

ANALISIS PENGUKURAN ARUS LISTRIK DAN EFIKASI CAHAYA PADA BERBAGAI MERK LAMPU LED DALAM PRAKTIKUM INSTALASI LISTRIK TEGANGAN RENDAH

Sukatmo¹, Hapsoro Agung Nugroho^{2*}

¹²Program Studi Instrumentasi MKG, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Tangerang, Indonesia

*Corresponding Author: hapsoro.agung@stmkg.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik kelistrikan dan efikasi cahaya dari empat merk lampu Light Emitting Diode (LED) bertegangan rendah dalam kegiatan praktikum mata kuliah Instalasi Listrik Tegangan Rendah di Program Studi Instrumentasi MKG, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (STMKG). Pengujian dilakukan pada rangkaian instalasi listrik sederhana yang terdiri dari sumber tegangan PLN, Miniature Circuit Breaker (MCB), dan saklar tunggal, dengan tegangan sumber terukur 233 V. Arus setiap beban lampu diukur menggunakan multimeter digital Sanwa CD800a pada mode amperemeter seri. Empat spesimen lampu yang diuji adalah Merk A (LED 12 W, 1.360 lumen), Merk B (LED 12 W, 1.020 lumen), Merk C (LED 5 W, 610 lumen), dan Merk D (LED 5 W, 472 lumen). Metode yang digunakan adalah eksperimen deskriptif dengan analisis berdasarkan persamaan daya listrik AC dan konsep efikasi cahaya. Hasil pengukuran menunjukkan arus terukur berkisar antara 18,4 mA hingga 43,7 mA dengan daya aktif antara 4,31 W hingga 10,23 W. Merk C memiliki efikasi cahaya tertinggi sebesar 141,5 lm/W, sedangkan Merk D memiliki efikasi terendah sebesar 92,9 lm/W. Hasil penelitian ini memberikan pemahaman kuantitatif tentang konsumsi daya nyata dan efisiensi cahaya lampu LED yang relevan dengan perencanaan sistem kelistrikan.

Kata Kunci: instalasi listrik, tegangan rendah, efikasi cahaya, daya listrik AC

ABSTRACT

This study aims to analyze the electrical characteristics and luminous efficacy of four LED lamp brands during practicum activities for the Low Voltage Electrical Installation course at the MKG Instrumentation Study Program, STMKG. Testing was conducted on a simple circuit with a measured source voltage of 233 V. Current was measured using a Sanwa CD800a digital multimeter in series ammeter mode. Four specimens were tested: Brand A (12 W, 1,360 lm), Brand B (12 W, 1,020 lm), Brand C (5 W, 610 lm), and Brand D (5 W, 472 lm). The descriptive experimental method was applied with analysis based on AC power equations and luminous efficacy concepts. Measured current ranged from 18.4 mA to 43.7 mA with active power from 4.31 W to 10.23 W. Brand C had the highest luminous efficacy (141.5 lm/W) and Brand D the lowest (92.9 lm/W). These findings provide quantitative insight into actual power consumption and luminous efficiency of LED lamps relevant to electrical planning.

Keywords: electrical installation, low voltage, luminous efficacy, AC electrical power

PENDAHULUAN

Kelistrikan merupakan salah satu kompetensi teknis yang wajib dikuasai oleh mahasiswa Program Studi Instrumentasi MKG di Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (STMKG). Dalam operasional stasiun pengamatan meteorologi, klimatologi, dan geofisika, kebutuhan sistem pencahayaan yang andal dan hemat energi menjadi pertimbangan penting, terutama untuk stasiun yang berlokasi di daerah terpencil dan mengandalkan sumber energi terbatas seperti panel surya atau baterai cadangan. Pengelolaan konsumsi daya listrik secara akurat pada fasilitas STMKG telah menjadi perhatian riset tersendiri; Sukatmo et al. (2025) menunjukkan bahwa prediksi daya listrik berbasis data historis dari *Building Automation System* (BAS) gedung STMKG mampu mendukung efisiensi energi secara signifikan, yang menegaskan pentingnya pemahaman karakteristik beban listrik nyata termasuk pencahayaan di lingkungan STMKG.

Lampu *Light Emitting Diode* (LED) telah menjadi pilihan utama dalam sistem pencahayaan modern karena konsumsi daya yang rendah dan umur pakai yang panjang dibandingkan lampu konvensional Floyd (2006) dan Wildi (2006). Mata kuliah Instalasi Listrik Tegangan Rendah di STMKG dirancang untuk membekali mahasiswa dengan kompetensi praktis dalam merangkai, mengoperasikan, dan menganalisis sistem listrik tegangan rendah sesuai Persyaratan Umum Instalasi Listrik SNI (2011). Kegiatan asistensi dan praktikum secara langsung terbukti meningkatkan pemahaman konsep dan kesiapan teknis mahasiswa secara lebih mendalam dibandingkan pembelajaran konvensional berbasis ceramah semata Kamal et al. (2024).

Dalam praktik di lapangan, spesifikasi daya nominal lampu LED yang tercantum pada kemasan produk sering kali tidak sepenuhnya mencerminkan daya aktif yang sesungguhnya dikonsumsi. Hal ini disebabkan oleh perbedaan desain driver LED antarmerk, regulasi tegangan internal, serta variasi kualitas komponen yang digunakan Narang et al. (2025). Pengukuran langsung menggunakan multimeter digital menjadi cara paling akurat untuk mengetahui konsumsi daya nyata suatu beban lampu LED Abdussamad (2022) pada kondisi tegangan sumber aktual. Selain itu juga melatih keterampilan instrumentasi mahasiswa secara kontekstual dan autentik Firdaus et al. (2020). Disamping itu, parameter efikasi cahaya (*luminous efficacy*) yang menyatakan fluks cahaya yang dihasilkan per satuan daya yang dikonsumsi (lm/W) menjadi indikator penting dalam evaluasi efisiensi lampu LED Floyd (2006).

Berbeda dengan penelitian terdahulu yang berfokus pada efektivitas media dan metode pembelajaran rangkaian elektronika secara umum Obina et al. (2025) dan Suswati et al. (2021), penelitian ini memiliki kebaruan pada perbandingan karakteristik kelistrikan dan efikasi cahaya empat merk lampu LED komersial secara terukur, serta relevansinya dengan perencanaan sistem catu daya pada sebuah bangunan.

Pentingnya pengamatan langsung terhadap karakteristik komponen listrik dan elektronika terbukti memperkuat pemahaman konsep yang bersifat abstrak Fitria et al. (2023). Sejalan dengan itu, Wardani dan Malik (2023) menegaskan bahwa kemampuan menganalisis dan membandingkan data pengukuran antarvariabel secara kritis merupakan indikator kompetensi sains yang penting dan harus terus dilatih melalui kegiatan eksperimen langsung pada kondisi nyata. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengukur arus listrik yang dikonsumsi empat merk lampu LED pada tegangan sumber

233 V menggunakan multimeter digital, menghitung dan menganalisis daya aktif serta hambatan dinamis setiap merk, dan mengevaluasi serta membandingkan efikasi cahaya keempat merk sebagai dasar rekomendasi pemilihan komponen pencahayaan untuk sistem instalasi.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen deskriptif, yaitu melakukan percobaan langsung pada rangkaian listrik nyata kemudian menganalisis dan mendeskripsikan data hasil pengukuran secara sistematis. Kegiatan praktikum dilaksanakan pada tanggal 18–19 Mei 2026 dalam rangka mata kuliah Instalasi Listrik Tegangan Rendah, Program Studi Instrumentasi MKG, STMKG. Pendekatan ini dipilih karena tujuan penelitian bersifat analitik-komparatif terhadap besaran terukur antar merk lampu LED Suswati et al. (2021) dan Obina et al. (2025).

A. Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan adalah:

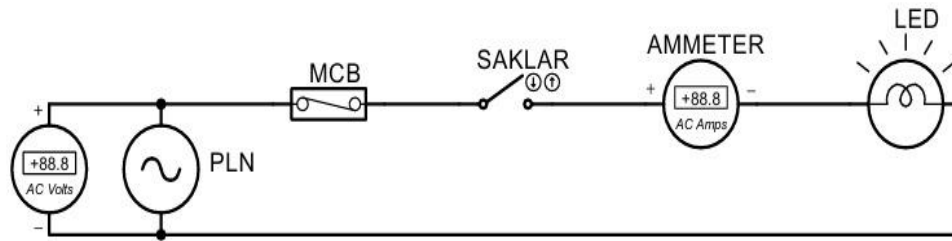
1. Multimeter digital Sanwa CD800a (4000 count, batas ukur AC mA maks. 400 mA, Auto Power Off)
2. Sumber tegangan PLN (terukur 233 V AC/50 Hz)
3. *Miniature Circuit Breaker* (MCB) Schneider 1 fase 6A
4. Saklar tunggal (single switch)
5. Kotak sambungan (junction box/T-dos), kabel NYM, stop kontak, dan fitting lampu
6. Empat spesimen lampu LED sebagai beban pengujian (spesifikasi pada Tabel 1)
7. Lembar kerja praktikum

Tabel 1. Spesifikasi Lampu LED yang Digunakan sebagai Beban Pengujian

Spes.	Merk	Daya Nominal (W)	Fluks Cahaya (lm)	Keterangan
A	Merk A	12	1.360	LED Putih, 220–240 V
B	Merk B	12	1.020	LED Putih, 220–240 V
C	Merk C	5	610	LED Putih, 220–240 V
D	Merk D	5	472	LED Putih, 220–240 V

B. Skema Rangkaian

Rangkaian instalasi listrik mengacu pada skematik Gambar 1. Sumber tegangan PLN dihubungkan secara seri melalui MCB, saklar, dan beban lampu LED. Voltmeter (mode V_{∞}) dipasang paralel terhadap sumber, sedangkan amperemeter (mode mA_{∞}) dipasang seri dalam rangkaian sesuai standar PUIL 2011.



Gambar 1. Skematik Rangkaian Instalasi Listrik Tegangan Rendah untuk Pengujian Empat Spesimen Lampu LED

C. Prosedur Pengukuran

Prosedur dilaksanakan dalam tiga tahap:

1. Tahap Persiapan: menyiapkan seluruh komponen, memeriksa kondisi MCB dan kabel, memastikan multimeter dalam kondisi baik, serta mengukur tegangan sumber satu kali ($V = 233 \text{ V}$) sebagai acuan tetap seluruh pengujian.
2. Tahap Pengukuran: memasang Spesimen A pada fitting; menghidupkan saklar; membaca dan mencatat arus yang ditampilkan multimeter (mode $\text{mA}\infty$); mendokumentasikan secara fotografis; mematikan saklar; mengganti spesimen; mengulangi prosedur untuk Spesimen B, C, dan D secara berurutan.
3. Tahap Analisis: menghitung daya aktif menggunakan persamaan:

$$P = V \times I \quad (1)$$

dan efikasi cahaya menggunakan persamaan

$$\eta = \Phi / P \quad (2)$$

untuk setiap spesimen, kemudian membandingkan hasil antar merk LED.

Persamaan (1) $P = V \times I$ adalah persamaan daya aktif pada rangkaian AC resistif, di mana P adalah daya aktif (W), V adalah tegangan sumber RMS (V), dan I adalah arus beban RMS (A). Persamaan (2) $\eta = \Phi / P$ adalah efikasi cahaya (lm/W), di mana Φ adalah fluks cahaya dari spesifikasi produk (lm) dan P adalah daya aktif terukur dari persamaan (1). Efikasi dihitung menggunakan P terukur bukan P nominal agar mencerminkan efisiensi nyata pada kondisi operasi aktual Serway et al. (2000).

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengukuran Tegangan Sumber

Pengukuran tegangan sumber PLN menggunakan multimeter Sanwa CD800a pada mode $V\infty$ menghasilkan $V = 233 \text{ V}$. Nilai ini berada di atas tegangan nominal PLN 220 V, namun masih dalam toleransi $\pm 10\%$ (198–242 V) sesuai standar distribusi PLN (PLN, 2020). Tegangan 233 V digunakan sebagai acuan tetap dalam seluruh perhitungan, sehingga perbedaan hasil antarmerk semata mencerminkan perbedaan karakteristik beban lampu.



(a) Pengukuran Tegangan Sumber: 233 V AC



(b) Pengukuran Arus Beban: contoh Merk B (42,8 mA)

Gambar 2. Hasil Pembacaan Multimeter Digital Sanwa CD800a pada Titik Pengukuran Tegangan dan Arus

B. Hasil Pengukuran Arus dan Perhitungan Daya Aktif

Arus setiap spesimen diukur secara seri. Daya aktif dihitung menggunakan persamaan (1) dan efikasi cahaya menggunakan persamaan (2). Hasil lengkap disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengukuran Arus dan Perhitungan Besaran Kelistrikan Setiap Spesimen ($V = 233 \text{ V}$)

Spes.	P Nom. (W)	I Ukur (mA)	P Aktif (W)	R Dinamis (Ω)	Lumen (lm)	Efikasi (lm/W)
A	12	43,7	10,23	5.355	1.360	132,9
B	12	42,9	10,04	5.455	1.020	101,6
C	5	18,4	4,31	12.717	610	141,5
D	5	21,7	5,08	10.783	472	92,9

C. Daya Aktif terhadap Daya Nominal

Perbandingan daya aktif terukur dengan daya nominal disajikan pada Tabel 3. Merk A (10,23 W), Merk B (10,04 W), dan Merk C (4,31 W) menunjukkan daya aktif di bawah nilai nominal dengan selisih 13,8–16,3%, sedangkan Merk D (5,08 W) hampir tepat pada nominalnya dengan selisih hanya 1,6%.

Tabel 3. Perbandingan Daya Aktif Terukur dengan Daya Nominal Spesifikasi Produk

Spes.	P Nominal (W)	P Terukur (W)	ΔP (W)	Selisih (%)	Keterangan
A	12	10,23	-1,77	14,8%	Di bawah nominal
B	12	10,04	-1,96	16,3%	Di bawah nominal
C	5	4,31	-0,69	13,8%	Di bawah nominal

D	5	5,08	+0,08	1,6%	Mendekati nominal
---	---	------	-------	------	-------------------

Fenomena daya aktif terukur yang lebih rendah dari nominal merupakan hal yang lazim pada lampu LED komersial. Penerapan rangkaian elektronika menemukan bahwa komponen elektronika aktif termasuk rangkaian driver LED umumnya memiliki konsumsi daya aktual yang bervariasi bergantung pada tegangan masukan dan karakteristik komponen internalnya Nurhidayah et al. (2020). Hal senada dikonfirmasi oleh Waluyo et al. (2021) yang menunjukkan bahwa pengukuran langsung pada rangkaian nyata sering menghasilkan nilai berbeda dari spesifikasi nominal akibat toleransi komponen dan kondisi operasi aktual.

Secara teknis, daya nominal pada kemasan umumnya merupakan nilai input power maksimum yang diukur pada kondisi tegangan uji standar (tepat 220 V), sementara pada tegangan aktual 233 V driver LED yang terregulasi akan menyesuaikan konsumsinya. Toleransi komponen pasif (kapasitor, resistor) dalam rangkaian driver berbeda antarmerk dan secara langsung memengaruhi arus serta daya aktual Anitis dan Maryadi (2018). Merk D merupakan pengecualian dengan selisih hanya 1,6%, yang mengindikasikan driver LED dengan regulasi daya lebih presisi. Dari perspektif keandalan data teknis, Merk D menunjukkan konsistensi tertinggi antara klaim spesifikasi dan kondisi operasi nyata, sebagaimana pentingnya konsistensi data teknis komponen yang ditekankan oleh Budi et al. (2021) dalam konteks evaluasi kinerja komponen elektronika.

Hambatan dinamis setiap spesimen dihitung dari $R = V/I$. Hasil menunjukkan bahwa lampu 5 W (Merk C: 12.717 Ω dan Merk D: 10.783 Ω) memiliki hambatan dinamis jauh lebih besar dibandingkan lampu 12 W (Merk A: 5.355 Ω dan Merk B: 5.455 Ω), konsisten dengan logika bahwa pada tegangan sumber yang sama daya lebih kecil berarti arus lebih kecil dan hambatan lebih besar Siagian dan HS (2021). Karakteristik hambatan dinamis komponen elektronika aktif harus diukur langsung pada kondisi operasi nyata tidak dapat diprediksi semata dari spesifikasi nominal karena driver LED bersifat non-linier akibat adanya rangkaian penyearah dan regulator di dalamnya Matsun et al. (2021). Efikasi cahaya dihitung menggunakan persamaan (2) dengan fluks cahaya dari spesifikasi produk dan daya aktif terukur. Dokumentasi pengujian ditampilkan pada Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3. Dokumentasi Pengujian Rangkaian dengan Spesimen Lampu LED Menyala



Gambar 4. Dokumentasi Pengukuran Arus pada Berbagai Posisi Titik Ukur dalam Rangkaian

Urutan efikasi cahaya dari tertinggi ke terendah: Merk C (141,5 lm/W) > Merk A (132,9 lm/W) > Merk B (101,6 lm/W) > Merk D (92,9 lm/W). Pemahaman karakteristik komponen elektronika secara kuantitatif melalui praktikum langsung merupakan kompetensi fundamental yang harus dikuasai mahasiswa Obina et al. (2025). Temuan perbedaan efikasi yang signifikan antarmerk meskipun daya nominal dalam kelompok yang sama, menjadi bahan diskusi yang kaya untuk melatih kemampuan analisis kritis. Pada kelompok 12 W, Merk A (132,9 lm/W) unggul 30,8% lebih efisien dibandingkan Merk B (101,6 lm/W), meskipun keduanya mengonsumsi daya aktif yang hampir sama. Perbedaan ini mencerminkan kualitas chip LED dan desain optik yang berbeda antarmerk. Penelitian Fitria et al. (2023) menunjukkan bahwa fenomena di mana komponen dengan spesifikasi nominal sama menghasilkan performa berbeda justru menjadi bahan diskusi berharga dalam praktikum untuk melatih kemampuan analisis kritis mahasiswa.

Pada kelompok 5 W, Merk C (141,5 lm/W) bahkan mengungguli kedua merk 12 W dalam hal efikasi, menjadikannya spesimen paling efisien di antara keempat merk. Sebaliknya, Merk D (92,9 lm/W) merupakan spesimen paling tidak efisien: mengonsumsi daya aktual lebih besar (5,08 W) namun menghasilkan fluks cahaya lebih sedikit (472 lm) dibandingkan Merk C. Kemampuan menganalisis dan membandingkan data pengukuran antarvariabel secara kritis merupakan indikator kompetensi sains penting yang harus terus dilatih melalui eksperimen langsung Wardani dan Malik (2023). Seluruh spesimen menunjukkan efikasi di atas 75 lm/W, melampaui standar minimum efisiensi lampu LED komersial Kholis et al. (2018). Hal ini mengonfirmasi keempat merk memenuhi standar minimum yang berlaku, meskipun terdapat perbedaan kinerja yang signifikan.

SIMPULAN

Berdasarkan kegiatan praktikum dan analisis data yang telah dilakukan terhadap empat spesimen lampu LED pada tegangan sumber 233 V, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Arus terukur keempat spesimen berbeda signifikan: Merk A (43,7 mA), Merk B (42,9 mA), Merk C (18,4 mA), dan Merk D (21,7 mA), mencerminkan perbedaan

karakteristik driver LED antarmerk meskipun dalam kelompok daya nominal yang sama.

2. Daya aktif terukur menggunakan $P = V \times I$ menghasilkan: Merk A = 10,23 W, Merk B = 10,04 W, Merk C = 4,31 W, dan Merk D = 5,08 W. Merk A, B, dan C menunjukkan daya aktif di bawah nominal (13,8–16,3%), sedangkan Merk D paling mendekati nominal dengan selisih hanya 1,6%.
3. Efikasi cahaya $\eta = \Phi/P$ tertinggi dimiliki Merk C (141,5 lm/W), diikuti Merk A (132,9 lm/W), Merk B (101,6 lm/W), dan terendah Merk D (92,9 lm/W). Seluruh spesimen melampaui standar minimum 75 lm/W.
4. Untuk perencanaan sistem pencahayaan: Merk A direkomendasikan untuk kebutuhan fluks cahaya tinggi, sedangkan Merk C direkomendasikan untuk instalasi hemat energi dengan kapasitas baterai terbatas. Data ini dapat pula mendukung akurasi sistem prediksi dan manajemen energi berbasis BAS di lingkungan STMKG.

Saran untuk penelitian selanjutnya yaitu mengukur faktor daya ($\cos\theta$) setiap spesimen menggunakan power meter; kemudian menguji pengaruh variasi tegangan sumber terhadap daya dan efikasi serta ke langkah berikutnya mengintegrasikan data konsumsi daya nyata ini ke dalam model prediksi energi *Building Automation System*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ketua Program Studi Instrumentasi MKG dan seluruh sivitas akademika STMKG yang telah mendukung terlaksananya kegiatan praktikum dan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdussamad, S. (2022). Implementasi Pengukuran Beban Resistif Pada Lampu Pijar. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 4(1), 83–86.
- Anitis, D. I. A., & Maryadi, T. H. T. (2018). Efektivitas Media Pembelajaran Berbantuan Proteus untuk Peningkatan Kompetensi Digital Dasar. *Jurnal Pendidikan Teknik Elektro*, 8(4), 260–266.
- Budi, A. H. S., Juanda, E. A., & Fauzi, D. L. N. (2021). Implementation of simulation software on vocational high school students in programming and arduino microcontroller subject. *Journal of Technical Education and Training*, 13(3), 108–114.
- Firdaus, Fatiatun, Jumini, S., Trisnowati, E., & Dahnuss, D. (2020). Proteus as a virtual simulation to improve readiness and process skills in laboratory experiment. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1517, p. 12074). IOP Publishing.
- Fitria, N., Aziizi, M. K. R., Hardoyo, T., Supriadi, B., Harjianto, A., & Junaidi, M. R. (2023). Penggunaan PhET simulation untuk meningkatkan aktivitas dan hasil belajar siswa SMP Islam Panggul. *OPTIKA: Jurnal Pendidikan Fisika*, 7(2), 428–438.
- Floyd, T. L. (2006). *Electronics Fundamentals: Circuits, Devices and Applications (Floyd Electronics Fundamentals Series)*. Prentice-Hall, Inc.
- Kamal, M. F. S., Nashih, S. A., Johan, A. A. A. N., Maharani, L. A., Falah, M. M., Jati, N. P. A., ... Sari, M. (2024). Studi Kasus Mahasiswa Pendidikan Fisika Dan Fisika: Pengalaman Asistensi Praktikum Termodinamika. *OPTIKA: Jurnal Pendidikan Fisika*, 8(2), 334–346.
- Kholis, N., Syarifuddin Zuhrie, M., & Rahmadian, R. (2018). Innovation online teaching module plus digital engineering kit with proteus software through hybrid learning

- method to improve student skills. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 336, p. 12036). IOP Publishing.
- Matsun, M., Boisandi, B., Sari, I. N., Hadiati, S., & Hakim, S. L. (2021). Use of arduino microcontroller and proteus software in physics lesson in review of mathematics ability and critical thinking skills. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 7(SpecialIssue), 20–27.
- Narang, N. H. Z., Meok, N. J., Arpin, R. M., & Radja, A. K. (2025). Peningkatan Kemandirian Belajar Melalui Simulasi Proteus dalam Praktikum Perakitan Pesawat Elektronika. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 9(2), 18651–18659.
- Nurhidayah, S., Aribowo, D., & Desmira, D. (2020). Penerapan Aplikasi Simulasi Electronic Workbench Dan Proteus Pada Materi Penerapan Rangkaian Elektronika Bagi Siswa Kelas Xi Teknik Elektronika Industri. *Jurnal Edukasi Elektro*, 4(2), 120–128.
- Obina, W. M., Nababan, E. D., & Nurfahrunnisa, A. (2025). Efektivitas Pemanfaatan Simulasi Software Proteus dalam Membuat Rangkaian Elektronika Pada Materi Semikonduktor Dioda. *OPTIKA: Jurnal Pendidikan Fisika*, 9(2), 361–369.
- Serway, R. A., Jewett, J. W., & Perroomian, V. (2000). *Physics for scientists and engineers* (Vol. 2). Saunders college publishing Philadelphia.
- Siagian, S. M., & HS, S. C. (2021). Analisis Karakteristik Hasil Pengukuran Terhadap Arus Dan Tegangan Pada Suatu Resistansi. *Jurnal Vorteks*, 2(1), 48–52.
- Standar Nasional Indonesia. (2011). Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2011 (PUIL 2011). *DirJen Ketenagalistrikan*, 2011, 1–133.
- Sukatmo, S., Nugroho, H. A., Rusanto, B. H., & Soekirno, S. (2025). Performance Comparison of 1D-CNN and LSTM Deep Learning Models for Time Series-Based Electric Power Prediction. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 13(1), 44.
- Suswati, L., & Subhan, M. (2021). Efektivitas virtual laboratorium berbantuan software proteus pada praktikum fisika rangkaian listrik terhadap keterampilan proses sains siswa. *Gravity Edu: Jurnal Pembelajaran Dan Pengajaran Fisika*, 4(1), 30–34.
- Waluyo, B. D., Bintang, S., & Januariyansah, S. (2021). The effect of using proteus software as a virtual laboratory on student learning outcomes. *Paedagoria*, 12(1), 140–145.
- Wardani, A. K., & Malik, A. (2023). Analisis Efektivitas Virtual Laboratorium Amrita dalam Menjalankan Praktikum Pegas dan Hubungan Variabel dalam Konteks Hukum Hooke. *OPTIKA: Jurnal Pendidikan Fisika*, 7(2), 200–208.
- Wildi, T. (2006). *Electrical machines, drives, and power systems*. Pearson Educación.