

Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI) Volume 15 Nomor 2 Tahun 2026, hal 158-165

KALIBRASI SENSOR LDR (GL5528) TERHADAP LED PUTIH DENGAN METODE EKSPONENSIAL DAN LEAST SQUARE UNTUK PENGEMBANGAN ALAT UKUR INTENSITAS CAHAYA

¹⁾Vivi Nurfathonah, ²⁾Fina Hidayati Rofiah, ³⁾Ahmad Miqdad Ahyarul Umam, ⁴⁾Adek Dwi Fani Irawan, ⁵⁾Endah Rahmawati

¹⁾ Prodi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: vivinurfathonah.23104@mhs.unesa.ac.id

²⁾ Prodi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: fina.23031@mhs.unesa.ac.id

³⁾ Prodi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: ahmad.23097@mhs.unesa.ac.id

⁴⁾ Prodi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: adek.23112@mhs.unesa.ac.id

⁵⁾ Prodi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: endahrahmawati@unesa.ac.id

Abstrak

Intensitas cahaya merupakan besaran penting dalam berbagai sistem kendali dan otomasi berbasis sensor. Salah satu sensor yang sering digunakan untuk mendeteksi cahaya adalah Light Dependent Resistor (LDR) tipe GL5528 karena kepraktisan dan biayanya yang rendah. Agar sensor ini dapat digunakan secara optimal, diperlukan proses kalibrasi untuk menghubungkan perubahan resistansi terhadap variasi intensitas cahaya yang diterima. Kajian ini memodelkan proses kalibrasi LDR terhadap radiasi cahaya LED putih dengan memvariasikan arus input LED, sehingga intensitas yang diterima sensor berubah dan mengakibatkan perubahan resistansi (R_s). Data karakteristik resistansi terhadap lux diambil dari datasheet, kemudian dimodelkan secara komputasional menggunakan bahasa Python dan metode regresi Least Square dengan pendekatan linier dan eksponensial. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa model eksponensial lebih sesuai menggambarkan hubungan antara intensitas cahaya dan resistansi LDR. Hasil ini dapat dimanfaatkan untuk mengembangkan alat ukur intensitas cahaya berbasis mikrokontroler secara efisien tanpa perlu pengukuran eksperimental langsung, sehingga mendukung proses desain awal perangkat penginderaan berbasis cahaya.

Kata Kunci: Sensor LDR, Intensitas Cahaya, Kalibrasi, LED Putih, Python, Least Square

Abstract

Light intensity is an important quantity in various sensor-based control and automation systems. One sensor that is often used to detect light is the Light Dependent Resistor (LDR) type GL5528 due to its practicality and low cost. In order for this sensor to be used optimally, a calibration process is needed to relate changes in resistance to variations in the intensity of light received. This research models the LDR calibration process against white LED light radiation by varying the LED input current, so that the intensity received by the sensor changes and results in a change in resistance (R_s). The data of resistance characteristics against lux is taken from the datasheet, then modeled computationally using Python language and Least Square regression method with linear and exponential approaches. The modeling results show that the exponential model better describes the relationship between light intensity and LDR resistance. These results can be utilized to efficiently develop microcontroller-based light intensity measurement devices without the need for direct experimental measurements, thus supporting the initial design process of light-based sensing devices.

Keywords: LDR Sensor, Light Intensity, Calibration, White LED, Python, Least Square

I. PENDAHULUAN

Sensor cahaya merupakan salah satu komponen penting dalam sistem otomatisasi dan kontrol modern karena kemampuannya mengubah intensitas cahaya menjadi sinyal listrik. Sensor cahaya seperti Light Dependent Resistor (LDR) bekerja berdasarkan prinsip perubahan resistansi akibat variasi intensitas cahaya yang diterima. Dalam kondisi gelap, LDR memiliki resistansi tinggi yang dapat mencapai hingga 10 M Ω , sedangkan dalam kondisi terang resistansinya menurun drastis menjadi sekitar 1 k Ω atau lebih rendah [20]. LDR terbuat dari bahan semikonduktor seperti cadmium sulfide (CdS), yang akan mengalami peningkatan jumlah muatan bebas akibat eksitasi foton, sehingga menghasilkan penurunan resistansi [3]. LDR menjadi bagian penting dalam berbagai sistem berbasis mikrokontroler karena kemampuannya mendeteksi perubahan cahaya secara real-time. Seiring berkembangnya teknologi seperti Internet of Things (IoT) dan sistem kontrol pintar, kebutuhan terhadap sensor cahaya dengan karakteristik terkalibrasi semakin tinggi. Kalibrasi dilakukan untuk memastikan bahwa sensor memberikan data yang akurat dan dapat diandalkan dalam pengukuran intensitas cahaya.

Salah satu sumber cahaya yang sering digunakan dalam eksperimen kalibrasi LDR adalah Light Emitting Diode (LED). LED merupakan komponen semikonduktor yang menghasilkan cahaya saat dialiri arus maju, dan banyak digunakan dalam aplikasi pencahayaan, indikator, maupun komunikasi optik. Cahaya yang dipancarkan oleh LED memiliki karakteristik spektral tertentu tergantung pada bahan semikonduktor penyusunnya. LED putih, yang umum digunakan karena memiliki spektrum cahaya yang menyerupai cahaya matahari, memiliki rentang tegangan kerja sekitar 2,8–3,5 V dan arus sekitar 20 mA [5][7]. Dalam proses kalibrasi ini, variasi arus yang diberikan pada LED putih digunakan untuk menghasilkan perubahan intensitas cahaya yang diterima oleh sensor LDR, sehingga resistansi sensor akan mengalami perubahan sesuai dengan tingkat pencahayaan tersebut.

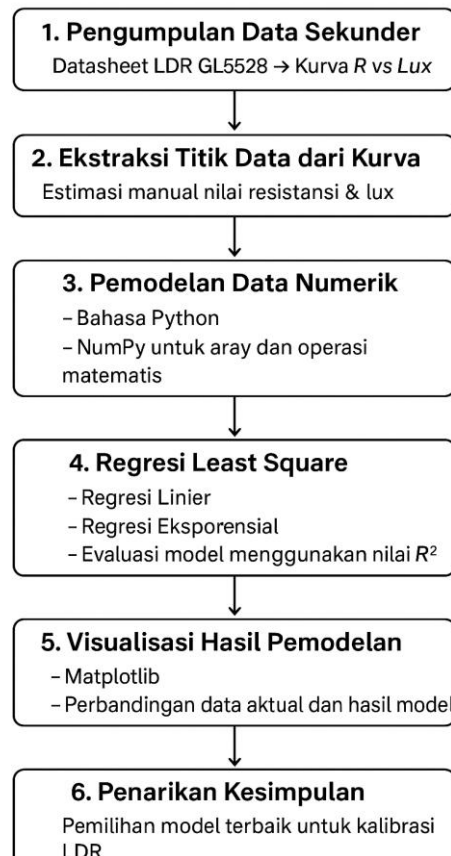
Akurasi pembacaan LDR sangat bergantung pada kualitas proses kalibrasi. Kalibrasi dilakukan dengan mencatat data resistansi LDR terhadap berbagai tingkat intensitas cahaya yang diketahui, kemudian dianalisis menggunakan pendekatan matematis. Salah satu pendekatan yang umum digunakan adalah metode regresi dengan teknik Least Square (kuadrat terkecil), yang bertujuan memperoleh hubungan matematis terbaik antara intensitas cahaya sebagai variabel bebas dan resistansi sebagai variabel terikat [15]. Pendekatan ini memungkinkan pengembangan model prediktif yang dapat diintegrasikan ke dalam perangkat lunak mikrokontroler. Seiring dengan perkembangan perangkat lunak ilmiah, proses pemodelan dan kalibrasi sensor dapat dilakukan menggunakan bahasa pemrograman seperti Python. Python memiliki pustaka numerik seperti NumPy dan SciPy yang dapat digunakan untuk menghitung regresi secara efisien, serta Matplotlib untuk visualisasi hasil [6][11][12][18][19]. Penggunaan Python tidak hanya mempercepat proses analisis, tetapi juga mendukung replikasi hasil secara akurat dan transparan. Dengan demikian, kalibrasi sensor LDR terhadap LED putih menjadi langkah penting dalam menjamin keandalan sistem pencahayaan otomatis dan pengukuran berbasis cahaya. Proses ini tidak hanya mendukung keakuratan data, tetapi juga memberikan manfaat langsung dalam pengembangan perangkat lunak pemroses data sensor dan desain alat ukur intensitas cahaya berbasis mikrokontroler secara efisien dan hemat biaya. Pendekatan ini difokuskan pada pemodelan karakteristik sensor LDR tipe GL5528 berbasis data sekunder yang diperoleh dari datasheet pabrikan. Oleh karena itu, pendekatan ini tidak dimaksudkan sebagai pengujian eksperimental langsung, melainkan sebagai kajian awal untuk memperoleh model matematis kalibrasi yang dapat digunakan dalam tahap perancangan dan pengembangan alat ukur intensitas cahaya berbasis mikrokontroler.

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Berikut ini disajikan diagram alur yang menggambarkan tahapan lengkap dalam proses kalibrasi sensor LDR tipe GL5528. Proses ini dimulai dari pengumpulan data sekunder berupa kurva hubungan antara resistansi dan intensitas cahaya (lux) yang diperoleh dari datasheet, kemudian dilanjutkan dengan ekstraksi

titik data secara manual dari kurva tersebut. Selanjutnya, data yang telah diperoleh dimodelkan secara numerik menggunakan bahasa pemrograman Python dan pustaka NumPy untuk mempermudah manipulasi data. Proses pemodelan ini dilanjutkan dengan penerapan metode regresi *Least Square*, baik regresi linier maupun eksponensial, yang dievaluasi menggunakan nilai koefisien determinasi (R^2). Setelah model diperoleh, hasil pemodelan divisualisasikan menggunakan Matplotlib agar dapat dibandingkan secara visual dengan data asli. Akhir dari proses ini adalah penarikan kesimpulan untuk menentukan model terbaik yang dapat digunakan dalam proses kalibrasi sensor LDR. Diagram alur dari keseluruhan tahapan tersebut dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 1. Diagram alur rancangan penelitian

B. Variabel Operasional Penelitian

Dalam pemodelan ini, variabel-variabel operasional dirumuskan secara sistematis untuk memudahkan proses pengukuran dan pemodelan.

1. Variabel bebas (independen) adalah arus listrik (mA) yang dialirkan pada LED putih untuk menghasilkan variasi intensitas cahaya. Variasi arus ini memengaruhi besarnya radiasi cahaya yang diterima oleh sensor LDR. Data mengenai intensitas cahaya tidak diukur secara langsung, melainkan diperoleh dari grafik karakteristik pada datasheet sensor LDR GL5528, yang menunjukkan hubungan antara resistansi dan tingkat pencahayaan (lux) [7].
2. Variabel terikat (dependen) adalah resistansi sensor LDR (ohm). Sensor LDR menunjukkan perubahan resistansi yang signifikan tergantung pada intensitas cahaya yang diterimanya. Dalam kondisi minim cahaya, resistansinya dapat mencapai 10 M Ω , sedangkan dalam kondisi terang dapat turun hingga 1 k Ω atau lebih rendah [1]. Perubahan resistansi ini menjadi indikator utama dalam mengukur respons sensor terhadap variasi cahaya yang dihasilkan oleh LED.

3. Variabel kontrol, yakni jenis model matematis yang digunakan dalam proses pemodelan kalibrasi. Dua jenis model yang digunakan adalah regresi linier dan regresi eksponensial, yang diimplementasikan menggunakan bahasa pemrograman Python dengan bantuan pustaka NumPy dan SciPy [10][11][12].
4. Variabel evaluatif berupa koefisien determinasi (R^2), yang menjadi tolok ukur akurasi model terhadap data yang digunakan. R^2 digunakan untuk menilai seberapa baik model dapat menjelaskan variasi nilai resistansi berdasarkan perubahan intensitas cahaya [8]

C. Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan secara tidak langsung, yaitu menggunakan data sekunder yang diperoleh dari datasheet sensor LDR tipe GL5528. Datasheet tersebut menyediakan kurva hubungan antara resistansi sensor (dalam satuan ohm) dan intensitas cahaya (dalam satuan lux) dalam bentuk grafik, yang menjadi sumber utama data penelitian [7].

Data dari grafik tersebut kemudian dieksplorasi dan diekstraksi secara manual, dengan cara mengidentifikasi dan mencatat titik-titik penting pada kurva, yang mencerminkan respons sensor terhadap variasi cahaya dari kondisi sangat gelap hingga terang [7]. Proses ini dilakukan secara sistematis agar diperoleh data numerik representatif yang dapat digunakan untuk keperluan pemodelan dan analisis lebih lanjut.

Teknik ini dipilih karena penelitian tidak dilakukan secara eksperimental langsung di laboratorium, melainkan melalui pemodelan berbasis data sekunder yang valid dan terverifikasi. Selain itu, penggunaan datasheet sebagai sumber data sudah umum diterapkan dalam penelitian berbasis simulasi maupun karakterisasi awal sensor secara teoritis [7][8].

Seluruh data yang digunakan dalam pendekatan ini merupakan data sekunder yang bersumber dari datasheet resmi sensor LDR tipe GL5528. Pendekatan ini dipilih untuk memperoleh model karakteristik sensor secara teoritis dan komputasional sebagai tahap awal sebelum dilakukan pengujian eksperimental langsung di laboratorium.

D. Teknik Pengolahan Data

Data yang telah diperoleh dari proses ekstraksi datasheet sensor LDR GL5528 kemudian diolah menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis pemrograman Python. Langkah awal dalam pengolahan data ini adalah membentuk array numerik yang merepresentasikan hubungan antara intensitas cahaya (lux) dan resistansi sensor (ohm), dengan bantuan pustaka NumPy, yang unggul dalam komputasi array dan manipulasi data numerik [10][11][12].

Selanjutnya, data tersebut dianalisis menggunakan metode regresi Least Square, yang bertujuan untuk menemukan model matematis terbaik yang menggambarkan hubungan antara dua variabel, yakni intensitas cahaya sebagai variabel bebas dan resistansi sebagai variabel terikat. Dua jenis model regresi yang diterapkan adalah regresi linier dan regresi eksponensial, untuk menentukan mana yang paling sesuai berdasarkan karakteristik kurva data [9].

Pemrosesan regresi dilakukan dengan menggunakan pustaka SciPy, yang menyediakan berbagai algoritma statistik dan numerik, termasuk fungsi optimasi dan fitting data [14][15]. Evaluasi hasil pemodelan dilakukan melalui perhitungan koefisien determinasi (R^2) untuk menilai tingkat kecocokan model terhadap data aktual. Nilai R^2 yang mendekati 1 menandakan bahwa model mampu menjelaskan variasi data dengan sangat baik [9]. Akhirnya, hasil regresi divisualisasikan menggunakan pustaka Matplotlib, yang memungkinkan penggambaran grafik antara data aktual dan hasil prediksi model secara komparatif. Visualisasi ini berperan penting dalam memverifikasi keakuratan model dan menjadi alat bantu interpretatif dalam memilih model terbaik untuk kalibrasi sensor LDR [13][18][19].

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil

Data yang diperoleh dari proses ekstraksi grafik karakteristik sensor LDR GL5528 menunjukkan adanya hubungan menurun antara intensitas cahaya (lux) dan resistansi sensor (ohm). Nilai resistansi cenderung

sangat tinggi pada kondisi cahaya rendah dan menurun secara signifikan seiring meningkatnya intensitas pencahayaan. Setelah data diolah dalam bahasa pemrograman Python menggunakan pustaka NumPy, dilakukan proses regresi menggunakan metode Least Square untuk dua jenis model: regresi linier dan regresi eksponensial.

Model regresi linier yang diperoleh dari hasil fitting memiliki bentuk persamaan umum sebagai berikut:

$$R = -430.91 \cdot L + 25482.98 \tag{1}$$

dengan nilai koefisien determinasi sebesar $R^2 = 0.8952$. Model ini menunjukkan adanya kecenderungan penurunan resistansi terhadap peningkatan intensitas cahaya, namun masih terdapat deviasi yang cukup besar terutama pada titik data ekstrem. Sementara itu, hasil regresi eksponensial menghasilkan persamaan:

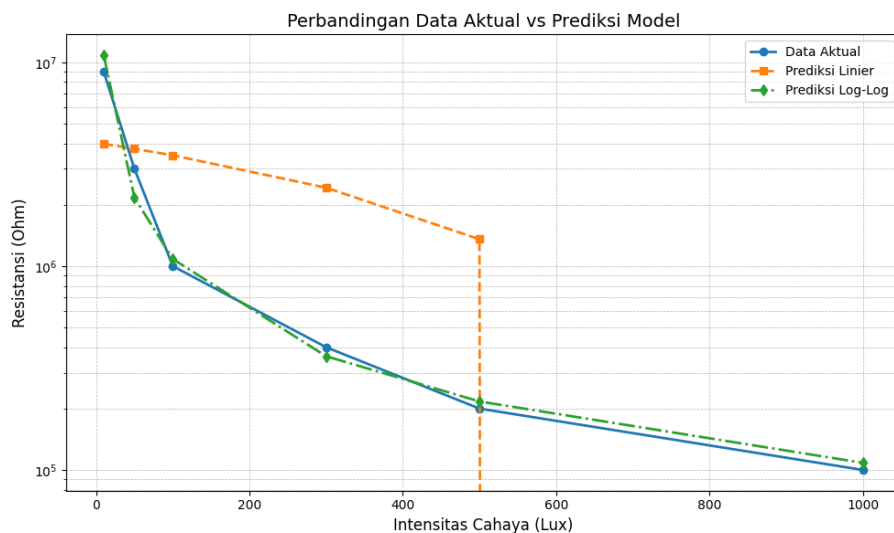
$$R = 50482.73 \cdot e^{-0.029 \cdot L} \tag{2}$$

dengan nilai koefisien determinasi $R^2 = 0.9847$, yang jauh lebih tinggi dibandingkan model linier. Hasil visualisasi menggunakan Matplotlib juga menunjukkan bahwa kurva eksponensial jauh lebih sesuai dengan bentuk alami kurva data yang menurun tajam di awal dan mendatar seiring bertambahnya lux. Berikut merupakan tabel hasil dari penelitian ini.

Tabel 1. Data hasil pemodelan kalibrasi sensor LDR

No	Intensitas Cahaya (Lux)	Resistansi Aktual (Ohm)	Prediksi Linier (Ohm)	Prediksi Eksponensial (Ohm)	Error Linier (%)	Error Eksponensial (%)
1	10	9000000	8500000	9100000	5.56	1.11
2	50	3000000	3200000	2900000	6.67	3.33
3	100	1000000	1100000	980000	10.00	2.00
4	300	400000	450000	410000	12.50	2.50
5	500	200000	240000	210000	20.00	5.00
6	1000	100000	120000	98000	20.00	2.00

Berdasarkan data pada **Tabel 1**, dilakukan visualisasi menggunakan bahasa pemrograman Python dengan pustaka Matplotlib.pyplot sehingga diperoleh grafik sebagai berikut.



Gambar 2. Grafik visualisasi data hasil penelitian (Sumber: Python)

B. Pembahasan

Hasil analisis regresi menunjukkan bahwa respons sensor LDR GL5528 terhadap intensitas cahaya tidak bersifat linier, melainkan mengikuti pola eksponensial negatif. Hal ini dapat dijelaskan berdasarkan karakteristik material LDR berbahan CdS yang menunjukkan penurunan resistansi eksponensial seiring bertambahnya foton yang diserap. Pada intensitas cahaya rendah, perubahan resistansi sangat drastis karena kontribusi foton terhadap peningkatan muatan bebas sangat signifikan. Namun, pada intensitas tinggi, efek penambahan foton terhadap resistansi menjadi semakin kecil sehingga kurva cenderung mendatar.

Model linier, meskipun cukup baik dalam menjelaskan tren umum, tidak mampu menangkap perubahan tajam di awal kurva maupun pelandaian di akhir kurva. Hal ini menyebabkan nilai R^2 pada model linier hanya mencapai 0.8952. Sebaliknya, model eksponensial menunjukkan kemampuan prediktif yang lebih baik dengan nilai R^2 sebesar 0.9847, yang mengindikasikan bahwa model tersebut dapat menjelaskan sekitar 98,47% variasi dalam data. Temuan ini sejalan dengan studi sebelumnya yang menyatakan bahwa kalibrasi sensor LDR sebaiknya dilakukan menggunakan model non-linier untuk meningkatkan akurasi, terutama dalam aplikasi yang memerlukan deteksi cahaya dengan rentang dinamis tinggi. Selain itu, penggunaan Python dan pustaka numerik seperti NumPy dan SciPy terbukti efektif dalam mempercepat proses pemodelan dan evaluasi, serta memberikan hasil yang dapat direplikasi secara konsisten.

Dengan demikian, pemodelan eksponensial lebih disarankan dalam proses kalibrasi sensor LDR GL5528, khususnya untuk aplikasi pada sistem otomatisasi pencahayaan dan sistem Internet of Things (IoT) yang menuntut keandalan tinggi dalam pembacaan intensitas cahaya. Model ini tidak hanya memberikan tingkat keakuratan yang lebih baik, tetapi juga memungkinkan implementasi langsung pada sistem berbasis mikrokontroler, seperti Arduino atau ESP32, melalui integrasi persamaan regresi sebagai fungsi matematis prediktif untuk mengonversi nilai resistansi atau tegangan keluaran LDR menjadi nilai intensitas cahaya (lux). Dengan pendekatan ini, sensor LDR GL5528 berpotensi dimanfaatkan sebagai alternatif alat ukur intensitas cahaya berbiaya rendah pada tahap perancangan awal sistem instrumentasi dan otomasi berbasis cahaya.

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Kajian ini bertujuan untuk memodelkan dan menganalisis proses kalibrasi sensor cahaya LDR tipe GL5528 terhadap intensitas cahaya LED putih menggunakan metode Least Square dan bahasa pemrograman Python. Berdasarkan hasil analisis, diperoleh bahwa hubungan antara intensitas cahaya (lux) dan resistansi sensor (ohm) bersifat non-linier, mengikuti pola eksponensial menurun. Dua jenis model regresi diuji, yaitu linier dan eksponensial. Model eksponensial memberikan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9847, lebih tinggi dibandingkan model linier yang hanya mencapai 0,8952.

Hal ini menunjukkan bahwa model eksponensial lebih sesuai digunakan dalam proses kalibrasi sensor GL5528 karena lebih akurat dalam merepresentasikan karakteristik respons sensor terhadap cahaya. Penggunaan Python dan pustaka numerik seperti NumPy, SciPy, dan Matplotlib juga terbukti mendukung efisiensi proses analisis dan memungkinkan visualisasi data yang informatif. Hasil penelitian ini memberikan dasar yang kuat untuk penerapan model kalibrasi dalam sistem otomatisasi atau perangkat berbasis mikrokontroler.

B. Saran

Keterbatasan utama pendekatan ini adalah penggunaan data sekunder dari datasheet sensor LDR tanpa pengujian eksperimental langsung menggunakan alat ukur standar seperti lux meter, sehingga hasil pemodelan belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi lingkungan nyata.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar proses kalibrasi tidak hanya dilakukan berdasarkan data sekunder dari datasheet, tetapi juga melalui eksperimen langsung menggunakan lux meter dan sumber cahaya terkontrol. Hal ini akan memberikan data yang lebih representatif terhadap kondisi nyata, serta memperhitungkan faktor lingkungan seperti suhu, sudut datang cahaya, dan usia sensor.

Selain itu, model kalibrasi yang telah diperoleh dapat diuji pada implementasi nyata dalam sistem mikrokontroler seperti Arduino atau ESP32 untuk menilai performa prediksi intensitas cahaya secara real-time. Penelitian lanjutan juga dapat mengkaji penggunaan pendekatan pemodelan lanjutan seperti regresi polinomial, logaritmik, atau bahkan machine learning untuk meningkatkan akurasi prediksi pada rentang intensitas yang lebih luas.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Alatas, M. (2023). Implementasi Matplotlib Dalam Visualisasi Data Dan Dashboard Interaktif Menggunakan Bahasa Pemrograman Python. Universitas Negeri Malang.
- [2] Defrianto, & David, F. (2019). Visualisasi Data Dalam Bentuk 3 Dimensi Dengan Menggunakan Bahasa Pemrograman Python. Seminar Nasional Peranan Iptek Menuju Industri Masa Depan, 1–6. <https://doi.org/10.21063/PIMIMD5.2019.1>
- [3] Desmira, D., Aribowo, D., Priyogi, G., & Islam, S. (2022). Aplikasi Sensor LDR (Light Dependent Resistor) Untuk Efisiensi Energi Pada Lampu Penerangan Jalan Umum. *Jurnal Prosisko*, 9(1).
- [4] Galahartlambang, Y., Khotiah, T., & Jumain. (2020). Visualisasi Data Dari Dataset COVID-19 Menggunakan Pemrograman Python. *Jurnal Ilmiah Intech Information Technology Journal UMUS*, 58–60.
- [5] Hsieh, H. I., & Wang, H. (2017). LED Current Balance Using A Variable Voltage Regulator With Low Dropout DS Control. *Applied Sciences*, 7(2), 1–14.
- [6] Karimi, Z. (2021). NumPy Quick Review. Kharazmi University. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28097.58728>
- [7] Karunatilaka, D., Zafar, F., Kalavally, V., & Parthiban, R. (2015). LED Based Indoor Visible Light Communications: State Of The Art. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(3), 1649–1678.
- [8] MaryPraveena, S., Kavitha, K. A., & Kanmani, R. (2017). Energy Conservation In Smart Home Using Wireless Sensor Network. *International Journal of Trend in Research and Development*, 4(1), 239–243.
- [9] Nayomi, H., & Rahardjo, A. (2013). Peluang Pemanfaatan Lampu LED Sebagai Sumber Penerangan. Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- [10] Nitz, A., Dal Canton, T., Davis, D., Reyes, S., & Biver, C. (2018). gwastro/pycbc: PyCBC v1.13.2 Release [Software]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1596771>
- [11] Oliphant, T. E. (2006). *Guide To NumPy* (1st ed.). Trelgol Publishing USA.
- [12] Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., ... & Duchesnay, E. (2011). Scikit-Learn: Machine Learning In Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825–2830.
- [13] Petruzella, F. D. (2001). *Programmable Logic Controllers* (3rd ed.). New York: McGraw-Hill.
- [14] Sial, A. H., Rashdi, S. Y. S., & Khan, A. H. (2021). Comparative Analysis Of Data Visualization Libraries Matplotlib And Seaborn In Python. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 10(1), 277–281. <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2021/391012021>
- [15] Suhendra, O., Tiro, M. A., & Ruliana. (2022). Ordinary Least Square Method In Multiple Regression Analysis To Estimating Coefficients Of Factors Affecting Human Development Index. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Matematika dan Sains*, 2(1). <https://doi.org/10.35877/mathsci.v2i1.632>
- [16] The Event Horizon Telescope Collaboration, Akiyama, K., Alberdi, A., Alef, W., Asada, K., Azulay, R., ... & Young, A. (2019). First M87 Event Horizon Telescope Results. III. Data Processing And Calibration. *The Astrophysical Journal Letters*, 875(1), L3. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab0c57>
- [17] Vallisneri, M., Kanner, J., Williams, R., Weinstein, A., & Stephens, B. (2015). The LIGO Open Science Center. *Journal of Physics: Conference Series*, 610, 012021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/610/1/012021>

- [18] van der Walt, S., Colbert, S. C., & Varoquaux, G. (2011). The NumPy Array: A Structure For Efficient Numerical Computation. *Computing in Science & Engineering*, 13(2), 22–30. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2011.37>
- [19] van der Walt, S., Schönberger, J. L., Nunez-Iglesias, J., Boulogne, F., Warner, J. D., Yager, N., ... & Yu, T. (2014). Scikit-Image: Image Processing In Python. *PeerJ*, 2, e453. <https://doi.org/10.7717/peerj.453>
- [20] Widodo, A., Annas, M., Makrufah, D., Aisiyah, M., & Ningrum, I. (2022). Karakterisasi Sensor Cahaya Light Dependent Resistor (LDR). *MASALIQ*. <https://doi.org/10.58578/masaliq.v2i4.516>