



Analisis Penyebab Kerusakan Precision Approach Path Indicator Runway 07 dan 25 Di Bandar Udara Nusawiru

Hendra Kristiady Pangaribuan¹ I Wayan Juliarta² Ayunda Maulita Alya Rizky³

Program Studi D-IV Teknik Listrik Bandara, Politeknik Penerbangan Indonesia Curug,
Tangerang, Indonesia^{1,2,3}

Email: hendrapangaribuan10@gmail.com¹ juliarta71@gmail.com²
ayundamaulita@gmail.com³

Abstrak

Sistem Precision Approach Path Indicator (PAPI) merupakan fasilitas Airfield Lighting System (AFL) vital yang memberikan panduan visual sudut luncur pesawat saat pendekatan dan pendaratan. Di Bandar Udara Nusawiru Pangandaran, sistem PAPI pada Runway 07 dan 25 mengalami kegagalan operasi total sejak tahun 2021. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi kerusakan teknis, menghitung beban sistem, menganalisis hasil pengukuran tahanan isolasi kabel FL2XCY dan trafo seri, evaluasi fisik box PAPI dan bak trafo, evaluasi kapasitas CCR, hasil wawancara, serta penentuan akar penyebab menggunakan metode Root Cause Analysis (RCA) dan Fishbone Diagram. Penelitian dengan metode kombinasi kualitatif dan kuantitatif ini menemukan bahwa total beban PAPI sebesar 315 VA melebihi kapasitas operasional maksimum CCR (4 kVA) sehingga mengalami ketiadaan daya (total breakdown/kerusakan CCR). Sebanyak 60% titik kabel FL2XCY dan 50% trafo seri memiliki tahanan isolasi 0–20 M Ω (di bawah standar minimum 50 M Ω), 46% fitting lampu rusak, serta 87% bak trafo tergenang air/lumpur. RCA mengidentifikasi ketiadaan program pemeliharaan preventif terstruktur (preventive maintenance) sebagai akar masalah utama yang diperkuat oleh interaksi faktor Man, Machine, Material, Method, dan Environment.

Keywords: Precision Approach Path Indicator (PAPI), Tahanan Isolasi, Constant Current Regulator (CCR), Root Cause Analysis (RCA), Fishbone Diagram

Abstract

The Precision Approach Path Indicator (PAPI) system is a vital Airfield Lighting System (AFL) facility that provides visual guidance on aircraft glide path angle during approach and landing. At Nusawiru Pangandaran Airport, the PAPI systems on Runway 07 and 25 have experienced total operational failure since 2021. This research aims to identify the technical damage, calculate the system load, analyze the insulation resistance measurement results of FL2XCY cables and series transformers, evaluate the physical condition of the PAPI boxes and transformer pits, assess CCR capacity, examine interview results, and determine the root cause using the Root Cause Analysis (RCA) method and Fishbone Diagram. This research, using a combined qualitative and quantitative method, found that the total PAPI load of 315 VA exceeded the maximum operational capacity of the CCR (4 kVA), resulting in a total power failure (total breakdown/CCR damage). As many as 60% of the FL2XCY cable measurement points and 50% of the series transformers had insulation resistance values of 0–20 M Ω (below the minimum standard of 50 M Ω), 46% of the lamp fittings were damaged, and 87% of the transformer pits were inundated with water/mud. RCA identified the absence of a structured preventive maintenance program as the main root cause, which was reinforced by the interaction of Man, Machine, Material, Method, and Environment factors.

Kata Kunci: Precision Approach Path Indicator (PAPI), Tahanan Isolasi, Constant Current Regulator (CCR), Root Cause Analysis (RCA), Fishbone Diagram



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

PENDAHULUAN

Transportasi udara merupakan salah satu moda transportasi yang banyak dimanfaatkan untuk mengangkut penumpang serta kargo, baik di dalam negeri maupun ke luar negeri (Bima, 2023). Sebagai negara kepulauan, Indonesia memiliki ketergantungan yang tinggi terhadap transportasi udara karena kemampuannya menjangkau wilayah terpencil, mempercepat waktu tempuh, serta mendukung pertumbuhan ekonomi dan pariwisata. Untuk menjamin kelancaran transportasi udara, keberadaan bandar udara yang dilengkapi fasilitas keselamatan penerbangan yang andal menjadi keharusan, khususnya pada fase kritis seperti pendekatan dan pendaratan pesawat udara. Berdasarkan Undang-Undang Nomor 1 Tahun 2009 tentang Penerbangan, bandar udara didefinisikan sebagai kawasan yang digunakan sebagai tempat pesawat udara mendarat dan lepas landas, yang wajib dilengkapi fasilitas keselamatan dan keamanan penerbangan sesuai standar (Indonesia, 2009). Salah satu bandar udara yang berperan penting dalam mendukung konektivitas wilayah adalah Bandar Udara Nusawiru, yang berada di bawah pengelolaan Dinas Perhubungan Provinsi Jawa Barat. Bandara berkode ICAO WICN dan IATA CJN ini memiliki landasan pacu sepanjang 1.400×30 meter dengan klasifikasi kode 3C, dan berlokasi di Cijulang, Pangandaran — menjadi salah satu pintu masuk utama wisatawan menuju destinasi seperti Green Canyon dan Batu Karas (Azhari & Kartini, 2023). Bandara ini melayani penerbangan perintis menggunakan pesawat Cessna 208 Grand Caravan menuju Bandara Halim Perdanakusuma, Husein Sastranegara, dan Adisutjipto, serta digunakan sebagai lokasi latihan terbang, sehingga menuntut kesiapan fasilitas keselamatan penerbangan yang tinggi dan berkesinambungan.

Sesuai KP 407 Tahun 2014 tentang Rencana Induk Bandar Udara Nusawiru, pengembangan sisi udara (airside) dan sisi darat (landside) diperlukan untuk mendukung keselamatan dan kelancaran operasi penerbangan (Udara, 2014). Salah satu fasilitas sisi udara yang tersedia adalah Airfield Lighting System (AFL), meliputi runway edge light, taxiway edge light, taxi guidance sign, windcone, serta Precision Approach Path Indicator (PAPI). Di antara komponen tersebut, PAPI memiliki peran strategis pada fase pendekatan pendaratan karena memberikan panduan sudut luncur pesawat melalui kombinasi indikasi cahaya merah dan putih (Sandro et al., 2025), dan keandalannya sangat bergantung pada kontinuitas daya, kestabilan tegangan, kondisi lampu, serta ketepatan sudut optik. Keberadaan PAPI menjadi krusial terutama pada kondisi jarak pandang terbatas maupun pada bandara yang melayani penerbangan rutin (Wartoyo, 2023), sebagaimana diamanatkan dalam PR 21 Tahun 2023 bagian 5.3.5.6 bahwa bandara berkode nomor 3 dan 4 wajib menyediakan alat bantu pendaratan berupa PAPI, T-VASIS, atau AT-VASIS (Direktorat Jenderal Perhubungan Udara, 2023).

Kondisi geografis Bandara Nusawiru yang berada di dekat pantai membuat lingkungan sekitarnya minim referensi visual alami, terutama saat cuaca buruk, sehingga keberadaan PAPI menjadi sangat penting untuk membantu pilot memperkirakan sudut luncur secara akurat. Namun, unit PAPI di runway 07 dan 25 — yang telah terpasang sejak tahun 2010 dan 2011 — saat ini mengalami gangguan fungsi yang berpotensi mengganggu keselamatan penerbangan, khususnya pada saat pendaratan malam hari atau dalam kondisi jarak pandang rendah. Kerusakan ini diduga berkaitan dengan tidak terlaksananya program pemeliharaan preventif secara rutin, meliputi pemeriksaan unit lampu, kabel suplai, sambungan kabel, isolasi, serta kinerja Constant Current Regulator (CCR) dan trafo. Sesuai ketentuan mengenai peralatan bandar udara, seluruh fasilitas keselamatan penerbangan termasuk sistem PAPI wajib memenuhi standar teknis dan

dipelihara dengan baik guna menjamin keselamatan serta kelancaran operasional penerbangan (Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, 2021).

Urgensi perbaikan sistem PAPI ini semakin diperkuat oleh tren peningkatan arus lalu lintas angkutan udara di Bandar Udara Nusawiru. Sepanjang tahun 2025, tercatat sebanyak 1.817 pergerakan pesawat dengan total 8.804 penumpang (mencakup penerbangan reguler dan latihan terbang/training), dan tren ini terus meningkat pada tahun 2026, di mana pada periode Januari–Juni 2026 saja tercatat 1.006 pergerakan pesawat dan 5.253 penumpang, naik masing-masing sebesar 15,4% dan 32,7% dibandingkan periode yang sama pada tahun sebelumnya (*Data Arus Lalu Lintas Angkutan Udara Bandar Udara Nusawiru Pangandaran*, 2026). Peningkatan volume penerbangan ini, ditambah dengan tingginya intensitas penerbangan latihan yang memerlukan pendekatan berulang (*touch and go*), menuntut keandalan fasilitas alat bantu pendaratan visual seperti PAPI agar dapat terus beroperasi secara optimal, mengingat PAPI berperan penting dalam memberikan panduan sudut kemiringan pendaratan (*glide path*) yang aman bagi pilot, khususnya pada kondisi jarak pandang terbatas. Dengan demikian, kegagalan operasi total PAPI pada Runway 07 dan 25 sejak tahun 2021 menjadi permasalahan yang mendesak untuk segera dianalisis dan ditindaklanjuti.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi jenis gangguan dan kerusakan pada sistem PAPI di Bandar Udara Nusawiru serta menentukan status kelayakan tiap komponen berdasarkan kriteria standar teknis yang berlaku; menganalisis faktor penyebab kerusakan melalui pemeriksaan kondisi kabel FL2XCY, transformator isolasi, transformer pit, fitting lampu, kelengkapan box PAPI, dan CCR; menentukan akar penyebab kerusakan menggunakan metode *Root Cause Analysis* (RCA) dan *Fishbone Diagram*; serta memberikan rekomendasi perbaikan dan pemeliharaan guna meningkatkan keandalan sistem PAPI di bandara tersebut. Penelitian ini berfokus pada analisis penyebab kerusakan lampu PAPI di bandara Nusawiru, yang mencakup perhitungan teoritis kapasitas trafo dan pembebanan Constant Current Regulator (CCR), hasil pengujian kelistrikan tahanan isolasi kabel FL2XCY dan trafo seri, evaluasi fisik housing dan fitting box PAPI, kondisi lingkungan bak trafo (transformer pit), sintesis hasil wawancara mendalam, serta formulasi penanggulangan masalah berbasis metode Root Cause Analysis (RCA) dan Diagram Fishbone 5M+E.

Tinjauan Pustaka

Precision Approach Path Indicator (PAPI) adalah sistem alat bantu pendaratan visual yang dipasang di sisi landasan pacu. Melalui kombinasi pendaran cahaya merah dan putih, pilot dapat memastikan apakah pesawat berada pada sudut pendaratan yang ideal (biasanya disetel pada 3 derajat). Keandalan PAPI didukung oleh sistem kelistrikan khusus yang dirangkai secara seri. Komponen utama pendukung sistem ini meliputi *Constant Current Regulator* (CCR) yang berfungsi sebagai perangkat catu daya untuk menyuplai arus listrik konstan, umumnya sebesar 6,6 A, agar intensitas cahaya lampu tetap stabil. Selain itu, terdapat kabel FL2XCY yang merupakan kabel bawah tanah berspesifikasi khusus guna mendistribusikan daya dari CCR ke setiap trafo seri. Trafo seri (*Series Transformer*) tersebut berfungsi mengisolasi aliran daya dari rangkaian primer ke beban lampu secara individual. Untuk keperluan inspeksi, sistem ini juga membutuhkan alat ukur berupa *insulation tester* untuk memastikan ketahanan isolasi kelistrikan dengan batas aman minimal 50 MΩ, serta *clinometer* guna mengukur ketepatan sudut kemiringan fisik kotak instalasi PAPI. Untuk mendiagnosis kerusakan sistem yang kompleks tersebut, metode *Root Cause Analysis* (RCA)

yang dipadukan dengan *Fishbone Diagram* sangat efektif digunakan melalui pendekatan 5M+E, yakni analisis yang meninjau aspek Manusia (*Man*), Mesin/Peralatan (*Machine*), Metode (*Method*), Material (*Material*), dan Lingkungan (*Environment*).

Beberapa penelitian terdahulu telah dilakukan terkait analisis keandalan fasilitas keselamatan penerbangan yang menjadi landasan penelitian ini. (Panjaitan & Sahputra, 2020) menguraikan spesifikasi dan instalasi sistem Constant Current Regulator (CCR) sebagai komponen utama penyuplai daya lampu PAPI. Di sisi lain, (Bahtiar & Soebiantoro, 2025) serta (Desryanto et al., 2024) menemukan bahwa penurunan tahanan isolasi kabel dan trafo pada sistem Airfield Lighting banyak dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti kelembapan, debu, dan usia instalasi yang telah lama beroperasi, sehingga pemeriksaan berkala menjadi krusial untuk menjaga keandalan sistem. Sementara itu, (Fretes, 2022) membuktikan efektivitas metode Root Cause Analysis (RCA) yang dipadukan dengan Fishbone Diagram dalam mengidentifikasi akar penyebab kerusakan peralatan kelistrikan, baik yang bersumber dari kondisi internal maupun eksternal peralatan. Berbeda dengan penelitian-penelitian sebelumnya, penelitian ini berfokus secara spesifik pada kegagalan operasional total sistem PAPI di Bandar Udara Nusawiru dengan memadukan analisis teknis kerusakan komponen dan evaluasi metode pemeliharaan menggunakan Fishbone Diagram, sehingga mampu memberikan rekomendasi perbaikan teknis dan manajerial yang tepat sasaran sesuai dengan kondisi geografis bandara tersebut.

METODE PENELITIAN

Penelitian Penelitian dilaksanakan di Bandar Udara Nusawiru, Pangandaran, pada sistem Precision Approach Path Indicator (PAPI) runway 07 dan 25, periode Januari–Juli 2026. Penelitian menggunakan pendekatan kombinasi kualitatif dan kuantitatif, dengan analisis Root Cause Analysis (RCA) dan Fishbone Diagram. Analisis data kombinasi merupakan proses pencarian, pengolahan, dan penyusunan data secara sistematis yang melibatkan dua jenis data sekaligus, yaitu data kuantitatif berupa angka atau hasil perhitungan, serta data kualitatif berupa hasil wawancara, observasi, catatan lapangan, dan dokumentasi. Kedua jenis data tersebut kemudian diintegrasikan agar temuan penelitian menjadi lebih utuh dan mudah dipahami. Metode kombinasi didefinisikan sebagai pendekatan penelitian yang melibatkan pengumpulan data kuantitatif dan kualitatif secara bersamaan, yang kemudian digabungkan untuk menghasilkan kesimpulan yang lebih menyeluruh (Gultom & Della Fadhilatunisa, S.E, 2023). Pendekatan ini berlandaskan filsafat pragmatisme, sehingga memungkinkan peneliti melaksanakan penelitian kualitatif dan kuantitatif secara bersamaan dalam satu rangkaian penelitian. Sejalan dengan hal tersebut, (Sugiyono, 2019) menjelaskan bahwa dalam penelitian kombinasi, analisis data dilakukan dengan memadukan cara analisis yang lazim digunakan pada metode kuantitatif dan kualitatif. Sifat analisis data kuantitatif bersifat deduktif, yaitu menguji data berdasarkan teori atau hipotesis yang telah ditetapkan sebelumnya, sedangkan analisis data kualitatif bersifat induktif, yaitu menyusun pemahaman atau pola berdasarkan data yang diperoleh di lapangan. Perpaduan kedua sifat analisis ini memungkinkan hasil penelitian tidak hanya digunakan untuk memahami makna suatu fenomena secara mendalam, tetapi juga untuk menghasilkan generalisasi yang lebih terukur.

Salah satu desain yang umum digunakan dalam metode kombinasi adalah *sequential explanatory*, yaitu desain yang mengumpulkan dan menganalisis data kuantitatif terlebih dahulu untuk menjawab pertanyaan penelitian, kemudian

dilanjutkan dengan pengumpulan data kualitatif untuk memperdalam penjelasan atas temuan tersebut (Gultom & Della Fadhilatunisa, S.E, 2023). Pendekatan serupa juga diterapkan pada penelitian di bidang navigasi penerbangan, misalnya pada studi mengenai dampak kinerja *Instrument Landing System* (ILS) yang kurang optimal terhadap keselamatan penerbangan, di mana analisis kualitatif digunakan untuk menggambarkan kondisi umum keselamatan, sementara analisis kuantitatif digunakan untuk menghitung dampak operasionalnya secara terukur (Sabur et al., 2020). Pemaduan data kuantitatif dan kualitatif ini bertujuan agar kedua temuan saling menguatkan (triangulasi) sekaligus saling melengkapi (komplementaritas), sehingga menghasilkan gambaran yang lebih komprehensif dibandingkan apabila penelitian hanya menggunakan satu metode saja (Gultom & Della Fadhilatunisa, S.E, 2023). Hal ini sejalan dengan pandangan (Sugiyono, 2019) bahwa untuk memperoleh data yang valid, reliabel, dan objektif dalam penelitian kombinasi, peneliti perlu menerapkan cara-cara pengujian keabsahan data yang berlaku pada metode kuantitatif maupun kualitatif secara bersamaan. Dalam penelitian ini, sisi kualitatif dianalisis menggunakan alat bantu seperti *Fault Tree Analysis* (FTA) atau *Root Cause Analysis* (RCA) untuk menelusuri akar penyebab kerusakan komponen, sedangkan sisi kuantitatif menggunakan data terukur berupa frekuensi kerusakan atau *downtime* pada tiap komponen, yaitu CCR, kabel FL2XCY, trafo, *connector kit*, bak trafo, dan *box* PAPI. Kedua hasil analisis tersebut kemudian dipadukan untuk menghasilkan gambaran yang lebih objektif mengenai permasalahan yang diteliti.

Populasi dan Sampel

Populasi meliputi 8 unit *box* PAPI (4 unit di runway 07 dan 4 unit di runway 25) beserta komponen pendukungnya (CCR, kabel FL2XCY, trafo isolasi seri, dan konektor). Sampel ditentukan dengan teknik *purposive sampling* (Sugiyono, 2022), meliputi:

- Unit lampu PAPI (kondisi fisik dan operasional)
- Kabel primer FL2XCY (kondisi tahanan isolasi)
- Transformator isolasi seri (kondisi sisi primer-sekunder)
- Bak kontrol/transformer pit
- Kapasitas Constant Current Regulator (CCR)

Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data sekunder dan primer dilakukan melalui tiga teknik utama:

- a. Wawancara — dengan kepala bandara dan teknisi listrik, mencakup riwayat pemasangan, jadwal pemeliharaan, prosedur perbaikan, serta kendala instalasi PAPI.
- b. Observasi, terdiri atas:
 - Pemeriksaan fisik komponen housing, fitting, filter, serta pengujian deviasi sudut elevasi PAPI menggunakan Clinometer presisi.
 - Pengujian tahanan isolasi kabel FL2XCY dan trafo seri menggunakan Insulation Tester Kyoritsu KEW 3122A dengan tegangan uji 5.000 V DC sesuai prosedur Peraturan Direktur Jenderal Perhubungan Udara Nomor PR 26 Tahun 2022 (ambang batas minimum $R_{iso} \geq 50 M\Omega$).
 - Pemeriksaan fisik bak trafo (genangan air, korosi, kondisi konektor)
- c. Dokumentasi — sebagai data pendukung hasil observasi.
- d. Dalam menganalisis kerusakan dan kelayakan sistem Precision Approach Path Indicator (PAPI), diperlukan beberapa dasar teori kelistrikan yang meliputi Hukum Ohm, resistansi

kabel, rugi-rugi daya, serta ketentuan tahanan isolasi, yang menjadi acuan perhitungan dalam penelitian ini (Budi et al., 2024).

Dasar perhitungan pertama yang digunakan adalah Hukum Ohm, yang menyatakan hubungan antara tegangan (V), arus (I), dan resistansi (R) melalui persamaan:

$$V = I \times R$$

di mana V adalah tegangan (volt), I adalah arus (ampere), dan R adalah resistansi atau hambatan (ohm). Hukum ini menjadi dasar untuk menurunkan rumus rugi-rugi daya pada bagian selanjutnya. Selanjutnya, resistansi penghantar kabel tembaga dihitung menggunakan persamaan:

$$R = \rho \times l / A$$

di mana R adalah resistansi kabel (Ω), ρ adalah tahanan jenis konduktor (untuk tembaga sebesar $0,0175 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$), l adalah panjang kabel (meter), dan A adalah luas penampang kabel (mm^2). Rumus ini diterapkan untuk menghitung hambatan tiap segmen kabel FL2XCY dengan luas penampang 6 mm^2 berdasarkan panjang jalurnya masing-masing, di mana semakin panjang kabel maka semakin besar pula resistansi dan rugi dayanya. Nilai resistansi kabel yang diperoleh kemudian digunakan untuk menghitung rugi-rugi daya (power loss) menggunakan persamaan:

$$P = I^2 \times R$$

di mana P adalah rugi daya (watt), I adalah arus yang mengalir (tetap sebesar 6,6 A untuk sirkuit AFL), dan R adalah resistansi kabel hasil perhitungan sebelumnya. Rumus ini merupakan turunan dari Hukum Ohm ($P = V \times I$ dan $V = I \times R$, sehingga $P = I^2 R$), yang menjelaskan energi yang hilang sebagai panas akibat hambatan kabel di sepanjang jalur distribusi. Selain rugi daya pada kabel, rugi daya juga terjadi pada isolating transformer. Berdasarkan asumsi teknis yang umum digunakan, rugi daya pada masing-masing isolating transformer diasumsikan sebesar 10% dari daya lampu yang terpasang padanya. Berdasarkan ketiga komponen rugi daya tersebut, total kapasitas beban Constant Current Regulator (CCR) dihitung dengan menjumlahkan tiga komponen utama, yaitu total daya lampu (jumlah lampu $\times$ daya lampu),

- total rugi daya isolating transformer (jumlah lampu $\times$ 10% daya lampu),
- total rugi daya penggunaan kabel (dihitung dari $R = \rho l/A$ dan $P = I^2 R$).

Ketiga komponen tersebut dijumlahkan untuk memperoleh total kapasitas beban CCR yang selanjutnya dibandingkan dengan kapasitas operasional maksimum CCR guna menentukan kelayakan sistem.

Teknik Analisis Data

Data hasil observasi, pengukuran, dan wawancara dikelompokkan untuk mengidentifikasi jenis gangguan pada CCR, kabel FL2XCY, trafo seri, dan konektor. Analisis dilanjutkan dengan RCA, menggunakan Fishbone Diagram untuk mengelompokkan penyebab ke dalam kategori Method, Machine, Material, Man, dan Environment (5M+E).

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Pembahasan pada bagian ini menyajikan seluruh temuan teknis di lapangan yang diolah secara runtut mulai dari evaluasi kapasitas pembebanan, pengukuran kelistrikan, kondisi fisik, wawancara, hingga analisis akar penyebab kegagalan sistem.

Perhitungan Kapasitas Trafo dan Beban Sistem PAPI

Sistem PAPI di Bandar Udara Nusawiru menggunakan 4 unit box PAPI pada masing-masing runway. Setiap unit box PAPI dilengkapi dengan 3 buah lampu halogen spesifikasi **105 Watt / 6.6 Ampere**. Maka daya aktif total per unit box PAPI adalah:

$$P_{box} = 3 \times 105 \text{ Watt} = 315 \text{ Watt}$$

$$P_{total_4box} = 4 \times 315 \text{ Watt} = 1.260 \text{ Watt}$$

Setiap lampu PAPI dilengkapi dengan trafo isolasi tersendiri, dengan rugi-rugi sebesar 10% dari daya lampu yang terpasang, rugi-rugi trafo isolasi dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Rugi trafo} &= \text{Jumlah lampu} \times (10\% \times \text{daya lampu}) \\ &= 4 \times (10\% \times 315 \text{ W}) = 126 \text{ W} \end{aligned}$$

Kapasitas CCR Terhadap Beban Nyata Sistem PAPI

Penyaluran daya dari Constant Current Regulator (CCR) menuju unit PAPI melalui kabel primer tipe FL2XCY **1 × 6 mm²**. Panjang total kabel pada Runway 07 adalah **1.540 meter** dan Runway 25 sepanjang **1.337 meter**. Resistansi spesifik kabel FL2XCY **6 mm²** adalah **3.08 Ω/km**. Arus nominal keluaran CCR pada tingkat kecerahan maksimum (Step 5) adalah **I = 6,6 Ampere**. Rugi-rugi daya listrik (**P_{loss}**) pada sirkuit kabel FL2XCY Runway 07 dihitung sebagai berikut:

$$R = \rho \times l/A = 0,0175 \times 1.540/6 = 4,49 \Omega$$

$$P = I^2 \times R = 6,6^2 \times 4,49 = 195,6 \text{ watt}$$

$$\text{Beban R/W 07} = 1.260 \text{ W} + 126 \text{ W} + 195,6 \text{ W} = 1.521,6 \text{ W}$$

$$S = 1.521,6 \text{ W} \div (1.000 \times 0,8) = 1,902 \text{ kVA}$$

Perhitungan yang sama dilakukan pada sirkuit PAPI runway 25

$$R = \rho \times l/A = 0,0175 \times 1.337/6 = 3,90 \Omega$$

$$P = I^2 \times R = 6,6^2 \times 3,90 = 169,87 \text{ watt}$$

$$\text{Beban R/W 25} = 1.260 \text{ W} + 126 \text{ W} + 169,87 \text{ W} = 1.555,87 \text{ W}$$

$$S = 1.555,87 \text{ W} \div (1.000 \times 0,8) = 1,94 \text{ kVA}$$

Maka, total pembebanan nyata pada sirkuit PAPI Runway 07 dan 25 yang harus ditanggung oleh unit CCR adalah:

$$S_{\text{beban_gabungan}} = 1,902 \text{ kVA (R/W 07)} + 1,94 \text{ kVA (R/W 25)} = 3,842 \text{ kVA}$$

$$\text{Presentase gabungan} = (3.842 \text{ VA} / 4.000 \text{ VA}) \times 100\% = 96,05\%$$

Temuan Evaluasi CCR: Hasil perhitungan menunjukkan bahwa secara teoritis kapasitas keluaran CCR sebesar 4 kVA hampir mencapai batas maksimalnya dalam memenuhi kebutuhan daya gabungan sistem PAPI pada kedua runway, dengan total beban aktual sebesar 3.842 VA atau setara 96,05% dari kapasitas nominal CCR. Angka ini telah melampaui

batas pembebanan yang direkomendasikan, yaitu sebesar 80% dari kapasitas terpasang atau setara 3.200 VA, sehingga beban aktual sudah melebihi ambang rekomendasi tersebut sebesar 642 VA, dengan sisa margin kapasitas hanya sekitar 158 VA ($\pm 3,95\%$) menuju batas maksimum CCR.

Hasil Pengukuran Tahanan Isolasi Instalasi PAPI

Pengujian tahanan isolasi dilakukan pada sirkuit kabel FL2XCY dan trafo seri mengacu pada Peraturan Direktur Jenderal Perhubungan Udara Nomor PR 26 Tahun 2022, di mana standar nilai tahanan isolasi minimum adalah $R_{iso} \geq 50 \text{ M}\Omega$.

Tabel 1. Hasil Pengukuran Tahanan Isolasi Kabel FL2XCY Runway 07 & 25

Lokasi Runway	Segmen Pengukuran Kabel	Nilai Standar	Hasil Ukur	Status Kelayakan
Runway 07	CCR to Box A	$> 50 \text{ M}\Omega$	20 $\text{M}\Omega$	Tidak Standar
	Box A to Box B	$> 50 \text{ M}\Omega$	1.500 $\text{M}\Omega$	Standar
	Box B to Box C	$> 50 \text{ M}\Omega$	0 $\text{M}\Omega$ (Short)	Tidak Standar
	Box C to Box D	$> 50 \text{ M}\Omega$	110 $\text{M}\Omega$	Standar
	Box D to CCR	$> 50 \text{ M}\Omega$	0 $\text{M}\Omega$ (Short)	Tidak Standar
Runway 25	CCR to Box A	$> 50 \text{ M}\Omega$	0 $\text{M}\Omega$ (Short)	Tidak Standar
	Box A to Box B	$> 50 \text{ M}\Omega$	10 $\text{M}\Omega$	Tidak Standar
	Box B to Box C	$> 50 \text{ M}\Omega$	0 $\text{M}\Omega$ (Short)	Tidak Standar
	Box C to Box D	$> 50 \text{ M}\Omega$	180 $\text{M}\Omega$	Standar
	Box D to CCR	$> 50 \text{ M}\Omega$	70 $\text{M}\Omega$	Standar

Berdasarkan Tabel 1, sebanyak **60% titik segmen kabel FL2XCY** (6 dari 10 segmen) mengalami kegagalan isolasi parah dengan nilai di bawah 50 $\text{M}\Omega$, bahkan 4 segmen menunjukkan nilai 0 $\text{M}\Omega$ (hubung singkat ke tanah).

Tabel 2. Hasil Pengukuran Tahanan Isolasi Trafo Seri Isolasi (300 W)

No	Unit Trafo Seri	Standar Minimum	Hasil Ukur R_{iso}	Kondisi Fisik / Status
1	Trafo PAPI A Runway 07	50 $\text{M}\Omega$	12 $\text{M}\Omega$	Lembab / Tidak Standar
2	Trafo PAPI B Runway 07	50 $\text{M}\Omega$	550 $\text{M}\Omega$	Standar
3	Trafo PAPI C Runway 07	50 $\text{M}\Omega$	0 $\text{M}\Omega$	Tidak Standar
4	Trafo PAPI D Runway 07	50 $\text{M}\Omega$	800 $\text{M}\Omega$	Standar
5	Trafo PAPI A Runway 25	50 $\text{M}\Omega$	0 $\text{M}\Omega$	Tidak Standar
6	Trafo PAPI B Runway 25	50 $\text{M}\Omega$	15 $\text{M}\Omega$	Lembab / Tidak Standar
7	Trafo PAPI C Runway 25	50 $\text{M}\Omega$	620 $\text{M}\Omega$	Standar
8	Trafo PAPI D Runway 25	50 $\text{M}\Omega$	710 $\text{M}\Omega$	Standar

Hasil pengujian trafo seri pada Tabel 2 menunjukkan bahwa **50% trafo seri** (4 dari 8 unit) tidak memenuhi standar keselamatan kelistrikan, di mana 2 unit mengalami bocor total (0 $\text{M}\Omega$) akibat terendam air di dalam bak trafo.

Hasil Pemeriksaan Fisik Box PAPI, Fitting, dan Sudut Elevasi

Pemeriksaan fisik komprehensif dilakukan pada 8 unit box PAPI (Runway 07 dan 25). Aspek yang diperiksa meliputi keutuhan housing, kelayakan fitting lampu, keberadaan lampu halogen, serta keakuratan sudut penyetelan optik menggunakan Clinometer.

Tabel 3. Evaluasi Kondisi Komponen Box PAPI dan Fitting Lampu

Unit PAPI	Kondisi Housing Box	Fitting Lampu Keramikan	Kelengkapan Lampu Halogen	Status Kebutuhan
PAPI A R/ W 07	Kusam, Seal Gasket Getas	2 Rusak / Korosi, 1 Baik	Lampu Putus / Hilang 2	Perbaikan/ Replacement
PAPI B R/ W 07	Baik, Baut Berkarat	1 Rusak, 2 Baik	Lampu Lengkap (3 Unit)	Perawatan / Ganti Fitting
PAPI C R/ W 07	Lensa Buram & Berdebu	3 Rusak	Lampu Putus Total	Overhaul Total
PAPI D R/ W 07	Baik	3 Baik	Lampu Lengkap (3 Unit)	Pembersihan Optik
PAPI A R/ W 25	Engsel Korosi, Retak Halus	2 Rusak, 1 Baik	Lampu Putus 2 Unit	Ganti Fitting & Lampu
PAPI B R/ W 25	Kusam, Seal Rusak	2 Rusak (Korosi)	Lampu Lengkap	Ganti Fitting & Seal
PAPI C R/ W 25	Baik	1 Rusak, 2 Baik	Lampu Lengkap	Ganti 1 Fitting
PAPI D R/ W 25	Baik	3 Baik	Lampu Lengkap	Siap Operasi (Re-setting)

Rangkuman Kondisi Fisik:

- **Housing Box:** 37,5% unit mengalami degradasi fisik (seal getas, engsel korosi, lecet fisik).
- **Fitting Lampu:** Dari total 24 fitting lampu (8 box × 3 fitting), sebanyak **11 fitting (45,8%) mengalami kerusakan** fisik/korosi berat akibat oksidasi dan kelembapan tinggi.

Hasil Pemeriksaan Kondisi Fisik Bak Trafo (Transformer Pit)

Bak trafo berfungsi melindungi trafo seri dan primary/secondary connector kit dari lingkungan luar. Hasil observasi menunjukkan bahwa **87,5% bak trafo (7 dari 8 bak) dalam kondisi buruk**. Mayoritas bak trafo tergenang air keruh dan tertimbun endapan lumpur padat setinggi 10–25 cm. Penyebab utama genangan air adalah ketiadaan sistem drainase dasar (porous drain), tutup bak trafo yang tidak dilengkapi rubber seal kedap air, serta posisi bak yang lebih rendah dari elevasi permukaan tanah sekitar. Air dan lumpur yang merendam konektor dan trafo seri selama bertahun-tahun menjadi pemicu utama masuknya uap air ke dalam isolasi kabel dan penurunan nilai resistansi hingga 0 MΩ.

Data Hasil Wawancara Narasumber

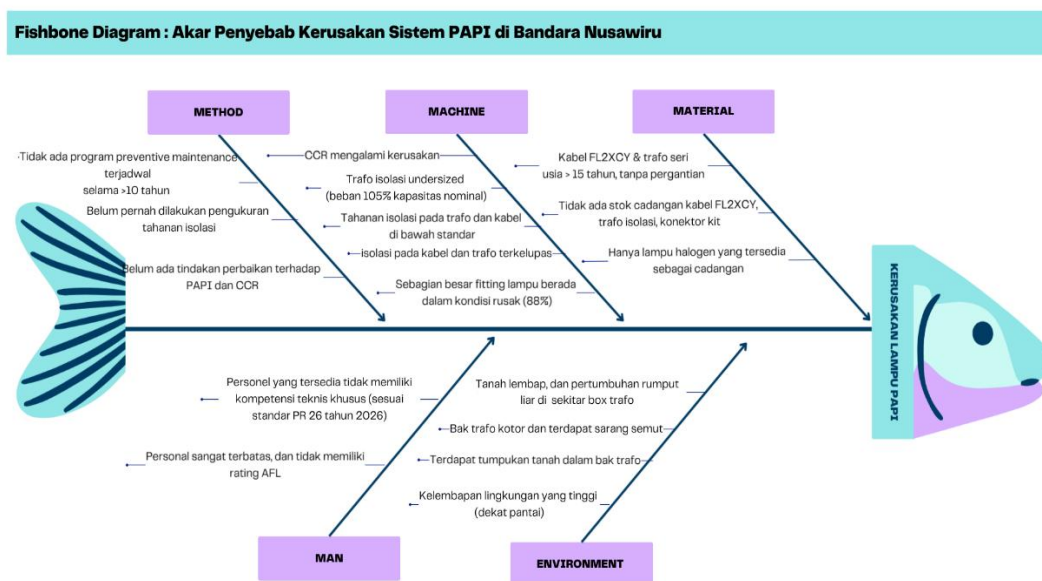
Wawancara terstruktur dilakukan bersama Kepala Bandar Udara Nusawiru dan Teknisi Listrik Bandara. Sintesis poin-poin utama wawancara disajikan sebagai berikut:

1. Siklus Operasional: PAPI R/W 25 terpasang tahun 2010 dan R/W 07 tahun 2011. Kedua sistem PAPI telah mengalami kegagalan fungsi total sejak tahun 2021.

2. Program Pemeliharaan: Tidak terdapat SOP dan Standar Operasional Pemeliharaan Preventif (preventive maintenance schedule) terstruktur untuk fasilitas AFL. Pemeliharaan selama ini bersifat reaktif (corrective maintenance) jika ada keluhan dari penerbang.
3. Ketersediaan Anggaran dan Suku Cadang: Alokasi anggaran pemeliharaan fasilitas kelistrikan sangat terbatas. Suku Cadang pengganti (kabel FL2XCY, trafo seri 300W, fitting lampu spesifik, dan modul CCR) tidak tersedia di gudang penyimpanan (zero stock).
4. Peralatan Pengujian: Unit pengelola bandara tidak memiliki alat ukur kelistrikan khusus seperti Insulation Tester (Megger 5kV), sehingga pengujian rutin tahanan isolasi yang tidak pernah dilaksanakan.

Root Cause Analysis (RCA) dan Fishbone Diagram (5M+E)

Berdasarkan sintesis data perhitungan, pengukuran, observasi fisik, dan wawancara, disusun analisis akar masalah menggunakan kerangka **Fishbone Diagram 5M+E** untuk mengidentifikasi penyebab utama tidak beroperasinya PAPI Runway 07 dan 25.



Gambar 1. Fishbone Diagram

1. MAN (Sumber Daya Manusia)

- Keterbatasan jumlah personel teknis kelistrikan bandara yang tersertifikasi AFL.
- Kurangnya pelatihan berkala mengenai prosedur pemeliharaan dan kalibrasi sistem PAPI.

2. METHOD (Metode & Prosedur)

- Tidak ada program preventive maintenance terjadwal selama >10 tahun
- Belum pernah dilakukan pengukuran tahanan isolasi sebelumnya
- Belum ada tindakan perbaikan meski PAPI sudah mati sejak 2021

3. MACHINE (Peralatan & Fasilitas Utama)

- CCR mengalami kegagalan operasi total akibat pembebanan berlebih (overload) dan usia pakai.
- Ketiadaan peralatan ukur mandiri di unit teknis bandara seperti Insulation Tester

4. MATERIAL (Komponen & Suku Cadang)

- Sebanyak 60% kabel FL2XCY dan 50% trafo seri mengalami kerusakan isolasi (breakdown).
- Fitting lampu mengalami korosi berat (45,8% rusak) dan seal housing getas.
- Ketiadaan stok suku cadang pengganti (zero spare part inventory).

5. ENVIRONMENT (Lingkungan Lapangan)

- Kondisi bak trafo tergenang air dan lumpur akibat drainase buruk dan seal tutup rusak.
- Tingkat kelembapan tanah tinggi dan paparan korosif lingkungan pesisir pantai.
- Pergeseran struktur tanah pondasi yang menyebabkan deviasi sudut elevasi PAPI.

Sintesis Root Cause Analysis (RCA): Akar penyebab utama (root cause) dari tidak berfungsinya sistem PAPI di Bandar Udara Nusawiru adalah ketiadaan program pemeliharaan preventif yang terstruktur dan terencana (Absence of Structured Preventive Maintenance Program). Ketiadaan program ini memicu akumulasi kerusakan berantai (domino effect), dimulai dari masuknya air ke bak trafo, merusak isolasi kabel/ trafo, memicu pembebanan abnormal pada CCR, hingga akhirnya menyebabkan kerusakan total pada CCR dan seluruh komponen optik-kelistrikan PAPI.

KESIMPULAN

Berdasarkan pengolahan data teknis dan pembahasan komprehensif Bab IV, diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Kondisi komponen utama menunjukkan tingkat kerusakan yang signifikan, yaitu Constant Current Regulator (CCR) rusak total sehingga seluruh lampu PAPI pada runway 07 dan 25 tidak beroperasi sejak tahun 2021; kabel FL2XCY mengalami degradasi isolasi pada 60% titik pengukuran; fitting lampu rusak sebesar 46%, serta transformator seri menunjukkan penurunan kondisi pada 50% unit, disertai kapasitas trafo yang tidak sesuai kebutuhan daya aktual.
2. Hasil Root Cause Analysis (RCA) dengan Fishbone Diagram mengidentifikasi lima kategori penyebab (5M+E) — method, machine, material, man, dan environment — yang saling berkaitan dan bermuara pada satu akar masalah utama, yaitu ketiadaan sistem pemeliharaan preventif yang terstruktur selama lebih dari 10 tahun.
3. Berdasarkan akar masalah tersebut, dirumuskan 10 rekomendasi tindakan perbaikan, mencakup tindakan korektif segera (penggantian CCR, kabel, trafo seri, fitting lampu, serta realignment sudut PAPI) dan tindakan preventif jangka menengah-panjang (penerapan program preventive maintenance terjadwal, pengadaan insulation tester, penyediaan stok suku cadang, penugasan personel bersertifikasi AFL, serta perbaikan kondisi bak trafo).

Saran

Guna memulihkan keandalan operasional sistem PAPI di Bandar Udara Nusawiru Pangandaran, direkomendasikan sepuluh langkah tindakan perbaikan sebagai berikut:

1. Penggantian unit Constant Current Regulator (CCR) baru dengan kapasitas minimal 5.0 kVA yang dilengkapi proteksi open-circuit dan surge arrester.
2. Penggantian (rewiring) pada 6 segmen kabel FL2XCY yang mengalami breakdown isolasi (0–20 MΩ).
3. Penggantian 4 unit trafo seri isolasi 300W yang mengalami penurunan tahanan isolasi.
4. Penggantian 11 unit fitting lampu ceramic socket dan penggantian seluruh lampu halogen yang putus.
5. Pembersihan total interior bak trafo (transformer pit) serta pembuatan saluran drainase pembuangan air (porous drain).
6. Pemasangan ganjal seal karet kedap air (rubber gasket) pada seluruh tutup bak trafo dan housing PAPI.
7. Penyusunan dan pengesahan SOP Pemeliharaan Preventif (Preventive Maintenance) harian, mingguan, bulanan, dan tahunan mengacu pada PR 26 Tahun 2022.
8. Pengadaan peralatan pendukung pemeliharaan mandiri berupa Insulation Tester 5kV dan Clinometer digital.
9. Pelaksanaan pelatihan dan sertifikasi kompetensi Airfield Lighting System bagi teknisi listrik bandara secara berkesinambungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Azhari, R. M., & Kartini, D. S. (2023). *Strategi Pemerintah untuk Meningkatkan Pendapatan Asli Daerah dalam Pengembangan Pariwisata di Kabupaten Pangandaran Tahun 2021*. 7, 3407–3415.
- Bahtiar, M., & Soebiantoro, R. (2025). *Analisis Tahanan Isolasi Kabel dan Trafo Approach Light pada Runway 35 di Bandar Udara Abdulrachman Saleh*. 01(02), 73–81.
- Bima, M. S. (2023). *Kepuasan Penumpang Wings Air Di Bandar Udara Sultan Sumber : Kementerian Perhubungan Republik Indonesia Pelayanan Terhadap Kepuasan Penumpang Maskapai Lion Air di Banda Udara Abdulrachman*. 5(2), 221–230.
- Budi, S., Situmeang, A., Tharo, Z., Anisah, S., Sains, F., Teknologi, D., Pembangunan, U., & Budi, P. (2024). *Analisis sistem constant current regulator pada airfield lighting system di bandar udara constant current regulator system analysis on airfield lighting systems at airports*. 7, 434–446.
- Data Arus Lalu Lintas Angkutan Udara Bandar Udara Nusawiru Pangandaran*. (2026).
- Desryanto, N., Sptra, M. A., Saputro, R., Arnas, Y., & Analysis, F. T. (2024). *Tahanan Isolasi Runway Edge Light Circuit 2 Dengan Metode Fault Tree Analysis (Fta) Di Bandar Udara*. 7, 16152–16162.
- Direktorat Jenderal Perhubungan Udara. (2023). *Keputusan Direktur Jenderal Perhubungan Udara No Pr 21 Tahun 2023*.
- Frete, R. A. De. (2022). *Analisis Penyebab Kerusakan Transformator Menggunakan Metode Rca (Fishbone Diagram And 5-Why Analysis) Di Pt . Pln (Persero) Kantor Pelayanan Kiandarat*. 16(2).
- Gultom, N. B., & Della Fadhilatunisa, S.E, M. A. (2023). *Metodologi Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan Kombinasi* (S. Bahri (Ed.)). Media Sains Indonesia.
- Indonesia, R. (2009). *Undang-Undang Nomor 1 Tahun 2009 Tentang Penerbangan*.



- Kementerian Perhubungan Republik Indonesia. (2021). *Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor Pm 36 Tahun 2021* (Nomor 583).
- Panjaitan, A., & Sahputra, A. (2020). *Analisis Sistem Constant Current Regulator pada Lampu Precision Approach Path Indikator di Bandara Udara*. 9(2), 31–35.
- Sabur, F., Bahrawi, A., & Raharjo, M. A. (2020). *Analisis Pengaruh Instrument Landing System (ILS) untuk Peningkatan Pelayanan Keselamatan di Bandar Udara Haluleo Kendari Analysis of the Influence of Instrument Landing System (ILS) for Improving Safety Services in Haluleo Airport of Kendari*. 3, 78–87.
- Sandro, A., Tostes, M., Marini-pereira, L., Moraes, A. D. O., Peixoto, D. O., Dietzsch, G., Smidt, S., & Gonçalves, M. (2025). *Feasibility Assessment of Unmanned Aerial Systems for Precision Approach Path Indicator Inspections : a Cost-Effective and Sustainable Alternative*.
- Sugiyono. (2019). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D* (Edisi Kedu). Alfabeta.
- Udara, D. J. P. (2014). *Keputusan Direktur Jenderal Perhubungan Udara Nomor KP 407 Tahun 2014 tentang Rencana Induk Bandara Nusawiru*.