

# Manajemen Kontrol Beban Ac Pada Keluaran Daya Photovoltaic Menggunakan Logika Fuzzy

<sup>1</sup>Nana Sutarna, <sup>2</sup>Muhammad Novriaz Zikri, <sup>3</sup>Rangga Prabu Zaky  
<sup>1,2,3,4</sup>Elektronika Industri, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Jakarta  
Jl. Prof. Dr. G.A. Siwabessy, Kampus UI, Depok  
[nana.sutarna@elektro.pnj.ac.id](mailto:nana.sutarna@elektro.pnj.ac.id)  
[muhammad.novriaz.zikri.te22@mhs.w.pnj.ac.id](mailto:muhammad.novriaz.zikri.te22@mhs.w.pnj.ac.id)  
[rangga.prabu.zaky.te22@mahasiswa.pnj.ac.id](mailto:rangga.prabu.zaky.te22@mahasiswa.pnj.ac.id)

## Abstrak

Pemanfaatan energi surya melalui sistem photovoltaic (PV) menawarkan solusi menjanjikan untuk mengatasi keterbatasan energi fosil. Namun, fluktuasi daya keluaran PV akibat perubahan intensitas cahaya matahari menjadi tantangan signifikan. Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan sistem kontrol beban *Alternating Current* (AC) pada keluaran daya photovoltaic menggunakan logika fuzzy berbasis mikrokontroler ESP32, dilengkapi dengan fitur monitoring *real-time*. Sistem ini memanfaatkan sensor PZEM-017 untuk mengukur parameter listrik DC dari panel surya dan PZEM-004T untuk memantau parameter listrik AC dari beban. Algoritma logika fuzzy tipe Sugeno dirancang untuk secara cerdas mengelola aktivasi dan deaktivasi beban AC (lampu) berdasarkan ketersediaan daya PV. Fitur monitoring *real-time* diimplementasikan melalui aplikasi Blynk yang menampilkan *dashboard* visual berisi daya, tegangan, dan arus PV serta beban, juga status operasional beban. Data monitoring juga disimpan dalam bentuk *datasheet* historis untuk analisis kinerja sistem lebih lanjut. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat beradaptasi secara efektif terhadap perubahan kondisi cuaca, dengan akurasi kontrol fuzzy mencapai 99,39% dibandingkan simulasi MATLAB. Sistem ini berhasil menunjukkan kapabilitas dalam manajemen energi yang efisien dan adaptif, serta menyediakan platform monitoring yang komprehensif untuk evaluasi performa.

Kata Kunci: Photovoltaic (PV), Logika Fuzzy, Kontrol Beban AC, ESP32, Monitoring *Real-time*, PZEM-017, PZEM-004T.

## Abstract

*The utilization of solar energy through photovoltaic (PV) systems offers a promising solution to address the limitations of fossil energy. However, fluctuations in PV output power due to changes in solar light intensity pose a significant challenge. This research designs and implements an Alternating Current (AC) load control system for photovoltaic power output using fuzzy logic based on the ESP32 microcontroller, equipped with real-time monitoring features. The system utilizes the PZEM-017 sensor to measure DC electrical parameters from the solar panel and the PZEM-004T to monitor AC electrical parameters from the load. A Sugeno-type fuzzy logic algorithm is designed to intelligently manage the activation and deactivation of AC loads (lights) based on PV power availability. Real-time monitoring features are implemented via the Blynk application, displaying a visual dashboard containing PV and load power, voltage, and current, as well as load operational status. Monitoring data is also stored in a historical datasheet for further system performance analysis. Test results show that the system can effectively adapt to changing weather conditions, with fuzzy control accuracy reaching 99.39% compared to MATLAB simulation. This system successfully demonstrates its capability in efficient and adaptive energy management, as well as providing a comprehensive monitoring platform for performance evaluation.*

**Keywords:** Photovoltaic (PV), Fuzzy Logic, AC Load Control, ESP32, Real-time Monitoring, PZEM-017, PZEM-004T.

## 1. Pendahuluan

Kebutuhan akan energi listrik terus meningkat seiring dengan perkembangan teknologi dan pertumbuhan populasi. Sumber energi konvensional seperti bahan bakar fosil menghadapi tantangan besar, termasuk keterbatasan cadangan, peningkatan biaya produksi, dan dampak negatif terhadap lingkungan. Dalam upaya mengatasi tantangan tersebut, energi terbarukan,

khususnya energi surya melalui teknologi photovoltaic (PV), menjadi solusi yang menarik perhatian global. Sistem PV mampu mengonversi energi matahari menjadi listrik yang dapat digunakan untuk berbagai keperluan[1].

Namun, tantangan utama dalam pengoperasian sistem PV adalah ketidakstabilan daya yang dihasilkan akibat variasi intensitas cahaya matahari sepanjang hari. Hal ini menjadi lebih kompleks ketika daya tersebut digunakan

untuk beban-beban yang membutuhkan kestabilan, seperti perangkat *Alternating Current* (AC), termasuk peralatan rumah tangga, industri, atau komersial. Sistem kontrol konvensional seringkali tidak mampu merespons dinamika ini secara efisien, berpotensi menyebabkan ketidakstabilan beban atau pemanfaatan energi yang kurang optimal[2][3].

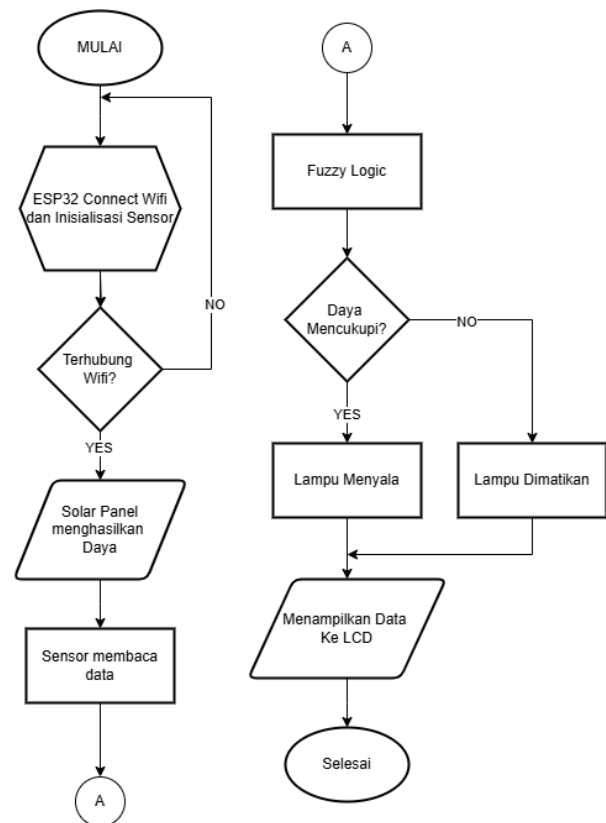
Untuk mengatasi masalah ini, diperlukan sistem kontrol manajemen yang dapat mengelola pemanfaatan daya PV secara efisien. Salah satu pendekatan yang efektif adalah menggunakan logika fuzzy, sebuah metode kontrol berbasis aturan yang mampu menangani ketidaklinieritas dalam sistem. Dengan logika fuzzy, sistem dapat mengatur distribusi daya secara cerdas sesuai dengan kebutuhan beban. Penerapan logika fuzzy dalam kontrol manajemen beban AC pada keluaran daya PV memiliki potensi besar untuk meningkatkan efisiensi sistem dan memastikan bahwa kebutuhan daya beban AC terpenuhi secara optimal[4], [5].

Logika fuzzy memerlukan data masukan yang akurat untuk mengelola berbagai kondisi. Agar pemantauan dan pengendalian sistem lebih efisien dan *real-time*, teknologi Internet of Things (IoT) diterapkan. IoT memungkinkan mikrokontroler ESP32 terhubung dengan platform pemantauan, sehingga data kondisi panel surya dan *output* sistem dapat diakses serta dianalisis langsung melalui internet. Hal ini memungkinkan pemantauan performa sistem dari jarak jauh dan penyesuaian yang diperlukan[6][6], [7], [8].

## 2. Metode Penelitian

### 2.1 Sistem Kontrol Fuzzy Logic

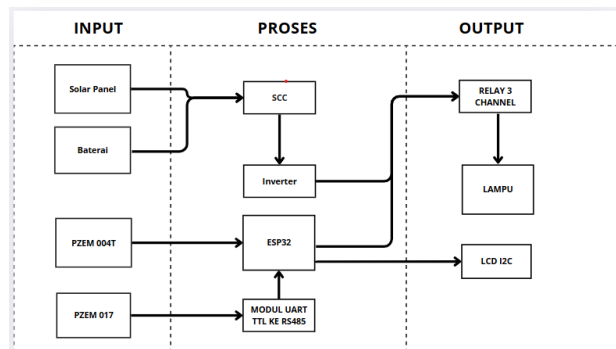
Alur kerja sistem kontrol dimulai dengan menghubungkan WiFi dan inisialisasi sensor. Apabila perangkat terhubung dan panel surya (PV) menghasilkan daya, maka sistem akan membaca data sensor dan memprosesnya menggunakan logika fuzzy untuk menentukan apakah daya yang tersedia mencukupi. Jika mencukupi, lampu akan menyala, sedangkan jika tidak mencukupi, sistem mematikan lampu, dan data ditampilkan pada layar LCD serta dikirim ke Blynk. Oleh karena itu, untuk menjawab kebutuhan tersebut, proses sistem dan metode penelitian untuk sistem pemantauan otomatis ini dapat dilihat melalui alur kerja berikut:



Gambar 2. 1 Flowchart

Metodologi sistem dimulai dengan ESP32 terhubung ke WiFi dan menginisialisasi sensor yang diperlukan. Jika koneksi WiFi belum berhasil, sistem akan terus mencoba hingga berhasil terhubung. Setelah itu, panel surya akan menghasilkan daya, dan sensor akan membaca data daya yang dihasilkan serta daya beban. Data yang terkumpul kemudian diproses oleh modul Fuzzy Logic untuk menentukan apakah ketersediaan daya mencukupi. Berdasarkan hasil analisis ini, lampu akan dikontrol, yaitu dinyalakan atau dimatikan, sesuai dengan kebutuhan. Semua data penting juga ditampilkan ke LCD secara *real-time*, dan keseluruhan proses ini berulang secara otomatis.

Gambar diagram blok dapat dilihat seperti gambar di bawah ini:



Gambar 2. 2 Blok Diagram

Arsitektur sistem kontrol beban AC pada keluaran daya photovoltaic ini dirancang secara modular dengan tiga segmen utama: Input, Proses, dan Output. Pada segmen Input, Solar Panel dan Baterai berfungsi sebagai sumber energi, sementara sensor PZEM 004T dan PZEM 017 mengumpulkan data kelistrikan. Segmen Proses adalah inti kendali sistem, di mana SCC (Solar Charge Controller) mengatur pengisian baterai dan Inverter mengubah daya DC ke AC. Modul UART TTL ke RS485 memfasilitasi komunikasi data sensor, dan ESP32 sebagai otak sistem memproses data serta menerapkan logika fuzzy. Terakhir, segmen Output mengimplementasikan kontrol dan menampilkan informasi. Relay 3 Channel menerima perintah dari ESP32 untuk mengaktifkan atau menonaktifkan Lampu sebagai beban. Informasi penting ditampilkan pada LCD I2C secara lokal, memberikan *feedback* langsung kepada pengguna.

## 2.2. Realisasi Alat



Gambar 2. 3 Realisasi Alat

Realisasi pemodelan sistem kontrol beban AC pada keluaran daya photovoltaic ini terbagi menjadi tiga unit blok utama, yaitu unit input, proses, dan output. Unit input bertanggung jawab untuk mengumpulkan energi dan data dari lingkungan, di mana Solar Panel berfungsi sebagai penangkap energi matahari utama yang kemudian energinya disimpan dalam Baterai. Selain itu, unit ini juga mencakup sensor PZEM 004T untuk

mengukur parameter kelistrikan AC dari beban, serta sensor PZEM 017 yang khusus mengukur parameter kelistrikan DC dari panel surya.

Selanjutnya, unit blok proses merupakan inti kendali dan pengolahan data dalam sistem. Di dalamnya terdapat SCC (Solar Charge Controller) yang mengatur aliran daya dari panel surya ke baterai, dan Inverter berfungsi untuk mengubah daya DC yang tersimpan menjadi daya AC yang dapat digunakan. Untuk komunikasi data yang spesifik, Modul UART TTL ke RS485 digunakan sebagai jembatan antara sensor PZEM 017 dan mikrokontroler. Otak dari unit ini adalah ESP32, yang menerima semua data sensor, memprosesnya menggunakan logika fuzzy, dan membuat keputusan kontrol. Terakhir, unit blok output mengimplementasikan keputusan kontrol dan menampilkan informasi kepada pengguna. Relay 3 Channel menerima sinyal dari ESP32 untuk mengendalikan Lampu sebagai beban AC, menyalakan atau mematikannya sesuai ketersediaan daya. Selain itu, LCD I2C berfungsi untuk menampilkan informasi penting secara lokal, seperti status daya dan beban, memberikan *feedback* langsung dari sistem.

## 3. Pembahasan

Pengujian sistem dilakukan untuk memvalidasi performa dan keandalan dari setiap modul yang telah diimplementasikan. Metodologi pengujian dibagi menjadi dua kategori utama:

### 3.1. Pengujian Manajemen Kontrol Beban AC Pada Keluaran Daya Photovoltaic Menggunakan Logika Fuzzy

Penelitian ini bertujuan untuk merancang, mengimplementasikan, dan memantau sistem kontrol distribusi daya photovoltaic ke beban AC secara *real-time* menggunakan logika fuzzy berbasis mikrokontroler ESP32.

### 3.2. Hasil Pengujian Perbandingan Output Fuzzy Sinyal Kontrol Dengan Simulasi

tujuan dari pengujian perbandingan *output* Fuzzy Sinyal Kontrol dengan Simulasi adalah untuk membandingkan hasil *output* fuzzy sinyal kontrol dari perangkat ESP32 dengan hasil simulasi logika fuzzy di MATLAB.

Tabel 3. 1 Pengujian Manajemen Kontrol Beban Ac Pada Keluaran Daya Photovoltaic Menggunakan Logika Fuzzy

| No | Daya PV (W) | Daya Beban (W) | Tegangan Inverter (V) | Sinyal Kontrol Output Fuzzy | Beban Lampu |    |    |
|----|-------------|----------------|-----------------------|-----------------------------|-------------|----|----|
|    |             |                |                       |                             | L1          | L2 | L3 |
| 1  | 44,9        | 21,9           | 225,5                 | 94                          | ON          | ON | ON |
| 2  | 45,5        | 18,4           | 229,7                 | 87                          | ON          | ON | ON |
| 3  | 39,8        | 18,2           | 228,6                 | 81                          | ON          | ON | ON |
| 4  | 42,3        | 15,9           | 229,9                 | 78                          | ON          | ON | ON |
| 5  | 46,3        | 18,2           | 230,7                 | 86                          | ON          | ON | ON |

| No | Daya PV (W) | Daya Beban (W) | Tegangan Inverter (V) | Sinyal Kontrol Output Fuzzy | Beban Lampu |     |     |
|----|-------------|----------------|-----------------------|-----------------------------|-------------|-----|-----|
|    |             |                |                       |                             | L1          | L2  | L3  |
| 6  | 43,2        | 16,1           | 237                   | 80                          | ON          | ON  | ON  |
| 7  | 36,4        | 17,8           | 227,8                 | 76                          | ON          | ON  | ON  |
| 8  | 44          | 17,6           | 231,9                 | 84                          | ON          | ON  | ON  |
| 9  | 20,3        | 18,3           | 231,2                 | 54                          | ON          | ON  | ON  |
| 10 | 18,8        | 15,8           | 229,1                 | 46                          | ON          | OFF | OFF |
| 11 | 20,9        | 15             | 231                   | 49                          | ON          | OFF | OFF |
| 12 | 14,4        | 18,7           | 229,9                 | 43                          | ON          | OFF | OFF |
| 13 | 23,5        | 15,3           | 230,6                 | 52                          | ON          | ON  | OFF |
| 14 | 40          | 17,7           | 231,9                 | 80                          | ON          | ON  | ON  |
| 15 | 42,6        | 20,3           | 227,1                 | 86                          | ON          | ON  | ON  |
| 16 | 43,3        | 18,1           | 230,2                 | 83                          | ON          | ON  | ON  |
| 17 | 43,2        | 17,7           | 230,7                 | 83                          | ON          | ON  | ON  |
| 18 | 43,4        | 18,2           | 229,8                 | 84                          | ON          | ON  | ON  |
| 19 | 42          | 18,1           | 229,3                 | 81                          | ON          | ON  | ON  |
| 20 | 43,7        | 18,1           | 230,3                 | 84                          | ON          | ON  | ON  |
| 21 | 41,8        | 14             | 232,3                 | 74                          | ON          | ON  | OFF |
| 22 | 22,3        | 15,3           | 227,5                 | 50                          | ON          | OFF | OFF |
| 23 | 14,3        | 11,5           | 230                   | 40                          | ON          | OFF | OFF |
| 24 | 18,2        | 11             | 229,7                 | 46                          | ON          | OFF | OFF |
| 25 | 38,3        | 13,6           | 231,4                 | 69                          | ON          | ON  | OFF |
| 26 | 30,9        | 12,5           | 229,9                 | 60                          | ON          | ON  | OFF |
| 27 | 40,5        | 13,7           | 229,9                 | 72                          | ON          | ON  | OFF |
| 28 | 38,3        | 13,6           | 229,3                 | 69                          | ON          | ON  | OFF |
| 29 | 40,3        | 13,6           | 230,4                 | 72                          | ON          | ON  | OFF |
| 30 | 38,8        | 19,2           | 228,2                 | 78                          | ON          | ON  | ON  |
| 31 | 37,1        | 20,5           | 227,5                 | 77                          | ON          | ON  | ON  |
| 32 | 30,9        | 14,9           | 229,6                 | 61                          | ON          | ON  | OFF |
| 33 | 28,5        | 13,7           | 230,1                 | 57                          | ON          | ON  | OFF |
| 34 | 21,3        | 10,6           | 230                   | 49                          | ON          | OFF | OFF |
| 35 | 17,9        | 10,9           | 232,2                 | 45                          | ON          | OFF | OFF |
| 36 | 19,8        | 10,6           | 229,5                 | 46                          | ON          | OFF | OFF |
| 37 | 11,6        | 10,7           | 230                   | 38                          | ON          | OFF | OFF |
| 38 | 13,1        | 10,4           | 230                   | 40                          | ON          | OFF | OFF |
| 39 | 13,5        | 10,9           | 229,5                 | 40                          | ON          | OFF | OFF |
| 40 | 27,6        | 13,9           | 228,9                 | 56                          | ON          | ON  | OFF |
| 41 | 12,7        | 10,8           | 228,9                 | 39                          | ON          | OFF | OFF |
| 42 | 12,1        | 11,5           | 230,2                 | 39                          | ON          | OFF | OFF |
| 43 | 13          | 11,3           | 231,1                 | 40                          | ON          | OFF | OFF |
| 44 | 14,2        | 11,3           | 230,8                 | 41                          | ON          | OFF | OFF |
| 45 | 12,5        | 11,5           | 229,3                 | 39                          | ON          | OFF | OFF |
| 46 | 12          | 11,6           | 229,6                 | 39                          | ON          | OFF | OFF |
| 47 | 13,7        | 11,6           | 230,1                 | 40                          | ON          | OFF | OFF |

| No | Daya PV (W) | Daya Beban (W) | Tegangan Inverter (V) | Sinyal Kontrol Output Fuzzy | Beban Lampu |     |     |
|----|-------------|----------------|-----------------------|-----------------------------|-------------|-----|-----|
|    |             |                |                       |                             | L1          | L2  | L3  |
| 48 | 15,1        | 11,9           | 230,3                 | 42                          | ON          | OFF | OFF |
| 49 | 12,4        | 11,5           | 230                   | 39                          | ON          | OFF | OFF |
| 50 | 16,5        | 11,9           | 232,7                 | 43                          | ON          | OFF | OFF |
| 51 | 13,4        | 11,8           | 237,9                 | 40                          | ON          | OFF | OFF |
| 52 | 14,9        | 11,9           | 237                   | 42                          | ON          | OFF | OFF |

Pada Tabel 3.1 tersebut menunjukkan hasil pemantauan sistem kontrol beban AC berbasis daya panel surya menggunakan logika fuzzy Sugeno. Data mencakup daya dari panel surya (PV), daya beban, tegangan inverter, output fuzzy (0–100), dan status nyala lampu (L1, L2, L3). Saat daya PV tinggi ( $\geq 40$  W), output fuzzy juga tinggi ( $\geq 78$ ), sehingga semua lampu menyala (L1, L2, L3 ON). Ketika daya PV menurun (sekitar 20 W atau kurang), output fuzzy turun ( $< 50$ ), sehingga hanya lampu L1 yang ON, sementara L2 dan L3 OFF. Untuk daya menengah (30–40 W), sistem hanya menyalakan L1 dan L2. Sistem fuzzy ini bekerja secara bertingkat, menyesuaikan nyala lampu berdasarkan ketersediaan daya PV. Hal ini menjaga efisiensi pemanfaatan energi dan kestabilan tegangan inverter, serta mencegah beban berlebih pada sistem

### 3.3 Hasil Perbandingan Output Fuzzy Sinyal Kontrol Dengan Simulasi

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk membandingkan dan memvalidasi kesesuaian antara hasil *output* sinyal kontrol logika fuzzy yang dihasilkan oleh perangkat ESP32 dengan hasil simulasi logika fuzzy yang dilakukan di MATLAB.

Tabel 3. 2 Hasil Perbandingan Output Fuzzy Sinyal Kontrol Dengan Simulasi

| Output Fuzzy(%) |          | Selisih | Error (%) |
|-----------------|----------|---------|-----------|
| Sinyal Kontrol  | Simulasi |         |           |
| 94              | 93,3     | 0,7     | 0,01      |
| 87              | 86,8     | 0,2     | 0         |
| 81              | 78       | 3       | 0,04      |
| 78              | 78       | 0,00    | 0,00      |
| 86              | 86,4     | 0,4     | 0,00      |
| 80              | 79,6     | 0,4     | 0,01      |
| 76              | 72       | 4       | 0,06      |
| 84              | 83,6     | 0,4     | 0,00      |
| 54              | 47,6     | 6,4     | 0,13      |
| 46              | 45,9     | 0,1     | 0,00      |
| 49              | 48,2     | 0,8     | 0,02      |
| 43              | 41       | 2       | 0,05      |

| Output Fuzzy(%)                  |          | Selisih | Error (%) |
|----------------------------------|----------|---------|-----------|
| Sinyal Kontrol                   | Simulasi |         |           |
| 52                               | 51,4     | 0,6     | 0,01      |
| 80                               | 77,5     | 2,5     | 0,03      |
| 86                               | 86,3     | 0,3     | 0,00      |
| 83                               | 83,5     | 0,5     | 0,01      |
| 83                               | 82,6     | 0,4     | 0,00      |
| 84                               | 83,8     | 0,2     | 0,00      |
| 81                               | 81,4     | 0,4     | 0,00      |
| 84                               | 84,1     | 0,1     | 0,00      |
| 74                               | 74       | 0       | 0,00      |
| 50                               | 49,8     | 0,2     | 0,00      |
| 40                               | 40,9     | 0,9     | 0,02      |
| 46                               | 45,3     | 0,7     | 0,02      |
| 69                               | 69,1     | 0,1     | 0,00      |
| 60                               | 59,3     | 0,7     | 0,01      |
| 72                               | 71,9     | 0,1     | 0,00      |
| 69                               | 69,1     | 0,1     | 0,00      |
| 72                               | 71,5     | 0,5     | 0,01      |
| 78                               | 77,8     | 0,2     | 0,00      |
| 77                               | 76,6     | 0,4     | 0,01      |
| 61                               | 61,1     | 0,1     | 0,00      |
| 57                               | 57,3     | 0,3     | 0,01      |
| 49                               | 48,7     | 0,3     | 0,01      |
| 45                               | 44,9     | 0,1     | 0,00      |
| 46                               | 47       | 1       | 0,02      |
| 38                               | 37,9     | 0,1     | 0,00      |
| 40                               | 39,6     | 0,4     | 0,01      |
| 40                               | 40       | 0       | 0,00      |
| 56                               | 56,3     | 0,3     | 0,01      |
| 39                               | 39,1     | 0,1     | 0,00      |
| 39                               | 38,4     | 0,6     | 0,02      |
| 40                               | 39,4     | 0,6     | 0,02      |
| 41                               | 40,8     | 0,2     | 0,00      |
| 39                               | 38,8     | 0,2     | 0,01      |
| 39                               | 38,3     | 0,7     | 0,02      |
| 40                               | 40,2     | 0,2     | 0,01      |
| 42                               | 41,8     | 0,2     | 0,00      |
| 39                               | 38,8     | 0,2     | 0,01      |
| 43                               | 43,3     | 0,3     | 0,01      |
| 40                               | 39,9     | 0,1     | 0,00      |
| 42                               | 41,6     | 0,4     | 0,01      |
| Rata-Rata Error                  |          |         | 0,61      |
|                                  |          |         | 99,39     |
| Akurasi = 100% - Rata-Rata Error |          |         | %         |

Hasil pengujian menunjukkan bahwa output fuzzy dari ESP32 sangat mendekati hasil simulasi MATLAB. Dari 52 data, selisih rata-rata hanya 0,61%, dengan akurasi sistem mencapai 99,39%. Perbedaan kecil yang terjadi kemungkinan disebabkan oleh pembulatan nilai atau perbedaan presisi antara ESP32 dan MATLAB. Secara keseluruhan, sistem kontrol fuzzy berhasil diimplementasikan dengan akurat dan dapat diandalkan untuk mengatur beban AC secara otomatis berbasis daya PV secara real-time.

### 3.3. Tampilan Monitoring Blynk

Tampilan Monitoring Blynk menyajikan *dashboard* komprehensif pada *smartphone* yang menampilkan data *real-time* dari sistem, termasuk Daya PV, Daya Beban, Tegangan PV, Tegangan Inverter, Arus PV, Arus Beban, dan *Output Fuzzy*. Fitur ini memungkinkan pemantauan kondisi operasional sistem secara dinamis dan intuitif dari jarak jauh.

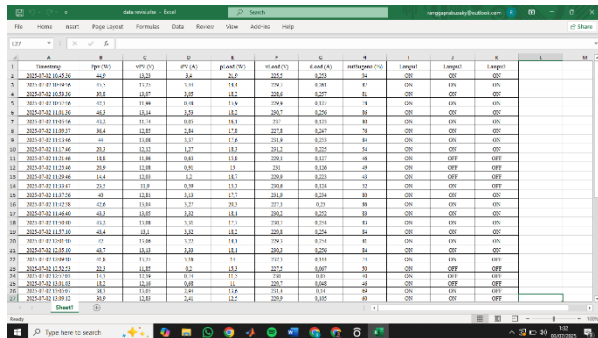


Gambar 3. 1 Tampilan Blynk

Pada tampilan monitoring beban AC di Blynk yang diambil pada jam 08.57 sampai jam 11.12 Gambar ini menampilkan sebuah ponsel yang sedang menunjukkan aplikasi "Monitoring Daya PV". Aplikasi ini menyajikan data real-time mengenai kinerja sistem panel surya. Pada layar terlihat bahwa panel surya menghasilkan daya sebesar 7.6Watt (Daya PV), dengan tegangan 12.27 Volt dan arus 0.62Ampere. Sementara itu, beban yang terhubung mengkonsumsi daya sebesar 12.20 Watt (Daya Beban) dengan arus sekitar 0.05 Ampere. Inverter mengubah tegangan dari panel surya menjadi 231.800 Volt, yang kemungkinan besar telah disesuaikan untuk kebutuhan penggunaan perangkat.

### 3.4. Data Logger

Data logger berfungsi untuk menyimpan data operasional sistem secara otomatis dan periodik dalam format *spreadsheet*, memungkinkan analisis performa jangka panjang dan pelacakan tren historis, melengkapi pemantauan instan.



| Time                | Power (W) | Current (A) | Voltage (V) | Sensor 1 | Sensor 2 | Sensor 3 | Sensor 4 | Sensor 5 | Sensor 6 | Sensor 7 | Sensor 8 | Sensor 9 | Sensor 10 |
|---------------------|-----------|-------------|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| 2024-05-08 10:00:00 | 45.2      | 0.85        | 53.1        | 23.5     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:01:00 | 45.5      | 0.86        | 53.2        | 23.6     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:02:00 | 45.8      | 0.87        | 53.3        | 23.7     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:03:00 | 46.1      | 0.88        | 53.4        | 23.8     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:04:00 | 46.4      | 0.89        | 53.5        | 23.9     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:05:00 | 46.7      | 0.90        | 53.6        | 24.0     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:06:00 | 47.0      | 0.91        | 53.7        | 24.1     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:07:00 | 47.3      | 0.92        | 53.8        | 24.2     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:08:00 | 47.6      | 0.93        | 53.9        | 24.3     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:09:00 | 47.9      | 0.94        | 54.0        | 24.4     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:10:00 | 48.2      | 0.95        | 54.1        | 24.5     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:11:00 | 48.5      | 0.96        | 54.2        | 24.6     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:12:00 | 48.8      | 0.97        | 54.3        | 24.7     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:13:00 | 49.1      | 0.98        | 54.4        | 24.8     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:14:00 | 49.4      | 0.99        | 54.5        | 24.9     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:15:00 | 49.7      | 1.00        | 54.6        | 25.0     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:16:00 | 50.0      | 1.01        | 54.7        | 25.1     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:17:00 | 50.3      | 1.02        | 54.8        | 25.2     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:18:00 | 50.6      | 1.03        | 54.9        | 25.3     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:19:00 | 50.9      | 1.04        | 55.0        | 25.4     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:20:00 | 51.2      | 1.05        | 55.1        | 25.5     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:21:00 | 51.5      | 1.06        | 55.2        | 25.6     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:22:00 | 51.8      | 1.07        | 55.3        | 25.7     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:23:00 | 52.1      | 1.08        | 55.4        | 25.8     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:24:00 | 52.4      | 1.09        | 55.5        | 25.9     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:25:00 | 52.7      | 1.10        | 55.6        | 26.0     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:26:00 | 53.0      | 1.11        | 55.7        | 26.1     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:27:00 | 53.3      | 1.12        | 55.8        | 26.2     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:28:00 | 53.6      | 1.13        | 55.9        | 26.3     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:29:00 | 53.9      | 1.14        | 56.0        | 26.4     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:30:00 | 54.2      | 1.15        | 56.1        | 26.5     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:31:00 | 54.5      | 1.16        | 56.2        | 26.6     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:32:00 | 54.8      | 1.17        | 56.3        | 26.7     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:33:00 | 55.1      | 1.18        | 56.4        | 26.8     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:34:00 | 55.4      | 1.19        | 56.5        | 26.9     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:35:00 | 55.7      | 1.20        | 56.6        | 27.0     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:36:00 | 56.0      | 1.21        | 56.7        | 27.1     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:37:00 | 56.3      | 1.22        | 56.8        | 27.2     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:38:00 | 56.6      | 1.23        | 56.9        | 27.3     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:39:00 | 56.9      | 1.24        | 57.0        | 27.4     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:40:00 | 57.2      | 1.25        | 57.1        | 27.5     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:41:00 | 57.5      | 1.26        | 57.2        | 27.6     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:42:00 | 57.8      | 1.27        | 57.3        | 27.7     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:43:00 | 58.1      | 1.28        | 57.4        | 27.8     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:44:00 | 58.4      | 1.29        | 57.5        | 27.9     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:45:00 | 58.7      | 1.30        | 57.6        | 28.0     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:46:00 | 59.0      | 1.31        | 57.7        | 28.1     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:47:00 | 59.3      | 1.32        | 57.8        | 28.2     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:48:00 | 59.6      | 1.33        | 57.9        | 28.3     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:49:00 | 59.9      | 1.34        | 58.0        | 28.4     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:50:00 | 60.2      | 1.35        | 58.1        | 28.5     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:51:00 | 60.5      | 1.36        | 58.2        | 28.6     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:52:00 | 60.8      | 1.37        | 58.3        | 28.7     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:53:00 | 61.1      | 1.38        | 58.4        | 28.8     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:54:00 | 61.4      | 1.39        | 58.5        | 28.9     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:55:00 | 61.7      | 1.40        | 58.6        | 29.0     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:56:00 | 62.0      | 1.41        | 58.7        | 29.1     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:57:00 | 62.3      | 1.42        | 58.8        | 29.2     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:58:00 | 62.6      | 1.43        | 58.9        | 29.3     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 10:59:00 | 62.9      | 1.44        | 59.0        | 29.4     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| 2024-05-08 11:00:00 | 63.2      | 1.45        | 59.1        | 29.5     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |

Gambar 3. 2 Data Logger

Data logger berfungsi untuk menyimpan data operasional sistem secara otomatis dan periodik, biasanya dalam format *spreadsheet*. Ini memungkinkan analisis performa jangka panjang, pelacakan tren, serta evaluasi efektivitas kontrol fuzzy dan manajemen beban secara historis, melengkapi pemantauan instan yang disediakan oleh aplikasi seperti Blynk.

### 3.4. Analisa dan Pembahasan

Bagian ini menyajikan hasil pengujian dan analisis mendalam terhadap sistem kontrol beban AC pada keluaran daya photovoltaic menggunakan logika fuzzy dan monitoring *real-time* yang telah dirancang. Pembahasan mencakup tiga aspek utama: manajemen daya beban, perbandingan *output* fuzzy dengan simulasi.

Pengujian manajemen daya beban menunjukkan kapabilitas sistem dalam mengelola distribusi daya secara otomatis berdasarkan ketersediaan daya panel surya (PV). Sistem ini secara responsif menyesuaikan jumlah lampu AC yang menyala sesuai dengan *output* logika fuzzy tipe Sugeno. Ketika daya PV tinggi (misalnya  $\geq 40$  W), *output* fuzzy juga tinggi ( $\geq 78$ ), yang mengindikasikan bahwa semua lampu (L1, L2, L3) dapat dinyalakan. Sebaliknya, saat daya PV menurun (sekitar 20 W atau kurang), *output* fuzzy berkurang ( $< 50$ ), sehingga hanya lampu L1 yang tetap menyala, sementara L2 dan L3 dimatikan untuk menghemat energi. Pada kondisi daya menengah (30–40 W), sistem mengaktifkan L1 dan L2. Mekanisme kontrol bertingkat ini berhasil menjaga efisiensi pemanfaatan energi dan stabilitas tegangan *inverter*, sekaligus mencegah beban berlebih pada sistem.

Validasi kinerja sistem kontrol fuzzy dilakukan dengan membandingkan *output* sinyal kontrol dari perangkat ESP32 dengan hasil simulasi logika fuzzy di MATLAB.

Hasil pengujian menunjukkan konsistensi yang sangat tinggi antara kedua platform, dengan selisih rata-rata hanya 0,61% dan tingkat akurasi mencapai 99,39%. Perbedaan kecil yang teramati kemungkinan disebabkan oleh pembulatan nilai atau perbedaan presisi komputasi antara mikrokontroler ESP32 dan perangkat lunak MATLAB. Akurasi yang tinggi ini mengkonfirmasi bahwa logika fuzzy yang diimplementasikan pada ESP32 berfungsi secara akurat dan dapat diandalkan untuk mengatur beban AC secara otomatis berdasarkan daya PV secara *real-time*.

## 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, realisasi, dan pengujian sistem kontrol beban AC berbasis logika fuzzy pada keluaran daya panel surya dengan monitoring *real-time*, dapat disimpulkan bahwa sistem photovoltaic dengan pengendali logika fuzzy berbasis mikrokontroler ESP32 telah berhasil dirancang dan direalisasikan, terbukti sukses dalam mengelola aktivasi dan deaktivasi beban AC (lampu) secara adaptif terhadap perubahan ketersediaan daya PV dan kondisi lingkungan. Proses akuisisi dan pemrosesan data dari sensor PZEM-017 dan PZEM-004T pada mikrokontroler ESP32 untuk kebutuhan monitoring telah berhasil diimplementasikan, dengan data parameter kunci sistem berhasil dikumpulkan dan diproses secara akurat. Sistem monitoring *real-time* yang mampu menampilkan data performa sistem PV secara langsung telah berhasil dibuat dan berfungsi efektif melalui aplikasi Blynk dan LCD I2C, serta menunjukkan keberhasilan integrasi data ke *spreadsheet* Google Sheets untuk pelacakan performa kronologis. *Output* fuzzy dari sistem kontrol menunjukkan kesesuaian yang sangat tinggi dengan hasil simulasi MATLAB, dengan rata-rata *error* hanya 0,61% dan tingkat akurasi mencapai 99,39%. Sistem ini juga mampu mengatur nyala beban (L1, L2, L3) secara efisien sesuai kondisi daya PV, baik saat pagi, siang, maupun sore hari, sehingga implementasi sistem ini mendukung efisiensi penggunaan energi terbarukan dan berpotensi diaplikasikan untuk sistem distribusi daya otomatis berbasis PV di lingkungan nyata.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan pendanaan, teknis, dan moril selama proses penelitian hingga penyusunan artikel ini. Ucapan terima kasih secara khusus ditujukan kepada PNJ serta para mitra industri yang telah berkontribusi secara signifikan dalam pelaksanaan penelitian ini.

## Daftar Acuan

- [1] Fahmawaty, “Perancangan Alat Penghitung Jumlah Pengunjung Di Perpustakaan Unis Tangerang Menggunakan Sensor Pir Berbasis IoT,” *JIMTEK J. Ilm. Fak. Tek.*, vol. 1, no. 3, pp. 253–261, 2020, [Online]. Available: <http://ejournal.unis.ac.id/index.php/jimtek/article/download/1124/Mega/>
- [2] M. A. Putra, A. Harjoko, and Wahyono, “A Systematic Review on Vision-Based Traffic Density Estimation for Intelligent Transportation Systems,” *IET Intell. Transp. Syst.*, vol. 19, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.1049/itr2.70038.
- [3] Suryana Taryana, “Membangun Stasiun Cuaca dengan BME 280 Untuk Monitoring Suhu, Kelembaban, Tekanan Udara dan Ketinggian,” *Komputa*, pp. 1–21, 2022, [Online]. Available: <https://github.com/nodemcu/nodemcu-devkit>
- [4] Z. V. Gbouna and M. Lee, “An integrated design of energy and indoor environmental quality monitoring system for effective building performance management,” *Futur. Constr. Context Digit. Transform. decarbonization - Proc. 22nd Int. Conf. Constr. Appl. Virtual Real.*, pp. 455–466, 2022.
- [5] T. A. R. Shyaa and A. A. Hashim, “Enhancing real human detection and people counting using YOLOv8,” *BIO Web Conf.*, vol. 97, pp. 1–8, 2024, doi: 10.1051/bioconf/20249700061.
- [6] Z. Ge, S. Liu, F. Wang, Z. Li, and J. Sun, “YOLOX: Exceeding YOLO Series in 2021,” pp. 1–7, 2021, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2107.08430>
- [7] F. Salam and O. Alexander, “PERANCANGAN MONITORING SUHU BERBASIS INTERNET OF THINGS DENGAN NODE MCU ESP8266, DHT 11 DAN THINGSPEAK,” *J. Ilm. Inform.*, vol. 11, no. 01, pp. 22–26, Mar. 2023, doi: 10.33884/jif.v11i01.6546.
- [8] N. Sonkalyari, A. Patil, T. Zade, K. Sharma, and A. Manekar, “Python and MySQL-based Transport Management System,” *Int. J. Recent Eng. Sci.*, vol. 10, no. 3, pp. 44–49, Jun. 2023, doi: 10.14445/23497157/IJRES-V10I3P107.