

Analisis Kinerja Penggabungan Logika Fuzzy dan PID pada Penjejak Matahari Dua Sumbu

M. Nur Hasan, Yuwaldi Away, Suriadi, dan Andri Novandri
Magister Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala
Jl. Tgk. Sych Abdurrauf, No. 7, Banda Aceh, 23111
e-mail: hasan.mnur@gmail.com

Abstrak—Pemanfaatan energi terbarukan dari sistem panel surya semakin banyak diaplikasikan, tetapi hingga saat ini pemanfaatannya tidak secara maksimal. Perpindahan matahari yang disebabkan oleh rotasi bumi dan kondisi berawan patut diperhitungkan untuk memaksimalkan energi listrik pada panel surya. Pada penelitian ini, sebuah konsep untuk menghitung pergerakan sun tracker dua sumbu diusulkan dengan menggunakan penggabungan dua metode kontrol yaitu Proportional Integral Derivative (PID) dan logika Fuzzy yang disebut dengan Fuzzy-PID (F-PID). Untuk mengikuti pergerakan matahari maka digunakan sensor *Light Dependent Resistor* (LDR) sebagai input terhadap cahaya sekaligus sebagai output yang digunakan untuk menggerakkan dua servo untuk sumbu-x dan sumbu-y. Sun tracker yang digunakan berbasis geometri tetrahedron dan menggunakan tiga LDR sebagai input. Komponen input dan output saling terhubung ke ATmega328P dengan menggunakan program gabungan logika Fuzzy dan PID (F-PID). Pemrograman logika Fuzzy terlebih dahulu dilakukan pada aplikasi Matlab menggunakan *Fuzzy Inference System* (FIS), kemudian dikonversikan menjadi bahasa pemrograman berbasis Arduino. Pergerakan sun tracker dan tegangan yang diterima panel surya akan disimpan kedalam SD card menggunakan modul data logging. Pengaturan pergerakan sun tracker menggunakan metode F-PID ini bermaksud untuk memaksimalkan energi listrik yang diterima oleh panel surya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode F-PID memperoleh tegangan maksimal sebesar 5,3 V, arus maksimal sebesar 0,11 A, dan daya maksimal sebesar 0,61 W.

Kata kunci: sun tracker, pid, logika fuzzy, f-pid

Abstract—Utilization of renewable energy from solar panel systems is increasingly being applied, but until now its utilization has not been maximized. The movement of the sun caused by rotation of the earth and cloudy condition should be taken into account to maximize the electrical energy in solar panels. In this study, a concept to calculate the movement of a two-axis sun tracker is proposed by using a combination of two controller methods, i.e. Proportional Integral Derivative (PID) and Fuzzy logic known as Fuzzy-PID (F-PID). To follow the movement of the sun, the LDR sensor is used as an input to light as well as output used to drive 2 units servo for x-axis and y-axis. Sun tracker that is used is based on tetrahedron geometry and uses three Light Dependent Resistor (LDR) sensors as input. Input and output components are connected to the Atmega 328P by using a combination of Fuzzy logic and PID programs (F-PID). Fuzzy logic programming is first performed on the Matlab application using Fuzzy Inference System (FIS), then converted into an Arduino-based programming language. The sun tracker movement and the voltage received by the solar panel will be stored into the SD card using a data logging module. Adjusting the sun tracker movement using the combined Fuzzy logic and PID method intends to maximize the electrical energy received by the solar panel. The results showed that the F-PID method obtained the maximum voltage of 5.3 V, a maximum current of 0.11 A, and a maximum power of 0.61 W.

Keywords: sun tracker, pid, fuzzy logic, f-pid

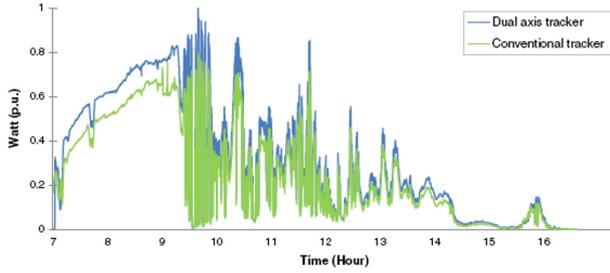
I. PENDAHULUAN

Pemanfaatan energi matahari merupakan suatu bentuk konservasi energi dalam penggunaan energi terbarukan, dimana pemanfaatannya masih belum optimal. Pergerakan matahari terhadap rotasi bumi serta kondisi cuaca yang menjadi kendala utama. Maka dari itu diperlukan suatu tracker yang berfungsi untuk menjejak posisi matahari. Teknologi sun tracker telah banyak dibuat oleh peneliti-peneliti sebelumnya dengan metode dan sensor yang berbeda. Sun tracker ini bekerja mengikuti pergerakan matahari berdasarkan intensitas cahaya yang diterima,

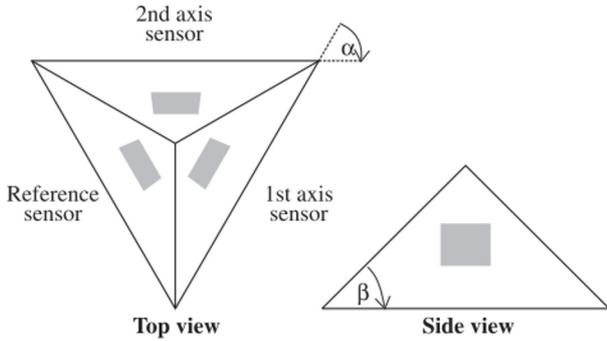
sehingga banyak metode yang dikembangkan untuk memaksimalkan energi listrik yang diterima oleh panel surya.

Salah satu penelitian yang telah dilakukan oleh Y. Away dan M. Ikhsan [1] yaitu berupa perancangan sensor sun tracker dua sumbu berbasis tetrahedron geometri dengan menggunakan metode pengendali *Proportional Integral Derivative* (PID) untuk menentukan pergerakan sensor dan tracker. Metode PID digunakan pada sun tracker ini bertujuan untuk mengurangi gangguan pada pergerakan sehingga tracker menjadi lebih baik.

Hasil komparasi sun cell dengan tracking dan



Gambar 1. Komparasi daya antara sun cell dengan tracking (hijau) dan tanpa tracking (biru) [1]



Gambar 2. Struktur sensor tetrahedron

tanpa *tracking* menggunakan metode PID ditunjukkan pada Gambar 1. Berdasarkan hasil tersebut, diperoleh peningkatan energi sebesar 20,86% pada *sun cell* dengan *tracking*.

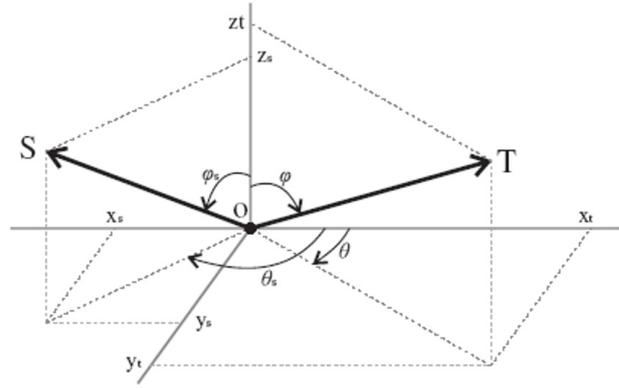
Penelitian selanjutnya yaitu penerapan logika *fuzzy* pada *sun tracker* dua sumbu berbasis sensor tetrahedron geometri telah dilakukan juga oleh Yuwaldi Away dkk [2], dimana metode logika *fuzzy* digunakan untuk mengatur pergerakan sensor dan *tracker* untuk memaksimalkan kinerja panel surya. Metode logika *fuzzy* terbukti dapat memberikan nilai *output* yang lebih mulus (*smooth*) dengan nilai yang berbeda-beda sesuai dengan *input* yang diterima.

Pada penelitian ini, *sun tracker* menggunakan algoritma gabungan dari metode logika *Fuzzy* dan PID yang biasa disebut sebagai *Fuzzy-PID* (F-PID). *Sun tracker* dengan metode logika F-PID telah banyak digunakan, namun masih ada beberapa kekurangan dari metode ini, diantaranya belum mampu menjejak matahari secara akurat, sehingga potensi energi surya belum dapat dimanfaatkan secara maksimal. Dengan pengembangan yang dilakukan pada penelitian ini, diharapkan sistem *sun tracker* mampu untuk mengatur pergerakan menjadi lebih baik sehingga dapat memaksimalkan beban yang dihasilkan oleh panel surya [3], [4].

II. STUDI PUSTAKA

A. Tetrahedron-Based Sensor

Tetrahedron-based sensor merupakan konsep terbaru dari desain sensor matahari. Terdapat tiga buah sensor cahaya yang terpasang pada masing-masing sisinya. Pada Gambar 2 merupakan struktur dari sensor tetrahedron,



Gambar 3. Orientasi dari ketiga sensor cahaya

dimana terdapat *reference sensor*, *first axis sensor* dan *second axis sensor*. Masing-masing sensor memiliki perannya tersendiri. *Reference sensor* berperan sebagai sensor acuan yang menjadi perbandingan diantara sensor yang lain. Pada *first axis sensor* berperan sebagai penentu pergerakan sumbu-*x*, sedangkan pada *second axis sensor* berperan sebagai pengatur pergerakan sumbu-*y*.

Kinerja dari sensor tetrahedron telah disimulasikan terhadap sumber cahaya untuk diperoleh nilai intensitas pada masing-masing sensor cahaya. Pendekatan matematika diturunkan berdasarkan Gambar 3 untuk mendapatkan sudut *azimuth* (θ) dan sudut *elevation* (φ) dari ketiga sensor cahaya. Titik T dan titik S merupakan arah sumber cahaya. Penentuan koordinat berdasarkan matriks koordinat matahari berdasarkan sumbu-*x*, sumbu-*y*, dan sumbu-*z* dengan menggunakan persamaan berikut [1]:

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\varphi) \cdot \cos(\theta) \\ \sin(\varphi) \cdot \sin(\theta) \\ \cos(\varphi) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\varphi_s) \cdot \cos(\theta_s) \\ \sin(\varphi_s) \cdot \sin(\theta_s) \\ \cos(\varphi_s) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

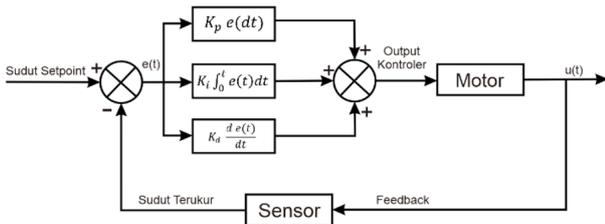
B. Pengendali PID

Sistem kendali PID merupakan sistem kendali umpan balik untuk menghitung nilai kesalahan secara kontinyu sebagai selisih antara *setpoint* yang diinginkan dengan variabel proses terukur. Kontroler mencoba untuk meminimalkan nilai kesalahan setiap waktu dengan penyetelan variabel kontrol. Nilai *error* didapat dari hasil pengurangan antara nilai dari sensor dengan nilai *setpoint*. Kontrol PID terdiri dari tiga buah parameter, yaitu: parameter *Proportional* (P), *Integral* (I), dan *Derivative* (D) [5]-[7].

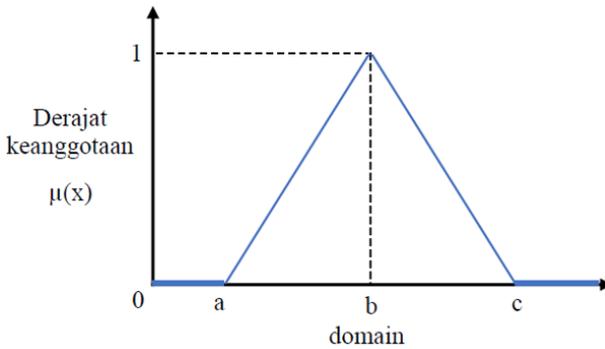
Berdasarkan Gambar 4, ketiga parameter dijumlahkan untuk dijadikan *output* kontroler. *Output* tersebut yang menjadi nilai acuan pergerakan motor. Persamaan kendali PID diperoleh dengan menggunakan konstanta *proportional*, konstanta *integral*, dan konstanta *derivative* yang dapat ditulis sebagai berikut [14]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

dimana $u(t)$ adalah sinyal *output*, $e(t)$ adalah sinyal *error*, dan K_p , K_i , dan K_d secara berturut-turut adalah konstanta *proportional*, *integral*, dan *derivative*.



Gambar 4. Diagram alir PID



Gambar 5. Kurva segitiga [15]

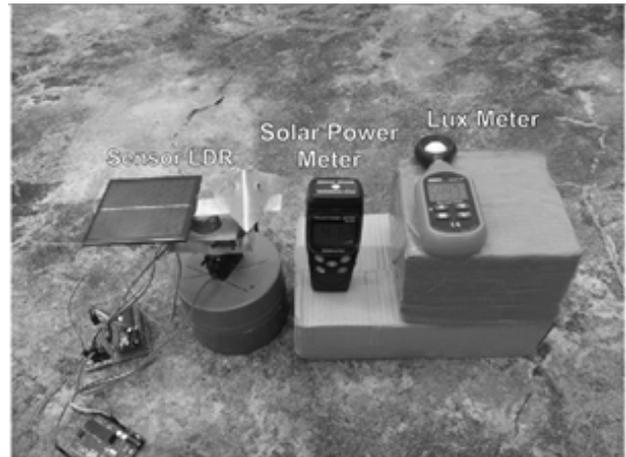
C. Logika Fuzzy

Logika *fuzzy* adalah suatu logika yang mempunyai banyak nilai untuk mendefinisikan keadaan konvensional seperti nilai benar dan salah, hitam dan putih, dan sebagainya. Logika *fuzzy* adalah peningkatan dari logika *Boolean* oleh Lofti Zadeh pada tahun 1965 melalui tulisannya tentang teori himpunan *fuzzy*. Logika *fuzzy* dapat diterapkan pada bidang teori kendali hingga inteligensi buatan. Pada umumnya, metode logika *fuzzy* digunakan pada permasalahan sistem yang mengandung unsur ketidaktepatan, ketidakpastian, dan lain sebagainya. Logika *fuzzy* menjembatani bahasa mesin disesuaikan dengan bahasa manusia yang menekankan pada arti dan dikembangkan berdasarkan bahasa alami manusia.

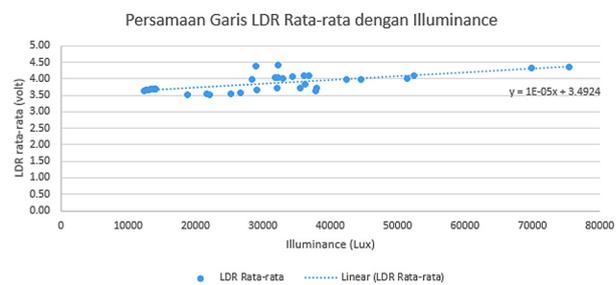
Pada logika *fuzzy*, representasi kurva segitiga digunakan untuk menganggotakan fungsi pada setiap *membership*. Kurva tersebut ditunjukkan pada Gambar 5. Berdasarkan gambar tersebut, *range* nilai *membership* dari titik *a* hingga titik *c*, dengan titik *b* sebagai puncak. Berdasarkan kurva tersebut, maka diperoleh himpunan keanggotaan yang dapat ditulis sebagai berikut:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & ; \quad x \leq a \text{ dan } x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a} & ; \quad a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & ; \quad b < x < c \end{cases} \quad (3)$$

dimana *a* adalah domain terkecil dengan nilai derajat keanggotaan nol, *b* adalah domain dengan nilai derajat keanggotaan satu, *c* adalah domain terbesar dengan nilai derajat keanggotaan nol, dan *x* adalah *input* yang akan dijadikan bilangan *fuzzy*.



Gambar 6. Pengambilan data dengan alat ukur



Gambar 7. Persamaan *linear* antara nilai *illuminance* dengan *irradiance*

D. Daya Listrik

Daya listrik yang diperoleh oleh suatu *photovoltaic* (PV) dapat dihitung menggunakan nilai *irradiance*. Nilai *irradiance* tersebut diperoleh dengan melakukan konversi dari nilai *illuminance* dan nilai *Light Dependant Resistor* (LDR). Proses konversi tersebut dilakukan dengan menggunakan regresi linear. Sebelum dilakukan perhitungan, dilakukan pengambilan dataset terlebih dahulu. Pengambilan dataset dilakukan menggunakan alat ukur berupa *lux meter* dan *solar power meter*. Alat ukur diletakkan sejajar dan menghadap ke atas. Peletakan alat ukur dapat dilihat pada Gambar 6, yaitu dengan ketinggian peletakan yang sama.

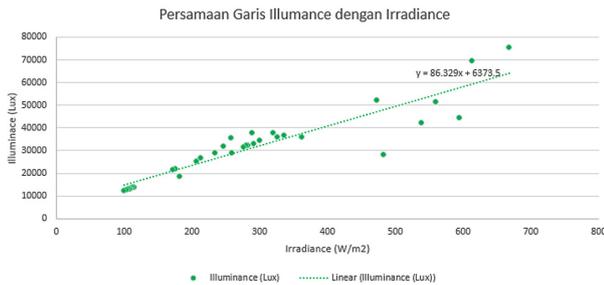
Nilai *irradiance* merupakan besaran radiometri sedangkan nilai LDR dan *illuminance* merupakan besaran fotometri. Pengkonversian besaran fotometri, yaitu LDR dan *illuminance*, ke besaran radiometri secara berurutan berdasarkan hasil dari grafik pada Gambar 7 dan Gambar 8, adalah sebagai berikut:

$$E_e = \frac{x - 3.5464}{0.0011} \quad (4)$$

$$E_e = \frac{E_v - 6373.5}{86.329} \quad (5)$$

dimana *x* adalah nilai LDR rata-rata dalam volt, *E_e* adalah nilai *irradiance* dalam W/m², dan *E_v* adalah nilai *illuminance* dalam lux.

Persamaan (4) merupakan konversi dari nilai LDR rata-rata menjadi nilai *irradiance*, yang diperoleh melalui



Gambar 8. Persamaan *linear* antara nilai LDR rata-rata dengan *illuminance*

perhitungan persamaan linear pada Gambar 7. Sedangkan Persamaan (5) merupakan konversi dari nilai *illuminance* menjadi nilai *irradiance*, yang diperoleh melalui perhitungan persamaan linear pada Gambar 8. Proses konversi menghasilkan rata-rata *error* sebesar 19,01%.

Berdasarkan nilai *irradiance* yang diperoleh, maka dapat dihitung potensi daya Pembangkit Listrik Pembangkit Surya (PLTS) berdasarkan ukuran PV yang dipakai. Rumus menghitung potensi PLTS menggunakan persamaan berikut [3]:

$$P = E_e A \quad (6)$$

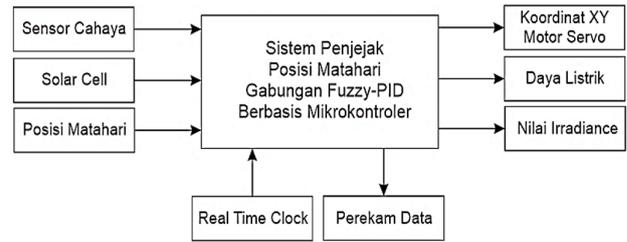
dimana P adalah daya listrik dalam Watt dan A adalah luas penampang PV dalam m^2 .

III. METODE

A. Desain Sistem

Pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode F-PID pada *sun tracker* guna memaksimalkan efektivitas daya yang diperoleh. Daya yang dihasilkan dari penggabungan dua metode ini, akan dikomparasikan dengan *sun tracker* terdahulu menggunakan metode pengendali PID dan logika *fuzzy*. Komparasi daya ini akan menjadi fokus pada penelitian ini, dengan melihat hasil dari penggabungan dua metode ini, efektif atau tidak. Pergerakan *sun tracker* dilakukan dengan mengatur putaran dari kedua motor servo, yang dimana *motor servo* 1 mengatur pergerakan pada sumbu- x , dan *motor servo* 2 mengatur pergerakan pada sumbu- y . Putaran kedua motor servo tersebut dilakukan berdasarkan pembacaan nilai dari ketiga LDR. Data waktu, data LDR, data servo, dan data daya yang diperoleh dari panel surya selanjutnya ditulis ke dalam *datalogger* [8]-[12].

Pada Gambar 9 memperlihatkan alur dari penelitian dari *sun tracker* ini. Desain logika *fuzzy* dikerjakan menggunakan *Fuzzy Inference System* (FIS) yang ada pada *software* Matlab. *Software* Matlab ini berfungsi untuk membantu fuzzifikasi dan defuzzifikasi secara otomatis. Proses fuzzifikasi dan defuzzifikasi dapat dilakukan setelah meng-*input* *memberships* dan *rules*. Hasil dari proses ini menghasilkan *fis_header* yang nantinya di-*include* ke dalam program. Nilai konstanta PID diperoleh menggunakan *pidtool* yang ada pada Matlab. Nilai PID



Gambar 9. Perancangan sistem

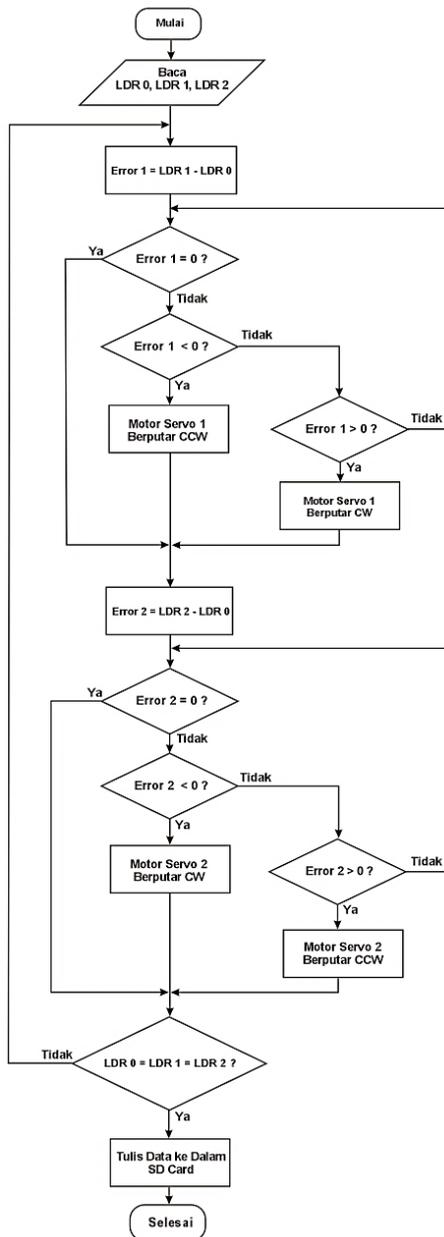
dapat di-*tuning* untuk mengatur seberapa cepat respon sistem yang diinginkan. Sebelum masuk ke *pidtool*, hal yang harus dilakukan adalah memasukkan fungsi transfer. Fungsi transfer dihitung berdasarkan sistem mekanik dari *sun tracker*.

Hasil dari proses ini menghasilkan nilai konstanta P , I dan D . Setelah mendapatkan *fis_header* dan konstanta PID, maka proses selanjutnya adalah memprogramnya ke dalam mikrokontroler ATmega328P melalui *software* Arduino IDE. Nilai konstanta P , I dan D dimasukkan ke dalam program sebagai nilai deklarasi, sedangkan *fis_header* dimasukkan sebagai *header* program. Pada tahap akhir penelitian ini adalah mengkomparasi dan menganalisis *output* daya yang dihasilkan oleh panel surya menggunakan tiga metode yang berbeda. Mendata semua proses yang dilakukan *sun tracker*, seperti daya yang dihasilkan, nilai intensitas cahaya, pergerakan motor servo, dan waktu. Data tersebut lalu disimpan ke dalam *datalogger*. Melalui *datalogger* tersebut, dilakukan analisis dan kinerja sistem sehingga diperoleh kesimpulan penelitian.

Pada Gambar 9 merupakan diagram perancangan sistem, dimana pada tahap awal yaitu membuat desain dari *sun tracker*. Dalam merancang kendali PID, diperlukan fungsi transfer. Fungsi tersebut dihitung menggunakan *software* Matlab. Sama seperti PID, dalam merancang logika *fuzzy* diperlukan FIS yang juga terdapat di dalam Matlab. Setelah diperoleh konfigurasi kendali PID dan logika *fuzzy*, maka selanjutnya digabungkan ke dalam satu program.

B. Perancangan Proses

Diagram alur dari sistem *sun tracker* dapat dilihat pada Gambar 10. Berdasarkan diagram tersebut, dapat diketahui bahwa sistem *sun tracker* memiliki dua subsistem, dimana masing-masing subsistem bertugas untuk menggerakkan satu buah motor servo. Masing-masing subsistem mencari nilai *error* yang terjadi. Pada subsistem yang pertama, nilai *error* didapat dengan mencari selisih nilai antara LDR 0 dengan LDR 1, sedangkan pada subsistem kedua, nilai *error* didapat dengan mencari nilai selisih antara LDR 0 dengan LDR 2. Nilai *error* tersebut menjadi acuan ke arah mana dan ke sudut berapa motor servo akan berputar. Jika tidak terdapat nilai *error* lagi pada kedua subsistem, maka data tegangan dan arus yang dihasilkan oleh panel surya selanjutnya direkam.

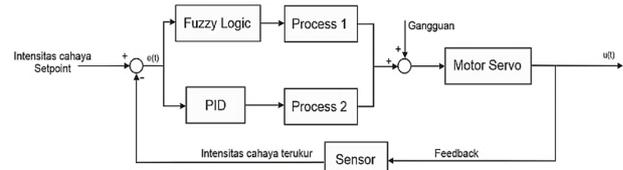


Gambar 10. Diagram alur sun tracker

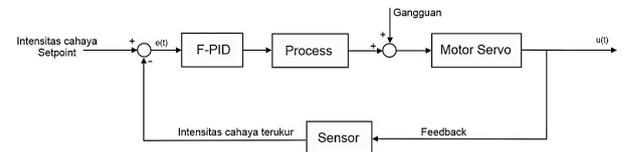
C. Perancangan PID dan Fuzzy

Metode F-PID ini berguna untuk memperkecil kesalahan yang terjadi pada tiap-tiap metode, sehingga kekurangan dari satu metode dapat diperbaiki oleh metode yang lain. Penelitian ini menggunakan metode logika Fuzzy yang diprogram melalui FIS (Fuzzy Inference System) pada Matlab, kemudian file FIS ini dikonversikan menjadi bahasa pemrograman Arduino. Pada kendali PID, diperlukan fungsi transfer sebelum memperoleh konstanta P, I dan D. Fungsi transfer dapat diperoleh dengan menghitung sistem mekanik pada sun tracker ataupun dengan analisis sinyal dengan metode Ziegler-Nichols [15]:

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{1}{0,00006s^2 - 0,0588} \quad (7)$$



Gambar 11. Diagram blok dengan dua kontroler yang terpisah



Gambar 12. Diagram blok dengan dua kontroler yang tergabung

dimana $\theta(s)$ adalah fungsi output, $U(s)$ adalah fungsi input, dan s adalah domain waktu.

Pada Persamaan (7) merupakan fungsi transfer untuk sistem sun tracker. Sedangkan pada logika Fuzzy, digunakan metode Centroid dengan menentukan nilai membership dan rules-nya.

Setelah diperoleh fungsi transfer, maka proses selanjutnya adalah men-tuning nilai konstanta PID [13],[14]. Konstanta di-tuning agar sistem sesuai dengan kebutuhan yang diinginkan, seperti mengurangi overshoot, menaikkan rise time, dan mempercepat settling time. Proses tuning tersebut dilakukan menggunakan software Matlab R2016a pada pidtool. Sistem sun tracker merupakan sistem kendali loop tertutup, dimana sistem ini mengandalkan feedback sebagai input untuk mengetahui nilai error.

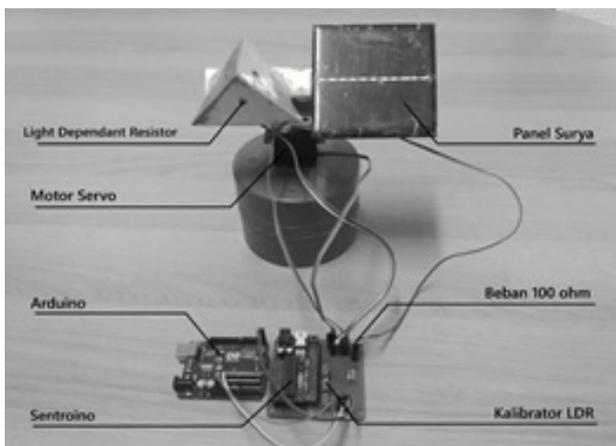
Diagram blok sistem sun tracker ditunjukkan pada Gambar 11 dan Gambar 12, dimana intensitas cahaya sebagai setpoint, LDR sebagai feedback, dan sudut putaran motor servo sebagai output. Pada Gambar 11 merupakan sistem sun tracker dengan dua pengendali yang terpisah. Masing-masing kontroler mengendalikan plant yang berbeda dengan output yang berbeda juga. Kelemahan dari sistem ini adalah sistem tidak bekerja secara sinkron [15]-[17].

Pada Gambar 11 menunjukkan diagram blok sun tracker dengan dua kontroler yang digabungkan, kendali PID dan logika Fuzzy. Kedua metode kendali ini memproses plant yang sama secara bersamaan dan dapat bekerja secara sinkron. Metode gabungan ini disebut F-PID [18].

Metode kendali PID dan logika Fuzzy bekerja berdasarkan input intensitas cahaya dari sensor LDR berdasarkan pseudocode yang ditunjukkan pada Gambar 13. Setelah proses perhitungan, dihasilkan nilai output sudut putaran motor servo. Dengan demikian, pembacaan sensor LDR akan berubah juga. Maka dari itu, sistem melakukan feedback untuk mengecek apakah masih terdapat error. Jika masih terdapat error, maka sistem akan melakukan perhitungan ulang. Namun jika tidak terdapat error, maka eksekusi dianggap selesai. Sistem akan berhenti ketika tidak terdapat error. Sistem ini bekerja dengan mengecilkan nilai error hingga mencapai nilai minimum [19]-[21].

Pseudocode Sun Tracker	
1.	Inisialisasi sensor LDR
2.	Inisialisasi motor servo
3.	Baca nilai intensitas cahaya pada masing-masing LDR
4.	Hitung sudut putaran motor servo dengan Kendali PID
5.	Hitung sudut putaran motor servo dengan Logika Fuzzy
6.	Gabungkan output PID dan Fuzzy
7.	Output gabungan PID dan Fuzzy memutar motor servo
8.	Baca kembali nilai intensitas cahaya pada masing-masing LDR
9.	Jika ada <i>error</i> , hitung kembali
10.	Nilai output memutar motor servo
11.	Jika tidak ada <i>error</i> , maka eksekusi selesai

Gambar 13. Pseudocode program sun tracker



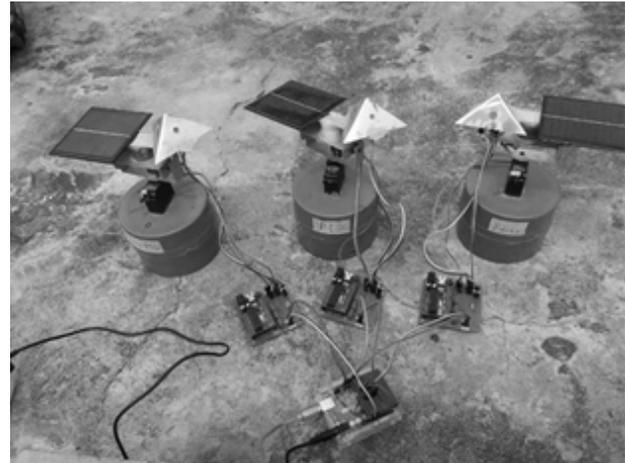
Gambar 14. Prototipe sun tracker

D. Prototipe Sistem

Hasil dari rancangan sistem yaitu sebuah *sun tracker* yang mampu bergerak mengikuti sumber cahaya matahari agar daya yang dihasilkan oleh panel surya bisa maksimal. Hasil rancangan dari sistem *sun tracker* dapat dilihat pada Gambar 14.

Sistem ini menggunakan tiga buah sensor LDR (*Light Dependant Resistor*) yang berfungsi sebagai *input* pada sistem, Arduino uno yang merupakan mikrokontroler yang berfungsi untuk pengolahan data, dua buah penggerak motor servo yang berfungsi sebagai *output* dan aktuator (penggerak). Sistem ini juga dilengkapi *datalogger* yang dapat mencatat semua data yang diperoleh selama sistem ini bekerja, seperti data intensitas cahaya, data tegangan dan arus yang dihasilkan oleh panel surya, dan data pergerakan motor servo [22]-[24]. Hasil dan Pembahasan

Komparasi dilakukan untuk mengetahui tingkat kinerja pada masing-masing prototipe. Proses komparasi dilakukan dengan prototipe dan metode pada penelitian terdahulu [1][2]. Metode yang dikomparasi yaitu metode kendali PID, logika fuzzy, dan metode F-PID. Komparasi dilakukan dengan meletakkan ketiga sun tracker dibawah matahari seperti yang terlihat pada Gambar 15. Aspek yang dikomparasi yaitu tegangan, arus dan daya. Pengujian ini menggunakan beban resistif sebesar 47 Ω . Berdasarkan pengujian yang dilakukan, didapatkan data



Gambar 15. Komparasi sun tracker dengan metode berbeda

statistik tegangan output photovoltaic seperti yang terlihat pada Tabel 1.

Pada grafik di Gambar 16, terlihat bahwa daya yang dihasilkan menggunakan metode F-PID mampu memperoleh daya maksimal ketika matahari mulai bergerak turun, pada pukul 4:00 PM sampai 5:30 PM. Berdasarkan data pada Tabel 1, nilai tegangan maksimum yang dihasilkan oleh metode PID dan metode F-PID mencapai 5 volt, sedangkan pada metode *fuzzy*, tegangan maksimum yang dihasilkan belum mencapai 5 volt. Pada saat menjelang matahari terbenam, metode F-PID menghasilkan tegangan yang lebih besar dibandingkan kedua metode lainnya. Pada metode PID dan metode F-PID dapat mencapai daya sebesar 0,6 W. Sedangkan pada metode *fuzzy*, daya yang dihasilkan dibawah 0,6 W.

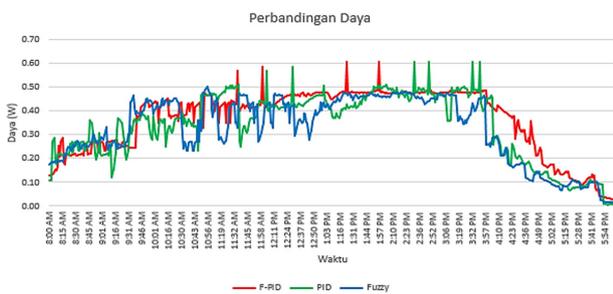
Pada Gambar 17 merupakan grafik perbandingan selisih diantara ketiga metode yang digunakan. Pada perbandingan metode F-PID dengan metode PID, nilai selisih terbesar terjadi pada pukul 06:00 PM dengan persentase selisih sebesar 45,29% dan selisih terkecil terjadi pada pukul 02:00 PM dengan persentase sebesar 0,60%. Sedangkan pada perbandingan metode F-PID dengan metode fuzzy, nilai selisih terbesar terjadi pada pukul 04:00 PM dengan persentase selisih sebesar 25,87% dan selisih terkecil terjadi pada pukul 02:00 PM dengan persentase selisih sebesar 1,62%.

IV. KESIMPULAN

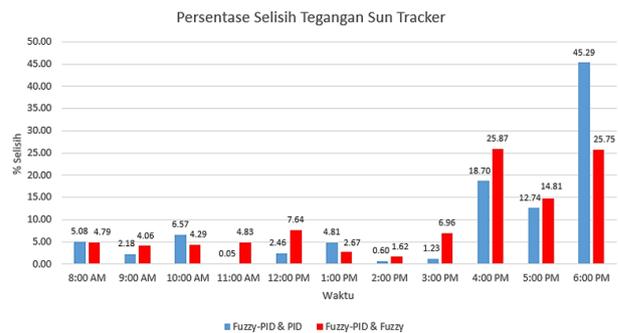
Berdasarkan hasil penelitian telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa selisih antara nilai LDR0 dan LDR1 sudah minimum namun selisih antara LDR0 dan LDR2 belum minimum. Hal tersebut mengakibatkan motor servo sumbu-x berputar lebih banyak dibandingkan motor servo pada sumbu-y. Tegangan puncak yang dihasilkan panel surya dengan metode F-PID sebesar 5,3V, arus puncak sebesar 0,11 A, dan daya puncak sebesar 0,61 W dengan beban resistif sebesar 47 Ω . Metode F-PID mampu memperoleh daya maksimal ketika matahari mulai bergerak turun, yaitu pada pukul 4:00 PM sampai 5:30 PM.

Tabel 1. Perbandingan statistik tegangan output photovoltaic

Time	Rata-Rata			Max			Min			Standar Deviasi		
	F-PID	PID	Fuzzy	F-PID	PID	Fuzzy	F-PID	PID	Fuzzy	F-PID	PID	Fuzzy
8:00 AM	3.18	3.34	3.33	3.66	4.12	3.77	2.46	2.26	2.87	0.33	0.38	0.26
9:00 AM	3.79	3.71	3.95	4.57	4.33	4.67	3.30	2.38	3.35	0.46	0.50	0.48
10:00 AM	4.41	4.12	4.22	4.72	4.72	4.86	3.94	4.72	3.30	0.20	0.33	0.50
11:00 AM	4.46	4.46	4.24	5.18	4.90	4.72	4.05	3.43	3.50	0.16	0.40	0.41
12:00 PM	4.64	4.53	4.29	5.25	5.25	4.72	4.42	4.33	3.63	0.13	0.16	0.28
1:00 PM	4.75	4.52	4.62	5.34	4.89	4.74	4.59	4.17	4.37	0.12	0.21	0.09
2:00 PM	4.74	4.76	4.66	4.78	5.34	4.76	4.71	4.52	4.48	0.02	0.14	0.07
3:00 PM	4.74	4.68	4.41	4.78	5.34	4.72	4.52	4.11	3.49	0.05	0.25	0.33
4:00 PM	3.85	3.13	2.85	4.50	4.67	3.72	2.77	2.36	2.19	0.54	0.59	0.49
5:00 PM	2.18	1.90	1.85	2.88	2.34	2.29	1.22	0.52	0.84	0.49	0.48	0.44
6:00 PM	1.13	0.62	0.84	1.16	0.64	0.88	1.09	0.55	0.81	0.03	0.04	0.03



Gambar 16. Komparasi daya PV



Gambar 17. Persentase selisih tegangan sun tracker

REFERENSI

[1] Y. Away and M. Ikhsan, “Dual-axis sun tracker sensor based on tetrahedron geometry,” *Elsevier: Automation in Construction*, vol. 73, pp. 175–183, Jan. 2017.

[2] Y. Away, S. A. Rahman, T. Isma and M. Firdaus, “Penerapan logika fuzzy pada sun tracker dual axis berbasis sensor tetrahedron geometri,” in *Proc. Seminar Nasional dan Expo Teknik Elektro*, Oct. 2017, pp. 74-80.

[3] Sun Surya Indonesia. (view 29 April 2022). Sistem off grid, on grid PLTS. [Online]. Available: <http://sunsuryaindonesia.com/info/sistem-off-grid-on-grid-tie>.

[4] Y. Away, S. A. Rahman, T. Isma, and M. Firdaus, “Optimum design and performance comparison between pid and fuzzy algorithm for sun tracker based on tetrahedron geometry,” in *Proc. Inter. Conf. on Elec. Engineering and Informatics*, Sep. 2018, pp. 40-44.

[5] Wikipedia. (view 3 April 2022). Transformasi Laplace. [Online]. Available: https://id.wikipedia.org/wiki/Transformasi_Laplace.

[6] Speedy Plasgroup, (view 4 April 2017). Laplace Table. [Online]. Available: <http://tresumes.speedyplasgroup.com/laplace-table/>.

[7] Wordpress. (view 3 April 2022). Kestabilan sistem kendali. [Online]. Available: <https://herudibiyolaksono.files.wordpress.com/2011/03/kestabilan-sistem-kendali.pdf>.

[8] J. Coburn. (view 3 April 2022). Getting Started with Arduino a Beginner’s Guide. [Online]. Available: <https://www.makeuseof.com/tag/getting-started-with-arduino-a-beginners-guide/>.

[9] M. D. Rezki, *Perancangan pengendalian lampu di rumah menggunakan bluetooth berbasis arduino uno dipantau melalui smartphone*, Jakarta, Indonesia: Universitas Mercubuana, 2015.

[10] Arduino. (view 19 Agustus 2022). [Online]. An overview of different UNO boards. Available: <https://support.arduino.cc/hc/en-us/articles/7901453165724-An-overview-of-different-UNO-boards?queryID=undefined>

[11] Teknik Elektronika. (view 8 Mei 2022). Pengertian LDR light-dependent resistor cara mengukur LDR [Online]. Available: <https://teknikelektronika.com/pengertian-ldr-light-dependent-resistor- cara-mengukur-ldr/>.

[12] A. Huda. (view 9 Mei 2022). Mengenal motor servo. [Online]. Available: <https://akbarulhuda.wordpress.com/2010/04/01/mengenal-motor-servo/>.

[13] A. H. Bin Abd Malik, *Sistem pengawal inverted pendulum: perbandingan diantara pengawal PID Dan Pengawal State Feedback*, Malaka, Malaka, Malaysia: Universiti Teknikal Malaysia, 2008.

[14] A. Novandri, Roslidar, and A. Rahman, “Rancang bangun robot self balancing berbasis mikrokontroler Atmega328P dengan kendali PID,” *J. Komputer, Inf. Teknol. dan Elektro*, vol. 2, no. 2, pp. 15–23, 2017.

[15] M. Taherbaneh, H.G. Fard, A.H. Rezaie, and S. Karbasian, “Combination of fuzzy-based maximum power point tracker and sun tracker for deployable solar panels in photovoltaic systems,” in *Proc. IEEE Int. Fuzzy Syst. Conf.*, July 2007, pp. 23–26.

[16] F. Pineda, C.A. Arredondo, “Design and implementation of sun tracker prototype for solar module positioning,” in *Proc. 38th IEEE Photovolt. Spec.*, June 2012, pp. 3–8.

[17] G. M. Tina, F. Arcidiacono, A. Gagliano, “Intelligent sun-tracking system based on multiple photodiode sensors for maximisation of photovoltaic energy production,” *Math. Comput. Simul.* vol. 91, pp. 16–28, May 2017.

[18] R. Tejwani, C.S. Solanki, “360° sun tracking with automated

- cleaning system for solar PV modules,” in *Proc. 35th IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, June 2010, pp. 20–25
- [19] F. Afrin, T. Titirsha, S. Sanjidah, A.R.M. Siddique, and, Rabbani, “Installing dual axis solar tracker on rooftop to meet the soaring demand of energy for developing countries,” in *Proc. IEEE India Conf.*, Dec. 2013, pp.13–15.
- [20] S. Kivrak, M. Gunduzalp, and F. Dincer, “Theoretical and experimental performance investigation of a two-axis solar tracker under the climatic condition of Denizli,” *Przegląd Elektro Techniczny (Electrical Review)*, Turkey, 2012.
- [21] Y. Yao, Y. Hu, S. Gao, G. Yang, D. Jinguang, “A multipurpose dual-axis solar tracker with two tracking strategies,” *Elsevier: Renew. Energy*, vol. 72, pp. 88–98, Dec. 2014.
- [22] N. Othman, M.I.A. Manan, Z. Othman, and S.A.M. Al Junid, “Performance analysis of dual- axis solar tracking system”, in *Proc. IEEE Int. Conf. Control Syst. Comput. Eng.*, Dec. 2013, pp. 370–375.
- [23] S. Fadil, A.C. Capar, K. Caglar, “Two axis solar tracker design and implementation,” in *Proc. 8th Int. Conf. Electr. Electron. Eng.*, Nov. 2013, pp. 28–30.
- [24] A. Novandri, Melinda, and Y. Away, “PID Controllers Performance on Dual Axis Tracking with Tetrahedron Based Sensor,” *Kinet. Game Technol. Inf. Syst. Comput. Network, Comput. Electron. Control*, vol. 7, no. 4, pp. 371–382, Nov. 2022.