



Rancang Bangun *Driver Power Supply Lampu Taxiway Guidance Sign (TGS) Tipe LED di Bandar Udara Budiarto*

Adolof Jacques Wersiko Safkaur¹ I Wayan Juliarta² Andika Hakim Putra³

Program Studi Diploma IV Teknik Listrik Bandara, Program Sarjana Terapan, Politeknik

Penerbangan Indonesia Curug, Tangerang, Banten, Indonesia^{1,2,3}

Email: adolfsafkaur@gmail.com¹ juliarta71@gmail.com²

andikahakimputra@gmail.com³

Abstrak

Taxiway Guidance Sign (TGS) merupakan bagian dari Airfield Lighting System (AFL) yang berfungsi memberikan panduan visual kepada pilot selama pergerakan pesawat di area taxiway, dan keandalannya sangat bergantung pada kinerja driver power supply yang menyuplai modul LED. Hasil observasi di Bandar Udara Budiarto menunjukkan bahwa kerusakan pada driver power supply menjadi penyebab utama tidak beroperasinya lampu TGS, sementara Constant Current Regulator (CCR) dan series isolating transformer masih berfungsi normal. Keterbatasan ketersediaan suku cadang asli serta tingginya biaya dan lamanya waktu pengadaan turut menghambat proses pemeliharaan fasilitas TGS. Penelitian ini bertujuan merancang dan menghasilkan driver power supply alternatif untuk TGS tipe LED yang lebih efisien dari segi biaya dan waktu pengadaan dengan memanfaatkan komponen elektronik yang mudah diperoleh di pasaran. Metode yang digunakan adalah Research and Development (R&D) dengan model pengembangan ADDIE (Analysis, Design, Development, Implementation, Evaluation). Driver yang dikembangkan terdiri atas transformator toroid, bridge rectifier, kapasitor elektrolit, buck-boost converter, dan modul LED sebagai beban uji. Pengujian meliputi pengujian kinerja beban LED, pengujian kondisi short circuit dan open circuit, pengujian ketahanan (endurance test) selama 9 jam, serta pengujian validasi bersama dosen pembimbing dan teknisi kelistrikan Bandar Udara Budiarto. Hasil pengujian menunjukkan bahwa driver mampu menghasilkan tegangan keluaran stabil sebesar 24 VDC pada setiap step CCR (1 sampai 5), beroperasi secara kontinu selama 9 jam tanpa mengalami kegagalan fungsi, serta mempertahankan nyala LED secara normal tanpa flicker maupun overheating, dengan total biaya pembuatan sebesar Rp870.699. Dengan demikian, driver yang dirancang dapat digunakan sebagai alternatif pengganti driver bawaan pabrikan yang mendukung efisiensi biaya pengadaan dan mempercepat proses pemeliharaan TGS. Penelitian lanjutan disarankan untuk melakukan pengujian fotometrik guna memvalidasi kesesuaian intensitas cahaya terhadap standar ICAO Annex 14.

Kata Kunci: *Airfield Lighting System, Taxiway Guidance Sign, Driver Power Supply, ADDIE*



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

PENDAHULUAN

Keselamatan penerbangan merupakan aspek fundamental dalam penyelenggaraan transportasi udara, dan keselamatan pergerakan pesawat di area runway maupun taxiway sangat bergantung pada keandalan sistem panduan visual (PM 21 TAHUN, 2015). Pentingnya keandalan fasilitas visual tersebut tergambar dari insiden di Narita International Airport, ketika sebuah pesawat salah memasuki taxiway yang sedang diperbaiki sehingga landasan harus ditutup selama beberapa jam (Crhistiastuti, 2018). Salah satu fasilitas visual utama di bandar udara adalah Airfield Lighting System (AFL), yang terdiri atas runway lighting, taxiway lighting, approach lighting, dan Movement Area Guidance Sign (MAGS) yang mencakup Taxiway Guidance Sign (TGS) (Design & Edition, 2018). Seluruh peralatan tersebut disuplai melalui rangkaian seri dengan Constant Current Regulator (CCR) sebagai sumber daya utama, yang menjaga arus tetap konstan pada beberapa tingkat step (step 1 sampai step 5) sehingga setiap lampu memperoleh intensitas cahaya yang seragam (Panjaitan et al., 2020). TGS dipasang

dalam konfigurasi seri yang terhubung dengan CCR melalui isolating transformer, sehingga arus pada setiap unit lampu tetap seragam meskipun terjadi perubahan step CCR. Penggunaan teknologi LED pada sistem MAGS memberikan efisiensi energi yang lebih tinggi dibandingkan lampu konvensional, tetapi karakteristik beban non-linier LED dapat menimbulkan tantangan stabilitas daya apabila driver tidak dirancang sesuai dengan karakteristik suplai arus seri (Gautami et al., 2023).

Berdasarkan hasil wawancara dengan Kepala Unit Listrik Bandar Udara Budiarto, gangguan yang paling sering ditemukan pada sistem TGS adalah kerusakan pada komponen driver, sementara CCR dan series isolating transformer masih berfungsi dengan baik. Apabila suku cadang asli tidak tersedia, proses perbaikan harus menunggu pengadaan unit pengganti sehingga waktu pemulihan fasilitas menjadi lebih lama, terutama karena keterbatasan anggaran pengadaan yang menyebabkan stok suku cadang di gudang sering tidak mencukupi. Kondisi tersebut menunjukkan perlunya solusi teknis berupa driver power supply alternatif yang kompatibel dengan sistem AFL, mudah dirakit, efisien, serta menggunakan komponen yang tersedia di pasaran sehingga dapat dipasang dengan cepat oleh teknisi lapangan ketika driver bawaan pabrikan mengalami kerusakan.

Penelitian Terdahulu yang Relevan

Menurut (Gautami et al., 2023) mengkaji integrasi LED pada sistem AFL dan Movement Area Guidance Sign (MAGS) yang disuplai oleh CCR di Bandar Udara Internasional I Gusti Ngurah Rai, Bali, dan menunjukkan bahwa perubahan step CCR dapat menimbulkan fluktuasi tegangan yang berpotensi memengaruhi kinerja LED. (Taryana et al., 2022) mengembangkan Taxiway Guidance Sign berbasis LED jenis Mandatory Instruction Sign dengan sistem catu daya yang terdiri atas transformator step-down, bridge rectifier, kapasitor filter, dan pengatur tegangan berbasis IC LM723CN, dan berhasil merancang TGS LED yang memenuhi standar ICAO Annex 14 serta persyaratan pencahayaan untuk runway kategori 1 dan 2. Kedua penelitian tersebut menggunakan CCR sebagai sumber daya dan LED sebagai beban, tetapi lebih menitikberatkan pada integrasi LED dan perancangan fisik TGS, bukan pada pengembangan driver power supply itu sendiri.

Tabel 1. Penelitian Terdahulu yang Relevan

No	Penulis/Tahun	Judul	Metode	Hasil	Kontribusi dan Relevansi
1	(Gautami et al., 2023)	Analisis Efisiensi pada Lampu MAGS di Bandar Udara Ngurah Rai	Analisis sistem AFL	Perubahan step CCR dapat menimbulkan fluktuasi tegangan yang memengaruhi kinerja LED	Menggunakan sumber daya CCR dan menghasilkan tegangan DC stabil untuk LED TGS
2	(Taryana et al., 2022)	Taxiway Guidance Sign Jenis Mandatory Instruction Sign	R&D	TGS LED memenuhi standar ICAO Annex 14 dan persyaratan pencahayaan runway kategori 1-2	Sistem catu daya LED, namun fokus pada perancangan TGS dan pencahayaan, bukan driver

Research Gap

Berdasarkan kedua penelitian terdahulu, penggunaan LED pada sistem AFL dan TGS memerlukan catu daya yang mampu menyesuaikan karakteristik sumber dengan kebutuhan beban. Namun, fokus penelitian-penelitian tersebut belum secara khusus diarahkan pada pengembangan driver power supply TGS sebagai alternatif terhadap driver bawaan pabrikan yang mampu mempertahankan tegangan keluaran sesuai kebutuhan beban ketika terjadi perubahan tegangan pada sumber CCR. Celah inilah yang mendasari penelitian ini, yaitu merancang driver power supply TGS tipe LED menggunakan transformator toroid, bridge rectifier, kapasitor filter, dan buck-boost converter untuk mengondisikan tegangan masukan



dari sistem menjadi tegangan DC dengan target keluaran 24 VDC. Dengan demikian, penelitian ini tidak berfokus pada perancangan fisik TGS maupun pengukuran karakteristik pencahayaan seperti penelitian sebelumnya, melainkan secara khusus mengembangkan driver power supply sebagai solusi teknis untuk mempercepat proses pemeliharaan dan mengurangi ketergantungan terhadap pengadaan suku cadang pabrikan.

Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menghasilkan driver power supply untuk TGS tipe LED di Bandar Udara Budiarto yang dapat digunakan sebagai alternatif pengganti driver bawaan pabrikan dengan mempertimbangkan efisiensi biaya dan waktu pengadaan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode Research and Development (R&D), yaitu pendekatan penelitian yang bertujuan menghasilkan produk tertentu melalui tahapan perancangan, pembuatan, hingga pengujian kelayakan produk. Teknik pengumpulan data dilakukan melalui observasi lapangan, wawancara dengan teknisi kelistrikan, serta studi literatur, yang kemudian diolah menggunakan teknik triangulasi untuk meningkatkan keabsahan hasil penelitian (Vera Nurfajriani et al., 2024). Penelitian dilaksanakan pada periode Maret hingga Agustus 2026, dengan observasi lapangan di Bandar Udara Budiarto, Curug, sedangkan proses perancangan dan pengujian prototipe dilakukan di Laboratorium Airfield Ground Lighting (AGL) Politeknik Penerbangan Indonesia Curug dan Main Power House (MPH).

Metode R&D ADDIE

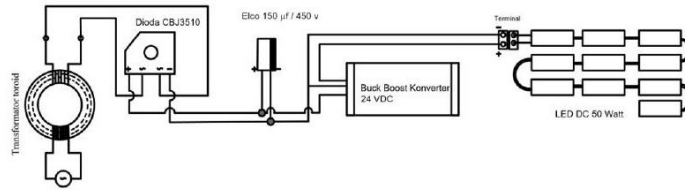
Model pengembangan yang digunakan adalah ADDIE, yang terdiri atas lima tahapan utama yaitu Analysis, Design, Development, Implementation, dan Evaluation (Sugiyono, 2017). Tahap Analysis dilakukan untuk mengidentifikasi kebutuhan driver alternatif melalui observasi kondisi aktual sistem TGS di Bandar Udara Budiarto. Tahap Design merupakan proses perancangan rangkaian driver yang terdiri atas transformator step-down, rangkaian penyearah, filter, dan regulator tegangan. Tahap Development merealisasikan desain menjadi prototipe dengan komponen yang dipilih berdasarkan ketersediaan di pasaran dan efisiensi biaya. Tahap Implementation menguji produk pada kondisi kerja yang menyerupai sistem AFL sebenarnya menggunakan suplai dari CCR melalui isolating transformer. Tahap Evaluation menganalisis hasil pengujian prototipe untuk menilai kinerja, kestabilan operasi, dan efisiensi biaya dibandingkan driver pabrikan, sebagai dasar penyempurnaan produk.

Analisis Kebutuhan

Analisis kebutuhan didasarkan pada hasil pengukuran dan observasi langsung pada sistem AFL di Bandar Udara Budiarto. Pengukuran dilakukan pada sisi keluaran series transformer yang terhubung dengan CCR untuk memperoleh karakteristik tegangan pada setiap step CCR, sedangkan observasi dilakukan untuk mengetahui spesifikasi lampu TGS yang digunakan di lapangan. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa tegangan keluaran series transformer berada pada rentang 47 VAC hingga 62 VAC seiring perubahan step CCR 1 sampai 5, sedangkan hasil observasi menunjukkan lampu TGS di lapangan memiliki variasi daya sebesar 29 Watt dan 83 Watt bergantung pada jenis dan ukuran papan petunjuk. Berdasarkan data tersebut, pengujian menggunakan beban prototipe berupa 10 modul LED bertegangan kerja 24 VDC dengan daya 5 Watt per modul, sehingga total daya beban uji sebesar 50 Watt dan estimasi arus beban sebesar 2,08 A.

Perancangan Sistem

Rancangan driver TGS tipe LED terdiri atas transformator toroid, rangkaian penyearah (bridge rectifier), kapasitor filter (elco), dan modul buck-boost converter dengan lampu LED sebagai beban. Tegangan AC sebesar 47 hingga 62 VAC dari keluaran isolating transformer terlebih dahulu diturunkan oleh transformator toroid menjadi sekitar 24 VAC, kemudian disearahkan oleh bridge rectifier menjadi tegangan DC. Tegangan DC hasil penyearahan masih mengandung riak (ripple) sehingga difilter oleh kapasitor elektrolit, lalu dialirkan ke buck-boost converter yang mengatur tegangan keluaran hingga mencapai 24 VDC sesuai kebutuhan modul LED.



Gambar 1. Blok Rangkaian Driver Power Supply TGS Tipe LED

Spesifikasi Komponen

Spesifikasi komponen ditentukan berdasarkan hasil pengukuran tegangan sistem AFL dan perhitungan kebutuhan daya beban. Transformator toroid dipilih dengan tegangan primer 55 VAC dan tegangan sekunder 24 VAC. Kapasitas transformator dihitung menggunakan persamaan $S = V \times I$, dengan tegangan sekunder 24 VAC dan arus sekunder 2,08 A, sehingga diperoleh kapasitas minimum sebesar 49,92 VA yang dibulatkan menjadi 50 VA; transformator 100 VA yang digunakan pada pengujian memberikan margin pembebanan yang aman. Rincian alat dan komponen utama yang digunakan disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Komponen Utama Driver Power Supply

No	Nama Komponen	Jumlah	Fungsi
1	Transformator Toroid 55 VAC-24 VAC	1 Buah	Menurunkan tegangan AC dari isolating transformer AFL
2	Bridge Rectifier GBJ3510 35A/1000V	1 Buah	Mengubah tegangan AC menjadi DC
3	Kapasitor Elektrolit (Elco) 150 uF/450V	1 Buah	Menyaring riak (ripple) tegangan DC
4	Modul DC-DC Buck-Boost Converter	1 Buah	Mengatur tegangan keluaran maksimum 24 VDC
5	Modul LED (beban uji)	10 Buah	Beban dan sumber pencahayaan, masing-masing 24 VDC/5 Watt
6	PCB Lubang (Veroboard) dan Terminal Block	Secukupnya	Tempat pemasangan dan koneksi komponen

Total biaya pembuatan driver power supply menggunakan komponen tersebut sebesar Rp870.699, yang mencakup dioda bridge GBJ3510 (Rp10.000), kapasitor elco 150 uF/450V (Rp9.900), modul DC-DC Buck-Boost Converter (Rp160.799), dan transformator toroid 55 VAC-24 VAC (Rp690.000). Seluruh komponen dapat diperoleh melalui marketplace maupun toko elektronika, baik secara daring maupun luring.

Prosedur Pengujian

Pengujian driver power supply yang telah dirancang meliputi empat tahapan. Pertama, pengujian kinerja beban LED dilakukan dengan mengamati kondisi nyala 10 modul LED, kestabilan pencahayaan, serta indikasi flicker selama driver beroperasi. Kedua, pengujian

kondisi short circuit dan open circuit dilakukan dengan mengoperasikan sistem secara keseluruhan sambil mengukur tegangan dan arus keluaran menggunakan multimeter digital secara berkala. Ketiga, pengujian ketahanan (endurance test) dilakukan selama 9 jam operasi kontinu sesuai persyaratan validasi dari Bandar Udara Budiarto. Keempat, pengujian bersama dosen pembimbing dan teknisi kelistrikan Bandar Udara Budiarto dilakukan di Gedung AGL Politeknik Penerbangan Indonesia Curug dan Main Power House (MPH) Bandar Udara Budiarto untuk memverifikasi bahwa driver dapat beroperasi sesuai tujuan perancangan.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Pengujian Step CCR 1-5

Pengukuran tegangan keluaran series transformer tanpa beban pada kelima step CCR menunjukkan peningkatan tegangan secara bertahap seiring kenaikan step, sebagaimana disajikan pada Tabel 3. Rentang tegangan 47 VAC hingga 62 VAC ini menjadi acuan dalam menentukan spesifikasi tegangan masukan transformator toroid agar seluruh rangkaian driver tetap dapat beroperasi dengan baik pada setiap level CCR yang dipilih oleh Air Traffic Control (ATC).

Tabel 3. Tegangan Keluaran Series Transformer 100 Watt pada Setiap Step CCR

Step CCR	Tegangan Keluaran Transformator (VAC)
Step 1	47
Step 2	50
Step 3	53
Step 4	57
Step 5	62

Analisis Tegangan

Pengukuran pada setiap tahap rangkaian driver menunjukkan bahwa tegangan output transformator toroid dan tegangan hasil penyearahan bridge rectifier meningkat mengikuti kenaikan step CCR, tetapi tegangan keluaran modul buck-boost converter menuju lampu LED tetap konsisten pada 24 VDC di seluruh step, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4. Hal ini membuktikan bahwa buck-boost converter berfungsi efektif sebagai regulator yang meredam fluktuasi tegangan masukan akibat perubahan step CCR, sehingga tegangan yang diterima oleh beban LED tetap stabil pada nilai yang telah ditentukan tanpa menimbulkan flicker.

Tabel 4. Data Pengukuran Driver Power Supply pada Setiap Step CCR

Parameter Pengukuran	Satuan	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5
Tegangan output transformator toroid	VAC	24	25	26	27	28
Tegangan output dioda bridge (input Buck-Boost Converter)	VDC	33	34	35	36	38
Tegangan output modul Buck-Boost Converter menuju lampu LED	VDC	24	24	24	24	24
Arus output modul Buck-Boost Converter menuju lampu LED	A	1,5	1,6	1,7	1,7	1,8

Analisis Arus dan Daya

Berdasarkan Tabel 4, arus keluaran modul buck-boost converter meningkat secara bertahap dari 1,5 A pada step 1 hingga 1,8 A pada step 5, sejalan dengan meningkatnya tegangan sisi masukan pada setiap step CCR. Secara teoritis, beban 50 Watt pada tegangan kerja 24 VDC membutuhkan arus sekitar 2,08 A ($I = P/V = 50/24$), namun hasil pengukuran aktual menunjukkan arus sebesar 1,5 A hingga 1,8 A, sehingga daya aktual yang diserap beban berkisar 36 hingga 43,2 Watt. Perbedaan antara nilai teoritis dan aktual ini terjadi karena

adanya rugi-rugi daya pada transformator, bridge rectifier, dan buck-boost converter, serta karena karakteristik pembebanan LED yang tidak sepenuhnya linier terhadap tegangan sumber. Meskipun demikian, tegangan keluaran tetap dipertahankan konstan pada 24 VDC oleh buck-boost converter, sehingga arus beban relatif stabil pada setiap step CCR dan tidak terjadi fluktuasi signifikan yang dapat mengganggu kinerja LED.

Endurance Test 9 Jam

Pengujian ketahanan dilakukan pada kondisi CCR step 1 selama 9 jam operasi kontinu bersama dosen pembimbing dan teknisi kelistrikan Bandar Udara Budiarto sebagai bagian dari validasi kinerja alat. Hasil pengujian pada interval waktu 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, dan 9 jam disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Data Validasi Ketahanan Driver Power Supply Selama 9 Jam (CCR Step 1)

No.	Waktu Pengujian	Tegangan Output DC-DC (VDC)	Arus Output (A)	Kondisi Beban Lampu LED	Kondisi Driver Power Supply	Keterangan
1	0 Jam	24	1,5	Menyala Normal	Beroperasi Normal	Awal pengujian
2	1 Jam	24	1,5	Menyala Normal	Beroperasi Normal	Stabil
3	2 Jam	24	1,5	Menyala Normal	Beroperasi Normal	Stabil
4	3 Jam	24	1,5	Menyala Normal	Beroperasi Normal	Stabil
5	4 Jam	24	1,5	Menyala Normal	Beroperasi Normal	Stabil
6	5 Jam	24	1,5	Menyala Normal	Beroperasi Normal	Stabil
7	6 Jam	24	1,5	Menyala Normal	Beroperasi Normal	Stabil
8	7 Jam	24	1,5	Menyala Normal	Beroperasi Normal	Stabil
9	8 Jam	24	1,5	Menyala Normal	Beroperasi Normal	Stabil
10	9 Jam	24	1,5	Menyala Normal	Beroperasi Normal	Pengujian selesai

Selama 9 jam pengujian, tegangan keluaran tetap stabil pada 24 VDC dan arus keluaran berada pada rentang 1,5 A tanpa mengalami overvoltage, undervoltage, maupun fluktuasi arus yang signifikan. Tidak ditemukan indikasi kerusakan seperti perubahan warna komponen, bau terbakar, maupun panas berlebih (overheating), dan lampu LED tetap menyala normal tanpa flicker hingga pengujian selesai. Hasil ini membuktikan bahwa driver power supply memiliki tingkat keandalan (reliability) yang baik dalam mempertahankan kinerjanya selama pengoperasian kontinu.



Gambar 2. Dokumentasi Pengujian Ketahanan Driver Power Supply Selama 9 Jam

Pembahasan

Hasil pengujian pada setiap step CCR dan pengujian ketahanan 9 jam secara konsisten menunjukkan bahwa driver power supply yang dirancang mampu menghasilkan tegangan keluaran 24 VDC yang stabil, sehingga lampu LED pada TGS dapat beroperasi dengan baik pada berbagai kondisi operasi sistem AFL. Temuan ini sejalan dengan hasil Taryana et al. (2022) yang menunjukkan bahwa rangkaian catu daya berbasis transformator, penyearah, dan pengatur tegangan mampu menghasilkan pencahayaan LED yang sesuai standar, namun penelitian ini memperluas kontribusi tersebut dengan membuktikan kestabilan tegangan keluaran secara khusus pada perubahan step CCR 1 hingga 5, aspek yang belum dibahas secara eksplisit pada penelitian terdahulu. Temuan ini juga memperkuat catatan Gautami et al. (2023) bahwa perubahan step CCR berpotensi memengaruhi kinerja LED, dengan menunjukkan bahwa penggunaan buck-boost converter sebagai regulator tegangan efektif meredam potensi fluktuasi tersebut.

Dari sisi penerapan, driver yang dirancang dapat digunakan sebagai alternatif pengganti atau cadangan (backup) ketika driver pabrikan mengalami kerusakan dan membutuhkan waktu pengadaan yang lama. Dengan total biaya pembuatan sebesar Rp870.699 menggunakan komponen yang tersedia luas di pasaran, baik secara daring maupun luring, driver ini memberikan solusi yang lebih ekonomis dan fleksibel dibandingkan menunggu pengadaan suku cadang asli dari pabrikan, sehingga dapat membantu meminimalkan waktu gangguan operasional TGS di lapangan.

KESIMPULAN

Driver power supply alternatif untuk TGS tipe LED di Bandar Udara Budiarto berhasil dirancang melalui integrasi transformator toroid, dioda bridge rectifier, kapasitor elektrolit, dan modul buck-boost converter, yang mampu menstabilkan tegangan masukan fluktuatif dari isolating transformer/CCR menjadi tegangan keluaran konstan 24 VDC tanpa menimbulkan flicker pada setiap step CCR (1 hingga 5). Hasil pengujian endurance selama 9 jam menunjukkan driver mampu mempertahankan tegangan keluaran 24 VDC dan arus keluaran sekitar 1,5 A secara stabil, dengan lampu LED tetap menyala normal dan tanpa gejala overheating maupun short circuit. Dari sisi ekonomis, driver ini terbukti efisien dengan total biaya pembuatan Rp870.699 serta efisien dari segi waktu karena tidak perlu menunggu proses inden suku cadang impor, sehingga proses pemeliharaan TGS di lapangan dapat dipercepat. Dengan demikian, driver power supply yang dirancang telah memenuhi tujuan penelitian sebagai alternatif pengganti driver bawaan pabrikan yang efisien dari segi biaya dan waktu

pengadaan. Ucapan terima kasih disampaikan kepada dosen pembimbing dan teknisi kelistrikan Bandar Udara Budiarto atas dukungan selama proses pengujian dan validasi alat.

Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, pengujian tidak mencakup pengukuran intensitas cahaya, luminansi, maupun nilai candela yang dihasilkan oleh lampu TGS, karena fokus penelitian berada pada perancangan dan pengujian driver power supply sebagai catu daya, bukan pada performa pencahayaan LED. Pengukuran fotometrik tersebut memerlukan peralatan khusus seperti luminance meter atau photometer yang tidak tersedia selama penelitian berlangsung, sehingga kesesuaian tingkat kecerahan lampu terhadap persyaratan luminansi ICAO Annex 14 belum dapat disimpulkan. Kedua, pengujian menggunakan beban prototipe berupa 10 modul LED 50 Watt, bukan lampu TGS tipe ADB yang terpasang langsung di lapangan, sehingga karakteristik beban aktual pada instalasi TGS sesungguhnya dapat sedikit berbeda. Ketiga, dimensi fisik dan kesesuaian ruang pemasangan (housing) driver terhadap box TGS di lapangan belum dievaluasi secara khusus, serta rangkaian pada PCB belum ditempatkan dalam casing pelindung terhadap debu, kelembapan, dan getaran. Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan untuk melakukan pengujian fotometrik sesuai standar ICAO Annex 14, evaluasi kesesuaian dimensi fisik terhadap housing TGS, serta perancangan casing pelindung sebelum driver diimplementasikan secara permanen pada fasilitas operasional bandar udara.

DAFTAR PUSTAKA

- Crhistiastuti, N. (2018). *Ada Pesawat Salah Masuk, Landasan Bandara Narita Sempat Ditutup*. Detiknews. <https://news.detik.com/internasional/d-4142742/ada-pesawat-salah-masuk-landasan-bandara-narita-sempat-ditutup>
- Design, A., & Edition, E. (2018). *Annex 14 of the Convention on the International Civil Aviation Organization: Vol. I* (Issue November).
- Gautami, N. L. A., Bunahri, R. R., Nugrahayani, T., & Kona, M. (2023). Analisis Efisiensi pada Lampu Movement Area Guidance Sign (MAGS) di Bandar Udara Internasional I Gusti Ngurah Rai - Bali. *SKY EAST: Education of Aviation Science and Technology*, 1(2), 111–121. <https://doi.org/10.61510/skyeast.v1i2.15>
- Panjaitan, A., Sahputra, A., & Syafriwel. (2020). Analisis Sistem Constant Current Regulator pada Lampu Precision Approach Path Indikator di Bandara Udara. *Edu Elekrika Journal*, 9(2), 31–35.
- PM 21 TAHUN. (2015). *Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia*.
- Sugiyono. (2017). *Metode Penelitian Kuantitatif, kualitatif dan R & D*. ALFABETA.
- Taryana, Mahesa, A., & Samanhudi, A. (2022). Taxiway Guidance Sign Jenis Mandatory Instruction Sign. *Airman: Jurnal Teknik Dan Keselamatan Transportasi*, 5(1), 101–108. <https://doi.org/10.46509/ajtk.v5i1.223>
- Vera Nurfajriani, W., Ilhami, M. W., Mahendra, A., Sirodj, R. A., Afgani, W., Negeri, U. I., Fatah, R., & Abstract, P. (2024). Triangulasi Data Dalam Analisis Data Kualitatif, *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, September 2024., *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 10(17), 826–833. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13929272>