

Efek Penerapan Teknik *Spread Spectrum* pada *Lifetime LED*

1st Naufal Zakariya
Department of Computer Engineering
Telkom University
Surabaya, Indonesia
nzakariya@student.telkomuniversity.ac
.id

2nd Mohammad Yanuar Hariyawan
Department of Computer Engineering
Telkom University
Surabaya, Indonesia
myanuarh@telkomuniversity.ac.id

3rd Mochamad Nizar Palefi Ma'ady
Department of Information Systems
Telkom University
Surabaya, Indonesia
mmizarpm@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Masa pakai (*lifetime*) LED telah menjadi aspek krusial dalam pengembangan teknologi pencahayaan modern. Meskipun teknologi LED menawarkan efisiensi tinggi, masa pakainya sangat dipengaruhi oleh stabilitas *driver* yang mengaturnya. Salah satu tantangan utama adalah *conducted emission* yang dihasilkan oleh *Switched Mode Power Supply* (SMPS) pada *driver* LED. Emisi ini tidak hanya menyebabkan interferensi elektromagnetik (EMI) yang dapat mengganggu perangkat lain, tetapi juga menciptakan stres elektrik dan termal yang dapat mempercepat degradasi dan memperpendek *lifetime* LED. Penelitian ini berfokus pada implementasi teknik *spread spectrum* untuk memitigasi *conducted emission* pada *driver* LED berbasis SMPS. Tujuan utamanya adalah untuk menganalisis pengaruh teknik *spread spectrum* terhadap parameter operasional LED yang berkaitan dengan proyeksi *lifetime*. Pendekatan yang diterapkan menggunakan modulasi *switching frequency* dengan bentuk gelombang Ramp dan Sinus untuk menyebarkan energi harmonisa dan menekan puncak EMI. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan tiga konfigurasi sistem: baseline (tanpa modulasi), modulasi Ramp, dan modulasi Sinus. Parameter yang dianalisis meliputi suhu lingkungan, intensitas lumen, arus, dan tegangan untuk memahami bagaimana teknik *spread spectrum* memengaruhi faktor-faktor kritis yang menentukan stabilitas operasional dan proyeksi *lifetime* LED.

Kata kunci— LED, Conducted Emission, EMI, Spread Spectrum, SMPS

I. PENDAHULUAN

Pengelolaan energi secara efisien menjadi aspek kunci dalam pengembangan teknologi pencahayaan modern. Teknologi *Light Emitting Diode* (LED) telah mencatat pencapaian besar dalam meningkatkan efisiensi energi dibandingkan sumber pencahayaan tradisional. Kemajuan ini terus didorong oleh inovasi yang bertujuan untuk memperbaiki kinerja dan kualitas pencahayaan secara berkelanjutan [1], [2], [3].

Kemajuan teknologi LED telah membuka berbagai peluang inovasi yang mendukung efisiensi dan keberlanjutan energi. Salah satu pendekatan potensial adalah penggabungan teknologi *Photovoltaic-Thermoelectric* (PV-TE) dengan material pengubah fasa untuk penyimpanan energi panas. Pendekatan ini memiliki potensi besar untuk meningkatkan produksi sekaligus penyimpanan energi yang lebih ramah lingkungan [4]. Selain itu, pengembangan bahan fosfor telah memungkinkan penciptaan LED dengan cahaya putih berkualitas tinggi, yang memiliki indeks renderasi warna lebih baik dan suhu warna lebih rendah. Teknologi ini mampu

memenuhi kebutuhan pencahayaan yang nyaman dan mendukung kesehatan [1].

Masalah *conducted emission* pada *driver* LED menjadi perhatian utama, terutama karena penggunaan *Switched Mode Power Supply* (SMPS) untuk meningkatkan efisiensi energi. Mekanisme kerja SMPS menghasilkan harmonisa *switching frequency* yang memicu gangguan elektromagnetik (*Electromagnetic Interference/EMI*), yang berpotensi mengganggu perangkat lain dalam jaringan listrik. Sebagai contoh, pengujian lampu LED 15 Watt menunjukkan *conducted emission* sebesar 82,5 dB μ V pada frekuensi 299,25 kHz, melebihi standar kompatibilitas elektromagnetik (*Electromagnetic Compatibility/EMC*) CISPR 22 Class B hingga 30,9 dB μ V. Kegagalan memenuhi standar EMC tidak hanya berdampak pada performa perangkat tetapi juga meningkatkan biaya mitigasi, seperti penggunaan filter EMI [5].

Teknik *Spread Spectrum* merupakan metode untuk mengurangi EMI dengan menyebarkan energi harmonisa ke berbagai spektrum frekuensi, sehingga amplitudo *noise* pada satu frekuensi tertentu dapat diminimalikan. Teknik ini digunakan pada sistem seperti LED *driver* berbasis PWM, di mana perubahan *switching frequency* yang cepat sering menghasilkan harmonisa beramplitudo tinggi. Dengan cara mengubah frekuensi *switching* secara acak atau terprogram, energi harmonisa yang awalnya terkonsentrasi pada satu titik frekuensi tersebar ke spektrum lain, sehingga lebih mudah memenuhi standar regulasi EMI. Metode ini efektif, hemat biaya, dan fleksibel dibandingkan teknik konvensional seperti filter atau *shielding* [6].

Switching Frequency pada *driver* LED merupakan komponen penting dalam pengendalian EMI yang dipancarkan oleh perangkat ini. Pada umumnya, *switching frequency* pada *driver* LED yang beroperasi dalam konfigurasi SMPS ditetapkan pada frekuensi tetap yang tinggi guna meningkatkan efisiensi energi. Namun, pendekatan ini sering kali memicu EMI yang signifikan, terutama akibat emisi dari frekuensi dasar, harmonik, dan harmoniknya. Untuk mengatasi tantangan tersebut, penelitian ini memperkenalkan teknik spektrum tersebar yang memanfaatkan sinyal *chaotic* dari osilator Lorenz untuk memodifikasi frekuensi *switching*. Dengan penerapan sinyal *chaotic* ini, *switching frequency* berfluktuasi secara acak, sehingga puncak EMI yang terkonsentrasi dapat didistribusikan lebih merata ke seluruh spektrum frekuensi. Pendekatan ini dirancang untuk memastikan kepatuhan terhadap standar EMC tanpa mengurangi kinerja atau efisiensi *driver* LED [7].

Penelitian ini difokuskan pada implementasi teknik spektrum tersebar sebagai upaya untuk mengatasi permasalahan *conducted emission* yang kerap terjadi pada *driver* LED berbasis *Switched Mode Power Supply* (SMPS). Tujuan utamanya adalah mengevaluasi efek penerapan teknik *spread spectrum* terhadap peningkatan *lifetime* LED dengan tetap menjaga ketahanan terhadap gangguan EMI dan efisiensi energi pada tingkat yang optimal. Pendekatan yang diusulkan melibatkan penggunaan *switching frequency* yang secara dinamis disesuaikan untuk menekan puncak EMI, yang sering kali melampaui batasan standar EMC. Melalui penerapan teknik ini, diharapkan *lifetime* LED dapat diperpanjang dengan mempertahankan stabilitas operasional, sehingga mendukung keandalan dan keberlanjutan dalam berbagai aplikasi pencahayaan. Evaluasi kinerja dilakukan dengan mengamati variabel-variabel seperti suhu, lumen, arus, dan tegangan untuk menilai dampak teknik tersebut terhadap *lifetime* LED.

II. KAJIAN TEORI

A. Light Emitting Diode (LED)

Teknologi LED beroperasi berdasarkan prinsip elektroluminesensi, yaitu proses di mana cahaya dihasilkan ketika arus listrik mengalir melalui bahan semikonduktor. Cahaya tersebut dihasilkan karena elektron dalam bahan semikonduktor bergerak dari pita konduksi ke pita valensi, melepaskan energi dalam bentuk foton. Warna cahaya yang dihasilkan ditentukan oleh jenis bahan semikonduktor yang digunakan serta tingkat energi yang dilepaskan selama proses tersebut [8].

Lifetime LED dipengaruhi oleh berbagai faktor krusial, termasuk arus operasional, suhu lingkungan, dan kualitas material semikonduktor yang digunakan. Penelitian mengungkapkan bahwa *lifetime* LED memiliki hubungan terbalik dengan pangkat tiga dari densitas arus stres. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme degradasi dipicu oleh keberadaan elektron berenergi tinggi yang terlibat dalam proses rekombinasi *Auger-Meitner* [9].

Pengukuran dan evaluasi *lifetime* LED dapat dilakukan melalui berbagai metode. Salah satu metode yang umum digunakan adalah standar LM-80-08, yang melibatkan pengujian lumen *maintenance* LED selama periode tertentu [10].

B. Conducted Emission

Conducted emission merupakan salah satu bentuk gangguan EMI yang ditransmisikan melalui jalur listrik, biasanya pada rentang frekuensi 150 kHz hingga 30 MHz. Gangguan ini berpotensi menginterferensi perangkat lain yang menggunakan jaringan listrik yang sama, sehingga harus mematuhi standar EMC seperti yang diatur dalam CISPR 22 Class B. *Conducted emission* terdiri atas dua mode utama: *Differential Mode* (DM), di mana arus mengalir antara fase dan netral, serta *Common Mode* (CM), di mana arus mengalir secara simultan melalui fase, netral, dan tanah [5].

Switched Mode Power Supply (SMPS) merupakan komponen vital dalam perangkat elektronik yang memanfaatkan teknik *switching* pada frekuensi tinggi. Teknik ini menghasilkan harmonisa frekuensi yang menjadi sumber utama terjadinya *conducted emission*. Dalam aplikasi

pada lampu LED, *noise* yang dihasilkan oleh SMPS sering kali melampaui batas regulasi yang ditetapkan. Berdasarkan penelitian, *conducted emission* pada lampu LED dapat mencapai tingkat 82,5 dB μ V pada frekuensi 299,25 kHz, yang melebihi batas yang diizinkan oleh CISPR 22 Class B sebesar 30,9 dB μ V [5].

C. Spread Spectrum

Spread Spectrum merupakan teknik yang digunakan untuk mengurangi gangguan *Electromagnetic Interference* (EMI) dengan menyebarkan energi harmonisa ke berbagai spektrum frekuensi. Pada metode konvensional seperti *Pulse Width Modulation* (PWM), frekuensi *switching* cenderung menghasilkan harmonisa yang terkonsentrasi pada satu spektrum frekuensi tertentu. Akibatnya, amplitudo *noise* di frekuensi tersebut sering kali melebihi batas yang ditetapkan oleh regulasi. Teknik *Spread Spectrum* bekerja dengan mengubah-ubah frekuensi *switching* di sekitar frekuensi utama, sehingga energi harmonisa yang sebelumnya terfokus pada satu titik akan tersebar ke berbagai spektrum. Penyebaran ini menyebabkan amplitudo *noise* pada masing-masing spektrum menjadi lebih rendah, sehingga dampak EMI dapat ditekan secara signifikan [6].

Dalam implementasinya pada sistem LED driver, berbagai jenis sinyal Spread Spectrum telah diterapkan untuk memodulasi frekuensi *switching* guna mereduksi EMI, khususnya pada *conducted emission*. Salah satu jenis sinyal yang digunakan adalah sinyal chaotic Lorenz, yaitu sinyal dengan pola yang acak namun tetap memiliki struktur dinamis yang khas. Sinyal ini diaplikasikan untuk memodulasi frekuensi *switching* LED driver secara acak namun terkontrol [7]. Selain itu, pendekatan lain menggunakan metode *random up spreading*, di mana frekuensi *switching* diacak naik dalam rentang 600 kHz hingga 650 kHz dengan interval acak minimal 100 Hz [6]. Pada penelitian terdahulu, sinyal periodik seperti gelombang segitiga dan sinus juga diterapkan dengan frekuensi sekitar 472,5 kHz hingga 525 kHz [11].

D. Switching Frequency

Pada penelitian Hariyawan [7] difokuskan pada implementasi teknik spektrum tersebar sebagai upaya untuk mengatasi permasalahan *conducted emission* yang kerap terjadi pada *driver* LED berbasis SMPS. Tujuan utamanya adalah meningkatkan ketahanan terhadap gangguan EMI sekaligus menjaga efisiensi energi pada tingkat yang optimal. Pendekatan yang diusulkan melibatkan penggunaan frekuensi *switching* yang secara dinamis disesuaikan untuk menekan puncak EMI, yang sering kali melampaui batasan standar EMC.

Frekuensi *switching* merujuk pada kecepatan perubahan kondisi *output* dalam SMPS, yang umum digunakan dalam pengaturan daya pada perangkat LED. Konsep ini memiliki peran penting, mengingat frekuensi operasi tetap sering kali memicu terjadinya EMI yang signifikan, sehingga berpotensi melanggar standar EMC. Dalam upaya mengatasi permasalahan ini, pada penelitian Hariyawan [7] mengusulkan pemanfaatan sinyal chaotic Lorenz untuk secara dinamis memodifikasi frekuensi *switching*. Pendekatan ini bertujuan untuk mengurangi EMI melalui metode *spread spectrum*, yang secara efektif

mendistribusikan energi emisi ke berbagai frekuensi, sehingga menekan puncak emisi pada frekuensi tertentu.

E. Metodologi Analisa

Karakteristik listrik pada sistem LED, khususnya konsumsi daya, berfungsi sebagai indikator utama tingkat stres termal yang dialami oleh komponen LED, yang secara langsung memengaruhi masa pakai LED tersebut. Konsumsi daya dihitung sebagai daya rata-rata (\bar{P}) selama periode operasi untuk menentukan beban termal total pada sistem [12], [13].

$$\bar{P} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i$$

Regresi linear merupakan salah satu model statistik paling fundamental yang digunakan untuk memodelkan hubungan antara satu atau lebih variabel independen dengan variabel dependen melalui garis lurus. Model ini sering diterapkan dalam berbagai bidang, seperti *machine learning* dan statistik, berfungsi untuk memperkirakan dan menyimpulkan efek perlakuan dalam uji klinis acak maupun eksperimen kuantitatif lainnya [14].

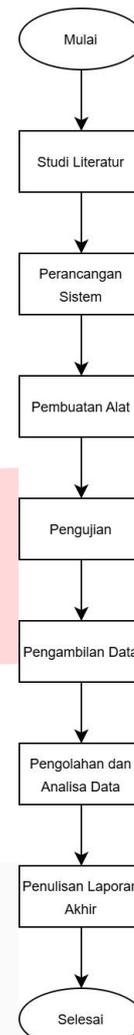
Model regresi linear digunakan untuk memodelkan laju degradasi rata-rata pemeliharaan cahaya (M_E) terhadap waktu (t), seperti pada persamaan berikut:

$$M_E = m \cdot t + c$$

Model ini sederhana dan mudah diinterpretasikan, sehingga sering digunakan untuk membandingkan performa antar konfigurasi pencahayaan. Namun, model ini mengasumsikan laju degradasi yang konstan sepanjang masa pakai, sehingga kurang akurat untuk prediksi jangka Panjang [15], [16].

III. METODE

Penelitian ini dilakukan secara bertahap, dimulai dari studi literatur untuk memahami teori dasar dan standar terkait, diikuti dengan perancangan sistem, pembuatan alat, pengujian, pengambilan data, dan diakhiri dengan penulisan laporan akhir. Diagram alur penelitian ini sebagai berikut:



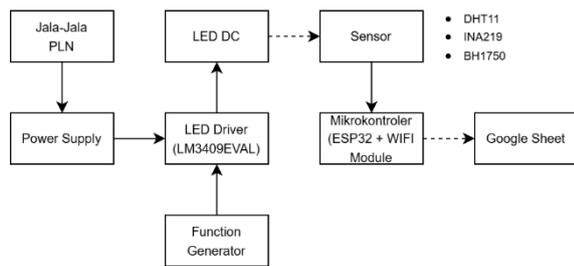
GAMBAR 1
(ALUR PENELITIAN)

A. Perancangan Sistem

Pada tahap ini, dilakukan kajian literatur untuk memahami teori dasar terkait penelitian ini. Studi literatur mencakup *Light Emitting Diode (LED)*, *Conducted Emission*, *Spread Spectrum*, *Switching Frequency*, dan Metodologi Analisa Masa Pakai.

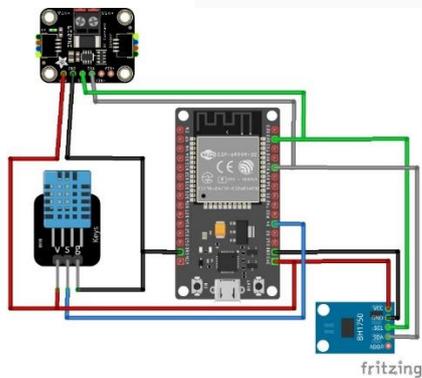
B. Perancangan Sistem

1) Desain Sistem: Sistem pengujian LED berbasis mikrokontroler ESP32 memiliki tiga bagian utama, yaitu *input*, *proses*, dan *output*. Pada bagian *input* mencakup sumber daya mulai dari jala-jala PLN dengan tegangan AC yang nantinya dikonversi menjadi tegangan DC melalui *power supply*. Sedangkan untuk bagian *proses* akan melibatkan LED driver LM3409EVAL, sinyal *input* dari *function generator*, serta mikrokontroler ESP32 yang nantinya terhubung dengan berbagai sensor untuk mendapatkan data selama pengujian. Untuk bagian *output* sendiri adalah Google Spreadsheet yang di mana dapat diakses secara daring serta dapat dilakukan analisa secara lanjut. Desain sistem pengujian bisa dilihat pada Gambar 2.



GAMBAR 2
(DESAIN SISTEM)

2) Perancangan Perangkat Keras: Perancangan perangkat keras pada pengujian ini menggunakan mikrokontroler ESP32 yang menghubungkan seluruh sensor untuk memantau LED sebagai objek pada pengujian. Sensor-sensor yang digunakan selama pengujian yakni DHT11 untuk memantau suhu dan kelembapan, BH1750 untuk mengukur tingkat pencahayaan, serta INA219 untuk memantau tegangan dan arus listrik. Mikrokontroler ESP32 ini dipilih karena sudah dilengkapi dengan adanya konektivitas WiFi, sehingga dapat mengirim data pengujian secara *real-time* dari ESP32 ke Google Spreadsheets tanpa memerlukan instalasi modul komunikasi tambahan. ESP32 sendiri juga memiliki jumlah pin I/O yang cukup untuk mendukung berbagai sensor yang akan digunakan selama pengujian. Untuk sensor BH1750 dan INA219 terhubung melalui protokol I2C yang memungkinkan penggunaan jalur komunikasi yang sama, sedangkan untuk sensor DHT11 sendiri menggunakan komunikasi *one-wire* yang memiliki konfigurasi lebih sederhana. Rancangan perangkat keras dapat dilihat pada Gambar 3.



GAMBAR 3
(RANCANGAN HARDWARE)

3) Perancangan Perangkat Keras: *Flowchart* pada Gambar 4 ini menunjukkan alur kerja dari sistem IoT berbasis ESP32 yang berfungsi untuk memantau kondisi lingkungan selama pengujian berlangsung secara *real-time* dengan menggunakan beberapa sensor yang kemudian nantinya mengirimkan data hasil pemantauan selama pengujian ke Google Spreadsheets secara otomatis dalam interval waktu yang telah ditentukan.



GAMBAR 4
(ALUR PROGRAM)

C. Pembuatan Alat

Tahap pembuatan alat ini meliputi perakitan sistem, pemrograman ESP32, dan pengujian awal. Perakitan dimulai dengan menghubungkan LM3409EVAL sebagai driver LED, *function generator* untuk sinyal *input*, dan integrasi sensor dengan ESP32. Kemudian dilanjutkan pemrograman ESP32 yang di mana akan dikonfigurasi untuk membaca data-data dari sensor dan mengirimkan ke Google Spreadsheets sebagai tempat menyimpan data secara *real-time*. Terakhir pengujian awal dilakukan untuk memastikan semua komponen berfungsi dengan baik.

D. Pengujian

Pengujian dilakukan dengan 3 skenario sistem yang berbeda untuk mengetahui perbedaan dampak sinyal *input* dari teknik *spread spectrum* terhadap performa LED:

1) Sistem *Baseline* (Tanpa *Spread Spectrum*): *Driver* LED beroperasi dalam kondisi normal tanpa modifikasi sinyal *input*. Pengukuran ini digunakan sebagai referensi untuk perbandingan dengan sistem yang menerapkan teknik *spread spectrum*.

2) Sistem Modulasi *Ramp*: Teknik *spread spectrum* diterapkan menggunakan sinyal *ramp* dengan frekuensi 525 kHz dan amplitudo 12 Vpp.

3) Sistem Modulasi Sinus: Menggunakan sinyal sinus sebagai modulasi dengan frekuensi 525 kHz dan amplitudo 12 Vpp.

Parameter yang dicatat meliputi: Suhu dan kelembapan (DHT11) untuk memantau stabilitas kondisi lingkungan, Output lumen (BH1750) untuk mengetahui degradasi intensitas cahaya, dan Arus dan tegangan (INA219) untuk memantau stabilitas konsumsi daya LED.

E. Pengambilan Data

Pengumpulan data dilakukan secara otomatis melalui sensor yang terhubung dengan ESP32. Data diambil setiap 10 menit dan dikirimkan secara real-time ke Google Spreadsheet melalui API untuk analisis online selama dan setelah pengujian.

F. Pengambilan Data

Pengolahan data menggunakan bahasa pemrograman Python dengan pustaka matplotlib untuk visualisasi grafik. Analisis meliputi perhitungan karakteristik listrik LED, hubungan antara suhu dan kelembaban terhadap intensitas cahaya, serta metode regresi linear menggunakan fungsi `linregress` dari `library scipy` untuk menganalisis pola degradasi cahaya secara kuantitatif.

```
=== Sending Data to Google Sheets ===
URL: https://script.google.com/macros/s/
Sending sensor data:
Temperature: 31.8°C
Humidity: 91.0%
Light Level: 250.0 lux
Voltage: 0.000V
Current: 11.8mA
HTTP Response Code: 200
Response Time: 120 ms
FE0 Data sent successfully!
Server Response: Success
Free heap after HTTP: 316000 bytes
=== End Data Transmission ===
```

GAMBAR 6
(HASIL PENGUJIAN PENGIRIMAN DATA)

Timestamp	Temperature (°C)	Humidity (%)	Light (lux)	Voltage (V)	Current (mA)
4/12/2025 1:17:39	31.8	91	250	0	11.8

GAMBAR 7
(DATA PENGUJIAN PADA GOOGLE SPREADSHEET)

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil eksperimen dari ketiga konfigurasi sistem yang diuji selama periode 249 jam operasi kontinu, serta analisis mendalam terhadap dampak Teknik *spread spectrum* pada performa dan *lifetime* LED.

A. Pengujian Mikrokontroler dan Sensor

Pengujian mikrokontroler dan sensor dilakukan untuk memastikan sistem dapat berfungsi dengan baik sebelum pengujian utama. Mikrokontroler ESP32 dihubungkan ke laptop menggunakan kabel USB dengan aplikasi Platform IO pada Visual Studio Code. Sensor yang digunakan adalah DHT11 (suhu dan kelembapan), BH1750 (intensitas cahaya), dan INA219 (tegangan dan arus).

```
Verifying DHT11 sensor...
Verifying BH1750 light sensor...
Verifying INA219 current sensor...
Sensor Readings:
Temperature: 31.8°C
Humidity: 91.0%
Light Level: 250.0 lux
Bus Voltage: 0.000 V
Current: 11.8 mA
```

GAMBAR 5
(HASIL PENGUJIAN MIKROKONTROLER DAN SENSOR)

B. Pengujian Pengiriman Data ke Google Spreadsheet

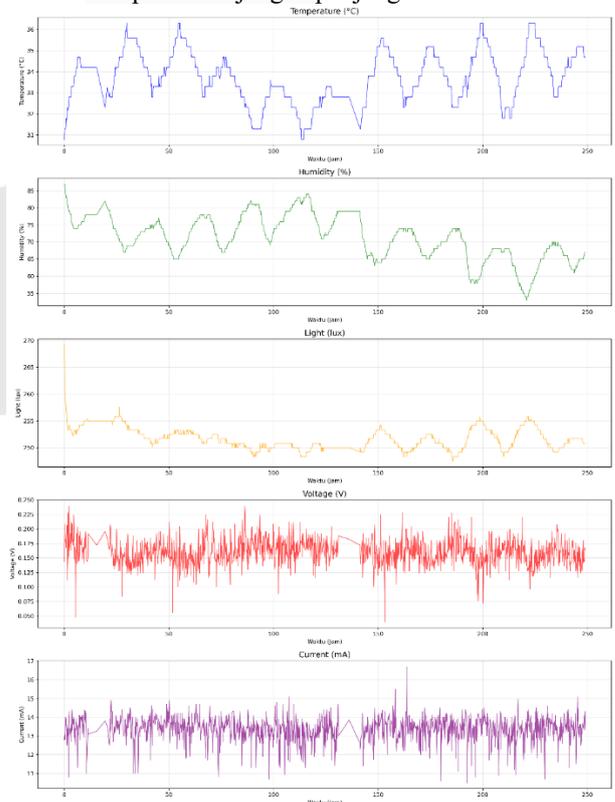
Pengujian untuk dilakukannya pengiriman data ke Google Spreadsheet dilakukan agar dapat memastikan bahwa data yang dibaca oleh sensor dapat terkirim serta tercatat secara otomatis di Google Spreadsheet yang berfungsi sebagai penyimpanan data selama pengujian. Dalam prosesnya, mikrokontroler yang terhubung dengan jaringan WiFi diharapkan dapat mengirimkan data dari sensor-sensor yang sudah terpasang yakni DHT11, INA219, dan BH1750 ke Google Spreadsheet melalui koneksi internet dengan jaringan WiFi.

C. Pengumpulan Data

Pada bagian ini, menyajikan hasil dari data selama pengujian dengan menggunakan beberapa sistem yang sudah ditentukan. Data yang terkumpul merupakan representasi kuantitatif dari kinerja masing-masing sistem dan akan menjadi dasar untuk analisis perbandingan yang lebih mendalam.

1. Data Hasil Pengujian Sistem Baseline

Pengujian pertama dilakukan pada sistem *driver* LED yang beroperasi tanpa penerapan teknik *spread spectrum* (*baseline*). Pada kondisi ini, sinyal *input* ke *driver* tidak dilakukan modulasi, sehingga sistem akan berjalan dalam mode standar tanpa penyebaran spektrum frekuensi. Sistem dijalankan secara kontinu selama 249 jam untuk memperoleh data yang menjadi acuan dalam kondisi normal dengan stabilitas dan performa jangka panjang dari LED.

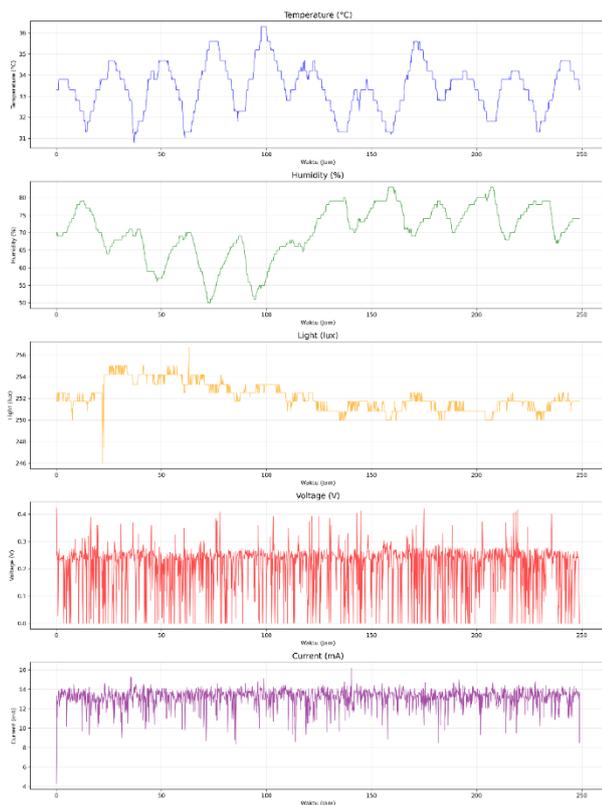


GAMBAR 8
(VISUALISASI DATA SISTEM BASELINE)

Berdasarkan Gambar 8, suhu lingkungan selama pengujian sistem *baseline* berkisar antara 30.8°C hingga 36.3°C, dengan rata-rata 33.8°C, mengikuti pola harian tanpa fluktuasi ekstrem. Kelembapan berada dalam rentang 53.0% hingga 87.0%, dengan rata-rata 70.8%, menunjukkan kecenderungan menurun saat suhu meningkat, yang merupakan respons alamiah. *Output* cahaya LED relatif stabil dalam kisaran 247.5 hingga 269.2 lux (rata-rata 251.6 lux), meskipun di awal pengujian terjadi lonjakan pada *output* cahaya, namun tidak berdampak signifikan terhadap kestabilan sistem. Dari sisi kelistrikan, tegangan 0.040 hingga 0.240 V dan arus 10.5 hingga 16.7 mA menunjukkan daya yang stabil, tanpa lonjakan atau penurunan tajam selama pengujian berlangsung.

2. Data Hasil Pengujian Sistem Ramp

Pengujian kedua dilakukan pada *driver* LED yang menerapkan sistem teknik *spread spectrum* dengan menggunakan sinyal modulasi dalam bentuk gelombang *ramp*. Pada skenario ini, sinyal *ramp* yang diberikan pada *driver* LED memiliki frekuensi sebesar 525 kHz dan amplitudo 12 Vpp selama pengujian berlangsung.



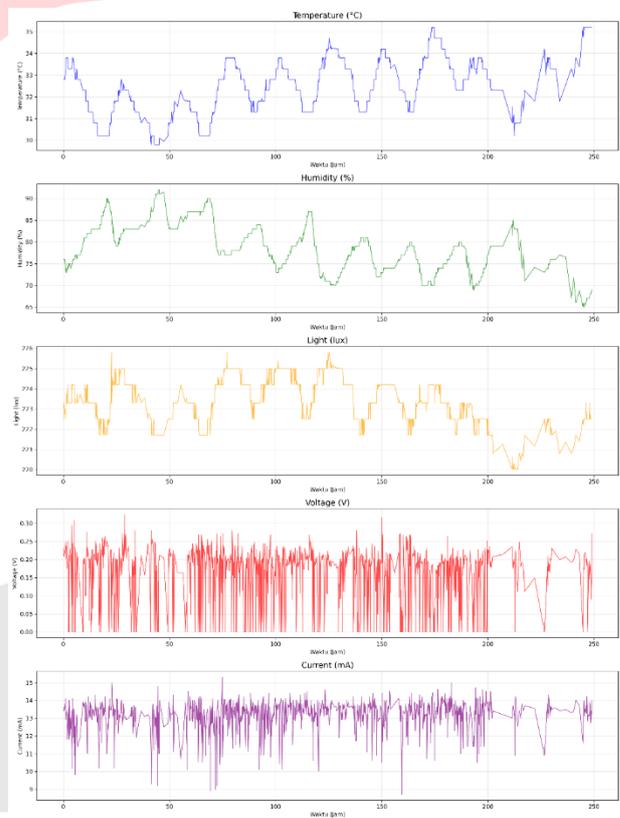
GAMBAR 9
(VISUALISASI DATA SISTEM RAMP)

Berdasarkan Gambar 9, suhu selama pengujian dengan teknik *spread spectrum* sinyal *ramp* berkisar antara 30,8°C hingga 36,3°C, dengan rata-rata 33,4°C, mengikuti siklus harian dan tetap dalam batas aman. Kelembapan berada di kisaran 50,0% hingga 83,0%, dengan rata-rata 70,3%, mengikuti pola suhu dan tidak menimbulkan risiko terhadap sistem. Intensitas cahaya LED relatif stabil dalam rentang

246,0 hingga 256,7 lux, dengan rata-rata 252,1 lux, meskipun terjadi penurunan signifikan antara jam ke-20 hingga ke-25, yang diduga akibat penerapan teknik *spread spectrum*. Dari sisi kelistrikan, tegangan menunjukkan rentang 0,000 hingga 0,424 V, dengan rata-rata 0,208 V, di mana tercatat penurunan tegangan hingga 0 volt yang mengindikasikan sistem sempat kehilangan daya karena efek penerapan Teknik *spread spectrum* selama pengujian. Arus berkisar antara 4,3 hingga 16,2 mA, dengan rata-rata 13,2 mA, dan nilai minimum yang rendah menunjukkan adanya penurunan suplai daya pada LED. Kondisi anomali ini berpotensi mempercepat degradasi komponen jika terjadi secara berulang.

3. Data Hasil Pengujian Sistem Sinus

Pengujian ketiga difokuskan pada *driver* LED yang menerapkan sistem teknik *spread spectrum* dengan menggunakan sinyal modulasi berbentuk gelombang sinus. Pada pengujian sistem ini menggunakan frekuensi yang sama dengan modulasi sebesar 525 kHz dan juga amplitudo sebesar 12 V.



GAMBAR 10
(VISUALISASI DATA SISTEM SINUS)

Berdasarkan Gambar 10, pengujian sistem *spread spectrum* dengan sinyal sinus menunjukkan bahwa suhu lingkungan berkisar antara 29.8°C hingga 35.2°C (rata-rata 32.5°C), sedikit lebih rendah dibandingkan dengan sistem *baseline*. Penurunan ini kemungkinan disebabkan oleh bentuk sinyal sinus yang lebih halus, yang menghasilkan *switching* lebih lembut dan panas lebih rendah. Kelembapan tercatat cukup tinggi, yaitu antara 65.0% dan 92.0% (rata-rata 78.6%), namun tidak menimbulkan gangguan pada sistem. *Output* cahaya LED berada dalam rentang

(rata-rata 223.4 lux), lebih rendah dari sistem sebelumnya, tetapi menunjukkan kestabilan intensitas yang lebih baik tanpa fluktuasi besar. Dari sisi kelistrikan, tegangan bervariasi antara 0.000 dan 0.324 V (rata-rata 0.162 V), menunjukkan adanya penurunan tegangan sampai nol yang menandakan adanya kondisi mati sementara pada sistem efek dari penerapan teknik *spread spectrum*. Arus berkisar antara 8.7 dan 15.3 mA (rata-rata 13.2 mA), dan nilai minimum yang cukup rendah mengindikasikan suplai daya yang tidak selalu stabil.

D. Pengolahan Data

Pada bagian ini merupakan proses pengolahan data dan ditahap ini dilakukan Analisa yang lebih lanjut dengan metode yang sudah ditentukan sebelumnya.

1. Analisa Karakteristik Kelistrikan

Analisis pada bagian ini difokuskan untuk melakukan evaluasi karakteristik listrik dari sistem LED, khususnya terkait dengan konsumsi daya selama proses pengujian. Konsumsi daya berperan penting sebagai indikator utama dalam menilai tingkat stres termal yang dialami oleh komponen LED. Nilai daya rata-rata (\bar{P}) dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\bar{P} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i \quad (1)$$

Yang di mana :

\bar{P} = Rata-rata Konsumsi Daya (W)

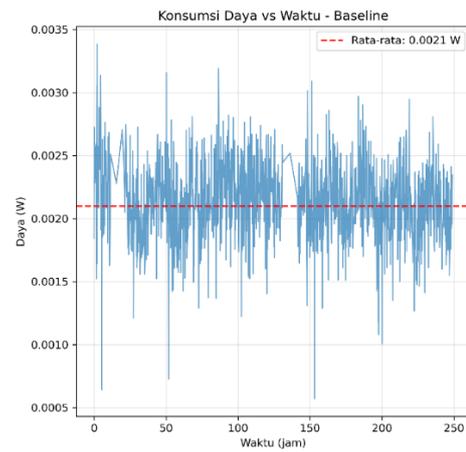
N = Jumlah data yang diambil tiap 10 menit

P_i = Daya pada kondisi i (W)

TABEL 1
(DATA RATA-RATA KONSUMSI DAYA)

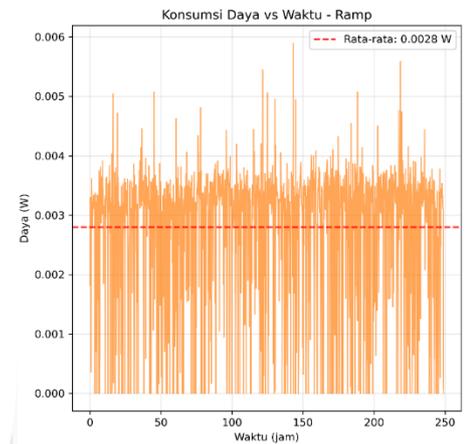
Sistem Pengujian	Rata-Rata Konsumsi Daya (W)
Baseline	0.0021
Ramp	0.0028
Sinus	0.0021

Berdasarkan data pada Tabel 1, nilai hasil dari perhitungan rata-rata konsumsi daya selama 249 jam pengujian pada ketiga sistem ditunjukkan dengan menggunakan rumus (1). Pada sistem *baseline*, yang tidak menerapkan teknik *spread spectrum*, konsumsi daya rata-rata tercatat sebesar 0,0021 W, menunjukkan kestabilan yang lebih baik. Sementara itu, untuk pengujian yang menerapkan *spread spectrum* dengan sinyal modulasi berbentuk *ramp*, konsumsi daya rata-rata tercatat sebesar 0,0028 W. Hal ini menunjukkan peningkatan daya sekitar 33% dibandingkan dengan sistem *baseline*.



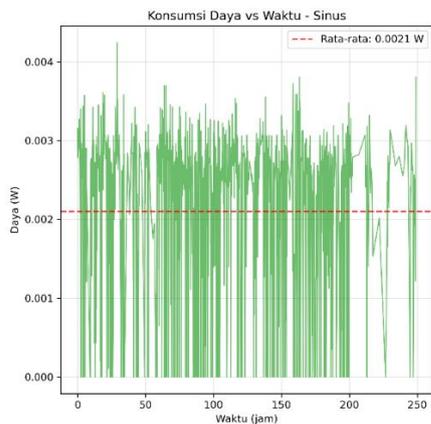
GAMBAR 11
(GRAFIK RATA-RATA KONSUMSI DAYA BASELINE)

Pada Gambar 11 dapat dilihat bahwa lonjakan atau penurunan daya pada sistem *baseline* dapat dikategorikan stabil selama dilakukannya pengujian. Hal ini menunjukkan bahwa sistem *baseline* menunjukkan performa yang stabil dengan sistem tanpa teknik *spread spectrum*.



GAMBAR 12
(GRAFIK RATA-RATA KONSUMSI DAYA RAMP)

Pada Gambar 12 terlihat dari grafik terjadi adanya lonjakan atau penurunan yang signifikan yang di mana daya juga sesaat turun hingga menyentuh 0 W dan LED sempat tidak menyala akibat dari *switching* yang dilakukan pada sistem ini. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan teknik *spread spectrum* ini dapat menyebabkan ketidakstabilan konsumsi daya selama pengujian berlangsung yang dapat menyebabkan pemanasan berlebih akibat dari ketidakstabilan konsumsi daya pada sistem ini.



GAMBAR 13
(GRAFIK RATA-RATA KONSUMSI DAYA SINUS)

Pada Gambar 13 merupakan grafik konsumsi daya pada sistem dengan sinyal sinus selama pengujian. Sama seperti sistem dengan sinyal *ramp*, pada sistem ini juga terjadi adanya penurunan daya hingga 0 W selama pengujian. Hal ini merupakan akibat penerapan efek dari mekanisme penyebaran spektrum frekuensi pada teknik *spread spectrum*. Penurunan ini terjadi akibat adanya distribusi energi yang tersebar ke berbagai frekuensi, sehingga arus dan tegangan dapat menurun drastis dalam waktu tertentu. Meskipun begitu lonjakan daya pada sistem ini tidak terlalu tinggi jika dibandingkan dengan sistem dengan sinyal *ramp*, sehingga pemanasan berlebih pada sistem ini tidak terlalu signifikan.

2. Analisa Pengaruh Lingkungan

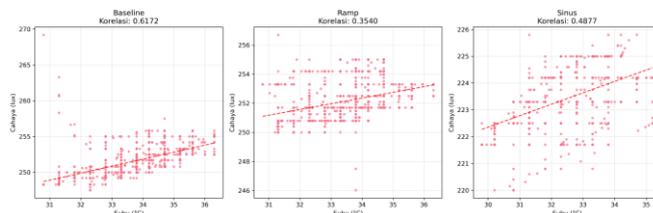
Dalam mengevaluasi faktor-faktor yang dapat memengaruhi performa dan umur operasional LED, suhu dan kelembapan lingkungan menjadi faktor penting yang perlu diperhatikan.

TABEL 2
(DATA ANALISA PENGARUH LINGKUNGAN)

Sistem Pengujian	Korelasi Suhu dengan Cahaya	Korelasi Kelembapan dengan Cahaya
Baseline	+0.6172	-0.3664
Ramp	+0.3540	-0.6935
Sinus	+0.4877	-0.3334

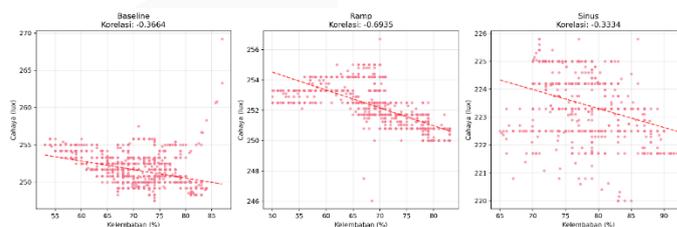
Tabel 2 menampilkan data korelasi antara suhu dan cahaya serta korelasi antara kelembapan dan cahaya, yang diperoleh dari pengujian selama 249 jam. Data ini kemudian dianalisis lebih lanjut untuk mengetahui keterkaitan antara suhu dan cahaya serta antara kelembapan dan cahaya. Dari tabel tersebut, terlihat bahwa korelasi suhu dengan pencahayaan menunjukkan hubungan positif pada ketiga sistem. Nilai korelasi suhu dengan cahaya pada sistem *baseline* adalah +0.6172, pada sistem *ramp* +0.3540, dan pada sistem sinus +0.4877. Korelasi positif ini menunjukkan bahwa peningkatan *output* cahaya cenderung menyebabkan peningkatan suhu di lingkungan, dan sebaliknya. Sementara itu, korelasi kelembapan dengan *output* cahaya dari tabel menunjukkan hubungan negatif pada ketiga sistem. Data menunjukkan nilai korelasi kelembapan dengan cahaya pada sistem *baseline* sebesar -0.3664, pada sistem *ramp* -0.6935, dan pada sistem sinus -0.3334. Korelasi negatif ini

menyiratkan bahwa penurunan *output* cahaya cenderung menyebabkan peningkatan kelembapan.



GAMBAR 14
(KORELASI SUHU DENGAN CAHAYA)

Dari Gambar 14, sistem *Baseline* menunjukkan sensitivitas tertinggi terhadap suhu di antara ketiga sistem, menandakan bahwa sistem ini sangat responsif terhadap perubahan suhu di lingkungannya. Hal ini terlihat dari titik-titik yang tersebar mengikuti garis. Sebaliknya, sistem yang menerapkan *spread spectrum* sinyal *ramp* menunjukkan sensitivitas terendah, menandakan bahwa sistem ini lebih stabil dalam menghadapi fluktuasi suhu. Hal ini dapat dilihat dari penyebaran titik yang lebih luas dibandingkan dengan sistem lainnya. Sementara itu, sistem dengan modulasi sinyal sinus berada di antara sistem *baseline* dan *ramp*, menunjukkan performa yang cukup stabil. Penyebaran titik pada sistem ini sangat acak, namun garisnya cukup tinggi sehingga nilai korelasinya masih lebih baik dibandingkan dengan sistem *ramp*.



GAMBAR 15
(KORELASI KELEMBAPAN DENGAN CAHAYA)

Berdasarkan Gambar 15, sistem *ramp* menunjukkan bahwa sistem ini sangat sensitif terhadap kelembapan. Hal ini terlihat dari penyebaran titik-titik yang cenderung mengikuti garis dengan arah penurunan yang jelas, sehingga dapat disimpulkan bahwa jika terjadi penurunan *output* cahaya, kelembapan akan meningkat secara konsisten. Sementara itu, sistem *baseline* menunjukkan sensitivitas sedang terhadap perubahan kelembapan. Pola titiknya mengindikasikan hal ini, meskipun tidak sekuat sistem *ramp*. Di sisi lain, sistem sinus menunjukkan sensitivitas terendah di antara ketiga sistem yang diuji. Penyebaran titik yang acak pada sinyal sinus ini menunjukkan bahwa hubungan antara kelembapan dan pencahayaan tidak konsisten.

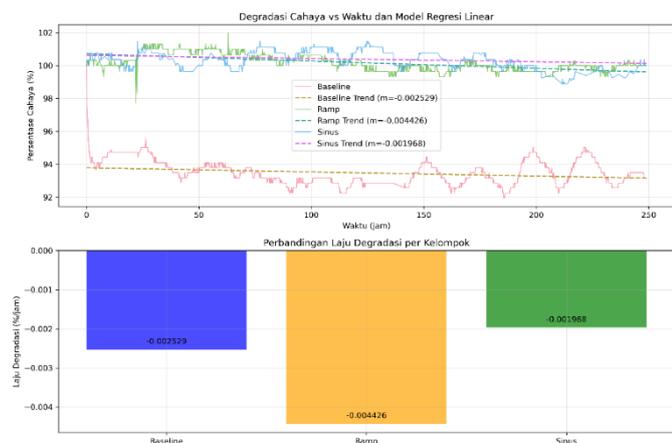
3. Analisa Degradasi Pencahayaan Dengan Regresi Linear

Dalam menganalisis degradasi pencahayaan sebagai acuan untuk menentukan *lifetime* LED, digunakan model regresi linear untuk memodelkan hubungan antara rata-rata pemeliharaan cahaya (M_E) terhadap waktu (t). Model ini dirumuskan sebagai:

$$M_E = m \cdot t + c \quad (2)$$

Yang di mana:

M_E = Nilai Lumen
 m = laju degradasi lumen (*slope*)
 t = waktu
 c = nilai lumen awal



GAMBAR 16
(PENURUNAN PENCAHAYAAN DENGAN REGRESI LINEAR)

Berdasarkan Gambar 16, hasil dari model regresi linear menunjukkan bahwa setiap sistem memiliki laju penurunan cahaya yang berbeda. Sistem dasar tanpa teknik *spread spectrum* memiliki laju penurunan $m = -0.002529$ %/jam. Penurunan ini digunakan sebagai pembandingan dengan sistem lain yang memakai teknik *spread spectrum*. Sistem dengan teknik *spread spectrum* berbasis sinyal *ramp* memiliki laju penurunan tertinggi, yaitu $m = -0.004426$ %/jam. Ini berarti cahaya LED menurun sekitar 75% lebih cepat dibandingkan sistem dasar. Penurunan cepat ini mungkin disebabkan oleh stres termal dari suhu tinggi dan stres elektrik dari perubahan frekuensi yang tajam, yang mempercepat kerusakan material LED. Sementara itu, sistem dengan teknik *spread spectrum* berbasis sinyal sinus memiliki laju penurunan terendah, yaitu $m = -0.001968$ %/jam. Ini menunjukkan bahwa penurunan cahaya paling lambat dan bisa membuat LED bertahan lebih lama. Meskipun ada stres elektrik dari *switching*, sistem ini lebih stabil dengan cahaya yang lebih konsisten meskipun sedikit lebih redup dibandingkan sistem lain.

E. Analisa

Pengujian berlangsung selama 249 jam untuk melihat karakteristik listrik, pengaruh lingkungan, dan penurunan cahaya pada tiga sistem: *baseline* (tanpa *spread spectrum*), *spread spectrum* dengan sinyal *ramp*, dan *spread spectrum* dengan sinyal sinus. Hasilnya menunjukkan bahwa konsumsi daya rata-rata sistem *baseline* dan sinus sama, yaitu 0,0021 W. Sistem *ramp* lebih tinggi, yaitu 0,0028 W, atau naik sekitar 33%. Sistem *ramp* dan sinus kadang-kadang mengalami penurunan daya hingga 0 W, menandakan pemadaman sesaat karena stres termal dan elektrik, meskipun sistem sinus tidak mengalami konsumsi daya berlebih. Korelasi antara *output* cahaya dan suhu paling tinggi pada sistem *baseline* (+0,62), diikuti sinus (+0,49), dan *ramp* (+0,35). Korelasi dengan kelembapan paling negatif pada sistem *ramp* (-0,6935), *baseline* (-0,3664), dan sinus (-0,3334), menunjukkan sistem *ramp* paling sensitif terhadap kelembapan. Pemodelan penurunan cahaya dengan regresi

linear menunjukkan laju penurunan sistem *baseline* - 0,002529%/jam, *ramp* -0,004426%/jam (sekitar 75% lebih cepat dari *baseline*), dan sinus -0,001968%/jam, menjadikannya yang paling kecil. Secara keseluruhan, sistem *spread spectrum* dengan sinyal sinus menunjukkan performa terbaik karena konsumsi dayanya sama dengan sistem *baseline* dan laju penurunan paling rendah, meskipun intensitas cahayanya lebih redup sekitar 11,2%.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian selama 249 jam pada tiga sistem pencahayaan LED, yaitu *Baseline*, *spread spectrum* dengan sinyal *ramp*, dan *spread spectrum* dengan sinyal sinus, ditemukan beberapa hal penting. Sistem *Baseline* dan sinus memiliki konsumsi daya rata-rata yang sama, yaitu 0,0021 W. Namun, sistem *ramp* menggunakan daya lebih tinggi, yaitu 0,0028 W, atau naik sekitar 33%, dan mengalami panas berlebih. Ada juga fluktuasi daya ekstrem yang menyebabkan pemadaman sesaat pada sistem *ramp* dan sinus, menunjukkan stres elektrik tambahan, terutama pada sistem *ramp*. Korelasi positif antara suhu dan *output* cahaya paling kuat pada sistem *Baseline* dengan nilai +0,62. Sementara itu, korelasi negatif antara kelembapan dan *output* cahaya paling signifikan pada sistem *ramp* dengan nilai -0,6935, menunjukkan sensitivitas tinggi terhadap kelembapan. Dari segi degradasi, sistem *ramp* mengalami penurunan *output* cahaya tercepat dengan laju -0,004426 %/jam, sedangkan sistem sinus mencatat degradasi paling rendah sebesar -0,001968 %/jam, menunjukkan ketahanan jangka panjang yang lebih baik. Meskipun sistem sinus menghasilkan cahaya sekitar 11,2% lebih redup dibandingkan *Baseline*, sistem ini tetap memberikan kinerja terbaik karena konsumsi daya rendah dan degradasi cahaya yang lambat. Oleh karena itu, sistem *spread spectrum* dengan sinyal sinus terbukti paling unggul dalam pengujian ini.

REFERENSI

- [1] X. Huang, J. Liang, S. Rtimi, B. Devakumar, dan Z. Zhang, "Ultra-high color rendering warm-white light-emitting diodes based on an efficient green-emitting garnet phosphor for solid-state lighting," *Chemical Engineering Journal*, vol. 405, 2021, doi: 10.1016/j.cej.2020.126950.
- [2] S. Miao, Y. Liang, R. Shi, W. Wang, Y. Li, dan X. J. Wang, "Broadband Short-Wave Infrared-Emitting MgGa₂O₄:Cr³⁺, Ni²⁺ Phosphor with Near-Unity Internal Quantum Efficiency and High Thermal Stability for Light-Emitting Diode Applications," *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 15, no. 27, 2023, doi: 10.1021/acsami.3c05980.
- [3] T. G. Shibaeva, E. G. Sherudilo, A. A. Rubaeva, dan A. F. Titov, "Continuous LED Lighting Enhances Yield and Nutritional Value of Four Genotypes of Brassicaceae Microgreens," *Plants*, vol. 11, no. 2, 2022, doi: 10.3390/plants11020176.
- [4] H. Alghamdi *dkk.*, "Latest Advancements in Solar Photovoltaic-Thermoelectric Conversion Technologies: Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials, Machine Learning, and 4E Analyses," 2024. doi: 10.1155/2024/1050785.

- [5] S. N. Posma, M. Y. Hariyawan, dan O. Rifandi, "Perancangan Filter EMI Pasif dalam Rangka Mitigasi Conducted emission pada Lampu LED," *Jurnal Elektro dan Mesin Terapan*, vol. 5, no. 2, 2019, doi: 10.35143/elementer.v5i2.3376.
- [6] N. Harpawi, M. Y. Hariyawan, dan S. N. Posma, "Teknik Mitigasi Conducted Emission Pada LED Driver Topologi Buck Dengan Metode Random Up Spreading Switching Frequency," *Jurnal Elektro dan Mesin Terapan*, vol. 5, no. 2, 2019, doi: 10.35143/elementer.v5i2.3357.
- [7] M. Y. Hariyawan dan N. H. Harpawi, "Modifikasi Frekuensi Switching pada LED Driver Menggunakan Oscillator Lorenz Analog untuk Mereduksi Conducted EMI," *Jurnal Elektro dan Mesin Terapan*, vol. 6, no. 2, 2020, doi: 10.35143/elementer.v6i2.3600.
- [8] A. Prasad, L. Du, M. Zubair, S. Subedi, A. Ullah, dan M. S. Roopesh, "Applications of Light-Emitting Diodes (LEDs) in Food Processing and Water Treatment," 2020. doi: 10.1007/s12393-020-09221-4.
- [9] N. Trivellin *dkk.*, "Performance and Degradation of Commercial Ultraviolet-C Light-Emitting Diodes for Disinfection Purposes," *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*, vol. 220, no. 16, 2023, doi: 10.1002/pssa.202200900.
- [10] J. Hegedüs, G. Hantos, dan A. Poppe, "Lifetime modelling issues of power light emitting diodes," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 13, 2020, doi: 10.3390/en13133370.
- [11] M. Y. Hariyawan, R. Hidayat, dan E. Firmansyah, "The Effects of spread spectrum techniques in mitigating conducted EMI to LED luminance," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 6, no. 3, 2016, doi: 10.11591/ijece.v6i3.9528.
- [12] M. Strąkowska *dkk.*, "Modelling and Thermographic Measurements of LED Optical Power," *Sensors*, vol. 24, no. 5, 2024, doi: 10.3390/s24051471.
- [13] B. Sun *dkk.*, "A novel lifetime prediction for integrated LED lamps by electronic-thermal simulation," *Reliab Eng Syst Saf*, vol. 163, 2017, doi: 10.1016/j.res.2017.01.017.
- [14] J. Lu, "A rigorous introduction to linear models," Mei 2025, [Daring]. Tersedia pada: <http://arxiv.org/abs/2105.04240>
- [15] A. Ikuzwe, X. Xia, dan X. Ye, "Maintenance optimization incorporating lumen degradation failure for energy-efficient lighting retrofit projects," *Appl Energy*, vol. 267, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115003.
- [16] Y. G. Yoon, J. P. Hyung, U. H. Jeong, H. W. Lim, dan J. S. Jang, "Life time comparison of LED package and the self-ballasted LED lamps by simple linear regression analysis," *Microelectronics Reliability*, vol. 55, no. 9–10, 2015, doi: 10.1016/j.microrel.2015.07.044.