

Analisis Sistem Kelistrikan Lampu PAPI (*Precision Approach Path Indicator*) Bandar Udara Rendani Manokwari

Analysis of the Electrical System of Precision Approach Path Indicator (PAPI) Lighting at Rendani Airport, Manokwari

Fanly Bawansel¹, Pandung Sarungallo^{2*}, Saiful Ismail³

^{1,2,3}Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Papua, Manokwari, Papua Barat 98314

¹rhaxa420@gmail.com, ²p.sarungallo@unipa.ac.id, ³s.ismail@unipa.ac.id

Info Artikel

Riwayat Artikel:

Diterima 22/07/2026

Direvisi 23/07/2026

Disetujui 25/07/2026

Key Words:

Precision Approach Path Indicator (PAPI)

Constant Current Regulator (CCR)

Airfield Lighting System

Electrical Load Analysis

Light Intensity

Rendani Airport

Kata Kunci:

Precision Approach Path Indicator (PAPI),

Constant Current Regulator (CCR), sistem penerangan

bandar udara, intensitas

cahaya,

Bandara Udara Rendani.

ABSTRACT

The electrical system of the Precision Approach Path Indicator (PAPI) lighting at Rendani Airport, Manokwari, plays a crucial role as a visual navigation aid for aircraft during landing. This study aims to evaluate the performance of the electrical system, analyze the suitability of the Constant Current Regulator (CCR) capacity relative to the actual load, and determine key technical parameters such as power and light intensity. The research employs field observations, technical data collection, and analytical calculations based on measurement results. The findings reveal that the PAPI electrical system operates reliably under existing conditions. The total actual load of PAPI 35 and PAPI 17 is 3.88 kVA, indicating that the 5 kVA CCR operates at 77.6% of its rated capacity, which ensures adequate operational reliability and safety margins. Furthermore, the analysis shows that increasing the CCR current step leads to a rise in lamp power from 28.92 W to 160.38 W and light intensity from 2.86 cd to 28.68 cd. These results emphasize the importance of routine maintenance of the CCR and isolating transformer to sustain consistent system performance. It is recommended to improve the control system between the CCR and the Air Traffic Control (ATC) tower to enhance overall operational efficiency.

ABSTRAK

Sistem kelistrikan Lampu PAPI (*Precision Approach Path Indicator*) di Bandar Udara Rendani, Manokwari, yang merupakan alat bantu navigasi visual vital untuk pendaratan. Tujuan penelitian adalah mengevaluasi kinerja sistem kelistrikan, menganalisis kesesuaian kapasitas *Constant Current Regulator* (CCR) terhadap beban aktual, dan menghitung parameter teknis seperti daya dan intensitas cahaya. Metode yang digunakan meliputi observasi lapangan, pengumpulan data teknis, serta analisis perhitungan data pengukuran. Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem kelistrikan PAPI beroperasi dengan baik. Dengan total beban aktual dari PAPI 35 dan PAPI 17 sebesar 3,88 kVA, penggunaan CCR berkapasitas 5 kVA dinilai sangat tepat karena hanya beroperasi pada 77,6% dari kapasitas maksimalnya, sehingga menjamin keandalan. Perhitungan teknis menunjukkan bahwa seiring kenaikan step arus pada CCR, daya lampu meningkat dari 28,92 W menjadi 160,38 W, dan intensitas cahaya meningkat dari 2,86 cd menjadi 28,68 cd. Studi ini menggarisbawahi pentingnya pemeliharaan rutin pada CCR dan isolating transformer untuk menjaga konsistensi kinerja lampu. Rekomendasi yang diajukan adalah melakukan perbaikan sistem kontrol dari CCR ke menara kontrol (ATC) untuk meningkatkan efisiensi operasional.

Koresponden:

Pandung Sarungallo

Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Papua

Jl. Gunung Salju Amban Manokwari Papua Barat Kode Pos 98314

Email: p.sarungallo@unipa.ac.id

1. PENDAHULUAN

Bandar Udara Rendani Manokwari, sebagai salah satu gerbang udaradi Provinsi Papua Barat, memegang peranan strategis dalam mendukung konektivitas dan dinamika pembangunan ekonomi regional. Keselamatan operasional penerbangan merupakan prioritas utama dalam manajemen bandar udara, terutama pada fase kritis seperti pendekatan (*approach*) dan pendaratan (*landing*). Statistik menunjukkan bahwa sebagian besar insiden penerbangan terjadi selama fase pendaratan akibat ketidakstabilan jalur luncur pesawat [1]. Untuk memitigasi risiko tersebut, Organisasi Penerbangan Sipil Internasional (ICAO) dan *Federal Aviation Administration* (FAA) mensyaratkan penggunaan sistem pemandu pendaratan visual yang presisi [2].

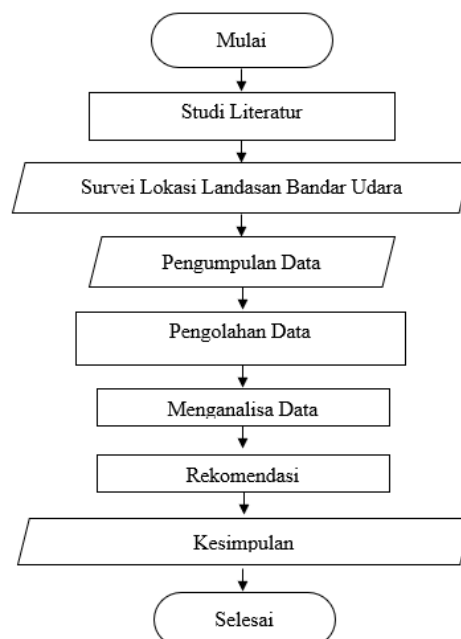
Seiring dengan peningkatan frekuensi penerbangan dan diversifikasi jenis pesawat yang beroperasi, integritas dan keandalan infrastruktur pendukung, khususnya sistem penerangan landasan, menjadi faktor penentu [3]. Sistem kelistrikan yang stabil dan terproteksi merupakan fondasi operasional yang tak terpisahkan bagi lampu PAPI (*Precision Approach Path Indicator*) [4]. Gangguan sekecil apa pun pada sistem kelistrikan berpotensi menyebabkan disfungsi lampu PAPI, yang secara langsung dapat membahayakan keselamatan penerbangan karena hilangnya panduan visual *glide path* bagi pilot [5]. Dalam konteks operasionalnya, lampu PAPI sangat bergantung pada *Constant Current Regulator* (CCR) untuk memastikan intensitas cahaya yang konsisten pada setiap unit lampu melalui pengaturan arus bertahap [6]. Selain itu, penggunaan *isolating transformer* menjadi komponen kritis untuk menjaga kontinuitas aliran arus listrik pada sirkuit seri, sehingga apabila terjadi kegagalan atau kerusakan pada salah satu unit lampu, unit lainnya dalam rangkaian tetap dapat beroperasi secara normal [7].

Sehingga sejauh mana kapasitas CCR yang terpasang sesuai dengan total beban aktual lampu PAPI di Bandara Rendani harus diperhitungkan dengan baik, bagaimana konfigurasi dan kondisi teknis instalasi kelistrikan lampu PAPI dan berapa nilai kapasitas beban terpasang dan bagaimana perubahan intensitas cahaya, kuat penerangan, serta daya lampu pada setiap *brightness step* sistem PAPI harus diperhitungkan dengan detail dan teliti dalam pengukuran dan perhitungan di lapangan.

Berdasarkan hal-hal tersebut maka tujuannya adalah sebagai berikut, menganalisis kapasitas CCR yang digunakan dalam sistem PAPI, serta memastikan bahwa kapasitas tersebut sesuai dengan kebutuhan operasional dan dapat mendukung kinerja optimal dari sistem pencahayaan Bandar Udara Rendani Manokwari. Selain itu juga tujuannya adalah menganalisis sistem kelistrikan instalasi Lampu PAPI, guna memberikan pemahaman mendalam yang dapat diaplikasikan dalam upaya perencanaan, perbaikan, maupun pengembangan sistem di masa mendatang, serta melakukan perhitungan teknis terkait kapasitas beban terpasang, intensitas cahaya, kuat penerangan, dan daya lampu pada setiap step pengoperasian sistem Lampu PAPI.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan studi kasus pada sistem kelistrikan lampu PAPI di Bandar Udara Rendani Manokwari



Gambar1.Diagram Alir Penelitian

Langkah-langkah dalam penelitian sistem kelistrikan lampu PAPI (*Precision Approach Path Indicator*) Bandar Udara Rendani Manokwari dapat dilihat pada Gambar 1.

2.1 Constant Current Regulator (CCR)

CCR merupakan perangkat catu daya utama pada sistem *Airfield Ground Lighting* (AGL) yang berfungsi menjaga arus keluaran tetap konstan pada rangkaian seri lampu bandara. Sesuai standar FAA AC 150/5345-10H, CCR digunakan untuk menyuplai sirkuit lampu bandara seperti runway light, taxiway light, approach light, dan lampu PAPI dengan arus tetap pada berbagai tingkat intensitas cahaya dengan kondisi cuaca dan visibilitas di bandara [6][8]. Pada sistem lampu PAPI, CCR memiliki peran penting dalam mempertahankan kestabilan arus agar setiap unit lampu menghasilkan intensitas cahaya yang seragam. Umumnya arus nominal yang digunakan pada sistem AGL adalah 6,6 A, dengan beberapa tahapan brightness step untuk menyesuaikan kondisi operasi siang dan malam. Dengan kestabilan arus tersebut, perubahan impedansi akibat panjang kabel, variasi beban, atau gangguan lampu tidak memengaruhi keseragaman intensitas cahaya yang diterima pilot saat pendekatan pendaratan. Setiap "Step" pada CCR telah diatur untuk mengeluarkan nilai arus tertentu. Semakin tinggi step yang dipilih, semakin besar pula arus yang dialirkan ke rangkaian, dan hasilnya, lampu akan menyala lebih terang. Sebaliknya, step yang lebih rendah akan menghasilkan arus yang lebih kecil dan lampu yang lebih redup.

Sebagai contoh, sebuah CCR untuk pencahayaan PAPI mungkin memiliki beberapa tingkatan "Step" sebagai berikut:

- Step 1: Mengeluarkan arus 2.8 Ampere (kecerahan paling rendah)
- Step 2: Mengeluarkan arus 3.4 Ampere
- Step 3: Mengeluarkan arus 4.1 Ampere
- Step 4: Mengeluarkan arus 5.2 Ampere
- Step 5: Mengeluarkan arus 6.6 Ampere (kecerahan paling tinggi)

Pengaturan step ini sangat penting untuk menyesuaikan intensitas cahaya dengan kondisi cuaca dan jarak pandang (*visibility*). CCR *Honeywell* merupakan perangkat pengatur arus konstan yang digunakan sebagai sumber daya untuk PAPI. Prinsip kerjanya adalah dengan mengatur tingkat kecerahan (*brightness setting*) yang mengalirkan arus ke pengendali (*controller*), berfungsi sebagai pemicu untuk menentukan sudut penyalan SCR (*Silicon Controlled Rectifier*) melalui rangkaian pembalik (*inverting circuit*). Jika arus beban (I_s) berada dalam kondisi stabil, maka tegangan yang dihasilkan oleh trafo sensor (*sensing transformer*) juga akan tetap, sehingga sudut penyalan SCR tidak berubah dan arus terjaga konstan di angka 6,6 Ampere.

Namun, apabila terjadi perubahan pada arus beban (I_s), tegangan tersebut akan diperkuat melalui rangkaian pengganda (*multiplier*), kemudian diubah menjadi sinyal pulsa berbentuk persegi oleh blok squaring. Sinyal ini selanjutnya dikirim ke pengendali dan diproses secara inversi, sehingga jika arus beban meningkat, sudut penyalan akan dikurangi agar arus turun kembali ke nilai nominal (6,6 A). dan sebaliknya, jika arus beban menurun, sudut penyalan akan diperbesar untuk menaikkan arus kembali ke tingkat semula.

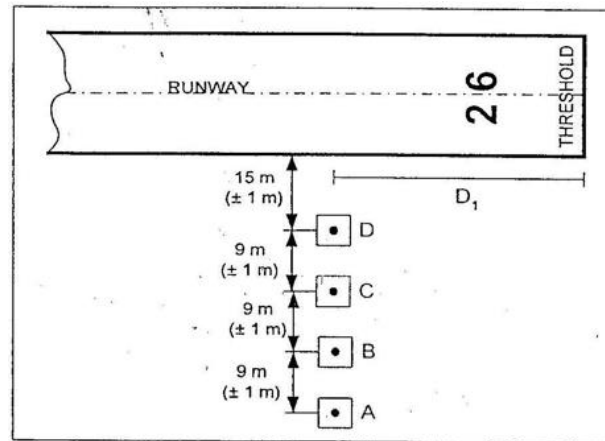
Terdapat perbedaan karakteristik antara dua kondisi ekstrem, yakni ketika terjadi hubung singkat (*short circuit*) pada beban dan ketika rangkaian terbuka (*open circuit*), yang memengaruhi respons sistem dalam mempertahankan kestabilan arus.

Tabel 1 Arus setiap step pada CCR

Step	Arus (A)	Kondisi
1	2,8A	Redup: Untuk malam hari saat cuaca sangat cerah.
2	3,4A	Sedang: Untuk siang hari cerah atau malam dengan gangguan ringan (kabut tipis).
3	4,1A	
4	5,2A	Terang: Untuk kondisi cuaca buruk (hujan lebat, kabut tebal).

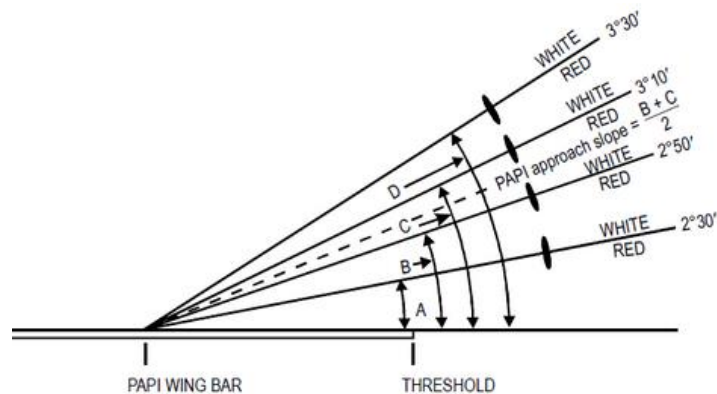
2.2 PAPI (*Precision Approach Path Indicator*)

PAPI adalah alat bantu visual yang menyediakan informasi panduan untuk membantu pilot dalam mempertahankan posisi pesawat dengan pendekatan yang benar (dalam dimensi vertikal) ke *touch down point* di *runway*. Menurut standar International Civil Aviation Organization, PAPI dipasang di sisi kiri landasan pacu dan terdiri atas empat unit lampu yang disusun secara horizontal dengan sudut pancar tertentu yang telah dikalibrasi sesuai kebutuhan operasional bandar udara. Sistem ini menjadi bagian penting dari *Airfield Lighting System* (ALS) karena berfungsi meningkatkan keselamatan penerbangan terutama pada operasi malam hari maupun kondisi cuaca dengan visibilitas terbatas [9].



Gambar 2. Tata Letak PAPI [8]
(Perhubungan Udara, 2002)

Pada umumnya posisi PAPI terletak di samping landasan pacu sekitar 300 meter di luar batas landas dari landasan pacu. Konsep sudut pendekatan PAPI secara umum dapat direpresentasikan sudut jalur pendekatan (*approach angle*) yang digunakan sebagai referensi pendaratan berdasarkan standar keselamatan penerbangan dan kondisi operasional bandar udara [10] [11]. Ketinggian sudut PAPI diukur dalam tingkat. Secara umum, sudut PAPI direkomendasikan antara 3° hingga $3,5^\circ$ tergantung pada kondisi landasan pacu dan peraturan setempat. Sudut yang lebih tinggi dari $3,5^\circ$ dapat digunakan dalam situasi khusus, seperti pendekatan pada landasan pacu pendek



Gambar.1 Ketinggian Sudut PAPI [9]

Lampu PAPI dapat memunculkan warna yang berbeda bila dilihat dari sudut yang berbeda. Untuk mendapatkan hasil cahaya tersebut pada konstruksi dari lampu PAPI dipasang red filter. Jika dilihat dari sisi atas akan tampak warna putih dan jika dilihat dari sisi lebih bawah akan tampak warna merah karena keempat lampu PAPI memiliki batasan sudut yang berbeda sehingga dilihat dari udara juga akan dapat menentukan ketinggian pesawat dalam persiapan pendaratan di landasan pacu atau run way [12]

Pengoperasian dan pengendalian sistem penerangan di PAPI ini dilakukan melalui saklar selektor (*selector switch*), yang terbagi menjadi dua mode utama:

- Kontrol lokal, yaitu pengoperasian langsung dari unit peralatan itu sendiri.
- Kontrol jarak jauh (*remote control*), yang dijalankan oleh petugas lalu lintas udara dari menara pengawas.

Dalam situasi normal, sistem ini biasanya dikendalikan menggunakan kontrol jarak jauh oleh petugas dari menara pengawas. Sementara itu, mode kontrol lokal digunakan hanya dalam kondisi tertentu, seperti:

- Ketika sistem kendali jarak jauh mengalami gangguan atau kerusakan.
- Saat dilakukan kegiatan pemeliharaan atau perbaikan perangkat.

Meskipun pengoperasian dilakukan secara lokal, kendali penuh tetap berada di tangan petugas lalu lintas udara. Artinya, setiap perubahan tingkat intensitas pencahayaan (*step intensity*) tetap harus berdasarkan instruksi dari pengawas lalu lintas udara, karena mereka yang menjalin komunikasi langsung dengan pilot.

Oleh karena itu, pengoperasian CCR sepenuhnya merupakan tanggung jawab petugas lalu lintas udara dalam sistem pengaturan penerbangan. Standar dan toleransi pada lampu PAPI terdapat pada Tabel 2 [13].

Tabel 2. Standar dan Toleransi Lampu PAPI

Parameter	Standar	Toleransi / Limit: Initial	Toleransi / Limit: Operating
1. Lamps burning PAPI	Menyala Semua	Sama dengan standar	Tidak lebih satu lampu yang mati dalam tiap boks
2. Vertical aiming			
Unit D (close to Runway)	3° 30'	3 menit	6 menit
Unit C (2 nd from Runway)	3° 10'	3 menit	6 menit
Unit B	2° 50'	3 menit	6 menit
Unit A (farthest from Runway)	2° 30'	3 menit	6 menit
3. Arus Lampu (current-regulated)	Sesuai dengan nilai arus yang tertera pada lampu	Sesuai dengan arus regulator untuk tipe regulator yang digunakan	
4. Tegangan lampu (Voltage-regulated)	Nilai tegangan lampu yang tertera	5%	5%
5. Obstruction akibat benda tumbu, dll	No obstruction	Sama dengan standar	Sama dengan standar

Intensitas cahaya, yang disimbolkan dengan I , adalah ukuran jumlah energi radiasi yang dipancarkan oleh suatu sumber cahaya dalam arah tertentu per satuan sudut ruang. Satuan internasional untuk intensitas cahaya adalah *candela* (cd).

Secara lebih sederhana, *candela* menunjukkan seberapa terang suatu sumber cahaya terlihat dari sudut pandang tertentu. Ini berbeda dengan total *output* cahaya (lumen) karena intensitas cahaya berfokus pada arah spesifik, menjadikannya metrik penting dalam aplikasi pencahayaan terarah seperti lampu PAPI yang memandu pilot.

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

Menghitung kuat penerangan (2)

$$E = I/r^2$$

Dimana:

- ϕ = Fluks Cahaya (Lumen)
- ω = Besaran sudut ruang pada suatu titik cahaya (sr)
- r = Jarak titik lampu (Cm)
- I = Intensitas cahaya (kandela)
- E = Kuat penerangan

2.4 Resistansi Tembaga

Resistansi pada sebuah penghantar atau konduktor (seperti kawat penghantar) adalah karakteristik yang menyebabkan adanya hambatan terhadap aliran arus listrik di dalam konduktor tersebut yang sesuai dengan persamaan 2.3 [13]

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (3)$$

Dimana: R = Resistansi dalam ohm (Ω),
 ρ = Resistivitas material dalam ohm-meter ($\Omega \cdot m$),
 L = Panjang konduktor dalam meter (m),
 A = Luas penampang konduktor dalam meter persegi (m^2).

2.5 Rugi-Rugi Daya

Pengaruh dari hambatan pada penghantar listrik menyebabkan terjadinya kehilangan energi listrik yang disalurkan, yang dikenal sebagai rugi-rugi daya. Besarnya rugi-rugi daya listrik dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.4

$$P = I^2 R \quad (4)$$

Dimana: P = Daya dalam watt (W)
 I = Arus dalam ampere (A)
 R = Resistansi dalam ohm (Ω)

2.6 Kapasitas CCR

Constant Current Regulator (CCR) adalah perangkat yang digunakan untuk mengatur arus listrik yang mengalir ke beban, seperti lampu navigasi di bandar udara. CCR berfungsi untuk memastikan bahwa arus yang diterima oleh lampu tetap konstan, meskipun ada fluktuasi dalam tegangan atau beban. Untuk merancang dan mengoperasikan CCR dengan efektif, penting untuk memahami kapasitas CCR dan bagaimana menghitung total daya yang diperlukan sebelum menghitung efisiensi.

Kapasitas CCR merujuk pada kemampuan perangkat untuk mengatur arus maksimum yang dapat disuplai ke beban. Kapasitas ini biasanya dinyatakan dalam ampere (A) dan harus cukup untuk memenuhi kebutuhan daya dari semua lampu atau beban yang terhubung.

Menghitung Total Daya Sebelum menghitung efisiensi CCR, langkah pertama yang harus dilakukan adalah menghitung total daya yang diperlukan oleh sistem pencahayaan. Total daya dapat dihitung dengan rumus:

$$P_{\text{total}} = P_{\text{Total beban}} + P_{\text{Rugi}} \quad (5)$$

100 % = Efisiensi CCR ideal yang berarti semua daya yang diberikan pada CCR tanpa adanya rugi daya

80 % = Maksimal beban CCR. Saat CCR full beban, efisiensi CCR 80%.

Untuk merubah menjadi kVA dikalikan dengan cos phi yaitu 0,8. Rumus untuk menentukan kapasitas CCR :

$$\frac{100\%}{80\%} \times \text{Total daya} \quad (6)$$

$$kW \times \cos \phi \quad (7)$$

2.7 Drop Tegangan

Jatuh tegangan (*Drop Voltage*) adalah seberapa besar penurunan atau kehilangan nilai tegangan listrik yang mengalir pada suatu penghantar dari nilai tegangan normal.

1. Jatuh tegangan pada trafo seri. Jatuh tegangan pada trafo seri disebabkan oleh beberapa faktor, termasuk:
 - a. Resistansi Kawat: Setiap transformator memiliki resistansi pada kumparan (kawat) yang menyebabkan penurunan tegangan saat arus mengalir.
 - b. Impedansi: Selain resistansi, impedansi total dari kumparan juga mempengaruhi jatuh tegangan, terutama pada beban induktif.
 - c. Arus yang Mengalir: Semakin besar arus yang mengalir melalui transformator, semakin besar jatuh tegangan yang terjadi.
2. Jatuh tegangan pada kabel. Jatuh tegangan pada kabel adalah penurunan tegangan yang terjadi ketika arus listrik mengalir melalui kabel [Puil 2011]. Fenomena ini penting untuk dipahami dalam sistem kelistrikan karena dapat mempengaruhi kinerja perangkat, efisiensi energi, dan keselamatan sistem. Jatuh tegangan terjadi akibat resistansi kabel dan dapat menyebabkan kerugian daya. Jatuh tegangan dapat dihitung berdasarkan persamaan 2.9

$$V_{\text{drop}} = I \times R \quad (9)$$

Dimana:

- V_{drop} = Drop tegangan (V)
 I = Arus yang mengalir melalui kabel (A)
 R = Resistansi total kabel (Ω)

(Musyafak & Andik Eka Desmina Raharjo, 2018)

Pada suatu rangkaian dimana tegangan isolasi dan tegangan kabel merupakan komponen yang tegak lurus. Ini adalah penerapan langsung *Teorema Pythagoras* yang sering terlihat pada rangkaian AC di mana tegangan direpresentasikan pada persamaan 2.10.

$$V_{\text{total}} = \sqrt{(V_{\text{Isolating}})^2 + (V_{\text{kabel}})^2} \quad (10)$$

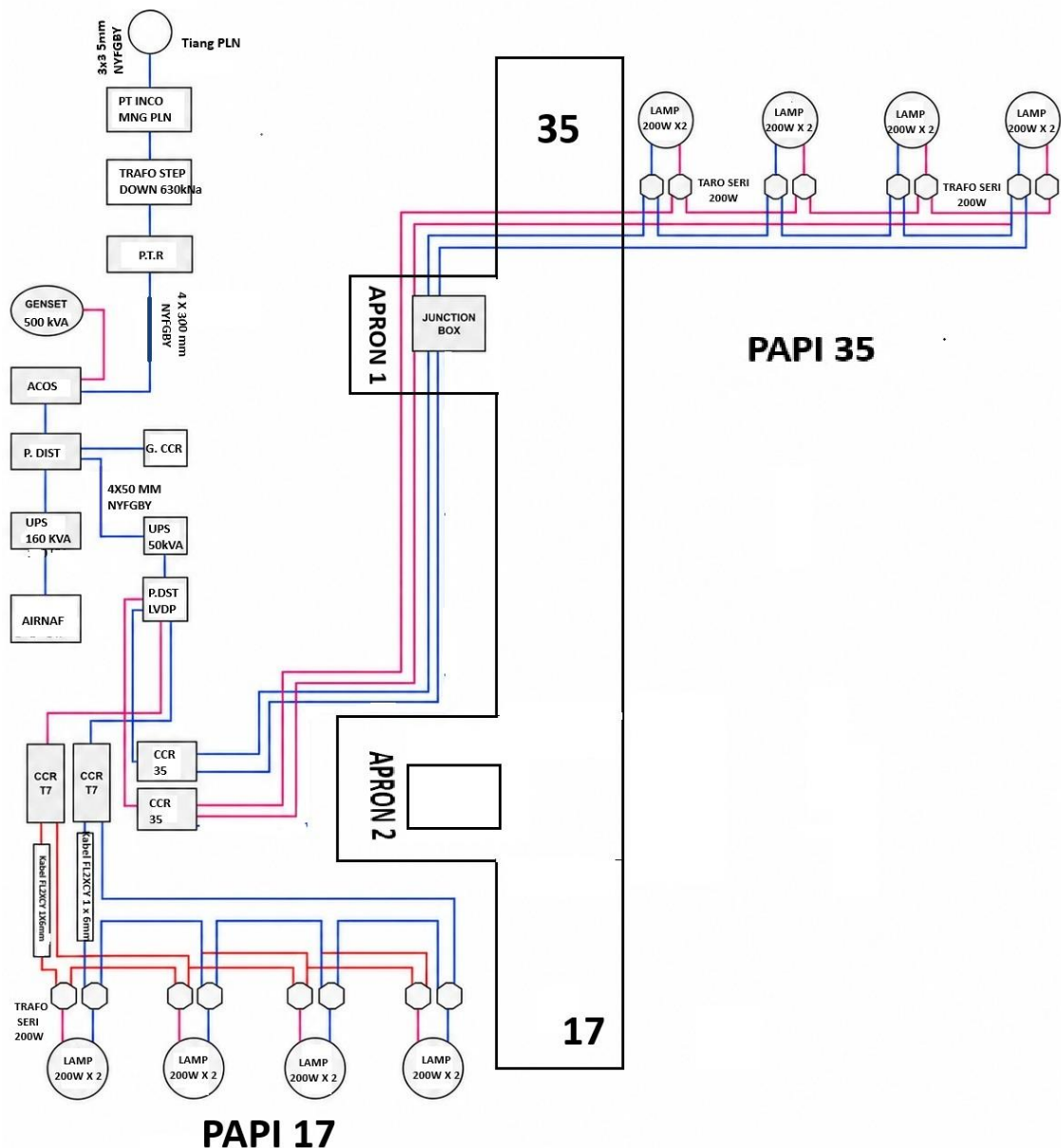
Dimana:

- V_{total} = Tegangan total
 $V_{\text{isolating}}$ = Tegangan trafo seri
 V_{kabel} = Tegangan kabel

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilaksanakan di Bandar Udara Rendani Manokwari, yang berlokasi di Trikora Rendani, Kabupaten Manokwari, Papua Barat. Titik koordinat geografisnya adalah -0.8901872160921364, 134.04897479552696. Sebagai salah satu pintu gerbang utama penerbangan di wilayah Papua Barat, Bandar Udara Rendani sangat mengandalkan sistem Lampu PAPI untuk mendukung keselamatan operasional. Sistem ini memegang peranan krusial, terutama saat visibilitas rendah atau selama penerbangan malam hari. Fokus penelitian ini adalah pada evaluasi dan analisis kinerja sistem PAPI yang ada di bandara. Tujuannya adalah untuk memahami efektivitasnya dalam membantu navigasi pesawat saat pendekatan dan pendaratan, serta kontribusinya terhadap pengurangan risiko kecelakaan penerbangan di Bandar Udara Rendani.

Tata letak dan konfigurasi instalasi sistem PAPI digunakan untuk membantu pilot dalam menentukan sudut luncur (*glide slope*) yang tepat saat pendekatan pendaratan di *runway*. Sistem ini terdiri dari empat unit lampu PAPI yang dipasang sejajar dengan jarak antar unit sebesar 9 Meter dan diposisikan sekitar 15 Meter dari *centerline runway* serta 300 Meter dari *threshold landasan*. Masing-masing unit dirancang memancarkan cahaya merah atau putih tergantung sudut pandang pilot, di mana kombinasi warna tersebut menunjukkan apakah pesawat berada pada jalur luncur yang benar, terlalu tinggi, atau terlalu rendah. Instalasi dilakukan pada kemiringan 2,5% dengan ketinggian pemasangan yang disesuaikan untuk membentuk sudut *glide path* standar sebesar 3°. Representasi teknis sistem PAPI yang dirancang sesuai dengan standar internasional dari *International Civil Aviation Organization* (ICAO), khususnya untuk kategori II bandar udara. Beban pada sistem catu daya PAPI di Bandar Udara Rendani bersifat campuran, yakni gabungan antara induktif dan resistif. Hal ini disebabkan oleh penggunaan dua komponen utama pada setiap titik bebannya: sebuah transformator isolasi (sumber beban induktif) dan sebuah lampu 200 watt (sumber beban resistif). Single diagram PAPI pada Bandar Udara Rendani digambarkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Single Line Diagram PAPI

Transformator isolasi berperan penting dalam menjamin keamanan dan stabilitas tegangan dengan cara memisahkan beban dari catu daya utama. Di sisi lain, lampu PAPI beroperasi sesuai standar arus konstan untuk penerangan bandara. Dengan konfigurasi beban campuran ini, unit CCR dituntut untuk mampu menjaga arus keluaran tetap stabil. Kestabilan ini krusial agar pencahayaan PAPI dapat berfungsi secara optimal untuk menunjang keselamatan pendaratan.

Untuk menentukan kapasitas CCR, diperlukan perhitungan beban terlebih dahulu. Berdasarkan kapasitas CCR yang tersedia di lapangan, terdapat CCR dengan kapasitas: 2,5 kVA; 5 kVA; 7,5 kVA; 10 kVA; 15 kVA; 25 kVA; dan 30 kVA. Tabel 3 adalah perhitungan kapasitas CCR yang akan digunakan untuk (PAPI).

Tabel 3 Precision Approach Path Indicator (PAPI) pada Bandar Udara Rendani

No	Nama	Keterangan
1	PAPI 35	4 box/2 Lamp
2	PAPI 17	4 box/2 Lamp

3	Kapasitas Lampu	200W/6,6A
4	Panjang kabel FL2XCY	5.500M + 5%
5	Ukuran kabel FL2XCY	1 x 6 mm ²

3.1 Analisis Kapasitas Constant Current Regulator (CCR)

Hasil analisis menunjukkan bahwa kebutuhan kapasitas CCR pada sistem PAPI ditentukan berdasarkan total beban lampu dan rugi daya pada jaringan kabel. Pada PAPI 35 dan PAPI 17, masing-masing memiliki beban lampu sebesar 1600 W (8 lampu × 200 W). Namun, perbedaan panjang kabel menyebabkan nilai hambatan yang berbeda signifikan, yaitu 16,84 Ω pada PAPI 35 dengan Panjang kabel 5775m dan 3,99 Ω pada PAPI 17 dengan Panjang kabel 1369 m. Rugi daya meningkat secara signifikan seiring kenaikan arus, mengikuti hukum Joule ($P = I^2R$), di mana pada arus maksimum (6,6 A), rugi daya mencapai 733,55 W pada PAPI 35 dan 173,80 W pada PAPI 17. Hal ini menunjukkan bahwa panjang kabel menjadi faktor dominan dalam meningkatkan losses sistem. Setelah memperhitungkan efisiensi CCR sebesar 92%, diperoleh kebutuhan kapasitas sebesar 2,23 kVA (PAPI 35) dan 1,65 kVA (PAPI 17). Total kebutuhan sistem adalah 3,88 kVA, sehingga penggunaan CCR 5 kVA dinilai cukup aman untuk mengantisipasi peningkatan beban.

3.2 Analisis Rugi Daya dan Efisiensi Sistem

Rugi daya meningkat secara eksponensial terhadap arus, terutama pada sistem dengan hambatan tinggi. Pada PAPI 35, peningkatan arus dari 2,8 A menjadi 6,6 A menyebabkan rugi daya naik lebih dari 5 kali lipat. Sebaliknya, pada PAPI 17, peningkatan rugi daya lebih rendah karena hambatan kabel yang lebih kecil. Fenomena ini menegaskan pentingnya optimasi panjang dan ukuran kabel untuk meningkatkan efisiensi sistem. Penggunaan kabel dengan hambatan lebih kecil atau penempatan CCR lebih dekat dengan beban dapat menjadi solusi untuk meminimalkan losses energi.

3.3 Analisis Tegangan dan Impedansi Sistem

Pengukuran menunjukkan bahwa tegangan total sistem meningkat seiring kenaikan arus, dari sekitar 294,49 V hingga 691,47 V. Sementara itu, nilai impedansi sistem relatif konstan di sekitar 105 Ω . Stabilitas impedansi ini menunjukkan bahwa sistem bekerja secara linier dan beban tidak mengalami perubahan signifikan meskipun terjadi peningkatan arus. Namun, drop tegangan pada kabel yang cukup besar (hingga 666,99 V) menjadi perhatian utama karena dapat mempengaruhi kinerja lampu jika tidak dikompensasi dengan baik.

3.4 Analisis Daya dan Karakteristik Beban

Daya listrik pada setiap step meningkat seiring kenaikan arus CCR, namun cenderung stabil pada sistem total. Hal ini menunjukkan bahwa sistem PAPI dirancang dengan karakteristik beban yang relatif konstan, meskipun terjadi variasi arus. Beban sistem merupakan kombinasi antara beban resistif (lampu) dan induktif (transformator isolasi), sehingga CCR berperan penting dalam menjaga kestabilan arus sebesar 6,6 A. Kestabilan ini sangat krusial untuk menjaga performa sistem penerbangan navigasi.

3.5 Analisis Intensitas Cahaya dan Kuat Penerangan

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa intensitas cahaya dan kuat penerangan meningkat secara signifikan seiring kenaikan step CCR. Intensitas cahaya meningkat dari 2,86 cd menjadi 28,68 cd, sedangkan kuat penerangan meningkat dari $0,71 \times 10^5$ lux menjadi $7,17 \times 10^5$ lux. Hal ini menunjukkan bahwa sistem PAPI mampu memberikan variasi intensitas cahaya yang memadai sesuai kebutuhan operasional penerbangan. Peningkatan intensitas ini penting untuk memastikan visibilitas pilot dalam berbagai kondisi cuaca dan jarak pandang.

3.6 Evaluasi Konfigurasi Sistem PAPI

Konfigurasi sistem PAPI yang terdiri dari empat unit lampu dengan jarak dan posisi sesuai standar ICAO telah memenuhi persyaratan operasional. Penggunaan isolating transformer juga memberikan keuntungan dalam hal keamanan dan kestabilan sistem. Selain itu, sistem arus konstan (6,6 A) yang dikontrol oleh CCR terbukti mampu menjaga performa lampu tetap optimal meskipun terjadi variasi beban dan kondisi jaringan.

Kesimpulan

1. Analisis kapasitas CCR telah sesuai dengan kebutuhan operasional. Hasil perhitungan menunjukkan total beban aktual dari sistem PAPI 35 dan PAPI 17 adalah 3,88 kVA. Dengan CCR yang terpasang memiliki kapasitas 5 kVA, sistem hanya beroperasi pada 77,6% dari kapasitas maksimalnya serta memiliki cadangan daya yang cukup untuk mendukung kinerja optimal dan mengantisipasi penambahan beban di masa mendatang, sehingga tujuan pertama penelitian tercapai.
2. Konfigurasi dan kondisi teknis instalasi kelistrikan sistem PAPI telah memenuhi standar operasional, dengan penggunaan sistem arus konstan (6,6 A), isolating transformer, serta kabel berstandar penerangan bandar udara. Sistem menunjukkan karakteristik kerja yang stabil dengan nilai impedansi yang relatif konstan, sehingga mampu menjaga performa pencahayaan secara optimal dan aman.
3. Kapasitas beban terpasang dan kinerja pencahayaan system PAPI menunjukkan bahwa:
 - a) Kapasitas beban terpasang pada sistem adalah 3,88 kVA.
 - b) Daya Lampu: Daya yang dikonsumsi lampu meningkat secara proporsional pada setiap step CCR, mulai dari 28,92 Watt (Step 1) hingga 160,38 Watt (Step 5).
 - c) Intensitas cahaya dan kuat penerangan: Kinerja visual terbukti andal, di mana intensitas cahaya meningkat dari 2,86 cd menjadi 28,68 cd, dan kuat penerangan meningkat dari $0,71 \cdot 10^5$ lux menjadi $7,17 \cdot 10^5$ lux seiring kenaikan step dari 1 ke 5.

Hal ini menandakan bahwa sistem brightness step pada CCR berfungsi dengan baik dalam mengatur tingkat pencahayaan sesuai kebutuhan visibilitas penerbangan. Sistem PAPI di Bandar Udara Rendani Manokwari telah bekerja secara optimal, efisien, dan sesuai standar, sehingga mampu mendukung keselamatan proses pendekatan dan pendaratan pesawat udara.

REFERENSI

- [1] International Civil Aviation Organization (ICAO), *Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation: Aerodromes, Volume I - Aerodrome Design and Operations*, 8th ed. Montreal, Canada: ICAO, 2018.
- [2] Federal Aviation Administration (FAA), *Standards for Airport Markings*, Advisory Circular (AC) 150/5340-1M, 2023.
- [3] International Civil Aviation Organization (ICAO), *Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation: Aerodromes, Volume I - Aerodrome Design and Operations*, 8th ed. Montreal, Canada: ICAO, 2018.
- [4] Federal Aviation Administration (FAA), *General Provisions for Airfield Lighting Systems*, Advisory Circular (AC) 150/5340-30J, 2
- [5] R. S. Kazda and R. E. Caves, *Airport Design and Operation*, 3rd ed. Oxford, UK: Elsevier Science, 2015, pp. 215-220.
- [6] Federal Aviation Administration (FAA), *Specification for Constant Current Regulators and Regulator Monitors*, Advisory Circular (AC) 150/5345-10G, 2014.
- [7] H. J. Beade, "Design Considerations for Airfield Lighting Series Circuits," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, no. 5, pp. 1025-1032, Sep./Oct. 1998.
- [8] F. Haqi, Y. Saragih, and R. Hidayat, "Working Principles of Constant Current Regulator (CCR) as Charge with Constant Flow at the Airport International Jendral Ahmad Yani Semarang," *Widya Teknik*, vol. 20, no. 2, pp. 54-60, 2021.
- [9] International Civil Aviation Organization, *Annex 14: Aerodromes, Volume I – Aerodrome Design and Operations*, 8th ed., Montreal, Canada, 2018
- [10] H. Widiarto dan A. S. Agosto, "Rancang Bangun Alat Ground Check On Slope Precision Approach Path Indicator (PAPI)," *Jurnal Review Pendidikan dan Pengajaran*, vol. 8, no. 1, 2025
- [11] Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, *Keputusan Direktur Jenderal Perhubungan Udara Nomor KP 2 Tahun 2013 tentang Manual of Standard CASR Part 139 Volume I Bandar Udara (Aerodrome)*, Jakarta, Indonesia, 2013/
- [12] Panjaitan, A., dkk *Analisi Sistem Constant Current Regulator pada Lampu Precision Approach Path Indikator di Bandara Udara*.
- [13] Direktorat Jenderal Perhubungan Udara, *Keputusan Direktur Jenderal Perhubungan Udara tentang Standar Teknis dan Operasional Bandar Udara (CASR Part 139/MOS)*, Jakarta, 2023.
- [14] Direktorat Jenderal Perhubungan Udara, *SKEP 114/VI/2002 Standar Gambar Instalasi Sistem Penerangan Bandar Udara*, Jakarta, 2002

- [15] Fariza Haqi dkk., *Working Principles of Constant Current Regulator (CCR) as Charge With Constant Flow at Jenderal Ahmad Yani International Airport Semarang*