



Studi Tekno Ekonomi Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Pulau Badi, Provinsi Sulawesi Selatan

Jerry Kurniawan¹, Syamsir Abduh², Marwan Rosyadi³

¹Institut Teknologi PLN, Jakarta, Indonesia, jerry2310504@itpln.ac.id

²Institut Teknologi PLN, Jakarta, Indonesia, syamsir@itpln.ac.id

³Institut Teknologi PLN, Jakarta, Indonesia, marwanrosyadi@itpln.ac.id

Corresponding Author: jerry2310504@itpln.ac.id¹

Abstract: PLN is committed to increasing the renewable energy mix and achieving Net Zero Emissions by 2060, as outlined in the 2025-2034 Electricity Supply Business Plan (RUPTL). A concrete step is the development of solar power plants (PLTS) or hybrid systems, such as the one planned for Badi Island, South Sulawesi. A study utilized HOMER Pro software to simulate a Diesel-Solar-Battery hybrid system, aiming to find the optimal configuration with the lowest Net Present Cost (NPC) and Levelized Cost of Energy (LCOE), while reducing emissions. The simulation results indicate that Scenario 2 is the optimal one, involving the hybrid operation of two diesel generators with a solar power plant and a battery system. This configuration significantly decreased the NPC from IDR 41.1 Billion to IDR 37.6 Billion and reduced the LCOE by 8% to IDR 5,264.74/kWh. CO₂ emissions were also reduced from 454,782 kg/year to 334,751 kg/year. A sensitivity analysis emphasized that a rise in fuel prices would increase the LCOE, highlighting the impact of fuel price volatility.

Keywords: Solar Power Plant, Hybrid System, Net Present Cost (NPC), LCOE, Exhaust Emissions

Abstrak: PLN berkomitmen meningkatkan bauran energi terbarukan dan mencapai Net Zero Emissions pada tahun 2060, sebagaimana tertuang dalam RUPTL 2025-2034. Langkah konkretnya adalah pengembangan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) atau sistem hibrida, seperti yang direncanakan di Pulau Badi, Sulawesi Selatan. Studi menggunakan perangkat lunak HOMER Pro mensimulasikan sistem hibrida PLTD-PLTS-Baterai untuk mencari konfigurasi yang optimal dengan Net Present Cost (NPC) dan Levelized Cost of Energy (LCOE) terendah, serta mengurangi emisi. Hasil simulasi menunjukkan Skenario 2 sebagai yang optimal, yaitu operasi hibrida dua generator diesel (PLTD 1 dan PLTD 2) dengan PLTS dan sistem baterai. Konfigurasi ini signifikan menurunkan NPC dari Rp 41,1 Miliar menjadi Rp 37,6 Miliar dan LCOE turun 8% menjadi Rp 5.264,74/kWh. Emisi CO₂ juga berkurang dari 454.782 kg/tahun menjadi 334.751 kg/tahun. Analisis sensitivitas menekankan bahwa kenaikan harga bahan bakar akan meningkatkan LCOE, menunjukkan dampak volatilitas harga bahan bakar.

Kata Kunci: Pembangkit Listrik Tenaga Surya, Sistem Hibrid, Net Present Cost (NPV), LCOE, Emisi Gas Buang.

PENDAHULUAN

Kondisi geografis Indonesia sebagai negara kepulauan menyebabkan ketergantungan yang tinggi pada Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) di wilayah terpencil, termasuk Pulau Badi di Kabupaten Pangkajene Kepulauan. Namun, sejalan dengan target *Net Zero Emission (NZE)* 2060 dan program *Accelerated Renewable Energy Development (ARED)* oleh PLN, transisi menuju energi terbarukan menjadi prioritas untuk memenuhi prinsip keberlanjutan lingkungan (*acceptability*) dan efisiensi ekonomi.

Secara teknis, energi surya di Indonesia diperkirakan memiliki potensi sebesar 206 GW, dimana pada tahun 2023 dimanfaatkan sebesar 242 MW (RUPTL PLN 2025-2034, 2025). Di Pulau Badi, sistem kelistrikan saat ini hanya beroperasi 12 jam (18.00–06.00) menggunakan PLTD berkapasitas total 252 kW. Keterbatasan akses listrik di siang hari menghambat potensi ekonomi lokal dan pengembangan konsep pariwisata hijau (*green tourism*) yang berkelanjutan.

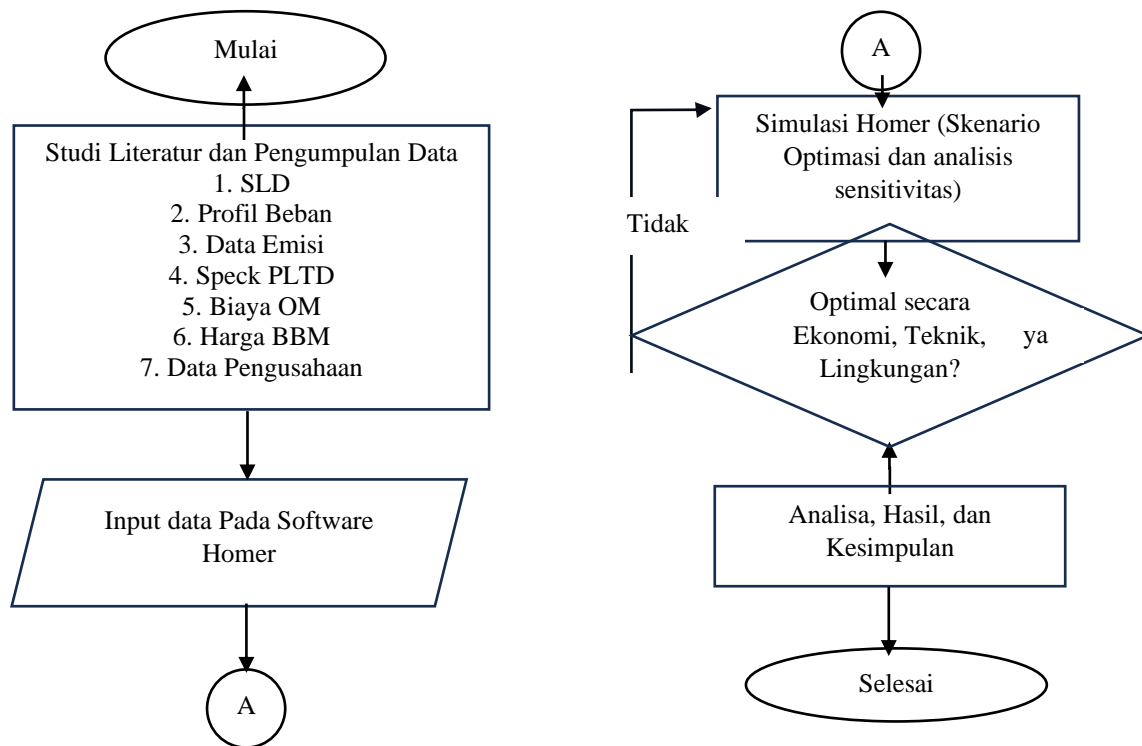
Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai bagian dari sistem hibrid dimana sistem hibrid merupakan sistem yang dinilai cukup tepat untuk dapat diterapkan pada sistem kelistrikan isolated atau kepulauan (1). Sistem ini dinilai cukup efisien dan andal dalam memenuhi kebutuhan beban serta dalam hal penghematan bahan bakar serta ramah lingkungan. Seperti pada penelitian yang dilakukan di pulau Tunda terkait dengan design pembangkit listrik hibrid, maka didapatkan penurunan nilai emisi yang terjadi sebesar 15,1% (Otong et al., 2017).

Selain menurunkan emisi, sistem hibrid juga dapat mencapai *Levelized Cost of Energy (LCOE)* yang lebih kompetitif. *Levelized cost of energy (LCOE)* merupakan parameter ekonomi yang digunakan secara luas untuk mengevaluasi dan membandingkan biaya produksi energi listrik dari berbagai jenis pembangkit dalam satuan biaya per kilowatt-jam (Arsikaputra et al., 2020; Azizah & Purbawanto, 2021). Penelitian ini bertujuan untuk menentukan konfigurasi sistem hibrid (*PV-Baterai-PLTD*) yang paling optimal di Pulau Badi dengan mempertimbangkan aspek teknis, ekonomis, dan lingkungan menggunakan perangkat lunak HOMER. HOMER Pro atau *hibrid optimization model of multiple energy resources* adalah sebuah perangkat lunak yang dikembangkan oleh *national renewable energy lab*. Software ini dapat melakukan sebuah simulasi untuk pembangkit dengan sistem hibrid dengan menggunakan energi terbarukan sehingga menghasilkan sistem pembangkitan yang paling optimal, dimana dapat dilakukan secara *on grid* maupun *off grid* untuk semua kemungkinan (Sianturi, 2021).

METODE

Penelitian ini adalah jenis penelitian yang menggabungkan antara kuantitatif dan simulasi. Penelitian kuantitatif yang digunakan adalah dengan melakukan pengumpulan data-data sekunder yang dibutuhkan sebagai data masukan awal untuk disimulasikan. Data-data ini berupa profil beban sistem kelistrikan eksisting, produksi energi saat ini, jenis pembangkit, jam operasi untuk masing-masing pembangkit, data radiasi yang didapatkan dari *library software*. Selain data teknik seperti yang telah disebutkan diatas, dibutuhkan pula data-data berupa tingkat inflasi serta data tingkat suku bunga yang ada di Indonesia selama satu tahun terakhir, untuk kemudian diambil nilai rata rata dari masing-masing parameter. Data-data spesifikasi teknis rencana peralatan yang akan ditambahkan seperti PLTS, baterai, serta konverter yang nantinya akan dimasukkan pada program simulasi untuk kemudian diolah atau disimulasikan dengan menggunakan software homer guna mendapatkan skema sistem kelistrikan yang paling optimal dengan kata lain software tersebut akan melakukan simulasi

untuk menentukan pola operasi pembangkit terbaik dari nilai ekonomi berupa NPC dan LCOE terendah, penurunan nilai emisi, serta nilai kriteria ekonomi dan teknik lainnya untuk semua kemungkinan operasi pembangkit yang akan dilakukan hibrid dibandingkan dengan operasi pembangkit saat ini. Adapun konsep penelitian ini meliputi tahapan-tahapan seperti studi literatur, pengumpulan data, penginputan data pada software, simulasi, serta analisa hasil simulasi dan pembahasan dan yang terakhir adalah kesimpulan. Langkah langkah tersebut dapat dilihat pada diagram alir seperti pada Gambar 1 Diagram alir



Gambar 1 Diagram alir

Analisis sensitivitas merupakan metode analisis yang digunakan untuk mengukur pengaruh perubahan satu atau lebih variabel input terhadap hasil akhir dari suatu model ekonomi (Azizah & Purbawanto, 2021; Salasa et al., 2017). Dalam konteks studi kelayakan ini, analisis ini berguna untuk mengetahui seberapa sensitif parameter ekonomi seperti *Net Present Cost* (NPC), *Levelized Cost of Energy* (LCOE) terhadap perubahan asumsi seperti biaya bahan bakar, suku bunga serta inflasi. Analisis sensitivitas menjadi penting dalam perencanaan pembangunan PLTS karena ketergantungan terhadap parameter eksternal yang sangat dinamis, seperti harga bahan bakar dan biaya modal, yang dapat mempengaruhi kelayakan ekonomi proyek secara signifikan.

Setelah melakukan analisis sensitivitas, dilakukan pula metode optimasi yaitu metode MCDM. Metode MCDM yang digunakan adalah SAW atau *simple additive weighting* (Alanazi & Alanazi, 2023; Sigalingging et al., n.d.). Pada studi ini telah ditentukan bobot dan kriteria untuk setiap alternatif untuk memilih skenario paling optimal dalam studi pembangkit listrik hibrid PLTS–PLTD. Penilaian dilakukan berdasarkan tiga aspek utama, yaitu ekonomi, teknik, dan lingkungan, dengan bobot masing-masing 50%, 40%, dan 10%. Pada aspek ekonomi, kriteria yang dipertimbangkan meliputi net present cost (NPC) yang merepresentasikan total biaya proyek selama umur operasinya dalam nilai sekarang, levelized cost of energy (LCOE) yang menunjukkan biaya produksi listrik per kWh, potensi pengurangan subsidi energi dari pemerintah, internal rate of return (IRR) sebagai indikator kelayakan finansial, serta payback period (PP) yang mengukur waktu pengembalian investasi. Sementara itu, aspek teknik mencakup lima kriteria, yaitu luas lahan yang dibutuhkan untuk instalasi pembangkit, efisiensi baterai sebagai indikator kemampuan penyimpanan energi,

specific fuel consumption (SFC) untuk mengukur efisiensi penggunaan bahan bakar pada genset, konsumsi bahan bakar total, serta renewable fraction yang menunjukkan proporsi energi terbarukan dalam total produksi listrik. Pada aspek lingkungan, kriteria yang digunakan adalah emisi yang dihasilkan, khususnya dari pembakaran bahan bakar pada PLTD.

Tabel 1 Bobot dan Kriteria Penilaian untuk Analisis Multi-Kriteria pada Studi Tekno-Ekonomi Pembangkit Hibrid

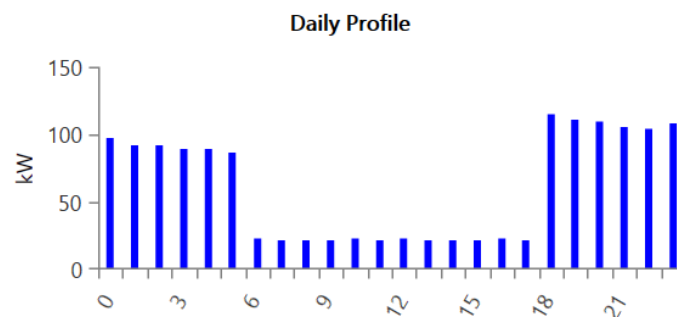
Ekonomi	Bobot (50%)	Kriteria
		NPC
		LCOE
		Pengurangan Subsidi
		IRR
		PP
Teknik	Bobot (40%)	Kriteria
		Luas Lahan
		Efisiensi Baterai
		SFC
		Konsumsi Bahan Bakar
		Renewable Fraction
Lingkungan	Bobot (10%)	Emisi

Struktur pembobotan ini memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih objektif dan terukur karena mempertimbangkan keseimbangan antara biaya, kinerja teknis, dan dampak lingkungan. Kriteria yang dipilih relevan dengan tujuan studi, yaitu menemukan skenario dengan biaya terendah, kinerja optimal, dan dampak lingkungan minimal.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Profil Beban Listrik Pulau Badi

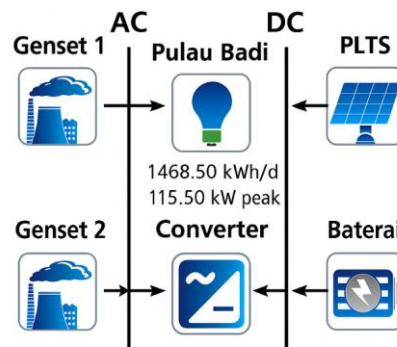
Pada simulasi sistem kelistrikan pulau Badi, profil beban yang ada saat ini disuplai oleh 2 generator dengan masing masing beban yaitu untuk generator 1 adalah sebesar 83 kW dan generator 2 adalah sebesar 32,5 kW. Pada rentang waktu antara pukul 00.00 hingga 06.00 dan pada rentang waktu antara pukul 18.00 hingga 24.00, beban listrik berada pada posisi tertinggi yaitu diatas 100 kW. Pada periode waktu antara pukul 06.00 hingga 18.00, diasumsikan adalah beban terkecil generator kedua yang dianggap flat yaitu sebesar 22-23 kW seperti terlihat pada gambar 2



Gambar 2 profil beban pulau Badi

2. Hasil Simulasi Sistem Hibrid

Pada simulasi homer, bentuk sistem yang digunakan akan terdiri dari 2 PLTD, Beban, PV, baterai dan juga inverter sesuai dengan gambar 3. Dari data tersebut kemudian dilakukan simulasi untuk mencari skenario terbaik dari masing-masing kemungkinan kombinasi. Simulasi ini menghasilkan 56.937 kemungkinan hasil dimana 41.366 simulasi yang layak serta 15.571 yang tidak layak.



Gambar 3 sistem pemodelan pulau Badi

Dari hasil simulasi dikelompokkan kembali menjadi menjadi 7 model skenario atau unit komitmen termasuk dengan skenario eksisting saat ini yaitu skenario dengan sumber pembangkitan yang hanya disuplai oleh PLTD untuk kemudian dibandingkan terkait dengan sistem yang paling optimal. 7 unit komitmen tersebut adalah

Tabel 2 Unit komitmen

	PV	PLTD 1	PLTD 2	Baterai	Konverter
Skenario 1	111 kW	90 kW	-	887 kWh	34,3 kW
Skenario 2	111 kW	70 kW	20 kW	1005 kWh	32,1 kW
Skenario 3	466 kW	-	-	6157 kWh	176 kW
Skenario 4	-	80 kW	30 kW	-	-
Skenario 5	-	80 kW	30 kW	16,9 kWh	0,906 kW
Skenario 6	50 kW	90 kW	20 kW	118 kWh	25,4 kW
Skenario 7	75 kW	100 kW	-	507 kWh	59,6 kW

Berdasarkan hasil simulasi berupa unit komitmen, maka dilakukan perhitungan penyesuaian lahan yang akan digunakan dalam pembangunan rencana PLTS. PV yang digunakan pada simulasi ini menggunakan ukuran dimensi 76,90 x 38,70 x 1,57 inci. Lahan yang tersedia pada pulau Badi adalah sebesar 1023m². Berdasarkan Tabel 2 maka didapatkan hasil perhitungan kebutuhan lahan untuk PV berdasarkan masing masing skenario yaitu

Tabel 3 kebutuhan lahan PV

	Kebutuhan PV	Ukuran PV (kW)	Kebutuhan panel (jumlah)	Kebutuhan lahan (m2)	Sisa lahan (m2)
Skenario 1	111	0,325	342	656	367
Skenario 2	111	0,325	342	656	367
Skenario 3	466	0,325	1434	2753	-1730
Skenario 4	0	0	0	0	1023
Skenario 5	0	0	0	0	1023
Skenario 6	50	0,325	154	295	728
Skenario 7	75	0,325	231	443	560

Kebutuhan lahan untuk penempatan baterai juga perlu diperhitungkan. Spesifikasi rak baterai yang digunakan adalah dengan dimensi 2,4 m². Berdasarkan pada Tabel 2 tersebut maka didapatkan hasil perhitungan kebutuhan lahan untuk baterai berdasarkan masing masing skenario. Dari sisi keterjangkauan lahan dan kelayakan teknis, skenario 1, 2, 5, 6, dan

7 merupakan skenario yang paling realistis untuk diimplementasikan karena memadukan kebutuhan penyimpanan energi yang moderat dengan efisiensi penggunaan ruang.

Tabel 4 Kebutuhan lahan baterai

	Kebutuhan baterai	Ukuran baterai (kWh)	Ukuran baterai (m2)	Kebutuhan lahan (m2)	Sisa ukuran pemetaan (m2)
Skenario 1	887 kWh	8,45	2,4	252	115
Skenario 2	1005 kWh	8,45	2,4	285,6	82
Skenario 3	6157 kWh	8,45	2,4	1749,6	-3480
Skenario 4	-	0	2,4	0	1023
Skenario 5	16,9 kWh	8,45	2,4	4,8	1018
Skenario 6	118	8,45	2,4	33,6	694
Skenario 7	507 kWh	8,45	2,4	114	346

3. LCOE

Secara keseluruhan jika dilihat dari sisi teknik serta ekonomi maka skenario 2 memberikan nilai NPC paling rendah dibandingkan dengan skenario dasar dan juga skenario hibrid lainnya dengan kata lain adalah skenario hibrid kedua adalah skenario paling optimal untuk diterapkan pada pulau Badi. Hal ini terlihat dari nilai NPC yang paling rendah yaitu sebesar \$2.305.771,1 dan juga LCOE sebesar Rp. \$0,32/kWh seperti pada Tabel 5

Tabel 5 perbandingan nilai NPC dan LCOE untuk semua skenario

	PV	PLTD 1	PLTD 2	Baterai	Konverter	NPC (Juta USD)	LCOE (USD/kWh)
Skenario 1	111 kW	100 kW	-	887 kWh	34,3 kW	2,33	0,33
Skenario 2	111 kW	90 kW	10 kW	1005 kWh	32,1 kW	2,30	0,322
Skenario 3	466 kW	-	-	6157 kWh	176 kW	2,54	0,367
Skenario 4	-	80	30	-	-	2,51	0,35
Skenario 5	-	80	30	16,9 kWh	0,9 kW	2,52	0,348
Skenario 6	50	90 kW	20 kW	118 kWh	25,4 kW	2,37	0,326
Skenario 7	75	100 kW	-	507 kWh	59,6 kW	2,35	0,329

Dari perbandingan ini, jika dikaitkan dengan subsidi, terdapat penghematan dari nilai LCOE hasil simulasi dan perhitungan dengan harga jual listrik saat ini. Pendapatan PLN dari subsidi dari pemerintah adalah selisih dari harga jual saat ini dibandingkan dengan biaya pokok pembangkitan yang diperbolehkan ditambah margin 7% dengan harga jual saat ini per masing-masing golongan tarif kecuali untuk golongan tarif yang telah mendapatkan penyesuaian tarif otomatis menurut Peraturan Menteri ESDM No. 3 Tahun 2020 tentang perubahan ke-4 atas Peraturan Menteri ESDM No. 28 Tahun 2016 tentang tarif tenaga listrik untuk listrik yang disediakan oleh PT PLN (Persero).

Dengan tarif rumah tangga saat ini adalah sebesar US\$0,088, maka dapat diketahui besaran nilai subsidi untuk masing-masing skenario dan perhitungan sesuai dengan Peraturan Menteri ESDM tersebut, maka didapatkan nilai penghematan subsidi listrik sesuai dengan Tabel 6.

Tabel 6 Penghematan subsidi dibandingkan dengan skenario dasar

	LCOE for Subsidi (USD)	Subsidi/kWh (USD)	Konsumsi (USD)	Biaya Subsidi (USD)	Penghematan Subsidi (USD)
S1	\$0,35	\$0,26	\$32,37	\$137.641,48	\$14.007,31
S2	\$0,35	\$0,26	\$32,35	\$135.520,66	\$16.128,13
S3	\$0,39	\$0,30	\$31,41	\$156.063,01	-\$4.414,22
S4	\$0,37	\$0,28	\$32,71	\$151.648,79	\$0,00

	LCOE for Subsidy (USD)	Subsidi/kWh (USD)	Konsumsi (USD)	Biaya Subsidi (USD)	Penghematan Subsidi (USD)
S5	\$0,37	\$0,28	\$32,73	\$151.825,17	-\$176,38
S6	\$0,35	\$0,26	\$32,73	\$139.415,46	\$12.233,33
S7	\$0,35	\$0,26	\$32,73	\$141.026,20	\$10.622,59

4. Perbandingan Nilai SFC

Nilai SFC menunjukkan efisiensi penggunaan bahan bakar per kWh listrik yang dihasilkan. Pada Tabel 7 terlihat bahwa kontribusi produksi energi dan konsumsi BBM bervariasi tergantung pada konfigurasi skenario. Pada skenario 1, genset 1 menghasilkan 385.055 kWh/tahun dengan konsumsi BBM 127.983 liter, sedangkan genset 2 tidak beroperasi. skenario 3 merupakan kondisi tanpa penggunaan kedua genset, sehingga nilai produksi dan konsumsi BBM adalah nol. Pada skenario 4 dan 5 menunjukkan operasi simultan kedua genset, dengan total produksi listrik yang lebih tinggi namun juga diikuti konsumsi BBM yang signifikan. Pada skenario 6 menunjukkan nilai SFC pada kisaran 0,33 dan pada skenario 7 menghasilkan nilai 0,260 dari penggunaan genset 1.

Tabel 7 Perbandingan nilai SFC

	Genset 1		Genset 2		SFC Genset 1 (0,33)	SFC Genset 2 (0,34)
	kWh Produksi/tahun	Konsumsi BBM	kWh Produksi/tahun	Konsumsi BBM		
S 1	385055	127983	0	0	0,332	0,000
S 2	282846	93775	95683	30047	0,332	0,314
S 3	0	0	0	0	0,000	0,000
S 4	319010	105554	218270	68260	0,331	0,313
S 5	318005	105553	218015	68191	0,332	0,313
S 6	369227	121802	106497	32980	0,330	0,310
S 7	547932	142505	0	0	0,260	0,000

Secara keseluruhan didapatkan bahwa nilai SFC dari hasil simulasi menunjukkan nilai yang telah mendekati kondisi aktual. Hal ini dapat memberikan gambaran bahwa kondisi PLTD saat simulasi telah mendekati kondisi aktual saat ini.

5. Analisis Efisiensi dan Faktor Aging Baterai

Pada simulasi penelitian ini, baterai yang digunakan telah mempertimbangkan beberapa faktor seperti throughput, SOC dan DOD. Simulasi akan menghitung umur baterai berdasarkan lifetime throughput, yakni total energi (kWh) yang dapat diisi dan dikosongkan hingga kapasitas baterai menurun ke batas akhir yang ditentukan. Selain itu, *depth of discharge* (DOD) diperhitungkan untuk menilai pengaruh kedalaman siklus pengosongan terhadap umur baterai, di mana semakin besar DOD akan semakin mempercepat degradasi. *state of charge* (SOC) juga menjadi parameter penting karena penyimpanan pada SOC tinggi atau sangat rendah dapat mempercepat kerusakan sel baterai.

Efisiensi dalam perhitungan ini menggunakan nilai energi yang diserap oleh baterai atau *energy in* dibandingkan dengan energi yang delapskan oleh baterai atau *energy out*. Dari Tabel 8 terlihat bahwa skenario S3 memiliki nilai efisiensi 80,606%, sedangkan S4 tidak menggunakan baterai sama sekali sehingga efisiensinya tercatat 0%. Skenario S1, S2, S5, S6, dan S7 menunjukkan kinerja baterai yang relatif serupa dengan efisiensi sedikit bervariasi di sekitar 80,1% hingga 80,48%.

Tabel 8 Perhitungan efisiensi baterai

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Energy In (kWh)	101539	100870	544968	0	662	13563	57577
Energy Out (kWh)	81707	81235	439279	0	538	10860	46333
Efisiensi Baterai	80,488%	80,460%	80,606%	0,000%	80,147%	80,071%	80,471%

Nilai *throughput* per baterai konstan pada semua skenario yang menggunakan baterai, yaitu 11.809 kWh dimana sesuai dengan spesifikasi baterai yang digunakan. Estimasi penggantian baterai menunjukkan frekuensi kebutuhan penggantian selama masa proyek dimana ini dapat tergantung pada dimana kondisi yang lebih dahulu terpenuhi yaitu *throughput* baterai atau umur proyek. Perbedaan lifetime baterai ini dipengaruhi *annual throughput* yang menunjukkan energi yang diproses baterai setiap tahun serta proses charging dan discharging baterai.

Tabel 9 Lifetime baterai

t	S1	S2	S3	S5	S6	S7
<i>Lifetime throughput</i> (kWh)	1239987	1405319	8609053	12037	165332	708564
<i>Annual throughput</i> (kWh)	91351	90824	491.128	602	12.142	51802
Jumlah Baterai	105	119	729	2	14	60
Throughput perbaterai	11809	11809	11809	11809	11809	11809
Lifetime Baterai	13,57	15,47	17,52	39,23	13,61	13,67

6. Analisis Kelayakan Lingkungan

Berdasarkan tujuh skenario tersebut, dapat dibandingkan pula tingkat emisi yang dihasilkan masing- masing skenario. Skenario 2 menjadi skenario dengan nilai emisi yang rendah dibandingkan dengan kondisi dasar saat ini yaitu PLTD 2 unit dan juga skenario hibrid lainnya. Hal ini terlihat dari nilai penurunan emisi dibandingkan dengan skenario dasar atau skenario 4 yaitu menjadi 3344.750 kg/th dari yang semula sebesar 454.782 kg/th (lihat pada Tabel 10).

Tabel 10 perbandingan nilai emisi untuk semua skenario

Jenis Emisi	S1 (ton)	S2 (ton)	S3 (ton)	S4 (ton)	S5 (ton)	S6 (ton)	S7 (ton)
Karbon dioksida	334	323	0	454	454	409	372
Karbon monoksida	2,2	2,1	0	2,9	2,9	2,7	2,5
Unburned hydrocarbon	0,092	0,089	0	0,125	0,125	0,111	0,103
Particulate matter	0,009	0,0096	0	0,014	0,014	0,0119	0,010
Sulfur dioxide	0,820	0,794	0	1,1	1,1	0,992	0,913
Nitrogen oxides	0,182	0,595	0	1,2	1,19	0,680	0,203

Analisis ini menunjukkan bahwa skenario 3 berbasis energi terbarukan memberikan keuntungan signifikan tidak hanya dalam pengurangan emisi tetapi juga potensi penghematan biaya akibat kebijakan pajak karbon.

Tabel 11 penghematan pajak karbon

Jenis Emisi	Emisi gas Buang (Ton/yr)	Faktor Emisi	Harga Emisi Ton CO2e (USD)	CO2e (ton/year)	Penghematan Pajak Karbon (USD/tahun)
S1	338	0,84	\$1,84	283,9	\$188,76
S2	328	0,84	\$1,84	275,2	\$204,90
S3	0	0,84	\$1,84	0	\$710,91

Jenis Emisi	Emisi gas Buang (Ton/yr)	Faktor Emisi	Harga Emisi Ton CO2e (USD)	CO2e (ton/year)	Penghematan Pajak Karbon (USD/tahun)
S4	460	0,84	\$1,84	386,59	\$-
S5	460	0,84	\$1,84	386,43	\$0,29
S6	413	0,84	\$1,84	346,92	\$72,95
S7	376	0,84	\$1,84	315,84	\$130,11

7. Analisis Sensitivitas

Pada simulasi analisis sensitivitas studi tekno ekonomi ini, digunakan 4 parameter seperti harga bahan bakar diesel, suku bunga, tingkat inflasi serta perubahan harga baterai. untuk mengetahui seberapa besar perubahan skenario design optimal sistem hibrid yang dapat diterapkan pada pulau Badi. Analisis sensitivitas ini membandingkan nilai NPC serta LCOE untuk 3 skenario diatas.

Dari hasil simulasi didapatkan bahwa analisis sensitivitas terhadap tingkat inflasi (*expected inflation rate*) dalam simulasi sistem kelistrikan hibrid (PLTS–PLTD–baterai) di pulau Badi. Tiga skenario inflasi yang dilakukan pengujian adalah 0,76%, 1,79%, dan 5,95%. Pengujian ini dilakukan untuk melihat dampaknya perubahan inflasi terhadap desain sistem, biaya ekonomi, dan proporsi energi terbarukan.

Hasil ini menunjukkan bahwa kenaikan inflasi mendorong investasi lebih besar pada energi terbarukan dan baterai, yang pada jangka panjang dapat menurunkan ketergantungan pada bahan bakar diesel dan mengurangi biaya operasional. Meskipun inflasi tinggi menyebabkan peningkatan nilai NPC karena waktu nilai uang berubah, sistem menjadi lebih ramah lingkungan dan efisien secara bahan bakar seperti terlihat pada Tabel 12

Tabel 12 Simulasi sensitivitas dengan parameter inflasi

Inflasi (%)	PLTS (kW)	Genset 1 (kW)	Genset 2 (kW)	Baterai (kWh)	NPC (Juta USD)	LCOE (USD/kWh)	RenFrac (%)	IRR (%)
0.76	112	70.0	20.0	912	\$2,12	\$0,326	27,9%	11%
1.79	111	70.0	20.0	1005	\$2,30	\$0,322	28,2%	11%
5.95	466	-	-	6157	\$2,94	\$0,285	100%	3,9%

Selanjutnya, analisis sensitivitas dilakukan pada perubahan tingkat suku bunga dengan tiga skenario suku bunga dibandingkan, yaitu 3,25%, 5,90%, dan 8,55%, dengan tujuan melihat dampaknya terhadap konfigurasi sistem, biaya ekonomi, kontribusi energi terbarukan, dan konsumsi bahan bakar.

Pada skenario dengan tingkat bunga terendah 3,25%, sistem cenderung melakukan investasi besar pada PLTS yaitu sebesar 219 kW dan baterai sebesar 2373 kWh. Skenario suku bunga menengah yaitu sebesar 5,90% menunjukkan keseimbangan antara efisiensi teknis dan biaya, dengan kapasitas PLTS sebesar 111 kW dan baterai 1005 kWh. Sementara itu, pada suku bunga tertinggi yaitu pada 8,55%, sistem memilih investasi yang lebih kecil yaitu PLTS dengan kapasitas sebesar 64,6 kW dan baterai 296 kWh. Perubahan suku bunga ini menunjukkan besaran kontribusi energi terbarukan menunjukkan ketergantungan besar pada PLTD yang ada saat ini (lihat pada Tabel 13).

Tabel 13 simulasi sensitivitas dengan parameter suku bunga

Suku Bunga (%)	PLTS (kW)	Genset 1 (kW)	Genset 2 (kW)	Baterai (kW)	NPC (Juta USD)	LCOE (USD/kWh)	RenFrac (%)	IRR (%)
3,25	219	60	10	2373	\$2,76	\$0,308	53,1%	7,1%
5,90	111	70.0	20.0	1005	\$2,3	\$0,322	28,2%	11%
8,55	64,6	80.0	20.0	296	\$1,89	\$0,328	16,5%	18%

Perubahan harga BBM menjadi naik 30% dan turun 30 % menjadi skenario analisis sensitivitas berikutnya. Tiga skenario utama berdasarkan variasi harga BBM yaitu \$0,68, \$0,98, dan \$1,27 per liter. Dari ketiga skenario tersebut, harga BBM \$0,98/liter menunjukkan performa sistem yang paling optimal secara teknis dan ekonomis. Pada skenario ini, sistem terdiri atas PLTS sebesar 111 kW, dua unit genset sebesar 70 kW dan 20 kW, baterai sebesar 1005 kW, serta konverter berkapasitas 27,3 kW. Hasil simulasi menunjukkan nilai *net present cost* (NPC) sebesar \$2.304.768,91, *levelized cost of energy* (LCOE) sebesar \$0,322/kWh, dan biaya operasional tahunan sebesar \$146.499,93/tahun, dengan kontribusi energi terbarukan sebesar 28,2% (lihat pada Tabel 14). Dengan demikian, skenario BBM \$0,98/liter dianggap sebagai titik tengah yang seimbang, menghasilkan sistem yang lebih ramah lingkungan dibanding skenario termurah, namun masih jauh lebih ekonomis dibanding skenario harga BBM tertinggi.

Tabel 14 simulasi sensitivitas dengan parameter harga BBM

Parameter	\$0,68/L	\$0,98/L	\$1,27/L
<i>NPC (Juta USD)</i>	\$1,74	\$2,3	\$2,5
<i>LCOE (USD)</i>	\$0,244	\$0,322	\$0,367
Biaya operasi / tahun (USD)	\$117.690,32	\$146.499,93	\$63.135,95
Initial Capital (USD)	\$156.920,43	\$322.422,45	\$1.691.798,45
Kontribusi Energi Terbarukan	17,2%	28,2%	100%
Total Bahan Bakar (L/tahun)	143.082	123.822	0
Produksi Energi (kWh)	540.974	557260	746.996

Dari hasil analisis sensitivitas ini didapatkan bahwa perubahan indikator baik suku bunga, tingkat inflasi serta harga bahan bakar, dapat merubah skenario sistem hibrid terbaik, sekaligus mempengaruhi pilihan untuk membangun sistem hibrid yang secara nilai NPC dan LCOE yang lebih efektif. Selain itu juga perubahan perubahan ini dapat mempengaruhi kelayakan pada suatu proyek pelaksanaan pembangkit. Perubahan tingkat inflasi sebesar 5,9% dari yang semula adalah 1,79% memberikan hasil bahwa secara proyek menjadi tidak layak karena nilai IRR yang lebih kecil yaitu 3,9% dari nilai discount rate sebesar 5,9%.

Selanjutnya dilakukan analisis sensitivitas terkait dengan perubahan harga baterai. Saat ini teknologi baterai terus berkembang. Banyak perusahaan terus menerus melakukan penelitian untuk memproduksi baterai yang secara kinerja lebih efektif dan efisien dengan harga yang semakin kompetitif. Dalam penelitian ini dilakukan analisis dengan mengubah harga baterai dengan kenaikan 10 % dan penurunan 10 % dari harga saat ini

Secara umum, penurunan harga baterai memberikan dampak pada perubahan kapasitas PLTS yang akan dibangun. Hal ini dikarenakan komponen baterai memiliki harga yang paling tinggi dibandingkan komponen lainnya sehingga memberikan dampak pada perubahan kapasitas PLTS, nilai NPC serta LCOE dari pembangkit hibrid yang direncanakan.

Tabel 15 simulasi sensitivitas dengan parameter perubahan harga baterai



Harga	PLTS (kW)	Genset 1 (kW)	Genset 2 (kW)	Baterai (kW)	NPC (Juta USD)	LCOE (USD/kWh)	<i>RenFrac</i> (%)	IRR (%)
90%	217	50	20	2348	\$2,28	\$0,324	52,5%	8,0%
100%	111	70	20	1005	\$2,30	\$0,322	28,2%	11%
110%	113	70	20	887	\$2,32	\$0,324	27,9%	11%

8. Metode Optimalisasi

Skenario optimal yang digunakan pada penelitian kali ini adalah dengan menggunakan SAW atau *simple additive weighting*. Berdasarkan skema pembobotan yang

telah disusun, maka akan dilakukan perankingan dengan melihat masing masing kriteria yang telah ditentukan sebelumnya. Untuk kriteria berupa NPC, LCOE, luas lahan, konsumsi bahan bakar, SFC, emisi dan PP maka arah kriterianya adalah semakin kecil adalah semakin baik atau dikategorikan sebagai cost. Untuk kriteria IRR, pengurangan subsidi, efisiensi baterai dan renewable fraction, maka arah kriteria adalah semakin besar maka semakin baik atau dikategorikan sebagai benefit (lihat pada Tabel 16). Selanjutnya akan dibentuk penilaian untuk masing masing skenario dimana berdasarkan skoring sehingga dapat menghasilkan penilai untuk masing masing skenario yaitu berupa

Tabel 16 Sistem Skoring Kriteria Penilaian pada Analisis SAW untuk Studi Tekno-Ekonomi Pembangkit Listrik Hibrid PLTS–PLTD"

NPC, LCOE, Luas Lahan, Konsumsi BBM, SFC, Emisi, dan PP	Skoring	IRR, Pengurangan Subsidi, Efisiensi Baterai, Renewable Fraction	Skoring
Besar  Kecil	7 6 5 4 3 2 1	Kecil  Besar	1 2 3 4 5 6 7

Tabel 17 Penilaian Multi-Kriteria pada Analisis Tekno-Ekonomi dan Lingkungan Pembangkit Listrik Hibrid PLTS–PLTD

Bobot	Kriteria Ekonomi	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
50%	NPC	5	7	1	3	2	4	6
	LCOE	6	7	1	3	2	5	4
	Pengurangan Subsidi	6	7	7	1	2	5	4
	IRR	3	4	1	7	2	6	5
	PP	3	4	1	7	6	5	2
	Jumlah	23	29	11	21	14	25	21
Bobot	Kriteria Teknik	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
40%	Luas Lahan	3	2	1	7	6	5	4
	Efisiensi Baterai	6	4	7	1	3	2	5
	SFC	1	3	7	4	2	5	6
	Konsumsi bahan bakar	5	6	7	1	2	3	4
	Renewable Fraction	5	6	7	1	2	3	4
	Jumlah	20	21	29	14	15	18	23
Bobot	Kriteria Lingkungan	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
10%	Emisi	5	6	7	1	2	3	4
	Jumlah	5	6	7	1	2	3	4

Dari pembobotan diatas maka dapat dihitung nilai optimal masing masing skenario. Pada kelompok ekonomi, skor tertinggi diperoleh oleh skenario 2 dengan nilai 29 diikuti skenario 6 dengan nilai 25. Pada kelompok teknik, skor tertinggi adalah skenario 3 dengan nilai 29, kemudian skenario 7 dengan nilai 23. Sementara pada kelompok lingkungan secara berurutan adalah skenario 3 dan terakhir adalah skenario 4. Dari skoring subkriteria dari

masing-masing skenario kemudian dihitung berdasarkan bobot masing-masing kriteria sehingga didapatkan hasil seperti pada

Tabel 18.

Tabel 18 Hasil Perhitungan Bobot Kriteria SAW pada Skenario Pembangkit Listrik Hibrid PLTS–PLTD Optimal

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Ekonomi	11,5	14,5	5,5	10,5	7	12,5	10,5
Teknik	8	8,4	11,6	5,6	6	7,2	9,2
Lingkungan	0,5	0,6	0,7	0,1	0,2	0,3	0,4
Total	20	23,5	17,8	16,2	13,2	20	20,1

Berdasarkan hasil perhitungan, skenario 2 memperoleh nilai tertinggi sebesar 23,5, menunjukkan performa terbaik secara keseluruhan dari perspektif ekonomi, teknik, dan lingkungan. Skenario 1 dan 6 menempati posisi berikutnya dengan skor 20, sedangkan skenario 5 memiliki skor terendah yaitu 13,2, yang menunjukkan kinerja terendah dibandingkan skenario lainnya. Oleh karena itu dapat ditentukan bahwa skenario 2 merupakan skenario optimasi terbaik dengan mempertimbangkan ketiga aspek tersebut.

KESIMPULAN

1. Desain paling optimal berdasarkan hasil simulasi dan metode pembobotan dengan bobot terbesar yaitu 23,5 dengan kombinasi sistem yang terdiri dari PLTS 111 kW, PLTD 1 70 kW, PLTD 2 20 kW serta baterai sebesar 1005 kWh dan konverter dengan kapasitas 32,1 kW (skenario 2).
2. Penambahan PLTS dan baterai di sistem kelistrikan pulau Badi berpengaruh pada turunnya nilai biaya pembangkitan pada skenario 2 yaitu sebesar 8% dari \$0,348/kWh menjadi \$0,322/kWh .
3. Penurunan nilai emisi yang terjadi pada sistem kelistrikan pulau Badi yaitu untuk karbon dioksida adalah sebesar 130 tonCO₂e untuk skenario 2 yang merupakan skenario terbaik.
4. Perubahan harga BBM, inflasi, dan suku bunga memiliki pengaruh signifikan terhadap nilai LCOE. Kenaikan harga BBM mendorong peningkatan nilai LCOE langsung secara drastis dibandingkan dengan kenaikan tingkat inflasi dan suku bunga yaitu dari semula \$0,244/kWh menjadi \$0,367/kWh.

REFERENSI

- Alanazi, A., & Alanazi, M. (2023). Multicriteria Decision-Making for Evaluating Solar Energy Source of Saudi Arabia. *Sustainability*, 15(13), 10228. <https://doi.org/10.3390/su151310228>
- Arsikaputra, I. P., Giriantari, I. A. D., & Ariastina, W. G. (2020). Studi Unjuk Kerja Smart Microgrid Sistem Hibrid di Jurusan Teknik Elektro Universitas Udayana Kampus Bukit Jimbaran. *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, 19(1), 89. <https://doi.org/10.24843/MITE.2020.v19i01.P13>
- Azizah, A. N., & Purbawanto, S. (2021). Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid (PV dan Mikrohidro) Terhubung Grid (Studi Kasus Desa Merden, Kecamatan Padureso, Kebumen). *Jurnal Listrik, Instrumentasi dan Elektronika Terapan (JuLIET)*, 2(1). <https://doi.org/10.22146/juliet.v2i1.64365>
- Otong, M., Alimuddin, A., & Mas'ud, I. (2017). Optimasi Kapasitas Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida Menggunakan Homer Di Pulau Tunda. *Setrum : Sistem Kendali-Tenaga-elektronika-telekomunikasi-komputer*, 6(1), 1. <https://doi.org/10.36055/setrum.v6i1.1850>

- RUPTL PLN 2025-2034* (188.K/HK.03/MEM.L/2025; RUPTL 2025-2034). (2025). Ministry of Energy and Mineral Resources.
- Salasa, Y., Rumbayan, M., & Silimang, S. (2017). *Studi Elektrifikasi Daerah Terluar Khususnya di Kabupaten Kepulauan Talaud*. 6(2).
- Sianturi, Y. (2021). Pengukuran dan Analisa Data Radiasi Matahari di Stasiun Klimatologi Muaro Jambi. *Megasains*, 12(1), 40–47. <https://doi.org/10.46824/megasains.v12i1.45>
- Sigalingging, E. D., Muda, I., & Herubawa, D. A. (n.d.). Application of The Simple Additive Weighting Method in The Performance Assessment of Energy Companies Based On ROA and DAR. . . *Vol.*, (22).