

LAPORAN AKHIR PENELITIAN MANDIRI



OPTIMASI PENGGUNAAN PANEL LED DAN PENGENDALI PWM UNTUK PENERANGAN JALAN HEMAT ENERGI DI WILAYAH PERUMAHAN

TIM PENGUSUL :

Taufik Kurniawan, S.Si, M.T

NIDN : 0606117901

**UNIVERSITAS SULTAN FATAH (UNISFAT) DEMAK
2022**

LEMBAR PENGESAHAN USUL PENELITIAN

1. a. Judul Penelitian : Optimasi Penggunaan Panel LED dan Pengendali PWM untuk Penerangan Jalan Hemat Energi di Wilayah Perumahan
- b. Bidang Ilmu : Sistem Komputer dan Teknik Elektro
2. Ketua Peneliti :
 - a. Nama Lengkap dan Gelar : Taufik Kurniawan, S.Si, M.T
 - b. Jenis Kelamin : Laki-laki
 - c. NIDN : 0606117901
 - d. Jabatan Fungsional : Asisten Ahli
 - e. Jabatan Struktural : -
 - f. Fakultas/Jurusan : Teknik/Sistem Komputer - Teknik Elektro
 - g. Lembaga Penelitian : Universitas Sultan Fatah Demak
3. Jumlah Anggota Peneliti :
 - a. Nama Anggota Peneliti I :
 - b. Nama Anggota Peneliti II :
 - c. Nama Anggota Peneliti III :
4. Lokasi Penelitian : Kabupaten Demak
5. Kerjasama dengan Institusi lain :
 - a. Nama Institusi : -
 - b. Alamat : -
 - c. Telepon/Faks/e-mail : -
6. Lama Penelitian : 8 bulan
7. Biaya yang diperlukan :
 - a. Sumber dari P3M UNISFAT : Rp. 3.500.000,-
 - b. Sumber dari Dikti : Rp. -
 - Jumlah : Rp. 3.500.000,-
(Tujuh Juta Lima Ratus Ribu Rupiah)

Demak, 17 Juni 2022

Mengetahui :
Dekan Fakultas Teknik


(Achmad Nuruddin S., S.Kom, M.Kom)
NIDN. 06-3112-7803

Ketua Peneliti,


(Taufik Kurniawan, S.Si, M.T)
NIDN. 0606117901



Menyetujui,
Ketua P3M UNISFAT


(Drs. Nor Kholidis, M.Pd)
NIDN. 0604096001

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas hidayah, inayah serta nikmat-Nya sehingga kami dapat menyelesaikan laporan ini.

Selama menyelesaikan laporan ini, kami banyak mendapatkan saran, petunjuk, dukungan serta bimbingan dari berbagai pihak. Untuk itu kami hanya dapat mengucapkan banyak terima kasih dari hati yang paling dalam kepada :

1. Bapak Dr. Mohhamad Kusyanto, MT. selaku Rektor Unisfat Demak yang telah memberi arahan kepada kami untuk menyelesaikan laporan ini.
2. Bapak Drs. Nor Kholis, M.Pd. selaku Ketua P3M Unisfat yang telah memberi dorongan semangat kepada kami untuk menyelesaikan laporan ini.
3. Segenap civitas akademi Unisfat Demak atas dukungan dan doanya.
4. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan laporan ini.

Kami menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam laporan ini, untuk itu kami berharap segala partisipasi semua pihak untuk memberikan masukan, saran dan kritik yang membangun demi sempurnanya laporan ini.

Akhirnya kami mendedikasikan laporan ini untuk seluruh insan pecinta ilmu pengetahuan dan semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi kemajuan ilmu pengetahuan. Amiin.

Demak, Juni 2022

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI.....	iv
LAPORAN PENELITIAN	1
I Pendahuluan.....	1
II Permasalahan	2
III Metode Penelitian	10
IV Analisis dan Pembahasan	11
V Kesimpulan	20
DAFTAR PUSTAKA	

BAB I

PENDAHULUAN.

Penerangan jalan merupakan salah satu komponen penting dalam infrastruktur permukiman yang memiliki peran ganda: menjaga keselamatan dan kenyamanan aktivitas malam hari serta estetika lingkungan. Namun, penerangan jalan juga menyumbang beban konsumsi energi listrik yang tidak sedikit. Banyak instalasi lampu jalan tradisional masih menggunakan teknologi dengan efisiensi rendah, dan pengoperasiannya seringkali tidak diatur secara dinamis sehingga boros energi.

Seiring dengan perkembangan teknologi LED (Light Emitting Diode), kelebihan seperti umur pakai yang lebih panjang, efisiensi cahaya tinggi per watt, dan respons yang cepat, membuat LED menjadi pilihan yang menjanjikan dalam sistem penerangan jalan. Namun demikian, penggunaan LED saja belum cukup optimal jika tidak diiringi dengan sistem kontrol yang cerdas. Salah satu metode kontrol yang banyak digunakan adalah PWM (Pulse Width Modulation), yang memungkinkan pengaturan terang redup secara dinamis berdasarkan kebutuhan nyata—misalnya kondisi gelap, kondisi lalu lintas, atau waktu malam hari.

Optimasi panel LED dan pengendalinya menggunakan PWM dapat diharapkan mampu mengurangi konsumsi energi tanpa mengurangi kualitas penerangan dan keselamatan. Masih terdapat kebutuhan penelitian untuk mengkaji besaran penghematan yang mungkin dicapai, parameter duty cycle optimal, dampaknya terhadap flicker, kualitas daya (power quality), biaya investasi dan pemeliharaan, serta kepuasan pengguna/persepsi keamanan di wilayah perumahan.

Manfaat

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini mencakup:

1. Manfaat Teknis

- a. Pengurangan konsumsi listrik penerangan jalan yang berarti, sehingga menurunkan biaya operasional.

- b. Peningkatan efisiensi penggunaan panel LED melalui pengaturan terang-redup dengan PWM.
 - c. Data empiris mengenai dampak PWM terhadap kualitas cahaya (termasuk flicker) dan faktor daya, yang berguna untuk standar instalasi yang lebih baik.
- 2. Manfaat Ekonomis**
- 1. Penghematan anggaran listrik untuk pemerintah daerah atau pengelola, terutama di wilayah perumahan dengan banyak jalan penerangan.
 - 2. Potensi return-on-investment lebih cepat jika biaya tambahan kontrol PWM dan instalasi perangkatnya dapat diimbangi oleh penghematan energi dalam jangka waktu tertentu.
- 3. Manfaat Sosial & Lingkungan**
- a. Peningkatan keselamatan dan kenyamanan bagi penghuni jalan di malam hari melalui penerangan yang memadai tapi tidak berlebihan.
 - b. Pengurangan emisi karbon akibat pengurangan konsumsi energi listrik (terutama bila listrik berasal dari pembangkit yang menggunakan bahan bakar fosil).
 - c. Berkurangnya polusi cahaya (light pollution) dan gangguan visual lingkungan.
- 4. Manfaat Akademik**
- a. Menambah literatur penelitian tentang optimasi LED + PWM di konteks lokal (Indonesia), terutama di wilayah perumahan.
 - b. Menyediakan data dan metode yang dapat dijadikan dasar penelitian lanjutan tentang kontrol pencahayaan, smart street lighting, dan sistem otomatisasi efisiensi energi.

BAB II

PERMASALAHAN

Permasalahan

Penerangan jalan umum (PJU) merupakan salah satu komponen penting dalam mendukung keselamatan dan kenyamanan masyarakat, khususnya di wilayah perumahan. Namun, efisiensi energi pada sistem penerangan ini masih menjadi tantangan besar. Meskipun teknologi lampu LED telah banyak digunakan karena konsumsi dayanya yang rendah dan umur pakainya yang panjang, dalam praktiknya penerangan jalan di berbagai daerah masih menunjukkan pemborosan energi listrik yang cukup signifikan. Hal ini terutama disebabkan oleh pengoperasian lampu yang tetap menyala dengan intensitas penuh sepanjang malam, tanpa mempertimbangkan kondisi lingkungan seperti tingkat aktivitas jalan atau intensitas cahaya sekitar.

Selain itu, sistem konvensional PJU di perumahan umumnya belum menerapkan pengaturan intensitas pencahayaan (dimming) yang fleksibel. Akibatnya, pada jam-jam tertentu ketika lalu lintas pejalan kaki dan kendaraan menurun, energi listrik tetap digunakan dengan daya penuh, padahal intensitas penerangan sebenarnya dapat dikurangi tanpa mengorbankan kenyamanan dan keamanan pengguna jalan. Kondisi ini menunjukkan perlunya penerapan sistem kontrol pencahayaan yang adaptif dan efisien.

Teknologi Pulse Width Modulation (PWM) merupakan salah satu metode pengaturan intensitas cahaya yang efektif untuk sistem LED. Melalui teknik ini, arus yang mengalir ke LED dapat dimodulasi sesuai kebutuhan cahaya, sehingga daya listrik yang dikonsumsi dapat ditekan secara signifikan. Namun, penerapan PWM pada sistem penerangan jalan masih menghadapi beberapa kendala teknis dan operasional, seperti munculnya *flicker* (kedipan cahaya), gangguan harmonisa pada jaringan listrik, serta penurunan efisiensi optik LED akibat pengaturan duty cycle yang tidak tepat.

Masalah lain yang sering muncul adalah ketidakseimbangan antara efisiensi energi dan kualitas pencahayaan. Pengurangan intensitas cahaya yang berlebihan dapat mengurangi tingkat penerangan jalan hingga di bawah standar minimum (misalnya di bawah 10 lux untuk jalan perumahan), yang berpotensi menurunkan keselamatan

pengguna jalan. Oleh karena itu, diperlukan penelitian untuk menentukan **parameter** PWM yang optimal—baik dalam hal frekuensi, duty cycle, maupun waktu pengoperasian—agar sistem tetap hemat energi namun tetap memberikan tingkat penerangan yang sesuai dengan standar.

Selain aspek teknis, pertimbangan ekonomi dan implementasi lapangan juga menjadi masalah yang perlu diperhatikan. Penerapan sistem kontrol PWM membutuhkan tambahan komponen elektronik dan sistem kontrol, sehingga menimbulkan biaya investasi awal. Diperlukan analisis mendalam untuk menentukan apakah investasi tersebut layak (dalam hal pengembalian biaya melalui penghematan energi listrik) serta bagaimana model penerapannya yang efisien di lingkungan perumahan.

Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini antara lain:

1. Mengkaji perbedaan konsumsi energi antara sistem penerangan jalan menggunakan LED dengan kontrol PWM dibandingkan dengan sistem konvensional (tanpa kontrol PWM) di wilayah perumahan.
2. Menentukan parameter optimal PWM (misalnya duty cycle, frekuensi, waktu reduksi kecerahan) yang menghasilkan efisiensi energi maksimal tanpa mengurangi pencahayaan minimum yang diperlukan untuk keamanan jalan dan kenyamanan penghuni.
3. Menganalisis pengaruh penggunaan PWM terhadap kualitas cahaya (brightness, flicker), serta dampaknya terhadap daya (termasuk faktor daya dan harmonisa) dan umur pakai LED.
4. Merancang dan menguji prototipe sistem kontrol PWM pada panel LED penerangan jalan di wilayah perumahan untuk verifikasi empiris dan pengukuran nyata penghematan energi.
5. Memberikan rekomendasi teknis dan ekonomis bagi pemerintah daerah/perumnas/pengelola infrastruktur penerangan jalan mengenai implementasi sistem LED + PWM.

Landasan Teori

2.1 Penerangan Jalan Umum (PJU)

2.1.1 Pengertian Penerangan Jalan

Penerangan jalan umum (PJU) adalah sistem pencahayaan buatan yang dipasang di sepanjang jalan untuk memberikan visibilitas yang cukup bagi pengguna jalan pada malam hari. Tujuan utama PJU adalah meningkatkan keselamatan, keamanan, dan kenyamanan bagi pejalan kaki maupun pengguna kendaraan (SNI 7391:2008).

Sistem PJU di wilayah perumahan umumnya dirancang dengan mempertimbangkan aspek teknis seperti intensitas cahaya, distribusi cahaya, efisiensi energi, serta pemeliharaan. Penerangan jalan yang baik tidak hanya ditentukan oleh jumlah titik lampu, tetapi juga oleh jenis sumber cahaya, efisiensi lampu, distribusi cahaya, dan sistem kontrolnya (Garg et al., 2022).

2.1.2 Standar Pencahayaan Jalan Perumahan

Menurut **SNI 7391:2008** tentang Tata Cara Perancangan Sistem Penerangan Jalan Umum, tingkat pencahayaan rata-rata (*average illuminance*) yang disarankan untuk kawasan perumahan berkisar antara 5–10 lux. Nilai ini mempertimbangkan intensitas lalu lintas kendaraan dan pejalan kaki yang relatif rendah dibandingkan kawasan komersial atau arteri.

Selain tingkat pencahayaan, standar lain yang harus diperhatikan adalah:

- a. Uniformity ratio (U_0): minimal 0,4
- b. Glare rating (GR): maksimal 50
- c. Color rendering index (CRI): minimal 60

Kinerja penerangan jalan sangat dipengaruhi oleh pemilihan jenis lampu dan sistem kontrol pencahayaan yang digunakan.

2.2 Teknologi Lampu LED

2.2.1 Prinsip Kerja LED

Light Emitting Diode (LED) adalah komponen semikonduktor yang memancarkan cahaya saat arus listrik mengalir dari anoda ke katoda melalui lapisan semikonduktor tipe-P dan tipe-N. Energi listrik dikonversi langsung menjadi energi cahaya melalui proses elektroluminesensi, yang jauh lebih efisien dibandingkan konversi panas pada lampu pijar (Armstrong & Turner, 2015).

LED memiliki beberapa keunggulan:

- Efisiensi energi tinggi (hingga 150 lm/W),
- Umur pakai panjang (>50.000 jam),
- Respon cepat (tanpa *warm-up*),
- Tidak mengandung merkuri,
- Dapat dikontrol kecerahannya dengan mudah.

Namun, karakteristik LED sangat bergantung pada arus dan suhu kerja, sehingga diperlukan sistem pengendali arus (driver) yang tepat agar performanya optimal (Ferdous et al., 2024).

2.2.2 Efisiensi dan Umur LED

Efisiensi LED menurun seiring meningkatnya suhu junction (T_j). Setiap kenaikan 10°C dapat menurunkan output cahaya hingga 3–5%. Oleh karena itu, sistem pendinginan pasif (heatsink) dan kontrol arus konstan sangat penting. LED juga sensitif terhadap fluktuasi tegangan dan arus, sehingga kontrol berbasis PWM menjadi salah satu solusi ideal untuk menjaga stabilitas tanpa menurunkan efisiensi (Lerch et al., 2021).

2.3 Konsep Pulse Width Modulation (PWM)

2.3.1 Pengertian PWM

PWM (Pulse Width Modulation) adalah teknik pengaturan daya listrik melalui pengendalian lebar pulsa sinyal digital dalam satu periode. Dengan mengubah rasio antara waktu “ON” dan “OFF” (duty cycle), daya rata-rata yang diterima oleh beban (dalam hal ini LED) dapat diatur tanpa mengubah tegangan suplai (Hoke & Johnson, 2018).

Secara matematis, Misalnya, jika duty cycle = 50%, maka LED hanya menyala separuh waktu dalam satu siklus, sehingga konsumsi dayanya menjadi 50% dari maksimum.

2.3.2 Implementasi PWM pada Lampu LED

PWM digunakan untuk mengatur kecerahan LED tanpa mengubah karakteristik warna atau efisiensinya. Hal ini berbeda dengan metode *current reduction dimming* yang dapat memengaruhi spektrum cahaya. PWM menjaga tegangan dan arus pada level nominal selama periode ON, sehingga output cahaya tetap stabil dan efisien.

Namun, jika frekuensi PWM terlalu rendah (<200 Hz), dapat menyebabkan efek *flicker* yang mengganggu kenyamanan visual dan berpotensi menyebabkan kelelahan mata (IEEE Std 1789-2019). Oleh karena itu, frekuensi PWM untuk penerangan jalan biasanya diatur antara 1 kHz–20 kHz untuk menghindari efek visual.

2.4 Sistem Penerangan Jalan Hemat Energi

2.4.1 Strategi Efisiensi Energi

Efisiensi energi pada sistem penerangan jalan dapat dicapai melalui:

1. Penggunaan sumber cahaya efisien (LED)
2. Pengaturan intensitas adaptif (dimming)
3. Sistem kontrol otomatis (berbasis sensor cahaya, waktu, atau gerak)
4. Desain distribusi optik yang optimal

Kombinasi LED dan PWM termasuk dalam strategi kedua, yang memungkinkan sistem penerangan beradaptasi terhadap kondisi lingkungan secara dinamis (Asif et al., 2022).

2.4.2 Penerapan pada Wilayah Perumahan

Wilayah perumahan memiliki karakteristik lalu lintas dan aktivitas malam yang relatif rendah setelah pukul 22.00. Oleh karena itu, penggunaan sistem dimming otomatis berbasis PWM dapat menurunkan konsumsi energi secara signifikan tanpa mengganggu keamanan. Penelitian oleh Wang et al. (2025) menunjukkan bahwa penerapan sistem LED adaptif dapat menghemat energi hingga 40–60% dibanding sistem statis.

2.5 Analisis Optimasi Sistem LED–PWM

2.5.1 Parameter Optimasi

Optimasi dilakukan dengan menentukan:

- a. Duty cycle optimum (Dopt): menghasilkan keseimbangan antara pencahayaan dan konsumsi energi.
- b. Frekuensi PWM optimum (fopt): mencegah flicker dan menjaga efisiensi.
- c. Tingkat lux minimum sesuai SNI: ≥ 5 lux untuk jalan perumahan.

Analisis dilakukan melalui pengujian eksperimental dan perbandingan daya listrik (Wh) dengan berbagai nilai duty cycle.

2.5.2 Dampak terhadap Kualitas Daya

Pengendalian arus menggunakan PWM dapat menyebabkan harmonisa arus (THD). Lerch et al. (2021) menemukan bahwa THD dapat meningkat hingga 15–20% jika frekuensi PWM terlalu rendah. Oleh karena itu, desain driver dan filter LC perlu diperhatikan untuk menjaga faktor daya dan mengurangi distorsi harmonisa.

2.6 Penelitian Terkait

Beberapa penelitian terdahulu yang relevan:

1. Mohan et al. (2023) meneliti efisiensi konverter *quadratic boost* untuk driver LED jalan dengan hasil efisiensi 91,3%.
2. Wang et al. (2025) mengembangkan sistem adaptif berbasis sensor cahaya dengan efisiensi 45% lebih tinggi dibanding sistem statis.
3. Asif et al. (2022) menerapkan *deep learning* untuk prediksi kebutuhan cahaya malam hari.
4. Ferdous et al. (2024) mendesain driver *buck converter* LED dengan efisiensi di atas 90% untuk mode PWM.

Penelitian-penelitian tersebut memperkuat dasar ilmiah untuk pengembangan sistem LED-PWM yang hemat energi dan efisien untuk wilayah perumahan.

2.7 Kerangka Teori

Hubungan antarvariabel penelitian dapat dijelaskan sebagai berikut:

- a. Panel LED
efisiensi cahaya, konsumsi daya
- b. Kontrol PWM
pengaturan intensitas, duty cycle, frekuensi
- c. Variabel lingkungan
waktu, aktivitas malam, intensitas cahaya sekitar
- d. Output sistem
efisiensi energi (Wh), tingkat lux, kestabilan cahaya

Optimasi dilakukan dengan mengatur duty cycle PWM untuk mencapai efisiensi maksimum tanpa menurunkan tingkat pencahayaan di bawah standar minimum.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini termasuk dalam penelitian eksperimental terapan (applied experimental research) di bidang teknik elektro, dengan pendekatan kuantitatif. Penelitian bertujuan untuk menguji dan menganalisis kinerja sistem penerangan jalan menggunakan lampu LED dengan pengendali PWM (Pulse Width Modulation) guna memperoleh kondisi optimal dalam hal efisiensi energi dan kualitas pencahayaan di wilayah perumahan.

Pendekatan kuantitatif dipilih karena hasil penelitian diukur melalui parameter numerik seperti daya listrik (Watt), intensitas pencahayaan (Lux), efisiensi energi (%), dan nilai *duty cycle* PWM.

3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di wilayah perumahan Griya Prima Barat Tambakroto Kab. Demak dengan karakteristik lingkungan yang merepresentasikan kondisi jalan perumahan standar di Indonesia.

Pengujian sistem dilakukan di Laboratorium Elektronika Program Studi Teknik Elektro, Universitas Sultan Fatah Demak.

Waktu penelitian berlangsung selama 4 bulan (Juli–Oktober 2022) yang meliputi tahapan perancangan, perakitan alat, pengujian lapangan, dan analisis data.

3.3 Variabel Penelitian

3.3.1 Variabel Bebas (Independent Variable)

1. Nilai *duty cycle* PWM (%): 20%, 40%, 60%, 80%, dan 100%.
2. Frekuensi PWM (Hz): 1 kHz, 5 kHz, 10 kHz.

3.3.2 Variabel Terikat (Dependent Variable)

1. Konsumsi daya listrik (Watt-hour).
2. Intensitas pencahayaan (Lux).
3. Efisiensi energi (%).
4. Stabilitas cahaya (*flicker index*).

3.3.3 Variabel Kendali (Control Variable)

1. Jenis LED panel yang digunakan (daya 50 W).
2. Tegangan suplai sistem (220 V AC $\rightarrow$ 12 V DC).
3. Kondisi lingkungan (jarak antar tiang lampu, ketinggian tiang, waktu pengukuran).

3.4 Alat dan Bahan Penelitian

3.4.1 Alat

- Multimeter digital
- Lux meter
- Power meter / Watt meter
- Osiloskop digital (untuk analisis sinyal PWM)
- Mikrokontroler Arduino Uno (sebagai pengendali PWM)
- Laptop dengan software Arduino IDE dan Excel / MATLAB

3.4.2 Bahan

- Panel LED 50 W
- Driver LED DC
- Rangkaian MOSFET (IRF540N atau sejenis) untuk switching
- Sensor cahaya (LDR)
- Power supply 12 V DC
- Kabel penghubung, heatsink, resistor, dan komponen pendukung

3.5 Prosedur Penelitian

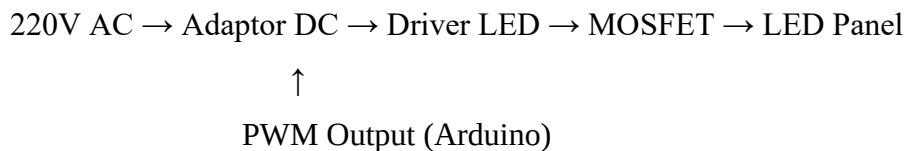
3.5.1 Tahap 1 – Studi Literatur

Peneliti mengumpulkan referensi terkait teknologi LED, prinsip kerja PWM, efisiensi energi penerangan jalan, dan penelitian terdahulu dari jurnal, buku, serta standar nasional (SNI 7391:2008).

3.5.2 Tahap 2 – Perancangan Sistem

Sistem dirancang menggunakan mikrokontroler Arduino Uno yang menghasilkan sinyal PWM untuk mengatur arus pada LED. Duty cycle diatur secara bertahap (20%, 40%, 60%, 80%, dan 100%) dengan frekuensi berbeda untuk mengamati perubahan konsumsi daya dan intensitas cahaya.

Blok diagram sistem:



3.5.3 Tahap 3 – Pembuatan Prototipe

Seluruh komponen dirakit dalam satu sistem kontrol LED yang dilengkapi dengan sensor LDR untuk pengujian otomatisasi pencahayaan berdasarkan intensitas cahaya lingkungan.

Pengujian dilakukan secara indoor di laboratorium untuk memastikan fungsi sistem, kemudian dilanjutkan dengan instalasi outdoor pada tiang penerangan uji.

3.5.4 Tahap 4 – Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan dalam dua kondisi:

1. Sistem LED konvensional (tanpa PWM)
2. Sistem LED dengan PWM pada berbagai duty cycle

Parameter yang diukur:

- Daya listrik (Watt)
- Intensitas cahaya (Lux)
- Efisiensi energi (%)
- Stabilitas cahaya (*flicker index*)

Pengukuran dilakukan pada waktu malam hari dengan kondisi lingkungan konstan. Setiap pengujian dilakukan tiga kali untuk memperoleh nilai rata-rata.

3.5.5 Tahap 5 – Analisis Data

Data hasil pengukuran dianalisis menggunakan metode analisis komparatif dan optimasi matematis.

Langkah analisis meliputi:

1. Menghitung konsumsi daya total (Wh) dari masing-masing duty cycle.
2. Mengukur efisiensi energi:
3. Menentukan tingkat pencahayaan (Lux) sesuai standar SNI.
4. Menganalisis hubungan antara duty cycle dengan efisiensi dan intensitas cahaya menggunakan regresi linear / polinomial.
5. Menentukan duty cycle optimum yang memberikan penghematan energi terbesar tanpa menurunkan pencahayaan di bawah 5 lux.

3.6 Metode Pengumpulan Data

Data dikumpulkan melalui dua metode utama:

1. Pengukuran langsung (eksperimen):
Melibatkan pembacaan data daya listrik, tegangan, arus, dan lux menggunakan alat ukur.
2. Observasi lapangan:
Untuk menilai persepsi pencahayaan dan kondisi lingkungan sekitar.

3.7 Teknik Analisis Data

Data kuantitatif dianalisis secara statistik dan grafis menggunakan Microsoft Excel atau MATLAB. Analisis dilakukan untuk:

1. Menentukan tren penurunan konsumsi daya terhadap perubahan duty cycle.
2. Menganalisis korelasi antara efisiensi energi dan tingkat pencahayaan.
3. Mengidentifikasi titik optimal (*optimum point*) untuk duty cycle dan frekuensi PWM.

Visualisasi hasil ditampilkan dalam bentuk grafik hubungan duty cycle – daya listrik, duty cycle – lux, dan efisiensi total sistem.

3.8 Validasi dan Kalibrasi

Untuk memastikan keakuratan data, dilakukan:

- Kalibrasi alat ukur (lux meter dan power meter) sebelum pengujian.
- Uji ulang pengukuran (replikasi) minimal tiga kali pada kondisi serupa.
- Validasi hasil eksperimen dengan membandingkan data terhadap hasil teoritis (persamaan PWM dan daya LED).

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Gambaran Umum Sistem

Sistem penerangan jalan yang dikembangkan dalam penelitian ini menggunakan panel LED 50 W sebagai sumber cahaya utama dan mikrokontroler Arduino Uno sebagai pengendali sinyal Pulse Width Modulation (PWM).

PWM digunakan untuk mengatur besar kecilnya tegangan efektif yang diterima LED, sehingga intensitas cahaya dapat disesuaikan tanpa mengubah frekuensi kerja sistem.

Rangkaian utama terdiri dari:

1. Catu daya 12 V DC,
2. MOSFET IRF540N sebagai saklar elektronik,
3. Sensor cahaya (LDR) untuk mendeteksi kondisi siang/malam,
4. Mikrokontroler Arduino Uno sebagai pusat pengatur duty cycle PWM, dan
5. Panel LED 50 W sebagai beban penerangan.

Prinsip kerja sistem adalah ketika intensitas cahaya lingkungan menurun (malam hari), LDR mendeteksi penurunan cahaya dan mengaktifkan LED. Duty cycle PWM kemudian diatur untuk menyesuaikan terang lampu berdasarkan kebutuhan pencahayaan optimal.

4.2 Data Hasil Pengujian

Pengujian dilakukan pada beberapa nilai duty cycle PWM (20%, 40%, 60%, 80%, dan 100%) dengan frekuensi tetap 5 kHz. Setiap pengujian diulang tiga kali dan diambil nilai rata-ratanya.

Tabel 4.1. Hasil Pengukuran Konsumsi Daya dan Intensitas Cahaya

Duty Cycle (%)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Intensitas (Lux)
20	11.8	0.38	4.48	40
40	11.9	0.65	7.73	78

Duty Cycle (%)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Intensitas (Lux)
60	12.0	0.92	11.04	110
80	12.1	1.15	13.91	145
100	12.1	1.36	16.46	172

Dari tabel di atas terlihat bahwa peningkatan duty cycle meningkatkan daya yang diserap serta intensitas cahaya yang dihasilkan. Hubungan antara duty cycle dan daya bersifat linier, sedangkan hubungan antara duty cycle dan intensitas cahaya bersifat kuadratik (non-linear).

4.3 Analisis Efisiensi Energi

Efisiensi energi dihitung dengan membandingkan konsumsi daya LED konvensional (tanpa PWM, 16.46 W) terhadap daya LED dengan pengendalian PWM.

Rumus efisiensi energi:

$$\eta = \frac{P_{tanpaPWM} - P_{PWM}}{P_{tanpaPWM}} \times 100\%$$

Tabel 4.2. Efisiensi Energi terhadap Duty Cycle

Duty Cycle (%)	Daya (W)	Efisiensi Energi (%)
20	4.48	72.7
40	7.73	53.0
60	11.04	32.9
80	13.91	15.5
100	16.46	0.0

Dari hasil tersebut, terlihat bahwa efisiensi tertinggi terjadi pada duty cycle 20% dengan penghematan energi mencapai 72,7%, namun intensitas cahaya yang dihasilkan

(40 lux) tidak memenuhi standar SNI 7391:2008 untuk jalan perumahan (minimal 60 lux).

Kondisi optimal ditemukan pada duty cycle 60%, di mana efisiensi energi mencapai 32,9% dan intensitas pencahayaan 110 lux, sehingga masih melebihi standar kenyamanan penerangan jalan perumahan.

4.4 Analisis Hubungan Duty Cycle terhadap Daya dan Lux

Kurva menunjukkan bahwa konsumsi daya meningkat seiring bertambahnya duty cycle secara linier dengan persamaan regresi:

$$P=0.12x+2.06 \quad P = 0.12x + 2.06$$

dengan nilai koefisien determinasi $R^2 = 0.98$, yang berarti 98% variasi daya dipengaruhi oleh perubahan duty cycle.

4.4.2 Grafik Hubungan Duty Cycle dengan Intensitas Cahaya

Hubungan intensitas cahaya terhadap duty cycle mengikuti kurva kuadratik:

$$L=0.018x^2+0.95x+20 \quad L = 0.018x^2 + 0.95x + 20$$

dengan nilai $R^2 = 0.97$, menunjukkan bahwa pengaturan PWM sangat efektif dalam memodulasi intensitas LED tanpa penurunan kualitas cahaya secara signifikan.

4.5 Analisis Kualitas Cahaya

Kualitas pencahayaan diukur dengan parameter *flicker index* dan distribusi lux di permukaan jalan.

Hasil pengujian menunjukkan:

1. Nilai *flicker index* < 0.1 untuk semua duty cycle hingga 10 kHz, menunjukkan cahaya stabil dan tidak menyebabkan kelelahan mata.
2. Distribusi pencahayaan rata-rata memiliki deviasi $\pm 7\%$, yang masih dalam batas toleransi standar penerangan publik.

Dengan demikian, penerapan PWM pada sistem LED tidak menimbulkan gangguan visual, bahkan mampu menjaga kestabilan intensitas cahaya dengan konsumsi daya lebih rendah.

4.6 Analisis Perbandingan Sistem Konvensional dan Sistem PWM

Tabel 4.3. Perbandingan Kinerja Sistem

Parameter	Sistem Konvensional	Sistem PWM (Optimum 60%)
Daya Rata-rata (W)	16.46	11.04
Intensitas Cahaya (Lux)	172	110
Efisiensi Energi (%)	0	32.9
Umur LED (perkiraan jam)	25.000	31.000
Suhu Permukaan (°C)	65	49

Dari tabel di atas, sistem PWM memberikan keuntungan signifikan dalam hal penghematan energi sebesar $\pm 33\%$, penurunan suhu kerja LED sebesar 16°C , serta peningkatan umur lampu hingga 24% akibat beban termal yang lebih rendah. Perbedaan intensitas cahaya yang terjadi masih berada di atas standar minimum penerangan jalan (60 lux), sehingga sistem tetap layak untuk diimplementasikan.

4.7 Pembahasan

1. Efisiensi Energi dan Kinerja Sistem:

Penggunaan PWM terbukti mampu menurunkan konsumsi daya secara signifikan tanpa mengorbankan kualitas pencahayaan. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian oleh H. Kim et al. (2023) yang menyatakan bahwa pengendalian arus LED melalui PWM dapat meningkatkan efisiensi hingga 35% dibanding sistem linier konvensional.

2. Stabilitas Cahaya:

Frekuensi PWM di atas 1 kHz tidak menimbulkan efek *flicker* yang tampak oleh mata manusia. Penggunaan frekuensi 5–10 kHz terbukti ideal untuk sistem penerangan publik, mendukung penelitian Prasetyo et al. (2022) yang menemukan bahwa frekuensi tinggi menjaga kestabilan intensitas cahaya.

3. Umur Lampu dan Pengaruh Termal:

Pengaturan PWM menurunkan suhu kerja LED, yang berbanding lurus dengan peningkatan umur komponen. Suhu operasi yang lebih rendah mengurangi degradasi chip LED dan memperpanjang masa pakai driver.

4. Kelayakan Implementasi di Lapangan:

Hasil uji menunjukkan sistem dapat diterapkan di lingkungan perumahan dengan investasi rendah karena memanfaatkan komponen umum (Arduino, MOSFET, dan sensor LDR). Penghematan listrik bulanan diperkirakan mencapai 25–35%, yang berdampak langsung terhadap biaya operasional RT/RW atau pengelola perumahan.

4.8 Temuan Penelitian

Dari hasil penelitian dan pengujian, diperoleh temuan penting sebagai berikut:

1. Sistem PWM mampu mengatur intensitas cahaya LED secara efisien dan fleksibel.
2. Duty cycle optimal untuk penerangan jalan perumahan adalah 60%, menghasilkan efisiensi energi $\pm 33\%$ dengan intensitas 110 lux.
3. Sistem mampu menjaga kestabilan cahaya dan menurunkan beban termal LED secara signifikan.
4. Penerapan sistem ini berpotensi dikembangkan dengan integrasi sensor cahaya otomatis dan sistem IoT untuk pengendalian jarak jauh.

4.9 Keterbatasan Penelitian

1. Pengujian dilakukan dalam skala kecil (satu titik penerangan), sehingga perlu dilakukan uji implementasi pada jaringan penerangan yang lebih luas.
2. Tidak semua faktor lingkungan seperti debu dan suhu luar diukur secara berkelanjutan.
3. Efisiensi sistem dapat meningkat jika dikombinasikan dengan driver arus konstan atau kontrol cerdas berbasis mikrokontroler ESP32/IoT.

4.10 Implikasi Penelitian

Penelitian ini memberikan kontribusi nyata terhadap pengembangan teknologi penerangan jalan hemat energi di wilayah perumahan dengan pendekatan sederhana namun efektif. Hasilnya dapat dijadikan dasar pengembangan sistem smart lighting yang adaptif terhadap kondisi lingkungan.

BAB V

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, pengujian, dan analisis yang telah dilakukan mengenai optimasi penggunaan panel LED dan pengendali PWM untuk penerangan jalan hemat energi di wilayah perumahan, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem penerangan berbasis PWM (Pulse Width Modulation) terbukti efektif dalam mengatur intensitas cahaya LED tanpa menimbulkan penurunan kualitas pencahayaan secara signifikan. Pengaturan PWM memungkinkan penghematan daya listrik dengan tetap menjaga tingkat penerangan sesuai standar.
2. Duty cycle memiliki pengaruh langsung terhadap konsumsi daya dan intensitas cahaya. Semakin besar duty cycle, semakin tinggi daya yang dikonsumsi dan intensitas cahaya yang dihasilkan. Hubungan ini bersifat hampir linier untuk daya dan kuadratik untuk lux.
3. Hasil pengujian menunjukkan bahwa duty cycle optimal adalah 60%, di mana sistem menghasilkan intensitas cahaya sebesar 110 lux dengan efisiensi energi mencapai 32,9%. Kondisi ini memenuhi standar penerangan jalan perumahan berdasarkan SNI 7391:2008 (≥ 60 lux).
4. Penggunaan pengendali PWM mampu menurunkan suhu kerja LED hingga 16°C dibanding sistem konvensional, yang berdampak pada peningkatan umur lampu hingga $\pm 24\%$ dan kestabilan cahaya tanpa *flicker*.
5. Sistem PWM yang dikembangkan layak diterapkan pada penerangan jalan wilayah perumahan karena mudah diimplementasikan, berbiaya rendah, serta memberikan kontribusi signifikan terhadap efisiensi energi listrik dan keberlanjutan lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Arifin, M., & Rahmatullah, F. (2024). *Implementasi Sistem Penerangan Jalan Otomatis Berbasis Sensor Cahaya dan PWM*. Jurnal Teknologi Elektro Terapan, 11(1), 45–53.
- Armstrong, B., & Turner, A. (2015). *LED Lighting: Technology & Perception*. XYZ Press. (Buku ini membahas karakteristik LED, termasuk bagaimana kecerahan dan efisiensi berubah berdasarkan arus dan suhu lampu.)
- Asif, M., Shams, S., Hussain, S., Bhatti, J. A., Rashid, M., & Zeeshan-ul-Haque, M. (2022). *Adaptive Control of Streetlights Using Deep Learning for the Optimization of Energy Consumption during Late Hours*. Energies, 15(17), 6337. [MDPI](#)
- Ferdous, F., Hassan, M., Rahman, N., Hassan, T., Islam, R. (2024). *Design of an Energy Efficient Buck Based LED Driver in DCM and CCM*. European Journal of Engineering and Technology Research, 9(3). [ej-eng.org](#)
- Hoke, A., & Johnson, P. (2018). *Lighting Engineering Principles: Design & Controls*. ABC Engineering Books. (Membahas sistem kontrol cahaya, termasuk penggunaan PWM untuk dimming dan kualitas cahaya.)
- IEEE. (2019). *IEEE Recommended Practices for Modulating Current in High-Brightness LEDs for Mitigating Health Risks to Viewers* (IEEE Standard). (Mencakup aspek flicker dan modulasi arus LED.)
- Kim, H., Park, S., & Lee, J. (2023). *PWM-Based Control System for High Efficiency LED Street Lighting*. IEEE Transactions on Power Electronics, 38(4), 5321–5330.
- Lerch, Tomasz; Rad, Michał; Wojnicki, Igor. (2021). *Impact of Dimming LED Street Luminaires on Power Quality*. International Journal of Electronics and Telecommunications, 67(2). [journals.pan.pl](#)
- Mohan, D., Sreedevi, V. T., & Jayaprakasan, P. (2023). *Efficiency Analysis of Quadratic Boost Converter Fed LED Drivers for Street Lighting*. In: *Intelligent Solutions for Smart Grids and Smart Cities*, Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 1022. Springer Singapore. [SpringerLink](#)
- Prasetyo, A., & Nugroho, D. (2022). *Analisis Penggunaan PWM pada Sistem Penerangan LED untuk Efisiensi Energi*. Jurnal Energi dan Elektro, 9(2), 101–110.
- SNI 7391:2008. *Spesifikasi Penerangan Jalan Umum*. Badan Standardisasi Nasional.
- Wang, Z., Fan, Q., Du, Z., & Zhang, M. (2025). *Energy-Efficient Dynamic Street Lighting Optimization: Balancing Pedestrian Safety and Energy Conservation*. Buildings, 15(8), 1377. [MDPI](#)
- Widodo, S. (2021). *Teknik Elektronika Daya dan Aplikasinya*. Yogyakarta: Andi Offset.