

KOMPARASI PERFORMANSI ANTARA PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE CONTROLLER (PID) DAN FUZZY LOGIC CONTROLLER (FLC) PADA PENJEJAK CAHAYA DENGAN TIGA SENSOR

Doni Gunawan^{*1)}, Yuwaldi Away²⁾, Ira Devi Sara²⁾, Andri Novandri²⁾

¹⁾Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Ubudiyah Indonesia, Banda Aceh, Indonesia

²⁾Jurusan Teknik Elektro dan Komputer, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh, Indonesia

e-mail: benzena.dny@gmail.com, yuwaldi@gmail.com, ira.sara@unsyiah.ac.id, andrie.nov11@gmail.com

Diterima: 1 Juni 2021 – Direvisi: 3 Februari 2022 – Disetujui: 9 Februari 2022

ABSTRACT

The technology of light tracking monitors the solar panels to track the sun with full efficiency, and the solar panels can be upright to the sunlight in order to maximize the absorption of solar energy, so this system has a higher efficiency than non-tracking systems. This study aimed to obtain a controller that works accurately between the Proportional, Integral, and Derivative Controller (PID) and the Fuzzy Logic Controller (FLC) Algorithm by comparing the performance of the two algorithms in regulating the direction of the light tracker to detect the presence of sunlight. This solar prototype uses nine lamps as a simulation to determine the accuracy and precision of the angles of the two light trackers. The parameters compared in this test were the aspects of angular velocity and angle accuracy. The mean value of angular velocity obtained from the PID light tracking test results was 0.16 rad/s and the average linear velocity was 0.092 m/s whereas in the FLC light tracker, the average angular velocity value was 0.207 rad/s. Tests using a PID light tracker resulted in an X-axis accuracy of 45% and a Y-axis accuracy of 30%. The FLC light tracker, on the other hand, had an X-axis accuracy of 80% and a Y-axis accuracy of 30%. The precision value obtained by the PID light tracker on the X axis was 45% and the Y axis was 38%, while the precision value obtained by the FLC light tracker on the X axis was 71% and the Y axis was 33%. Based on the overall calculations, it can be concluded that the FLC light tracker has an increase in the speed value of 29% and an increase in the value of accuracy in the accuracy aspect by 35% and the precision aspect by 26% compared to the PID light tracker in previous studies.

Keywords: FLC, Light Tracking, PID.

ABSTRAK

Teknologi penjejak cahaya memantau agar panel surya dapat melacak matahari dengan efisiensi penuh dan panel surya dapat tegak lurus dengan cahaya matahari untuk memaksimalkan penyerapan energi surya, sehingga sistem ini mempunyai efisiensi lebih tinggi dari sistem nontracking. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan kontroler yang bekerja dengan akurat antara Algoritma Proportional, Integral, Derivatif controller (PID) dan algoritma Fuzzy Logic Controller (FLC) dengan cara membandingkan kinerja kedua algoritma dalam mengatur arah penjejak cahaya mendeteksi keberadaan cahaya matahari. Prototipe matahari penelitian ini menggunakan 9 buah lampu sebagai simulasi untuk mengetahui keakuratan dan kepresisian sudut dari kedua penjejak cahaya. Parameter yang dibandingkan dalam pengujian ini adalah aspek kecepatan sudut dan ketepatan sudut. Nilai rata-rata kecepatan sudut yang diperoleh dari hasil pengujian penjejak cahaya PID sebesar 0,16 rad/s sedangkan pada penjejak cahaya FLC sebesar 0,207 rad/s. Pengujian menggunakan penjejak cahaya PID menghasilkan nilai akurasi sumbu X sebesar 45% dan akurasi sumbu Y sebesar 30% sedangkan pada penjejak cahaya FLC menghasilkan nilai akurasi sumbu X sebesar 80% dan akurasi sumbu Y sebesar 30%. Nilai presisi yang diperoleh penjejak cahaya PID pada sumbu X sebesar 45% dan sumbu Y sebesar 38%, sedangkan nilai presisi yang diperoleh penjejak cahaya FLC pada sumbu X sebesar 71% dan sumbu Y sebesar 33%. Berdasarkan perhitungan keseluruhan yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa penjejak cahaya FLC memiliki peningkatan nilai kecepatan sebesar 29% dan peningkatan nilai ketepatan pada aspek akurasi sebesar 35% serta aspek presisi sebesar 26% dari penjejak cahaya PID pada penelitian terdahulu.

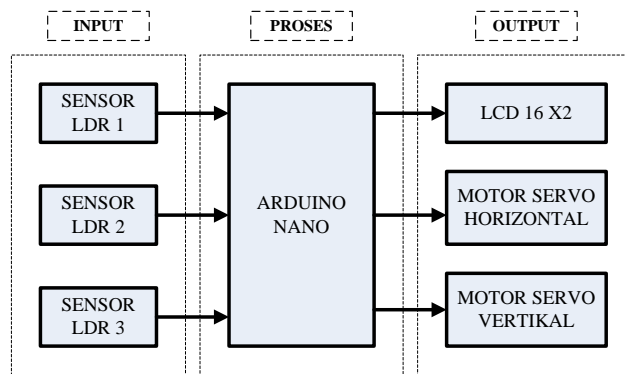
Kata Kunci: FLC, Penjejak Cahaya, PID.

I. PENDAHULUAN

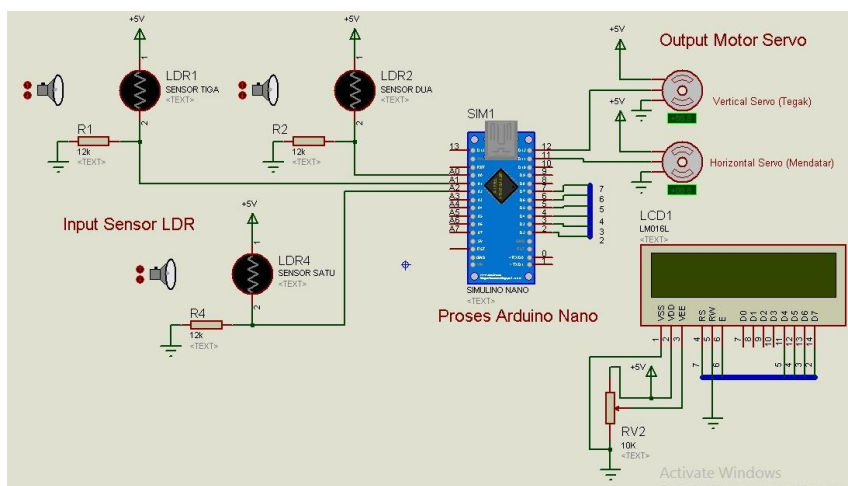
TEKNOLOGI penjejak cahaya merupakan sebuah sistem yang berfungsi untuk menggerakkan panel surya untuk mengikuti arah cahaya matahari dengan efisiensi penuh untuk memungkinkan sinar matahari tegak lurus dengan panel surya. Penjejak cahaya bekerja mengikuti pergerakan cahaya berdasarkan intensitas cahaya yang diterima. Semakin tegak panel surya dengan matahari, maka penyerapan energi listrik terhadap panel surya akan semakin maksimal. Oleh karena itu, sangat diperlukan sebuah penjejak cahaya yang dapat bekerja dengan baik. Sistem penjejak cahaya menggunakan *tracking* mempunyai efisiensi yang meningkat dibandingkan dengan sistem *nontracking*. Penjejak cahaya menggunakan *tracking*, memanfaatkan minimum sistem sebagai pemroses dan kontroler, sensor cahaya sebagai pendeteksi arah sumber cahaya dan motor sebagai *actuator*, sehingga penjejak cahaya dapat bergerak secara otomatis saat mengikuti cahaya matahari. Dengan teknologi tersebut, maka potensi penyerapan energi surya dapat dimaksimalkan dengan baik. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan kontroler yang bekerja dengan akurat antara algoritma *Proportional, Integral, Derivatif controller (PID)* dan algoritma *Fuzzy Logic Controller (FLC)* dengan cara membandingkan kinerja kedua algoritma dalam mengatur arah penjejak cahaya mendeteksi keberadaan cahaya matahari.

Penelitian mengenai penjejak cahaya telah ada sebelumnya menggunakan algoritma PID [1]. Fokus penelitian tersebut adalah mengkaji tingkat ketepatan dan kecepatan penjejak cahaya untuk meningkatkan pemanfaatan energi yang dihasilkan oleh panel surya. Namun, hasil dari penjejak cahaya tersebut kurang memuaskan karena tingkat akurasi dan presisi masih belum maksimal. Selanjutnya, terdapat kajian yang membahas penerapan algoritma Fuzzy pada penjejak cahaya [2] dengan fokus penelitian yaitu mengamati pengaruh algoritma Fuzzy terhadap penjejak cahaya. Penelitian mengenai perbandingan dua buah penjejak cahaya yang menggunakan algoritma PID dan Fuzzy [3] juga terdapat pada penelitian selanjutnya, akan tetapi Penelitian tersebut lebih fokus kepada perbandingan daya listrik yang dihasilkan oleh masing-masing PV. Penelitian yang lain yaitu tentang perbandingan *solar tracker* menggunakan PID dan FLC juga, akan tetapi aktuator yang digunakan adalah *single axis* dan menggunakan algoritma *type 2 fuzzy Logic Controller* [4], [5]. Penelitian tentang *solar tracker* menggunakan *controller fuzzy* juga diterapkan pada penelitian lain dengan menggunakan Teknik FPGA dan *Particle Swarm Optimization* untuk peningkatan *tracking* [6]-[8]. Penelitian berikutnya membahas tentang pengembangan *solar tracker* dengan menggunakan logika fuzzy [9], [10]. Penelitian ini fokus pada pengembangan sistem *fuzzy* dengan menggunakan *Arduino uno* dan sistem *tracking* yang digunakan masih *single axis* sehingga hasil yang didapatkan juga masih belum maksimal. Diantara semua penelitian *sun tracker* dengan algoritma *fuzzy* diatas belum ada analisis yang lebih dalam tentang kecepatan sudut dan ketepatan sudut pada *sun tracker* tersebut. Padahal tingkat kecepatan dan ketepatan sudut pada penjejak cahaya sangat dibutuhkan untuk memaksimalkan penyerapan cahaya matahari sebagai energi listrik tenaga surya. Maka dari itu, diperlukan pengembangan pada penjejak cahaya yang diusulkan dengan membandingkan algoritma PID dan FLC pada aspek kecepatan sudut dan ketepatan sudut.

Penelitian yang diusulkan membahas tentang tingkat akurasi dan presisi pada penjejak cahaya menggunakan algoritma *Fuzzy Logic Controller (FLC)*. Data yang didapat dalam penelitian ini akan dibandingkan dengan data penjejak cahaya sebelumnya dengan menggunakan algoritma PID (*Proportional Integral Derivative*). Parameter yang dibandingkan antara penjejak cahaya PID dan penjejak cahaya FLC yaitu aspek kecepatan sudut dan kecepatan linear sebagai acuan untuk menentukan penjejak cahaya mana yang lebih cepat mengarahkan panel surya ke sumber cahaya. Kemudian aspek ketepatan sudut sebagai acuan untuk menentukan tingkat ketepatan masing-masing penjejak cahaya dengan mengukur akurasi dan presisi untuk melihat tingkat keakuratan kedua penjejak cahaya. Sejauh ini penjejak cahaya berbasis kontrol logika Fuzzy dari konfigurasi yang berbeda telah diimplementasikan pada mikrokontroler PIC, logika kontrol untuk penelitian ini diimplementasikan pada papan mikrokontroler sederhana *Arduino Uno* [11], [12]. Dalam penelitian lain [13], algoritma penjejak cahaya dirancang dan diterapkan pada *platform* eksperimental penjejak cahaya menggunakan kontrol tri-posisional. Dengan menggunakan nilai terukur untuk radiasi dari sensor dan memastikan aktuator bekerja dengan baik. Penjejak cahaya dengan algoritma FLC diharapkan mampu menghasilkan tingkat akurasi dan presisi yang lebih tinggi dibandingkan dengan penjejak cahaya terdahulu yang



Gambar 1. Blok Diagram Sistem Penjejak Cahaya



Gambar 2. Rangkaian Konfigurasi Sistem Penjejak Cahaya

menggunakan algoritma PID dan mampu menghasilkan tingkat kesalahan yang lebih rendah.

II. METODE PENELITIAN

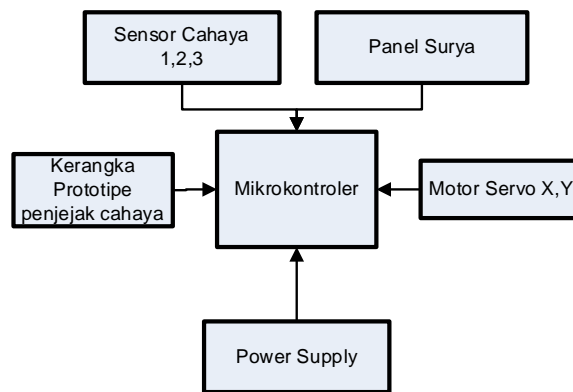
A. Desain Sistem Penjejak Cahaya

Sistem penjejak cahaya yang diusulkan terdapat sistem *hardware* dan sistem *software*. Sistem *hardware* adalah rancangan model dari penjejak cahaya berupa kerangka penjejak cahaya, sensor, *actuator* dan mikrokontroler. Sistem *software* adalah perancangan *listing program* yang dibuat dengan dengan Bahasa C dan dijalankan pada mikrokontroler *Arduino Nano* [14].

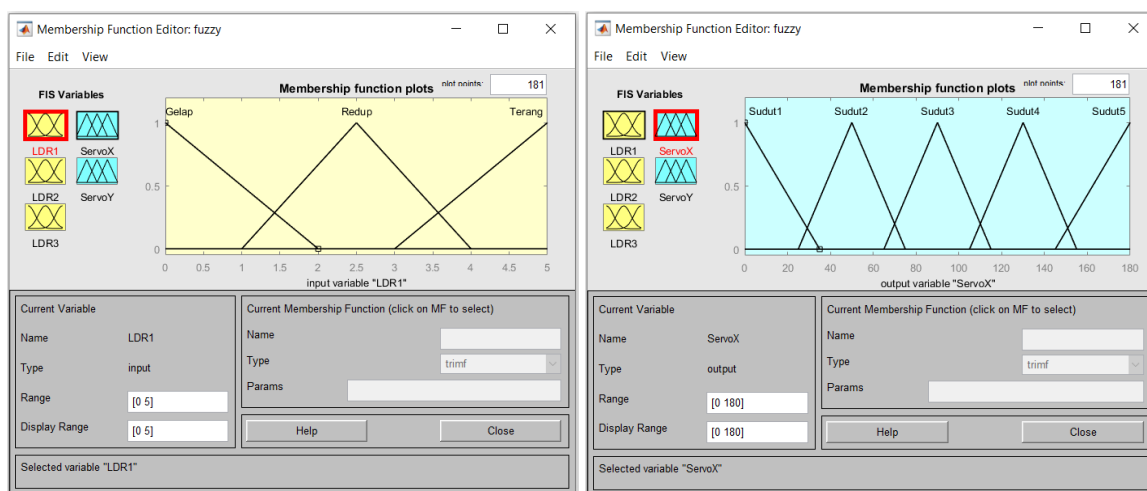
Input dari alat ini adalah sensor LDR yang berjumlah tiga sensor yang berfungsi untuk mendeteksi radiasi cahaya [18]. Alasannya menggunakan tiga buah sensor LDR karena masing-masing sensor memiliki fungsinya tersendiri. Sensor LDR 1 merupakan sensor acuan yang akan menentukan arah putaran motor nantinya. Sensor LDR 2 merupakan sensor yang bertanggung jawab untuk pergerakan motor pada sumbu X. Jika nilai pembacaan LDR 1 lebih besar dari LDR 2, maka motor berputar *clockwise* (CW), jika sebaliknya, motor berputar *counterclockwise* (CCW). Sensor 3 merupakan sensor yang bertanggung jawab untuk pergerakan motor pada sumbu Y. Jika pembacaan LDR 1 lebih besar dari LDR 3, maka motor berputar *clockwise* (CW), jika sebaliknya, motor berputar *counterclockwise* (CCW) [16], [17]. Hasil dari ketiga nilai sensor LDR diatas, diproses pada perangkat mikrokontroler dengan menggunakan kontroler sehingga menghasilkan *output* sesuai dengan hasil pemrograman. *Output* dari penjejak cahaya ini terdapat motor servo dan LCD. Motor servo ini berfungsi sebagai aktuator yang bisa bergerak CW dan CCW dari 0° sampai 180°.

B. Konfigurasi Sistem Penjejak Cahaya

Penjejak cahaya terdiri dari beberapa komponen yang digabung menjadi sebuah sistem [15]. Mikrokontroler *Arduino nano* adalah perangkat utama pada penjejak cahaya yang berfungsi untuk mengontrol semua komponen pelengkap yaitu sensor cahaya LDR, *power supply*, LCD dan *motor servo*. Ketika sensor menerima data masukan, maka data tersebut diterima oleh mikrokontroler dan



Gambar 3. Struktur *Hardware* Penjejak Cahaya



Gambar 4. Membership input dan output FLC

ditampilkan pada LCD. Kemudian data itu diolah oleh mikrokontroler sesuai dengan program perintah untuk menggerakkan aktuator yaitu *motor servo* X dan Y. *Motor servo* ini akan mengarahkan panel surya kearah tepat dengan cahaya.

Cara kerja *Penjejak cahaya* ini yaitu pertama akan melakukan kalibrasi sudut ketika penjejak cahaya diaktifkan. Setelah itu secara otomatis sensor cahaya mendeteksi cahaya matahari dengan menampilkan nilai sensor pada LCD, kemudian nilai dari sensor tersebut dikontrol oleh mikrokontroler dan melakukan perintah terhadap *motor servo* X dan Y untuk menggerakkan panel surya kearah tepat dengan cahaya matahari. Pergerakan penjejak cahaya akan berubah secara otomatis ketika cahaya bergerak.

C. Rancangan Prototipe Penjejak Cahaya

Hasil Pembuatan *prototipe* penjejak cahaya sangat diperlukan dalam penelitian ini untuk memudahkan proses penelitian. Pada Gambar 3 terdapat beberapa tahap pembuatan *prototipe* penjejak cahaya tersebut.

Setelah dilakukan perakitan kerangka penjejak cahaya, tahap selanjutnya yaitu perakitan sistem elektrik pada penjejak cahaya yaitu menghubungkan mikrokontroler *arduino nano* dengan komponen pendukung seperti sensor cahaya, panel surya, *power supply* dan *motor servo*.

D. Rancangan FLC

Sistem ini menggunakan tiga sensor LDR (*Light Dependant Resistor*) yang berfungsi sebagai *input*. *Arduino nano* merupakan mikrokontroler yang berfungsi sebagai pengolahan data dan dua penggerak *motor servo* yang berfungsi sebagai aktuator (penggerak). Sistem ini juga dilengkapi *data logger* yang dapat mencatat semua data yang diperoleh selama sistem ini bekerja, seperti data intensitas cahaya, data tegangan, arus yang dihasilkan oleh panel surya dan data pergerakan *motor servo*. *Membership function* yang digunakan ada tiga, yaitu kurva *linear* naik, kurva segitiga dan kurva *linear* turun. Hal ini karena ada dua kondisi yang digunakan, yaitu fungsi naik dan fungsi turun.

Terdapat tiga *membership* pada *input* yaitu input gelap, redup dan terang. Pada *output* terdapat 5

TABEL 1
KONSTANTA PID

| Konstanta | Nilai |
|-----------|-------|
| Kp | 1,15 |
| Ki | 13,6 |
| Kd | 0,019 |

membership yaitu Sudut1, Sudut2, Sudut3, Sudut4, dan Sudut5.

E. Rancangan PID

Rancangan PID menerapkan tiga konstanta yang terdiri dari konstanta *proportional*, konstanta *integral* dan konstanta *derivative*. Ketiga konstanta tersebut diperoleh dari fungsi *transfer* dengan menggunakan Persamaan 1.

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{1}{I \cdot s^2 - m \cdot g \cdot l} \quad (1)$$

Dimana, $\theta(s)$ adalah sistem perpindahan sudut. $U(s)$ adalah sistem input. I adalah momen inersia (kgm^2). m adalah massa (kg). g adalah percepatan gravitasi (m/s^2). l adalah lebar (m). Konstanta PID adalah penghubung antara perhitungan matematis sistem dengan mekanika sistem. Melalui konstanta ini, maka sistem dapat mengetahui *output* dan *input*. Berdasarkan Persamaan 1, selanjutnya dapat dilakukan perhitungan untuk mendapatkan konstanta P , I dan D sebagai berikut.

Diketahui, $I = 0,00012 \text{ kgm}^2$, $m = 0,10 \text{ kg}$, $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, dan $l = 0,06 \text{ m}$.

Maka,

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{1}{0,00012 \cdot s^2 - 0,10 \cdot 9,8 \cdot 0,06}$$

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{1}{0,00012s^2 - 0,0588}$$

Dua *numerator* dan *denominator* dimasukkan ke dalam sistem *matlab* untuk dilakukan *tuning*. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan konstanta PID dengan respon yang stabil. Maka dari itu diperoleh nilai ketiga konstanta PID seperti yang terlihat pada Tabel 1.

Parameter PID pada Tabel 1 menunjukkan nilai konstanta integral menjadi nilai terbesar dari ketiga konstanta, karena konstanta *integral* berfungsi untuk meredam *overshoot*, konstanta *proportional* berfungsi untuk menaikkan nilai *rise time* serta *overshoot* dan konstanta *derivative* berfungsi untuk menjaga sistem agar tetap berada pada *setpoint*. Sistem dianggap stabil karena tidak terlalu banyak osilasi dan *output* mencapai nilai *setpoint*.

F. Metode Pengujian Komparasi Penjejak Cahaya

Proses perbandingan penjejak cahaya PID dan FLC ini dilakukan dengan membandingkan hasil nilai kecepatan dan ketepatan pada kedua penjejak cahaya. Pengujian yang akan dilakukan meliputi pengujian kecepatan sudut, kecepatan Linear dan ketepatan sudut (akurasi dan presisi).

1) Pengujian Kecepatan Sudut dan Kecepatan Linear

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kecepatan sudut pada penjejak cahaya yang dilakukan dengan cara menghidupkan semua perangkat sistem penjejak cahaya dengan cara memberikan catu daya 5 Volt DC lalu menghitung sudut yang ditempuh dalam waktu 1 detik pada penjejak cahaya. Berdasarkan pengujian, maka diperoleh sudut tempuh sebesar 12° dalam 1 detik pada penjejak cahaya dengan FLC. Berdasarkan data tersebut, maka dapat dihitung kecepatan sudut dengan Persamaan 2.

$$\omega = 2\pi f \quad (2)$$

Disamping itu juga akan dilakukan pengujian kecepatan linear. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kecepatan linear pada penjejak cahaya dengan PID dan penjejak cahaya dengan FLC. Pengujian ini dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.

$$v = 2\pi r f \text{ atau } v = \omega \cdot f \quad (3)$$

TABEL 2
JARAK PENJEJAK CAHAYA KE LAMPU

| Lampu | Jarak dari penjejak cahaya |
|-------|----------------------------|
| 1 | 56 cm |
| 2 | 54 cm |
| 3 | 56 cm |
| 4 | 54 cm |
| 5 | 50 cm |
| 6 | 54 cm |
| 7 | 56 cm |
| 8 | 54 cm |
| 9 | 56 cm |



Gambar 5. (a) Jarak antar lampu (b) Simulator matahari

dimana, v = kecepatan linear (m/s), ω = kecepatan sudut (rad/s), r = jarak (m), dan f = frekuensi.

2) Pengujian Ketepatan Sudut

Pengujian ketepatan sudut penjejak cahaya menggunakan simulasi lampu sebagai matahari, tujuannya untuk mengetahui keakuratan dan presisi dari masing-masing penjejak cahaya.

Konfigurasi lampu dapat dilihat pada Gambar 5(a). Pengujian menggunakan 9 buah lampu yang diletakkan pada posisi yang berbeda-beda. Jarak antar lampu sebesar 20 cm dengan jarak diagonal sebesar 28 cm. Gambar 5(b) merupakan *Prototipe* simulator matahari, memiliki ketinggian 50 cm dari panel surya. Masing-masing lampu menyala bergantian dengan urutan acak. Perpindahan cahaya lampu tersebut menandakan kondisi matahari ketika tertutup awan.

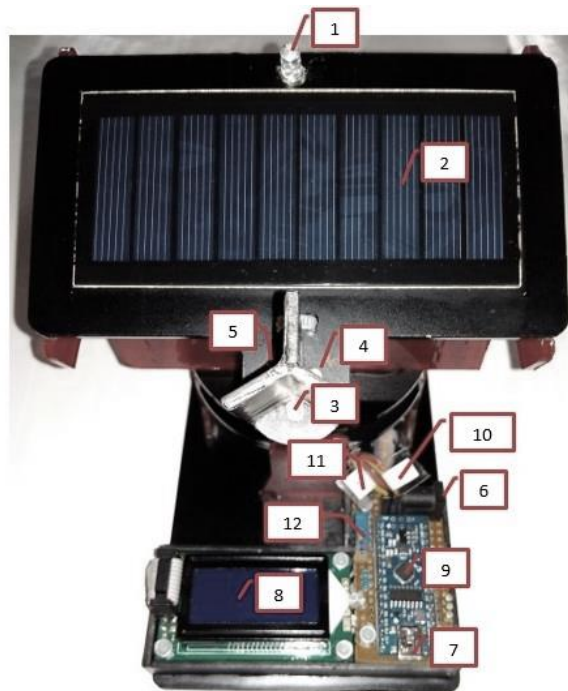
Jarak dari penjejak cahaya ke masing-masing lampu memiliki jarak yang bervariasi. Nilai masing-masing jarak tersebut dapat dilihat pada Tabel 2. Pengujian pada masing-masing lampu dilakukan secara berulang-ulang sebanyak 10 kali. Tujuannya untuk melihat tingkat kepresisian sensor penjejak. Jika sensor berhasil mengarah tepat ke sumber cahaya, maka sensor dianggap akurat dan jika sensor berhasil menjejak ke sumber cahaya sebanyak 10 kali perulangan, maka sensor dianggap presisi

3) Analisis Tingkat Kesalahan Penjejak Cahaya

Pada pengukuran tingkat kesalahan penjejak cahaya, diperlukan data yang berupa nilai *Mean Absolute Error (MAE)* dan nilai *Root Mean Square Error (RMSE)*. Untuk memperoleh tingkat kesalahan yang terjadi, maka selanjutnya dilakukan perhitungan MAE dan RMSE. Untuk perhitungan MAE digunakan Persamaan 4, sedangkan untuk perhitungan RMSE digunakan Persamaan 5. Dimana nilai θ_1 merupakan data aktual sedangkan nilai θ_2 merupakan data pengujian.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\theta_{1i} - \theta_{2i}| \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\theta_{1i} - \theta_{2i})^2} \quad (5)$$



Gambar 6. *Prototipe* Penjejak Cahaya

Keterangan:

- | | |
|-----------------------------|--|
| 1. LED indikator solar cell | 7. Konektor Power 5 Volt |
| 2. Solar cell | 8. LCD 2 X 8 karakter |
| 3. LDR 1 | 9. Arduino Nano |
| 4. LDR 2 | 10. Konektor Servo X (Vertikal) |
| 5. LDR 3 | 11. Konektor Servo Y (Horizontal) |
| 6. Konektor power 5 Volt | 12. Variable Resistor (Mengatur LED LCD) |

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tahap akhir penelitian ini yaitu menampilkan hasil *prototipe* dan data hasil pengujian penjejak cahaya serta pembahasan perbandingan terhadap kinerja penjejak cahaya PID dan FLC. Proses perbandingan ini dilakukan dengan membandingkan aspek kecepatan dan ketepatan pada kedua penjejak cahaya.

A. Hasil Prototipe dan Data Hasil Pengujian

1) Prototipe Sistem Penjejak Cahaya

Prototipe penjejak cahaya pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 6. Penjejak cahaya ini memiliki beberapa komponen yang memiliki fungsi tersendiri. Penjejak cahaya ini memiliki dua sistem pergerakan (*dual axis*) yaitu pergerakan horizontal dan vertikal. Sistem *dual axis* ini bertujuan untuk memaksimalkan penjejak cahaya dapat lebih tepat dengan cahaya. Kemudian penjejak cahaya ini memiliki tiga sensor LDR yang diletakkan pada tiga sisi berbentuk segitiga. Pada tiap sisi bagian dalam segitiga tersebut, diberikan pembatas dengan tujuan sensor dapat mendeteksi cahaya secara maksimal sehingga penjejak cahaya dapat bekerja dengan baik.

2) Hasil Pengujian Kecepatan Sudut dan Kecepatan Linear Penjejak Cahaya PID dan FLC

Pengujian kecepatan sudut pada penjejak cahaya yang dilakukan dengan cara menghidupkan semua perangkat sistem penjejak cahaya dengan cara memberikan catu daya 5 Volt DC lalu menghitung sudut yang ditempuh dalam waktu 1 detik pada penjejak cahaya. Berdasarkan pengujian, maka diperoleh sudut tempuh sebesar 12° dalam 1 detik pada penjejak cahaya dengan FLC dan 9° dalam 1 detik pada penjejak cahaya dengan PID. Berdasarkan data diatas, maka kecepatan sudut dan kecepatan linear kedua *tracker* dapat dihitung menggunakan Persamaan 2 dan Persamaan 3 dengan hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 3.

Data kecepatan sudut dan kecepatan linear mendapatkan hasil yang berbeda-beda dikarenakan jarak antara penjejak dengan sumber cahaya juga berbeda. Berdasarkan Tabel 3, nilai kecepatan yang paling besar pada kedua penjejak cahaya yaitu pada penjejak cahaya FLC.

TABEL 3
 HASIL UJI KECEPATAN PADA PENJEJAK CAHAYA

| Lampu | Jarak antara Penjejak Cahaya | Penjejak Cahaya FLC | | Penjejak Cahaya PID | |
|-------|------------------------------|---------------------|------------------|---------------------|------------------|
| | | Kec.Sudut (Rad/s) | Kec.Linear (m/s) | Kec.Sudut (Rad/s) | Kec.Linear (m/s) |
| 1 | 0,54 | 0,207 | 0,112 | 0,16 | 0,086 |
| 2 | 0,5 | 0,207 | 0,103 | 0,16 | 0,08 |
| 3 | 0,54 | 0,207 | 0,112 | 0,16 | 0,086 |
| 4 | 0,56 | 0,207 | 0,116 | 0,16 | 0,09 |
| 5 | 0,53 | 0,207 | 0,11 | 0,16 | 0,084 |
| 6 | 0,56 | 0,207 | 0,116 | 0,16 | 0,09 |
| 7 | 0,64 | 0,207 | 0,132 | 0,16 | 0,102 |
| 8 | 0,62 | 0,207 | 0,128 | 0,16 | 0,099 |
| 9 | 0,64 | 0,207 | 0,132 | 0,16 | 0,102 |

TABEL 4
 NILAI KETEPATAN SUMBU X PENJEJAK CAHAYA FLC

| Lampu | Rata-Rata Sudut X (°) | Rata-Rata Output FLC X (°) | Error Sudut (°) | Persentase Error (%) |
|-------|-----------------------|----------------------------|-----------------|----------------------|
| 1 | 43 | 43,147 | 0,147 | 0,34 |
| 2 | 90 | 90,955 | 0,955 | 1,06 |
| 3 | 136 | 135,999 | 0,001 | 0,0007 |
| 4 | 175 | 175,563 | 0,563 | 0,32 |
| 5 | 90 | 90,605 | 0,605 | 0,67 |
| 6 | 16 | 16,321 | 0,321 | 2,006 |
| 7 | 143 | 143,142 | 0,142 | 0,09 |
| 8 | 90 | 90,662 | 0,662 | 0,73 |
| 9 | 44 | 44,042 | 0,042 | 0,09 |

TABEL 5
 NILAI KETEPATAN SUMBU X PENJEJAK CAHAYA PID

| Lampu | Rata-Rata Sudut X (°) | Rata-Rata Output PID X (°) | Error Sudut (°) | Persentase Error (%) |
|-------|-----------------------|----------------------------|-----------------|----------------------|
| 1 | 72 | 72,54 | 0,54 | 0,59 |
| 2 | 91 | 91,32 | 0,54 | 0,35 |
| 3 | 109 | 108,62 | 0,38 | 0,34 |
| 4 | 111 | 110,48 | 0,52 | 0,46 |
| 5 | 89 | 89,61 | 0,61 | 0,68 |
| 6 | 66 | 67,07 | 1,07 | 1,62 |
| 7 | 63 | 64,01 | 1,01 | 1,60 |
| 8 | 89 | 89,41 | 0,41 | 0,46 |
| 9 | 113 | 114,04 | 1,04 | 0,92 |

3) Hasil Pengujian Ketepatan Sudut

Aspek ketepatan pada penelitian ini yaitu melakukan perhitungan *pesentase error output Fuzzy* pada penjejak cahaya terhadap seluruh lampu (cahaya), untuk mengetahui keakuratan nilai *output Fuzzy* terhadap nilai sudut. Nilai error sudut merupakan selisih antara nilai koordinat sudut sumber cahaya dengan nilai sudut pergerakan motor. Pengujian ketepatan dilakukan pada masing-masing sumbu X dan Y penjejak cahaya. Data hasil pengujian sumbu X penjejak cahaya FLC dapat dilihat pada Tabel 4, sedangkan hasil pengujian sumbu X penjejak cahaya PID tertera pada Tabel 5 sebagai berikut.

Berdasarkan hasil pengujian sumbu X dari kedua penelitian ini disimpulkan penjejak cahaya FLC memiliki rata-rata *persentase error* pada sumbu X sebesar 0,59%. Sedangkan pada penjejak cahaya PID memiliki rata-rata *persentase error* pada sumbu X sebesar 0,78%. Hal tersebut membuktikan bahwa sumbu X penjejak cahaya FLC memiliki keakuratan lebih baik dari sumbu X penjejak cahaya PID. Selanjutnya akan dilakukan pengujian pada sumbu Y kedua penjejak cahaya. Nilai hasil pengujian ketepatan sumbu Y pada penjejak cahaya FLC dan ketepatan sumbu Y pada penjejak cahaya PID dapat dilihat pada Tabel 6 dan Tabel 7.

Hasil pengujian sumbu Y dari kedua penelitian ini adalah penjejak cahaya FLC memiliki rata-rata *persentase error* pada sumbu Y sebesar 0,70%. Sedangkan pada penjejak cahaya PID memiliki rata-rata *persentase error* pada sumbu Y sebesar 4,67%. Hal tersebut membuktikan bahwa sumbu Y pada penjejak cahaya FLC memiliki keakuratan lebih baik dari sumbu Y penjejak cahaya PID.

TABEL 6
NILAI KETEPATAN SUMBU Y PENJEJAK CAHAYA FLC

| Lampu | Rata-Rata Sudut Y (°) | Rata-Rata Output FLC Y (°) | Error Sudut (°) | Persentase Error (%) |
|-------|-----------------------|----------------------------|-----------------|----------------------|
| 1 | 56 | 56,935 | 0,935 | 1,67 |
| 2 | 66 | 65,912 | 0,088 | 0,13 |
| 3 | 58 | 58,598 | 0,598 | 1,03 |
| 4 | 64 | 64,843 | 0,843 | 1,32 |
| 5 | 90 | 90,919 | 0,919 | 1,02 |
| 6 | 64 | 64,221 | 0,221 | 0,34 |
| 7 | 147 | 147,28 | 0,28 | 0,19 |
| 8 | 156 | 156,443 | 0,443 | 0,28 |
| 9 | 150 | 150,448 | 0,448 | 0,30 |

TABEL 7
NILAI KETEPATAN SUMBU Y PENJEJAK CAHAYA PID

| Lampu | Rata-Rata Sudut X (°) | Rata-Rata Output PID X (°) | Error Sudut (°) | Persentase Error (%) |
|-------|-----------------------|----------------------------|-----------------|----------------------|
| 1 | 6 | 6,59 | 0,59 | 9,83 |
| 2 | 6 | 5,84 | 0,16 | 2,83 |
| 3 | 4 | 4,67 | 0,67 | 16,75 |
| 4 | 22 | 21,88 | 0,12 | 0,54 |
| 5 | 25 | 25,79 | 0,79 | 3,16 |
| 6 | 24 | 24,89 | 0,89 | 3,70 |
| 7 | 43 | 42,89 | 1,01 | 1,60 |
| 8 | 44 | 45,32 | 1,32 | 3 |
| 9 | 39 | 39,25 | 0,25 | 0,64 |

TABEL 8
DATA ERROR PADA PENJEJAK CAHAYA PID

| Pengujian | \sum Error X | \sum Error Y | \sum Error X ² | \sum Error Y ² |
|-----------|----------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Lampu 1 | 5,43 | 7,89 | 6,16 | 11,28 |
| Lampu 2 | 8,87 | 6,78 | 8,40 | 8,97 |
| Lampu 3 | 5,51 | 11,24 | 3,42 | 18,17 |
| Lampu 4 | 7,04 | 6,03 | 6,73 | 6,02 |
| Lampu 5 | 10,65 | 8,30 | 14,22 | 9,24 |
| Lampu 6 | 11,13 | 8,98 | 18,86 | 12,42 |
| Lampu 7 | 11,93 | 8,35 | 23,25 | 8,43 |
| Lampu 8 | 6,18 | 13,81 | 6,09 | 27,42 |
| Lampu 9 | 10,41 | 8,93 | 15,08 | 13,08 |
| Total | 77,25 | 80,41 | 102,21 | 115,04 |

TABEL 9
DATA ERROR PADA PENJEJAK CAHAYA FLC

| Pengujian | \sum Error X | \sum Error Y | \sum Error X ² | \sum Error Y ² |
|-----------|----------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Lampu 1 | 2,37 | 9,35 | 0,82 | 10,64 |
| Lampu 2 | 9,55 | 5,26 | 12,27 | 3,50 |
| Lampu 3 | 6,77 | 5,98 | 6,31 | 4,93 |
| Lampu 4 | 5,63 | 8,43 | 5,42 | 7,13 |
| Lampu 5 | 6,05 | 10,33 | 5,93 | 15,39 |
| Lampu 6 | 3,61 | 3,71 | 1,53 | 1,70 |
| Lampu 7 | 4,32 | 5,16 | 2,44 | 2,89 |
| Lampu 8 | 6,62 | 4,49 | 4,84 | 2,83 |
| Lampu 9 | 3,80 | 4,48 | 1,72 | 2,30 |
| Total | 48,72 | 57,19 | 41,29 | 51,30 |

4) Hasil Pengujian Tingkat Kesalahan Penjejak Cahaya PID dan FLC

Nilai pada Tabel 8 merupakan data *error* pada pengujian menggunakan penjejak cahaya PID. Nilai tersebut merupakan total *error* yang terjadi pada 9 pengujian menggunakan posisi lampu yang berbeda dengan 10 kali perulangan, sehingga menghasilkan sebanyak 90 data.

Nilai pada Tabel 9 merupakan data *error* pada pengujian menggunakan penjejak cahaya FLC. Nilai tersebut merupakan total *error* yang terjadi pada 9 pengujian menggunakan posisi lampu yang berbeda dengan 10 kali perulangan, sehingga menghasilkan sebanyak 90 data.

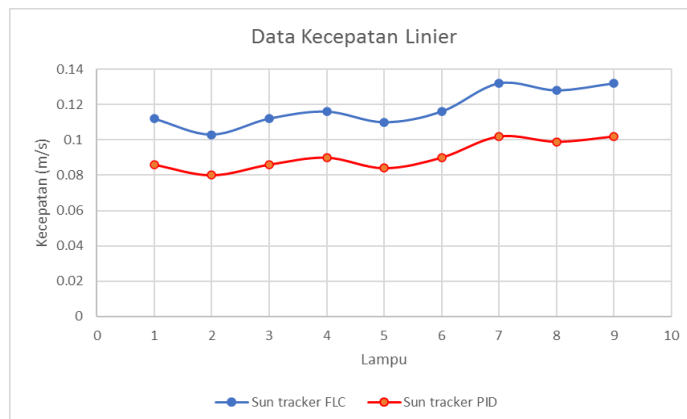
B. Pembahasan Hasil Pengujian

1) Perbandingan Hasil Kecepatan Sudut dan Kecepatan Linear Penjejak Cahaya PID dan FLC

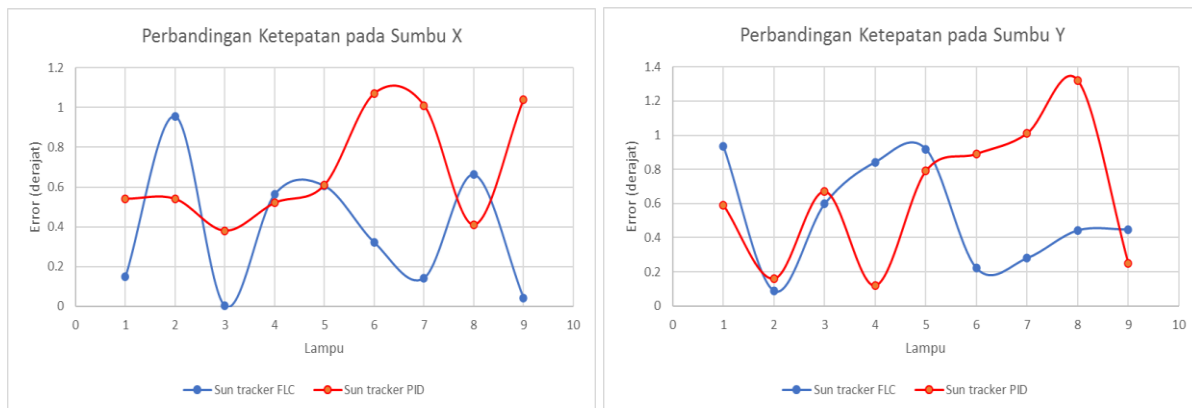
Perbandingan kecepatan sudut dan kecepatan linear kedua penjejak, dilakukan dengan membandingkan data hasil pengujian kecepatan kedua penjejak cahaya. Hasil perbandingan dapat dilihat pada grafik sebagai berikut.

TABEL 10
 DATA ERROR PENJEJAK CAHAYA PID DAN FLC

| Nilai | Penjejak cahaya PID | Penjejak cahaya FLC |
|--------|---------------------|---------------------|
| MAE X | 0,86 | 0,54 |
| MAE Y | 0,89 | 0,64 |
| RMSE X | 1,07 | 0,68 |
| RMSE Y | 1,13 | 0,75 |



Gambar 7. Perbandingan Data Kecepatan Linear PID dan FLC



Gambar 8. Perbandingan Ketepatan Sudut Sumbu X dan Sumbu Y

Grafik pada Gambar 7 menunjukkan nilai kecepatan linear PID yang diperoleh yaitu paling rendah sebesar 0,08 m/s dan paling tinggi sebesar 0,102 m/s sedangkan pada nilai kecepatan linear FLC, nilai paling rendah sebesar 0,103 m/s dan paling tinggi sebesar 0,132 m/s. Hal ini membuktikan bahwa penjejak cahaya FLC lebih cepat dari penjejak cahaya PID.

2) Perbandingan Ketepatan Sudut Penjejak Cahaya PID dan FLC

Pengujian ketepatan sudut penjejak cahaya meliputi pengujian pada sumbu x dan pada sumbu y penjejak cahaya PID dan FLC. Hasil pengujian tersebut akan dilakukan perbandingan untuk mengetahui hasil yang paling baik. Hasil perbandingan tersebut dapat dilihat pada Gambar 8.

Berdasarkan grafik pada Gambar 8 diatas, maka dapat disimpulkan bahwa ketepatan sudut penjejak cahaya FLC memiliki tingkat ketepatan sudut yang baik dibandingkan dengan penjejak cahaya PID. Hal ini dibuktikan dengan nilai rata-rata persentase error sumbu X dan sumbu Y pada penjejak cahaya FLC lebih sedikit dibandingkan dengan nilai rata-rata persentase error sumbu X dan sumbu Y pada penjejak cahaya PID.

3) Perbandingan Tingkat Kesalahan Penjejak Cahaya PID dan FLC

Data error pada tabel dan tabel merupakan data utama yang digunakan untuk melakukan perbandingan tingkat kesalahan penjejak cahaya PID dan FLC. Data tersebut digunakan untuk menghitung MAE dan RMSE pada masing-masing sumbu X dan Y penjejak cahaya PID dan FLC. Perhitungan MAE menggunakan Persamaan 4 dan perhitungan RMSE menggunakan Persamaan 5. Hasil perhitungan tersebut dapat dilihat pada Tabel 10.

Data pada Tabel 10 menunjukkan, nilai error pada sumbu penjejak cahaya FLC lebih sedikit dari sumbu penjejak cahaya PID. Dengan demikian, penjejak cahaya FLC lebih baik dari penjejak cahaya PID.

4) *Analisis Persentase Perbaikan Penjejak Cahaya PID dan FLC*

Berdasarkan data pengujian yang telah diperoleh pada masing-masing penjejak cahaya, maka dapat dihitung persentase perbaikan yang dihasilkan oleh penjejak cahaya FLC. Pada aspek kecepatan sudut, perhitungan dapat dilakukan dengan Persamaan 6 dan menghasilkan persentase perbaikan.

$$\begin{aligned} \text{Kecepatan} &= \frac{\text{Kec. FLC} - \text{Kec. PID}}{\text{Kec. PID}} * 100\% & (6) \\ \text{Kecepatan} &= \frac{0,207 - 0,16}{0,16} * 100\% \\ \text{Kecepatan} &= \frac{0,047}{0,16} * 100\% \\ \text{Kecepatan} &= 29\% \end{aligned}$$

Pada aspek akurasi sumbu x dan sumbu y penjejak cahaya FLC, perhitungan dapat dilakukan dengan Persamaan 7 untuk akurasi sumbu x dan Persamaan 8 untuk akurasi sumbu y, sehingga menghasilkan persentase perbaikan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \Delta \text{ Akurasi } x &= \% \text{ Fuzzy } x - \% \text{ PID } x & (7) \\ \Delta \text{ Akurasi } x &= 80\% - 45\% \\ \Delta \text{ Akurasi } x &= 35\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \text{ Akurasi } y &= \% \text{ Fuzzy } y - \% \text{ PID } y & (8) \\ \Delta \text{ Akurasi } y &= 30\% - 30\% \\ \Delta \text{ Akurasi } y &= 0\% \end{aligned}$$

Berdasarkan perbaikan akurasi yang diperoleh, pada sumbu y tidak mengalami perbaikan akurasi. Perbaikan akurasi hanya terjadi pada sumbu x yaitu sebesar 35%. Selanjutnya, perhitungan persentase perbaikan presisi pada sumbu x dapat dilakukan dengan Persamaan 9 dan pada sumbu y perhitungan dapat dilakukan dengan Persamaan 10.

$$\begin{aligned} \Delta \text{ Presisi } x &= \% \text{ Fuzzy } x - \% \text{ PID } x & (9) \\ \Delta \text{ Presisi } x &= 71\% - 45\% \\ \Delta \text{ Presisi } x &= 26\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \text{ Presisi } y &= \% \text{ Fuzzy } y - \% \text{ PID } y & (10) \\ \Delta \text{ Presisi } y &= 33\% - 38\% \\ \Delta \text{ Presisi } y &= -5\% \end{aligned}$$

Pada aspek presisi, sumbu y tidak mengalami perbaikan dan terjadi penurunan sebesar 5%. Perbaikan presisi hanya terjadi pada sumbu x yaitu sebesar 26%. Perbaikan lebih cenderung terjadi pada sumbu x dari pada sumbu y. Hal tersebut terjadi karena pergerakan sumbu x lebih aktif dibandingkan pergerakan sumbu y. Berdasarkan perhitungan keseluruhan yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa penjejak cahaya FLC memiliki peningkatan nilai kecepatan sebesar 29% dan peningkatan nilai ketepatan pada aspek akurasi sebesar 35% serta aspek presisi sebesar 26% dari penjejak cahaya PID pada penelitian terdahulu.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan pembahasan terhadap data yang diperoleh, maka dapat disimpulkan bahwa nilai rata-rata kecepatan sudut yang diperoleh dari hasil pengujian penjejak cahaya PID sebesar

0,16 rad/s dan nilai rata-rata kecepatan linear sebesar 0,091 m/s. Sedangkan pada penjejak cahaya FLC, nilai rata-rata kecepatan sudut sebesar 0,207 rad/s dan nilai rata-rata kecepatan linear sebesar 0,132 m/s. Tingkat akurasi dan presisi ketepatan sudut penjejak cahaya PID dan FLC adalah Nilai akurasi penjejak cahaya PID sumbu X pada sudut 91° sebesar 45% dan nilai presisi sebesar 45%. Sedangkan nilai akurasi penjejak cahaya PID sumbu Y pada sudut 25° sebesar 30% dan nilai presisi sebesar 38%. Pada penjejak cahaya FLC, nilai akurasi sumbu X pada sudut 43° sebesar 80% dan nilai presisi sebesar 71%. Sedangkan nilai akurasi penjejak cahaya FLC sumbu Y pada sudut 56° sebesar 30% dan nilai presisi sebesar 33%. Berdasarkan perhitungan keseluruhan yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa penjejak cahaya FLC memiliki peningkatan nilai kecepatan sebesar 29% dan peningkatan nilai ketepatan pada aspek akurasi sebesar 35% serta aspek presisi sebesar 26% dari penjejak cahaya PID pada penelitian terdahulu.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Saddam Azmi, "Kajian Aspek Kecepatan dan Ketepatan pada Sun Tracker Dua Sumbu Berbasis Sensor Berbentuk Tetrahedron," Universitas Syiah Kuala, 2018.
- [2] Y. Away, Suriadi, A. Rahman, T. R. A. Isma, and Muhammad Firdaus, "Penerapan Logika Fuzzy pada Sun Tracker Dual Axis Berbasis Sensor Tetrahedron Geometri," in Seminar Nasional dan Expo Teknik Elektro, 2017, pp. 74–80.
- [3] Y. Away, A. Rahman, T. R. A. Isma, and Muhammad Firdaus, "Performance Comparison Between PID and Fuzzy Algorithm for Sun Tracker Based on Tetrahedron Geometry Sensor," in International conference on Electrical Engineering and informatics, 2018, pp. 40–44.
- [4] E. Kiyak and G. Gol, "A Comparison of Fuzzy Logic and PID Controller for A Single-Axis Solar Tracking Sistem," *Renewables Wind Water Sol. a Springer Open J.*, vol. 3, no. 7, pp. 1–14, 2016.
- [5] C. Hilman and A. Musyafa', "Rancang Bangun Dual-Axis PV Solar Tracker System Menggunakan Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller," in Seminar Nasional Pasca Sarjana FTI-ITS Surabaya, 2014, pp. 1–7.
- [6] B. M. Hamed and M. S. El-Moghany, "Fuzzy controller design using FPGA for photovoltaic maximum power point tracking," *Int. J. Adv. Res. Artificial Intell.*, vol. 1, no. 3, pp. 14–21, 2012.
- [7] Abdul Adhim, "Perancangan Sistem Kontrol Dual-Axis Pv Solar System Menggunakan Particle Swarm Optimization," *S2 Teknik Fisika. FTI-ITS. Surabaya*, 2014.
- [8] I. Abadi, "Design and Implementation of Active Two Axes Solar Tracking System Using Particle Swarm Optimization Based Fuzzy Logic Controller," *Int. Rev. Model. Simulations*, vol. 8, no. 6, pp. 265–272, 2015.
- [9] D. Bawa and C. Y. Patil, "Fuzzy control based solar tracker using Arduino Uno," *Int. J. Eng. Innov. Technol.*, vol. 2, no. 12, pp. 179–187, 2013.
- [10] M. S. S. B. and K. R. P., "A new MPPT Design Using Grey Wolf Optimization Technique For PhotoVoltaic System Under partial Shading Conditions," *IEEE Trans. Suistable Energy*, vol. 7, pp. 181–188, 2016.
- [11] S. Degeratu, S. Rizescu, L. Alboteanu, C. Caramida, P. Rotaru, and I. Boncea, "Using a Shape Alloy Memory Spring Actuator to Increase the Performance of Solar Tracking System," *Ann. Univ. Craiova*, no. 38, pp. 116–121, 2014.
- [12] R. Maulana, M. H. H. Ihsan, and Gembong Edhi Setyawan, "Implementasi Pengkondisian Kipas dan Lampu Otomatis Menggunakan Logika Fuzzy," *J. PTHK*, vol. 2, no. 11, pp. 5301–5309, 2018.
- [13] A. U. Azmi, Sumardi, and M. A. Riyadi, "Sistem Tracking Panel Surya Untuk Pengoptimalan Daya Menggunakan Metode Kontrol Self-Tuning PID Dengan JST Jenis Perceptron," *J. Transm.*, vol. 17, no. 1, pp. 35–41, 2015.
- [14] B. E. Cahyono, I. D. Utami, and N. P. Lestari, "Karakteristik Sensor LDR dan Aplikasinya pada Alat ukur Tingkat kekeruhan Air Berbasis Arduino UNO," *J. Teor. dan Apl. Fis.*, vol. 7, no. 2, pp. 179–185, 2019.
- [15] I. Stamatescu, I. Fagarasan, G. Stamatescu, N. Arghira, and S. S. Iliescu, "Design and implementation of a solar tracking algorithm," in *Proceedings of the 24th DAAAM international symposium on intelligent manufacturing and automation*, 2014, pp. 500–507.
- [16] Sumathi, V., Kanagaraj, J., Reddy, S.S.C., Kankipati, S.S., Vidavaluru, A. and Subramaniam, U., "Dual-Axis Solar Tracking and Monitoring of Solar Panel Using Internet of Things." *Cyber-Physical Systems and Industry 4.0: Practical Applications and Security Management*, pp. 137-148, 2022.
- [17] Wu, C.H., Wang, H.C. and Chang, H.Y., "Dual-axis solar tracker with satellite compass and inclinometer for automatic positioning and tracking." *Energy for Sustainable Development* 66. pp 308-318, 2022.
- [18] Alvarez-Herrera, C. "Construction of dual-axis sun tracker controlled by Arduino." *Journal of Physics: Conference Series*. vol. 1723. no. 1, 2021.