

Analisis Tekno Ekonomi Implementasi *Defense Scheme* n-2 SUTET Batang – Pemalang Untuk Meningkatkan Pengoperasian Pembangkit PLTU Batang 2 x 1000 MW

Heri Presiyono¹, Agus Indarto²

^{1,2} Magister Teknik Elektro, Institut Teknologi PLN

Jl. Lingkar Luar Barat, Duri Kosambi, Cengkareng, Jakarta Barat, DKI Jakarta, 11750

Email: heri2310086@itpln.ac.id¹, agus.indarto@itpln.ac.id²

ABSTRAK

PLTU Batang 2 × 1.000 MW merupakan pembangkit listrik berbahan bakar batu bara yang beroperasi sebagai pembangkit beban dasar (*base load*) pada sistem ketenagalistrikan Jawa–Madura–Bali (Jamali), dengan teknologi *ultra-supercritical* (USC) untuk meningkatkan efisiensi dan menurunkan emisi. Keandalan operasinya sangat bergantung pada ketersediaan dua jalur Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) Batang–Pemalang, sehingga diperlukan mitigasi kontingensi n-2 guna mencegah gangguan simultan yang berpotensi menyebabkan ketidakstabilan sistem. Penelitian ini mengevaluasi keandalan sistem dan kelayakan ekonomi melalui simulasi pengoperasian dengan metode pembatasan operasi dan penerapan *Defense Scheme* kontingensi n-2 menggunakan *Software* DIg SILENT. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode pembatasan operasi membatasi kapasitas PLTU Batang hingga 1.400 MW untuk memenuhi kriteria keandalan, sedangkan penerapan *Defense Scheme* memungkinkan peningkatan pembangkitan hingga 1.900 MW dengan pelepasan beban terarah sebesar 608 MW. Secara ekonomi, *Defense Scheme* menurunkan biaya pokok penyediaan (BPP) harian sebesar 24% dibandingkan metode pembatasan operasi. Analisis kelayakan finansial menunjukkan bahwa implementasi *Defense Scheme* n-2 pada SUTET Batang–Pemalang layak dilaksanakan. Implementasi *Defense Scheme* tersebut untuk meningkatkan keandalan dan kestabilan sistem ketenagalistrikan Jawa–Madura–Bali serta sekaligus memberikan manfaat ekonomi yang signifikan..

Kata Kunci: *Defense Scheme*, *Load Shedding* Keandalan, Kestabilan, Kontingensi n-2, Biaya Pokok Penyediaan, Analisis Ekonomi

ABSTRACT

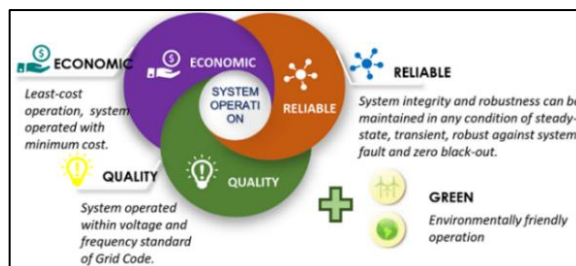
The he Batang Coal-Fired Power Plant (2 × 1,000 MW) operates as a base-load generator within the Java–Madura–Bali (Jamali) power system, utilizing *ultra-supercritical* (USC) technology to improve efficiency and reduce emissions. Its operational reliability is highly dependent on the availability of two Extra High Voltage Transmission Lines (SUTET) connecting Batang–Pemalang, necessitating an n-2 contingency mitigation scheme to prevent simultaneous disturbances that could lead to system instability. This study evaluates system reliability and economic feasibility through operational simulations using *DIgSILENT* software, comparing operational restrictions and the n-2 *Defense Scheme*. Simulation results indicate that operational restriction limits generation to 1,400 MW to meet reliability criteria, whereas the *Defense Scheme* allows up to 1,900 MW with directed load shedding of 608 MW. Economically, the *Defense Scheme* reduces daily generation costs by 24% compared to operational restriction. A financial feasibility analysis confirms that implementing the n-2 *Defense Scheme* is viable, enhancing the Jamali system's stability while delivering significant economic benefits.

Keywords: *Defense Scheme*, *Load Shedding*, *Reliability*, *Stability*, n-2 *Contingency*, *Cost of Supply*, *Economic Analysis*

Pendahuluan

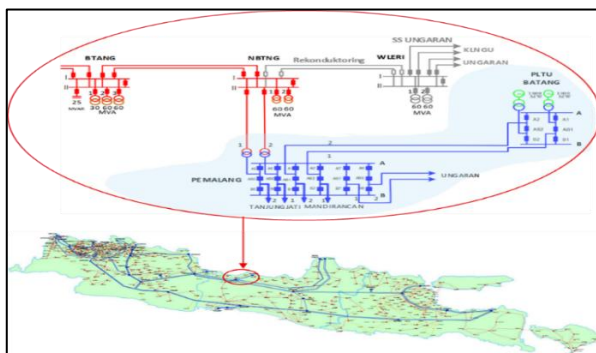
Penyediaan tenaga listrik di Indonesia dikelola oleh PT PLN (Persero) sebagai Badan Usaha Milik Negara yang memiliki tanggung jawab terhadap keberlanjutan pasokan energi listrik. Dalam pengoperasian sistem ketenagalistrikan, PLN memastikan energi yang dihasilkan oleh pembangkit dapat disalurkan secara berkesinambungan melalui jaringan distribusi untuk memenuhi kebutuhan konsumen, baik sektor rumah tangga maupun industri. Proses pengoperasian sistem ini mengikuti prinsip dasar yang mencakup efisiensi biaya, kualitas, keandalan, serta kepedulian terhadap kelestarian lingkungan (Gambar 1). Mutu dan keandalan sistem

diukur melalui parameter frekuensi, tegangan, serta jumlah gangguan yang terjadi. Untuk mencapai standar tersebut, Pusat Pengatur Beban (*Load Dispatch Center*) dituntut melakukan kompromi dan optimasi antara pemeliharaan kualitas tenaga listrik dan pencapaian biaya operasional yang minimal. Strategi ini menjadi faktor kunci dalam menjaga stabilitas sistem ketenagalistrikan nasional sekaligus memenuhi standar pelayanan yang telah ditetapkan [1].



Gambar 1. Prinsip Dasar Pengoperasian Sistem

Meningkatnya tuntutan terhadap keandalan dan kualitas pelayanan sistem ketenagalistrikan memerlukan langkah strategis untuk memastikan ketersediaan energi listrik yang stabil dan berkualitas. Upaya yang dilakukan mencakup penerapan standar keandalan (kriteria n-1) dan stabilitas (kriteria n-2) [2], peningkatan kehandalan melalui penguatan *Defense Scheme*, serta pengendalian frekuensi dengan optimalisasi pembangkit yang dilengkapi teknologi pengaturan otomatis seperti *Free Governor*, *Load Frequency Control (LFC)*[3] dan *Automatic Generation Control (AGC)* [4]. Selain itu ada metode pembatasan operasi yang diterapkan untuk menjaga keamanan peralatan transmisi dari potensi *over load capacity*.



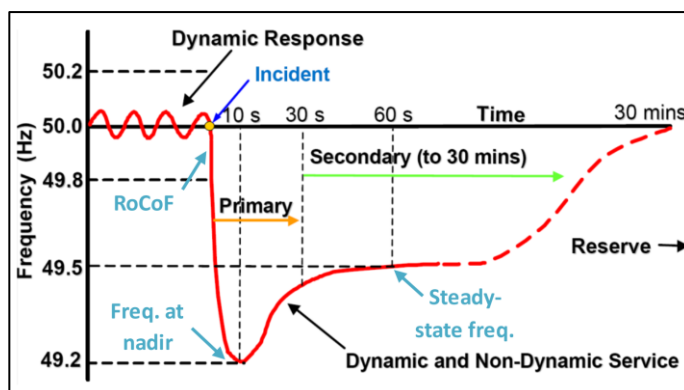
Gambar 2. PLTU Batang dan SUTET Batang-Pemalang Dalam Sistem Ketenagalistrikan Jamali

Sistem Jawa–Madura–Bali didukung oleh pembangkit berkapasitas besar, salah satunya PLTU Batang di Jawa Tengah yang bisa dilihat pada Gambar 2. PLTU Batang menggunakan teknologi *Ultra Super Critical* berbahan bakar batubara yang relatif murah [5]. Optimalisasi pembebanan PLTU Batang penting untuk menekan biaya dan mengurangi ketergantungan pada pembangkit berbahan bakar minyak dan gas. Namun, pengoperasian maksimum saat ini terkendala kapasitas penghantar dan konfigurasi radial, yang berisiko menurunkan frekuensi sistem di bawah batas aman jika terjadi kontingensi n-2. Untuk mengatasi risiko ini, dapat dilakukan pembatasan operasi atau penerapan *Defense Scheme* agar kontingensi n-2 dapat diakomodasi sekaligus memaksimalkan kontribusi PLTU Batang dalam menurunkan BPP sistem Jawa–Madura–Bali.

Defense scheme adalah sistem pertahanan operasi sistem tenaga listrik yang bertujuan menjaga keseimbangan sistem atau mengembalikan sistem tetap pada batasan normal operasi serta mencegah gangguan meluas bahkan blackout, saat terjadi gangguan yang berpotensi mengganggu kestabilan sistem, serta meningkatkan kriteria kehandalan sistem [6]. Ketidakstabilan yang dapat terjadi biasanya berupa ayunan frekuensi yang berkelanjutan, yang berpotensi mengakibatkan pemutusan (trip) unit pembangkit dan/atau beban [7]. *Defense Scheme* bertindak sebagai lapisan perlindungan terakhir untuk menghindari terjadinya pemadaman meluas pada sistem tersebut. Seiring dengan kemajuan sistem kelistrikan, desain ini perlu diperbaharui dan disesuaikan secara terus-menerus [8].

Gambar 3 menunjukkan tingkatan respons kestabilan frekuensi pada sistem tenaga listrik yang umumnya diidentifikasi sebagai primary response dan secondary response [10]. Primary response merujuk pada respons otomatis dan cepat yang terjadi secara instan ketika terjadi ketidakseimbangan antara daya yang dihasilkan pembangkit dan daya yang dibutuhkan. Primary response melibatkan pembangkit listrik yang dilengkapi dengan *free governor* yang merespons perubahan beban dengan mengatur daya mekanik dari generator. Batas bawah frekuensi pada primary frequency response disebut sebagai batas frekuensi nadir. Pada secondary response

terjadi dalam beberapa detik hingga beberapa menit setelah perubahan besar dalam kebutuhan daya atau terjadinya gangguan. Respons ini melibatkan sistem kontrol *Automatic Generation Control* (AGC). AGC adalah metode dalam pengaturan frekuensi sekunder untuk memelihara keseimbangan frekuensi suatu sistem dengan cara penyesuaian secara otomatis terhadap fluktuasi peningkatan dan penurunan daya keluaran pembangkit, agar frekuensi sistem dapat terjaga tetap stabil pada nilai referensi yang ditetapkan [4] [11].



Gambar 3. Ilustrasi RoCoF dan Frekuensi Nadir [9]

Indeks yang digunakan dalam mengukur kestabilan frekuensi dari sistem adalah *Rate of Change of Frequency* (RoCoF) dan frekuensi nadir dari sistem, seperti terlihat di Gambar 3. RoCoF menggambarkan tingkat perubahan frekuensi atau kecepatan perubahan frekuensi (df/dt) yang merupakan indikasi langsung dari ketidakseimbangan beban dengan pembangkit pada sistem karena fluktuasi beban atau gangguan [12]. Sedangkan, frekuensi nadir mencerminkan nilai terendah yang dapat dicapai oleh frekuensi selama periode tertentu, menunjukkan kemampuan sistem untuk menjaga kestabilan dalam kondisi ekstrem [9].

Aspek ekonomis merupakan salah satu parameter penting dalam pengoperasian sistem ketenagalistrikan, khususnya terkait upaya menekan Biaya Pokok Penyediaan (BPP). Berdasarkan evaluasi tahun 2024, BPP sistem Jawa–Madura–Bali mencapai Rp1.147,98/kWh, dengan dominasi bahan bakar batubara sebesar 75,04% [13]. Komponen terbesar dalam BPP adalah biaya bahan bakar, sehingga metode *Merit Order* diterapkan untuk mengoptimalkan pengoperasian pembangkit berbiaya rendah. Pendekatan ini memprioritaskan pembangkit dengan biaya produksi paling murah, seperti tenaga air dan batubara, guna mengurangi penggunaan bahan bakar minyak yang memiliki biaya tinggi [14].

Metode Penelitian

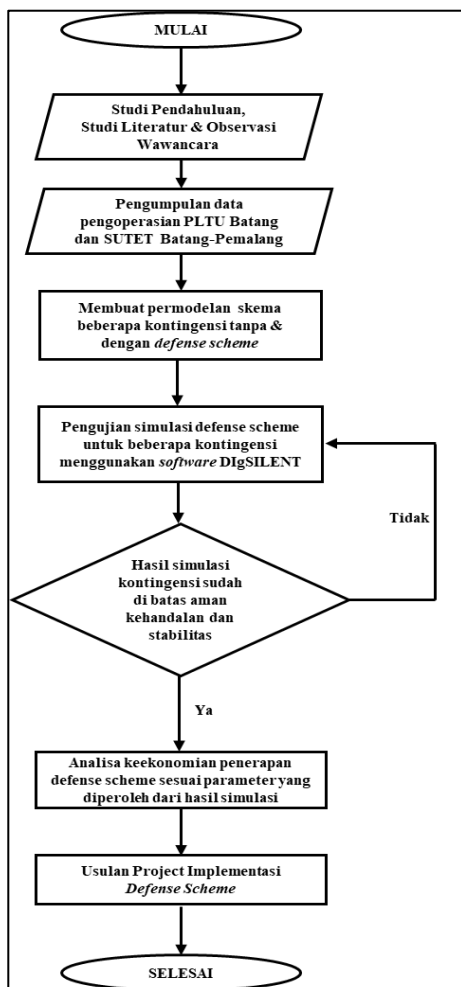
Penelitian ini didasari oleh keterbatasan outlet PLTU Batang dalam mengakomodasi kontingensi n-2 pada jaringan SUTET Batang–Pemalang, yang berpotensi menurunkan keandalan sistem ketenagalistrikan Jawa–Madura–Bali. Permasalahan utama terletak pada perancangan strategi mitigasi melalui pembatasan operasi serta pengembangan *Defense Scheme* n-2 agar sistem tetap berada dalam batas aman frekuensi, yaitu di atas 49 Hz. Hingga saat ini, kajian terkait analisis tekno-ekonomi implementasi skema *Defense Scheme* n-2 pada SUTET Batang–Pemalang belum pernah dilakukan. Saat ini, Unit PLTU Batang masih menerapkan pembatasan operasi untuk memenuhi persyaratan kontingensi n-2, sehingga pengoperasian pembangkit belum optimal sesuai dengan kapasitas daya nominal (MW) yang tersedia.

Penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut :

1. Merumuskan desain skema proteksi yang memungkinkan optimalisasi pengoperasian PLTU Batang sebagai pembangkit berbahan bakar batubara berbiaya rendah sekaligus mempertahankan kehandalan dan kestabilan.
2. Mengkaji dampak dan manfaat penerapan skema tersebut terhadap Biaya Pokok Penyediaan energi listrik.
3. Melakukan kajian kelayakan finansial proyek implementasi *Defense Scheme* n-2 untuk memastikan bahwa proyek tersebut tidak hanya layak secara teknis, tetapi juga memberikan keuntungan ekonomis.

Kegiatan penelitian terbagi menjadi beberapa tahapan seperti bisa dilihat di Gambar 4 dengan urutan:

1. Studi pendahuluan meliputi studi literatur, observasi dan wawancara.
2. Pengumpulan data kondisi pengoperasian PLTU Batang dan SUTET Batang-Pemalang.
3. Membuat permodelan kontingensi sistem dengan dan tanpa *Defense Scheme*.
4. Uji simulasi menggunakan aplikasi DIG SILENT untuk mendapatkan setting pelepasan beban yang sesuai kriteria kehandalan dan kestabilan sistem.
5. Analisis ekonomi atau kajian kelayakan finansial.
6. Rekomendasi implementasi *Defense Scheme*.



Gambar 4. Alur Penelitian

Hasil dan Pembahasan

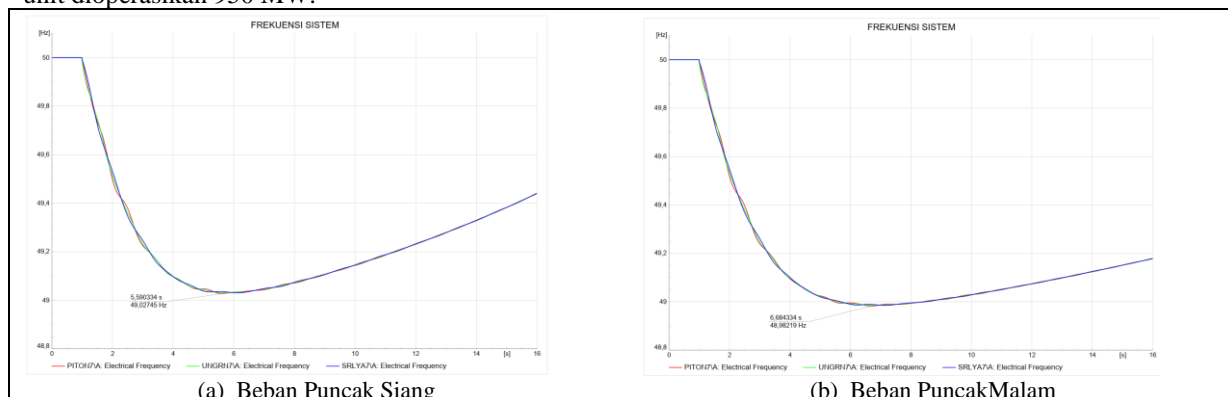
PLTU Batang masuk ke interkoneksi sistem 500kV melalui GITET Pemalang yang mengandalkan 2 sirkit SUTET berkapasitas masing-masing 3600 A. Saat ini pengoperasian 2 unit PLTU Batang tidak bisa dibebani maksimum karena keterbatasan kemampuan kapasitas penghantar dan konfigurasi PLTU Batang yang masih radial. Apabila dalam kondisi seperti sekarang PLTU Batang dipaksakan untuk dibebani maksimum pada 2 Unit, akan sangat beresiko sebab bila terjadi kontingensi n-2 atau 2 unit pembangkit trip akan menyebabkan penurunan frekuensi sistem Jawa-Bali di bawah batas bawah/nadir frekuensi.

Pada penelitian ini pengujian simulasi kontingensi n-2 pada jaringan SUTET Pemalang–Batang dilakukan melalui tiga skenario, yaitu pengoperasian PLTU Batang tanpa batasan, pengoperasian sesuai kondisi eksisting, dan pengoperasian dengan penerapan pelepasan beban melalui *Defense Scheme*. Penelitian dilaksanakan di PT PLN (Persero) UIP2B Jamali dengan memanfaatkan data primer *real-time* dari sistem SCADA serta data transaksi energi terkait PLTU Batang dan SUTET Batang–Pemalang.

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak DIGSILENT PowerFactory 2021 [15] dan menggunakan pemodelan sistem Base Case ROT (Rencana Operasi Tahunan) 2024 yang merepresentasikan kondisi aktual sistem. Simulasi waktu pembebanan dengan pengujian pada periode beban puncak siang dan malam hari kerja. Simulasi pengukuran frekuensi dilakukan di tiga lokasi, yaitu GITET Paiton (wilayah timur), GITET Ungaran (wilayah tengah), dan GITET Suralaya (wilayah barat). Skenario dimulai dengan kondisi normal, kemudian dilakukan pelepasan simultan dua unit PLTU Batang, diikuti pelepasan beban sesuai kuota simulasi. Respon frekuensi sistem dimonitor melalui grafik pemantauan, dengan analisis difokuskan pada penurunan frekuensi hingga titik nadir dan durasi pencapaiannya. Data frekuensi nadir dan waktu pencapaian digunakan untuk menganalisis kesetabilan respon sistem terhadap kontingensi n-2 pada Outlet Pembangkit berkapasitas besar PLTU Batang.

Simulasi Kontingensi n-2 tanpa batasan operasi

Pada bagian ini akan disimulasikan beberapa kontingensi n-2 yaitu 2 penghantar SUTET Batang-Pamalang #1 dan SUTET Batang-Pamalang #2 trip bersamaan tanpa batasan operasi 2 unit PLTU Batang, masing-masing unit dioperasikan 950 MW.



Gambar 5. Kondisi n-2 Beban Puncak Dengan Tanpa Batasan Operasi

Gambar 5 bisa dilihat respon sistem terhadap pembebanan 2 unit PLTU Batang yang beroperasi maksimal setiap unit di 950 MW (tanpa batasan operasi) pada beban puncak malam hari, maka bila terjadi gangguan n-2 berakibat frekuensi sistem akan turun mendekati atau di bawah dari titik nadir frekuensi sistem.

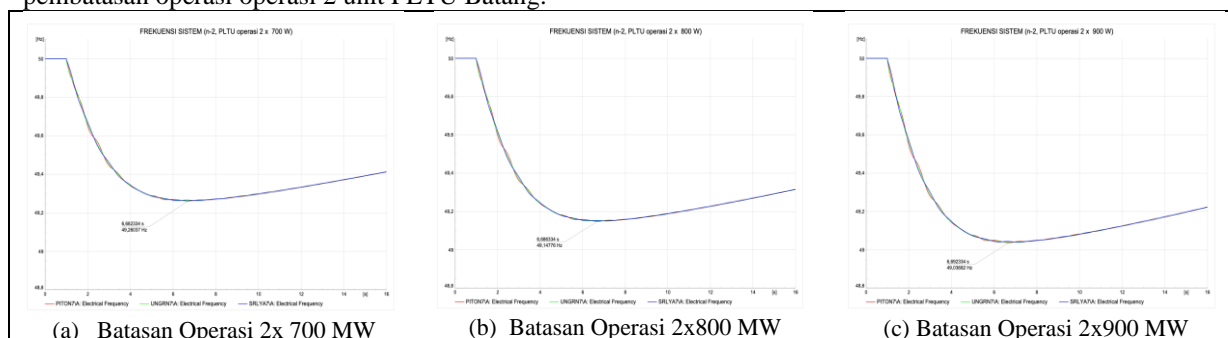
Tabel 1. Respon Sistem Terhadap Kondisi n-2 Tanpa Batasan Operasi

Kondisi Beban	Pengoperasian PLTU Batang		Frekuensi Nadir	Waktu
	Unit 1	Unit 2		
Siang Hari Kerja	950 MW	950 MW	49,027 Hz	5,59 s
Malam Hari Kerja	950 MW	950 MW	48,982 Hz	6,68 s

Dari Tabel 1 tersebut bisa diketahui respon sistem terhadap gangguan n-2 SUTET Pemalang-Batang pada saat operasi maksimum 2 x 950MW menyebabkan frekuensi sistem akan turun mendekati atau di bawah frekuensi nadir. Terutama untuk beban puncak malam hari kerja. Oleh karena itu pada penelitian ini akan ditekankan pada simulasi pada kondisi beban puncak malam hari.

Simulasi Kontingensi n-2 dengan batasan operasi (kondisi eksisting)

Pada bagian ini akan disimulasikan pada kondisi beban puncak malam hari untuk beberapa kontingensi n-2 yaitu 2 penghantar SUTET Batang-Pamalang #1 dan SUTET Batang-Pamalang #2 trip bersamaan dengan pembatasan operasi operasi 2 unit PLTU Batang.



Gambar 6. Kondisi n-2 Dengan Batasan Operasi PLTU Batang

Tabel 2. Respon Sistem Terhadap Kondisi n-2 Dengan Batasan Operasi

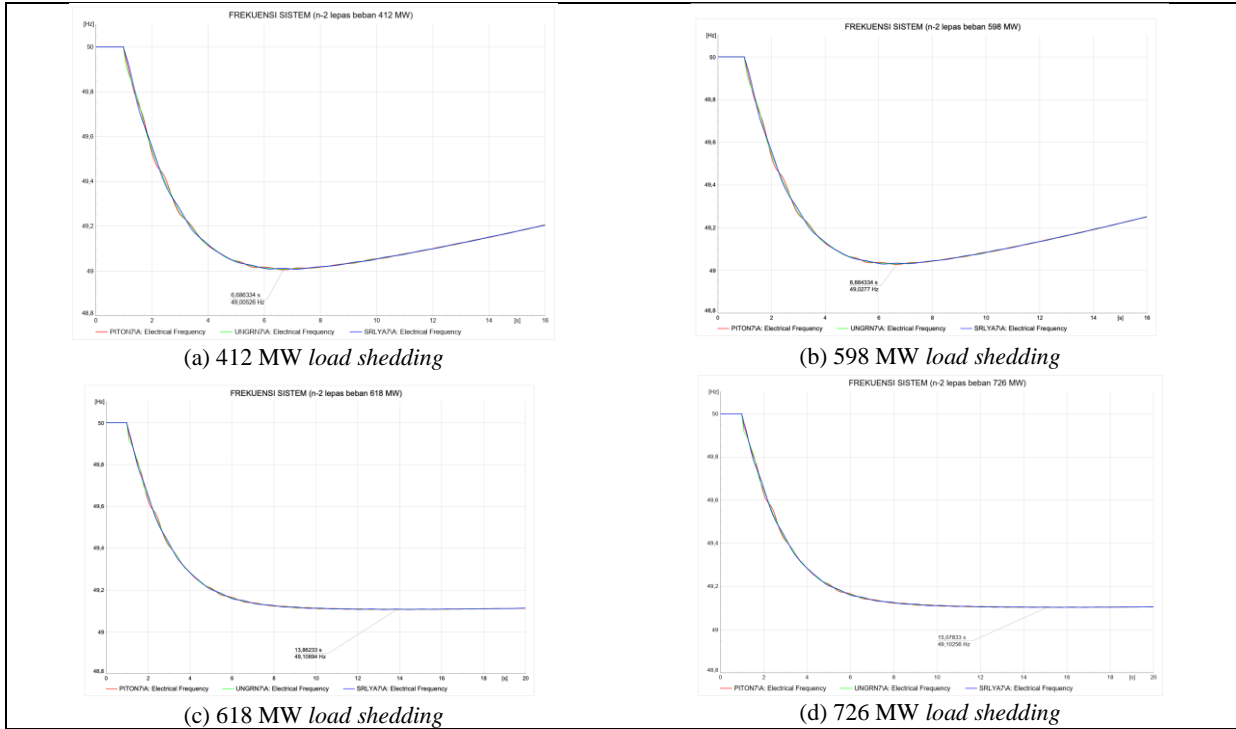
Pengoperasian Unit 1	Pengoperasian Unit 2	Frekuensi Nadir	Waktu
700 MW	700 MW	49,260 Hz	6,682 s
800 MW	800 MW	49,147 Hz	6,686 s
900 MW	900 MW	49,036 Hz	6,692 s

Dari Tabel 2 tersebut bisa diketahui respon sistem terhadap gangguan n-2 SUTET Pemalang-Batang pada saat diberlakukannya pembatasan operasi PLTU Batang per unit supaya tidak boleh lebih dari 742 MW dengan

asumsi total pembangkitan 2 unit PLTU Batang 1484 MW. Pembatasan ini berdasarkan batas indeks kekuatan sistem Jawa, Madura & Bali tahun 2024 sebesar 1.484,58 MW/Hz yang diambil dari data dari Buku Evaluasi Operasi Sistem Jawa, Madura dan Bali Tahun 2024 (EOT) [13].

Simulasi Kontingensi n-2 dengan Defense Scheme

Pada bagian ini akan disimulasikan pada kondisi beban puncak malam hari untuk beberapa kontingensi n-2 yaitu 2 penghantar SUTET Batang-Pamalang #1 dan SUTET Batang-Pemalang #2 trip bersamaan. Kondisi PLTU Batang dioperasikan maksimum 950 MW setiap unitnya dan dilakukan simulasi load shedding dari 100 MW s.d 700 MW.



Gambar 7. Kondisi n-2 Dengan Implementasi Load Shedding

Tabel 3. Respon Sistem Terhadap Kondisi n-2 Dengan Implementasi Defense Scheme

Pengoperasian PLTU Batang		Pelepasan Beban Sistem	Frekuensi Nadir	Time
Unit 1	Unit 2			
950 MW	950 MW	108 MW	48,98 Hz	6,694 s
950 MW	950 MW	202 MW	48,99 Hz	6,692 s
950 MW	950 MW	304 MW	49,036 Hz	6,692 s
950 MW	950 MW	412 MW	49,005 Hz	6,686 s
950 MW	950 MW	598 MW	49,027 Hz	6,644 s
950 MW	950 MW	618 MW	49,107 Hz	13,86 s
950 MW	950 MW	726 MW	49,102 Hz	15,07 s

Pengujian tersebut dilakukan untuk memperoleh nilai kuota pelepasan beban (*load shedding*) yang tepat dalam rangka menjamin keandalan sistem pada kondisi kontingensi n-2 SUTET Batang-Pemalang serta mengoptimalkan pengoperasian Pembangkit PLTU Batang. Berdasarkan hasil pengujian, pelepasan beban yang paling optimal berada pada kisaran 598 MW dengan durasi waktu mencapai titik nadir sebesar 6,6 detik. Pada pengujian dengan pelepasan beban lebih besar dari 600 MW, yaitu pada simulasi 618 MW dan 726 MW, sistem menunjukkan indikasi ketidakstabilan. Hal ini ditandai dengan durasi waktu menuju titik nadir yang semakin panjang, yaitu lebih dari 10 detik, akibat kekurangan pasokan daya.

Untuk menentukan kuota pelepasan beban yang optimal, dilakukan pendekatan dengan mencari titik tengah antara besaran pelepasan beban yang masih stabil (PLS = 598 MW; $t_n = 6,644$ s) dan besaran pelepasan beban yang sudah menunjukkan ketidakstabilan (PLS = 618 MW; $t_n = 13,86$ s). Perhitungannya sebagai berikut:

$$P_{LS\ Optimal} = P_{LS\ Low} + \frac{P_{LS\ High} - P_{LS\ Low}}{2} \tag{1}$$

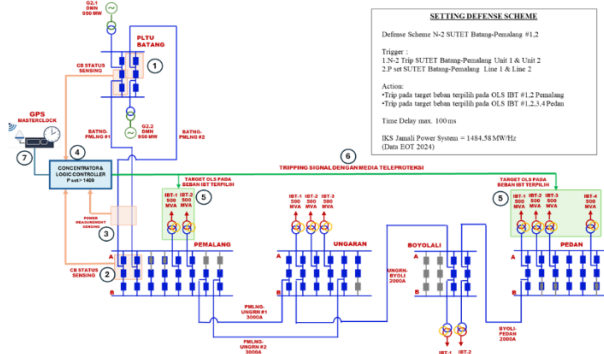
$$P_{LS\ Optimal} = 598 + \frac{618 - 598}{2} = 608\ MW$$

Keterangan:

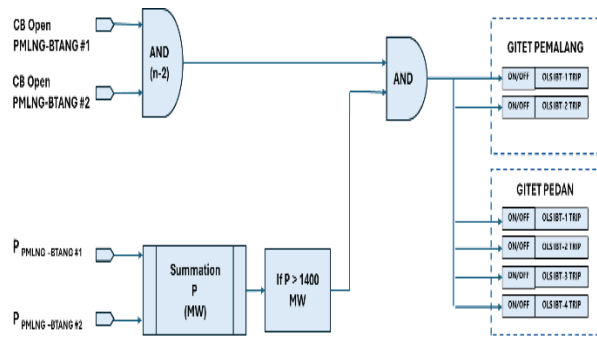
- $P_{LS\ Low}$ = Daya pelepasan beban rendah (masih kondisi stabil)
- $P_{LS\ High}$ = Daya pelepasan beban tinggi (mendekati tidak stabil)
- $P_{LS\ Optimal}$ = Daya pelepasan beban optimal

Dengan demikian, kuota pelepasan beban yang direkomendasikan untuk *Defense Scheme* pada kontingensi n-2 SUTET Batang–Pemalang adalah sebesar 608 MW. Kuota ini dapat diterapkan pada beberapa lokasi beban terpilih di sistem Jawa–Madura–Bali.

Penerapan Defense Scheme



Gambar 8. Skema Dasar Defense Scheme n-2 SUTET Batang - Pemalang #1 dan #2



Gambar 9. Logic Defense Scheme n-2 SUTET Pemalang-Batang #1 dan #2

Dari hasil pengujian berupa nilai kuota load shedding Defense Scheme tersebut bisa diperoleh besaran kuota beban load shedding untuk menerapkan Defense Scheme dengan pola event base yaitu kondisi kontingensi n-2 pengoperasian PLTU Batang. Kuota load shedding yang paling optimal di 608 MW. Pada gambar 8 dijelaskan skema dasar penerapan Defense Scheme yang n-2 SUTET Batang-Pemalang penghantar #1 & #2 dengan peralatan-peralatan terpasang sebagai berikut [16]:

1. Sensor status *open/close* yang dipasang di sisi GITET PLTU Batang untuk CB bay penghantar Pemalang-1 dan bay penghantar Pemalang-2.
2. Sensor status *open/close* yang dipasang di sisi GITET Pemalang untuk CB bay penghantar Batang-1 dan bay penghantar Batang-2.
3. Sensor pengukuran aliran daya (MW) yang dipasang pada SUTET Pemalang-Batang #1 dan #2
4. *Concentrator & Logic Controller* yang akan mengolah data-data *sensing* status CB *open/close*, dan jumlah total aliran daya pada kedua SUTET Pemalang-Batang #1 dan #2. Bila kedua kondisi tersebut memenuhi maka *Logic Controller* akan menterjemahkan tindak lanjut dengan memerintahkan *tripping Load shedding* pada baban terpilih (status sudah di-arming) dengan kuota tertentu dan waktu kerja tertentu, sesuai dengan setting *Defense Scheme* yang sudah diprogram sebelumnya. (gambar 9)
5. *Master Trip* yang merupakan kepanjangan dari *Concentrator & Logic Controller* yang akan melakukan pelepasan beban baik itu di secara lokal di Beban IBT GITET Pemalang tersebut maupun secara remote di beban IBT GITET Pedan, sesuai kuota pelepasan beban. Sebagai informasi target beban IBT di GITET Pemalang dan GITET Pedan tersebut sudah ada terpasang skema *Over Load Shedding* Eksisting sebelumnya yang secara total kuota mendekati pelepasan beban total sebesar 608MW.
6. Teleproteksi yang berfungsi mengirimkan sinyal trip dari *Concentrator & Logic Controller* untuk dikirimkan ke GI/GITET lawan dengan tujuan untuk melepaskan remote target beban yang dimaksud [17].
7. *Global Positioning System* (GPS) fungsinya sebagai sarana sinkronisasi waktu peralatan *Defense Scheme*.

Keuntungan Secara Ekonomis

PLTU Batang dengan kapasitas 2×1000 MW merupakan salah satu pemasok utama energi listrik dan berperan sebagai base load pada sistem ketenagalistrikan Jawa, Madura, dan Bali. Berdasarkan Evaluasi Operasi Tahunan (EOT) 2024, pembangkit ini memiliki Daya Mampu Netto (DMN) sebesar 2×950 MW, sehingga jika kedua unit beroperasi penuh, dapat menyuplai daya hingga 1.900 MW. Namun, pengoperasian pada kapasitas maksimum berisiko terhadap keandalan sistem karena melebihi estimasi Indeks Kekuatan Sistem (IKS) sebesar 1.484 MW/Hz sesuai EOT 2024. Kehilangan pasokan yang melampaui nilai IKS berpotensi memicu Under Frequency Load Shedding (UFLS) maupun island operation [18]. Oleh karena itu, pengoperasian yang aman untuk menjaga kestabilan sistem dilakukan dengan membatasi daya pada kisaran 700 MW per unit atau setengah dari nilai IKS.

Pembatasan operasi pada PLTU berbahan bakar batubara menyebabkan perlunya kompensasi melalui pengoperasian pembangkit alternatif berbahan bakar lebih mahal, yang umumnya digunakan sebagai *peak load*, seperti Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG). Untuk menganalisis aspek ekonomis, dilakukan perhitungan selisih biaya bahan bakar antara pengoperasian PLTU Batang dengan batasan 700 MW per unit dan pengoperasian penuh 950 MW per unit setelah penerapan *Defense Scheme Load Shedding*. Estimasi biaya dihitung berdasarkan pengoperasian selama 24 jam, menggunakan data *Average Cost* (AC) Biaya Pokok Penyediaan (BPP) dalam rupiah per kWh.

Tabel 4. Avarage Cost (AC) BPP (Rp per kWh)

Bulan	PLTU Batang (DMN = 1900MW)	PLTGU Tambak Lorok Blok 1 (DMN=405MW)
	AC (Rp/kWh)	AC (Rp/Kwh)
Januari 2025	1.141,80	2.465,64
Februari 2025	1.093,12	2.659,08
Maret 2025	1.012,21	2.271,12
April 2025	984,96	1.878,27
Mei 2025	951,49	2.271,83
Juni 2025	1.018,87	2.672,70
Juli 2025	1.043,95	2.083,05
Agustus 2025	1.041,27	1.927,60
Average Cost	1.035,62	2.278,66

Sumber : PLN UIP2B Jamali 2025

Dari data rata-rata (*Average Cost*) tersebut bisa diperhitungkan total biaya pengoperasian Pembangkit PLTU Batang selama 24 jam :

- Pengoperasian PLTU Batang 700 MW per unit dan dan 250 MW dikompensasi dengan penggunaan pembangkit lain yang berbahan bakar selain batubara, di penelitian ini diambil sampel uji dengan pengoperasian PLTGU Tambak lorok

Penggunaan Batu bara (B)

$$E(\text{kWh}) = P(W) \cdot t (h)$$

$$E (\text{kWh}) = 2 \times 700 \text{ MW} \times 24\text{h}$$

$$= 2 \times 700.000 \text{ kW} \times 24\text{h}$$

$$= 33.600.000 \text{ kWh}$$

$$\text{Biaya (B)} = \text{Rp } 1.035,62 / \text{kWh} \times 33.600.000 \text{ kWh}$$

$$= \text{Rp } 34.795.832.000$$

Penggunaan Gas (G) untuk 250 MW kompensasi

$$E(\text{kWh}) = P(W) \cdot t (h)$$

$$E (\text{kWh}) = 2 \times 250 \text{ MW} \times 24\text{h}$$

$$= 2 \times 250.000 \text{ kW} \times 24\text{h}$$

$$= 12.000.000 \text{ kWh}$$

$$\text{Biaya (G)} = \text{Rp } 2.278,66 / \text{kWh} \times 12.000.000 \text{ kWh}$$

$$= \text{Rp } 27.343.920.000$$

Total Biaya = Biaya (B) + Biaya (G)

$$= \text{Rp } 34.795.832.000 + \text{Rp } 27.343.920.000$$

$$= \text{Rp } 62.140.752.000$$

- Pengoperasian PLTU Batang 950 MW per unit dengan sudah mengimplementasikan *Defense Scheme* n-2 SUTET Batang-Pemalang

$$E(\text{kWh}) = P(W) \cdot t (h)$$

$$E (\text{kWh}) = 2 \times 950 \text{ MW} \times 24\text{h}$$

$$= 2 \times 950.000 \text{ kW} \times 24\text{h}$$

$$= 45.600.000 \text{ kWh}$$

$$\text{Biaya} = \text{Rp } 1.035,62 / \text{kWh} \times 45.600.000 \text{ kWh}$$

$$= \text{Rp } 47.224.272.000$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa pengoperasian PLTU Batang dengan pembatasan daya hingga 700 MW per unit menghasilkan biaya operasional sebesar Rp 34.795.832.000. Kekurangan pasokan sebesar 250 MW dikompensasi melalui pengoperasian PLTGU dengan biaya Rp 27.343.920.000, sehingga total biaya mencapai Rp 62.140.752.000. Sebaliknya, pengoperasian PLTU Batang pada kapasitas maksimum sesuai DMP dengan penerapan *Defense Scheme* n-2 SUTET Batang–Pemalang hanya memerlukan biaya Rp 47.224.272.000. Perbandingan kedua metode menunjukkan penghematan sebesar Rp 14.916.480.000 atau penurunan biaya sekitar 24%.

Dengan demikian, penerapan *Defense Scheme* n-2 pada SUTET Batang–Pemalang untuk meningkatkan pengoperasian PLTU Batang 2×1000 MW memenuhi kaidah pengoperasian sistem ketenagalistrikan, yaitu penyediaan energi listrik secara ekonomis dengan tetap menjaga kualitas dan keandalan.

Kajian Kelayakan Finansial

Kajian kelayakan finansial merupakan metode analisis yang berfokus pada aspek keuangan untuk menilai apakah biaya yang dikeluarkan dalam pelaksanaan usaha atau proyek investasi dapat dianggap layak atau memberikan keuntungan (*profitable*). Analisis ini dilakukan dengan mengevaluasi profitabilitas investasi melalui beberapa metode penilaian kelayakan. Beberapa metode yang digunakan dalam penelitian ini untuk penentuan kelayakan Finansial proyek adalah *Net Present Value (NPV)*, *Internal Rate of Return (IRR)*, *Profitability Index (PI)*, dan *Payback Period* [19].

Langkah awal dalam kajian finansial adalah penyusunan Rencana Anggaran Biaya (RAB) untuk pengadaan dan pemasangan *Defense Scheme n-2* pada SUTET Batang–Pemalang, sesuai dengan skema dan desain yang telah ditetapkan sebelumnya seperti di Gambar 8. Total kebutuhan anggaran diperkirakan sebesar Rp 2.218.890.000 seperti bisa dilihat di Tabel 5. Nilai ini akan digunakan sebagai investasi awal dalam kajian kelayakan finansial.

Tujuan utama implementasi *Defense Scheme n-2* pada SUTET Pemalang–Batang adalah meningkatkan keandalan dan kestabilan sistem sesuai standar mutu pelayanan. Manfaat yang dirasakan oleh pelanggan PLN adalah tersedianya pasokan listrik yang lebih andal, sehingga risiko pemadaman berkurang, dan jika terjadi gangguan, durasinya tidak lama serta tidak meluas. Dari sisi kelayakan ekonomi, proyek ini ditargetkan untuk memenuhi kinerja *Energy Not Served (ENS)*, yang tidak boleh melebihi 4.000 MWh per tahun pada sistem Jawa–Bali. ENS merupakan indikator keandalan yang menunjukkan jumlah energi yang tidak dapat disalurkan kepada pelanggan akibat gangguan atau pemadaman dalam satu tahun [20]. Nilai ENS dinyatakan dalam satuan energi (kWh atau MWh) dan digunakan untuk menilai frekuensi serta tingkat keparahan pemadaman beserta dampaknya terhadap pelanggan. Dalam penelitian ini, kegagalan fungsi *Defense Scheme n-2* berpotensi menyebabkan gangguan besar hingga blackout pada sistem Jawa-Madura-Bali.

Tabel 5. Investasi Awal Implementasi Defense Scheme

No	Peralatan	Vol	Sat.	Harga satuan	Jumlah
1	<i>Multi Function Relay</i>	2	unit	82.000.000	164.000.000
2	<i>Discrete Programmable Automation Controller-MTDS</i>	3	unit	67.000.000	201.000.000
3	<i>Real Time Automation Controller</i>	1	unit	230.000.000	230.000.000
4	<i>Teleprotection</i>	1	set	225.000.000	225.000.000
5	<i>Switch L2</i>	3	unit	35.000.000	105.000.000
6	<i>DS Panel include Pre Wiring & Annunciator</i>	3	unit	86.000.000	258.000.000
7	<i>Global Position System (GPS)</i>	1	unit	267.000.000	267.000.000
8	Material Accessories (Kabel, Terminal, dll.)	1	lot	250.500.000	250.500.000
9	Jasa Instalasi dan <i>Comissioning</i>	1	lot	250.500.000	250.500.000
				Jumlah	1.951.000.000
				PPN 11%	214.610.000
				Total (Jumlah +PPN 11%)	2.165.610.000

Tabel 6. Dasar Analisa Finansial

Dasar Analisa	Nilai	Keterangan
Target ENS	4000 MWh	SLA Keandalan Sistem
Masa Manfaat	10 tahun	
ENS Price/kWh	Rp 15.041	Data EOT 2025 UIP2B
Nilai Investasi	Rp 2.165.610.000	Investasi Awal
Biaya Total (a+b):	Rp 1.155,73 /kWh	
- Biaya pembelian tenaga listrik (a)	Rp 1.147,98 / kWh	Data EOT 2025 UIP2B
- Biaya Operasi dan Pemeliharaan (b)	Rp 7,75/kWh	Data PSA, TSA, SSA

Tabel 7. Asumsi Yang Digunakan

Asumsi	Nilai	Keterangan
Tingkat Inflasi	3,00%	Data Asumsi RKAP PLN
Bunga Deposito	4,14%	Data BI
Biaya Modal (Discount Rate)	9,70%	Data Asumsi RKAP PLN
Bunga Bank (Pinjaman)	4,75%	Data BI
Faktor Daya (PF)	0,85	Data Asumsi RKAP PLN
Faktor Kapasitas Tahun I	50%	

Pertumbuhan beban per tahun	3,35%	Data Asumsi RKAP PLN
Opportunity factor	5,00%	Data Asumsi RKAP UIP2B

Hasil kajian kelayakan finansial untuk proyek pengadaan dan pemasangan *Defense Scheme* n-2 pada SUTET Batang–Pemalang menunjukkan indikator yang positif (Gambar 10). Nilai *Net Present Value* (NPV) sebesar Rp5.791.606.000 (positif) mengindikasikan bahwa manfaat finansial proyek melebihi biaya yang dikeluarkan, sehingga proyek dinyatakan layak. Perhitungan *Internal Rate of Return* (IRR) dengan tingkat diskonto 9,7% menghasilkan nilai 54,27%, jauh di atas batas minimum yang disyaratkan, menandakan tingkat pengembalian investasi sangat optimal. Selain itu, *Profitability Index* (PI) sebesar 1,93 (>1) memperkuat kelayakan proyek karena menunjukkan manfaat lebih besar dibandingkan biaya. *Payback Period* tercatat 2,01 tahun, jauh lebih singkat dibandingkan masa manfaat aset 10 tahun, sehingga pengembalian investasi dinilai cepat.

Secara keseluruhan, hasil analisis kelayakan finansial melalui NPV, IRR, PI, dan *Payback Period* menyimpulkan bahwa proyek pengadaan dan pemasangan *Defense Scheme* n-2 SUTET Batang–Pemalang layak dilaksanakan pada tahun 2026. Seluruh indikator memenuhi kriteria kelayakan investasi dan memberikan prospek keuntungan yang optimal.

LAMPIRAN KKF											
Pengadaan Dan Pemasangan DS N-2 SUTET Batang-Pemalang											
ESTIMASI ENERGI DISELAMATKAN :	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ENS per tahun (MWh)	100	103	107	110	114	118	122	126	130	135	
ESTIMASI RUGI/LABA :	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Avoided Cost (Rp)	1.504.130	1.601.154	1.704.436	1.814.381	1.931.417	2.056.004	2.188.626	2.329.803	2.480.087	2.640.065	
Inflasi Pembelian Energi (Rp)	114.798	122.203	130.086	138.477	147.409	156.918	167.040	177.815	189.285	201.495	
Biaya depresiasi	86.624	86.624	86.624	86.624	86.624	86.624	86.624	86.624	86.624	86.624	
Laba kotor	1.302.707	1.392.326	1.487.726	1.589.279	1.697.384	1.812.461	1.934.962	2.065.364	2.204.178	2.351.946	
Biaya O&M	775	825	878	935	995	1.059	1.128	1.200	1.278	1.360	
Biaya alokasi pusat	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Laba operasional	1.301.932	1.391.501	1.486.848	1.588.345	1.696.389	1.811.402	1.933.834	2.064.164	2.202.900	2.350.586	
Hasil/Biaya bunga	-102.866	-50.280	-1.154	45.998	97.310	153.239	214.123	280.320	352.211	430.207	
Laba sebelum pajak	1.199.066	1.341.221	1.485.694	1.634.342	1.793.698	1.964.641	2.147.957	2.344.483	2.555.111	2.780.793	
Pajak	178.610	393.616	436.958	481.553	529.359	580.642	635.637	694.595	757.783	825.488	
Laba setelah pajak	1.020.456	947.605	1.048.735	1.152.790	1.264.339	1.383.999	1.512.320	1.649.888	1.797.328	1.955.305	
Laba kumulatif	1.020.456	1.968.061	3.016.796	4.169.586	5.433.925	6.817.924	8.330.244	9.980.132	11.777.460	13.732.765	
ESTIMASI ARUS KAS :	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ARUS KAS MASUK											
Avoided Cost (Rp)	1.504.130	1.601.154	1.704.436	1.814.381	1.931.417	2.056.004	2.188.626	2.329.803	2.480.087	2.640.065	
Nilai sisa											
Total	0,00	1.504.130	1.601.154	1.704.436	1.814.381	1.931.417	2.056.004	2.188.626	2.329.803	2.480.087	2.640.065
ARUS KAS KELUAR											
Investasi I	2.165.610,00										
Investasi II		0									
Biaya Operasi & Pemeliharaan	115.573	123.028	130.964	139.412	148.405	157.977	168.168	179.015	190.563	202.855	
Pajak	178.610	393.616	436.958	481.553	529.359	580.642	635.637	694.595	757.783	825.488	
Total	2.165.610,00	294.183	516.644	567.922	620.965	677.764	738.620	803.805	873.610	948.346	1.028.343
Saldo kas	-2.165.610,00	1.209.947	1.084.509	1.136.514	1.193.416	1.253.653	1.317.384	1.384.821	1.456.193	1.531.741	1.611.723
Bunga	0,00	-102.866	-50.280	-1.154	45.998	97.310	153.239	214.123	280.320	352.211	430.207
Kas kumulatif	-2.165.610,00	-1.058.530	-24.300	1.111.060	2.350.474	3.701.437	5.172.060	6.771.004	8.507.517	10.391.469	12.433.399
Faktor diskonto	1,00	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Nilai sekarang	-2.165.610,00	1.102.960	901.198	860.904	824.073	789.122	755.914	724.348	694.330	665.772	638.593
Nilai sekarang bersih	-2.165.610,00	-1.062.650	-161.453	699.452	1.523.525	2.312.647	3.068.561	3.792.909	4.487.239	5.153.012	5.791.604
HASIL PENILAIAN INVESTASI :											
PV Inflow	12.020.765	(000 Rp.)									
PV Outflow	6.229.160	(000 Rp.)									
NPV	5.791.604	(000 Rp.)									
IRR	54,27%										
PI	1,930										
KESIMPULAN	LAYAK										
PAY BACK PERIOD	2,01	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-

Gambar 10. Perhitungan Kelayakan Finansial Dengan MS Excel

Simpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan *Defense Scheme* n-2 pada SUTET Batang–Pemalang merupakan solusi efektif untuk meningkatkan keandalan dan kestabilan sistem ketenagalistrikan Jawa–Madura–Bali. Simulasi kontingensi n-2 membuktikan bahwa skema ini memungkinkan pengoperasian PLTU Batang mendekati Daya Mampu Netto (2×950 MW) dengan tetap menjaga frekuensi sistem di atas 49 Hz, serta mengurangi risiko pemadaman luas. Dari sisi ekonomi, penerapan *Defense Scheme* memberikan penghematan biaya operasional sebesar 24% dibandingkan metode pembatasan daya, dan hasil kajian finansial melalui NPV, IRR, PI, dan *Payback Period* menunjukkan kelayakan investasi yang tinggi. Implikasi kebijakan dari temuan ini adalah perlunya percepatan implementasi *Defense Scheme* n-2 pada pembangkit besar lain yang memiliki karakteristik serupa, integrasi skema ini dengan mekanisme *Under Frequency Load Shedding* (UFLS) eksisting untuk memperkuat proteksi sistem, serta pemanfaatannya sebagai referensi dalam pedoman operasional PLN.

Selain itu, penelitian ini dapat menjadi bahan pertimbangan manajemen PLN dalam pengambilan kebijakan terkait penganggaran biaya dan percepatan pelaksanaan proyek implementasi *Defense Scheme*. Dengan demikian, proyek ini tidak hanya memenuhi prinsip penyediaan energi yang andal dan ekonomis, tetapi juga memberikan arah strategis bagi pengembangan kebijakan ketenagalistrikan nasional.

Daftar Pustaka

- [1] D. Marsudi, "Operasi Sistem Tenaga Listrik (Edisi 3)," *Graha Ilmu*, pp. 2–5, 2016.
- [2] A. R. Nazwan, D. Tessel, and A. Rabiula, "Analisis Kontingensi Kinerja Sistem Kelistrikan Saluran Transmisi 150 KV di Substansi Jambi," *Electron J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. Volume 6 N, 2025, [Online]. Available: https://repository.unja.ac.id/view/creators/Nazwan=3AAhmad_Rifki=3A=3A.default.html
- [3] D. D. Rasolomampionona, M. Połeczki, K. Zagrajek, W. Wróblewski, and M. Januszewski, "A Comprehensive Review of Load Frequency Control Technologies," 2024. doi: 10.3390/en17122915.
- [4] B. Mukhlisoti and I. Garniwa, "Analysis Of Improvements To The Automatic Generation Control (AGC) Frequency Regulation System In The Java Madura Bali System For Intermittent New And Renewable Energy (EBT) Interconnection," *J. Ekon. Teknol. dan Bisnis*, vol. 2, no. 7, 2023, doi: 10.57185/jetbis.v2i7.49.
- [5] Dr. Cahyadi, *PLTU Batubara Superkritikal Yang Efisien*. Balai Besar Teknologi Energi, BPPT, 2015.
- [6] A. H. Maulana, "Mengintegrasikan Adaptive Defense Scheme Ke Master Station Scada Pada Sistem Tenaga Listrik Jawa-Bali," *PETIR*, vol. 14, no. 1, 2020, doi: 10.33322/petir.v14i1.935.
- [7] P. Kundur *et al.*, "Definition and classification of power system stability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 3, 2004, doi: 10.1109/TPWRS.2004.825981.
- [8] D. H. Barus and E. Y. Pramono, "No load shedding defence scheme as reinforcement in Aceh province network," in *Proceedings of the Universities Power Engineering Conference*, 2014. doi: 10.1109/UPEC.2014.6934598.
- [9] F. Teng, M. Aunedi, D. Pudjianto, and G. Strbac, "Benefits of demand-side response in providing frequency response service in the future GB power system," *Front. Energy Res.*, vol. 3, no. AUG, 2015, doi: 10.3389/fenrg.2015.00036.
- [10] S. Ntomalis, P. Iliadis, K. Atsonios, A. Nesiadis, N. Nikolopoulos, and P. Grammelis, "Dynamic modeling and simulation of non-interconnected systems under high-res penetration: The madeira Island case," *Energies*, vol. 13, no. 21, 2020, doi: 10.3390/en13215786.
- [11] Pusat Kajian LKFT UGM, "Laporan Akhir Studi Kebutuhan Cadangan Fast Response Untuk Meningkatkan Keandalan, Kualitas dan Keekonomian Listrik di Sistem Jawa, Madura dan Bali 2024-2026," 2025.
- [12] A. Adrianti, M. Nasir, and A. R. Salvayer, "Skema Pelepasan Beban Menggunakan Relai Rate of Change of Frequency dengan Supervisi Under Frequency Relay," *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 19, no. 2, 2020, doi: 10.24843/mite.2020.v19i02.p18.
- [13] PT PLN UIP2B Jamali, "Evaluasi Operasi Sistem Jawa, Madura, dan Bali Tahun 2024," Depok, 2025.
- [14] A. S. Putra, I. Garniwa, E. S. Arilanggaaji, and S. S. Pradana, "A study on carbon cap and trade effect to cost of electricity in accordance with the Merit Order of 300-400 MW coal power plants," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021. doi: 10.1088/1755-1315/880/1/012049.
- [15] DlgSILENT GmbH, "*DlgSILENT PowerFactory 2021 User Manual*". 2021.
- [16] PT PLN (Persero), "Pedoman Umum Peralatan Sistem Defense Scheme," *SPLN S5.0062023*, no. KepDir PLN No. 0167.K/DIR/2023, 2023.
- [17] A. Fariris and Sumpena, "Penggunaan Teleproteksi Digital Untuk Mendukung Keandalan Sistem Proteksi Defense Scheme," *J. Teknol. Ind. UNSURYA*, vol. 11, no. 1, 2022.
- [18] A. Sofwan and I. Aditya, "Analisa Pelepasan Beban Oleh Under Frequency Relay Berbasis Simulasi Pada Sistem Tenaga Listrik Jawa Bali," *Sinusoida*, vol. 24, no. 2, pp. 38–46, 2022, doi: 10.37277/s.v24i2.1466.
- [19] S. H. Situmorang, "Studi Kelayakan Bisnis," in *USU Press*, 2007.
- [20] Slamet Nurhadi, Mochammad Mieftah, Heri Sungkowo, and Sukamdi, "Peningkatan Keandalan Berbasis Nilai Energy Not Supplied (ENS) Pada Penyulang Banyu Biru," *Elposys J. Sist. Kelistrikan*, vol. 11, no. 2, 2024, doi: 10.33795/elposys.v11i2.5157.