

Karakterisasi Respons Elektrikal-Termal Transien LED COB pada Modul Aluminium Berbasis CNC terhadap Variasi Arus

Muhammad Rasyid Putera Agung ^{1*}, Ida Nurcahyani ¹

1. Program Studi Magister Rekayasa Elektro, Universitas Islam Indonesia
email 25925008@students.uii.ac.id, ida-nurcahyani@uii.ac.id

* Penulis Korespondensi: Muhammad Rasyid Putera Agung

Abstract: Chip-on-board (COB) LEDs in high-power lighting systems require thermal characterization because temperature rise can affect forward voltage, electrical power, optical stability, and system reliability. This study aims to characterize the transient electrical-thermal response of a COB LED mounted on a CNC-based aluminum module under current variation. The experiment was conducted using a constant-current (CC) power supply with a voltage compliance of 37 V. Seven current levels from 0.20 A to 0.50 A were tested for approximately 7200 s, with three repetitions performed at each current level. The measurement system recorded the actual forward voltage, measured current, calculated electrical power, module temperature, and local ambient temperature. The thermal response was analyzed using the temperature difference between the module and local ambient, while the late-time thermal response was represented by the average temperature rise during the last 30 minutes of each test. The results show that increasing current increased the calculated electrical power from approximately 6.68 W to 18.00 W and increased the late-time temperature rise from 13.39 °C to 45.27 °C. A linear empirical model between electrical power and late-time temperature rise produced ($\Delta T_{\text{late}} = 2.9820P - 6.3289$) with ($R^2 = 0.9605$). These results indicate a clear electrical-thermal relationship in the tested module, although not all current levels reached full steady-state within the test duration. Therefore, the findings are interpreted as transient and late-time thermal characteristics rather than universal steady-state behavior.

Keywords: COB LED; transient thermal response; electrical-thermal characterization; current variation; late-time thermal response.

Abstrak: LED *chip-on-board* (COB) pada sistem pencahayaan daya tinggi memerlukan karakterisasi termal karena kenaikan temperatur dapat memengaruhi forward voltage, daya listrik, stabilitas optik, dan keandalan sistem. Penelitian ini bertujuan mengkarakterisasi respons elektrikal-termal transien LED COB yang dipasang pada modul aluminium berbasis CNC terhadap variasi arus. Pengujian dilakukan menggunakan power supply pada mode constant current (CC) dengan voltage compliance 37 V. Tujuh level arus dari 0,20 A hingga 0,50 A diuji selama sekitar 7200 s, dengan tiga kali pengulangan pada setiap level arus. Sistem pengukuran mencatat tegangan forward aktual, arus terukur, daya listrik hasil perhitungan, temperatur modul, dan temperatur ambient lokal. Respons termal dianalisis menggunakan selisih temperatur antara modul dan ambient lokal, sedangkan respons termal akhir direpresentasikan oleh rata-rata kenaikan temperatur pada 30 menit terakhir pengujian. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan arus menaikkan daya listrik dari sekitar 6,68 W menjadi 18,00 W dan meningkatkan kenaikan temperatur akhir dari 13,39 °C menjadi 45,27 °C. Model empiris linear antara daya listrik dan kenaikan temperatur akhir menghasilkan persamaan ($\Delta T_{\text{late}} = 2,9820P - 6,3289$) dengan ($R^2 = 0,9605$). Hasil ini menunjukkan adanya hubungan elektrikal-termal yang jelas pada modul uji, meskipun tidak semua variasi arus mencapai steady-state penuh selama durasi pengujian. Oleh karena itu, hasil penelitian diinterpretasikan sebagai karakteristik termal transien dan late-time, bukan sebagai perilaku steady-state universal.

Kata kunci: LED COB; respons termal transien; karakterisasi elektrikal-termal; variasi arus; respons termal akhir

Diterima: June 18, 2026
Direvisi: July 12, 2026
Diterima: July 17, 2026
Diterbitkan: July 15, 2026
Versi sekarang: July 30, 2026



Hak cipta: © 2026 oleh penulis.
Diserahkan untuk kemungkinan
publikasi akses terbuka
berdasarkan syarat dan ketentuan
lisensi Creative Commons
Attribution (CC BY SA) (
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

1. Pendahuluan

Light-emitting diode chip-on-board (LED COB) banyak digunakan pada sistem pencahayaan daya tinggi karena mampu menghasilkan intensitas cahaya tinggi pada area emisi yang relatif kecil. Namun, densitas daya yang tinggi juga meningkatkan beban termal karena sebagian energi listrik diubah menjadi panas yang harus dialirkan melalui package, substrat, termal *interface*, struktur modul, dan lingkungan. Pengelolaan panas yang kurang baik dapat memengaruhi forward voltage, daya operasi, stabilitas cahaya, degradasi material, dan keandalan sistem [1], [2]. Penelitian terdahulu telah membahas jalur perpindahan panas, desain heatsink, resistansi termal, material termal *interface*, kondisi konveksi, pengukuran junction temperature, pemodelan driver, lifetime, dan reliability LED [1]-[10]. Literatur tersebut menunjukkan bahwa respons termal LED tidak hanya dipengaruhi oleh arus dan tegangan, tetapi juga oleh konfigurasi mekanik, kualitas kontak termal, sumber daya, dan kondisi lingkungan.

Meskipun memberikan dasar teori yang luas, penelitian sebelumnya belum selalu menyediakan benchmark eksperimen yang sederhana dan dapat direproduksi untuk konfigurasi modul LED COB tertentu. Pengukuran junction temperature memerlukan metode khusus sehingga temperatur permukaan modul tidak dapat langsung dianggap sebagai temperatur junction [4]. Demikian pula, resistansi termal yang dihitung dari temperatur permukaan lebih tepat dipahami sebagai resistansi termal efektif karena mencakup pengaruh kontak, antarmuka, struktur mekanik, dan konveksi. Pada pengujian menggunakan power supply mode constant current, tegangan LED juga bukan sekadar nilai setpoint, tetapi merupakan forward voltage aktual yang dapat berubah selama proses pemanasan. Oleh karena itu, karakterisasi perlu dilakukan dengan mencatat parameter elektrik dan termal secara simultan agar hubungan antara arus, tegangan forward, daya operasi, dan temperatur modul dapat dianalisis secara tepat.

Penelitian ini bertujuan mengkarakterisasi respons elektrik-termal transien LED COB pada modul aluminium berbasis CNC terhadap variasi arus. Konfigurasi mekanik modul dipertahankan tetap agar pengaruh perubahan arus dan daya terhadap temperatur dapat diamati secara konsisten. Pengujian dilakukan menggunakan power supply mode constant current dengan voltage compliance 37 V dan variasi arus 0,20–0,50 A. Parameter yang dianalisis meliputi arus terukur, tegangan forward aktual, daya listrik hasil perhitungan, temperatur case/modul, temperatur ambient lokal, serta kenaikan temperatur modul terhadap ambient lokal. Instrumen yang digunakan telah melalui verifikasi operasional, sedangkan temperatur permukaan modul dibedakan secara tegas dari junction temperature internal LED.

Karena tidak semua variasi arus mencapai steady-state penuh selama durasi pengujian sekitar 7200 s, respons termal dianalisis menggunakan $\Delta T(t)$ dan ΔT_{late} , yaitu rata-rata kenaikan temperatur pada 30 menit terakhir. Pendekatan ini menempatkan hasil sebagai karakteristik transien dan late-time, bukan sebagai perilaku steady-state universal. Kontribusi penelitian meliputi integrasi pencatatan parameter elektrik dan termal secara simultan, evaluasi respons termal berdasarkan ΔT_{late} , slope akhir, dan klasifikasi kondisi termal, analisis repeatability dari tiga pengulangan, serta penyusunan model empiris hubungan daya terhadap kenaikan temperatur dan model transien orde satu untuk mengestimasi karakter pemanasan modul.

Struktur artikel ini disusun sebagai berikut. Bagian 2 menyajikan tinjauan literatur mengenai manajemen termal LED COB, pengukuran temperatur, resistansi termal efektif, termal *interface* material, respons transien, dan aspek keandalan sistem LED. Bagian 3 menjelaskan metode penelitian, meliputi objek dan batasan penelitian, desain modul uji, sistem akuisisi data, prosedur pengujian, perhitungan parameter elektrik-termal, serta metode analisis respons termal. Bagian 4 menyajikan hasil dan pembahasan berupa validasi data, respons temperatur terhadap variasi arus, hubungan daya operasi terhadap (ΔT_{late}), serta evaluasi model transien. Bagian 5 membahas perbandingan hasil penelitian dengan studi

terdahulu dan implikasinya terhadap pengembangan modul uji LED COB. Bagian 6 menyajikan kesimpulan, keterbatasan penelitian, dan saran untuk penelitian lanjutan.

2. Tinjauan Literatur

Bagian ini menyajikan dasar literatur yang digunakan untuk memposisikan penelitian terhadap studi-studi sebelumnya yang membahas manajemen termal LED COB, pengukuran temperatur, jalur pembuangan panas, thermal *interface* material, parameter elektrik, reliability, dan respons transien sebagai dasar penggunaan $\Delta T(t)$, ΔT_{late} , $R_{th,eff}$ serta model transien dalam penelitian.

2.1. Manajemen Termal LED COB pada Level Package dan Sistem

LED chip-on-board (COB) menggabungkan beberapa chip LED pada satu substrat sehingga menghasilkan intensitas cahaya dan densitas daya yang tinggi. Kondisi tersebut meningkatkan beban termal karena panas harus dialirkan melalui chip, substrat, thermal *interface*, struktur modul, dan lingkungan. Li et al. [1] dan Khudaiwala et al. [2] menunjukkan bahwa temperatur operasi LED dipengaruhi oleh desain package, struktur mekanik, material *interface*, heatsink, dan kondisi lingkungan. Meskipun memberikan kerangka teori yang luas, sebagian besar studi membahas sistem LED secara umum dan belum menyediakan benchmark eksperimen untuk konfigurasi modul LED COB berbasis CNC tertentu. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada karakterisasi satu konfigurasi modul aluminium yang dijaga tetap selama pengujian.

2.2 Pengukuran Temperatur dan Batasan *Junction Temperature*

Temperatur merupakan parameter penting dalam evaluasi LED daya tinggi karena berhubungan dengan performa elektrik, stabilitas optik, dan keandalan sistem. Dalam literatur, salah satu parameter termal yang sering dibahas adalah *junction temperature* karena merepresentasikan kondisi internal chip LED. Zhao et al. [4] menekankan bahwa pengukuran *junction temperature* membutuhkan metode khusus, seperti pendekatan berbasis karakteristik listrik atau teknik pengukuran termal terkalibrasi. Dengan demikian, temperatur yang diukur pada permukaan modul, heatsink, atau case tidak dapat langsung disamakan dengan *junction temperature*.

Pada penelitian ini, temperatur yang dianalisis adalah temperatur case atau permukaan modul CNC yang direpresentasikan oleh TempA, sedangkan TempB digunakan untuk merepresentasikan temperatur ambient lokal. Selisih keduanya digunakan untuk membentuk ($\Delta T(t) = T_{case}(t) - T_{amb}(t)$). Pendekatan ini sesuai dengan batasan pengukuran karena data yang diperoleh merepresentasikan respons termal permukaan modul, bukan temperatur junction internal LED. Dengan demikian, hasil penelitian ini tidak ditujukan untuk mengestimasi *junction temperature*, melainkan untuk mengkarakterisasi respons termal modul uji terhadap variasi arus dan daya operasi.

2.3 Jalur Pembuangan Panas dan Resistansi Termal Efektif

Jalur pembuangan panas menjadi aspek penting dalam sistem LED daya tinggi. Wang et al. [5] menunjukkan bahwa identifikasi heat dissipation channel diperlukan untuk mengetahui bagian mana yang menjadi hambatan utama dalam pelepasan panas. Pada sistem LED COB, jalur panas dapat melibatkan LED package, substrat, thermal *interface*, badan modul, *cover*, lensa, dan perpindahan panas ke udara sekitar. Oleh karena itu, karakterisasi temperatur pada modul perlu dibaca sebagai respons gabungan dari beberapa mekanisme perpindahan panas, bukan hanya sebagai karakteristik LED chip secara tunggal.

Dalam analisis termal, thermal *resistance* sering digunakan untuk menghubungkan daya listrik dengan kenaikan temperatur. Liu et al. [6] menjelaskan bahwa resistansi termal dalam aplikasi rekayasa tidak selalu berupa satu nilai fisik sederhana, tetapi dapat mencerminkan gabungan pengaruh kontak, *interface*, struktur, dan konveksi. Karena itu, nilai resistansi termal yang dihitung dari pengukuran permukaan modul lebih tepat disebut sebagai resistansi termal efektif. Dalam penelitian ini, hubungan antara daya operasi dan kenaikan temperatur dianalisis menggunakan parameter (ΔT) dan model empiris, sedangkan interpretasi ($R_{th,eff}$)

dibatasi sebagai karakteristik efektif konfigurasi modul uji, bukan sebagai termal *resistance* internal LED murni.

2.4 Thermal Interface, Struktur Modul, dan Pengaruh Kontak Termal

Thermal interface material, kondisi kontak, tekanan pemasangan, dan struktur mekanik berpengaruh terhadap perpindahan panas pada sistem LED [3], [7]. Dalam penelitian ini, modul aluminium berbasis CNC, lensa, silicone holder, cover, dan thermal paste digunakan sebagai konfigurasi tetap agar pengaruh variasi arus dapat diamati secara konsisten. Variasi material interface, tekanan mounting, dan geometri modul belum dianalisis, sehingga pengaruhnya terhadap (ΔT), *drift thermal*, dan nilai ($R_{th,eff}$) menjadi ruang penelitian lanjutan.

2.5 Parameter Elektrikal, Driver, dan Respons Termal

Respons termal LED berkaitan dengan kondisi elektrikal aktual selama operasi. Pada mode constant current, arus dijaga pada nilai tertentu, sedangkan tegangan mengikuti forward voltage LED yang dapat berubah akibat pemanasan. Oleh karena itu, daya operasi perlu dihitung dari tegangan dan arus terukur, bukan hanya dari setpoint power supply. Berbeda dengan sistem luminaire terintegrasi, penelitian ini menggunakan power supply eksternal sehingga sumber panas driver tidak bercampur dengan modul LED COB. Namun, hasil penelitian belum merepresentasikan sistem luminaire lengkap yang mencakup driver, enclosure, dan lingkungan operasi nyata [8].

2.6 Reliability, Lifetime, dan Batasan Klaim Kegagalan

Temperatur tinggi dapat memengaruhi reliability, lifetime, dan mekanisme kegagalan LED [9]-[11]. Namun, data temperatur jangka pendek tidak cukup untuk membuktikan solder crack, penurunan lifetime, atau failure mechanism secara langsung. Oleh karena itu, penelitian ini hanya menggunakan data temperatur untuk mengkarakterisasi respons termal modul dan membangun model awal hubungan daya terhadap kenaikan temperatur. Analisis reliability, thermal cycling, accelerated aging, inspeksi material, dan degradasi optik ditempatkan sebagai penelitian lanjutan.

2.7 Respons Transien dan Late-Time Thermal Response

Selain temperatur akhir, dinamika pemanasan terhadap waktu juga penting dalam karakterisasi termal LED. Nirupam et al. [12] menunjukkan bahwa metrik berbasis waktu, seperti waktu menuju batas temperatur tertentu, dapat digunakan untuk mengevaluasi performa termal LED COB. Pada sistem yang belum mencapai *steady-state* penuh, analisis transien menjadi lebih relevan dibandingkan hanya mengandalkan temperatur akhir. Model transien orde satu sering digunakan sebagai pendekatan awal untuk membaca konstanta waktu termal, meskipun pada sistem nyata respons dapat dipengaruhi oleh beberapa jalur panas, massa termal, kontak, dan konveksi.

Pada penelitian ini, tidak semua variasi arus mencapai *steady-state* penuh selama durasi pengujian sekitar 7200 s. Oleh karena itu, parameter utama yang digunakan adalah (ΔT_{late}) atau ($\Delta T_{mean,last30}$), yaitu rata-rata kenaikan temperatur pada 30 menit terakhir pengujian. Pendekatan ini digunakan untuk menghindari klaim *steady-state* universal sekaligus tetap menyediakan indikator termal yang konsisten untuk membandingkan pengaruh variasi arus dan daya operasi.

2.8 Posisi Penelitian dan Research Gap

Studi sebelumnya telah membahas manajemen panas dari tingkat package hingga sistem, pengukuran junction temperature, jalur pembuangan panas, *thermal interface material*, driver, reliability, dan failure mechanism. Namun, masih diperlukan benchmark eksperimen modular yang sederhana, menggunakan instrumen yang telah diverifikasi secara operasional, dan dapat direproduksi untuk konfigurasi LED COB tertentu. Penelitian ini mengisi celah tersebut melalui karakterisasi simultan tegangan forward aktual, arus, daya operasi, temperatur modul, dan temperatur ambient lokal pada modul LED COB berbasis CNC. Penelitian tidak ditujukan untuk menggantikan pengukuran junction temperature, optimasi heatsink, atau

evaluasi reliability jangka panjang, tetapi untuk membangun baseline elektrik-thermal bagi pengembangan material, geometri modul, thermal interface, lensa, enclosure, kondisi ambient, dan parameter optik.

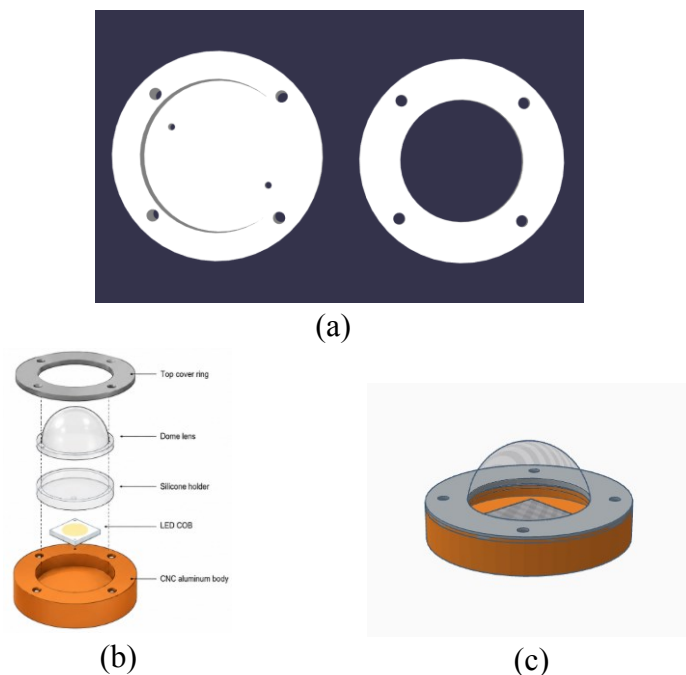
3. Metode

Bagian ini menjelaskan rancangan penelitian yang digunakan untuk mengkarakterisasi respons elektrik-thermal LED COB pada modul aluminium berbasis CNC. Uraian metode mencakup objek dan batasan penelitian, sistem eksperimen dan akuisisi data, desain pengujian, proses pengolahan data, kriteria respons termal akhir, serta model empiris dan model transien yang digunakan untuk menganalisis hubungan antara daya operasi dan kenaikan temperatur modul.

3.1. Objek dan Batasan Penelitian

Penelitian ini menggunakan LED chip-on-board (COB) yang dipasang pada modul aluminium berbasis CNC sebagai objek karakterisasi elektrik-thermal. Modul uji terdiri atas badan aluminium, LED COB, silicone holder, dome lens, cover, dan thermal interface material sebagai satu konfigurasi mekanik tetap. Modul aluminium berfungsi sebagai struktur utama sekaligus jalur awal pelepasan panas dari LED COB menuju lingkungan. Thermal paste berbasis silikon diaplikasikan secara tipis dengan ketebalan yang diperkirakan sekitar 0,1–0,2 mm, sedangkan LED COB dipasang menggunakan konfigurasi dan pola pengencangan sekrup yang sama pada seluruh pengujian. Ketebalan aktual thermal paste dan tekanan mounting tidak diukur secara presisi. Struktur penyangga eksternal seperti tripod atau fixture hanya digunakan untuk mempertahankan posisi modul dan tidak dijadikan variabel penelitian.

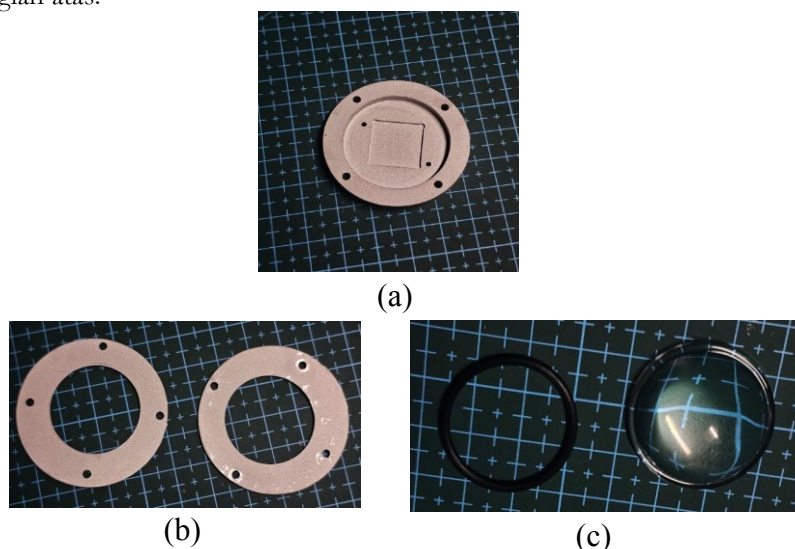
Karakterisasi temperatur dibatasi pada permukaan case atau badan modul, bukan pada junction temperature internal LED. Temperatur modul direpresentasikan oleh TempA yang ditempelkan langsung pada badan aluminium, sedangkan temperatur ambient lokal direpresentasikan oleh TempB yang ditempatkan sekitar 10 cm dari arah pancaran lensa. Dengan demikian, hasil pengukuran merepresentasikan respons termal permukaan modul dan kondisi ambient lokal. Gbr. 1 memperlihatkan susunan komponen, exploded view, dan rakitan akhir modul uji yang dipertahankan tetap agar pengaruh variasi arus terhadap respons temperatur dapat diamati secara konsisten.



Gambar 1. Modul uji LED COB berbasis CNC: (a) rancangan komponen modul, (b) exploded view susunan LED COB, *silicone holder*, dome lens, dan *cover*, (c) rakitan akhir modul.

Gbr. 2 menunjukkan realisasi fisik komponen modul uji yang digunakan dalam eksperimen. Badan modul aluminium berfungsi sebagai struktur utama sekaligus jalur

konduksi panas awal, sedangkan *cover*, dome lens, dan *silicone holder* menjaga posisi mekanik komponen bagian atas.



Gambar 2. Modul uji LED COB berbasis CNC: (a) komponen modul, (b) *cover* modul, (c) lensa dan karet.

3.1.1 Karakteristik LED COB Berdasarkan Datasheet

LED COB yang digunakan pada penelitian ini adalah Cree XLamp CXB1512 LED Array kelas tegangan 36 V. Berdasarkan datasheet produk [13], LED ini memiliki optical source berukuran 9 mm, sudut pancar 115° FWHM, serta batas arus DC maksimum 600 mA untuk kelas 36 V. Pada kondisi karakterisasi datasheet, forward voltage LED kelas 36 V berada pada sekitar 34,3 V tipikal hingga 38 V maksimum pada arus 350 mA dan temperatur 85°C . Informasi tersebut digunakan sebagai dasar untuk menentukan rentang arus pengujian serta menjelaskan bahwa tegangan yang tercatat selama eksperimen diinterpretasikan sebagai forward voltage aktual LED, bukan sekadar nilai setpoint power supply. Ringkasan spesifikasi utama LED COB yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 1.

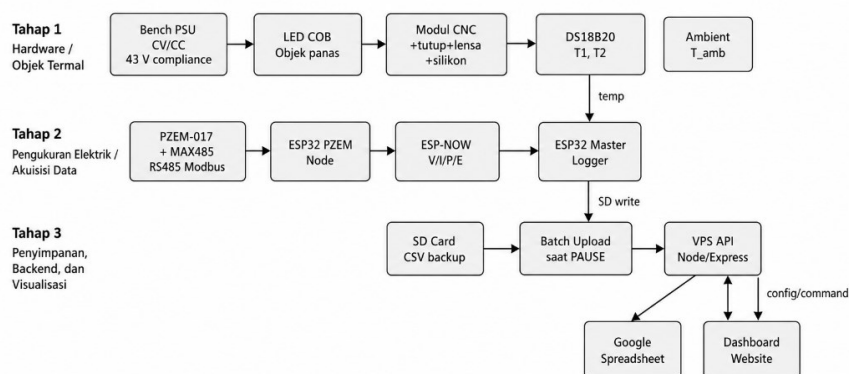
Tabel 1. Spesifikasi ringkas LED COB CXB1512 kelas 36 V yang digunakan pada penelitian.

Parameter	Spesifikasi
Tipe LED	Cree XLamp CXB1512 LED Array
Kelas LED	36 V class
Optical source	9 mm
Sudut pancar	115°
Arus DC maksimum	600 mA
Forward voltage	34,3 V tipikal hingga 38 V maksimum pada 350 mA, 85°C
Batas temperatur (light-emitting surface) LES	135°C
Peran dalam penelitian	Objek uji elektrik-termal pada modul aluminium berbasis CNC

Datasheet menyediakan informasi karakteristik optik seperti CCT, CRI, luminous flux, dan relative spectral power distribution untuk beberapa varian bin LED. Namun, karena penelitian ini tidak melakukan pengukuran spektrum, luminous flux, CCT, atau lux secara langsung, informasi tersebut hanya digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik produk. Spesifikasi datasheet juga digunakan sebagai dasar penentuan kelas tegangan LED, pemilihan rentang arus pengujian, serta interpretasi forward voltage aktual selama eksperimen. Dengan demikian, analisis penelitian tetap dibatasi pada hubungan antara parameter elektrik aktual dan respons termal LED COB CXB1512 kelas 36 V pada konfigurasi modul aluminium berbasis CNC yang digunakan.

3.2. Sistem Eksperimen dan Akuisisi Data

Sistem eksperimen dirancang untuk mencatat parameter elektrik dan termal secara simultan selama LED COB dioperasikan menggunakan power supply pada mode constant current. Pada kondisi ini, arus digunakan sebagai variabel utama pengujian, sedangkan tegangan power supply berfungsi sebagai voltage compliance atau batas maksimum tegangan. Tegangan yang tercatat diperlakukan sebagai forward voltage aktual LED, bukan sebagai tegangan setpoint mutlak. Gbr. 3 memperlihatkan arsitektur sistem yang menghubungkan sumber daya, LED COB, modul aluminium berbasis CNC, sensor temperatur, PZEM-017, ESP32, SD card, server, spreadsheet, dan dashboard monitoring, sehingga respons temperatur modul dapat dikaitkan dengan tegangan forward aktual, arus operasi, dan daya operasi LED.



Gambar 3. Arsitektur sistem eksperimen elektrik-termal LED COB, meliputi sumber daya, modul LED COB, sensor temperatur, PZEM-017, ESP32, SD card logger, server, dan dashboard monitoring.

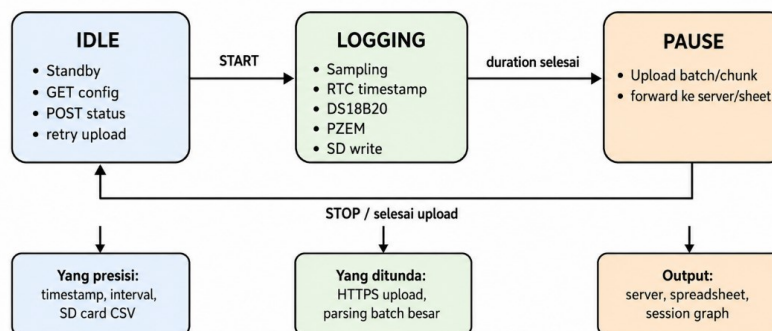
Parameter temperatur dibaca menggunakan dua sensor DS18B20. TempA ditempelkan secara langsung pada case atau badan modul aluminium untuk merepresentasikan temperatur permukaan modul, sedangkan TempB ditempatkan pada jarak sekitar 10 cm dari arah pancaran lensa untuk merepresentasikan temperatur ambient lokal. Parameter listrik berupa tegangan, arus, daya, dan energi dibaca menggunakan PZEM-017 melalui komunikasi RS485. Sistem akuisisi data berbasis ESP32 digunakan untuk membaca sensor, menyimpan data ke SD card, serta mengirimkan data ke server atau dashboard setelah sesi pengujian selesai. Sebelum digunakan, kedua sensor DS18B20 telah melalui kalibrasi pembandingan secara operasional menggunakan termometer kontak digital pada beberapa tingkat temperatur yang mencakup rentang pengujian. Pada rentang 30–80 °C, selisih absolut pembacaan DS18B20 terhadap termometer pembandingan berada pada kisaran 2–5 °C. Hasil pembandingan menunjukkan kecenderungan hubungan yang linear, dan persamaan koreksi yang diperoleh digunakan untuk menyesuaikan pembacaan temperatur sebelum proses analisis data.

Pengujian dilakukan di dalam ruangan tertutup dengan temperatur awal sekitar 28–30 °C. Selama pengujian, modul tidak menerima aliran udara langsung dari kipas, pendingin ruangan, maupun ventilasi luar untuk menjaga kondisi lingkungan relatif stabil. Pengujian belum menggunakan environmental chamber serta belum melakukan pengukuran kelembapan dan kecepatan aliran udara. Oleh karena itu, kondisi ambient telah dipantau menggunakan TempB dan gangguan lingkungan telah diminimalkan, tetapi belum dikendalikan secara aktif. Karena TempB ditempatkan relatif dekat dengan modul, pembacaannya merepresentasikan temperatur ambient lokal dan masih dapat dipengaruhi oleh perpindahan panas secara konveksi maupun radiasi dari modul LED. Penggunaan selisih temperatur $\Delta T(t)$ dimaksudkan untuk memperhitungkan perubahan temperatur ambient lokal selama pengujian.

Verifikasi operasional PZEM-017 dilakukan dengan membandingkan pembacaan tegangan dan arus terhadap tampilan power supply serta multimeter digital FNIRSI 2C23T pada beberapa kondisi operasi yang mencakup rentang pengujian. Power supply digunakan sebagai sumber tegangan dan arus sekaligus pembandingan tambahan, sedangkan multimeter digunakan sebagai alat pembandingan utama. Deviasi relatif maksimum pembacaan tegangan

dan arus PZEM-017 terhadap FNIRSI 2C23T masing-masing sebesar 2% dan 1%. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa pembacaan PZEM-017 masih berada dalam rentang kesesuaian yang digunakan pada penelitian sehingga instrumen tersebut digunakan dalam proses akuisisi parameter elektrik.

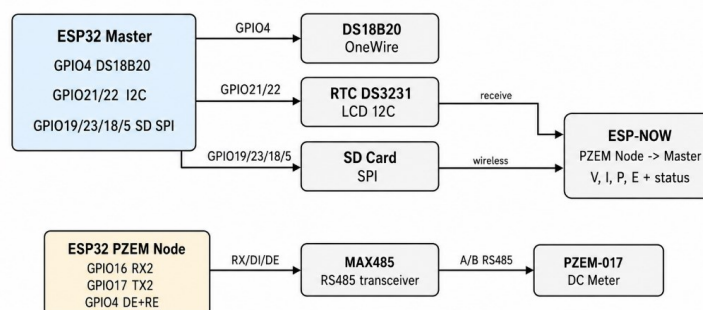
Gbr. 4 menunjukkan state machine sistem logging ESP32 Master yang terdiri dari mode *IDLE*, *LOGGING*, dan *PAUSE*. Pada mode *LOGGING*, sistem memprioritaskan pembacaan sensor dan penyimpanan data ke SD card, sedangkan proses upload data ditunda sampai sistem masuk mode *PAUSE*. Alur ini digunakan untuk menjaga kestabilan *interval sampling* dan mengurangi potensi gangguan dari proses komunikasi jaringan.



Gambar 4. State machine ESP32 Master dan prinsip Acquire First, Upload Later.

Sistem logging menggunakan prinsip *acquire first, upload later*. Pada saat sesi pengujian berlangsung, sistem memprioritaskan pembacaan sensor dan pencatatan data ke SD card agar interval sampling tetap stabil. Proses upload ke server dilakukan setelah sesi logging selesai sehingga proses pencatatan data tidak terganggu oleh delay jaringan atau proses komunikasi eksternal.

Gbr. 5 memperlihatkan ringkasan wiring antara ESP32 Master, ESP32 PZEM Node, sensor DS18B20, RTC, SD card, MAX485, dan PZEM-017. Pemisahan fungsi antara ESP32 Master dan ESP32 PZEM Node digunakan agar pembacaan parameter listrik melalui RS485 tidak membebani proses logging utama. Data listrik kemudian dikirimkan ke ESP32 Master menggunakan ESP-NOW sehingga sistem dapat mencatat parameter listrik dan temperatur secara terintegrasi.



Gambar 5. Ringkasan wiring ESP32 Master dan ESP32 PZEM Node.

Rancangan wiring dibuat untuk memisahkan pembacaan temperatur dan parameter listrik agar proses pembacaan PZEM-017 melalui RS485 tidak membebani logging utama pada ESP32 Master. Data tegangan, arus, daya, energi, dan status pembacaan dari PZEM-017 dikirimkan dari ESP32 PZEM Node ke ESP32 Master menggunakan ESP-NOW.

Website monitoring digunakan sebagai platform pendukung untuk memantau status eksperimen, mengatur konfigurasi logging, mengirim perintah kontrol, menyimpan histori data, dan menampilkan grafik hasil pengukuran berdasarkan session. Dashboard ini berfungsi sebagai antarmuka pemantauan, sedangkan data utama tetap berasal dari pencatatan lokal pada SD card.

3.3. Desain Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengamati pengaruh variasi arus terhadap respons elektrikal-thermal LED COB pada modul aluminium berbasis CNC. Voltage compliance ditetapkan sebesar 37 V berdasarkan uji pendahuluan, sedangkan arus digunakan sebagai variabel bebas utama pada tujuh level, yaitu 0,20 A hingga 0,50 A. Setiap level arus diuji selama sekitar 7200 s dan diulang sebanyak tiga kali sehingga diperoleh total 21 sesi pengujian. Data dicatat secara periodik menggunakan sistem akuisisi data pada Subbab 3.2. Kurva transien, ringkasan hasil utama, dan pemodelan disajikan menggunakan pengulangan pertama (R1) pada setiap level arus sebagai set pengujian representatif untuk menjaga konsistensi penyajian. Sementara itu, seluruh pengulangan R1–R3 digunakan untuk mengevaluasi repeatability dan melakukan analisis statistik.

Tahapan pengujian meliputi uji pendahuluan voltage compliance untuk memastikan tegangan aktual mengikuti forward voltage LED pada mode constant current, pengujian utama pada tujuh level arus dengan voltage compliance 37 V, serta pengolahan data pascapengujian. Tahap pengolahan menghasilkan respons temperatur, daya operasi, kenaikan temperatur terhadap ambient lokal, status termal akhir, parameter repeatability, dan parameter model. Rancangan pengujian utama disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rancangan pengujian utama LED COB pada voltage compliance 37 V.

3.4. Pengolahan Data Elektrikal-Termal

Kode pengujian	Arus setpoint (A)	Voltage compliance (V)	Durasi target (s)
I020	0,2	37	7200
I025	0,25	37	7200
I030	0,3	37	7200
I035	0,35	37	7200
I040	0,4	37	7200
I045	0,45	37	7200
I050	0,5	37	7200

Data hasil pengujian diproses untuk memperoleh parameter elektrikal dan termal yang dapat dibandingkan antarvariasi arus. Tegangan yang digunakan dalam analisis adalah tegangan *forward* aktual LED yang tercatat selama pengujian. Daya operasi dihitung dari tegangan aktual dan arus operasi sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$P(t) = V_f(t) \cdot I(t) \quad (1)$$

dengan $(P(t))$ merupakan daya operasi LED, $(V_f(t))$ merupakan tegangan *forward* aktual LED, dan $(I(t))$ merupakan arus operasi LED.

Respons termal modul dianalisis menggunakan selisih temperatur antara case/modul dan *ambient*. Selisih temperatur tersebut dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$\Delta T(t) = T_{case}(t) - T_{amb}(t) \quad (2)$$

dengan $(T_{case}(t))$ merupakan temperatur case atau modul CNC yang dibaca oleh TempA, sedangkan $(T_{amb}(t))$ merupakan temperatur *ambient* yang dibaca oleh TempB.

Karena tidak semua pengujian mencapai *steady-state* penuh selama durasi pengujian, penelitian ini menggunakan parameter late-time thermal response. Parameter ini dihitung sebagai rata-

rata ($\Delta T(t)$) pada 30 menit terakhir pengujian, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (3).

$$\Delta T_{late} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta T_i \quad (3)$$

dengan (N) merupakan jumlah data pada 30 menit terakhir pengujian. Parameter (ΔT_{late}) digunakan sebagai representasi respons termal akhir pada durasi pengujian, bukan sebagai klaim *steady-state* universal.

Nilai ΔT_{late} dihitung secara terpisah untuk setiap pengulangan pada masing-masing level arus. Dengan demikian, setiap level arus menghasilkan tiga nilai ΔT_{late} yang digunakan untuk mengevaluasi repeatability hasil pengujian. Evaluasi dilakukan menggunakan nilai rata-rata, simpangan baku sampel, dan koefisien variasi. Hasil repeatability disajikan dalam bentuk rata-rata $\pm$ satu simpangan baku dengan jumlah pengulangan $n=3$.

Konsistensi antarpengulangan dievaluasi menggunakan paired t-test dua arah terhadap nilai ΔT_{late} untuk pasangan R1–R2, R1–R3, dan R2–R3. Unit pasangan terdiri atas tujuh level arus, sehingga setiap perbandingan menggunakan $n=7$. Karena dilakukan tiga perbandingan, nilai signifikansi disesuaikan menggunakan koreksi Bonferroni dengan taraf signifikansi $\alpha=0,05$. Pengaruh level arus terhadap ΔT_{late} dianalisis menggunakan ANOVA satu arah, dengan tujuh level arus sebagai faktor dan tiga pengulangan pada setiap level. Besarnya pengaruh level arus dievaluasi menggunakan eta squared (η^2).

Sebagai indikator efektivitas pelepasan panas pada konfigurasi modul uji, resistansi termal efektif dihitung berdasarkan kenaikan temperatur dan daya rata-rata pada 30 menit terakhir pengujian. Parameter tersebut dihitung menggunakan Persamaan (4).

$$R_{th,eff} = \frac{\Delta T_{late}}{P_{late}} \quad (4)$$

dengan $R_{th,eff}$ merupakan resistansi termal efektif berbasis kondisi late-time dalam satuan $^{\circ}\text{C}/\text{W}$, ΔT_{late} merupakan rata-rata kenaikan temperatur pada 30 menit terakhir, dan P_{late} merupakan daya rata-rata pada jendela waktu yang sama. Nilai tersebut tidak diposisikan sebagai resistansi termal junction-to-ambient maupun nilai steady-state universal karena tidak seluruh pengujian telah mencapai steady-state penuh.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3} \quad (5)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 (x_i - \bar{x})^2}{3 - 1}} \quad (6)$$

$$CV = \frac{SD}{\bar{x}} \times 100\% \quad (7)$$

Koefisien variasi digunakan untuk menunjukkan besar variasi relatif antarpengulangan dan tidak diposisikan sebagai ketidakpastian metrologis sensor.

3.5. Kriteria Respons Termal Akhir

Evaluasi kondisi termal akhir dilakukan dengan mengamati perubahan $\Delta T(t)$ terhadap waktu. Slope temperatur pada fase akhir digunakan untuk membedakan kurva yang telah mendekati plateau dan kurva yang masih mengalami drift. Slope akhir dihitung pada jendela

30 menit terakhir pengujian agar konsisten dengan perhitungan ΔT_{late} , sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (8).

$$S_{late} = \frac{d(\Delta T)}{dt} \quad (8)$$

Kondisi termal diklasifikasikan secara deskriptif menjadi *quasi-plateau*, *overshoot-settling*, *late drift*, *possible disturbance*, atau *not full steady*. Istilah *quasi-plateau* digunakan apabila kurva telah menunjukkan kecenderungan mendatar dengan slope akhir yang relatif kecil. Istilah *overshoot-settling* digunakan apabila temperatur mengalami kenaikan hingga nilai tertentu kemudian menurun menuju kondisi akhir. Istilah *late drift* digunakan apabila temperatur masih menunjukkan kecenderungan naik atau turun pada fase akhir, sedangkan *possible disturbance* digunakan apabila terdapat perubahan pola yang tidak sepenuhnya mengikuti proses pemanasan normal. Status *not full steady* digunakan apabila respons belum menunjukkan kondisi stabil selama durasi pengujian. Status termal yang disajikan pada tabel hasil utama ditentukan dari satu set pengujian representatif, sedangkan konsistensi nilai ΔT_{late} dievaluasi secara terpisah menggunakan tiga pengulangan.

3.6. Model Hubungan Daya terhadap Kenaikan Temperatur

Hubungan antara daya operasi dan respons termal akhir dianalisis menggunakan model empiris berdasarkan satu set pengujian representatif. Untuk setiap level arus, daya operasi direpresentasikan oleh daya rata-rata pada 30 menit terakhir pengujian, sedangkan respons termal direpresentasikan oleh ΔT_{late} pada jendela waktu yang sama. Model utama yang digunakan adalah model linear antara daya operasi dan ΔT_{late} , sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (9).

$$\Delta T_{late} = aP + b \quad (9)$$

dengan a merupakan koefisien perubahan kenaikan temperatur terhadap daya, P merupakan daya operasi rata-rata pada 30 menit terakhir, dan b merupakan konstanta empiris. Model tersebut digunakan untuk menggambarkan kecenderungan hubungan antara daya listrik dan kenaikan temperatur modul pada rentang arus yang diuji.

Sebagai pembandingan, model linear melewati nol dan model kuadratik juga dievaluasi. Model linear melewati nol ditunjukkan pada Persamaan (10).

$$\Delta T_{late} = k_0 P \quad (10)$$

dengan k_0 merupakan koefisien empiris model linear yang dipaksa melewati titik nol.

Model kuadratik terhadap daya ditunjukkan pada Persamaan (11).

$$\Delta T_{late} = aP^2 + bP + c \quad (11)$$

Pemilihan model dilakukan dengan mempertimbangkan nilai koefisien determinasi, root mean square error, mean absolute error, kesederhanaan model, dan kemudahan interpretasi hasil. Model yang diperoleh dibatasi pada rentang arus 0,20–0,50 A, voltage compliance 37 V, serta konfigurasi modul dan kondisi pengujian yang digunakan. Oleh karena itu, persamaan model tidak diposisikan sebagai hubungan universal untuk seluruh jenis LED COB atau konfigurasi sistem termal lainnya.

3.7. Model Transien Termal

Respons pemanasan LED COB pada modul aluminium berbasis CNC didekati menggunakan model transien orde satu berdasarkan satu set pengujian representatif. Model tersebut digunakan sebagai pendekatan awal untuk mengestimasi kenaikan temperatur asimtotik dan konstanta waktu termal modul, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (12).

$$\Delta T(t) = \Delta T_{\infty} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (12)$$

dengan (ΔT_{∞}) merupakan estimasi kenaikan temperatur asimtotik hasil fitting, (t) merupakan waktu pengujian, dan (τ) merupakan konstanta waktu termal. Model ini digunakan sebagai ringkasan empiris terhadap respons pemanasan modul dan tidak diposisikan sebagai representasi seluruh jalur perpindahan panas secara fisik.

Kesesuaian model transien dievaluasi menggunakan root mean square error (RMSE) dan koefisien determinasi R^2 . Sementara itu, mean absolute error (MAE) digunakan sebagai metrik tambahan pada evaluasi model hubungan daya terhadap ΔT_{late} . Definisi RMSE, MAE, dan R^2 ditunjukkan pada Persamaan (13)–(15).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (13)$$

MAE dihitung menggunakan Persamaan (14).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (14)$$

Koefisien determinasi dihitung menggunakan Persamaan (15).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (15)$$

Hasil fitting model transien yang disajikan pada bagian hasil berasal dari satu set pengujian representatif, sedangkan repeatability penelitian dievaluasi secara terpisah menggunakan nilai ΔT_{late} dari tiga pengulangan.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Validasi Dataset dan Parameter Pengujian

Hasil validasi data menunjukkan bahwa pengujian utama mencakup tujuh level arus, yaitu 0,20 A, 0,25 A, 0,30 A, 0,35 A, 0,40 A, 0,45 A, dan 0,50 A, dengan tiga pengulangan pada setiap level sehingga diperoleh total 21 sesi pengujian. Data dikelompokkan berdasarkan test ID, level arus, dan nomor pengulangan. Satu set pengujian representatif digunakan untuk menyajikan kurva transien, ringkasan karakteristik elektrik-thermal, dan pemodelan utama, sedangkan seluruh pengulangan digunakan untuk mengevaluasi repeatability. Parameter yang dianalisis meliputi $I(t)$, $V_f(t)$, $P(t)$, $T_{case}(t)$, $T_{amb}(t)$, dan $\Delta T(t)$. Daya operasi dihitung dari tegangan forward aktual dan arus operasi menggunakan Persamaan (1), kenaikan temperatur modul terhadap ambient dihitung menggunakan Persamaan (2), sedangkan respons termal akhir direpresentasikan oleh ΔT_{late} berdasarkan Persamaan (3). Status termal pada setiap variasi arus ditentukan secara deskriptif dengan mempertimbangkan pola kurva dan slope akhir yang mengacu pada Persamaan (8), sehingga analisis tidak hanya bergantung pada setpoint power supply, tetapi juga pada kondisi operasi aktual LED selama pengujian.

Tabel 3 menyajikan hasil dari satu set pengujian representatif pada setiap level arus. Evaluasi repeatability berdasarkan tiga pengulangan disajikan secara terpisah pada bagian berikutnya. Parameter yang digunakan sebagai representasi respons termal akhir adalah (ΔT_{late}) , yaitu rata-rata kenaikan temperatur pada 30 menit terakhir pengujian. Parameter ini dipilih karena tidak semua pengujian mencapai *steady-state* penuh selama durasi 7200 s.

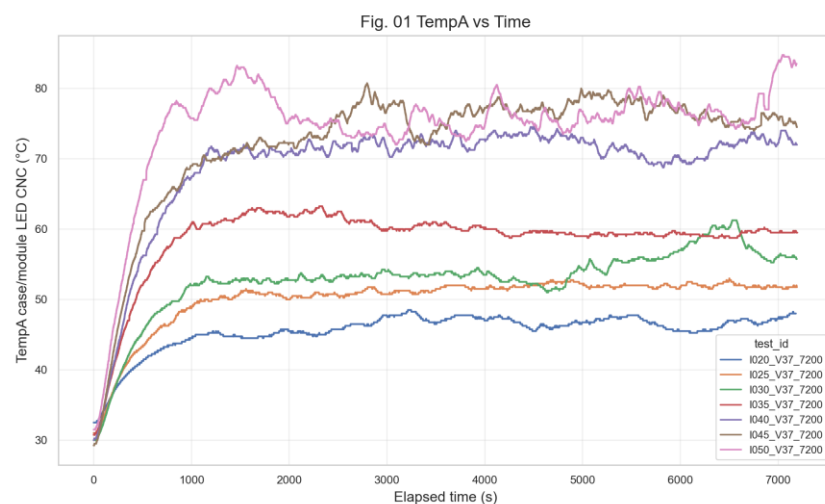
Tabel 3. Ringkasan hasil elektrikal-termal dari satu set pengujian representatif pada voltage compliance 37 V.

Kode pengujian	Arus set-point (A)	Daya rata-rata 30 menit terakhir (W)	TempA rata-rata 30 menit terakhir (°C)	$(\Delta T_{late})(^{\circ}\text{C})$	$R_{th,eff} (^{\circ}\text{C}/\text{W})$	Status termal
I020	0,2	6,684	46,612	13,386	2,003	Quasi-plateau
I025	0,25	8,489	51,939	19,939	2,349	Quasi-plateau
I030	0,3	10,295	57,232	24,035	2,335	Possible disturbance
I035	0,35	12,185	59,319	26,22	2,152	Overshoot-settling
I040	0,4	14,067	71,272	39,262	2,791	Possible disturbance
I045	0,45	15,999	76,289	43,21	2,701	Possible disturbance
I050	0,5	18,003	78,059	45,269	2,515	Possible disturbance

Tabel 3 menunjukkan bahwa peningkatan arus setpoint diikuti oleh peningkatan daya operasi dan ΔT_{late} . Pada arus 0,20 A, daya rata-rata 30 menit terakhir sebesar 6,684 W menghasilkan $\Delta T_{late} = 13,386^{\circ}\text{C}$, sedangkan pada 0,50 A daya meningkat menjadi 18,003 W dengan $\Delta T_{late} = 45,269^{\circ}\text{C}$. Nilai $R_{th,eff}$, yang dihitung menggunakan Persamaan (4), berada pada rentang 2,003–2,791 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ dan tidak menunjukkan pola monoton karena beberapa kondisi masih mengalami drift, overshoot, atau possible disturbance. Oleh karena itu, $R_{th,eff}$ digunakan sebagai indikator efektif untuk konfigurasi dan durasi pengujian ini, bukan sebagai konstanta termal material atau resistansi termal junction-to-ambient.

4.2. Respons Temperatur Modul terhadap Variasi Arus

Gbr. 6 menunjukkan respons temperatur case/modul LED COB terhadap waktu pada setiap variasi arus berdasarkan satu set pengujian representatif. Secara umum, seluruh kurva mengalami kenaikan temperatur yang relatif cepat pada fase awal, kemudian bergerak menuju respons yang lebih lambat akibat akumulasi panas pada modul aluminium. TempA menunjukkan bahwa peningkatan arus menghasilkan temperatur modul yang lebih tinggi. Pada arus 0,20 A dan 0,25 A, respons cenderung lebih mendekati plateau, sedangkan pada arus 0,40 A, 0,45 A, dan 0,50 A, temperatur akhir lebih tinggi dan masih menunjukkan fluktuasi pada fase akhir. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan daya operasi menambah beban termal modul sehingga proses pelepasan panas menuju lingkungan menjadi lebih kompleks.

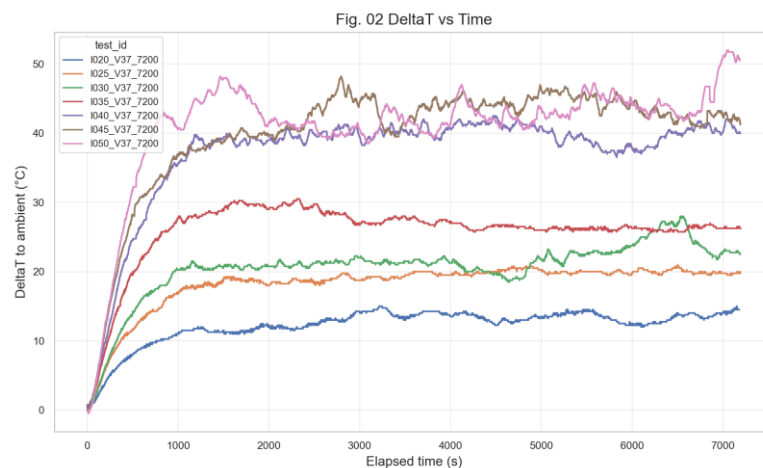


Gambar 6. Respons temperatur case/modul yang dibaca oleh TempA terhadap waktu pada variasi arus 0,20–0,50 A berdasarkan satu set pengujian representatif.

Respons temperatur modul yang dibaca oleh TempA menunjukkan bahwa peningkatan arus secara umum menghasilkan temperatur case/modul yang lebih tinggi. Perbedaan pola respons antarlevel arus dapat dipengaruhi oleh kondisi ambient lokal, kondisi awal modul, kontak termal, aliran udara lokal, serta dinamika perpindahan panas selama pengujian. Oleh karena itu, kurva pada bagian ini digunakan untuk menggambarkan karakteristik transien dari satu set pengujian representatif, sedangkan konsistensi hasil antarpengulangan dievaluasi secara terpisah melalui analisis repeatability.

4.3. Respons (ΔT) terhadap *Ambient*

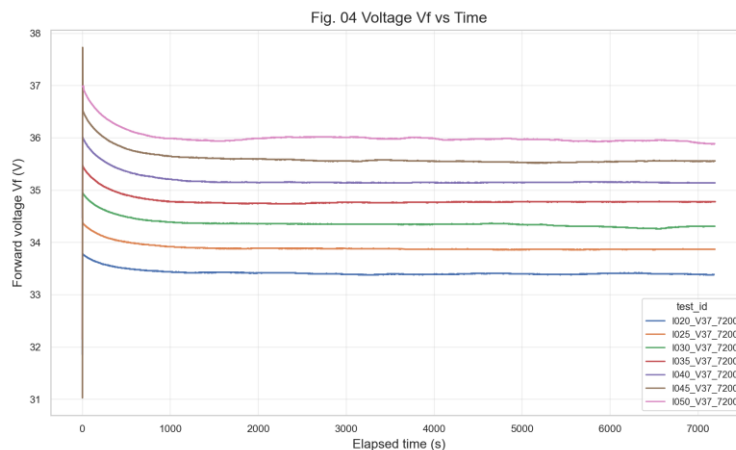
Gbr. 7 menunjukkan respons kenaikan temperatur modul terhadap ambient lokal, $\Delta T(t)$ yang dihitung menggunakan Persamaan (2) dari selisih temperatur case/modul oleh TempA dan temperatur ambient lokal oleh TempB. Berdasarkan satu set pengujian representatif, peningkatan arus secara umum menghasilkan nilai $\Delta T(t)$ yang lebih tinggi. Pada arus rendah, respons berada pada rentang lebih kecil dan cenderung mendekati plateau, sedangkan pada arus tinggi masih terlihat fluktuasi pada fase akhir. Nilai ΔT_{late} meningkat dari 13,386 °C pada arus 0,20 A menjadi 45,269 °C pada arus 0,50 A, yang menunjukkan bahwa peningkatan daya operasi berkaitan dengan peningkatan temperatur modul terhadap ambient lokal.



Gambar 7. Respons ($\Delta T(t) = T_{case}(t) - T_{amb}(t)$) terhadap waktu pada variasi arus 0,20–0,50 A.

4.4. Karakteristik Elektrikal: Arus, Tegangan *Forward*, dan Daya Operasi

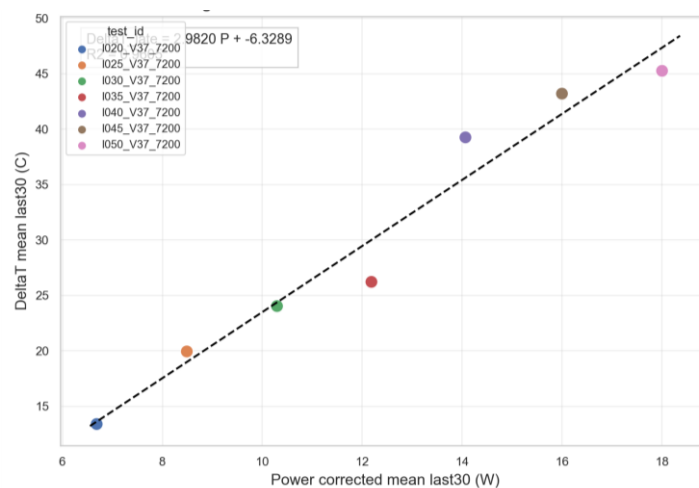
Selama pengujian, arus digunakan sebagai variabel bebas utama, sedangkan tegangan yang tercatat diperlakukan sebagai forward voltage aktual LED yang mengikuti karakteristik elektrikal LED selama proses pemanasan. Daya operasi dihitung dari tegangan forward aktual dan arus terukur menggunakan Persamaan (1). Gbr. 8 menunjukkan respons tegangan forward aktual terhadap waktu pada setiap variasi arus berdasarkan satu set pengujian representatif. Secara umum, level arus yang lebih tinggi menghasilkan tegangan forward yang lebih tinggi, meskipun pada setiap level arus nilainya cenderung berubah pada fase awal pemanasan sebelum bergerak menuju kondisi yang lebih stabil. Perubahan tersebut menunjukkan adanya keterkaitan antara kondisi termal modul dan karakteristik elektrikal LED, sehingga pencatatan tegangan forward aktual diperlukan agar daya operasi tidak hanya diperkirakan berdasarkan setpoint power supply.



Gambar 8. Respons tegangan forward aktual LED terhadap waktu pada variasi arus 0,20–0,50 A berdasarkan satu set pengujian representatif.

4.5. Hubungan Daya Operasi terhadap (ΔT_{late})

Hubungan antara daya operasi dan respons termal akhir dianalisis menggunakan ΔT_{late} , yaitu rata-rata $\Delta T(t)$ pada 30 menit terakhir pengujian yang dihitung berdasarkan Persamaan (3). Model linear hubungan daya terhadap ΔT_{late} disusun mengikuti bentuk umum pada Persamaan (9). Analisis pada bagian ini menggunakan satu set pengujian representatif. Gbr. 9 menunjukkan hubungan antara daya rata-rata pada 30 menit terakhir dan ΔT_{late} , dengan setiap titik merepresentasikan satu level arus pengujian.



Gambar 9. Hubungan daya operasi rata-rata 30 menit terakhir terhadap (ΔT_{late}) berdasarkan satu set pengujian representatif.

Hasil regresi menunjukkan bahwa model linear terhadap daya memberikan keseimbangan terbaik antara kesesuaian numerik, kesederhanaan model, dan kemudahan interpretasi. Model linear melewati nol dan model kuadratik digunakan sebagai pembandingan. Persamaan model linear yang diperoleh adalah:

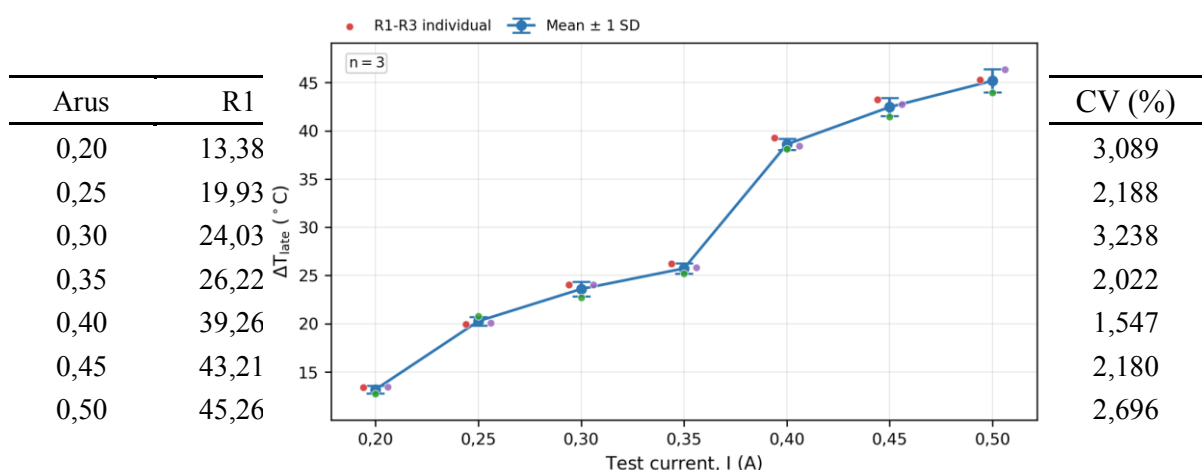
$$\Delta T_{late} = 2,9820P - 6,3289$$

dengan nilai ($R^2 = 0,9605$), RMSE sebesar 2,2796 °C, dan MAE sebesar 1,8358 °C. Nilai RMSE, MAE, dan R^2 dihitung menggunakan Persamaan (13), Persamaan (14), dan Persamaan (15). Nilai (R^2) yang tinggi menunjukkan bahwa daya operasi memiliki hubungan yang kuat dengan kenaikan temperatur akhir modul.

4.5.1 Repeatability dan Analisis Statistik Respons Termal

Repeatability respons termal dievaluasi menggunakan nilai ΔT_{late} dari tiga pengulangan pada setiap level arus. Nilai rata-rata, simpangan baku sampel, dan koefisien variasi dihitung menggunakan Persamaan (5)–(7), sedangkan hasil disajikan sebagai rata-rata $\pm$ satu simpangan baku dengan jumlah pengulangan $n = 3$. Berdasarkan Tabel 4 dan Gbr. 10, nilai ΔT_{late} dari ketiga pengulangan menunjukkan kecenderungan yang konsisten terhadap peningkatan arus. Variasi antarpengulangan dapat dipengaruhi oleh perbedaan kondisi awal modul, kontak termal, serta perubahan ambient lokal selama pengujian. Koefisien variasi digunakan untuk menunjukkan variasi relatif hasil dan tidak diposisikan sebagai ketidakpastian metrologis sensor.

Tabel 4. Hasil repeatability (ΔT_{late}) pada tiga pengulangan.



Gambar 10. Repeatability (ΔT_{late}) pada variasi arus 0,20–0,50 A. Titik menunjukkan rata-rata tiga pengulangan, sedangkan error bar menunjukkan ± 1 simpangan baku ($n=3$).

Hasil paired t-test dua arah menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan antarpengulangan yang signifikan setelah koreksi Bonferroni. Nilai p terkoreksi untuk perbandingan R1–R2, R1–R3, dan R2–R3 masing-masing sebesar 0,0817, 1,0000, dan 0,1662. Karena seluruh nilai tersebut lebih besar dari 0,05, tidak ditemukan pergeseran sistematis yang signifikan antara ketiga pengulangan. Hasil ini mendukung konsistensi repeatability pengujian.

Tabel 5. Hasil paired t-test dua arah antarpengulangan ΔT_{late} dengan koreksi Bonferroni.

Perbandingan	Mean difference (°C)	(p)-value	($p_{Bonferroni}$)	Interpretasi
R1–R2	0,9259	0,0272	0,0817	Tidak signifikan
R1–R3	0,0564	0,8157	1,0000	Tidak signifikan
R2–R3	–0,8694	0,0554	0,1662	Tidak signifikan

Selain evaluasi antarpengulangan, ANOVA satu arah digunakan untuk menguji perbedaan ΔT_{late} antarlevel arus. Hasil analisis menunjukkan bahwa level arus memberikan pengaruh

yang signifikan terhadap ΔT_{late} , dengan $F(6,14) = 801,7085$ dan $p = 6,2084 \times 10^{-17}$ atau $p < 0,001$. Nilai $\eta^2 = 0,9971$ menunjukkan ukuran efek yang sangat besar, yaitu sekitar 99,71% variasi ΔT_{late} pada dataset berkaitan dengan perbedaan level arus. Hasil paired t-test dengan koreksi Bonferroni mendukung konsistensi antarpengulangan, sedangkan ANOVA satu arah mengonfirmasi bahwa perubahan level arus memberikan pengaruh signifikan terhadap ΔT_{late} .

4.6 Evaluasi Model Transien

Model transien orde satu digunakan sebagai pendekatan awal untuk membaca karakter pemanasan modul berdasarkan Persamaan (12), sedangkan kesesuaian model dievaluasi menggunakan RMSE dan koefisien determinasi R^2 berdasarkan Persamaan (13) dan Persamaan (15). Tabel 6 menunjukkan bahwa model memberikan good approximation pada arus 0,20 A dan 0,25 A. Pada arus 0,30–0,50 A, nilai R^2 masih relatif tinggi, tetapi hasil fitting dikategorikan sebagai limited fit karena terdapat overshoot, drift, atau gangguan pola pada fase akhir. Oleh karena itu, model orde satu digunakan sebagai pendekatan awal untuk menggambarkan karakter transien sistem, bukan sebagai representasi sempurna untuk seluruh variasi arus.

Tabel 6. Ringkasan parameter model transien orde satu.

Kode pengujian	Arus setpoint (A)	(τ) (menit)	(ΔT_{∞}) (°C)	RMSE (°C)	(R^2)	Status fitting
I020	0,2	11,051	13,376	0,705	0,924	Good approximation
I025	0,25	9,022	19,701	0,493	0,982	Good approximation
I030	0,3	7,864	22,075	1,623	0,86	Limited fit
I035	0,35	5,511	27,375	1,361	0,919	Limited fit
I040	0,4	7,744	40,068	1,229	0,974	Limited fit
I045	0,45	9,191	43,564	1,672	0,959	Limited fit
I050	0,5	5,392	43,355	2,688	0,89	Limited fit

Nilai (τ) pada satu set pengujian representatif berada pada rentang sekitar 5,39–11,05 menit. Rentang tersebut menunjukkan bahwa modul memiliki respons pemanasan awal yang relatif cepat, sedangkan fase akhir masih dapat dipengaruhi oleh dinamika termal yang lebih lambat. Karena beberapa kurva menunjukkan overshoot, drift, dan possible disturbance, nilai τ diperlakukan sebagai parameter empiris dan bukan sebagai konstanta termal universal modul.

4.7. Pembahasan Umum dan Implikasi terhadap Modul CNC

Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan arus pada voltage compliance 37 V berkaitan dengan peningkatan daya operasi dan respons temperatur modul LED COB berbasis CNC. Kenaikan daya tersebut diikuti oleh peningkatan nilai ΔT_{late} , sehingga mendukung tujuan penelitian dalam membangun baseline elektrik-termal pada konfigurasi modul uji yang tetap. Namun, durasi pengujian sekitar 7200 s belum selalu menghasilkan steady-state penuh karena beberapa kurva masih menunjukkan overshoot, late drift, atau possible disturbance. Oleh karena itu, hasil penelitian lebih tepat diinterpretasikan sebagai respons termal transien dan late-time. Evaluasi repeatability berdasarkan tiga pengulangan menunjukkan konsistensi nilai ΔT_{late} pada setiap level arus. Kurva transien dan model empiris utama disajikan menggunakan satu set pengujian representatif, sedangkan variasi antarpengulangan dievaluasi menggunakan nilai rata-rata, simpangan baku, dan koefisien variasi. Perbedaan hasil antarpengulangan dapat dipengaruhi oleh kondisi awal modul, kontak termal, serta perubahan ambient lokal selama pengujian.

Kondisi lingkungan telah diupayakan relatif stabil melalui penggunaan ruangan tertutup dan pencegahan aliran udara langsung menuju modul, sedangkan temperatur ambient lokal dipantau menggunakan TempB. Namun, pengujian belum menggunakan environmental chamber serta belum mencatat kelembapan dan kecepatan aliran udara. Kalibrasi pembandingan DS18B20 dan verifikasi PZEM-017 juga dilakukan menggunakan alat pembanding operasional, bukan instrumen dengan ketertelusuran kalibrasi laboratorium. Temperatur yang diukur oleh TempA merupakan temperatur case atau permukaan modul dan tidak merepresentasikan junction temperature internal LED COB, sehingga hasil penelitian tidak dapat digunakan untuk menentukan junction temperature maupun resistansi termal junction-to-ambient. Model empiris $\Delta T_{late} = 2,9820P - 6,3289$ hanya berlaku pada rentang arus 0,20–0,50 A, voltage compliance 37 V, serta konfigurasi modul dan kondisi pengujian yang digunakan. Penelitian lanjutan dapat diarahkan pada pengendalian lingkungan yang lebih ketat, pengukuran junction temperature, variasi *thermal interface* dan geometri modul, serta evaluasi parameter optik LED.

5. Perbandingan

Perbandingan dengan studi terdahulu menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada manajemen termal dari tingkat package hingga sistem, pengukuran junction temperature, optimasi heatsink, *thermal interface material*, reliability driver, lifetime, dan thermal stress [1]–[11]. Berbeda dengan pendekatan tersebut, penelitian ini berfokus pada pembangunan baseline respons elektrik-thermal transien modul LED COB berbasis CNC melalui pencatatan tegangan forward aktual, arus, daya operasi, temperatur case/modul, dan temperatur ambient lokal secara simultan. Penggunaan ΔT_{late} dan analisis repeatability juga membedakan penelitian ini dari studi yang hanya melaporkan satu temperatur akhir atau mengasumsikan tercapainya steady-state penuh.

6. Kesimpulan

Penelitian ini telah mengkarakterisasi respons elektrik-thermal transien LED COB pada modul aluminium berbasis CNC terhadap variasi arus 0,20–0,50 A dengan voltage compliance 37 V selama sekitar 7200 s. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan arus diikuti oleh peningkatan daya operasi dan temperatur modul. Daya rata-rata pada 30 menit terakhir meningkat dari 6,684 W pada arus 0,20 A menjadi 18,003 W pada arus 0,50 A, sedangkan ΔT_{late} meningkat dari 13,386 °C menjadi 45,269 °C. Hasil tersebut menunjukkan bahwa respons termal modul lebih tepat dianalisis berdasarkan daya operasi aktual dan kenaikan temperatur terhadap ambient lokal daripada hanya berdasarkan setpoint arus atau batas tegangan power supply.

Hubungan antara daya operasi dan respons termal akhir dapat direpresentasikan menggunakan model empiris linear $\Delta T_{late} = 2,9820P - 6,3289$ dengan $R^2 = 0,9605$, RMSE sebesar 2,2796 °C, dan MAE sebesar 1,8358 °C. Model transien orde satu menghasilkan estimasi konstanta waktu termal sekitar 5,39–11,05 menit. Namun, beberapa variasi arus masih menunjukkan pola overshoot, drift, atau possible disturbance sehingga model tersebut diposisikan sebagai pendekatan empiris untuk membaca karakter pemanasan modul, bukan sebagai model termal universal. Pengujian dilakukan sebanyak tiga kali pada setiap level arus untuk mengevaluasi repeatability. Analisis paired t-test dua arah dengan koreksi Bonferroni tidak menunjukkan pergeseran sistematis yang signifikan antarpengulangan, sedangkan ANOVA satu arah menunjukkan bahwa level arus berpengaruh signifikan terhadap ΔT_{late} dengan $F(6,14) = 801,7085, p < 0,001$, dan $\eta^2 = 0,9971$.

Hasil penelitian diinterpretasikan sebagai karakteristik termal transien dan late-time karena tidak seluruh kondisi mencapai steady-state penuh selama durasi pengujian. Keterbatasan penelitian mencakup belum digunakannya environmental chamber, belum diukurnya kelembapan dan kecepatan aliran udara, serta penggunaan alat pembanding operasional pada proses verifikasi instrumen. Temperatur yang diukur merupakan temperatur case atau permukaan modul dan tidak merepresentasikan junction temperature internal LED COB. Model empiris yang diperoleh hanya berlaku pada rentang arus, konfigurasi modul, dan kondisi pengujian yang digunakan. Penelitian lanjutan dapat diarahkan pada pengendalian

lingkungan yang lebih ketat, pengukuran junction temperature, variasi *thermal interface* dan geometri modul, serta evaluasi parameter optik LED.

Kontribusi Penulis: Konseptualisasi awal penelitian, investigasi, perancangan sistem eksperimen, akuisisi data, perangkat lunak, kurasi data, analisis formal, visualisasi, penulisan draf awal, dan administrasi proyek dilakukan oleh Muhammad Rasyid Putera Agung. Ida Nurcahyani berkontribusi dalam supervisi, pemberian arahan terkait metode penulisan ilmiah, penguatan kerangka berpikir, penentuan arah penulisan artikel, peninjauan struktur naskah, serta penyuntingan artikel. Seluruh penulis telah membaca dan menyetujui versi akhir naskah.

Pernyataan Ketersediaan Data: Data yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari hasil pengujian eksperimental LED COB yang dicatat menggunakan sistem akuisisi data berbasis ESP32. Data pendukung dapat diberikan oleh penulis korespondensi atas permintaan yang wajar.

Ucapan Terima Kasih: Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah memberikan dukungan teknis dan akademik selama proses perancangan, pengujian, dan penyusunan naskah ini.

Konflik Kepentingan: Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan.

Referensi

- [1] Z. Li, J. Tan, J. Li, X. Ding, and Y. Tang, "A review on thermal management of light-emitting diodes: From package-level to system-level," *Applied Thermal Engineering*, vol. 257, Art. no. 124145, 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124145.
- [2] A. Khudaiwala, R. L. Patel, and R. Bumataria, "Recent developments in thermal management of light-emitting diodes (LEDs): A review," *Journal of Thermal Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 517–540, Mar. 2024, doi: 10.18186/thermal.1457052.
- [3] W. Xing, Y. Xu, C. Song, and T. Deng, "Recent Advances in Thermal Interface Materials for Thermal Management of High-Power Electronics," *Nanomaterials*, vol. 12, no. 19, Art. no. 3365, 2022, doi: 10.3390/nano12193365.
- [4] X. Zhao, H. Gong, L. Zhu, Z. Zheng, and Y. Lu, "LED Junction Temperature Measurement: From Steady State to Transient State," May 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/s24102974.
- [5] Z. Wang *et al.*, "Systematic Research on the Heat Dissipation Channel of High Power LED Street Lamps," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Jun. 2021. doi: 10.1088/1742-6596/1952/3/032003.
- [6] W. Liu, F. Zhang, L. Dong, H. Wang, Z. An, and G. Zhang, "Recent advances in thermal resistance model: Theories, models and engineering applications," *Proc. Inst. Mech. Eng. C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 239, no. 13, pp. 5209–5239, Mar. 2025, doi: 10.1177/09544062251326806.
- [7] E. Erkalkan and Z. Polat, "Thermal interface material impact prediction on LED heat dissipation: A machine learning-based performance modeling framework," *Measurement (Lond)*, vol. 271, Apr. 2026, doi: 10.1016/j.measurement.2026.120824.
- [8] J. C. Camacho-Arriaga, D. Cahue-Díaz, V. García-García, I. Juárez-Campos, and N. D. Herrera-Sandoval, "Enhanced thermal modeling of LED drivers for predictive reliability analysis in outdoor lighting systems," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 219, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2025.110212.
- [9] A. N. Padmasali and S. G. Kini, "Accelerated Testing Based Lifetime Performance Evaluation of LEDs in LED Luminaire Systems," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 137140–137147, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3118106.

-
- [10] W. D. van Driel, B. Jacobs, P. Watte, and X. Zhao, "Reliability of LED-based systems," *Microelectronics Reliability*, vol. 129, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.microrel.2022.114477.
 - [11] J. Wang, Y. Deng, Z. Zhang, J. Jin, and P. Liu, "Thermal stress behavior and optimization of solder joints in CSP-LED packages," *Results in Engineering*, vol. 26, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.104712.
 - [12] V. Nirupam, P. M. Suteesh, R. Bandaru, and L. G. K. Kumar, "Numerical investigations on thermal performance of phase change material-assisted radial heat sink for High-Power Chip-on-Board LEDs," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 62, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.tsep.2025.103614.
 - [13] "PRODUCT FAMILY DATA SHEET XLamp® CXB1512 LED PRODUCT DESCRIPTION," 2015. [Online]. Available: www.cree-led.com