Journal Transformation of Mandalika
https://ojs.cahayamandalika.com/index.php/jtm
Vol. 7, No. 5, 2026
e-ISSN: 2745-5882, p-ISSN: 2962-2956
hh. 182-195

Rancangan sistem catu daya listrik pada bandara sultan bantilan tolitoli

Vovi Azepi G. Soeka Raja[1],Edy Kurniawan[2],Suse Lamtiar S[3]*
[1,2,3]Program studi diploma IV teknik listrik bandara Politeknik penerbangan indonesia curug
*Corresponding Author e-mail: suse.lamtiar@ppicurug.ac.id
Email: voviazepi@gmail.com

Abstract

Airports are critical facilities that require a reliable electrical power supply system to ensure safety and continuity of flight operations. The construction of a new terminal at Sultan Bantilan Tolitoli Airport has significantly increased electrical load demand; however, this development was not accompanied by an increase in secondary power supply capacity. This condition potentially reduces the reliability of the electrical system, particularly during disturbances in the main power source.This study aims to analyze the existing electrical power supply system, evaluate the adequacy of power capacity relative to current load demands, and design a more reliable power distribution system. The research employs a descriptive–explanatory method with a case study approach. The research stages include electrical load data collection, analysis of primary and secondary power supply capacity, separation of essential and non-essential loads, and system modeling and simulation using ETAP software.The results indicate that the existing secondary power supply or generator set capacity are insufficient to support the airport's total electrical load after terminal expansion. Redesigning the distribution system by prioritizing essential loads and optimizing generator operation improves the reliability of power supply to critical loads. ETAP simulation results show that the proposed system meets acceptable technical limits for power flow and voltage profiles. Therefore, the proposed power supply system design is considered feasible to enhance the reliability and continuity of electrical power supply at Sultan Bantilan Tolitoli Airport.

Keywords: Airport, Power Supply, Generator Set, Distribution. Esential Loads, ETAP

Abstrak

Bandar udara merupakan fasilitas vital yang memerlukan sistem catu daya listrik andal untuk menjamin keselamatan dan kelangsungan operasional penerbangan. Pengembangan terminal baru di Bandara Sultan Bantilan Tolitoli menyebabkan peningkatan signifikan kebutuhan beban listrik, namun tidak diikuti dengan penambahan kapasitas catu daya sekunder. Kondisi tersebut berpotensi menurunkan keandalan sistem kelistrikan, terutama saat terjadi gangguan pada catu daya utama.Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kondisi sistem catu daya listrik eksisting, mengevaluasi kecukupan kapasitas daya terhadap kebutuhan beban aktual, serta merancang sistem distribusi catu daya yang lebih andal. Metode penelitian yang digunakan adalah metode deskriptif–eksplanatif dengan pendekatan studi kasus. Tahapan penelitian meliputi pengumpulan data beban listrik, analisis kapasitas catu daya primer dan sekunder, pemisahan beban esensial dan non-esensial, serta pemodelan dan simulasi sistem menggunakan perangkat lunak ETAP.Hasil analisis menunjukkan bahwa kapasitas catu daya sekunder atau genset eksisting belum mencukupi untuk menopang seluruh beban bandara setelah pengembangan terminal. Perancangan ulang sistem distribusi dengan pemisahan beban serta optimalisasi penggunaan genset mampu meningkatkan keandalan suplai listrik pada beban kritikal. Simulasi ETAP menunjukkan bahwa sistem yang dirancang memenuhi batas teknis aliran daya dan profil tegangan yang diizinkan. Dengan demikian, rancangan sistem catu daya yang diusulkan dinilai layak untuk meningkatkan keandalan dan kontinuitas suplai listrik di Bandara Sultan Bantilan Tolitoli.

Kata kunci: Bandara, Catu Daya, Genset, Distribusi, Beban Esensial, ETAP

How to Cite: Vovi Azepi G. Soeka Raja,Edy Kurniawan,Suse Lamtiar S. (2026). Rancangan sistem catu daya listrik pada bandara sultan bantilan tolitoli *Journal Scientific of Mandalika (JSM) E-ISSN 2745-5955 | P-ISSN 2809-0543, 7*(2), 265-275. https://doi.org/10.36312/10.36312/vol4iss1pp182-195

Copyright©2026, Author (s)
This is an open-access article under the CC-BY-SA License.

https://doi.org/10.36312/10.36312/vol4iss1pp182-195

PENDAHULUAN

Bandar Udara Sultan Bantilan Tolitoli merupakan bandar udara yang dikelola oleh Kementerian Perhubungan yang berlokasi di Tolitoli Sulawesi Tengah. Secara geografis Bandar Udara Sultan Bantilan Tolitoli terletak pada koordinat 01° 07' 23" LU 120° 47' 35" BT serta secara teritorial terletak 12 KM dari Kota Tolitoli. Bandar udara dengan kode ICAO yaitu WAFL dan kode IATA yaitu TLI ini melayani penerbangan. Bandara ini melayani penerbangan domestik dengan intensitas seminggu sekali. GAmbar PINDAH LAMPIRAN

Bandara merupakan salah satu fasilitas vital yang harus beroperasi secara terus-menerus tanpa gangguan, terutama dalam hal penyediaan energi listrik. Listrik memegang peran penting dalam mendukung sistem navigasi penerbangan,

komunikasi, pencahayaan landasan, sistem keamanan, serta layanan informasi kepada penumpang. Menurut Undang-Undang Nomor I Tahun 2009 tentang Penerbangan, Bandar Udara adalah fasilitas penting yang menghubungkan transportasi udara dengan transportasi darat, berfungsi sebagai tempat transit dan layanan bagi penumpang dan barang. Oleh karena itu suatu Bandar Udara Wajib mempunyai Catu Daya Cadangan menurut Permenhub Nomor 36 Tahun 2021 tentang Standarisasi Fasilitas Bandar Udara demi tercapainya keselamatan penerbangan. Gangguan pada pasokan listrik dapat mengakibatkan dampak signifikan terhadap kelancaran operasional dan bahkan keselamatan penerbangan.

Secara teori, pengelolaan infrastruktur kritikal seperti bandara diwajibkan memiliki sistem catu daya sekunder (backup power supply) untuk mengantisipasi pemadaman dari sumber utama seperti PLN. Sistem ini umumnya berupa genset (*generator set*) atau *Uninterruptible Power Supply* (UPS) yang dapat langsung aktif ketika sumber listrik utama terputus. Teori manajemen risiko juga menekankan pentingnya keandalan sistem cadangan ini sebagai bagian dari mitigasi gangguan teknis.

Tabel I.I
Tabel Data Catu Daya di Bandara Sultan Bantilan Tolitoli
Sumber : Dokumen *Aerodrome Manual* (AM) Bandara Sultan Bantilan Tolitoli

NO	SUMBER DAYA FASILITAS PEMBANGKIT LISTRIK	TYPE / MERK (PABRIK)	TENAGA / KAPASITAS (KVA)	AMPERE COSPHI	TAHUN OPERASI	AUTO MATIC
1.	Generator Set	Deutz	50 KVA	0,8	2009	ACOS SISTEM
2.	Generator Set	MWM	125 KVA	0,8	2009	ACOS SISTEM
3.	P L N	-	240 KVA	-	2024	-
4.	UPS	Bori	80 KVA	-	-	-

Saat ini Bandara Sultan Bantilan telah melakukan kenaikan daya langganan PLN dikarenakan adanya bangunan terminal penumpang baru yang tentunya dilengkapi fasilitas kelistrikan dan mekanikal yang lebih besar dari sebelumnya, oleh karena itu dilakukan penambahan daya utama dari 131 kVA menjadi 240 kVA dengan distribusi Tegangan Menengah. Namun, di Bandar Udara Sultan Bantilan Tolitoli, diketahui bahwa kapasitas genset yang tersedia hanya sebesar 125 kVA dan belum ada penambahan kapasitas catu daya sekunder yang sesuai dengan beban yang ada saat ini pasca dibangun dan dioperasikannya terminal baru pada Bandara Sultan Bantilan Tolitoli. Hal ini tentunya menimbulkan permasalahan dimana pada saat catu daya utama padam, catu daya sekunder tidak bisa membackup seluruh beban yang ada saat ini.

Peristiwa nyata terjadi pada 20 September 2024, saat PLN (catu daya utama) mengalami pemadaman selama kurang lebih 8 jam di hari operasional bandara pada saat sebelum adanya kegiatan operasional. Akibatnya, teknisi listrik harus memilih dan matikan beberapa fasilitas yang ada di kantor Bandara Sultan Bantilan dengan tujuan agar beban yang di supplai dari genset (catu daya sekunder) tercukupi, terkhusus untuk beban-beban esensial seperti alat bantu pendaratan visual dan peralatan navigasi dan komunikasi. Hal tersebut terjadi dikarenakan tidak adanya jalur distrubusi catu daya yang handal dengan pembagian beban esensial dan non-esesial sesuai dengan peraturan KP 326 Tahun 2019 MOS 139 VOL I Aerodrome point 8.1.10.

Saat ini pemerintahan Indonesia sedang melakukan efesiensi anggaran, begitu juga dengan Kementerian Perhubungan termasuk di Bandara Sultan Bantilan Tolitoli. Hal tersebut menjadi salah satu pertimbangan dimana belum tersedianya catu daya sekunder yang sesuai dengan beban keseluruhan yang ada di bandara. Oleh karena itu penelitian ini lebih menekannya ke arah pembuatan rancangan pengoptimalan sistem distribusi catu daya dengan pembagian beban esensial dan non-esensial guna terlaksananya kegiatan operasional pada saat catu daya utama mengalami kegagalan dengan memperhatikan kapasitas suplai catu daya sekunder yang tersedi Permasalahan ini menunjukkan adanya kesenjangan antara kapasitas catu daya sekunder yang tersedia dan kebutuhan aktual operasional. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian untuk mengevaluasi kebutuhan sebenarnya dan menilai efektivitas solusi berupa perancangan jalur distribusi baru yang meliputi beban *Essential* dan *Non-Essential* guna tercapainya operasional yang memadai serta menjaga *realibility* dan *aviability* dari catu daya sekunder yang tersedia.

Diperlukan suatu perencanaan pada system distibusi catu daya listrik pada Bandara Sultan Bantilan untuk menjamin keandalan operasional menggunakan metode *Fishbone Diagram*, yaitu antara lain:

1. Sumber Daya Manusia
   a. Kurangnya pelatihan dan pemahaman tentang pentingnya backup power.
   b. Kurangnya pelatihan dalam perencanaan kontingensi catu daya.
2. Mesin (Peralatan)
   a. Catu daya sekunder yang tersedia hanya 125 kVA dan tidak memadai untuk menyuplai seluruh peralatan.
   b. Tidak tersedianya UPS untuk sistem yang sangat kritikal (misalnya: *tower control*, dan lampu pendaratan).
3. Metode (Prosedur dan Sistem)

a. Tidak ada SOP darurat untuk penanganan pemadaman listrik.
b. Tidak ada simulasi atau drill kondisi padam listrik.
c. Evaluasi kebutuhan daya cadangan tidak dilakukan secara rutin.

4. Lingkungan (Faktor Eksternal)
   a. Ketergantungan pada pasokan listrik dari PLN yang tidak stabil.
   b. Kondisi cuaca ekstrem (kilat, banjir) memicu pemadaman mendadak.
   c. Tidak adanya koordinasi langsung dengan PLN untuk prioritas suplai.
5. Material (Infrastruktur)
   a. Infrastruktur distribusi internal (panel, kabel) tidak memadai jika pembagian jalur distribusi ditambah.
   b. Material pendukung (*transfer switch, circuit breaker*) tidak memadai.
6. Monitoring (Evaluasi)
   a. Tidak ada sistem monitoring real-time terhadap konsumsi daya tiap unit.
   b. Tidak tersedia histori beban dan gangguan untuk analisis tren.
   c. Tidak dilakukan review berkala terhadap performa genset.

Setelah faktor teridentifikasi, dilakukan penilaian skala prioritas untuk menentukan masalah mana yang paling mendesak untuk diselesaikan. maka langkah selanjutnya dilakukan analisis dengan menggunakan analisis AKPL (Aktual, Kekhalayakan, Problematika, Kelayakan) & USG (Urgent, Seriousness, Growth).

1. Aktual, benar-benar terjadi dan sedang hangat dibicarakan dalam masyarakat.
2. Problematik, faktor yang memiliki dimensi masalah yang komplek, sehingga perlu dicarikan segera solusinya.
3. Kekhalayakan, Isu yang menyangkut hidup orang banyak.
4. Layak, faktor yang masuk akal dan realistis serta relevan untuk dimunculkan inisiatif pemecahan masalahnya.

Untuk mendapatkan faktor masalah yang akan menjadi prioritas, sebagaimana tabel berikut ini :

Tabel I.2
Tabel Skala Prioitas dengan kriteria AKPL

NO	FAKTOR	A	K	P	L	JUMLAH	PRIORITAS
1	Sumber Daya Manusia	3	3	4	4	14	V
2	Mesin (Peralatan)	4	4	5	5	18	I
3	Metode (Prosedur dan Sistem)	4	3	4	4	15	IV
4	Lingkungan (Faktor Eksternal)	5	4	3	4	16	III
5	Material (Infrastruktur)	5	4	4	4	17	II
6	Monitoring Evaluasi	3	4	3	3	13	VI

*Pilihan ada pada jumlah/total terbesar
5 = Sangat Mendesak,
4 = Cukup Mendesak,
3 = Mendesak,
2 = Kurang Mendesak,
1 = Tidak Mendesak

- A : Aktual, Faktor tersebut benar-benar terjadi dan sedang hangat dibicarakan
- K : Kekhalayakan, Faktor tersebut menyangkut orang banyak
- P : Problematika, Faktor tersebut memiliki dimensi masalah yang kompleks sehingga perlu dicarikan segera solusinya
- K : Kelayakan, Faktor tersebut masuk akal, realistis, relevan dan dapat dimunculkan pemecah masalahnya

Setelah dilakukan identifikasi dan analisis faktor masalah dengan kriteria APKL didapat hasil skor tertinggi yakni sebesar 18 poin, maka faktor masalah yang di angkat menjadi faktor masalah prioritas adalah faktor mesin dan material.

Tabel I.3
Tabel Skala Prioitas dengan kriteria USG

NO	ISU	U	S	G	JUMLAH	PRIORITAS
1	Sumber Daya Manusia	3	3	4	10	V
2	Mesin (Peralatan)	5	4	5	14	I
3	Metode (Prosedur dan Sistem)	4	3	4	11	IV
4	Lingkungan (Faktor Eksternal)	4	4	4	12	III
5	Material (Infrastruktur)	5	4	4	13	II
6	Monitoring Evaluasi	3	3	3	9	VI

*Pilihan ada pada jumlah/total terbesar
5 = Sangat Mendesak,

4 = Cukup Mendesak,
3 = Mendesak,
2 = Kurang Mendesak,
1 = Tidak Mendesak

- U = Urgent, semakin mendesak suatu faktor harus dibahaas, dianalisis dan ditindaklanjuti.
- S = Serious, semakin serius suatu faktor harus dibahas dan dikaitkan dengan akibat yang akan ditimbulkan.
- G = Growth, semakin besar kemungkinan memburuknya faktor tersebut jika tidak segera ditangani.

Setelah dilakukan identifikasi dan analisis faktor masalah dengan kriteria USG didapat hasil skor tertinggi yakni sebesar 14 poin, maka faktor masalah yang di angkat menjadi faktor masalah prioritas adalah faktor mesin dan material.

Dari kedua tabel kriteria penentuan faktor prioritas dalam masalah sistem catu daya pada Bandar Udara Sultan Bantilan Tolitoli dapat disimpulkan perlunya rancangan lebih lanjut mengenai pentingnya ketersediaan sistem catu daya Listrik yang sesuai di suatu bandar udara guna terwujudnya prinsip 3S + 1C yang menjadi dasar bagi Direktorat Jenderal Perhubungan Udara.

METODELOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif–eksplanatif dengan pendekatan studi kasus, karena penelitian berfokus pada analisis kondisi nyata sistem catu daya listrik di Bandara Sultan Bantilan Tolitoli. Metode deskriptif digunakan untuk menggambarkan kondisi eksisting sistem kelistrikan, termasuk kapasitas catu daya primer dan sekunder serta kebutuhan beban listrik aktual.

Sementara itu, metode eksplanatif digunakan untuk menjelaskan hubungan antara peningkatan beban listrik akibat pembangunan terminal baru dengan ketidakcukupan kapasitas catu daya, serta dampaknya terhadap keandalan operasional bandara.

Pendekatan studi kasus dipilih karena penelitian dilakukan secara mendalam pada satu objek tertentu, yaitu sistem catu daya listrik Bandara Sultan Bantilan Tolitoli. Analisis teknis dilakukan melalui perhitungan kelistrikan, pemodelan sistem distribusi, serta simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP untuk mengevaluasi kelayakan dan keandalan sistem yang dirancang. Adapun langkah-langkah pelaksanaan penelitian meliputi:

1. Studi Observasi dan Pengumpulan Data

Melakukan survei dan pengamatan kondisi eksisting sistem catu daya di Bandara Sultan Bantilan Tolitoli, termasuk kapasitas genset yang tersedia, diagram satu garis (*single line diagram*), dan pembagian beban listrik saat ini.

2. Analisis Data Beban Listrik

Melakukan pengukuran dan evaluasi beban listrik pada berbagai titik, mengelompokkan beban menjadi beban *Essential* dan *Non-Essential* sesuai standar ICAO dan kebutuhan operasional bandara.

3. Perancangan Sistem Distribusi

Merancang jaringan distribusi catu daya yang memisahkan beban Essential dan Non-Essential dengan memperhitungkan kapasitas optimal genset, ukuran kabel, serta pemilihan jenis proteksi MCCB.

4. Simulasi dan Validasi Desain

Menggunakan perangkat lunak simulasi seperti ETAP atau *software* serupa untuk memvalidasi rancangan sistem proteksi dan daya cadangan agar memenuhi kriteria keandalan dan kontinuitas daya.

5. Evaluasi dan Rekomendasi

Mengevaluasi hasil simulasi dan merumuskan rekomendasi teknis yang dapat diimplementasikan di lapangan untuk meningkatkan keandalan sistem catu daya.

PEMBAHASAN

1. Analisis Kondisi Eksisting Sistem Catu Daya

Berdasarkan hasil observasi dan data lapangan, sistem catu daya listrik di Bandara Sultan Bantilan Tolitoli saat ini menggunakan catu daya primer dari PLN dengan kapasitas terpasang sebesar 240 kVA. Seiring dengan pembangunan terminal penumpang baru, terjadi peningkatan signifikan terhadap beban listrik yang harus disuplai oleh sistem kelistrikan bandara.

Sementara itu, catu daya sekunder yang tersedia hanya berupa satu unit genset berkapasitas 125 kVA. Kapasitas tersebut belum mengalami peningkatan sejak sebelum pembangunan terminal baru, sehingga menimbulkan ketidakseimbangan antara beban listrik aktual dengan kemampuan suplai catu daya cadangan.

Kondisi ini berpotensi menyebabkan gangguan operasional bandara ketika terjadi pemadaman catu daya utama, terutama pada fasilitas vital yang harus tetap beroperasi sesuai ketentuan KP 326 Tahun 2019 MOS 139 VOL I Aerodrome point 8.1.10.Analisis Beban Listrik Aktual

Hasil pengukuran dan evaluasi beban listrik menunjukkan bahwa total beban listrik Bandara Sultan Bantilan Tolitoli mencapai sebesar 302 kVA pada kondisi beban puncak. Beban tersebut terdiri dari beban essential dan non-essential yang tersebar pada fasilitas terminal, navigasi penerbangan, penerangan landasan, perkantoran, dan fasilitas pendukung lainnya.

Dari total beban tersebut, sebagian besar beban essential seperti peralatan navigasi, komunikasi, dan penerangan wajib tetap disuplai ketika terjadi kegagalan catu daya primer. Namun, dengan kapasitas genset yang hanya 125 kVA, tidak seluruh beban essential dapat ter-*backup* secara optimal tanpa dilakukan pemadaman selektif.

2. Analisis Kesenjangan Daya Primer dan Sekunder

Data Beban Daya Pada Tiap Panel

Tabel IV. 1
Tabel Beban Tiap Panel

NO.	Nama Panel	Beban dalam Ampere			Total A
		R	S	T	
1.	Panel AFL, PJU, Gedung PH	113,2	82,9	79,6	**275,7**
2.	LVMDP Lama	129,1	105,6	122,6	**357,3**
3.	Terminal Baru	269,9	234,9	240,9	**745,7**
	TOTAL				**1378,7**

Total jumlah daya (VA) pada Bandara Sultan Bantilan.

$$P = (Ampere/3) \times \sqrt{3} \times V$$

P = (1378,7/3) x $\sqrt{3}$ x 380
= 459,5 x 1,73 x 380
= 794,935 x 380
= 302.075,3 VA
= **302 kVA**

Perbandingan antara kapasitas catu daya dan kebutuhan beban menunjukkan adanya kesenjangan daya sebagai berikut:

- Kapasitas PLN: 240 kVA
- Beban aktual: 302 kVA
- Kapasitas genset: 125 kVA

Kondisi ini menunjukkan bahwa baik catu daya belum mencukupi untuk menopang kebutuhan listrik bandara secara penuh.

3. Perancangan Sistem Distribusi Baru

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dilakukan perancangan ulang sistem distribusi listrik dengan pemisahan jalur antara beban essential dan non-essential. Perancangan ini bertujuan agar kapasitas genset yang tersedia dapat difokuskan untuk menyuplai beban-beban vital pada saat terjadi pemadaman listrik utama.

Perancangan meliputi:

a. Penentuan jalur distribusi khusus beban essential
b. Pemilihan MCCB berdasarkan arus nominal dan faktor keamanan 125% sesuai PUIL 2011
c. Penentuan ukuran kabel berdasarkan tabel KHA
d. Penyesuaian konfigurasi panel distribusi (LVMDP)

Pembagian beban esensial dan non-esesial sesuai dengan peraturan KP 326 Tahun 2019 MOS 139 VOL I Aerodrome point 8.1.10.

Sumber : KP 326 Tahun 2019 MOS 139 VOL I Aerodrome point 8.1.10

Fasilitas – fasilitas yang akan menjadi beban essential dan akan di backup oleh catu daya sekunder ketika catu daya primer padam.

Tabel IV. 2
Tabel Beban Prioritas

NO.	Panel dan Nama Peralatan	Daya (A)
1.	Panel AFL, Gedung PH	**275,7**
	CCR PAPI 11	
	CCR PAPI 29	
	CCR Runway C1	
	CCR Runway C2	
	CCR Taxy	
	ROB	
	Apron Flood Light 1	
	Apron Flood Light 2	
	PJU Konvensional	
	Parking System	
	Gedung PH (Lampu, AC, dll.)	
2.	Tower Airnav	**50,4**
	Lampu, AC, VHF, Recorder	
	TOTAL	**329,1**

Total beban yang akan di suplai oleh catu daya sekunder yang sesuai dengan beban prioritas yang tertera pada peraturan KP 326 Tahun 2019 MOS 139 VOL I Aerodrome point 8.1.10 adalah sebesar 329,1 A.

$$P = (Ampere/3) \times \sqrt{3} \times V$$

P = (329,1/3) x $\sqrt{3}$ x 380
= 109,7 x 1,73 x 380
= 189,781 x 380
= 72.116,78 VA
= **72 kVA**

Dengan catu daya sekunder yang memiliki maksimal daya suplai sebesar 125 kVA, beban prioritas tersebut sudah dapat disuplai sepenuhnya dengan catu daya sekunder yang tersedia.

Menurut ISO 8528-1: 2018 Genset dengan *rating Prime Power* (PRP) dirancang untuk bekerja dengan beban bervariasi, di mana beban rata-rata tidak melebihi 70–80% dari daya terpasang, untuk menjaga batas termal mesin dan alternator. Hal ini bertujuan untuk menjaga *rating* dan *performance* pada genset tersebut.

1. Kapasitas Genset : 125 kVA
2. Maksimal suplai : 70% – 80%
3. >> 125 kVA x 80% = 100 kVA

Maka maksimal beban yang dapat di suplai oleh catu daya sekunder untuk menjaga *rating* dan *performance* peralatan itu sendiri adalah sebesar 100 kVA.

Agar proses administrasi perkantoran tidak terganggu ketika terjadi kegagalan pada catu daya utama, maka Gedung Administrasi perkantoran juga di tambahkan kedalam jalur distribusi essential yang akan di rancang. Adapun jumlah beban yang terpakai di panel Gedung Administrasi adalah sebesar 70,3 Ampere.

Tabel IV. 3
Tabel Beban yang akan di suplai catu daya sekunder

NO.	Panel dan Nama Peralatan	Daya (A)
1.	Panel AFL, Gedung PH	**275,7**
2.	Tower Airnav	**50,4**
3.	Panel Gedung Administrasi	**70,3**
	TOTAL	**399,4**

Jadi total daya (A) yang akan di suplai oleh catudaya sekunder adalah sebesar 399,4 Ampere.

$$P = (Ampere/3) \times \sqrt{3} \times V$$

P = (399,4/3) x $\sqrt{3}$ x 380
= 133,13 x 1,73 x 380
= 230,32 x 380
= 87.521,85 VA
= **88 kVA**

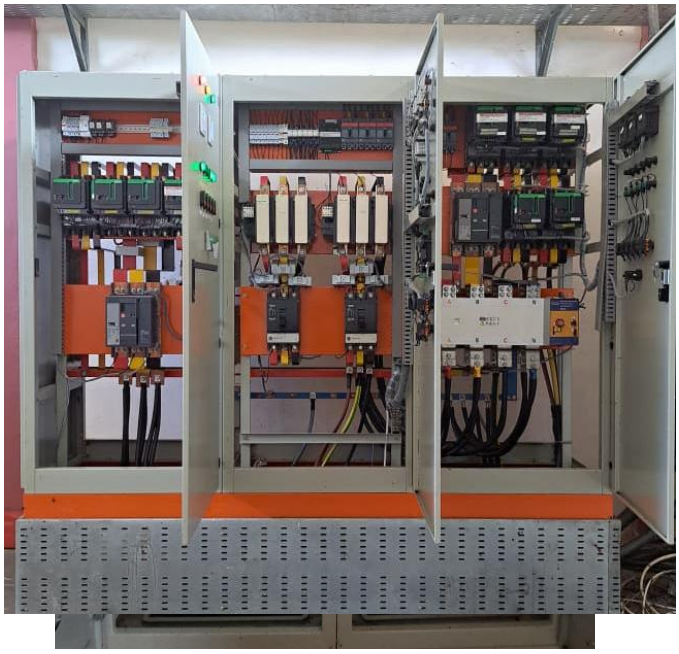
Maka total beban yang akan di suplai oleh catu daya sekunder adalah sebesar 88 kVA. Beban tersebut telah mencakup seluruh beban essential (prioritas) yang sesuai dengan peraturan KP 326 Tahun 2019 MOS 139 VOL I Aerodrome point 8.1.10 dan ditambah dengan beban dari Gedung administrasi. Dengan adanya perubahan jalur distribusi yang akan dilakukan ada beberapa part/bagian yang mengalami perubahan baik itu perpindahan posisi panel maupun pertukaran beberapa MCCB. Adapun perubahan tersebut adalah sebagai berikut :

Tabel IV. 4
Tabel Perubahan Part dan Komponen

NO.	Nama Part	Sebelum	Sesudah
1.	MCCB 630 A outgoing ke Terminal Baru bertukar posisi dengan MCCB 400 A yang ada pada panel LVMDP baru yang terletak sebelum panel A COS.	MCCB 630 A outgoing ke Terminal Baru berada di Panel LVMDP Baru yang terletak setelah panel A COS dan mendapatkan suplai dari catu daya sekunder jika terjadi kegagalan di catu daya primer.	MCCB 630 A outgoing ke Terminal Baru tidak lagi mendapat suplai dari catu daya sekunder jika terjadi kegagalan di catu daya primer.
2.	Penambahan MCCB 63 A dan 100 A pada panel AFL dikarenakan adanya penambahan beban dari Tower Airnav dan Gedung Administrasi.	Beban untuk Tower Airnav dan Gedung Administrasi berada di panel LVMDP Lama.	Beban untuk Tower Airnav dan Gedung Administrasi berada di panel AFL dan Gedung PH.
3.	Penambahan MCCB 630 A pada panel AFL dikarenakan adanya penambahan beban dari Tower Airnav dan Gedung Administrasi.	MCCB yang terpasang pada panel AFL Gedung PH sebesar 250 A.	Dilakukan penambahan MCCB Utama dikarenakan adanya penambahan beban.
4.	Penyambungan kabel distribusi untuk beban Tower Airnav dan Gedung Administrasi,	Lokasi Panel LVMDP Lama dengan Panel AFL yang	Beban Tower Airnav dan Gedung Administrasi di

	dikarenakan terpisahnya gedung Panel LVMDP Lama dengan gedung Panel AFL.	memiliki jarak.	pindahkan ke Panel AFL.
5.	Penambahan kabel distribusi langung dari Panel LVMDP Baru ke Panel AFL.	Panel AFL terhubung ke Panel LVMDP Lama.	Panel AFL terhubung ke Panel LVMDP Baru.

Rancangan *Single Line Diagram* Bandara Sultan Bantilan Tolitoli



Gambar IV. 3
Panel LVMDP Baru



Gambar IV. 1
Panel LVMDP Lama

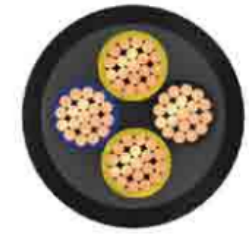
Gambar IV. 4
Kondisi Ruangan Unit Listrik dari depan



Gambar IV. 5
Jalur sambungan kabel di antara bangunan unit listrik

a. Perhitungan Luas Penampang Kabel

Sumber : Katalog Kabel Supreme NYY 4 Core



ELECTRICAL DATA

Nominal cross-sectional area	Resistance at 20 °C		Current Carrying Capacity at 30 °C		Short circuit current of conductor at 1.0 sec
	DC conductor max	Insulation min	In AIR	In GROUND	
mm²	Ω/Km	MΩ.Km	A		kA
1.5	12.1	50	18	24	0.19
2.5	7.41	50	25	32	0.32
4	4.61	50	34	41	0.50
6	3.08	50	44	52	0.73
10	1.83	50	60	69	1.20
16	1.15	40	80	89	1.91
25	0.727	40	105	116	2.96
35	0.524	40	130	138	4.13
50	0.387	30	160	165	5.87
70	0.268	30	200	205	8.19
95	0.193	30	245	245	11.09
120	0.153	30	285	285	13.98
150	0.124	20	325	315	17.46
185	0.0991	20	370	355	21.50
240	0.0754	20	435	415	27.86

Gambar IV. 6
Ukuran KHA Kabel NYY

1) Kabel Untuk Gedung Administrasi
Arus yang mengalir ke Gedung Administrasi adalah sebesar 70,3 Ampere, maka luas penampang kabel yang akan di pakai adalah :
KHA = 125% x Arus Nominal
KHA = 125% x 70,3 A
KHA = 87,875 Ampere
Sesuai dengan data tabel KHA maka untuk rancangan ini menggunakan kabel NYY 4 x 25 mm².

2) Kabel Untuk Tower Airnav
Arus yang mengalir ke Tower Airnav adalah sebesar 50,4 Ampere, maka luas penampang kabel yang akan di pakai adalah :
KHA = 125% x Arus Nominal
KHA = 125% x 50,5 A
KHA = 63 Ampere
Sesuai dengan data tabel KHA maka untuk rancangan ini menggunakan kabel NYY 4 x 16 mm².

3) Kabel dari Panel LVMDP Baru ke Panel AFL
Arus yang mengalir ke Tower Airnav adalah sebesar 399,4 Ampere, maka luas penampang kabel yang akan di pakai adalah :
KHA = 125% x Arus Nominal
KHA = 125% x 399,4 A
KHA = 499,25 Ampere
Sesuai dengan data tabel KHA maka untuk rancangan ini menggunakan kabel NYY 4 x 300 mm^2

b. Perhitungan Ukuran Breaker (MCCB)

Tabel IV. 5
Tabel Ukuran Kebutuhan MCCB

NO.	Panel dan Nama Peralatan	Beban (A)	Breaker yg dibutuhkan
1.	Tower Airnav	**50,4**	**63 A**
2.	Panel Gedung Administrasi	**70,3**	**100 A**
3.	Main Breaker AFL	**399,4**	**630 A**

Ukuran tersebut telah di sesuaikan mengikuti ketersediaan di kapasitas di pasar. Dari hasil perhitungan nilai nominal dan arus ratingnya, maka dapat ditentukan nilai MCCB yang akan dipergunakan sebagai proteksi bagi beban, yang akan mengikuti standar PUIL 2011 mengacu IEC 60898-1. Untuk lebih jelasnya perhatikan tabel IV.6

c. Pembuatan RAB

Berikut adalah bahan bahan yang dibutuhkan agar terlaksananya rancangan tersebut :

Tabel IV. 6
Rencana Anggaran Biaya

No.	Urutan Pekerjaan	Volume	Satuan	Harga Satuan	Total Harga
I	2	3	4	5	6
I.	**Pengadaan Peralatan**				
I.	**Peralatan Utama**				
	a. Pengadaan MCCB 630 A	1	Unit	9.793.8500	9.793.850
	b. Pengadaan MCCB 100 A	1	Unit	4.064.500	4.064.500
	c. Pengadaan MCCB 63 A	1	Unit	2.688.400	2.688.400
	d. Pengadaan Kabel NYY 4x300mm	18	Meter	4.068.900	73.240.200
	e. Pengadaan Kabel NYY 4x25mm	12	Meter	665.731	7.988.772
	f. Pengadaan Kabel NYY 4x16mm	12	Meter	386.100	4.633.200
	Total I				**102.408.922**
II.	**Pengadaan Penunjang**				
	a. Pengadaan Mur dan Baut m16	12	Set	33.700	405.240
	b. Pengadaan Skun cable 16mm	4	Unit	20.328	81.312
	c. Pengadaan Skun cable 25mm	4	Unit	25.328	100.312
	d. Pengadaan Jointing kit (Resin, Mould, dll)	8	Unit	1.595.000	12.760.000
	e. Pengadaan Scooth 3M	3	Unit	104.500	313.500
	f. Pengadaan Isolasi 3M	5	Unit	29.436	147.180
	g. Pasir	1	M3	353.960	353.960
	h. Bata Merah	100	Unit	1.550	155.000
	Total II				**14.297.504**
III.	**Instalasi dan Pemasangan**				
	Galian Kabel				
	a. Galian Tanah	18	M^3	73.033	1.314.594
	b. Urugan Kembali	18	M^3	42.250	760.500
	c. Pekerja	16	Oh	80.814	1.293.024
	d. Mandor	16	Oh	123.988	1.983.808
	Instalasi				
	a. Pekerja	16	Oh	80.814	1.293.024
	b. Tukang	16	Oh	95.179	1.522.864
	c. Mandor	16	Oh	123.988	1.983.808

	Total III				**10.151.622**
IV.	**Commisioning**				
	Commisioning	I	Lot	10.000.000	10.000.000
	Total IV				**10.000.000**
	Total (I + II + III + IV)			**Jumlah Rp.**	**136.858.048**
	PPN 11%			**Jumlah Rp.**	**15.054.385**
	Grand Total			**Jumlah Rp.**	**151.912.433**

d. Rencana kerja / metode pelaksanaan pekerjaan

1) Tahap Persiapan Pekerjaan

Tahap persiapan merupakan langkah awal sebelum pelaksanaan pekerjaan sistem catu daya listrik. Kegiatan yang dilakukan pada tahap ini meliputi:

a. Melakukan koordinasi awal dengan pengelola bandara dan unit terkait untuk penyesuaian jadwal pekerjaan agar tidak mengganggu operasional penerbangan.
b. Melakukan survei lapangan untuk memverifikasi kondisi eksisting sistem kelistrikan, posisi panel distribusi, jalur kabel, dan ruang genset.
c. Mengumpulkan dan menelaah dokumen teknis yang tersedia, seperti Single Line Diagram (SLD) eksisting, data beban listrik, serta spesifikasi peralatan.
d. Menyusun rencana keselamatan dan kesehatan kerja (K3) yang mengacu pada standar keselamatan kerja di lingkungan bandara.
e. Menyiapkan peralatan kerja, alat ukur, serta material yang akan digunakan sesuai dengan spesifikasi teknis yang telah direncanakan.

2. Tahap Pengadaan Material dan Peralatan

Setelah tahap persiapan, dilakukan pengadaan material dan peralatan pendukung pekerjaan, yang meliputi:

a. Menggali dan membuat jalur kabel sesuai standar yang telah di tetapkan.
b. Modifikasi panel eksisting sesuai desain.
c. Pengadaan MCCB, kabel listrik, dan aksesoris instalasi sesuai hasil perhitungan teknis.
d. Pemeriksaan kualitas material untuk memastikan kesesuaian dengan standar PUIL 2011 dan spesifikasi pabrikan.
e. Penyimpanan material di lokasi yang aman dan terlindung dari kerusakan sebelum instalasi.

3. Tahap Pelaksanaan Pekerjaan Instalasi

Tahap pelaksanaan pekerjaan dilakukan secara bertahap dan terkontrol, dengan memperhatikan aspek keselamatan dan keandalan sistem. Kegiatan pada tahap ini meliputi:

a. Melakukan pemadaman terencana (*planned shutdown*) apabila diperlukan, dengan koordinasi bersama unit operasional bandara.
b. Pemasangan panel distribusi dan peralatan proteksi sesuai dengan gambar kerja dan desain yang telah disetujui.
c. Penarikan dan pemasangan kabel daya sesuai jalur yang telah ditentukan, dengan memperhatikan metode pemasangan, jarak aman, dan sistem penandaan kabel.
d. Penyambungan kabel ke panel dan peralatan listrik sesuai standar instalasi dan kode warna.
e. Pemisahan jalur distribusi antara beban essential dan non-essential sesuai perencanaan.

4. Tahap Pengujian dan Commissioning

Setelah instalasi selesai, dilakukan tahap pengujian dan *commissioning* untuk memastikan sistem bekerja sesuai desain. Tahapan ini meliputi:

a. Pengujian kontinuitas dan tahanan isolasi kabel menggunakan alat ukur yang sesuai.
b. Pengujian fungsi MCCB dan sistem proteksi.
c. Simulasi pemadaman catu daya primer untuk memastikan sistem genset dapat menyuplai beban essential secara optimal.
d. Pengujian kinerja sistem distribusi pada kondisi berbeban dan tanpa beban.
e. Verifikasi hasil pengujian dengan data perhitungan dan simulasi ETAP.

5. Tahap Evaluasi dan Penyempurnaan Sistem

Berdasarkan hasil pengujian, dilakukan evaluasi terhadap kinerja sistem catu daya listrik. Apabila ditemukan ketidaksesuaian, dilakukan:

a. Penyesuaian setting proteksi.
b. Perbaikan sambungan atau instalasi yang tidak memenuhi standar.
c. Optimalisasi distribusi beban untuk mencegah overload.

Tahap ini bertujuan untuk memastikan sistem benar-benar siap dioperasikan secara penuh.

6. Tahap Dokumentasi dan Pelaporan

Tahap akhir adalah dokumentasi dan pelaporan hasil pekerjaan, yang meliputi:

a. Penyusunan gambar *as-built drawing* sistem kelistrikan yang telah terpasang.

b. Dokumentasi hasil pengujian dan commissioning dalam bentuk laporan teknis.
c. Penyusunan laporan akhir pekerjaan sebagai referensi operasional dan pemeliharaan sistem.
d. Serah terima dokumen teknis kepada pihak pengelola bandara.

B. PENGUJIAN

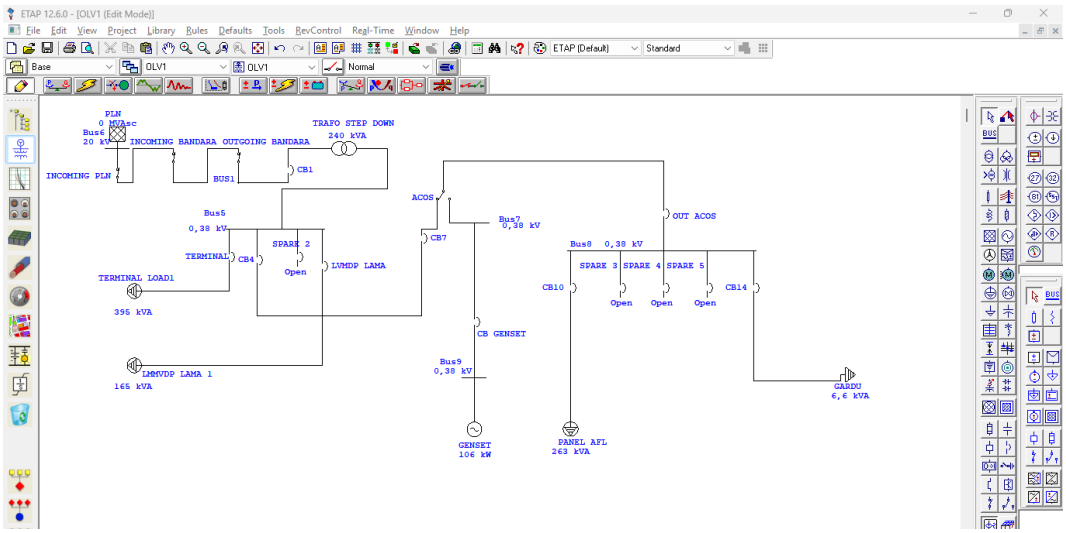
1. Pengujian dan Simulasi Menggunakan ETAP

Rancangan sistem distribusi yang telah dibuat kemudian diuji menggunakan perangkat lunak ETAP. Simulasi dilakukan untuk mengetahui kondisi aliran daya pada kondisi normal maupun kondisi pemadaman catu daya utama.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem distribusi hasil rancangan mampu menjaga tegangan dalam batas toleransi dan tidak mengalami overload pada jalur beban essential. Dengan demikian, sistem yang dirancang dinilai layak secara teknis dan memenuhi standar keandalan sistem kelistrikan bandara.

Sumber : Aplikasi Simulasi ETAP

Terlihat dalam simulasi ETAP seluruh jaringan distribusi yang ada di Bandar Udara Sultan Bantilan Tolitoli

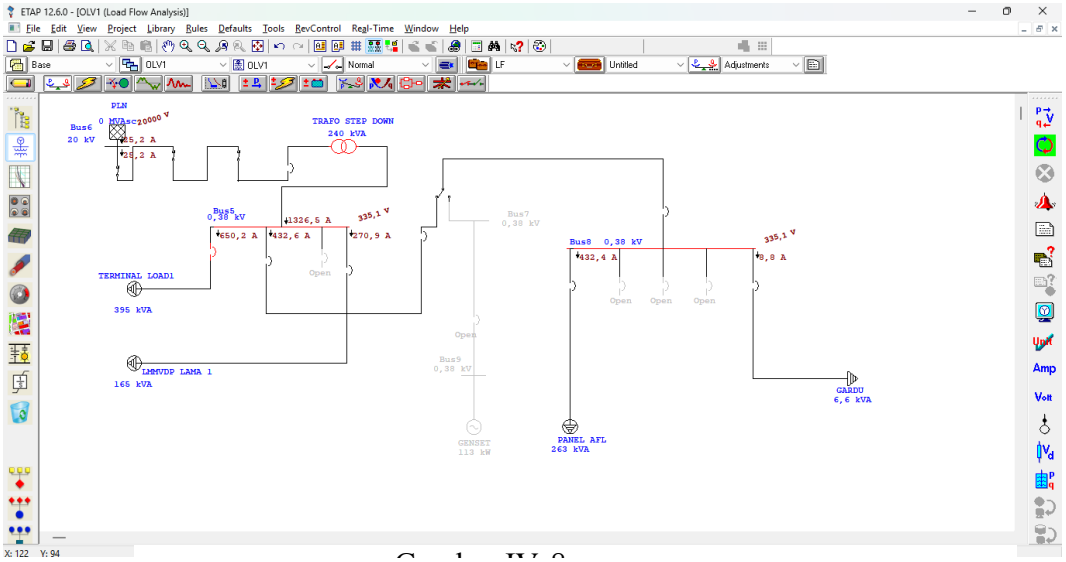


Gambar IV. 7
Single Line Diagram di Aplikasi ETAP

sesuai dengan rancangan yang dibuat.

Sumber : Aplikasi Simulasi ETAP

Kapasitas catu daya sekunder yang di set dalam aplikasi etap sebesar 125 kVA, sesuai dengan kapasitas genset eksisting yang ada di Bandar Udara Sultan Bantilan Tolitoli.



Gambar IV. 9
Kondisi distribusi arus yang mengalir saat catu daya *Primer* menyala

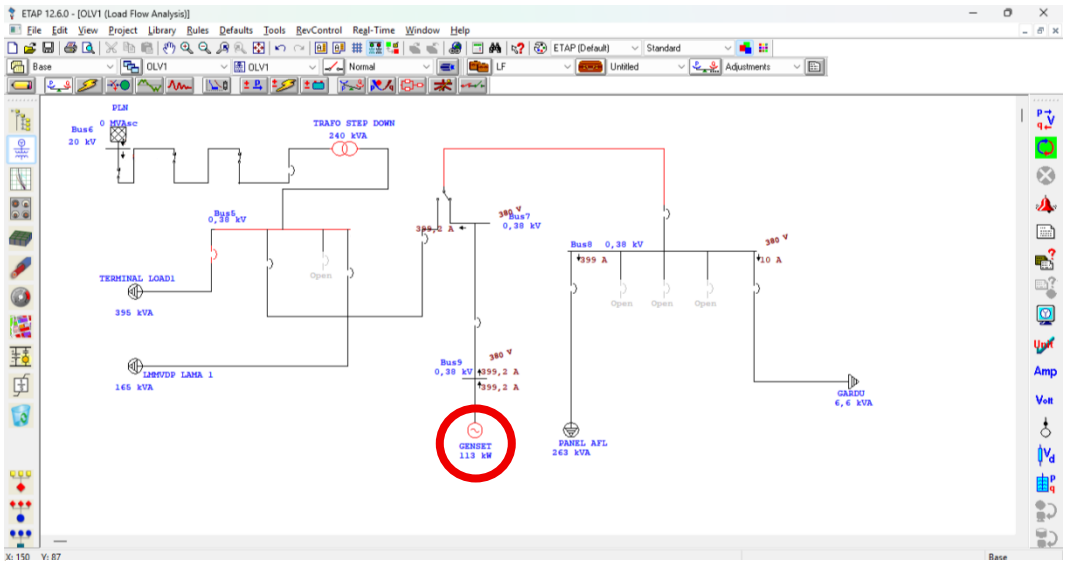
Sumber : Aplikasi Simulasi ETAP

Seluruh beban yang terpasang di Bandar Udara Sultan Bantilan Tolitoli yang mendapat suplai listrik ketika catu daya utama menyala.

2. Pembahasan Hasil dan Evaluasi Keandalan

Berdasarkan hasil analisis dan simulasi, dapat disimpulkan bahwa pemisahan beban essential dan non-essential merupakan solusi teknis yang efektif dalam mengoptimalkan kapasitas genset yang terbatas. Rancangan ini mampu meningkatkan keandalan sistem kelistrikan dan meminimalkan risiko gangguan operasional bandara.

Sumber : Aplikasi Simulasi ETAP



Gambar IV. 10

Kondisi distribusi arus yang mengalir saat catu daya *Sekunder* menyala

Saat catu daya utama mengalami pemadaman, dan catu daya cadangan menyala, terlihat beban *Essential* berhasil di suplai oleh catu daya cadangan yang berkapasitas 125 kVA.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, serta pengujian sistem catu daya listrik yang telah dilakukan pada Bandar Udara Sultan Bantilan Tolitoli, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Kondisi sistem catu daya eksisting belum memenuhi kebutuhan beban listrik pasca pengembangan terminal.

   Sistem catu daya listrik eksisting di Bandara Sultan Bantilan Tolitoli belum mampu memenuhi kebutuhan beban listrik setelah pembangunan terminal baru, karena peningkatan beban tidak diimbangi dengan peningkatan kapasitas catu daya sekunder. Kondisi ini berpotensi menurunkan tingkat keandalan sistem kelistrikan bandara.

2. Kapasitas genset eksisting tidak mencukupi sebagai catu daya sekunder.

   Genset yang digunakan sebagai catu daya sekunder dengan kapasitas 125 kVA dinyatakan tidak mencukupi untuk menyuplai seluruh beban listrik bandara pada saat terjadi pemadaman catu daya primer. Berdasarkan hasil perhitungan dan evaluasi beban essential, kapasitas genset tersebut hanya mampu menopang beban kritikal, sehingga diperlukan pembatasan atau pemadaman beban non-essential. Kondisi ini menunjukkan bahwa kapasitas dan konfigurasi catu daya sekunder belum memenuhi persyaratan keandalan sistem kelistrikan bandara sesuai standar operasional dan keselamatan penerbangan.

3. Pemisahan beban essential dan non-essential meningkatkan keandalan sistem catu daya.

   Pemisahan beban essential dan non-essential serta perancangan ulang sistem distribusi terbukti dapat meningkatkan keandalan catu daya bandara dengan memastikan bahwa beban-beban kritikal tetap mendapatkan suplai listrik pada kondisi darurat.

4. Rancangan sistem telah memenuhi standar keandalan berdasarkan hasil simulasi ETAP

   Hasil simulasi dan pengujian menggunakan perangkat lunak ETAP menunjukkan bahwa rancangan sistem distribusi listrik yang diusulkan mampu beroperasi dalam batas parameter teknis yang diizinkan, baik dari sisi aliran daya, profil tegangan, maupun kinerja sistem proteksi. Tidak ditemukan kondisi overload pada jalur beban essential. Dengan demikian, rancangan sistem dinyatakan memenuhi standar keandalan, keselamatan, dan kontinuitas suplai listrik yang dipersyaratkan untuk fasilitas bandar udara.

SARAN

1. Perlu dilakukan penambahan atau peningkatan kapasitas catu daya sekunder secara bertahap sesuai dengan pertumbuhan beban listrik bandara, agar sistem catu daya mampu mendukung pengembangan fasilitas di masa mendatang.
2. Disarankan pemasangan sistem Uninterruptible Power Supply (UPS) pada peralatan yang bersifat sangat kritikal, guna menjamin kontinuitas suplai daya selama proses perpindahan dari catu daya primer ke catu daya sekunder.
3. Evaluasi dan audit beban listrik perlu dilakukan secara berkala untuk memantau perkembangan beban, mencegah kondisi overload, serta menjaga keandalan dan keselamatan sistem kelistrikan bandara

DAFTAR PUSTAKA

1. Aisyah Pringsewu, U., Tanjung, M. M. S., Dalimunthe, M. E., & Saragih, Y. (2025). Analisis keandalan generator set (genset) sebagai power supply darurat pada sistem kelistrikan kampus. *Aisyah Journal of Informatics and Electrical Engineering*, 7(1), 12–20. https://doi.org/10.56724/ajiee.v7i1.2025
2. Anggara Hintiyas, F., & Oetomo, P. (2018). Sistem kontrol beban esensial dan non-esensial berbasis mikrokontroler pada sistem tenaga listrik. *Seminar Nasional Inovasi Teknologi Penerbangan*, 2(1), 44–51. https://doi.org/10.31227/osf.io/7kq5m
3. Aribowo, D., & Fauzan, D. A. (2020). Sistem perawatan mesin genset di industri kelistrikan. *Prosiding Seminar Nasional Pendidikan FKIP*, 3(1), 580–594. https://doi.org/10.30870/psnp.v3i1.9987
4. Arrosyid, B., & Ayodya, W. (2023). Analisis perencanaan pembagian beban elektrikal pada panel SDP gedung universitas. *Jurnal Teknik Elektro UNIBA*, 8(1), 45–53. https://doi.org/10.36277/jteuniba.v8i1.312
5. Fitrianto, E., & Nazir, R. (2016). Efek pengintegrasian pembangkit listrik tersebar pada sistem distribusi radial terhadap perbaikan tegangan. *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, 5(1), 1–6. https://doi.org/10.20449/jnte.v5i1.157
6. Fadhil Akkas, M., Raharjo, I., & Sunawar, A. (2024). Perancangan instalasi listrik menggunakan solar cell pada kawasan wisata alam. *Jurnal Energi dan Kelistrikan*, 16(2), 88–97. https://doi.org/10.33322/energi.v16i2.2890
7. Hendarto, D., & Lutfi, A. G. (2022). Rekondisi instalasi low voltage main distribution panel (LVMDP) pada gedung bertingkat. *Jurnal Teknologi Elektro*, 13(2), 112–119. https://doi.org/10.22441/jte.v13i2.14567
8. Hilmansyah Susanta, M. (2024). Pengukuran tegangan dan arus listrik menggunakan sensor INA219 berbasis Arduino Uno. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, 13(1), 23–31. https://doi.org/10.35793/jtek.13.1.2024.51234
9. Ilham, J., & Dako, A. Y. (2025). Evaluasi sistem instalasi tenaga listrik berdasarkan standar PUIL 2011 pada industri pengolahan. *Research Review: Jurnal Ilmiah Multidisiplin*, 4(1), 15–27. https://doi.org/10.54371/rrj.v4i1.2025
10. Kussoy, S. D., Prasetyo, J., & Widodo, S. (2024). Rancang bangun panel listrik tiga fasa untuk laboratorium instalasi listrik. *Jurnal Rekayasa Elektro Indonesia*, 5(2), 76–84. https://doi.org/10.26740/jrei.v5n2.p76-84
11. Muvhtar, N. F., Priatna, E., & Nadrotan, N. (2024). Perencanaan ulang instalasi listrik untuk pengembangan data center pemerintah daerah. *Jurnal Teknik Elektro dan Informatika*, 9(1), 55–66. https://doi.org/10.24176/jtei.v9i1.10234
12. Natsir, A., Lestari, P., & Suharto, D. (2022). Post-mortem analysis of 2018 power outage at Lombok International Airport: Technical and human factors. *Proceedings of the International Conference on Aviation and Aeronautical Engineering*, 221–228. https://doi.org/10.2991/assehr.k.220101.023
13. Pardi, K. (2021). Pengendalian operasi reaktor saat terjadi gangguan catu daya listrik utama. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 23(2), 89–98. https://doi.org/10.17146/jpen.2021.23.2.6211
14. Risaldi, R., Bijaksana, A. M., & Rahman, F. (2025). Perancangan panel ATS antara accu 12 volt DC dan jaringan PLN 220 volt AC. *Jurnal Teknik Elektro Kreatif*, 6(1), 33–42. https://doi.org/10.35308/jtek.v6i1.2025
15. Sadam Fahrezi, A., & Oetomo, P. (2022). Perencanaan instalasi listrik pada gedung rumah sakit. *Jurnal Teknik Energi Elektrik*, 11(2), 101–110. https://doi.org/10.25299/jtee.2022.11021
16. Ulfi, R., & Santoso, D. B. (2021). Pembaharuan single line diagram LVMDP menggunakan aplikasi AutoCAD di industri manufaktur. *Jurnal Teknologi Terapan*, 7(2), 94–103. https://doi.org/10.30736/jt.v7i2.621
17. Wahyu Muchamad Yusuf. (2024). Analisa pembebanan generator set menggunakan metode segitiga daya di hotel bertingkat. *Jurnal Energi dan Sistem Tenaga*, 15(1), 41–49. https://doi.org/10.31284/j.est.2024.15.1.4412
18. Widiarto, H., & Suprihartini, Y. (2022). Analisis kualitas jalur distribusi menggunakan ETAP Power Station pada gardu pendidikan penerbangan. *Jurnal Aviasi dan Teknik Elektro*, 2(1), 13–22. https://doi.org/10.56521/jate.v2i1.118
19. IEEE Standards Association. (2013). IEEE recommended practice for the design of reliable industrial and commercial power systems. *IEEE Standards*. https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2013.6519980
20. Billinton, R., & Allan, R. N. (1996). Reliability evaluation of power systems. *Springer Science & Business Media*. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1860-4
21. Brown, R. E. (2008). Electric power distribution reliability. *CRC Press*. https://doi.org/10.1201/9780849397566
22. Wang, P., Goel, L., & Billinton, R. (2001). Reliability assessment of electric power systems using Monte Carlo methods. *Electric Power Systems Research*, 58(3), 133–139. https://doi.org/10.1016/S0378-7796(01)00129-6
23. Chowdhury, A. A., & Koval, D. O. (2009). Power distribution system reliability: Practical methods and applications. *John Wiley & Sons*. https://doi.org/10.1002/9780470396549

24. Allan, R. N., Billinton, R., Sjarief, I., Goel, L., & So, K. S. (1999). A reliability test system for educational purposes-basic distribution system data and results. *IEEE Transactions on Power Systems*, 6(2), 813–820. https://doi.org/10.1109/59.76730
25. Singh, C., & Mitra, J. (1998). Distribution system reliability evaluation using state enumeration and Monte Carlo simulation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 13(3), 1225–1230. https://doi.org/10.1109/59.709131
26. Carvalho, P. M. S., Correia, P. F., & Ferreira, L. A. F. M. (2000). Distributed reactive power generation control for voltage rise mitigation in distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(2), 766–772. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.920076
27. Lopes, J. A. P., Hatziargyriou, N., Mutale, J., Djapic, P., & Jenkins, N. (2007). Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities. *Electric Power Systems Research*, 77(9), 1189–1203. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2006.08.016
28. Shahidehpour, M., Yamin, H., & Li, Z. (2002). Market operations in electric power systems. *IEEE Press*. https://doi.org/10.1002/0471224124
29. Kundur, P. (1994). Power system stability and control. *McGraw-Hill Education*. https://doi.org/10.1109/9780470545589
30. Short, T. A. (2014). Electric power distribution handbook. *CRC Press*. https://doi.org/10.1201/b16728