

Analisis Pencahayaan Lampu pada Sistem Penerangan *Carpark* Terminal 1 Sesuai Standar di Bandar Udara Internasional Juanda

Kadek Bagus Rizky Aditya Nugraha¹ Ahmad Kosasih² Isnain Jodi Anggoro³

Program Studi D.IV Teknik Listrik Bandara, Jurusan Teknik Penerbangan, Politeknik

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

Email: bagusrizky5@gmail.com¹ kosasih.curug@gmail.com² isnainjanggoro@ppicurug.ac.id³

Abstrak

Sistem penerangan carpark Terminal 1 Bandar Udara Internasional Juanda saat ini mengalami permasalahan ketidakcukupan pencahayaan akibat hanya terpasang 2–3 luminer per tiang dari kapasitas enam soket akibat kendala pengadaan lampu baru, serta penggunaan kombinasi lampu Metal Halide Philips HPI-T 1000 W dan LED Panasonic High Mast 480 W. Kondisi ini berpotensi membahayakan visibilitas dan keselamatan pengguna fasilitas di malam hari. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kondisi pencahayaan eksisting dan mengevaluasi kelayakan teknis perancangan ulang menggunakan enam unit Philips ClearFlood gen2 BVP656 per tiang High Mast. Evaluasi menggunakan kombinasi Metode Grid (pengukuran langsung 72 titik pada delapan zona), Metode Lumen, Metode Titik, serta simulasi DIALux evo. Pendekatan multimetode dipilih untuk memvalidasi secara komprehensif antara data lapangan, perhitungan teoritis, dan simulasi fotometrik. Standar iluminansi mengacu pada SNI 7391:2008 (target minimum 22 lux) dan keseragaman pencahayaan mengacu pada IES RP-20 (minimum 0,25). Hasil pengukuran kondisi eksisting menunjukkan iluminansi rata-rata 15,57 lux dan *overall uniformity* 0,167, yang membuktikan sistem belum memenuhi kriteria. Pada skenario usulan, Metode Lumen menghasilkan iluminansi rata-rata 34,19 lux, Metode Titik pada titik kritis menghasilkan 24,34 lux, serta simulasi DIALux evo menghasilkan *average illuminance* 49,5 lux, *minimum illuminance* 25,0 lux, *maximum illuminance* 141 lux, dan *overall uniformity* 0,51. Penggantian sistem penerangan ini terbukti layak secara teknis dan berhasil menurunkan total daya terpasang dari 19,50 kW menjadi 16,16 kW (efisiensi daya 17,12%). Pengelola bandara direkomendasikan merealisasikan penggantian ke satu jenis luminer LED seragam, dan bagi peneliti selanjutnya disarankan melakukan analisis *Life Cycle Cost* (LCC) serta integrasi *smart lighting*.

Kata Kunci: *Carpark*, Iluminansi, Metode Lumen, Metode Titik, Metode Grid



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

PENDAHULUAN

Bandar Udara Internasional Juanda beroperasi secara penuh selama 24 jam sehingga membutuhkan infrastruktur pendukung yang andal, khususnya sistem penerangan area parkir kendaraan (*carpark*) untuk menjamin keselamatan dan keamanan pengguna fasilitas. Namun, sistem penerangan carpark Terminal 1 saat ini mengalami kendala penurunan kualitas pencahayaan akibat hanya terpasang 2–3 luminer per tiang dari kapasitas ideal 6 soket, serta penggunaan kombinasi jenis lampu Metal Halide Philips HPI-T 1000 W dan LED Panasonic High Mast 480 W akibat kendala pengadaan. Penggunaan lampu konvensional HPI-T 1000 W berdaya tinggi ini terbukti tidak efisien karena sebagian besar energi listrik terbuang menjadi panas dengan efikasi yang relatif rendah.

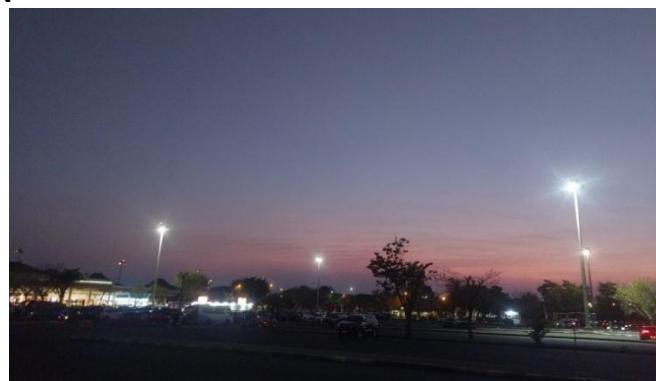
Beberapa penelitian terdahulu mengenai evaluasi penerangan fasilitas luar ruangan telah dilakukan. Husnayain et al. (2023) membuktikan keunggulan efikasi lampu LED dibandingkan teknologi lampu konvensional. Faizi et al. (2023) mengevaluasi area parkir terbuka Candi Borobudur dan merencanakan ulang sistem penerangan yang tidak memenuhi standar SNI 7391:2008. Sementara itu, Irmawanto et al. (2024) mengombinasikan Metode Lumen, pengukuran lapangan, dan simulasi DIALux dalam analisis Stadion Gelora Bung Tomo.

Gap analysis dalam penelitian ini terletak pada belum tersedianya kajian terintegrasi yang mengevaluasi penggantian sistem penerangan *high mast* di *carpark* aerodrome yang menggabungkan validasi pengukuran lapangan (*Grid Method*), kalkulasi matematis (*Lumen & Point Method*), simulasi fotometrik 3D (DIALux evo), hingga dampak reduksi emisi karbon berbasis data operasional bandara. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis tingkat iluminansi dan keseragaman pencahayaan eksisting serta mengevaluasi kelayakan teknis dan penghematan energi dari skenario penggantian ke luminer Philips ClearFlood gen2 BVP656.

Penelitian Terdahulu yang Relevan

No	Penulis/ Tahun	Judul	Tujuan	Metode	Hasil	Kontribusi dan Relevansi
1	Husnayain et al. (2023)	Analisis Perbandingan Kinerja Lampu LED, CFL, dan Pijar pada Sistem Penerangan Kantor	Membandingkan efisiensi dan kinerja teknis tiga jenis teknologi lampu	Eksperimental kuantitatif & Pengukuran Parameter Listrik/Cahaya	LED memiliki efikasi tertinggi (137,36 lm/W) dan daya terendah	Menjadi acuan keunggulan efikasi teknologi LED dibanding Metal Halide
2	Faizi et al. (2023)	Evaluasi Penerangan Tempat Parkir Terbuka (Outdoor) pada Wisata Candi Borobudur	Evaluasi dan perencanaan ulang sistem penerangan parkir terbuka	Metode Komparatif terhadap SNI 7391:2008	Kondisi eksisting 7 lux naik menjadi 16,6 lux setelah <i>redesign</i>	Landasan evaluasi standar SNI 7391:2008 pada area parkir terbuka
3	Irmawanto et al. (2024)	Analisis dan Evaluasi Intensitas Pencahayaan pada Lapangan Stadion Gelora Bung Tomo Surabaya	Evaluasi tingkat iluminansi lapangan sesuai standar FIFA	Metode Lumen, Metode Lux (Pengukuran), dan Simulasi DIALux	Seluruh metode mengonfirmasi pencahayaan telah memenuhi standar (> 2000 lux)	Acuan penggunaan metodologi komplementer (Lumen, Lux, dan DIALux)
4	Kusumayogo (2019)	Analisis Teknis dan Ekonomis Penerapan PJU Solar Cell di Jalan Tol Darmo	Menganalisis kelayakan penggantian lampu merkuri ke LED	Perhitungan Teknis & Analisis Kelayakan Financial (BEP)	LED 150 W menghasilkan pencahayaan optimal dan BEP 7,7 tahun	Referensi pendekatan efisiensi energi dan analisis keandalan
5	Parera et al. (2018)	Pengaruh Intensitas Penerangan pada Laboratorium dan Bengkel Elektro	Menganalisis pengaruh distribusi penerangan tempat kerja	Pengukuran Luxmeter berbasis SNI 16-7062-2004	Distribusi intensitas dipengaruhi faktor cuaca dan penataan titik lampu	Dasar prosedur teknis pengambilan data menggunakan <i>luxmeter</i>

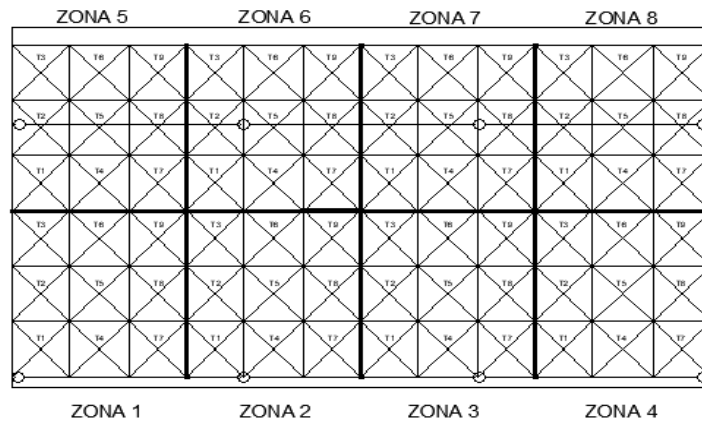
METODE PENELITIAN



Gambar 1. Area Carpark di Bandar Udara Juanda

Metode penelitian yang digunakan adalah Penelitian kuantitatif dengan pendekatan deskriptif-analitis ini dilaksanakan di area parkir kendaraan (*carpark*) Terminal 1 Bandar

Udara Internasional Juanda, Surabaya, yang memiliki dimensi $130\text{ m} \times 221\text{ m}$ dengan luas total 28.730 m^2 . Seluruh rangkaian kegiatan penelitian, mulai dari survei pendahuluan, observasi, pengukuran lapangan, pemodelan simulasi, hingga analisis pengolahan data, berlangsung dalam kurun waktu Januari hingga Agustus 2026.



Gambar 2. Pembagian Titik-Titik Perhitungan

Pengumpulan data primer dilakukan melalui pengukuran intensitas cahaya secara langsung pada malam hari saat seluruh sistem penerangan eksisting beroperasi penuh. Prosedur pengukuran mengacu pada standar SNI 7062:2019 tentang Pengukuran Intensitas Pencahayaan di Tempat Kerja. Metode yang diterapkan dalam pengambilan sampel adalah Metode Grid, di mana seluruh area *carpark* seluas 28.730 m^2 dibagi secara proporsional menjadi 8 zona pengukuran yang memetakan distribusi 8 tiang penerangan *High Mast* berkonstruksi setinggi 21 m. Pada setiap zona ditetapkan 9 titik ukur yang terdistribusi secara sistematis pada pola grid 3×3 , sehingga diperoleh total 72 titik pengukuran. Alat ukur utama yang digunakan adalah *digital luxmeter* yang telah dikalibrasi untuk menjamin akurasi data, dengan sensor diletakkan pada ketinggian 0,8 m dari permukaan aspal—merepresentasikan ketinggian bidang kerja operasional kendaraan dan pejalan kaki. Penentuan jarak serta posisi koordinat antar-titik ukur di lapangan dibantu menggunakan instrumen *measuring wheel*.



Gambar 3. Pengukuran Langsung di Lokasi

Setelah data empiris kondisi eksisting terhimpun, tahap pengolahan data teoritis dan verifikasi skenario perancangan ulang (*redesign*) dilakukan melalui tiga pendekatan

komplementer, yaitu kalkulasi matematis *Metode Lumen*, *Metode Titik (Point Method)*, serta simulasi fotometrik digital berbasis perangkat lunak DIALux evo:

Perhitungan Metode Lumen

Metode ini digunakan untuk mengestimasi tingkat iluminansi rata-rata (E) pada seluruh area *carpark* setelah direncanakan penggantian total menggunakan 48 unit lumener Philips ClearFlood gen2 BVP656 LED berdaya nominal 341 W (6 unit per tiang *High Mast*). Persamaan matematis yang digunakan adalah:

$$E = \frac{n \times \Phi \times CU \times LLF}{A}$$

di mana n merupakan jumlah total lumener (48 unit), Φ adalah fluks cahaya nominal per lumener (51.160 lumen), CU (*Coefficient of Utilization*) bernilai 0,50 sesuai karakteristik area luar ruangan bertiang tinggi, LLF (*Light Loss Factor*) bernilai 0,80 sebagai faktor depresiasi lumen dan depresiasi akibat kotoran, serta A merupakan luas total area *carpark* (28.730 m²).

Perhitungan Metode Titik (*Point Method*)

Metode Titik diterapkan untuk mengevaluasi dan memverifikasi iluminansi horizontal secara spesifik pada titik-titik kritis, khususnya titik yang berada di tengah area antartiang (*pitch* 75 m) yang memiliki potensi tinggi terjadinya area tergelap (*dark spot*). Perhitungan mengacu pada hukum kuadrat terbalik (*Inverse Square Law*) dengan formula:

$$E = \frac{I \times \cos^3 \theta}{H^2}$$

di mana I merepresentasikan estimasi intensitas cahaya efektif lumener ke arah titik ukur (candela), θ adalah sudut datang berkas cahaya terhadap sumbu vertikal tiang (60, 75°), dan H adalah tinggi tiang *High Mast* (21 m). Hasil iluminansi dari dua tiang terdekat kemudian dijumlahkan (*superposisi*) untuk memperoleh iluminansi total di titik kritis tersebut.

Simulasi dan Verifikasi DIALux evo

Untuk memvalidasi distribusi cahaya secara presisi dan tiga dimensi (3D), dilakukan pemodelan simulasi menggunakan perangkat lunak DIALux evo. Proses simulasi diawali dengan mengimpor denah tapak *carpark* dalam format DWG/CAD, menentukan *calculation surface* horizontal pada elevasi 0,000 m, serta memasukkan data fotometrik resmi produsen dalam format berkas *Unified Luminaire Data* (.ULD) untuk spesifikasi Philips ClearFlood gen2 BVP656 (336,7 W *actual power*, 51.561 lm, distribusi asimetris A35-MB) dengan *Maintenance Factor* disetel pada angka 0,80. Dari komputasi simulasi ini diperoleh indikator kuantitatif berupa *average illuminance* (E_{avg}), *minimum illuminance* (E_{min}), *maximum illuminance* (E_{max}), *overall uniformity* ($U_o = E_{min}/E_{avg}$), serta pemetaan visual berupa grafik *false colour*.

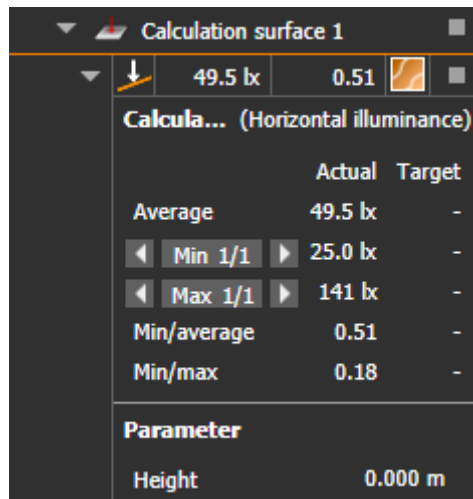
Sebagai tahap akhir, dilakukan Analisis Efisiensi Energi dan Estimasi Emisi Karbon untuk membandingkan performa operasional antara sistem eksisting (19,50 kW) dan sistem usulan (16,16 kW). Perhitungan konsumsi energi harian dan tahunan dinilai dengan asumsi jam kerja sistem penerangan selama 12 jam/hari (4.380 jam/tahun) menggunakan persamaan $E = P \times t \times 365$. Selanjutnya, kalkulasi reduksi emisi karbon tidak langsung (CO₂) dihitung dengan mengalikan selisih penghematan energi tahunan (kWh) terhadap faktor emisi ketenagalistrikan nasional jaringan PLN sebesar 0,87 kg CO₂/kWh. Seluruh hasil evaluasi teknis dan lingkungan tersebut kemudian dibandingkan terhadap standar acuan nasional SNI 7391:2008 (target iluminansi minimum 22 lux) dan standar internasional IES RP-20 (target keseragaman minimum 0,25).

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Hasil Evaluasi teknis dan analisis performa sistem penerangan *carpark* Terminal 1 Bandar Udara Internasional Juanda dilakukan secara menyeluruh melalui pengukuran lapangan (*Metode Grid*), kalkulasi matematis teoritis (*Metode Lumen* dan *Metode Titik*), simulasi fotometrik digital (*DIALux evo*), serta kalkulasi efisiensi energi dan reduksi emisi karbon. Berdasarkan hasil pengukuran lapangan pada malam hari menggunakan *digital luxmeter* di 72 titik ukur yang tersebar merata pada 8 zona, sistem penerangan eksisting terbukti tidak memenuhi kriteria minimum pencahayaan area parkir terbuka. Iluminansi rata-rata keseluruhan kondisi eksisting hanya mencapai 15,57 lux, berada jauh di bawah target minimum 22 lux yang dipersyaratkan oleh SNI 7391:2008. Dari 8 zona yang dievaluasi, 7 zona mencatatkan iluminansi di bawah standar minimum, di mana Zona 2 (9,33 lux) dan Zona 3 (10,92 lux) menjadi area dengan tingkat pencahayaan terendah, dan hanya Zona 4 yang melampaui ambang batas dengan rata-rata 26,94 lux. Selain iluminansi rata-rata yang rendah, tingkat keseragaman pencahayaan (*overall uniformity*) kondisi eksisting sangat buruk, yaitu sebesar $U_o = 0,167$, berada di bawah ambang batas minimum 0,25 mengacu pada standar IES RP-20. Titik tergelap (*minimum illuminance*) tercatat sebesar 2,60 lux pada titik T6 (Zona 3), sedangkan titik terterang (*maximum illuminance*) mencapai 65,50 lux pada titik T4 (Zona 4). Perbedaan ekstrem ini menghasilkan rasio kontras terang-gelap sebesar 25:1 yang memicu bahaya ketidaknyamanan visual (silau sesaat) serta menciptakan titik-titik gelap (*dark spot*) yang membahayakan visibilitas pengemudi dan pejalan kaki. Rendahnya performa penerangan eksisting ini merupakan dampak langsung dari kendala pengadaan yang menyebabkan setiap tiang *High Mast* hanya terpasang 2–3 unit lumener campuran (Metal Halide Philips HPI-T 1000 W dan LED Panasonic 480 W) dari kapasitas ideal 6 soket.

Guna mengatasi defisit pencahayaan tersebut, direncanakan skenario penggantian total menggunakan lumener Philips ClearFlood gen2 BVP656 LED 341W berdistribusi asimetris (A35-MB) sebanyak 6 unit per tiang *High Mast* (total 48 unit lumener). Pada kalkulasi teoritis, *Metode Lumen* menghasilkan perkiraan iluminansi rata-rata sebesar 34,19 lux, melampaui target 22 lux dan memberikan margin keselamatan (*safety margin*) terhadap faktor penyusutan lumen di masa mendatang. Sementara itu, kalkulasi *Metode Titik* (*Point Method*) pada area kritis antartiang (*pitch* 75 m) menghasilkan nilai superposisi sebesar 24,34 lux, membuktikan bahwa daerah yang paling jauh dari sumber cahaya tetap menerima iluminansi di atas batas minimum 22 lux. Selanjutnya, komputasi 3D menggunakan *DIALux evo* memperkuat validasi teoritis dengan mencatatkan *average illuminance* (E_{avg}) sebesar 49,5 lux dan *minimum illuminance* (E_{min}) sebesar 25,0 lux. Nilai iluminansi terendah (25,0 lux) yang tetap berada di atas standar 22 lux mengonfirmasi bahwa tidak ada lagi *dark spot* di seluruh area *carpark*. Selain itu, *overall uniformity* meningkat signifikan menjadi $U_o = 0,51$ (dua kali lipat melampaui standar IES RP-20 $\geq 0,25$) dengan tampilan visualisasi *false colour* yang memperlihatkan kontur gradasi warna halus dan dominan hijau-biru (30--75 lux), menandakan penyebaran cahaya berlangsung secara kontinu dan merata.



Gambar 4. Hasil Pengujian Lampu Usulan Menggunakan Dialux Evo

Sistem penerangan usulan ini juga terbukti jauh lebih efisien dibandingkan kondisi eksisting berkat efikasi tinggi lumener LED Philips BVP656 (153,1 lm/W). Meskipun jumlah lumener bertambah dari 23 unit menjadi 48 unit untuk memenuhi kecukupan cahaya, total daya terpasang justru mengalami penurunan dari 19,50 kW menjadi 16,16 kW. Penurunan daya sebesar 3,34 kW ini mewakili efisiensi daya sebesar 17,12%. Dengan asumsi waktu operasional 12 jam/hari (4.380 jam/tahun), sistem usulan menghasilkan penghematan energi listrik sebesar 40,06 kWh/hari atau 14.622,19 kWh/tahun. Berdasarkan faktor emisi listrik nasional 0,87 kg CO₂/kWh, penghematan energi tersebut secara langsung menurunkan emisi karbon tidak langsung sebesar 12.721,31 kg CO₂/tahun (~ 12,72 ton CO₂/tahun). Dari sisi keandalan operasional, umur pakai LED BVP656 yang mencapai 50.000 jam (~ 11,4 tahun) jauh melampaui lampu HPI-T (12.000 jam / ~ 2,7 tahun), sehingga dapat menekan frekuensi pekerjaan pemeliharaan berisiko tinggi (*high-risk work*) di ketinggian tiang 21 meter. Rangkuman komprehensif seluruh parameter teknis, performa pencahayaan, serta analisis energi dan lingkungan disajikan pada Tabel 1

Tabel 1. Rekapitulasi Komprehensif Perbandingan Parameter Teknis, Pencahayaan, Energi, dan Lingkungan

No	Parameter Evaluasi	Standar Acuan	Kondisi Eksisting (Pengukuran Grid)	Skenario Usulan (Kalkulasi Teoritis)	Skenario Usulan (Simulasi DIALux evo)	Evaluasi Status
A Spesifikasi & Konfigurasi						
1	Jenis Lumener Utama	-	Metal Halide HPI-T & LED Panasonic	Philips ClearFlood gen2 BVP656	Philips ClearFlood gen2 BVP656	Seragam (100% LED)
2	Jumlah Lumener Terpasang	48 unit (6 unit/tiang)	23 unit (2--3 unit/tiang)	48 unit (6 unit/tiang)	48 unit (6 unit/tiang)	Sesuai Kapasitas Soket
3	Efikasi Cahaya Lumener	-	83 lm/W & 110 lm/W	150,0 lm/W	153,1 lm/W	Peningkatan Efikasi
4	Estimasi Umur Pakai (L_{70})	-	±12.000 jam (~ 2,7 thn)	50.000 jam (~ 11,4 thn)	50.000 jam (~ 11,4 thn)	4,2 × Lebih Awet
B Performa Pencahayaan						
5	Illuminansi Rata-rata (E_{avg})	≥ 22,00 lux (SNI 7391:2008)	15,57 lux	34,19 lux (Lumen)	49,50 lux	Memenuhi Standar
6	Illuminansi Minimum (E_{min})	≥ 22,00 lux (SNI 7391:2008)	2,60 lux (Titik T3.6)	24,34 lux (Point)	25,00 lux	Memenuhi Standar
7	Illuminansi	-	65,50 lux (Titik)	-	141,00 lux	Terpusat di

	Maksimum (E_{max})		T4.4)			Bawah Tiang
8	Keseragaman Cahaya ($U_o = \frac{E_{min}}{E_{avg}}$)	$\geq 0,25$ (IES RP-20)	0,167	-	0,51	Memenuhi Standar
C	Energi & Dampak Lingkungan					
9	Total Daya Terpasang Sistem	-	19,50 kW	16,37 kW	16,16 kW	Efisiensi Daya 17,12%
10	Konsumsi Energi Harian (12 jam)	-	234,00 kWh/hari	196,42 kWh/hari	193,94 kWh/hari	Penghematan 40,06 kWh/hari
11	Konsumsi Energi Tahunan	-	85.410,00 kWh/tahun	71.691,84 kWh/tahun	70.787,81 kWh/tahun	Hemat 14.622,19 kWh
12	Estimasi Emisi CO ₂ Tahunan	-	74.306,70 kg CO ₂	62.371,90 kg CO ₂ /tahun	61.585,39 kg CO ₂ /tahun	Reduksi 12,72 ton CO ₂ /tahun

Pembahasan

Pembahasan ilmiah ini menelaah keterkaitan antara hasil temuan empiris di lapangan dengan konsep dasar fotometri, kriteria standar penerangan area luar ruangan (*outdoor lighting*), serta dampaknya terhadap efisiensi energi dan keberlanjutan operasional bandar udara. Temuan awal menunjukkan bahwa kondisi penerangan *carpark* Terminal 1 Bandar Udara Internasional Juanda berada dalam tingkat yang memprihatinkan, di mana iluminansi rata-rata eksisting hanya 15,57 lux dan *overall uniformity* 0,167. Ketiadaan keterpenuhan standar SNI 7391:2008 (≥ 22 lux) dan IES RP-20 ($\geq 0,25$) ini secara fundamental disebabkan oleh fenomena *under-lighting* akibat hanya terpasangnya 2–3 lumener per tiang dari kapasitas 6 soket yang tersedia. Ketidaklengkapan lumener tersebut memaksa fluks cahaya yang dihasilkan menanggung beban cakupan area seluas 28.730 m² yang tidak proporsional dengan kapasitas armatur terpasang. Selain itu, penggunaan kombinasi dua jenis teknologi lampu berbeda—Metal Halide Philips HPI-T 1000 W dan LED Panasonic 480 W—menciptakan ketidakseragaman distribusi spektrum dan sudut pemancaran cahaya di lapangan. Hal ini sejalan dengan temuan Faizi et al. (2023) pada fasilitas parkir Candi Borobudur, di mana penurunan jumlah titik lampu secara drastis berdampak langsung pada terdegradasinya iluminansi hingga jauh di bawah batas minimum SNI.

Ketidakmerataan penerangan yang ekstrem ($U_o = 0,167$) dengan rasio kontras mencapai 25: 1 antara titik terterang (65,50 lux) dan titik tergelap (2,60 lux) menimbulkan risiko keselamatan kerja dan kenyamanan visual yang signifikan. Secara teori adaptasi visual mata manusia (*dark and light adaptation*), perubahan intensitas cahaya yang mendadak ketika pengemudi atau pejalan kaki berpindah dari area terang di bawah tiang menuju area gelap di antara dua tiang (*pitch* 75 m) akan memicu efek *transient adaptation luminance* (TAL) atau penurunan visibilitas sesaat. Fenomena ini memperlambat waktu reaksi pengemudi terhadap hambatan (*obstacle*) di jalur parkir serta menyembunyikan titik-titik buta (*dark spot*) yang berpotensi meningkatkan risiko kecelakaan lalu lintas darat maupun gangguan keamanan di kawasan aerodrome. Penggunaan lampu konvensional HPI-T 1000 W juga terbukti sangat tidak efisien; dengan efikasi cahaya yang hanya sebesar 83 lm/W, sebagian besar energi listrik dikonversikan menjadi energi panas (*thermal losses*), yang mempercepat depresiasi lumen lumener serta mempersingkat umur pakainya (± 12.000 jam).

Penerapan skenario usulan menggunakan 48 unit lumener Philips ClearFlood gen2 BVP656 LED 341W secara teknis terbukti berhasil menyelesaikan permasalahan defisit pencahayaan tersebut. Peningkatan iluminansi rata-rata menjadi 34,19 lux pada *Metode Lumen* dan 49,50 lux pada simulasi *DIALux evo* menunjukkan adanya margin keselamatan (*safety margin*) yang sangat memadai untuk mengantisipasi penurunan fluks cahaya akibat faktor penuaan lampu (*lamp lumen depreciation*) dan akumulasi debu lingkungan (*luminaire*

dirt depreciation). Kunci utama dari meratanya distribusi cahaya pada skenario usulan ini terletak pada penggunaan karakteristik optik *Asymmetrical Medium Beam* (A35-MB) pada lumener BVP656. Optik asimetris ini secara khusus dirancang untuk memproyeksikan berkas cahaya memanjang ke depan dan ke samping, sehingga fluks cahaya tidak menumpuk tepat di bawah tiang, melainkan terdistribusi menjangkau area tengah antartiang. Validasi *Metode Titik* di titik kritis yang menghasilkan iluminansi superposisi sebesar 24,34 lux serta nilai *minimum illuminance* simulasi sebesar 25,00 lux mengonfirmasi bahwa seluruh permukaan *carpark* menerima pencahayaan yang melampaui standar 22 lux tanpa ada *dark spot* tersisa.

Peningkatan *overall uniformity* dari 0,167 menjadi 0,51 pada skenario usulan memperkuat argumen bahwa kualitas pencahayaan tidak hanya ditentukan oleh besarnya daya lampu, melainkan oleh presisi distribusi fotometrik dan ketercukupan konfigurasi fisik. Nilai $U_o = 0,51$ ini berarti tingkat iluminansi terendah di lapangan mencapai 51% dari nilai rata-ratanya, yang melebihi dua kali lipat syarat minimum IES RP-20 ($\geq 0,25$). Kontur warna yang kontinu pada grafik *false colour* DIALux evo membuktikan eliminasi kontras terang-gelap yang tajam, sehingga menciptakan lingkungan penglihatan yang nyaman (*visual comfort*) dan mendukung kinerja adaptasi mata pengguna fasilitas bandara di malam hari. Temuan ini selaras dengan metodologi terpadu yang diterapkan Irmawanto et al. (2024), di mana validasi silang antara perhitungan matematis dan simulasi fotometrik 3D memberikan gambaran sebaran kuat penerangan yang presisi sesuai kondisi nyata.

Dari aspek konservasi energi dan lingkungan, penggantian sistem ke lumener LED Philips BVP656 menghasilkan efisiensi daya terpasang sebesar 17,12% (menurun dari 19,50 kW menjadi 16,16 kW). Fenomena di mana jumlah lumener meningkat dua kali lipat (23 unit menjadi 48 unit) namun total daya justru menurun dapat dijelaskan oleh tingginya efikasi LED BVP656 yang mencapai 153,1 lm/W—hampir dua kali lipat dari efikasi Metal Halide HPI-T (83 lm/W). Hal ini memperkuat kajian Husnayain et al. (2023) mengenai keunggulan teknologi LED dalam mengonversi energi listrik menjadi fluks cahaya tampak secara optimal. Penghematan energi sebesar 14.622,19 kWh/tahun memberikan dampak ekonomi berupa penurunan biaya tagihan listrik operasional bandara, sekaligus mendukung pencapaian *Eco-Green Airport* melalui reduksi emisi karbon tidak langsung sebesar 12,72 ton CO₂/tahun berbasis faktor emisi PLN 0,87 kg CO₂/kWh.

Selain manfaat teknis dan lingkungan, skenario usulan memberikan keuntungan operasional dan keselamatan kerja yang sangat nyata bagi pengelola bandara. Tiang *High Mast* setinggi 21 meter membutuhkan prosedur pemeliharaan tingkat tinggi (*high-risk work*) yang melibatkan alat berat *Mobile Elevated Work Platform* (MEWP) serta pengamanan area parkir yang kompleks. Dengan umur pakai LED Philips BVP656 yang mencapai 50.000 jam (~ 11,4 tahun operational pada kriteria L_{70}), frekuensi pekerjaan pemeliharaan dapat ditekan hingga 4,2 kali lebih jarang dibandingkan penggunaan lampu HPI-T yang memiliki umur pakai ± 12.000 jam (~ 2,7 tahun). Penurunan frekuensi penggantian lampu ini secara signifikan memangkas biaya pemeliharaan (*maintenance cost*), memperkecil potensi gangguan lalu lintas parkir, serta meminimalkan risiko kecelakaan kerja di ketinggian bagi teknisi kelistrikan bandara. Dengan demikian, perancangan ulang sistem penerangan ini terbukti memberikan solusi komprehensif yang mendukung pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya Goal 7 (*Affordable and Clean Energy*), Goal 9 (*Industry, Innovation, and Infrastructure*), dan Goal 13 (*Climate Action*).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengukuran kondisi eksisting, kalkulasi matematis, simulasi fotometrik berbasis DIALux evo, serta analisis efisiensi energi, dapat disimpulkan bahwa sistem penerangan *carpark* Terminal 1 Bandar Udara Internasional Juanda pada kondisi

eksisting belum memenuhi standar SNI 7391:2008 dan IES RP-20, dengan iluminansi rata-rata sebesar 15,57 lux dan *overall uniformity* 0,167. Ketidacukupan penerangan ini merupakan dampak dari keterbatasan jumlah lumener terpasang (hanya 2–3 unit per tiang dari kapasitas 6 soket) serta penggunaan kombinasi teknologi lampu yang berbeda. Perancangan ulang menggunakan 48 unit lumener LED Philips ClearFlood gen2 BVP656 berdaya 341 W (6 unit per tiang *High Mast*) terbukti secara teknis mampu mengatasi permasalahan tersebut dengan menghasilkan *average illuminance* sebesar 49,50 lux, *minimum illuminance* sebesar 25,00 lux, dan *overall uniformity* sebesar 0,51—seluruhnya melampaui kriteria minimum yang dipersyaratkan. Selain meningkatkan kualitas pencahayaan dan mengeliminasi area gelap (*dark spot*), skenario usulan ini berhasil menurunkan total daya terpasang dari 19,50 kW menjadi 16,16 kW (efisiensi daya 17,12%), menghemat konsumsi energi listrik sebesar 14.622,19 kWh/tahun, serta mereduksi emisi karbon tidak langsung sebesar 12,72 ton CO₂/tahun. Penggunaan lumener LED dengan umur pakai 50.000 jam (~ 11,4 tahun) juga terbukti menekan frekuensi pekerjaan pemeliharaan berisiko tinggi di ketinggian 21 meter hingga 4,2 kali lebih jarang dibanding kondisi eksisting. Novelty atau kebaruan dari penelitian ini terletak pada formulasi skenario standarisasi penerangan *high mast* aerodrome yang terbukti mampu meningkatkan kualitas pencahayaan sekaligus menurunkan konsumsi daya dan emisi karbon secara signifikan. Keterbatasan dalam penelitian ini adalah belum diperhitungkannya kelayakan secara finansial yang mendalam, sehingga saran untuk penelitian selanjutnya adalah melakukan analisis keekonomian melalui *Life Cycle Cost*, *Net Present Value*, serta menguji potensi integrasi sistem pencahayaan pintar (*smart lighting*) berbasis sensor untuk optimalisasi efisiensi energi lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. (2001). *SNI 03-6575:2001: Tata Cara Perancangan Sistem Pencahayaan Buatan pada Bangunan Gedung*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008). *SNI 7391:2008: Spesifikasi Penerangan Jalan di Kawasan Perkotaan*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 7062:2019: Pengukuran Intensitas Pencahayaan di Tempat Kerja*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). *SNI 6197:2020: Konservasi Energi pada Sistem Pencahayaan*. Badan Standardisasi Nasional.
- Boyce, P. R. (2014). *Human Factors in Lighting* (3rd ed.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/b16707>
- Edi, J., & Rahayu, E. (2024). Analisa Rancangan Penerangan Parkir Dengan Menggunakan Energi Tenaga Surya. *Jurnal Inovator*, 7(1), 47–52.
- Faizi, A., Hidayat, N., & Prasetyo, B. (2023). Evaluasi Penerangan Tempat Parkir Terbuka (Outdoor) pada Wisata Candi Borobudur. *Jurnal Teknik Elektro dan Vokasional*, 9(2), 115–122.
- Fitriani, S. B., & Azmi, M. R. (2021). Analisis Sistem Penerangan Pada Puskesmas Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI). *Jurnal Teknik Elektro*, 1(1), 12–17.
- Gunawan, S., Martadinata, R. E., & Kunci, K. (2020). Studi Penggunaan Lampu LED untuk Efisiensi pada Pencahayaan. *Ejournal Kajian Teknik Elektro*, 1(2), 105–112.
- Husnayain, F., Himawan, D. S., Utomo, A. R., Ardita, I. M., & Sudiarto, B. (2023). Analisis Perbandingan Kinerja Lampu LED, CFL, dan Pijar pada Sistem Penerangan Kantor. *Jurnal Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan*, 6(1), 25–34.
- Illuminating Engineering Society. (2016). *IES RP-20-14: Recommended Practice for Lighting Parking Facilities*. Illuminating Engineering Society.



- International Civil Aviation Organization. (2022). *Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation: Aerodromes - Volume I: Aerodrome Design and Operations* (9th ed.). ICAO.
- Irmawanto, A., Suprianto, A., & Hermawan, Y. (2024). Analisis dan Evaluasi Intensitas Pencahayaan pada Lapangan Stadion Gelora Bung Tomo Surabaya. *Jurnal Teknik Elektro dan Ketenagalistrikan*, 11(1), 45–56.
- Isnaini, V. A., Wirman, R. P., & Wardhana, I. (2015). Karakteristik dan Efisiensi Lampu Light Emitting Diode (LED) sebagai Lampu Hemat Energi. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 11(3), 135–142.
- Kusumayogo, E. (2019). Analisis Teknis dan Ekonomis Penerapan Penerangan Jalan Umum Solar Cell di Jalan Tol Darmo Surabaya. *Jurnal Teknik Elektro*, 8(2), 101–108.
- Nazir, M. (2011). *Metode Penelitian*. Ghalia Indonesia.
- Nugraha, K. B. R. A. (2026). *Analisis Pencahayaan Lampu Pada Sistem Penerangan Carpark Terminal 1 Sesuai Standar di Bandar Udara Internasional Juanda* [Tugas Akhir, Politeknik Penerbangan Indonesia Curug].
- Parera, L. M., Tupan, H. K., & Pattiradjawane, V. (2018). Pengaruh Intensitas Penerangan pada Laboratorium dan Bengkel Jurusan Teknik Elektro. *Jurnal Simetrik*, 8(1), 60–67.
- Schubert, E. F. (2006). *Light-Emitting Diodes* (2nd ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511790546>
- Sugiyono. (2019). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan R&D*. Alfabeta.