

Rancang bangun bobot kartesian tiga axis untuk penyiraman tanaman yang akurat dan efisien

Niam Tamami¹, Hendhi Hermawan², Nofria Hanafi³, Madyono⁴,
Galang Perdana⁵, Farhan Ramadhan⁶

e-mail: niam@pens.ac.id, hendhi@pens.ac.id, hanafi@pens.ac.id, madyono@pens.ac.id,
galangperdana66@gmail.com, frhnrmdhn339@gmail.com

^{1,2,4}Dosen Departemen Teknik Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Indonesia

³Dosen Departemen Teknik Mekanika Energi, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Indonesia

^{5,6}Mahasiswa Departemen Teknik Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diterima 15 Agustus 2022

Direvisi 20 Oktober 2022

Diterbitkan 28 Oktober 2022

Kata kunci:

Robot Kartesian
Kontrol *fuzzy*
Kontrol penyiraman

Keywords:

Cartesian robot
Fuzzy controller
Watering control

ABSTRAK

Untuk menunjang lahan pertanian yang subur, diperlukan proses penyiraman agar kadar air dalam tanah tetap terjaga. Kegiatan penyiraman yang dilakukan secara manual membutuhkan banyak energi. Selain itu kadar air yang diberikan dengan penyiraman manual tidak dapat terukur secara akurat. Dalam makalah ini, kami mengusulkan penyiraman otomatis dengan robot kartesian tiga aksis untuk lahan dengan ukuran 3 meter x 1.5 meter dengan 171 titik tanam. Kontrol penyiraman berbasis *fuzzy* agar kadar air yang diberikan bisa akurat. Sebelum penyiraman, rata-rata kelembapan tanah pada lahan tersebut adalah 45.28% dengan nilai minimal 40%, nilai maksimal 50%. Target kelembapan tanah untuk setiap titik adalah 60%. Robot dapat menyiram seluruh titik tanam tanpa campur tangan manusia. Nilai kadar air rata-rata setelah penyiraman adalah 62.10%, dengan nilai minimal 60%, nilai maksimal 65%. Selain itu, juga telah dibandingkan mekanisme penyiraman dengan metode *fuzzy* dengan metode *on-off*, metode *fuzzy* mampu menghasilkan penyiraman yang lebih akurat dengan tingkat kesalahan rata-rata 2.10%, sedangkan metode *on-off* memiliki tingkat kesalahan rata-rata 5.32% terhadap target nilai kelembapan tanah. Metode *fuzzy* juga lebih efisien waktu dalam penyiraman yaitu 7 detik hingga 8 detik, sedangkan metode *on-off* membutuhkan waktu penyiraman 10 detik hingga 15 detik.

ABSTRACT

To support fertile agricultural land, a watering process is needed so that the water content in the soil is maintained. Watering activities carried out manually require a lot of energy. In addition, the water content given by manual watering cannot be measured accurately. In this paper, we propose automatic watering with a three-axis Cartesian robot for land with a size of 3 meters x 1.5 meters with 171 planting points. Fuzzy based watering control so that the water content given can be accurate. Before watering, the average soil moisture on the land was 45.28% with a minimum value of 40%, a maximum value of 50%. The target soil moisture for each point is 60%. The robot can water the entire planting point without human intervention. The average water content value of watering is 62.10%, with a minimum value of 60%, a maximum value of 65%. In addition, also compared with the application error with the fuzzy method with the on-off method, the fuzzy method is able to produce more accurate watering with an average error rate of 2.10%, while the on-off method has an average error of 5.32% against the soil moisture target. The fuzzy method is also more time efficient in watering, which is 7 seconds to 8

seconds, while the on-off method requires a watering time of 10 seconds to 15 seconds.

Penulis Korespondensi:

Niam Tamami,
Departemen Teknik Elektro,
Politeknik Elektronika Negeri Surabaya,
Jl. Raya ITS Sukolilo Kampus PENS, Surabaya, Jawa Timur, Indonesia.
Email: niam@pens.ac.id

1. PENDAHULUAN

Kadar air tanah merupakan banyaknya kandungan air yang terkandung di dalam tanah. Kelembaban tanah pada suatu lahan sangat dipengaruhi oleh besarnya tingkat kadar air di dalam tanah. Kelembaban tanah yang cukup adalah syarat wajib untuk menghasilkan pertumbuhan tanaman yang ideal. Kelembaban tanah sendiri merupakan salah satu faktor utama dalam menentukan tingkat kekeringan dari suatu lahan. Semakin tinggi tingkat kelembaban tanah pada suatu lahan maka akan semakin kecil peluang terjadinya kekeringan pada lahan tersebut.

Bercocok taman pada zaman ini dianggap sebagai kegiatan sampingan yang banyak menguras waktu dan tenaga. Dalam bercocok tanam juga perlu memperhatikan kondisi tanaman setiap waktu agar tanaman tidak mati. Namun, dalam kenyataannya pada saat ini masyarakat luas banyak disibukkan oleh pekerjaan, sehingga waktu bercocok tanam pun semakin sedikit dan membuat tanaman yang telah ditanam menjadi tidak terurus hingga tanaman pun menjadi layu dan mati. Salah satu hal yang paling penting dalam merawat tanaman adalah memperhatikan kadar kelembaban tanah, karena kelembaban tanah adalah faktor yang menjadikan tanaman tumbuh dengan baik atau tidak.

Kini teknologi robotika telah banyak menunjang bidang pertanian. Dengan adanya teknologi robotika di bidang pertanian maka akan dapat meringankan tugas manusia. Berikut ini adalah beberapa penelitian mengenai robot pertanian yang dilakukan. Martini mengembangkan robot lengan 2 aksis untuk sistem penyiraman otomatis tanaman. Proses penyiraman dilakukan berdasarkan jadwal yang telah ditetapkan. Sensor kapasitif digunakan sebagai feedback untuk mengetahui tingkat kelembaban pada tanah. Robot ini telah mampu memberikan penyiraman yang akurat, dengan kebutuhan tingkat kelembaban tanah 60% [1]. Moraitis mengembangkan Robot cartesian 3 axis dengan deep learning untuk identifikasi dan deteksi tanaman, sistem irigasi dan penjadwalan berdasarkan tahap pertumbuhan tanaman, dan penyimpanan cloud. Dengan menggunakan metode Faster-RCNN robot mendapatkan nilai yang akurat dan presisi hingga 90% dan dapat mengetahui posisi tanaman selada dengan tepat [2]. Fiestas menganalisis dan mensimulasikan kinematika dengan hubungan antara gerak sendi PTP (point-to-point) dan kecepatan end-effector robot berdasarkan Jacobiano dan interpolator Cubic Spline untuk robot kartesian 3 aksis [3]. Yeshmukhametov mengembangkan model dan simulasi robot kartesian 3 axis dengan kemampuan untuk pemanenan tomat. Pada lengan aksis z, robot ini dilengkapi dengan lengan robot yang dapat bergerak bebas [4]. Kuantham mengembangkan Robot beroda penyiram tanaman yang dapat dikontrol menggunakan smartphone. Robot mampu menyemprotkan air ke tanaman dengan durasi waktu 0-90 menit dan dapat digunakan hingga 1600 m² [5]. Shiva mengembangkan Sistem robot dengan kecerdasan untuk menganalisis kondisi kesehatan tanaman. Tanaman diklasifikasikan sebagai baik atau buruk berdasarkan fitur, bentuk dan ukuran yang diperoleh [6]. Pak meneliti mengenai perbandingan pemilihan jalur robot beroda dalam sistem pertanian cerdas. Ada 3 metode yang dibandingkan yaitu Djikstra, A*, RRT. Dari percobaan yang dilakukan metode A* memberikan penyelesaian terbaik [7]. Kim mengembangkan robot beroda dengan kemampuan navigasi secara otomatis untuk memonitor kondisi tanaman pada perkebunan jagung. Robot ini dilengkapi 2 sensor LIDAR dan kamera sebagai sensor navigasi. Robot telah mampu memonitor kondisi tanaman jagung berdasarkan daunnya [8]. Gan mengembangkan mobile Robot dengan sistem navigasi menggunakan GPS, IMU, LiDAR dan juga kamera Kinect. Robot ini mampu menuju lokasi pohon jeruk tanpa campur tangan manusia [9].

Kassim mengembangkan Robot beroda penyemprot pestisida otomatis untuk sistem fertisasi cabai. Robot ini telah mampu berbelok menghindari halangan mengikuti alur robot yang telah ditentukan [10]. Husman mengembangkan delta robot unguq membasmi tanaman liar. Robot dapat melakukan pencabutan tanaman liar dengan rata – rata kesalahan posisi sebesar 0.9 mm [11]. Klani mengembangkan perencanaan jalur untuk robot terbang pada daerah persawahan dengan metode Expanded Gray Wolf Optimization. Metode ini mampu meningkatkan performa hasil dari Gray Wolf Optimization hingga 55% [12]. Xu mengembangkan Modular Agricultural Robotic System (MARS). Robot telah mampu mengikuti jalur yang ditentukan dengan akurasi hingga 15% [13]. Tahmasebi mengembangkan robot dikembangkan yang dapat mendeteksi gulma di antara tanaman budidaya dengan sensor warna dan menyemprotkan secara otomatis. Hasil pengujian di dalam dan di luar ruangan menunjukkan bahwa akurasi robot dalam mendeteksi gulma hijau dapat diterima meskipun menurun dalam pengujian di luar ruangan. Robot mendeteksi warna dari rumput liar yang tumbuh di sela – sela tumbuhan [14]. Reddy mengembangkan Robot 9DOF dengan Collision Detection. Dengan Inverse Kinematika robot dapat mencapai objek yang dituju dan menggunakan mengimplementasikan metode bounding box untuk menghindari adanya tabrakan [15].

Pada penelitian ini dikembangkan Robot Kartesian Tiga Aksis untuk penyiraman tanaman yang akurat dan efisien. Pada ujung lengan efektor dipasangkan sensor kelembapan tanah sebagai umpan balik dan penyemprot air. Metode *fuzzy* digunakan sebagai metode kontrol penyiraman air sehingga kelembapan tanah bisa diatur seakurat mungkin.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Sistem Keseluruhan

Gambar 1 (a) merupakan bentuk robot kartesian tiga aksis. Lahan yang dibuat berukuran 3.0 meter x 1.5 meter x 0.17 meter. Mekanisme pergerakan robot berdasarkan sumbu kartesian X, Y, Z. Jalur robot sumbu X menggunakan 2 buah profil aluminium ukuran 4 cm x 8 cm dengan panjang 3.0 meter. Jalur robot sumbu Y menggunakan aluminium profil dengan ukuran 4 cm x 12 cm dengan panjang 1.5 meter. Sistem penggerak sumbu X, Y dan Z robot menggunakan aktuator motor stepper. Pada sumbu Z, rentang naik turun lengan robot adalah 30 cm, sehingga memungkinkan digunakan untuk tanaman dengan tinggi maksimal 30 cm. Saat bergerak, lengan robot diangkat sehingga mampu menghindari tanaman. Gambar 1 (b) menunjukkan bentuk ujung lengan efektor. Pada bagian tersebut dipasangkan sensor kelembapan tanah dan penyemprot air.



(a)

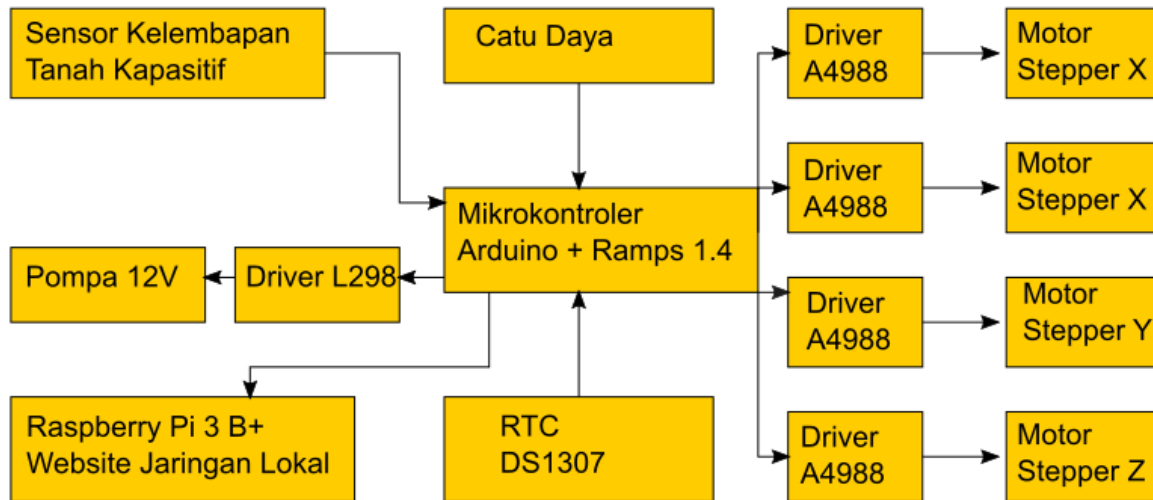
(b)

Gambar 1. Robot Kartesian Tiga Aksis (a), Ujung lengan efektor (b)

2.2 Perangkat Keras

Gambar 2 adalah blok diagram sistem dari robot. Pada penelitian ini, perangkat keras dirancang mampu melakukan gerakan pada tiga sumbu dan penyiraman tanaman. Sistem pergerakan robot menggunakan Arduino Mega 2560 sebagai mikrokontroler pemroses data. Pergerakan posisi

X, Y dan Z menggunakan motor stepper dengan rangkaian pengendali A4988 berdasarkan data pulsa pergerakan dari mikrokontroler. Sensor kelembapan tanah yang digunakan adalah sensor kelembapan tanah kapasitif. Sensor kelembapan tanah dapat ditancapkan pada lahan dengan perintah pergerakan naik turun pada sumbu Z, kemudian data kelembapan tanah dapat dibaca. Pada mikrokontroler, data sensor kelembapan tanah diolah dengan metode Fuzzy kemudian air disemprotkan dengan pompa DC 12V. RTC DS1307 digunakan sebagai perangkat pewaktu yang digunakan untuk penjadwalan penyiraman air. Raspberry Pi 3 B+ digunakan untuk antarmuka pengguna lewat website yang memunculkan data data dari robot seperti kelembapan tanah, posisi aktual robot, dan posisi tujuan pergerakan.



Gambar 2. Blok Diagram Sistem

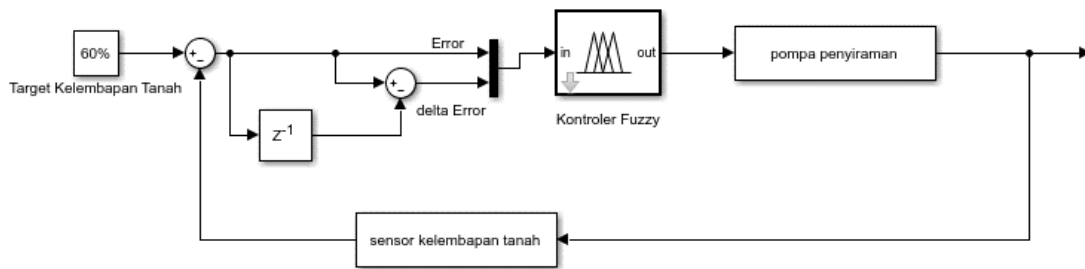
Motor stepper menggunakan motor stepper bipolar NEMA17. Mode motor yang digunakan adalah mode *full step* dimana pada setiap langkah motor memiliki putaran 1,8 derajat dari total 360 derajat. Untuk menjalankan motor, diperlukan rangkaian pengendali A4988. Rangkaian ini dapat mengontrol motor stepper dengan memanfaatkan dua pin yang terhubung ke mikrokontroler yaitu pin *Dir* yang digunakan untuk mengatur arah putaran motor dan pin *Step* yang digunakan untuk mengatur langkah motor.

Gambar 3 menunjukkan bentuk panel elektronik untuk kontroler robot. Panel elektronik yang digunakan berukuran panjang, lebar, dan kedalaman 28 cm x 21 cm x 10 cm yang masing-masing terbuat dari plastik. Di dalam panel terdapat catu daya AC 220 volt yang diambil dari jaringan PLN. Catu daya AC 220 volt akan mensuplai daya listrik untuk catu daya DC 5 volt untuk Arduino dan Raspberry Pi 3 B+.



Gambar 3. Panel Sistem Elektronik pada Robot

2.3 Desain Kontrol Logika Fuzzy



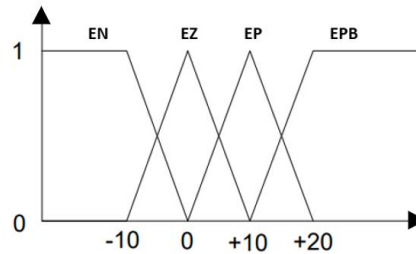
Gambar 4. Kontrol Penyiraman dengan *Fuzzy*

Gambar 4 menunjukkan blok kontrol penyiraman dengan *fuzzy*. Target kelembapan adalah 60%. Pada penelitian ini, mekanisme penyemprotan air dilakukan secara *close loop*. Terdapat dua masukan dan satu keluaran untuk *fuzzy*. Dua masukan terdiri dari error dan delta error sensor kelembapan tanah. Nilai error didapat dari selisih antara nilai target kelembapan tanah dan nilai pembacaan sensor kelembapan tanah. Sedangkan nilai delta error didapat dari selisih nilai error saat ini dengan nilai error sebelumnya. Nilai dari masing – masing masukan dibagi menjadi empat keanggotaan. Dari masing – masing empat keanggotaan tersebut dihasilkan 16 aturan / *rule*. Keluaran dari sistem *fuzzy* tersebut berupa besaran PWM untuk mengendalikan kecepatan dari pompa penyiraman.

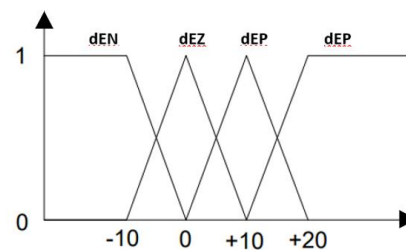
2.3.1 Fuzzifikasi

Pada tahap awal perancangan logika *fuzzy*, fuzzifikasi adalah proses pemetaan masukan ke dalam himpunan-himpunan *fuzzy* yang disajikan dalam bentuk fungsi keanggotaan. Tujuan dari fuzzifikasi adalah mendapatkan derajat keanggotaan dari hasil pemetaan masukan kedalam fungsi keanggotaan yang bersesuaian. Pada perancangan logika *fuzzy* ini menggunakan dua masukan yang terdiri dari error kelembapan tanah dan delta error kelembapan tanah. Fungsi keanggotaan error kelembapan tanah mempunyai empat variabel, yakni EN (Error Negatif), EZ (Error Zero), EP (Error

Positif), EPB (Error Positif Besar). Untuk fungsi keanggotaan delta error kelembaban tanah juga mempunyai empat variabel, yakni dEN (delta Error Negatif), dEZ (delta Error Zero), dEP (delta Error Positif), dEPB (delta Error Positif Besar). Tiap variabel memiliki *range* dengan selisih sebesar 10 hitungan. Gambar 5 dan 6 menunjukkan fungsi keanggotaan masukan error kelembaban tanah dan delta error kelembaban tanah.

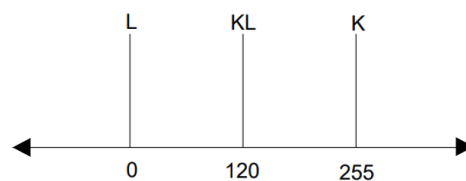


Gambar 5. Fungsi keanggotaan error kelembaban tanah



Gambar 6. Fungsi keanggotaan delta error kelembaban tanah

Keluaran pada logika *fuzzy* ini menggunakan model fungsi keanggotaan sugeno. Fungsi keanggotaan output dari logika *fuzzy* terdiri dari tiga himpunan, yaitu L (Lembab), KL (Kurang Lembab), dan K (Kering). Masing-masing memiliki nilai PWM yang berbeda pada tiap variabel sesuai pada Gambar 7.



Gambar 7. Fungsi keanggotaan PWM pompa

2.3.2 Aturan Fuzzy

Setelah membuat fungsi keanggotaan pada proses fuzzifikasi, selanjutnya menentukan aturan yang diterapkan pada logika *fuzzy*. Format aturan pada dasarnya merupakan pengontrol linguistik berisi aturan dalam format *IF-THEN*. Tetapi aturan dapat disajikan dalam format yang berbeda. Dalam sistem kali ini format disajikan seperti daftar di bawah ini.

Tabel 1. Aturan Fuzzy

Rule	Error	Delta Error	Output
1	EN	dEPB	L
2	EZ	dEPB	L
3	EN	dEP	L
4	EP	dEPB	KL
5	EZ	dEP	L
6	EN	dEPB	L
7	EPB	dEPB	K
8	EP	dEP	L
9	EZ	dEZ	L
10	EN	dEN	L

11	EPB	dEP	L
12	EP	dEZ	K
13	EZ	dEN	L
14	EPB	dEZ	K
15	EP	dEN	KL
16	EPB	dEN	K

2.3.3 Defuzzifikasi

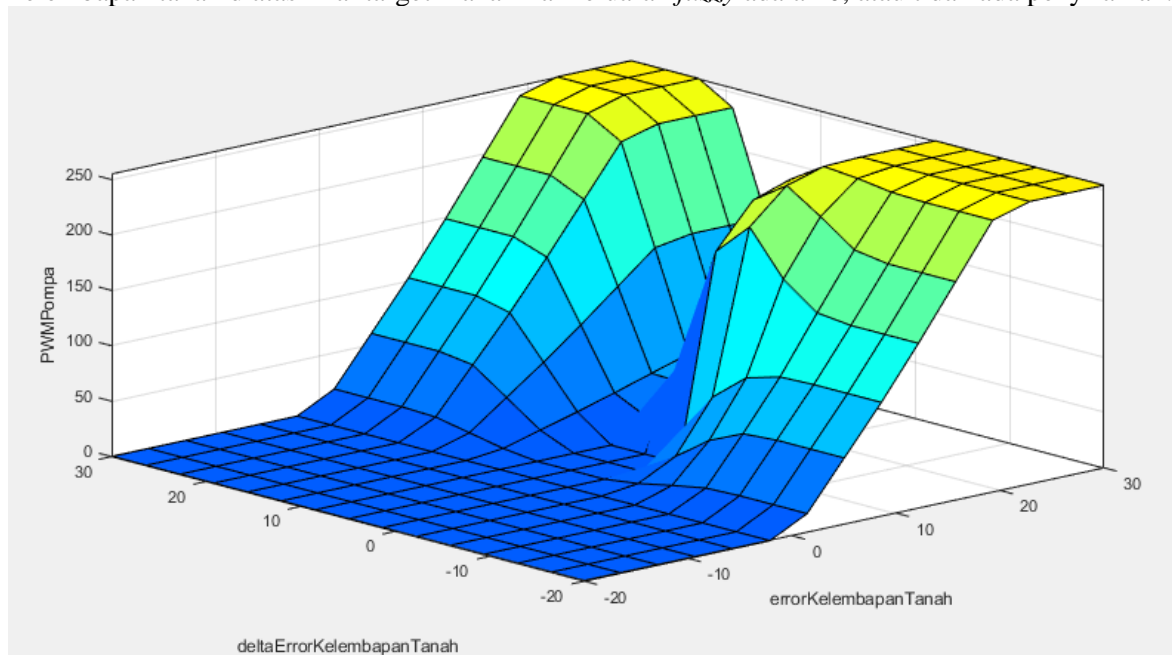
Proses terakhir pada perancangan logika *fuzzy* adalah defuzzifikasi. Defuzzifikasi adalah proses untuk mendapatkan satu bilangan dari keluaran himpunan *fuzzy*. Pada sistem kali ini defuzzifikasi dilakukan dengan metode WA (*Weighted Average*). Untuk proses defuzzifikasi dengan metode WA dapat dilakukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$y = \frac{\sum \mu(y)y}{\sum \mu(y)} \tag{1}$$

Dimana y adalah nilai *crisp* dan $\mu(y)$ adalah derajat keanggotaan y .

2.3.4 Simulasi Fuzzy

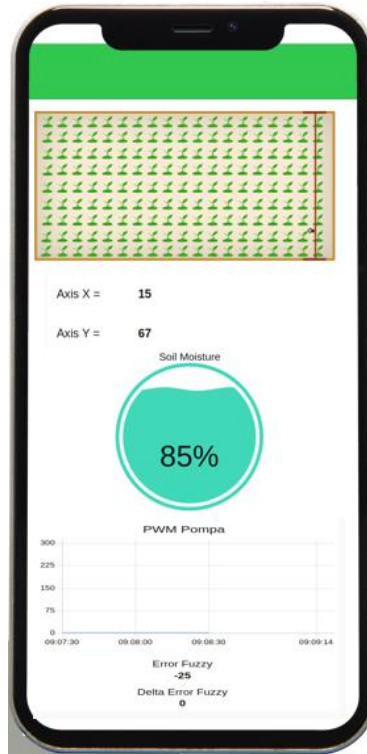
Untuk melihat hasil implementasi aturan *fuzzy* terhadap masukan-masukannya, berikut ini adalah hasil permukaan *fuzzy* (*fuzzy surface*). Permukaan *fuzzy* menunjukkan berapa nilai keluaran dari tiap kombinasi masukan dari *fuzzy*. Dari gambar 8 dapat dilihat bahwa saat nilai kelembapan tanah dibawah nilai target (error positif pada errorKelembapanTanah), maka keluaran dari *fuzzy* menghasilkan nilai PWM motor yang sebanding dengan nilai kesalahan (error). Sedangkan saat nilai kelembapan tanah diatas nilai target maka nilai keluaran *fuzzy* adalah 0, atau tidak ada penyiraman.



Gambar 8. Hasil simulasi permukaan *fuzzy*

2.4 Antarmuka Sistem

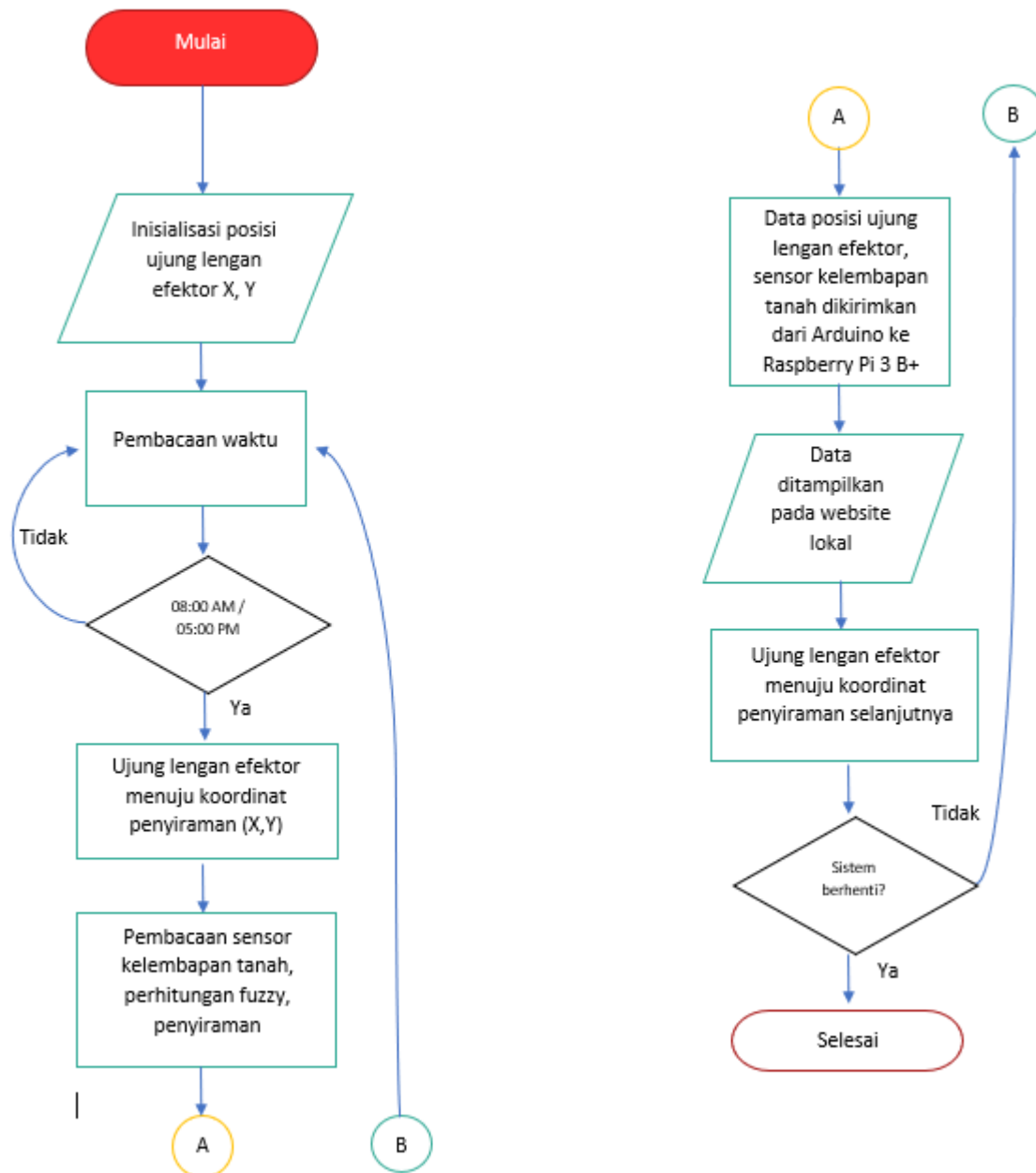
Gambar 9 menunjukan antarmuka untuk pengguna robot. Terdapat 3 paramter yang muncul pada antarmuka robot yaitu posisi X,Y ujung lengan efektor, tingkat kelembapan tanah, dan hasil perhitungan *fuzzy*. Untuk memudahkan pengguna, antarmuka dapat diakses pada jaringan lokal berbasis website. Untuk mengakses antarmuka, dapat digunakan smartphone maupun komputer tanpa perlu melakukan instalasi aplikasi tambahan. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, Raspberry Pi 3 B+ digunakan sebagai server penyimpan website untuk tampilan antarmuka pengguna robot.



Gambar 9. Tampilan Antarmuka

2.5 Algoritma Sistem

Gambar 10 menunjukkan diagram alir dari robot. Cara kerja sistem adalah saat sistem diaktifkan sistem akan mulai menginisialisasi posisi ujung lengan efektor (x, y) menuju titik (0,0). Ketika waktu pada RTC DS1307 menunjukkan pukul 08.00 AM atau 05.00 PM, robot akan mengatur ujung lengan efektor pada titik penyiraman pertama, kemudian robot akan menancapkan sensor kelembapan tanah ke dalam tanah. Mikrokontroler membaca data sensor kelembapan tanah. Pada mikrokontroler, data sensor kelembapan tanah akan diolah sehingga menghasilkan didapatkan nilai error dan delta error kelembapan tanah. Nilai error dan delta error kelembapan tanah digunakan sebagai masukan pada metode *fuzzy* untuk menentukan kecepatan putaran motor pompa untuk penyiraman tanaman. Kemudian data koordinat ujung lengan efektor, kelembapan tanah dikirimkan ke Raspberry Pi 3 B+ untuk ditampilkan di aplikasi antarmuka. Selanjutnya ujung lengan efektor menuju titik penyiraman selanjutnya. Proses diulang untuk seluruh titik penyiraman.

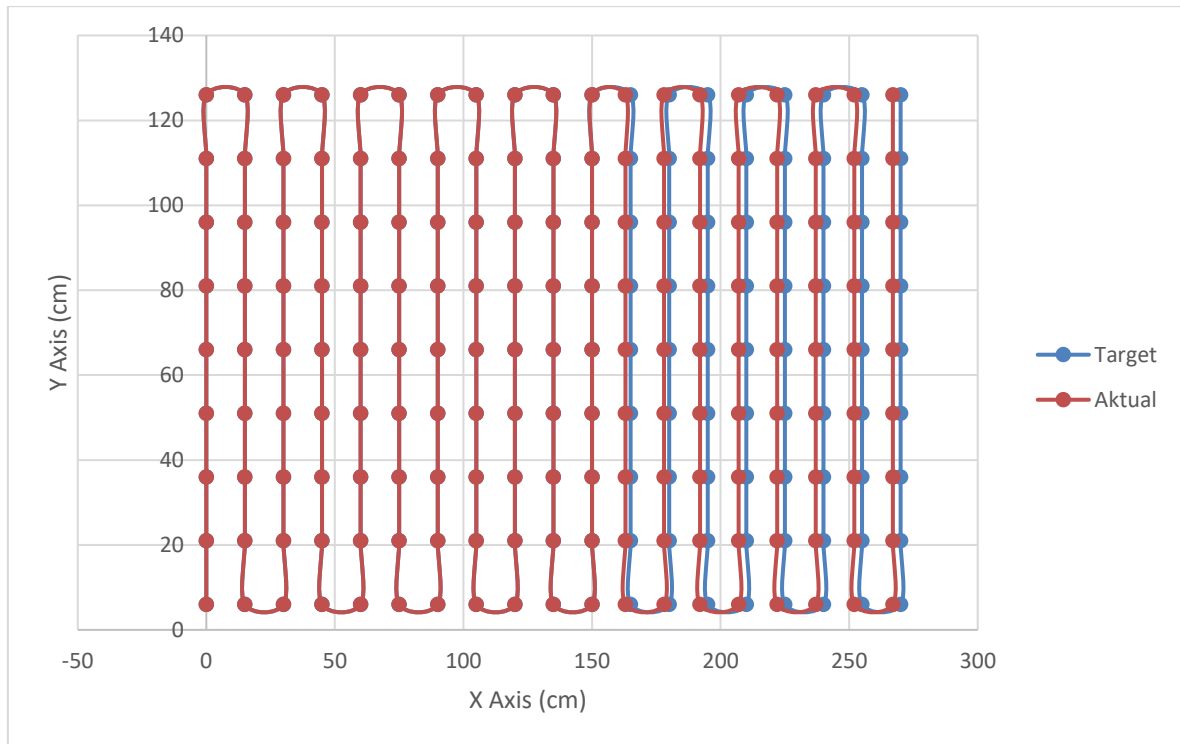


Gambar 10. Diagram Alir Sistem

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada pengujian pertama, pengujian dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi dari pergerakan robot. Gambar 11 ini adalah hasil pengujian dari perpindahan posisi ujung lengan efektor robot. Pada pengujian ini ujung lengan efektor diarahkan pada posisi tanaman budidaya. Penempatan tanaman budidaya diatur dengan jarak 15 cm dari tanaman lain. Dalam percobaan ini terdapat 171 titik penyiraman yang harus dituju oleh robot. Dari data percobaan dapat dilihat bahwa robot telah mampu bergerak menuju seluruh titik penyiraman, tetapi pada posisi tertentu akurasi pergerakan robot turun. Saat koordinat X robot lebih besar dari 150 cm, terjadi selisih pergerakan antara posisi target dengan posisi aktual. Terjadi selisih 3 cm antara posisi target dan posisi aktual pada rentang nilai X = 165 cm hingga 265 cm. Kesalahan ini terjadi karena selip roda dengan jalur robot pada titik X = 163 akibat kurang sempurnanya jalur robot. Kesalahan ini masih masuk batas toleransi karena luasan untuk titik tanam adalah 15 cm x 15 cm dengan pergeserannya hanya 3 cm untuk penyiraman

air. Masalah ini telah dapat diatasi dengan adanya sensor limit switch pada posisi $X = 0$ dan $X = 300$ sebagai pengatur ulang nilai posisi dari robot.



Gambar 11. Respon Pergerakan Robot

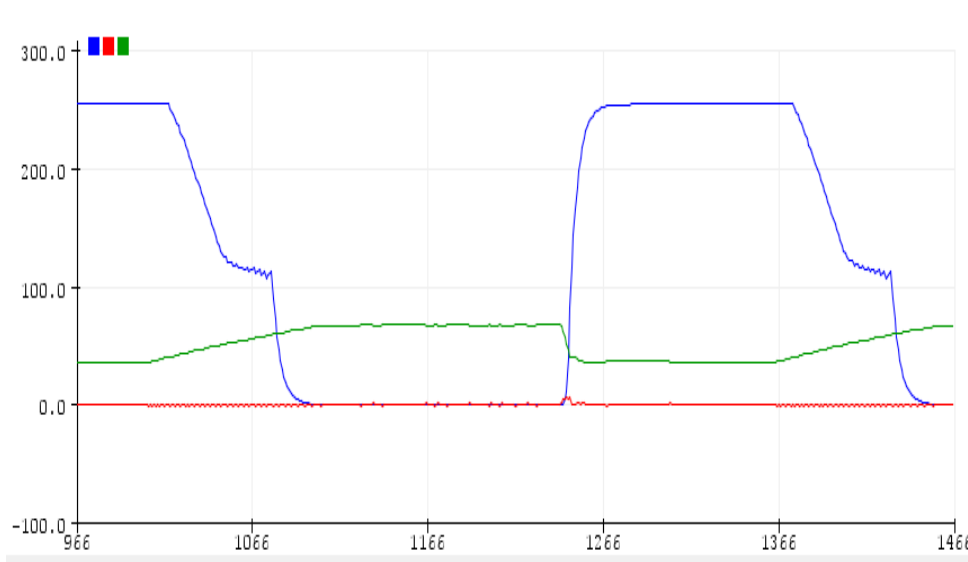
Pada pengujian kedua adalah pengukuran tingkat akurasi dari sensor kelembapan tanah pada ujung lengan efektor robot. Pengukuran tingkat akurasi pada sensor kelembapan tanah dilakukan dengan membandingkan pembacaan alat ukur standar kelembapan tanah dengan hasil pembacaan sensor. Pada pengujian ini disediakan 9 sampel tanah dengan kelembapan air yang berbeda-beda. Dari data tabel 2 diketahui bahwa nilai yang terbaca oleh sensor kelembapan hampir mendekati nilai yang terbaca oleh alat ukur, dimana nilai error dari pembacaan sensor dan alat ukur yaitu 0.46% sampai dengan 4.5%. Dari pengujian tersebut dapat diketahui bahwa sensor kelembapan yang digunakan akurat dengan rata-rata error sebesar 1,98%.

Tabel 2. Hasil Pengujian Sensor Kelembapan Tanah

No.	Kelembaban (%)		Error (%)
	Alat Ukur	Sensor	
1	15.3	16	4,5
2	21.7	22	1,3
3	34.1	33	3,2
4	41.8	41	1,9
5	52.4	51	2,6
6	64.7	65	0,4
7	70.7	71	0,4
8	80.2	82	2,2
9	91.7	93	1,4

Pada pengujian ketiga adalah pengujian respon kontrol *fuzzy* pada satu titik posisi tanam. Gambar 12 menunjukkan grafik respon kontrol penyiraman tanaman untuk sampel 1 titik posisi tanam. Target kelembapan tanah yang diinginkan adalah 60%. Hijau adalah respon nilai kelembapan tanah,

sedangkan biru adalah nilai PWM hasil perhitungan dari Fuzzy. Pada awalnya, nilai kelembapan tanah sebelum ada penyiraman adalah 42%. Kemudian mikrokontroler membaca sensor kelembapan tanah, mendapatkan nilai error, kemudian masuk ke sistem blok kontrol *fuzzy*. Dari blok tersebut dihasilkan perhitungan nilai PWM yang digunakan untuk mengatur kecepatan pompa penyiraman air. Biru adalah nilai PWM dari pompa penyiraman air. Setelah dilakukan penyiraman, kelembapan tanah naik menjadi 62.5%, masih terdapat sedikit selisih 2.5% dari target.



Gambar 12. Respon Fuzzy untuk kontrol kelembapan tanah

Pengujian keempat adalah pengujian integrasi seluruh sistem. Pada pengujian ini bertujuan apakah robot telah mampu melakukan penyiraman dengan efisien dan akurat pada 171 titik posisi tanam. Pada percobaan ini, digunakan metode *fuzzy* sebagai metode yang diusulkan. Gambar 13 menampilkan kondisi kelembapan tanah pada seluruh titik tanam sebelum dilakukan penyiraman air. Nilai kelembapan tanah sebelum penyiraman berkisar 40% hingga 50% dengan rata-rata 45.28%. Target kelembapan tanah setelah penyiraman adalah 60%. Gambar 14 menunjukkan kondisi lahan setelah terjadi proses penyiraman, kadar air tanah meningkat dengan kisaran nilai dari 60% hingga 65% dengan rata-rata 62.10%. Lama waktu yang dibutuhkan untuk menyiram 1 tanaman berkisar 7 hingga 8 detik. Pengujian penyiraman juga telah kami lakukan pada tanaman yang sudah berkembang. Pada saat tanaman telah berkembang, bagian daun tersentuh lengan robot, namun tidak menghalangi pengambilan data sensor kelembapan tanah dan penyiraman.

44	42	50	45	45	48	47	43	42	47	49	45	42	48	49	42	46	46	43
50	49	40	47	44	48	42	43	47	43	49	42	44	45	42	47	45	46	43
42	45	41	42	46	47	44	49	47	49	42	47	50	48	42	49	42	46	46
45	40	40	45	45	46	43	48	49	45	47	43	46	43	43	50	43	44	44
50	43	49	43	49	44	44	44	43	42	43	48	42	42	46	45	42	49	43
48	49	44	47	47	49	42	44	44	44	48	44	46	47	44	40	46	42	48
47	44	40	46	47	47	48	50	46	50	45	50	49	47	48	41	46	43	44
46	45	40	42	47	49	46	44	46	45	43	42	47	43	42	44	49	49	50
47	43	46	45	42	47	44	49	43	50	42	44	47	42	48	46	46	48	42

Gambar 13. Kondisi kelembapan tanah sebelum penyiraman dengan metode *fuzzy*

63	61	62	65	61	61	62	60	65	62	65	60	63	60	61	60	64	65	60
61	61	62	65	60	60	64	62	60	63	60	62	62	64	60	61	62	61	62
61	62	61	61	61	65	60	65	65	65	65	64	65	61	61	60	60	60	62
61	63	60	61	61	62	63	63	65	62	62	65	62	65	63	61	61	60	60
61	63	61	60	60	63	64	62	65	63	65	63	64	60	64	61	64	61	61
63	65	63	61	61	60	61	62	64	60	65	63	60	60	64	60	63	61	62
62	63	63	60	61	64	65	64	65	60	65	65	61	62	65	62	64	60	62
61	60	62	60	62	65	60	64	63	60	61	64	61	65	60	62	63	60	63
61	62	60	61	60	63	62	60	64	60	60	61	65	60	60	64	65	62	62

Gambar 14. Kondisi kelembapan tanah setelah penyiraman dengan metode *fuzzy*

Pengujian kelima adalah pengujian penyiraman tanaman dengan metode *on-off*. Pengujian ini dilakukan untuk membandingkan kinerja dari penyiraman tanaman dengan metode *fuzzy*. Pada pengujian ini bertujuan apakah robot telah mampu melakukan penyiraman dengan efisien dan akurat pada 171 titik posisi tanam. Gambar 15 menampilkan kondisi kelembapan tanah pada seluruh titik tanam sebelum dilakukan penyiraman air. Nilai kelembapan tanah sebelum penyiraman berkisar 40% hingga 42% dengan rata-rata 40.90%. Target kelembapan tanah setelah penyiraman adalah 60%. Gambar 16 menunjukkan kondisi lahan setelah terjadi proses penyiraman, kadar air tanah meningkat dengan kisaran nilai dari 63% hingga 67% dengan rata-rata 65.32%. Lama waktu yang dibutuhkan untuk menyiram 1 tanaman berkisar 10 hingga 15 detik.

41	41	42	40	42	42	42	40	40	41	42	40	40	41	40	40	41	40	42
41	40	41	42	40	42	42	40	40	41	41	42	41	40	40	41	40	41	41
41	41	40	41	41	42	40	41	41	42	41	41	42	40	40	40	41	41	41
42	42	40	42	41	40	40	42	41	40	40	40	41	42	41	42	40	42	42
41	42	41	41	41	40	40	41	40	40	42	40	42	41	40	41	42	40	41
42	42	41	41	41	42	42	42	40	42	40	40	41	41	40	41	40	41	40
40	41	41	40	41	41	40	40	41	42	41	41	42	40	40	40	40	41	42
41	40	40	41	40	41	42	41	42	41	40	40	40	42	41	40	42	42	42
40	42	42	41	40	42	40	41	40	42	41	40	41	41	41	41	41	41	41

Gambar 15. Kondisi kelembapan tanah sebelum penyiraman dengan metode *on-off*

67	65	67	64	67	66	65	63	66	64	65	67	63	65	65	66	65	67	66
65	67	67	65	67	66	65	65	67	65	67	63	64	65	64	66	67	64	65
67	67	64	64	64	65	67	65	64	65	63	65	66	65	66	65	67	65	63
66	65	64	67	65	67	67	67	63	67	63	65	64	63	63	64	67	65	67
64	64	67	65	67	67	65	67	64	67	65	64	64	65	67	63	65	67	67
63	66	64	67	66	66	66	65	67	66	67	63	64	64	66	64	65	66	66
66	67	64	67	67	63	67	63	64	67	66	65	66	65	63	67	66	67	66
65	65	67	64	64	63	64	63	64	65	65	64	63	67	67	66	65	65	64
67	67	67	67	65	66	64	67	65	64	66	63	63	66	66	66	67	65	66

Gambar 16. Kondisi kelembapan tanah setelah penyiraman dengan metode *on-off*

Dari data percobaan, metode penyiraman dengan menggunakan *fuzzy* lebih akurat dibandingkan dengan metode penyiraman *on-off*. Dengan target kelembapan 60%, penyiraman dengan metode *fuzzy* mampu membuat kelembapan tanah berkisar pada nilai dari 60% hingga 65% dengan rata-rata 62.10%, sedangkan dengan metode *on-off* kisaran nilai kelembapan tanah adalah 63% hingga 67% dengan rata-rata 65.32%. Dalam hal efisiensi waktu penyiraman, penggunaan metode *fuzzy* mampu membuat waktu penyiraman jauh lebih singkat daripada metode *on-off*. Metode *fuzzy* memerlukan waktu 7 detik hingga 8 detik untuk penyiraman 1 tanaman, sedangkan metode *on-off* memerlukan waktu 10 detik hingga 15 detik. Hal ini dikarenakan dengan metode *fuzzy*, keluaran air dapat diatur dengan aturan *fuzzy* dengan sangat akurat dan efisien.

4. KESIMPULAN

Robot kartesian tiga aksis penyiram tanaman untuk lahan dengan ukuran 3 meter x 1.5 meter telah berhasil diimplementasikan. Robot ini telah mampu melakukan penyiraman pada seluruh titik tanam dengan jumlah total 171 titik. Kontrol penyiraman berbasis *fuzzy* diimplementasikan pada robot agar kadar air yang diberikan dapat akurat. Sebelum penyiraman, rata-rata kelembapan tanah pada lahan tersebut adalah 45.28% dengan nilai minimal 40%, nilai maksimal 50%. Target kelembapan tanah untuk setiap titik adalah 60%. Robot dapat menyiram seluruh titik tanam tanpa campur tangan manusia. Nilai kadar air rata-rata setelah penyiraman adalah 62.10%, dengan nilai minimal 60%, nilai maksimal 65%. Selain itu, juga telah dibandingkan mekanisme penyiraman dengan metode *fuzzy* dengan metode *on-off*, metode *fuzzy* mampu menghasilkan penyiraman yang lebih akurat dengan tingkat kesalahan rata-rata 2.10%, sedangkan metode *on-off* memiliki tingkat kesalahan rata-rata 5.32% terhadap target nilai kelembapan tanah. Metode *fuzzy* juga lebih efisien waktu dalam penyiraman yaitu 7 detik hingga 8 detik, sedangkan metode *on-off* membutuhkan waktu penyiraman 10 detik hingga 15 detik.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini merupakan penelitian yang didanai oleh Direktorat Jenderal Pendidikan Vokasi dengan skema Penelitian Dosen Pemula 2022. Ucapan terima kasih diberikan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya atas kesempatan yang diberikan. Semoga penelitian ini membawa kemanfaatan untuk Politeknik Elektronika Negeri Surabaya.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Martini, Ni Putu Devira Ayu, Niam Tamami, and Ali Husein Alasiry. "Design and Development of Automatic Plant Robots with Scheduling System." 2020 International Electronics Symposium (IES). IEEE, 2020.
- [2] Moraitis, Michail, Konstantinos Vaiopoulos, and Athanasios T. Balafoutis. "Design and Implementation of an Urban Farming Robot." *Micromachines* 13.2 (2022): 250.
- [3] Erick, M., et al. "Modeling and simulation of kinematics and trajectory planning of a farmbot Cartesian robot." 2018 IEEE XXV International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON). IEEE, 2018.
- [4] Yeshmukhametov, Azamat, et al. "Designing of CNC based agricultural robot with a novel tomato harvesting continuum manipulator tool." *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research* 9.6 (2020): 876-881.
- [5] Khuantham, Chatchai, and Arkira Sonthitham. "Spraying robot controlled by application smartphone for pepper farm." 2020 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI). IEEE, 2020.

-
- [6] Shiva, R., G. Vimal, and M. Kaviyarasu. "Intelligent Farming using Delta Robot." 2020 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS). IEEE, 2020.
 - [7] Pak, Jeonghyeon, et al. "Field Evaluation of Path-Planning Algorithms for Autonomous Mobile Robot in Smart Farms." *IEEE Access* (2022).
 - [8] Kim, Kitae, Aarya Deb, and David J. Cappelleri. "P-AgBot: In-Row & Under-Canopy Agricultural Robot for Monitoring and Physical Sampling." *IEEE Robotics and Automation Letters* 7.3 (2022): 7942-7949.
 - [9] Gan, H., and W. S. Lee. "Development of a navigation system for a smart farm." *IFAC-PapersOnLine* 51.17 (2018): 1-4.
 - [10] Kassim, A. M., et al. "Design and development of autonomous pesticide sprayer robot for fertigation farm." *International Journal of Advanced Computer Science and Applications* 11.2 (2020).
 - [11] Hussmann, Stephan, et al. "Development and evaluation of a low-cost delta robot system for weed control applications in organic farming." 2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). IEEE, 2019.
 - [12] Kiani, Farzad, et al. "Adaptive metaheuristic-based methods for autonomous robot path planning: Sustainable agricultural applications." *Applied Sciences* 12.3 (2022): 943.
 - [13] Xu, Rui, and Changying Li. "A modular agricultural robotic system (MARS) for precision farming: Concept and implementation." *Journal of Field Robotics* 39.4 (2022): 387-409.
 - [14] Tahmasebi, Mona, Mohammad Gohari, and Alireza Emami. "An Autonomous Pesticide Sprayer Robot with a Color-based Vision System." *International Journal of Robotics and Control Systems* 2.1 (2022): 115-123.
 - [15] Sridhar Reddy, Abbireddy, V. V. M. J. Satish Chembuly, and V. V. S. Kesava Rao. "Collision-free inverse kinematics of redundant manipulator for agricultural applications through optimization techniques." *International Journal of Engineering* 35.7 (2022): 1343-1354.