



OPTIMALISASI DESAIN PEMBANGKIT HYBRID DI PULAU BANGKURUNG MENGGUNAKAN ANALISIS MULTI KRITERIA

Ade Rahmat³, Zainal Arifin², M M Sidiq¹

¹ Program Pascasarjana, Fakultas Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan, Institut Teknologi PLN

² Fakultas Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan, Institut Teknologi PLN

³ PT PLN (Persero) Unit Induk Distribusi Suluttenggo

INFO ARTIKEL

Kata kunci:

Energi terbarukan, Pembangkit hybrid, solar PV, wind turbine WT, multi criteria decision making (TOPSIS), NPV, PI & IRR, COE.

Keywords:

Renewable energy, hybrid power plant, solar PV, wind turbine WT, multi criteria decision making (TOPSIS), NPV, PI, IRR & COE.

Received: 19-11-2025

Revised: 27-12-2025

Online published: 30-03-2026

ABSTRAK

Pulau Bangkuring merupakan daerah terpencil di Sulawesi Tengah yang dialiri listrik 8 jam perhari oleh pembangkit diesel dengan kapasitas mampu pasok 850 kW dan beban puncak 466 kW. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pembangkitan listrik yang memanfaatkan Pembangkit Hybrid berbasis Energi Terbarukan setempat yang dapat memenuhi demand selama 24 jam perhari. Untuk itu diusulkan 5 skema alternatif desain Perencanaan : pertama komposisi PLTD 100%, kedua PLTD+PV+Li-ION, ketiga PLTD+WT+Li-ION, keempat PLTD+PV+WT+Li-ION, dan kelima PV+WT+Li-ION. Berdasarkan hasil simulasi aplikasi HOMER untuk kelima skema diatas dilakukan multi criteria decision making untuk menetapkan alternatif skema terbaik berdasarkan beberapa kriteria menggunakan metode TOPSIS (Technique of Preference by Similarity to Ideal Solution) didapat hasil pada skema keempat dengan nilai tertinggi dan memiliki nilai Cost of energy (COE) sebesar US\$ 0,105/kWh. Meskipun hasil studi analisis kelayakan finansial yang meliputi Net Present Value (NPV), Profitability Index (PI), dan Internal Rate of Return (IRR) tidak layak. Berdasarkan analisis keekonomian skema hybrid terbaik, penghematan biaya bahan bakar sebesar US\$ 597.239,21 /tahun dan aspek lingkungan dari pengurangan emisi CO₂ sebesar 1,99 Ton /tahun serta pengurangan Upaya pengolahan limbah dari pembangkit listrik tenaga diesel.

ABSTRACT

Bangkuring Island is a remote area in Southeast Sulawesi that is electrified for 8 hours per day by a diesel generator with a supply capacity of 850 kW and a peak load of 466 kW. This study aims to analyze electricity generation by utilizing local renewable energy-based hybrid plants that can meet demand for 24 hours per day. For this reason, 5 alternative Planning design schemes are proposed: first 100% PLTD composition, second PLTD+PV+Li-ION, third PLTD+WT+Li-ION, fourth PLTD+PV+WT+Li-ION, and fifth PV+WT+Li-ION. Based on the simulation results of the HOMER application for the five schemes above, multi criteria decision making is carried out to determine the best alternative scheme based on several criteria using the TOPSIS (Technique of Preference by Similarity to Ideal Solution) method, the results obtained in the fourth scheme with the highest value and has a Cost of energy (COE) value of US \$ 0.105 / kWh. Although the results of the financial feasibility analysis study which includes Net Present Value (NPV), Profitability Index (PI), and Internal Rate of Return (IRR) are not feasible. Based on the economic analysis of the best hybrid scheme, the usual fuel savings of US\$ 597,239.21 / year and the environmental aspects of reducing CO₂ emissions by 1.99 tons / year and reducing waste treatment efforts from diesel power plants.

1. Pendahuluan

Negara Indonesia, sebagai negara kepulauan yang terletak di wilayah khatulistiwa dengan jumlah pulau mencapai sekitar 13.466 pulau, memiliki karakteristik yang unik dibandingkan dengan negara-negara kontinental. Kondisi geografis ini memberikan Indonesia kelebihan berupa sumber daya alam yang melimpah dan sangat beragam. Namun, di sisi lain, tantangan besar muncul dalam penyusunan dan pelaksanaan kebijakan pembangunan nasional, khususnya terkait penyediaan infrastruktur pada sektor transportasi, telekomunikasi, dan peningkatan rasio elektrifikasi (Rahmat & Kurniawan, 2020) [1]. Hingga saat ini, Indonesia masih

menghadapi persoalan kesenjangan infrastruktur antara wilayah maju dan wilayah yang tertinggal.

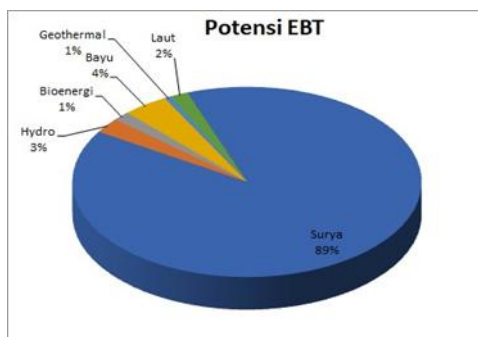
Dalam dokumen Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN), telah ditetapkan bahwa sebanyak 199 kabupaten di Indonesia tergolong sebagai daerah tertinggal. Dari jumlah tersebut, 123 kabupaten atau sekitar 62% berada di Kawasan Timur Indonesia (KTI), 58 kabupaten (29%) berada di wilayah Sumatera, dan sisanya sebanyak 18 kabupaten (9%) terletak di kawasan Jawa dan Bali (Peraturan Presiden No.2 Tahun 2015 tentang RPJMN 2015-2019, 2015) [2]. Penyediaan energi listrik di daerah-daerah terpencil, termasuk wilayah pedalaman yang terisolasi



serta pulau-pulau kecil, masih menghadapi berbagai kendala. Faktor geografis dan topografi Indonesia yang kompleks membuat pembangunan jaringan listrik PLN menjadi sulit dilakukan di banyak lokasi. Selain itu, pemanfaatan energi baru dan terbarukan (EBT) di wilayah-wilayah tersebut belum dioptimalkan secara maksimal (Rosyadi, 2011) [3]. Meskipun hingga tahun 2021 Indonesia berhasil mencapai rasio elektrifikasi sebesar 99,45% , beberapa daerah dengan sistem kelistrikan terisolasi belum sepenuhnya mendapatkan layanan listrik yang memadai sesuai dengan prinsip 5K, yaitu Kecukupan, Keandalan, Keberlanjutan, Keterjangkauan, dan Keadilan (Kementerian ESDM, 2023) [4].

Dari sisi keberlanjutan lingkungan, energi baru terbarukan memainkan peran strategis dalam menekan emisi gas rumah kaca dari sektor energi. Berdasarkan data Kementerian ESDM tahun 2020, Indonesia memiliki potensi energi baru terbarukan yang sangat besar, mencapai 3.686 gigawatt. Namun, hingga saat ini, pemanfaatan energi terbarukan baru mencapai 12,54 gigawatt. Kondisi tersebut menjadi modal penting dalam mendukung Program Transisi Energi yang berfokus pada peralihan dari energi fosil menuju energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan. Pada konferensi COP26 tahun 2021, Indonesia menetapkan target untuk mencapai Net Zero Emission (NZE) pada tahun 2060 atau bahkan lebih cepat (Indonesia Research Institute for Decarbonization, 2022) [5]. Oleh karena itu, langkah strategis diperlukan untuk menurunkan emisi karbon (dekarbonisasi) tanpa mengabaikan aspek ketahanan energi (Nugroho et al., 2023) [6].

ENERGI	POTENSI (GW)	PEMANFAATAN (GW)
SURYA	3.295	0,27
HIDRO	95	6,69
BIOENERGI	57	3,09
BAYU	155	0,15
PANAS BUMI	24	2,34
LAUT	60	0
TOTAL	3.686	12,54



Gambar 1 Potensi dan Pemanfaatan Energi Baru Terbarukan sd. tahun 2023 (Sumber data: Kementrian ESDM 2023)

Dalam rangka mendukung transisi energi ini, Indonesia menargetkan kapasitas pembangkit energi baru terbarukan sebesar 700 GW pada tahun 2060. Target ini melibatkan berbagai sumber seperti energi surya, air, bioenergi, angin, panas bumi, serta laut, termasuk teknologi hidrogen dan nuklir. Berdasarkan data yang tersedia, pemanfaatan tenaga

surya sangat potensial karena Indonesia memiliki kapasitas sebesar 3.295 MW, tetapi hingga kini baru dimanfaatkan sekitar 0,27 GW. Demikian pula, potensi energi angin sebesar 155 GW baru dimanfaatkan sebesar 0,15 GW. Untuk mempercepat pengembangan EBT, pemerintah telah mencanangkan Rencana Umum Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021-2030 [7], yang menargetkan penambahan pembangkit sebesar 40.575 MW, dengan komposisi pembangkit EBT mencapai 51,6%, sedangkan sisanya 48,4% merupakan pembangkit non-EBT. RUPTL 2021-2030 disebut sebagai RUPTL paling ramah lingkungan sepanjang sejarah, dengan tujuan mendukung pencapaian Net Zero Emission pada 2060.

Sejalan dengan kebijakan tersebut, Pemerintah Provinsi Sulawesi Tengah juga turut mendorong pengembangan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) terpusat untuk melistriki komunitas-komunitas terpencil, terutama yang berada jauh dari jaringan listrik utama. Wilayah yang menjadi prioritas meliputi daerah tertinggal, pulau-pulau terdepan yang berbatasan dengan negara lain, serta pulau-pulau terluar Indonesia. Penentuan lokasi PLTS terpusat dilakukan dengan mempertimbangkan aspek teknis dan ekonomi, seperti biaya transportasi bahan bakar minyak ke lokasi dan pengoperasian sistem PLTS secara hybrid dengan pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) yang sudah ada. Dengan cara ini, konsumsi bahan bakar minyak dapat dikurangi secara signifikan (Pemerintah Provinsi Sulawesi Tengah, 2019) [8].

Pulau Bangkurung, yang terletak di Kepulauan Banggai, Indonesia, merupakan wilayah yang memiliki ciri geografis dan ekologi yang unik. Pulau ini merupakan bagian dari Kepulauan Banggai, yang terletak di Laut Sulawesi dan dikenal akan kekayaan keanekaragaman hayati dan warisan budayanya. Populasi Bangkurung merupakan bagian dari demografi Kepulauan Banggai yang lebih luas, yang mencakup berbagai kelompok etnis dan budaya lokal yang dinamis (Syahrullah et al., 2023) [9]. Dalam hal pasokan energi, Bangkurung dilayani oleh penyedia listrik lokal, yang merupakan bagian dari perusahaan milik negara PT PLN (Persero). Pasokan listrik di wilayah ini terutama bergantung pada pembangkit listrik tenaga diesel, mirip dengan banyak pulau terpencil di Indonesia. Kapasitas dan jam operasional pembangkit ini dapat bervariasi, tetapi biasanya beroperasi di bawah kendala yang membatasi ketersediaannya, sering kali hanya menyediakan listrik selama 12 jam untuk mengelola biaya bahan bakar dan efisiensi operasional. Sumber energi terbarukan semakin diakui sebagai alternatif yang layak untuk bahan bakar fosil tradisional di Bangkurung. Potensi energi surya dan angin sangat penting, mengingat letak geografis pulau ini, yang memungkinkan adanya radiasi surya yang signifikan sepanjang tahun.

Untuk merancang pembangkit listrik hybrid berupa PLTS (Photovoltaic Solar Power) yang dikombinasikan dengan PLTB (Wind Turbine), diperlukan perhitungan yang akurat untuk masing-masing komponen sistem. Oleh karena itu, desain sistem microgrid harus dilengkapi dengan perhitungan yang cermat, termasuk teknologi penyimpanan energi yang sesuai. Dalam penelitian ini, dilakukan simulasi menggunakan software HOMER Pro. Software ini dikembangkan oleh National Renewable Energy Laboratory (NREL) di Amerika Serikat dan digunakan untuk merancang serta mengevaluasi sistem dari segi teknis maupun finansial.

Analisis tekno-ekonomi pada microgrid dengan penyimpanan energi hybrid sangat penting untuk mengevaluasi kelayakan teknologi tersebut baik secara teknis maupun ekonomis. Analisis ini mampu memperhitungkan biaya pembangunan dan operasional sistem, sekaligus mengidentifikasi faktor-faktor yang dapat memengaruhi keberhasilan atau kegagalan proyek microgrid dengan penyimpanan energi hybrid. Dari sudut pandang ekonomi, kelayakan proyek dapat diukur melalui beberapa parameter, seperti Net Present Cost (NPC), Profitability Index (PI), Internal Rate of Return (IRR), Avoided Cost, dan Cost of Energy (COE).

Software HOMER Pro juga berfungsi untuk menilai apakah sistem yang dirancang sudah mencapai tingkat optimalisasi, sekaligus memberikan gambaran tentang performa teknis sistem sepanjang umur proyek. Dalam penelitian ini, fokus utama adalah pada desain optimal pembangkit hybrid di Pulau Bangkurung menggunakan metode Multi-Criteria Decision Making (MCDM). Pada penelitian Kaya et al., 2019, membandingkan beberapa jenis metode MCDM yaitu AHP, TOPSIS, VIKOR, ELECTRE untuk menganalisis pembuatan kebijakan energi. Didapatkan bahwa metode TOPSIS adalah metode MCDM yang paling efektif untuk mengevaluasi kebijakan energi (Kaya et al., 2019) [10]. Metode Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) digunakan untuk meranking prioritas pembangkit listrik hybrid terbaik di pulau Bangkurung. Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan desain pembangkit listrik hybrid yang paling optimal dari segi teknis dan ekonomis menggunakan metode TOPSIS.

2. Prosedur Penelitian

Kendala dan tantangan yang telah diuraikan pada latar belakang pada dasarnya dapat diatasi dengan menyediakan pembangkit listrik yang berbasis sumberdaya alam setempat berupa energi terbarukan seperti energi matahari dan angin. Namun demikian, ada tantangan terkait pembangkit listrik berbasis energi terbarukan yaitu sifat intermittency yang mana hal ini berdampak pada kontinuitas dan kualitas supplay yang dihasilkan. Karakteristik dari Variabel renewable energy saat ini sudah dapat dimitigasi dengan adanya storage (penyimpanan) dalam skala yang besar, namun demikian dari sisi keekonomian belum dapat bersaing dengan pembangkit berbasis fosil. Mencermati kondisi diatas maka kehadiran system Pembangkit Hybrid diharapkan dapat menjadi solusi untuk mendapatka kondisi optimum dari trilemma energi yang meliputi aspek security, ekonomi dan sustainability.

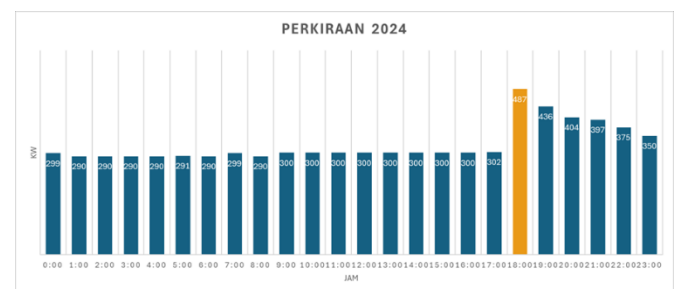
Potensi radiasi matahari di Pulau Bangkurung tercatat rata-rata sekitar 4,911 KWh/m²/hari, sedangkan potensi energi angin berada pada kisaran 3,38 m/s. penelitian ini difokuskan pada penggabungan energi surya, angin dan pembangkit diesel untuk menghasilkan listrik, yang dikenal dengan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (PLTH) yang terdiri dari Solar PV, Wind Turbine dan Diesel generator. Pemodelan serta simulasi sistem PLTH dalam studi ini dilakukan menggunakan perangkat lunak HOMER. Hasil simulasi akan memberikan konfigurasi pembangkit yang disusun berdasarkan Net Present Cost (NPC). Selanjutnya, hasil simulasi akan dianalisis, mencakup biaya sistem,

kebutuhan listrik, konsumsi bahan bakar, dan emisi gas buang. Setelah itu, analisis kelayakan investasi akan dilakukan dengan menggunakan parameter seperti NPV, PI atau rasio B/C, serta IRR. Jika hasil analisis finansial tidak memenuhi kriteria, evaluasi akan dilanjutkan dengan menghitung keuntungan yang diperoleh, baik berupa manfaat tangible maupun intangible. Untuk manfaat tangible, perhitungan dilakukan berdasarkan penghematan biaya bahan bakar (avoided cost). Sedangkan untuk manfaat intangible, perhitungan dilakukan berdasarkan pengurangan emisi gas karbon yang dihasilkan. Akhirnya, hasil yang optimal dan investasi yang layak akan diperoleh. Selanjutnya menggunakan metode Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) digunakan untuk meranking prioritas pembangkit listrik hybrid terbaik di pulau Bangkurung segi teknis dan ekonomis menggunakan metode TOPSIS.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Simulasi Pembangkit Hybrid (Homer)

Berdasarkan Profil beban listrik Pulau Bangkurung dari sumber data primer di PT PLN UID Sulutenggo, pada penelitian ini sebagai inputan ke aplikasi HOMER adalah profil beban Pulau Bangkurung yang dimodifikasi menjadi profil beban baru untuk skema 8 jam/hari menjadi 24 Jam/hari. Profil beban lama adalah profil beban real tertinggi yang menyala selama 8 jam/hari pada tahun 2023 selama 8 Jam operasi (durasi rentang waktu dari jam 17.00 sd. jam 00.00). Grafik profil beban baru yang dipakai dalam perhitungan ditunjukkan pada gambar 3.1 untuk skema pemenuhan demand selama 24 jam.



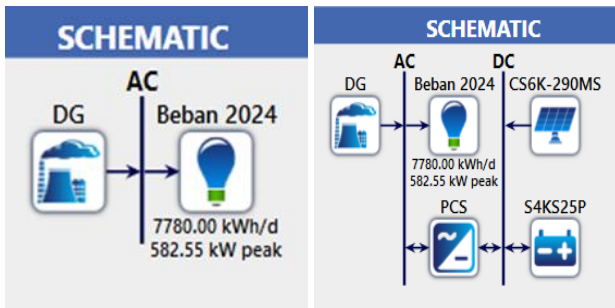
Gambar 2 Load Profil modifikasi 24 jam operasi Pulau Bangkurung

Selanjutnya akan direncanakan pemenuhan beban dari pembangkit Listrik pada simulasi masing-masing skema harus dapat memenuhi kebutuhan beban sebesar 7.780 kWh/hari.

Komponen PLTH yang direncanakan terdiri atas Generator diesel (genset), solar PV, Wind turbine, baterai dan inverter. Perhitungan spesifikasi pada komponen tersebut dalam penelitian ini dilakukan scenario sebagai berikut :

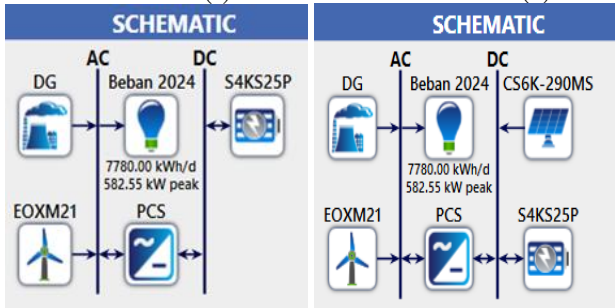
- I. Diesel
- II. Diesel + PV
- III. Diesel + WT
- IV. Diesel + PV + WT
- V. PV + WT

Kelima skenario tersebut dapat diilustrasikan pada gambar 3 (a) konfigurasi Generator Diesel 100 %, gambar 3 (b) untuk konfigurasi diesel + PV, gambar 3 (c) Diesel + WT, gambar 3 (d) untuk konfigurasi Diesel + PV + WT, gambar 3 (e) PV + WT.



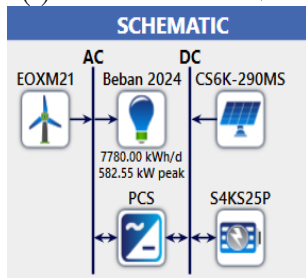
Gambar 3 (a)

Gambar 3 (b)



Gambar 3 (c)

Gambar 3 (d)



Gambar 3 (e)

Berdasarkan simulasi dengan aplikasi HOMER yang dilakukan pada kelima skema diatas diperoleh hasil perbandingan beberapa parameter output dari masing-masing konfigurasi yang di modelkan sebagai berikut :

Tabel 1 Hasil Simulasi HOMER pada masing-masing konfigurasi

Komponen Hasil Simulasi	Model Konfigurasi				
	Dieselt	Dieselt + PV	Dieselt + WT	Dieselt + PV + WT	PV + WT
Diesel (kW)	583	536	495	505	-
PV (kWp)	-	1.350	-	1.350	1.974
WT	-	-	2.500	1.200	1.100
Baterai (unit)	-	93	392,00	130	783
Converter (kW)	-	502	512,00	564	609
Initial capital (\$)	-	2.742.474	820.388	2.881.383	4.800.483
Biaya Operasi (\$/thn)	8.800	587.979	832.729	728.330	1.651.407
Fuel Consumption (L/thn)	885.960	297.887	374.102	129.961	-
Total NPC (\$)	14.303.962	8.243.774	8.187.342	5.948.068	7.720.179
CoE (\$/kWh)	0,251	0,145	0,144	0,104	0,135
Electrical Production (kWh/thn)	3.569.209	3.192.968	3.731.765	3.774.329	4.383.294
Consumption AC load (kWh/thn)	2.839.700	2.839.700	2.839.700	2.839.700	2.839.577
Renewable Fraction (%)	-	60	50	82	100
Excess Electricity (kWh/thn)	719.509	353.268	892.065	934.629	1.543.717
Capacity Shortage (kWh/thn)	-	-	-	-	-

Berdasarkan hasil simulasi homer nilai biaya investasi (initial capital cost) tertinggi ada pada konfigurasi PV+WT (renewable energy 100%) dengan nilai US\$ 4.800.483 dan juga biaya operasi terbesar ada pada konfigurasi ini yaitu sebesar US\$ 1.651.407 . Untuk biaya konsumsi bahan bakar solar terbesar ada pada konfigurasi PLTD 100% dengan biaya US\$ 885.960 dan biaya total NPC (Net Present cost) terbesar di konfigurasi ini dengan biaya US\$ 14.303.960. Nilai COE (cost of energy) terendah ada pada konfigurasi PLTD+PV+WT sebesar US\$ 0,104.

3.2 Multi Kriteria Analisis

Sistem pendukung keputusan untuk pemilihan Pembangkit Hybrid di Pulau Bangkuring ini menggunakan 8

kriteria, terdiri dari C1 sampai C8. Dimana masing-masing bobot dari kriteria tersebut adalah 12,5 %.

Tabel 2 Bobot Kriteria

ID	Kriteria	Unit	Kategori	Bobot
C1	Fuel Consumption	L/ Year	Negatif	12,5%
C2	Cost of Energy	\$/ kWh	Negatif	12,5%
C3	Net Present Cost	\$	Negatif	12,5%
C4	Operation & Maintenance	\$	Negatif	12,5%
C5	Capital Investment	\$	Negatif	12,5%
C6	Renewable Fraction	%	Positif	12,5%
C7	CO2 Emission	Kg / Year	Negatif	12,5%
C8	Jumlah Baterai	Qty	Negatif	12,5%

Selanjutnya membuat matriks keputusan dengan beberapa konfigurasi yang dijadikan sebagai alternatif untuk melakukan penilaian penentuan prioritas.

Tabel 3 Matriks Keputusan

Alternatif	Kriteria							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
A1	885960	0,251	14.303.960	8.800	-	0,000	233963	0
A2	297887	0,145	8.288.568	587.979	2.742.473	0,60	786734	93
A3	374102	0,144	8.187.342	832.729	8.220.388	0,50	989022	392
A4	129961	0,104	5.948.068	728.330	2.881.383	0,82	342324	130
A5	0	0,135	7.720.179	1.651.407	4.800.483	1,00	0	783
	NEGATIF	NEGATIF	NEGATIF	NEGATIF	NEGATIF	POSITIF	NEGATIF	NEGATIF
Bobot	0,1250	0,1250	0,1250	0,1250	0,1250	0,1250	0,1250	0,1250

Membuat matriks keputusan ternormalisasi dengan metode Euclidean Length of a vector :

$$r_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x X_{ij}^2}}$$

rij adalah ranking kinerja alternatif ke-i dan kriteria ke-j, Xij adalah alternatif ke-I dan kriteria ke-j dari perhitungan alternatif sebelumnya

Tabel 4 Matriks ternormalisasi rij

ALTERNATIF	ID	Fuel Consumption	Cost of Energy	Net Present Cost	O&M	Capital Investment	Renewable Traction	CO2 Emission	Jumlah Baterai
DG 100 %	Ri	0,8727	0,6862	0,6856	0,0042	0,0000	0,0000	0,8727	0,0000
DG + PV + LI-ION		0,2934	0,3964	0,3973	0,2837	0,2658	0,3972	0,2934	0,1045
DG + WT + LI-ION		0,3685	0,3937	0,3924	0,4017	0,7968	0,3310	0,3685	0,4404
DG + PV + WT + LI-ION		0,1280	0,2843	0,2851	0,3514	0,2793	0,5428	0,1280	0,1460
PV + WT + LI-ION		0,0000	0,3681	0,3700	0,7967	0,4653	0,6619	0,0000	0,8797

Setelah menghitung matriks ternormalisasi rij dilanjutkan menghitung matriks ternormalisasi terbobot “yij” dengan persamaan

$$Y_{ij} = w_i \times r_{ij}$$

Nilai Wi adalah nilai bobot kriteria yang sudah dihitung sebelumnya, dan nilai rij adalah nilai matriks ternormalisasi.

Tabel 5 Matriks ternormalisasi terbobot

ALTERNATIF	ID	Fuel Consumption	Cost of Energy	Net Present Cost	O&M	Capital Investment	Renewable Traction	CO2 Emission	Jumlah Baterai
DG 100 %	Yi	0,1091	0,0858	0,0857	0,0005	0,0000	0,0000	0,1091	0,0000
DG + PV + LI-ION		0,0367	0,0496	0,0497	0,0355	0,0332	0,0496	0,0367	0,0131
DG + WT + LI-ION		0,0461	0,0492	0,0491	0,0502	0,0986	0,0414	0,0461	0,0550
DG + PV + WT + LI-ION		0,0160	0,0355	0,0356	0,0439	0,0349	0,0678	0,0160	0,0183
PV + WT + LI-ION		0,0000	0,0461	0,0463	0,0986	0,0582	0,0827	0,0000	0,1100

Setelah selesai menghitung matriks ternormalisasi terbobot baru dapat menghitung matriks Solusi ideal positif (A^+) dan (A^-), perlu diperhatikan syaratnya adalah dapat menghitung nilai Solusi ideal dengan terlebih dahulu menentukan apakah besifat kategori negatif atau positif.

Tabel 6 Solusi ideal positif & negatif

Solusi Ideal Positif								
ID	Fuel Consumption	Cost of Energy	Net Present Cost	O&M	Capital Investment	Renewable Traction	CO ₂ Emission	Jumlah Batteral
A ⁺	0,0000	0,0355	0,0356	0,0005	0,0000	0,0827	0,0000	0,0000

Solusi Ideal Negatif								
ID	Fuel Consumption	Cost of Energy	Net Present Cost	O&M	Capital Investment	Renewable Traction	CO ₂ Emission	Jumlah Batteral
A ⁻	0,1091	0,0858	0,0857	0,0996	0,0996	0,0000	0,1091	0,1100

Setelah mendapatkan nilai Solusi ideal positif dan negatif, langkah selanjutnya yaitu menentukan nilai jarak, antara nilai setiap alternatif dengan matriks Solusi ideal positif dan negatif. Jarak antara alternatif ke- i dengan solusi ideal positif dengan persamaan

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y_{ij}^+ - y_{ij}^+)^2}$$

Dan untuk solusi ideal negatif menggunakan persamaan

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y_{ij}^- - y_{ij}^-)^2}$$

Tabel 7 nilai jarak antara nilai terbobot terhadap Solusi Positif & Negatif

Jarak antara nilai terbobot terhadap solusi ideal positif.		Jarak antara nilai terbobot terhadap solusi ideal negatif.	
D1+	0,0968	D1-	0,2654
D2+	0,0968	D2-	0,2654
D3+	0,0968	D3-	0,2654
D4+	0,0968	D4-	0,2654
D5+	0,0968	D5-	0,2654

Tahap terakhir pada analisa multi kriteria tophis ini yaitu menentukan nilai preferensi untuk setiap alternatif dengan persamaan

$$V_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+}$$

Tabel 8 Nilai preferensi setiap alternatif

ID	Alternatif	V _i	Ranking
A1	DG 100 %	0,4857	4
A2	DG + PV + LH-ION	0,6913	2
A3	DG + WT + LH-ION	0,4749	5
A4	DG + PV + WT + LH-ION	0,7618	1
A5	PV + WT + LH-ION	0,5412	3

Berdasarkan perhitungan menggunakan analisis multi kriteria tophis didapatkan ranking tertinggi yaitu pada alternatif scenario ke-4 yaitu pembangkit hybrid DG + PV + WT + Li-ion, Dimana Dimana diperoleh nilai preferensi sebesar 0,7618, dan diikuti dengan scenario ke-2 yaitu pembangkit hybrid DG + PV + Li-ion

3.3 Analisa Kelayakan Investasi

Analisis kelayakan finansial ditentukan berdasarkan perhitungan NPV, PI dan IRR yang ditentukan dari perhitungan kumulatif NCF (Net Cash Flow) pada system

pembangkit Hybrid dihitung mengacu arus kas masuk (cash in) dan arus kas keluar (cash out). Selanjutnya untuk mendapatkan Present Value Net cash flow (PVNCF) diperoleh dengan mengalikan NCF dengan discount factor (DF), besarnya $DF = \frac{(1+i)^t}{(1+i)^t}$ (dimana j merupakan tingkat inflasi sebesar 3,00% dan i merupakan tingkat suku bunga sebesar 4,81%).

Untuk mendapatkan arus kas masuk dihitung berdasarkan konsumsi energi listrik pulau Bangkuring sebesar 2.839.700 kwh/tahun kemudian dikalikan dengan dengan harga jual listrik rata-rata PT PLN (Persero) ULP Bungku (mengacu laporan penjualan listrik UIW Suluttenggo & ULP Banggai) sebesar Rp 1.272 /kwh atau US \$ 0,078 /kwh. Sedangkan arus kas keluar diperoleh dari biaya operasi, biaya penggantian peralatan, biaya O & M dan biaya bahan bakar dikurangi nilai sisa. Pada tahun ke 1 besarnya arus kas keluar sebesar US\$ 296.050,75 dengan $DF = \frac{(1+3,00)^1}{(1+4,81)^1}$ sebesar 0,9811 maka diperoleh Kas keluar pada tahun pertama sebesar US\$ 219.108,12 Dengan cara yang sama untuk tahun-tahun berikutnya dihitung sampai dengan 25 tahun (Perhitungan selengkapnya terdapat pada lampiran). Berdasarkan lampiran tersebut dapat dihitung parameter-parameter finansial sebagai berikut:

a) NPV

NPV dihitung berdasarkan persamaan *net cash flow* $\sum_{t=1}^n NCF_t \frac{(1+i)^t}{(1+i)^t}$ adalah sebesar US\$ 1.380.679,16 dan besarnya nilai investasi awal (II) sebesar US \$ 2.881.383,33 Sehingga diperoleh besarnya NPV = US\$ 1.380.679,16 - (US\$ 2.881.383,33) = US \$ -1.500.704,17 . Hasil perhitungan menunjukkan NPV<0 maka proyek tersebut dinyatakan belum layak secara finansial.

b) PI

Teknik PI dihitung dengan menggunakan persamaan $\sum_{t=1}^n NCF_t \frac{(1+i)^t}{(1+i)^t} .100\%$ adalah sebesar US\$ 1.380.679,16 dan besarnya nilai investasi awal (II) sebesar US\$ 2.888.136,33. Sehingga diperoleh besarnya PI :

$$PI = \frac{US \$ 1.380.679,16}{US \$ 2.881.383,33} .100\% = - 0.479$$

Sehingga PI < 0 dengan demikian dinyatakan belum layak secara finansial. Karena pada kasus ini PI mengindikasikan pengeluaran lebih besar dari pemasukan selama pembangkit hybrid ini berlangsung.

c) IIR

IIR merupakan metode penyusutan peringkat usulan investasi dengan menggunakan tingkat pengembalian dari sebuah investasi, yang dihitung dengan menemukan tingkat diskonto yang menyamai nilai sekarang dari arus kas masuk masa depan biaya proyek. Dalam hal perhitungan mengacu nilai revenue sepanjang umur investasi masih bernilai negative sehingga nilai IRR belum dapat dihitung.

3.4 Analisa Keekonomian dengan *Avoided Cost*

Sama seperti analisis kelayakan finansial sebelumnya menilai suatu proyek dengan melakukan perhitungan NPV, PI dan IRR yang ditentukan dari perhitungan kumulatif NCF

(Net Cash Flow) pada sistem pembangkit Hybrid, dihitung berdasarkan arus kas masuk dan arus kas keluar. Selanjutnya untuk mendapatkan Present Value Net cash flow (PVNCF) diperoleh dengan mengalikan NCF dengan discount factor (DF), $DF = \frac{(1+i)^t}{(1+i)^t}$ dimana j merupakan tingkat inflasi sebesar 3,11% dan i merupakan tingkat suku bunga sebesar 4,85%).

Pada kajian keekonomian untuk mendapatkan arus kas masuk dihitung berdasarkan benefit dari biaya bahan bakar minyak (BBM) yang dihemat dari pemanfaatan Solar PV & wind turbine yang dihybrid dengan diesel. Berdasarkan skema PLTD + PV + WT ini besarnya BBM yang dihemat sebesar 755.999 liter pertahunnya, jika harga BBM termasuk ongkos transportasinya sebesar US\$ 0,79 perliter maka diperoleh biaya penghematan sebesar US \$ 597.239,21 pertahun.

Selanjutnya mengacu lapiran jika dihitung IRR berdaarkan ke avoided cost penghematan dari penggunaan bahan bakar minyak diatas maka IRR dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$IRR = I1 + \left(\frac{NPV1}{NPV1 - NPV2} \right) \cdot (I2 - I1) \text{ dan dengan nilai :}$$

$$I1 = 4.81 \%$$

$$I2 = 6.25 \%$$

$$NPV1 = \text{US } \$ 6.116.085,34 \text{ (Net Present Value dengan I1)}$$

$$NPV2 = \text{US } \$ 4.182.316,30 \text{ Net Present Value dengan I2)}$$

$$IRR = I1 + \left(\frac{NPV1}{NPV1 - NPV2} \right) \cdot (I2 - I1)$$

$$IRR = 4,85 + \left(\frac{6.116.085,34}{6.116.085,34 - 4.182.316,30} \right) \cdot (6,25 - 4,81) = 9,32 \%$$

Dengan demikian pada parameter finansial IRR dinyatakan layak karena memiliki nilai lebih tinggi dari suku bunga acuan sebesar 9.32 %.

3.5 Analisa penurunan Emisi karbon pembangkit

Berdasarkan hasil simulasi HOMER dengan inputan bahan bakar diesel berdasarkan bahan bakar High Speed Diesel (HSD) diperoleh nilai emisi pada masing-masing skema dengan emisi karbon tertinggi PLTD 100 % dan yang tidak menimbulkan emisi pada skema PV & WT (100 % renewable energy).

Berdasarkan scenario terbaik yang diambil berdasarkan COE yakni pembangkit Hybrid skema PLTD + PV + WT jika dibandingkan penggunaan 100 % Pembangkit diesel yang mensuplai system kelistrikan Pulau Bangkuring selama 24 jam diperoleh intangible benefit dari penurunan emisi karbon sebesar 1.996.629 kg CO2/tahun atau 1,99Ton CO2/tahun.

Tabel 10 Emisi Green House Gas (GHG) pada skema PLTD 100% dan skema PLTD+PV+WT

Emission GHG	100 % Diesel (kg/yr)	PLTD + PV + WT (kg/yr)	Delta (kg/yr)
Carbon Dioxide	2.339.863	343.234	1.996.629
Carbon Monoxide	2.516	369	2.147
Unburned Hydrocarbon	98	14	83
Particulate Matter	98	14	84
Sulfur Dioxide	5.811	852	4.959
Nitrogen Oxide	16.842	2.471	14.371

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian analisis multi kriteria dan analisis simulasi keekonomian PLTH Diesel Solar PV dan Wind Turbine pada sistem kelistrikan di Pulau Bangkuring maka dapat ditarik beberapa Kesimpulan sebagai berikut:

1. Mengacu hasil simulasi dari lima skenario Perencanaan desain Pembangkit hybrid di pulau Bangkuring untuk melayani sistem selama 24 jam. Berdasarkan multi kriteria analisis menggunakan metode TOPSIS diperoleh skenario terbaik pada skenario PLTD + PV + WT dengan nilai preferensi sebesar 0,7618. Adapun nilai COE pada skenario PLTD + PV + WT sebesar 0,105 US\$ /kwh. Rincian Komponen pada skema ini terdiri dari PLTD sebesar 540 kW, solar PV 1.350 kWp, Wind Turbine 1.200 kW, Baterai Li-ion sebanyak 130 unit (Tegangan nominal 350 V, Nominal capacity 60 kWh 167 Ah.(Maximum Charge & Discharge Current 125 A), dan kapasitas Konverter 564 kW.
2. Berdasarkan Kajian kelayakan finansial, bila mengacu harga jual listrik rata-rata PT PLN (Persero) ULP Banggai sebesar Rp 1.272 /kwh atau US\$ 0,079 /kwh diperoleh pada skenario PLTD + PV + WT dari perspektif finansial dinyatakan tidak layak untuk semua analisis (NPV, PI dan IRR). Namun jika dilakukan Kajian Keekonomian benefit dari biaya bahan bakar minyak (BBM) yang dihemat dengan penggunaan solar PV & wind turbine yang dihybrid dengan diesel, BBM yang dihemat sebesar 641.370 liter pertahunnya, jika harga BBM termasuk ongkos transportasinya sebesar 0.79 US\$/liter maka diperoleh biaya penghematan sebesar 597.239,21 US\$/tahun.
3. Selain benefit yang diperoleh secara tangible dari proyek hybridisasi PLTD, solar PV, dan wind turbine secara kualitatif juga ada intangible benefit yang bisa diperoleh yakni terkait penurunan emisi CO2 sebesar 1.99 ton CO2/tahun dan effort pengelolaan limbah PLTD yang dapat ditekan.

References

- [1] Rahmat, A., & Kurniawan, A. (2020). Challenges and strategies to reduce cost of production in isolated electricity systems with optimization of renewable energy at Central Sulawesi. 2020 International Conference on Technology and Policy in Energy and Electric Power (ICT-PEP), 121-124
- [2] Peraturan Presiden No.2 Tahun 2015 tentang RJPMN 2015-2019, (2015).
- [3] Rosyadi. (2011). Pembangkit Listrik Tenaga Surya Hibrida Untuk Listrik Pedesaan di Indonesia. Jurnal Material dan Energi Indonesia, 01, 31-38.
- [4] Kementerian ESDM. (2023). Laporan Kinerja Tahun Anggaran 2022.
- [5] Indonesia Research Institute for Decarbonization. (2020). Mengenal Net-Zero Emission.
- [6] Nugroho, A. D., Alim, M. S., Sundari, S., & Soekarno, G. R. (2023). Kebijakan Dekarbonisasi.
- [7] Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021-2030, Jakarta PT PLN (Persero), 2021., (2021).
- [8] Pemerintah Provinsi Sulawesi Tengah. (2019). PERGUB NOMOR 25 TAHUN 2019[8].

- [9] Syahrullah, F. N., Maddus, U., Mustari, A. H., Gursky, S., & Indrawan, M. (2023). Distribution and Abundance of Peleng Tarsier (*Tarsius Pelengensis*) in Banggai Island Group, Indonesia. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30049-5>.
- [10] Kaya, I., Çolak, M., & Terzi, F. (2019). A comprehensive review of fuzzy multi criteria decision making methodologies for energy policy making. *Energy Strategy Reviews*, 24, 207–228