

Evaluasi Kuat Penerangan Berbasis ICAO Annex 14 Pada Runway Bandara Udara Internasional Juanda Surabaya

Muhammad Rhajiev Dzaky Al Hafizh Ersada, Muhamad Haddin

Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung
Jl. Kaligawe Raya No. Km. 04, Kota Semarang, Jawa Tengah 50112, Indonesia
email: rhajieve@gmail.com

Abstract — This study discusses the evaluation of the runway lighting system of an International Airport. The model is defined as a runway with a runway length and width. The parameters determined are: type of lamp, distance between lamps, color and direction of light, light intensity level, lamp placement layout, and cable resistance value. The evaluation is carried out through analysis of load impedance per point, total system impedance, voltage drop, and lighting intensity (lux) at critical observation points. The method used is quantitative: analyzing numerical data such as the calculation of light intensity (lux and candela), electrical power (watts), voltage (volts) and cable resistance. Qualitative method: evaluating non-technical aspects and supporting measurement results, such as the operation of the lighting system, the role of Air Traffic Control (ATC) in controlling brightness levels and environmental influences. The results show that the impedance value is 156.8 Ω , the total system voltage reaches +1035 V for a current of 6.6 A, and the cable current density is 1.1 A/mm², far below the safe limit (20 A/mm²), these results indicate that the system value is still working within very safe thermal limits in accordance with airport lighting safety standards and ICAO Annex 14 provisions.

Abstrak – Penelitian ini membahas tentang evaluasi sistem penerangan runway Bandar Udara Internasional. Model ditentukan sebagai sebuah runway dengan panjang landasan dan lebar landasan. Parameter yang ditentukan: jenis lampu, jarak antar lampu, warna dan arah cahaya, tingkat intensitas cahaya, layout penempatan lampu, dan nilai tahanan kabel. Evaluasi dilakukan melalui analisis impedansi beban per titik, impedansi total sistem, drop tegangan, dan kuat pencahayaan (lux) pada titik pengamatan kritis. Metode yang dilakukan adalah kuantitatif: menganalisa data numerik seperti perhitungan intensitas cahaya (lux dan candela), daya listrik (watt), tegangan (volt) dan resistansi kabel. Metode kualitatif: mengevaluasi aspek non-teknis dan mendukung hasil pengukuran, seperti pengoperasian sistem penerangan, peran Air Traffic Control (ATC) dalam pengendalian brightness level dan pengaruh lingkungan. Hasil menunjukkan bahwa nilai impedansi 156,8 Ω , tegangan total sistem mencapai +1035 V untuk arus 6,6 A, dan rapat arus kabel sebesar 1,1 A/mm², jauh di bawah batas aman (20 A/mm²), hasil ini menunjukkan bahwa nilai sistem masih berkerja dalam batas termal yang sangat aman sesuai dengan standar keselamatan penerangan bandar udara dan ketentuan ICAO Annex 14.

Kata Kunci–Kuat penerangan runway, ICAO Annex 14, Bandar Udara Juanda.

*) penulis korespondensi: Muhammad Rhajiev Dzaky
Email: rhajieve@gmail.com

Muhammad Rhajiev Dzaky: Evaluasi Kuat Penerangan Runway...

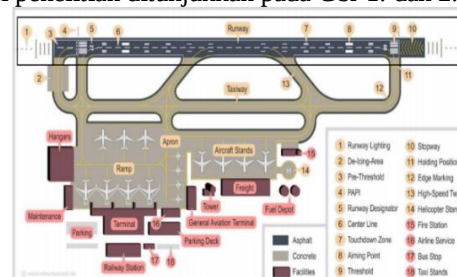
I. PENDAHULUAN

Perkembangan transportasi udara semakin pesat seiring meningkatnya aktivitas ekonomi dan mobilitas masyarakat. Dibanding transportasi lainnya, udara unggul dalam kecepatan, efisiensi, dan jangkauan wilayah. Peningkatan jumlah penumpang dan frekuensi penerbangan mendorong modernisasi infrastruktur pendukung, termasuk sistem penerangan landasan (runway lighting) [1]. Runway lighting adalah komponen vital keselamatan penerbangan, terutama saat visibilitas rendah seperti malam atau cuaca buruk [2]. Pencahayaan yang tidak sesuai standar dapat meningkatkan risiko kecelakaan pesawat, sehingga evaluasi sistem pencahayaan secara berkala menjadi penting untuk memastikan keandalan dan kesesuaiannya terhadap standar internasional. Salah satu acuan utama evaluasi ini adalah ICAO Annex 14 Volume I [3], yang mengatur tata letak, intensitas, warna cahaya, dan konfigurasi kelistrikan sistem lampu. Namun, implementasinya di lapangan dapat terpengaruh oleh kondisi teknis dan lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi berbasis data aktual guna mengetahui kesesuaian sistem dengan standar yang berlaku. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi teknis sistem penerangan runway di Bandara Internasional Juanda Surabaya, dengan fokus pada analisis impedansi sistem, drop tegangan, dan kuat pencahayaan (lux) pada titik pengamatan kritis saat final approach. Data diperoleh dari dokumen teknis, observasi lapangan, dan literatur standar. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam upaya peningkatan keselamatan dan keandalan sistem penerangan bandara.

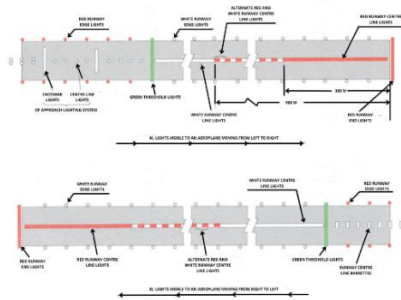
II. METODE PENELITIAN

A. Model Penelitian

Evaluasi sistem penerangan runway memerlukan sejumlah parameter teknis utama, seperti jenis dan daya lampu, jarak antar titik lampu, konfigurasi kelistrikan, serta standar intensitas cahaya yang ditetapkan oleh ICAO Annex 14 Volume I [3]. Model penelitian ini bersifat evaluatif teknis, dengan fokus pada perhitungan impedansi per titik, impedansi total sistem, drop tegangan, serta kuat pencahayaan (lux) pada titik pengamatan kritis. Model penelitian ditunjukkan pada Gbr 1. dan 2.



Gbr 1. Model Penelitian: Site Plan Runway



Gbr 2. Model Penelitian Layout Runway

Intensitas Cahaya adalah jumlah energi radiasi yang dipancarkan sebagai cahaya ke suatu titik tertentu [4], dengan rumus ditunjukkan dalam bentuk persamaan (1).

$$I = \frac{\phi}{\omega} \quad (1)$$

dengan: I = intensitas cahaya (cd), ϕ = fluks cahaya (Lumen), ω = Besar Sudut Ruang Pada Suatu Titik Cahaya.

Selain perhitungan berdasarkan fluks cahaya dan sudut pancaran, intensitas cahaya juga dapat digunakan untuk menghitung kuat lampu pada titik tertentu [5]. Hubungan antara intensitas cahaya (I) dan kuat lampu (E) dapat dijelaskan dengan hukum kuadrat terbalik, sebagaimana pada persamaan (2).

$$E = \frac{I}{r^2} \quad (2)$$

dengan: I : intensitas cahaya (candela, cd) E : kuat lampu (lux) r : Jarak titik pengamatan ke sumber cahaya (m).

1. Resistor

Resistor mempunyai nilai resistansi (tahanan) tertentu yang dapat memproduksi tegangan listrik diantara kedua pin dimana nilai tegangan terhadap resistansi tersebut berbanding lurus dengan arus yang mengalir berdasarkan persamaan hukum Ohm [6], seperti pada persamaan (3).

$$R = \frac{V}{I} \text{ atau } V = I \cdot R \quad (3)$$

dengan: V = beda potensial, dinyatakan dalam Volt (V), I = Kuat arus listrik, dinyatakan dalam ampere (A), R = hambatan listrik, dinyatakan dalam ohm (Ω).

2. Cahaya

Cahaya adalah suatu gejala fisis yang disebabkan oleh suatu sumber cahaya yang memancarkan suatu energi, dan sebagian energi merubah menjadi cahaya tampak. Perambatan pada cahaya pada ruang bebas 3×10^8 per detik dilakukan oleh gelombang-gelombang elektromagnetik [7], dalam bentuk persamaan (4).

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (4)$$

dengan: λ = panjang gelombang (m), v = Kecepatan Gelombang (m/s), f = Frekuensi Gelombang (Hz).

3. Kabel

Perancangan sistem kelistrikan *runway lighting*, penting juga mengevaluasi tahanan kabel, drop tegangan, dan impedansi sistem, baik per titik maupun secara keseluruhan. Salah satu langkah awal dalam evaluasi tersebut adalah menentukan panjang total kabel pada sistem [8]. Total panjang kabel dalam sistem *runway lighting* dihitung berdasarkan jumlah titik lampu dikalikan dengan panjang kabel per titik [9], seperti pada persamaan (5).

$$L = n \times l \quad (5)$$

dengan: L = panjang total kabel (m), n = jumlah titik lampu, l = panjang kabel per titik (m)

Setelah diketahui panjang kabel total, maka dapat dilakukan perhitungan nilai tahanan kabel. Nilai tahanan kabel akan memengaruhi drop tegangan dan performa sistem secara keseluruhan. Nilai tahanan kabel dihitung menggunakan rumus pada persamaan (6).

$$R = \frac{l}{1000} \times \rho \quad (6)$$

dengan: l = panjang kabel per titik (60 m), ρ = tahanan jenis kabel FLYCY (2,97 Ω/km)

Selanjutnya, drop tegangan resistif yang terjadi akibat aliran arus dapat dihitung dengan hukum Ohm pada persamaan (7).

$$V_R = I \times R \quad (7)$$

dengan: I = arus nominal (6,6 A), V_R = drop tegangan resistif (V)

Karena sistem *runway lighting* menggunakan isolating transformer, maka drop tegangan total per titik dihitung dengan menggunakan metode *Pythagoras*, menggabungkan komponen resistif dan induktif [9]. Untuk rumus drop tegangan dapat dilihat pada persamaan (8).

$$V_{total} = \sqrt{V_R^2 + V_L^2} \quad (8)$$

dengan: V_{total} = drop tegangan pada isolating transformer (17,5 V)

Jika total drop tegangan dan arus sudah diketahui, maka dapat dihitung nilai impedansi total sistem dengan menggunakan persamaan (9).

$$Z_{total} = \frac{V_{total}}{I} \quad (9)$$

dengan: Z_{total} = impedansi sistem (Ω), V_{total} = total tegangan sistem (V), I = impedansi sistem (Ω)

B. Data Penelitian

Data teknis sistem penerangan *runway* Bandar Udara Internasional Juanda Surabaya yang meliputi spesifikasi runway, spesifikasi lampu, paramter, dan fluks cahaya yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 1 sampai dengan 4.

Tabel 1. Spesifikasi Runway

Panjang Landasan	3000 Meter
Lebar Landasan	45 Meter
Luas Apron	118.161 m ² (114 m x 1036,5 m)
Luas Taxiway	161.108,4 m ²

Tabel 2. Spesifikasi Lampu

Red Runway Edge	50 meter
Red Runway Centre Line Lights	300 meter
White Runway Edge	50 meter
White Runway Centre Line Lights	90 meter
Centre Line Lights	30-60 meter
Crossbar Lights	2,7 meter
Runway Edge Lights	6 meter
High Intensity	100 Watt, 150 Watt, dan 200 Watt
Medium Intensity	45 – 100 Watt
Low Intensity	30 – 45 Watt

Tabel 3. Parameter Teknis Sistem Pencahayaan Runway

Parameter	Nilai
Jenis lampu	Lampu pijar 100 watt
Jumlah titik lampu	82 buah
Jarak antar lampu	±60 meter

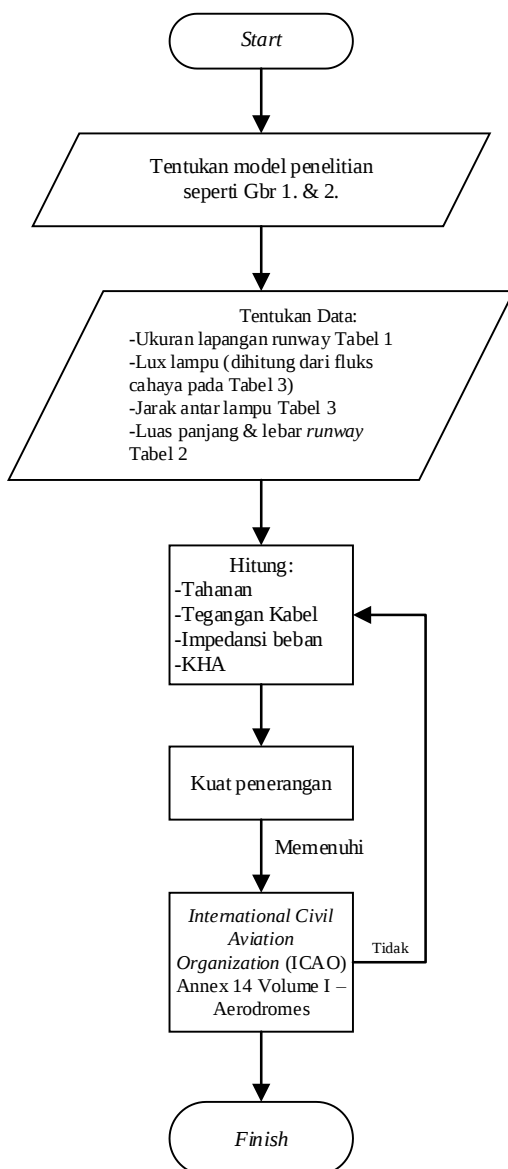
Jarak pandang pengamatan (r)	2.000 meter
Sudut pancaran cahaya (ω)	4π steradian

Tabel 4. Fluks Cahaya Tiap Step *Brightness*

Step <i>Brightness</i>	Fluks Cahaya (Φ) – lumen
5	1.380
4	1.090,2
3	855,6
2	717,6
1	579,6

C. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Bandar Udara Internasional Juanda Surabaya, yang terletak di Kecamatan Sedati, Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur. Fokus evaluasi dilakukan pada *Runway 10/28* sebagai landasan utama yang dilengkapi sistem penerangan untuk mendukung operasional malam hari dan kondisi cuaca terbatas. Alur kegiatan penelitian ditunjukkan pada Gbr 3.



Gbr 3. Flowchart Penelitian

III. HASIL DAN ANALISIS

Evaluasi sistem lampu runway di Bandara Internasional Juanda Surabaya dilakukan untuk menilai kesesuaian teknis terhadap standar ICAO Annex 14 Volume I.

1. Impedansi per Titik Beban

Berdasarkan model penelitian yang ditampilkan pada Gambar 3.1 dan 3.2, serta data teknis terkait sistem penerangan runwa yang meliputi ukuran lapangan runway Tabel 1, lebar runway Tabel 2, jarak antar lampu Tabel 3 dan *lux* lampu Tabel 4. Untuk memulai perhitungan, diketahui bahwa panjang kabel dari sumber ke satu titik lampu adalah 60 meter.

Jenis kabel yang digunakan adalah FLYCY, dengan tahanan jenis (ρ) sebesar $2,97 \Omega/\text{km}$. Berdasarkan data tersebut, maka tahanan kabel per titik dapat dihitung menggunakan rumus dasar tahanan konduktor pada persamaan (6).

$$R = \frac{60}{1000} \times 2,97 = 0,1782 \Omega$$

Dengan arus nominal sistem sebesar 6,6 Ampere (standar sistem CCR), maka drop tegangan akibat tahanan kabel dihitung dengan rumus di persamaan (7)

$$V_R = 6,6 \times 0,1782 = 1,1761 \text{ V}$$

Selain resistansi kabel, sistem juga mengalami penurunan tegangan dari trafo isolasi sebesar 17,5 Volt. Karena penurunan tegangan berasal dari kombinasi elemen resistif dan induktif, maka total drop tegangan pada satu titik dihitung dengan rumus *Pythagoras* persamaan (8):

$$\begin{aligned} V_{\text{total}} &= \sqrt{(1,1761)^2 + (17,5)^2} \\ &= \sqrt{1,383 + 306,25} \\ &= \sqrt{307,633} \approx 17,54 \text{ V} \end{aligned}$$

Berdasarkan nilai tegangan total tersebut, impedansi per titik beban dapat dihitung menggunakan persamaan (7).

$$Z = \frac{V_{\text{total}}}{I} = \frac{17,54}{6,6} \approx 2,657 \Omega$$

Impedansi sebesar $2,657 \Omega$ ini mengindikasikan bahwa beban pada satu titik berada dalam kategori rendah hingga sedang untuk sistem konfigurasi seri dengan trafo.

2. Analisis Impedansi Total

Selanjutnya dilakukan analisis terhadap impedansi sistem secara keseluruhan. Perhitungan ini didasarkan pada rumus-rumus yang telah dijelaskan pada Persamaan Evaluasi Sistem, yaitu Persamaan (5), (3), dan (8), yang menjadi acuan utama dalam evaluasi ini. Tujuan dari analisis ini adalah untuk memastikan bahwa *Constant Current Regulator* (CCR) dapat berfungsi secara optimal dalam menyuplai seluruh beban lampu yang terpasang di landasan pacu. Jumlah titik lampu yang digunakan dalam sistem mencapai 59 unit, di mana masing-masing dihubungkan menggunakan kabel sepanjang 60 meter, maka panjang total kabel adalah:

$$L = 59 \times 60 = 3540 \text{ m} = 3,54 \text{ km}$$

Dengan resistivitas kabel sebesar $2,97 \Omega/\text{km}$, maka total resistansi kabel dapat dihitung sebagai berikut:

$$R_{\text{kabel}} = 2,97 \times 3,54 = 10,51 \Omega$$

Arus sistem dijaga tetap pada 6,6 A oleh CCR. Sehingga, tegangan jatuh pada kabel adalah:

$$V_{\text{kabel}} = 6,6 \times 10,51 = 69,37 \text{ V}$$

Untuk menghitung tegangan total sistem, digunakan Persamaan (8):

$$V_{\text{total}} = \sqrt{(1032,5)^2 + (69,37)^2} \approx \sqrt{1066056,25 + 4812,5}$$

Dengan mengetahui total tegangan dan arus, maka impedansi

total sistem dihitung dengan Persamaan (9):

$$Z_{\text{total}} = \frac{1035}{6,6} \approx 156,82 \, \Omega$$

Nilai impedansi total sebesar 156,82 Ω menunjukkan bahwa sistem berada mendekati batas operasional dari CCR Siemens 6SF 402, yang memiliki kapasitas output hingga 6,6 kVA dan dirancang untuk beroperasi pada sistem dengan impedansi tinggi. Nilai ini masih dianggap dalam batas aman, namun memiliki ruang toleransi yang cukup sempit.

Dalam sistem kelistrikan lampu aerodrome, *Constant Current Regulator* (CCR) berperan menjaga arus tetap stabil meskipun tegangan output bervariasi sesuai beban [10]. Semakin besar impedansi, semakin tinggi tegangan yang dibutuhkan untuk mempertahankan arus, dan jika melebihi batas desain, CCR berisiko mengalami *overload*, *overvoltage*, atau kerusakan modul *sensing* [11]. Oleh karena itu, perlu dilakukan inspeksi sambungan kabel, pengukuran impedansi berkala, perawatan trafo isolasi, serta evaluasi teknis sebelum menambah titik lampu. Menjaga impedansi dalam batas aman memastikan kestabilan pencahayaan yang penting untuk keselamatan penerbangan, terutama saat visibilitas rendah.

3. Kesesuaian Impedansi Sistem dengan Standar ICAO Annex 14 dan Kapabilitas CCR

Berdasarkan hasil perhitungan, impedansi total sistem mencapai sekitar 156,8 Ω , masih berada dalam batas kemampuan operasi CCR Siemens 6SF 402, yang memang dirancang untuk menangani sistem pencahayaan dengan impedansi tinggi pada runway. CCR ini memiliki kapasitas daya 6,6 kVA dan mendukung pengaturan arus dalam beberapa level, mulai dari 2,8 A hingga 6,6 A. Spesifikasi ini sesuai dengan ketentuan ICAO Annex 14 Volume I, yang mengatur bahwa sistem kelistrikan harus mampu:

- Menyediakan pengaturan intensitas pencahayaan secara bertingkat (*multi-step*),
- Menjamin keandalan sistem penerangan pesawat saat cuaca buruk atau jarak pandang terbatas, serta
- Mengurangi kehilangan daya dan tegangan jatuh.

Desain sistem menggunakan konfigurasi seri tertutup dengan trafo isolasi di setiap lampu, sehingga sistem tetap dapat beroperasi secara stabil meskipun salah satu lampu mengalami gangguan, serta memastikan intensitas pencahayaan tetap merata di seluruh landasan. Oleh karena itu, sistem kelistrikan landasan pacu di Bandara Juanda dapat dinyatakan layak secara teknis dan telah memenuhi standar ICAO Annex 14 dari sisi daya, arus, hingga aspek keamanannya.

4. Analisis Performa CCR pada Variasi Beban

Dalam kondisi ideal, CCR menjaga arus tetap konstan sambil menyesuaikan tegangan sesuai kebutuhan beban. Namun, faktor eksternal seperti korosi pada sambungan kabel dan peningkatan resistansi lingkungan dapat memengaruhi kinerjanya. Dalam satu sistem yang memiliki 59 lampu dengan dua sambungan per titik, maka total resistansi akibat korosi dapat dihitung menggunakan rumus yang ada pada bab 2 pada persamaan (3).

$$R_{\text{total}} = 2 \times 59 \times 0,25 = 29,5 \, \Omega$$

CCR tetap mempertahankan arus 6,6 A, namun beban daya naik signifikan. Berdasarkan rumus daya pada persamaan 2.6.

$$P = I^2 \times R = (6,6)^2 \times 29,5 = 1285,56 \, \text{Watt}$$

Peningkatan daya sebesar $\pm 1,29 \, \text{kW}$ menyebabkan total beban

meningkat dari kondisi normal, yaitu:

- Beban normal sistem

$$P = 59 \times 100 \, \text{Watt} = 5900 \, \text{Watt}$$

- Beban total sistem

$$P_{\text{total}} = 5900 + 1285,56 = 7185,56 \, \text{Watt}$$

Beban ini melebihi kapasitas trafo 6,6 kVA, sehingga berisiko *overload*. Selain daya, tegangan juga meningkat akibat resistansi sebagai mana pada persamaan (3):

$$V = 6,6 \times 29,5 = 194,7 \, \text{Volt}$$

Tegangan tinggi akan masuk ke sistem sensing CCR, menyebabkan tegangan *input* sensing transformer naik drastis. Hal ini berpotensi merusak komponen internal seperti SCR, *squaring block*, *inverting circuit*, dan *multisensing module*. Hal ini juga menunjukkan bahwa meskipun CCR bekerja sesuai spesifikasi, kondisi instalasi yang buruk dapat mendorong sistem bekerja di luar desain dan mempercepat kerusakan.

5. Analisis Perhitungan Intensitas Cahaya

Nilai intensitas cahaya dalam satuan candela (cd) dihitung berdasarkan Persamaan 1 pada sub bab B. Persamaan Evaluasi Sistem, perhitungan menggunakan data fluks cahaya (lumen) untuk setiap level pencahayaan (*step*), dan hasilnya disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Perhitungan Intensitas Cahaya

Step	Φ (lumen)	$I = \frac{\Phi}{4\pi r^2}$ (cd)
5	1380	$\frac{1380}{12,566} = 109,8$
4	1090,2	$\frac{1090,2}{12,566} = 86,8$
3	855,6	$\frac{855,6}{12,566} = 68,1$
2	717,6	$\frac{717,6}{12,566} = 57,1$
1	579,6	$\frac{579,6}{12,566} = 46,1$

6. Analisis Perhitungan Kuat Penerangan

Dalam simulasi ini, digunakan jarak pengamatan 2000 meter sebagai parameter representatif untuk pendekatan akhir (*final approach*) pada kondisi visual normal. Jarak ini mengacu pada standar ICAO Annex 14, yang menyebutkan bahwa dalam kondisi visual baik, jarak pandang horizontal pilot terhadap *runway* berkisar antara 1800–2400 meter, tergantung cuaca, topografi, dan konfigurasi pencahayaan. Pemilihan jarak 2000 meter digunakan sebagai pendekatan konservatif untuk mengevaluasi efektivitas sistem pencahayaan dalam memberikan panduan visual. Kuat penerangan dihitung dalam *lux*, menggunakan hukum pencahayaan berdasarkan persamaan (2).

Tabel 6. Hasil Perhitungan Kuat Lampu (*Lux*)

Step	I (cd)	$E = \frac{I}{r^2}$ (lux)
5	109,8	$\frac{109,8}{4 \times 10^6} = 27,4 \times 10^{-5}$
4	86,8	$21,7 \times 10^{-5}$
3	68,1	17×10^{-5}
2	57,1	$14,3 \times 10^{-5}$
1	46,1	$11,5 \times 10^{-5}$

7. Analisis Evaluasi Intensitas Cahaya terhadap Standar

ICAO Annex 14

ICAO Annex 14 tidak menentukan nilai pasti intensitas cahaya dalam candela (cd), melainkan membaginya ke dalam tiga kategori:

- HIRL (*High Intensity*): >10.000 cd, digunakan di bandara besar.
- MIRL (*Medium Intensity*): 1.000–5.000 cd.
- LIRL (*Low Intensity*): <1.000 cd.

Berdasarkan hasil perhitungan kuat lampu (*lux*) (Tabel 5), intensitas lampu runway berkisar antara 46,1 hingga 109,8 cd. Nilai ini masih tergolong rendah dan belum sesuai dengan standar minimum ICAO Annex 14 untuk kategori HIRL maupun MIRL. Perhitungan dilakukan menggunakan asumsi lampu 100 watt, sesuai spesifikasi umum sistem HIRL, namun jenis lampu sebenarnya belum diverifikasi di lapangan. ICAO Annex 14 juga memperbolehkan penyesuaian intensitas berdasarkan faktor-faktor seperti jarak pandang, panjang landasan, dan waktu operasi (siang/malam). Maka dari itu, meskipun simulasi menunjukkan intensitas rendah, diperlukan verifikasi langsung dan kemungkinan peningkatan sistem agar pencahayaan runway mendukung visibilitas pilot secara optimal, khususnya pada malam hari atau cuaca buruk.

8. Analisis Evaluasi Sistem Kelistrikan Lampu Runway: Konfigurasi dan Kesesuaian terhadap Regulasi ICAO Annex 14

Sistem kelistrikan pada lampu landasan pacu (*runway*) memiliki peran vital dalam mendukung keselamatan penerbangan, terutama saat pesawat lepas landas dan mendarat pada kondisi visibilitas rendah. Dua jenis konfigurasi umum digunakan dalam sistem kelistrikan ini, yaitu rangkaian paralel dan rangkaian seri, masing-masing memiliki kelebihan dan keterbatasan yang memengaruhi kualitas pencahayaan, keandalan sistem, dan kemudahan pengaturan.

a) Konfigurasi Paralel

konfigurasi paralel, setiap lampu terhubung langsung ke sumber tegangan dan bekerja secara independen. Jika satu lampu rusak, lampu lain tetap menyala. Meskipun banyak digunakan di instalasi umum seperti perumahan, konfigurasi ini kurang ideal untuk sistem *runway* karena:

- Terjadi penurunan tegangan (*voltage drop*) pada kabel panjang seperti di *runway*, sehingga intensitas cahaya bisa berbeda di tiap titik.
- Intensitas pencahayaan antar lampu tidak seragam, menyebabkan gangguan visual bagi pilot.
- Sulit dikontrol secara terpusat dan real-time, padahal pengaturan pencahayaan perlu disesuaikan dengan kondisi cuaca atau visibilitas.

Dengan kelemahan tersebut, sistem paralel dianggap tidak memenuhi kebutuhan operasional runway yang menuntut stabilitas tinggi.

b) Konfigurasi Seri

Konfigurasi seri menjadi standar dalam sistem pencahayaan runway di bandara internasional, termasuk di Bandara Internasional Juanda. Semua lampu disusun dalam satu jalur arus yang sama, sehingga arus yang mengalir seragam. Konfigurasi ini memberikan keunggulan berikut:

- Intensitas cahaya antar lampu konsisten karena seluruh lampu menerima arus yang sama.
- Sistem dapat dikendalikan menggunakan *Constant Current Regulator (CCR)* untuk menjaga arus tetap stabil (biasanya 6,6 A) meski jumlah lampu aktif

berubah.

- Tingkat pencahayaan dapat disesuaikan dari menara pengawas sesuai kebutuhan operasional.

Untuk mengatasi potensi gangguan akibat kerusakan satu lampu, sistem ini dilengkapi isolating transformer di tiap titik lampu. Fungsi utama transformator ini adalah menjaga kontinuitas arus dan melindungi sistem dari gangguan isolasi atau lonjakan tegangan.

c) Kesesuaian dengan Regulasi ICAO

Sesuai ICAO Annex 14 Volume I, bagian 5.3.17 menyatakan bahwa sistem lampu *runway* harus menggunakan konfigurasi seri dengan CCR dan setiap lampu harus dilengkapi dengan isolating transformer. Implementasi sistem seperti ini di Bandara Juanda telah memenuhi kriteria tersebut, mencakup:

- Kestabilan dan keseragaman pencahayaan di sepanjang lintasan.
- Kemampuan sistem untuk tetap berfungsi meskipun ada kerusakan lokal.
- Kontrol terpusat yang mendukung fleksibilitas operasional.

Berdasarkan hasil analisis teknis dan perhitungan yang dilakukan, sistem kelistrikan runway di Bandara Juanda telah memenuhi aspek penting dalam regulasi ICAO Annex 14, termasuk kestabilan arus, distribusi tegangan, dan performa CCR, namun dari sisi intensitas pencahayaan, sistem saat ini belum mencapai kategori *High Intensity Runway Lighting (HIRL)* yang disyaratkan ICAO Annex 14. Hal ini menunjukkan perlunya verifikasi jenis lampu yang digunakan dan kemungkinan peningkatan sistem untuk mendukung operasi dalam kondisi visibilitas rendah. Sebagai catatan, studi ini tidak membahas secara rinci komponen sistem proteksi seperti *sekring (fuse)* dan kapasitas kabel karena keterbatasan data. Fokus utama diarahkan pada aspek sistem utama yang berdampak langsung pada performa dan keselamatan pencahayaan *runway*.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil evaluasi teknis terhadap sistem pencahayaan landasan pacu di Bandar Udara Internasional Juanda Surabaya, maka dapat disimpulkan:

- Sistem kelistrikan lampu *runway* menggunakan konfigurasi rangkaian seri dengan *isolating transformer* pada setiap titik, yang secara teknis telah sesuai dengan regulasi ICAO Annex 14 Volume I. Konfigurasi ini memungkinkan kestabilan arus 6,6 A dan menjaga intensitas pencahayaan tetap seragam di sepanjang landasan pacu.
- Hasil perhitungan menunjukkan impedansi per titik beban sebesar 2,657 Ω dan impedansi total sistem mencapai 156,82 Ω . Nilai ini masih dalam batas operasional sistem, namun memerlukan pemantauan berkala mengingat kenaikan impedansi akibat faktor lingkungan dapat meningkatkan tegangan dan daya secara signifikan.
- Berdasarkan simulasi intensitas dan kuat penerangan, sistem menghasilkan intensitas maksimum sebesar 109,8 cd dan kuat cahaya sekitar $27,4 \times 10^{-5}$ lux pada jarak 2000 meter. Nilai ini berada di bawah standar minimum kategori *High Intensity Runway Lighting (HIRL)* yang direkomendasikan ICAO, sehingga validasi lebih lanjut terhadap jenis dan kapasitas lampu aktual diperlukan sebagai dasar perbaikan sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ni Komang Diantiari, “Analisis Integrasi Moda Transportasi Online Di-Era Digital Sebagai Upaya Mewujudkan Manajemen Transportasi Udara Yang Berkesinambungan Di Bandar Udara I Gusti Ngurah Rai Bali,” vol. 7, no. 2, pp. 1–23, 2025.
- [2] U. Sabbit, A. Lubis, M. Kona, and R. R. Bunahri, “Sosialisasi Airfield Lighting System (AFL) berbasis Virtual Tour sebagai Alat Bantu Pendaratan Visual di Bandar Udara bagi Siswa SMA / SMK,” vol. 4, pp. 1–8, 2024.
- [3] International Civil Aviation Organization, “Annex 14 - Aerodromes Vol 1: Aerodrome Design and Operations,” *Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation*, vol. I. p. 352, 2022.
- [4] S. Setiyo, C. I. Cahyadi, W. Saputra, R. I. Sudjoko, and F. Faizah, “Analisis Kontrol Dan Monitoring Arus Listrik Ccr Pada Lampu Papi Di Bandar Udara Silangit,” *J. Kumparan Fis.*, vol. 6, no. 2, pp. 133–140, 2023, doi: 10.33369/jkf.6.2.133-140.
- [5] R. A. Yani *et al.*, “Kinerja CCR Terhadap Kuat Penerangan Lampu Landasan Pacu Pesawat di Bandara Sultan Thaha Jambi,” *Jurnal Teknik Elektro, Universitas Palembang*, vol. 7, no. 2. pp. 116–122, 2022.
- [6] D. A. Putri *et al.*, “Analisis Hubungan Tegangan Dan Arus DalamRangkaian Seri Dan Paralel Berdasarkan Hukum Ohm,” *PHYDAGOGIC J. Fis. dan Pembelajarannya*, vol. 7, no. 2, pp. 201–206, 2025, doi: 10.31605/phy.v7i1.4558.
- [7] R. Rahel Rehuella Marpaung, Neng Nenden Mulyaningsih and Sapundani, “Tingkat Akurasi Aplikasi Smart Lux Meter Sebagai Solusi Percobaan Mandiri Pada Pembelajaran Jarak Jauh,” *J. Pendidik. Fis.*, vol. 11, no. 1, p. 1, 2022, doi: 10.24114/jpf.v11i1.25777.
- [8] Destisari Amalia, Hendro Widiarto, and Asep Samanhudi, “Perencanaan Perubahan Konfigurasi Precision Approach Lighting System (PALS) Category I Limited Menjadi Medium Approach Lighting System (MALS) Di Bandar Udara Husein Sastranegara – Bandung,” *Langit Biru J. Ilm. Aviasi*, vol. 13, no. 02, pp. 37–48, 2020, [Online]. Available: <https://www.journal.ppicurug.ac.id/index.php/jurnal-ilmiah-aviasi/article/view/246>
- [9] M. Bahtiar and R. Soebiantoro, “Analisis Tahanan Isolasi Kabel dan Trafo Approach Light pada Runway 35 di Bandar Udara Abdulrachman Saleh,” vol. 01, no. 02, pp. 73–81, 2025.
- [10] R. Tampubolon, H. Lesnussa, and A. Patiran, “Analisa Kelayakan Taxiway Light (Studi Kasus Bandara Rendani Manokwari): Analysis of Feasibility for Taxiway Light (Case Study in Rendani Airport of Manokwari),” *JISTECH J. Inf. Sci. Technol.*, vol. 11, no. x, 2023.
- [11] A. B. Callista and R. R. Mubarak, “Desain Jalur Operasional Tambahan Remote Constant Current Regulator Untuk Peningkatan Pelayanan Suplai Listrik Pada Operasi Penerbangan,” *J. Airpt. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 48–54, 2022, doi: