



# Analisa Kebutuhan Baterai Dan Sistem Pengisian Dan Pengosongan Baterai Untuk Sistem Hybrid (PLTB & PLTS) Di Kawasan Pesisir Danau Tondano

**Claudio Rivaldo Lumanauw<sup>1</sup>, Ali Akbar Steven Ramschie<sup>2</sup>, Fery Anus Bungkaes<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Manado, Manado, Indonesia

e-mail: <sup>1</sup>claudiolumanauw0110@gmail.com, <sup>2</sup>ali.a.s.ramschie@gmail.com, <sup>3</sup>ferybungkaes@gmail.com

## Abstrak

Pembangkit listrik hybrid, yang menggabungkan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), memiliki potensi besar untuk menyediakan energi terbarukan di kawasan pesisir, termasuk di sekitar Danau Tondano. Metode yang digunakan adalah metode eksperimental dengan pendekatan kuantitatif untuk menganalisis kebutuhan baterai serta sistem pengisian dan pengosongan (*charge–discharge*) pada pembangkit listrik tenaga hybrid yang menggabungkan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) di kawasan pesisir Danau Tondano, melalui perhitungan beban listrik harian dan estimasi potensi energi yang dihasilkan dari kedua sumber berdasarkan data aktual di lapangan. Sistem hybrid PLTS–PLTB di kawasan pesisir Danau Tondano mampu menghasilkan energi listrik dengan variasi yang dipengaruhi kondisi radiasi matahari dan kecepatan angin. Dari hasil pengukuran, PLTS memberikan kontribusi pengisian terbesar pada siang hari dengan tegangan 18–19 V dan arus 1,2–1,8 A, sedangkan PLTB menyumbang energi tambahan dengan tegangan sekitar 12–14 V dan arus 0,4–0,9 A.

**Kata kunci** - Hybrida, PLTS, PLTB, Baterai, Energi Terbarukan

## Abstract

*Hybrid power plants, which combine solar power plants (SPPs) and wind power plants (WPPs), have great potential to provide renewable energy in coastal areas, including around Lake Tondano.. The method used is an experimental method with a quantitative approach to analyse battery requirements and the charging and discharging systems in a hybrid power plant that combines a solar power plant (PLTS) and a wind power plant (PLTB) in the coastal area of Lake Tondano, through daily electricity load calculations and estimates of the energy potential generated from both sources based on actual field data. The PLTS-PLTB hybrid system in the coastal area of Lake Tondano is capable of generating electrical energy with variations influenced by solar radiation and wind speed conditions. From the measurement results, the PLTS provides the largest contribution to charging during the day with a voltage of 18–19 V and a current of 1.2–1.8 A, while the PLTB contributes additional energy with a voltage of around 12–14 V and a current of 0.4–0.9 A.*

**Keywords** – Hybrid, Solar Energy, Wind energy, Battery, Renewable Energy

## 1. PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir, kebutuhan akan energi bersih dan terbarukan semakin meningkat sebagai upaya untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil serta menekan emisi karbon. Pemanfaatan energi terbarukan seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) menjadi salah satu solusi dalam penyediaan listrik yang lebih ramah lingkungan, terutama di daerah yang memiliki potensi energi matahari dan angin yang tinggi. Kawasan pesisir Danau Tondano memiliki potensi besar dalam pengembangan sistem hybrid energi terbarukan, karena memiliki paparan sinar matahari yang tinggi sepanjang tahun serta angin yang cukup kuat untuk dimanfaatkan sebagai



sumber energi listrik. Namun, tantangan utama dalam penerapan sistem hybrid PLTS dan PLTB adalah kestabilan suplai energi, mengingat energi matahari dan angin bersifat fluktuatif tergantung pada kondisi cuaca dan musim. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, sistem penyimpanan energi berbasis baterai menjadi komponen penting dalam sistem hybrid. Namun, dalam implementasinya, pemilihan kapasitas baterai yang tepat serta sistem kontrol pengisian dan pengosongan yang optimal sangat penting agar baterai dapat bekerja secara efisien, memiliki umur pakai yang panjang, dan meminimalkan kerugian energi. [1][2]

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kebutuhan kapasitas baterai yang sesuai untuk sistem hybrid PLTS dan PLTB di kawasan pesisir Danau Tondano. Selain itu, penelitian ini juga akan membahas tentang bagaimana sistem pengisian dan pengosongan baterai agar dapat mengoptimalkan penggunaan energi serta meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan. Dengan adanya penelitian ini, diharapkan dapat memberikan solusi yang aplikatif bagi pengembangan sistem energi terbarukan di daerah pesisir dan mendukung transisi menuju energi yang lebih berkelanjutan. [3][4]

Teknologi hybrid digunakan di banyak industri selain otomotif. Ada sistem pembangkit listrik hibrida di industri energi yang menggabungkan sumber energi terbarukan seperti panel surya atau turbin angin dengan pembangkit listrik konvensional. Ini dapat meningkatkan keandalan energi, terutama di lingkungan yang rentan terhadap gangguan atau perubahan daya. Proses otomasi dan manufaktur menggunakan teknologi hybrid di industri. Mesin produksi, misalnya, dapat menggunakan kombinasi kontrol manusia dan komputer untuk meningkatkan efisiensi dan fleksibilitas produksi. Kedokteran juga menggunakan teknologi hybrid dalam peralatan medis yang menggabungkan teknologi pemindaian seperti MRI dengan robot bedah untuk melakukan operasi yang lebih presisi. [5][6][7]

Kemampuannya untuk memanfaatkan keuntungan dari masing-masing teknologi atau sumber daya yang digunakan merupakan keunggulan utama teknologi hybrid. Ini dapat berarti penggunaan energi yang lebih efisien, penurunan emisi, peningkatan kinerja, atau bahkan penurunan biaya operasional. Dalam era yang penuh dengan ketidakpastian dan peningkatan kesadaran akan perubahan iklim, teknologi hybrid menjadi semakin penting untuk membangun solusi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan di berbagai industri [7]

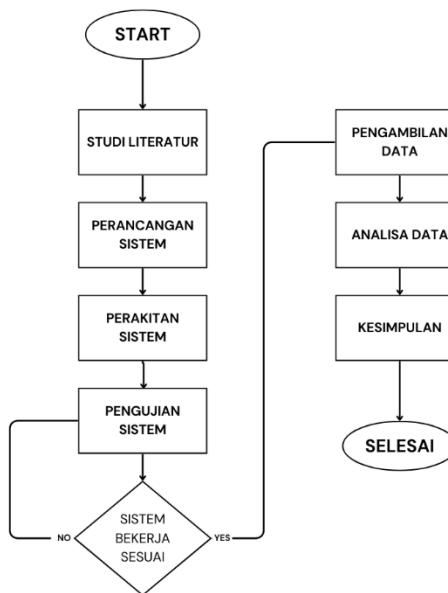
## 2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian dilakukan dengan menggunakan metode *Literature Review* dan Metode Eksperimen dengan menggunakan Pendekatan Kuantitatif untuk menganalisis aspek teknis sistem penyimpanan energi, seperti kapasitas baterai yang diperlukan, efisiensi pengisian dan pengosongan baterai, serta analisis daya yang dihasilkan oleh PLTB & PLTS. Data ini akan dikumpulkan dari sumber sekunder maupun melalui simulasi sistem hybrid. Pendekatan ini dipilih untuk memastikan bahwa penelitian tidak hanya berdasarkan angka dan perhitungan teknis, tetapi juga mempertimbangkan beberapa aspek seperti dalam aspek teori dan aspek praktik dari sistem penyimpanan energi dalam sistem hybrid.

Proses penelitian ini dilakukan secara bertahap untuk memastikan bahwa semua prosedur berjalan dengan benar dan menghasilkan informasi yang akurat. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis kapasitas baterai dan sistem pengisian dan pengosongan baterai pada sistem pembangkit listrik tenaga hibrid (PLTB & PLTS) di wilayah pesisir Danau Tondano.

### 2.1 Perancangan Sistem

Setelah memperoleh teori dan referensi yang cukup, tahap selanjutnya adalah melakukan perancangan sistem hybrid PLTS dan PLTB yang akan digunakan di lokasi penelitian.[8] Perancangan meliputi penentuan spesifikasi panel surya, turbin angin, MPPT hybrid, baterai LiFePO<sub>4</sub>, dan beban yang akan digunakan. Pada tahap ini juga dilakukan penyusunan diagram alir energi, perhitungan awal kebutuhan baterai, serta simulasi konfigurasi rangkaian untuk memastikan bahwa desain mampu memenuhi kebutuhan energi harian sebesar 1200 Wh dengan mempertimbangkan faktor-faktor



Gambar 2.1 *Flowchart* Penelitian.

### 2.2.1. Penentuan Energi Beban

Tabel 1. Tabel Energi Beban

No	Jenis Beban	Jumlah Unit	Daya Per Unit (W)	Pemakaian (Jam)	Energi (Wh)
1.	Lampu TL	2	15	12	360
2.	Peralatan Elektronik	2	20	2	80
Total		3	35	14	440

### 2.2.2. Penentuan Jenis Baterai

Baterai merupakan salah satu komponen kunci dalam sistem pembangkit listrik, khususnya pada sistem berbasis energi terbarukan seperti PLTS, PLTB, maupun kombinasi keduanya (hybrid). Perannya sangat penting untuk menyimpan energi saat produksi berlebih dan menyediakannya kembali ketika sumber energi utama tidak mencukupi. Berbagai jenis baterai telah digunakan pada penelitian-penelitian sebelumnya, masing-masing memiliki karakteristik, keunggulan, dan keterbatasan yang memengaruhi kinerja sistem secara keseluruhan. [9][10]

Berikut adalah parameter dari jenis baterai yang digunakan oleh para peneliti terdahulu dalam pembuatan suatu sistem pembangkit listrik dari sebuah baterai yang perlu diketahui dan biasanya dijadikan dasar perhitungan atau spesifikasi dalam sistem:

Tabel 2. Parameter Baterai dalam Sistem Pembangkit Listrik

Parameter	Lead-acid	vrla	Li-ion	Lifep04
Tegangan nominal	12V	12V	3.6-3.7 V/Sel	3.2-3.3V/Sel
kapasitas	1-3000 Ah	1-2000 Ah	5-500 Ah	10-1000 Ah
dod	50%	50-60%	80-90%	90-95%
soc	0-100% cut-off 20 %			
c-rate	0.1-0.3C	0.1-0.3C	0.5-2C	1-3C
efisiensi energi	70-80%	75-85%	90-95%	92-98%



cycle life	300-800	500-1000	1000-3000	2000-5000
self-discharge	10-15%	8-12%	3-5%	<3%
suhu operasional	0°C – 40°C	0°C – 40°C	-20°C – 60°C	-10°C – 60°C
v max/min	2.4 V / 1.75 V	2.4 V / 1.8 V	4.2 V / 2.5 V	3.65 V / 2.5 V
Resistensi internal	Tinggi	Sedang, Stabil	Renda	Sangat Rendah
berat & dimensi	Berat, Besar	Berat, Ringkas	Ringan, Padat	Ringan, Padat

Sesuai dengan penentuan jenis baterai pada table 2.2 Penulis memilih baterai LiFePO<sub>4</sub> karena memiliki kombinasi keunggulan yang paling sesuai untuk sistem hybrid PLTS–PLTB di Danau Tondano. Dibandingkan baterai timbal (lead-acid/VRLA) yang hanya aman digunakan pada DoD 50–60% dengan siklus hidup relatif pendek (300–800 kali), LiFePO<sub>4</sub> mampu digunakan hingga 90–95% DoD dengan umur siklus mencapai 2000–5000 kali, sehingga lebih tahan lama dan ekonomis dalam jangka panjang. Dari sisi efisiensi, LiFePO<sub>4</sub> mencapai 92–98%, jauh lebih tinggi dibanding timbal (70–85%) dan Ni-MH (65–75%), sehingga energi dari PLTS dan PLTB dapat dimanfaatkan lebih optimal. Selain itu, stabilitas termal dan keamanan LiFePO<sub>4</sub> lebih baik daripada Li-ion konvensional yang rentan overheating, membuatnya ideal digunakan di kawasan pesisir dengan suhu lingkungan cukup tinggi. Walaupun investasi awal lebih mahal, faktor umur panjang, efisiensi tinggi, kapasitas efektif besar, serta self-discharge rendah (<3%/bulan) menjadikan LiFePO<sub>4</sub> pilihan paling tepat untuk menjamin kontinuitas dan keandalan suplai energi terbarukan di lokasi penelitian [9]

### 2.2.3. Perhitungan Kapasitas Baterai

Baterai berfungsi sebagai penyimpan energi listrik yang dihasilkan dari PLTS dan PLTB untuk kemudian digunakan saat sumber energi utama tidak menghasilkan daya, seperti pada malam hari atau saat cuaca mendung. Pemilihan jenis baterai dilakukan berdasarkan kajian literatur yang telah dijelaskan pada Bab 2, di mana baterai LiFePO<sub>4</sub> dipilih karena memiliki efisiensi tinggi, *depth of discharge* (DOD) besar, umur siklus panjang, dan ketahanan yang baik terhadap kondisi lingkungan pesisir. [11]

Perancangan kapasitas baterai dilakukan untuk memastikan bahwa sistem dapat memenuhi kebutuhan beban listrik harian serta mempertahankan *autonomy days* sesuai target. Perhitungan kapasitas baterai dilakukan menggunakan persamaan berikut :

$$C_{baterai} = E_{harian} \times \text{Autonomy Days} \times \eta_{baterai} \quad (1)$$
$$C_{baterai} = DOD \times \eta_{baterai} E_{harian} \times \text{Autonomy Days}$$

Keterangan:

- C<sub>baterai</sub> = Kapasitas baterai (Wh)
- E<sub>harian</sub> = Energi yang dibutuhkan per hari (Wh)
- Autonomy Days = Jumlah hari ketersediaan energi tanpa pengisian
- DOD = *Depth of Discharge* maksimum yang aman (desimal)
- η<sub>baterai</sub> = Efisiensi baterai (desimal)

Berdasarkan hasil pengukuran dan pengamatan beban, energi yang dibutuhkan per hari adalah 1.200 Wh. Sistem dirancang untuk memiliki *autonomy* selama 1 hari. Baterai LiFePO<sub>4</sub> yang digunakan memiliki DOD 80% (0,8) dan efisiensi rata-rata 90% (0,9). Dengan demikian, kapasitas baterai yang diperlukan adalah:

$$\begin{aligned} C_{baterai} &= 1.200 \times 10,8 \times 0,9 \\ C_{baterai} &= 0,8 \times 0,91 \cdot 200 \times 1 \\ C_{baterai} &= 1.200,72 = 1.666,67 \text{ Wh} \\ C_{baterai} &= 0,72 \cdot 200 = 1.666,67 \text{ Wh} \end{aligned} \quad (2)$$

Jika sistem menggunakan tegangan nominal **12 V**, maka kapasitas dalam Ah adalah:



$$\begin{aligned} CAh &= 1.666,6712 \approx 138,9 \text{ Ah} \\ Cah &= 121.666,67 \approx 138,9 \text{ Ah} \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan tersebut, kapasitas baterai minimal yang dibutuhkan adalah 139 Ah pada 12 V. Namun, dalam implementasi, dipilih baterai LiFePO<sub>4</sub> 100 Ah dengan kemungkinan penggunaan dua unit secara paralel untuk mencapai kapasitas yang sesuai perhitungan, mempertimbangkan ketersediaan komponen dan efisiensi biaya.

#### 2.2.4. Penentuan Panel Surya

Panel surya digunakan untuk mengonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik. Berdasarkan hasil studi literatur dan data potensi radiasi di lokasi penelitian, rata-rata peak sun hours (PSH) adalah sekitar 5 jam/hari.

Diketahui:

- Energi harian yang dibutuhkan : 1.200 Wh
- Efisiensi sistem PLTS : 80% (0,80)
- PSH : 5 jam/hari
- Kapasitas panel terpasang : 100 Wp per unit

Dipilih 1 unit panel surya 100 Wp untuk mengantisipasi penurunan performa akibat kondisi cuaca, kotoran, atau degradasi sel surya. Panel surya yang digunakan memiliki spesifikasi :

- Kapasitas : 100 Wp
- Tegangan maksimum daya (Vmp) : 19,80 V
- Arus maksimum daya (Imp) : 6,06 A
- Dimensi : 900 × 670 × 30 mm

#### 2.2.5. Penentuan Turbin Angin

Beban Turbin angin digunakan sebagai sumber energi tambahan, terutama saat kondisi radiasi matahari rendah. Perancangan kapasitas PLTB mempertimbangkan potensi kecepatan angin rata-rata di lokasi.

Diketahui:

- Kapasitas turbin : 300 W
- Tegangan nominal : 12 V
- Cut-in speed : 2 m/s
- Rated speed : 11 m/s
- Cut-out speed : 45 m/s
- Diameter rotor : 0,9 m
- Kepadatan udara ( $\rho$ ) : 1,225 kg/m<sup>3</sup>
- Efisiensi konversi turbin : 35% (0,35)
- Jam efektif operasi per hari : 5 jam

Energi harian yang dapat dihasilkan turbin:

$$EPLTB = Prated \times t_{operasi} \times \eta_{turbin}$$

$$EPLTB = Prated \times t_{operasi} \times \eta_{turbin}$$

$$EPLTB = 300 \times 5 \times 0,35 = 525 \text{ Wh/hari}$$

$$EPLTB = 300 \times 5 \times 0,35 = 525 \text{ Wh/hari}$$

Energi dari PLTB ini akan menambah suplai harian dari PLTS sehingga sistem hybrid memiliki ketersediaan energi yang lebih stabil



### 3. PEMBAHASAN DAN HASIL

Pembahasan Hasil yang ditampilkan meliputi karakteristik sumber energi (angin dan matahari), kinerja pembangkit, serta analisis spesifik terhadap kebutuhan baterai dan sistem pengisian-pengosongan baterai. Metode pengumpulan data dilakukan dengan Mengobservasi lapangan dan Studi Literatur. Setiap temuan kemudian dibahas dan dibandingkan dengan teori, standar teknis, serta hasil penelitian terdahulu untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai performa dan kelayakan sistem.

#### 3.1 Data Hasil Observasi Pengujian dan Pengukuran Sistem PLTS

Bagian ini memuat hasil-hasil yang diperoleh dari penelitian di lapangan, baik melalui observasi langsung maupun dari pengukuran sistem yang telah dilakukan. Data yang disajikan di sini menjadi landasan utama untuk proses analisis pada tahap berikutnya. Untuk Data hasil Pengukuran sistem PLTS ini adapun metode pengumpulan data yang dilakukan yaitu dengan menggunakan metode pengukuran data secara langsung dengan menggunakan alat ukur tertentu :

Tabel 3. Tabel Pengisian PLTS Hari Pertama

Waktu	Lux	Parameter PLTS			Parameter Baterai		
		Suhu (C°)	Arus (I)	Tegangan (V)	Tegangan (V)	Arus (I)	SOC (%)
09:00	58790	27	3,1	11,18	11,7	2,65	20
09:30	58789	27	3	11,8	11,7	2,70	22
10:00	62234	27	3,3	12,5	11,8	3,14	24
10:30	63450	27	3,2	12,8	11,8	3,11	25
11:00	65356	28	4,1	13	11,9	4,03	27
11:30	65007	29	4,2	12,88	11,9	4,07	29
12:00	70427	32	4	12,7	11,9	3,81	31
12:30	65567	30	3,9	13	12,0	3,79	33
13:00	39901	25	4,1	13,3	12,0	4,06	35
13:30	23067	25	4,2	13,2	12,1	4,11	37
14:00	15025	23	1,7	12	12,1	1,51	38

Tabel 4. Tabel Pengosongan PLTS Hari Pertama

Waktu	Beban	Parameter Baterai				Durasi
		Tegangan (V)	Arus (I)	SOC Mulai (%)	SOC Akhir (%)	
18:00	50	12,0	4,2	38	33	1 Jam
19:00	50	11,8	4,3	33	29	1 Jam
20:00	30	11,8	2,5	29	26	1 Jam
21:00	30	11,7	2,6	26	24	1 Jam
22:00	30	11,7	2,6	24	21	1 Jam
23:00	30	11,6	1,6	21	20	37 Menit

Berdasarkan hasil pengukuran pada sistem PLTS hari pertama, terlihat bahwa intensitas cahaya (lux) sangat mempengaruhi arus yang dihasilkan panel, di mana rata-rata arus PV sebesar 3,5 A dengan arus masuk ke baterai sekitar 3,3 A, namun tegangan relatif rendah hanya 12–13 V sehingga proses pengisian berlangsung kecil dengan SOC yang tercapai hanya 38% atau 456 Wh dalam waktu lima jam, bahkan arus maksimal yang masuk ke baterai tercatat 4,07 A pada pukul 11:30 meskipun intensitas cahaya lebih kecil dibandingkan pukul 12:00 akibat pengaruh suhu panel. Pada tahap pengosongan, SOC 38% turun menjadi 20% dalam 5 jam 36 menit, dengan total energi yang tersuplai sekitar 156 Wh atau setara 18 Ah terpakai dari baterai 100 Ah; suplai beban terdiri dari dua lampu 30 W dan charger 40 W, di mana rata-rata arus awal lebih tinggi (~4,25–4,31 A) ketika charger aktif dan menurun menjadi ~2,59–2,62 A saat hanya lampu yang digunakan, sehingga secara keseluruhan baterai hanya mampu menopang beban sekitar 3 jam 42 menit sebelum mencapai batas SOC minimum 20%.



Tabel 5. Tabel Pengisian PLTS Hari Kedua

Waktu	Lux	Parameter PLTS			Parameter Baterai		
		Suhu (C°)	Arus (I)	Tegangan (V)	Tegangan (V)	Arus (I)	SOC (%)
09:00	58790	22,5	0,4	11	11,6	0,3	20
09:30	58789	22,9	1,5	11,3	11,7	1,3	21
10:00	62234	23	2	11,5	11,7	1,7	21
10:30	63450	25,4	2,1	11,8	11,7	1,8	22
11:00	65356	25,8	2,3	12	11,7	2,1	22
11:30	65007	26	2,5	12,2	11,8	2,3	24
12:00	70427	26,4	3	12,3	11,8	2,8	24
12:30	65567	26,9	3	12,5	11,8	2,8	25
13:00	39901	27,6	3,1	12,6	11,9	2,9	29
13:30	23067	28	3,4	12,7	11,9	3,2	30
14:00	15025	28,3	3,7	12,9	12	3,5	33

Tabel 6. Tabel Pengosongan PLTS Hari Kedua

Waktu	Beban	Parameter Baterai				Durasi
		Tegangan (V)	Arus (I)	SOC Mulai (%)	SOC Akhir (%)	
18:00	50	12,00	4,2	33	28	1 Jam
19:00	50	11,9	4,2	28	24	1 Jam
20:00	30	11,8	2,5	24	21	1 Jam
21:00	30	11,7	2,6	21	20	42 Min

Berdasarkan hasil pengukuran hari kedua pada sistem PLTS, proses pengisian terhitung lebih kecil karena tegangan yang dihasilkan panel relatif rendah hanya sekitar 12–13 V dengan kondisi cuaca mendung sehingga intensitas cahaya kurang optimal; akibatnya SOC baterai hanya meningkat hingga 33% atau 396 Wh, lebih kecil dibandingkan hari pertama yang mencapai 38%. Pada tahap pengosongan, SOC 33% turun menjadi 20% dalam 3 jam 42 menit, dengan total energi yang tersuplai sebesar 156 Wh atau setara 13 Ah dari kapasitas baterai 100 Ah, di mana persentase SOC yang berkurang sesuai dengan kapasitas aktual baterai LiFePO<sub>4</sub>. Selama periode ini, rata-rata arus tercatat sekitar 3,5 A, lebih tinggi di dua jam pertama (~4,25 A) ketika beban mencapai 50 W dan menurun menjadi ~2,59 A setelah hanya lampu 30 W yang aktif. Secara keseluruhan, dengan beban dua lampu 30 W dan charger 40 W, baterai hanya mampu menyuplai energi hingga batas SOC minimum 20% selama 3 jam 42 menit dengan daya yang dikeluarkan sebesar 156 Wh.

### 3.2 Data Hasil Observasi Pengujian dan Pengukuran Sistem PLTB

Data berikut adalah data hasil pengukuran yang dilakukan pada saat proses pengisian dan pengosongan baterai pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu. Parameter yang diukur mencakup Kecepatan Angin, tegangan (V) dan arus (I) yang dihasilkan oleh panel surya, Arus yang diterima oleh baterai dan tegangan baterai serta SOC sebagai parameter muatan dari baterai. Pengukuran proses pengisian pada PLTB ini dilakukan selama dua hari.

Tabel 7. Tabel Pengisian PLTB Hari Pertama

Waktu	M/s	Parameter PLTB			Parameter Baterai		
		Tegangan (V)	Arus (I)	Daya (W)	Tegangan (V)	Arus (I)	SOC (%)
08:00	6	11	2,45	27,21	11,7	1,7	21
09:00	7	11,5	3,75	43,21	11,7	2,8	24
10:00	6	11	2,7	27,21	11,8	1,9	26
11:00	6,7	11,3	3,35	37,89	11,9	2,5	29
12:00	7	11,5	3,75	43,21	11,9	2,8	32
13:00	6,3	11,1	2,8	31,1	12,0	2,0	34
14:00	7,7	11,8	4,8	57,52	12,1	3,7	37
15:00	7,1	11,6	3,8	45,1	12,1	2,9	40
16:00	8	12	5,3	64,51	12,2	4,2	45



Tabel 8. Tabel Pengosongan PLTB Hari Pertama

Waktu	Beban	Parameter Baterai			Durasi
		Tegangan (V)	Arus (I)	SOC Mulai (%)	
18:00	50	12,2	4,1	45	40
19:30	50	12,1	4,1	40	36
20:00	30	12	4,1	36	34
21:00	30	11,9	2,5	34	31
22:00	30	11,8	2,5	31	29
23:00	30	11,8	2,5	29	26
00:00	30	11,8	2,5	26	23
01:00	30	11,7	2,6	23	21
02:00	30	11,7	2,6	21	20
					30 Min

Berdasarkan hasil pengukuran pada sistem PLTB hari pertama, SOC baterai meningkat dari 20% menjadi 45% selama pukul 08:00–16:00 atau naik sekitar 25 persen poin, dengan total muatan masuk sebesar 24,5 Ah yang setara dengan 294 Wh dari total energi yang dihasilkan PLTB sebesar 376,96 W. Peningkatan ini sangat dipengaruhi oleh kecepatan angin, di mana pada sore hari rata-rata mencapai 7,5 m/s sehingga arus yang dihasilkan juga lebih tinggi, khususnya pada pukul 14:00 dan 16:00 yang menjadi waktu dengan kontribusi terbesar dalam produksi daya. Dengan demikian, total energi tersimpan pada baterai mencapai 540 Wh dengan SOC akhir 45%.

Pada tahap pengosongan, SOC 45% turun menjadi 20% dalam durasi 8 jam 30 menit, dimulai pukul 18:00 hingga mencapai batas SOC minimum 20% pada pukul 02:30:41 keesokan harinya. Selama periode ini, energi yang terpakai sebesar 300 Wh atau setara 25 Ah, dengan arus lebih tinggi di dua jam awal (~4,15–4,19 A) karena adanya beban charger HP, lalu menurun menjadi ~2,53–2,60 A saat hanya lampu 30 W yang aktif.

Tabel 9. Tabel Pengisian PLTB Hari Kedua

Waktu	M/s	Parameter PLTB			Parameter Baterai		
		Tegangan (V)	Arus (I)	Daya (W)	Tegangan (V)	Arus (I)	SOC (%)
08:00	6,1	11	2,58	28,59	11,7	1,9	21
09:00	6,5	11	3,08	34,6	11,7	2,2	24
10:00	7	11,5	3,75	43,21	11,8	2,8	27
11:00	6,7	11,3	3,3	37,89	11,9	2,4	29
12:00	7	11,5	3,75	43,2	11,9	2,8	32
13:00	6,8	11,4	3,53	39,61	12	2,6	35
14:00	6,5	11,2	3	34,6	12	2,3	37
15:00	7	11,5	3,75	43,21	12,1	2,8	40
16:00	7	11,5	3,75	43,21	12,2	2,8	43

Tabel 10. Tabel Pengosongan PLTB Hari Kedua

Waktu	Beban	Parameter Baterai			Durasi
		Tegangan (V)	Arus (I)	SOC Mulai (%)	
18:00	50	12,2	4,1	43	38
19:00	50	12,1	4,2	38	34
20:00	30	12	2,4	34	32
21:00	30	11,9	2,5	32	29
22:00	30	11,9	2,5	29	27
23:00	30	11,8	2,5	27	24
00:00	30	11,7	2,5	24	22
01:00	30	11,7	2,6	22	20
					43 Min

Berdasarkan hasil pengukuran pada sistem PLTB hari kedua, SOC baterai meningkat dari 20% pada pukul 08:00 menjadi 43% pada pukul 16:00, dengan total kenaikan sebesar 23 persen poin atau setara 23 Ah dari kapasitas baterai 100 Ah. Peningkatan ini dipengaruhi oleh kecepatan angin rata-rata sekitar 7 m/s,



di mana semakin tinggi kecepatan angin maka semakin besar arus yang dihasilkan, terutama pada waktu sore hari. Total daya yang dihasilkan PLTB sebesar 348,13 W, dengan energi yang masuk ke baterai sekitar 276 Wh, sehingga total energi tersimpan pada akhir pengisian mencapai 516 Wh dengan SOC 43%. Pada tahap pengosongan, SOC 43% turun menjadi 20% dalam durasi 7 jam 43 menit, dimulai pukul 18:00 hingga mencapai batas minimum pada pukul 01:43:44. Selama periode ini, energi yang terpakai tercatat sekitar 276 Wh atau setara 23 Ah, dengan arus puncak di dua jam pertama sebesar ~4,17–4,20 A saat beban 50 W (lampu + charger HP) dan menurun ke ~2,49–2,61 A saat hanya lampu 30 W yang aktif.

### 3.3 Data Hasil Observasi Pengujian dan Pengukuran Sistem PLTH

Data berikut adalah data hasil pengukuran yang dilakukan pada saat proses pengisian baterai pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (PLTS & PLTB). Parameter yang diukur mencakup intensitas cahaya pada hari pengukuran, kecepatan angin, tegangan dan arus yang dihasilkan oleh panel surya dan turbin angin. Arus yang diterima oleh baterai dan tegangan baterai serta SOC sebagai parameter muatan dari baterai. Pengukuran proses pengisian pada Sistem pembangkit hybrid ini dilakukan selama dua hari dimana hari pertama pengetesan dengan sumber yang hanya mengisi baterai, dan pada hari kedua Sumber disambungkan dengan beban dan juga baterai.

Tabel 11. Tabel Pengisian PLTH Hari Pertama Tanpa Beban

Waktu	PLTS		PLTB		Parameter Baterai		
	Tegangan (V)	Arus (I)	Tegangan (V)	Arus (I)	Tegangan (V)	Arus (I)	SOC (%)
08:00	-	-	11,05	2,5	11,6	2,3	22
09:00	12,5	3	11,2	3	11,7	5,7	28
10:00	12,7	3,4	11,2	3	11,8	6	34
11:00	12,9	3,7	11,6	4	12	7,3	41
12:00	13,1	4	11,5	3,7	12,1	7,3	48
13:30	12,8	3,2	11,4	3,65	12,3	6,5	55
14:00	12,9	3,7	11,8	4,83	12,5	8,1	63
15:30	13	3,9	12	5,3	12,7	8,7	72
16:00	12,6	3,1	12,2	5,4	12,9	8	80
17:30	9,2	-	12	5,3	13,1	5,1	85
18:00	-	-	12,1	5,3	13,2	5,1	90
19:00	-	-	12	5,2	13,3	5	95
19:51	-	-	12	5	13,4	4,9	100

Tabel 12. Tabel Pengosongan PLTH Hari Pertama Tanpa Beban

Waktu	Beban	Parameter PLTS				Durasi
		Tegangan (V)	Arus (I)	SOC Mulai (%)	SOC Akhir (%)	
20:00	50	13,6	3,7	100	96	1 Jam
21:00	50	13,5	3,7	96	92	1 Jam
22:00	30	13,4	2,2	92	90	1 Jam
23:00	30	13,3	2,2	90	87	1 Jam
00:00	30	13,3	2,3	87	85	1 Jam
01:00	30	13,2	2,3	85	83	1 Jam
02:00	30	13,1	2,3	83	80	1 Jam
03:00	30	13,1	2,3	90	78	1 Jam
04:00	30	13	2,3	78	76	1 Jam
05:00	30	13	2,3	76	73	1 Jam
06:00	30	12,9	2,3	73	71	1 Jam
07:00	30	12,9	2,3	71	69	1 Jam

Berdasarkan hasil pengukuran pada sistem PLTH (PLTS + PLTB) hari pertama, SOC baterai meningkat dari 20% pada pukul 08:00 hingga mencapai 100% pada pukul 19:51, dengan total energi yang masuk sebesar 960 Wh atau 80 Ah, sehingga kapasitas penuh baterai mencapai 1200 Wh. Pada pukul 16:00, SOC telah berada di angka 80,21% ketika kedua sistem masih bekerja bersamaan, namun setelah pukul 17:00 PLTS sudah tidak lagi menghasilkan arus karena intensitas cahaya sangat rendah, sehingga pengisian hanya



mengandalkan PLTB selama masih tersedia angin. Pada tahap pengosongan, SOC 100% turun menjadi 69,225% dalam durasi sekitar 12 jam (20:00–08:59) dengan energi terpakai sebesar 30 Ah. Rata-rata arus yang digunakan lebih tinggi di dua jam pertama, yaitu sekitar 3,75 A untuk beban 50 W, kemudian menurun menjadi 2,28–2,37 A saat hanya beban 30 W yang aktif.

Tabel 13. Tabel Pengisiang PLTH Hari Pertama Dengan Beban

Waktu	PLTS		PLTB		Parameter Baterai		
	Tegangan (V)	Arus (I)	Tegangan (V)	Arus (I)	Tegangan (V)	Arus (I)	SOC (%)
08:00	-	-	11	2,3	11,6	-0,2	19
09:00	12,9	3,7	11,2	3,1	11,6	4	23
10:00	13	4	11,4	3,2	11,7	4,4	28
11:00	13,2	4,5	11,4	3,2	11,8	4,9	33
12:00	12,8	3,4	11,6	4,2	11,9	4,8	37
13:30	12,9	3,7	11,9	4,9	12,1	5,8	43
14:00	12,8	3,7	11,9	4,9	12,2	5,8	49
15:30	13	4,2	12,2	5,3	12,3	5,1	54
16:00	13	4,1	12,5	5,5	12,5	5,3	60

Tabel 14. Tabel Pengosongan PLTH Hari Pertama Dengan Beban

Waktu	Beban	Parameter Baterai				Durasi
		Tegangan (V)	Arus (I)	SOC Mulai (%)	SOC Akhir (%)	
18:00	50	12,6	4	60	55	1 Jam
19:00	50	12,5	4	55	51	1 Jam
20:00	30	12,4	2,4	51	49	1 Jam
21:00	30	12,3	2,4	49	46	1 Jam
22:00	30	12,3	2,4	46	44	1 Jam
23:00	30	12,3	2,5	44	41	1 Jam
00:00	30	12,2	2,5	41	39	1 Jam
01:00	30	12,1	2,6	39	36	1 Jam
02:00	30	11,9	2,6	36	34	1 Jam
03:00	30	11,6	2,6	34	31	1 Jam
04:00	30	11,6	2,6	31	28	1 Jam
05:00	30	11,4	2,6	28	26	1 Jam
06:00	30	11,4	2,6	26	23	1 Jam
07:00	30	11,3	2,6	23	20	35 Min

Berdasarkan hasil pengukuran pada sistem PLTH (PLTS+PLTB) hari kedua, SOC baterai meningkat dari 20% pada pukul 08:00 menjadi 60% pada pukul 16:00, dengan kenaikan sebesar 40 persen poin selama delapan jam pengisian. Pada awalnya, saat pukul 08:00 hanya PLTB yang beroperasi, daya yang dihasilkan belum mampu menutup kebutuhan beban sehingga SOC sempat turun ke 19%, namun setelah pukul 09:00 ketika PLTS mulai berkontribusi, surplus energi dari gabungan PLTS dan PLTB membuat SOC naik signifikan, terutama pada periode 13:00–15:00 ketika arus gabungan mencapai nilai tertinggi. Meski demikian, produksi energi ke baterai relatif lebih rendah dibandingkan kondisi tanpa beban karena sebagian daya langsung digunakan untuk menyuplai beban. Pada tahap pengosongan, SOC 60% turun hingga 20% dalam durasi 14 jam 36 menit (18:00–08:36) dengan energi yang terpakai sebesar 480 Wh atau 40 Ah dari kapasitas baterai 100 Ah. Arus puncak terjadi pada dua jam awal sekitar 4,04–4,07 A karena beban 50 W, kemudian menurun ke kisaran 2,45–2,70 A saat hanya beban 30 W yang digunakan hingga SOC mencapai batas minimum 20%.

#### 4. KESIMPULAN

Kesimpulan Sebagian Setelah melakukan penelitian dan pengujian terhadap sistem pembangkit listrik tenaga Hybrid (PLTS & PLTB) serta analisa kebutuhan baterai dan sistem pengisian dan pengosongan baterai dapat disimpulkan bahwa :



- Baterai LiFePO<sub>4</sub> dipilih sebagai opsi terbaik karena memiliki umur siklus lebih panjang (>2000 cycle pada DoD 80%), efisiensi pengisian di atas 90%, serta stabilitas termal yang baik pada suhu pesisir. Hal ini membuat biaya per kWh per siklus lebih ekonomis dibandingkan lead-acid maupun Ni-MH. Dari hasil perhitungan, kapasitas baterai yang dibutuhkan adalah sekitar 35 Ah pada 12 V ( $\pm 420$  Wh)
- Proses pengisian baterai menunjukkan bahwa ketika PLTS dan PLTB bekerja bersamaan, arus total pengisian meningkat signifikan dan mampu menaikkan SOC lebih cepat dibanding hanya salah satu sumber bekerja. Dari hasil pengukuran, PLTS memberikan kontribusi pengisian terbesar pada siang hari dengan tegangan 18–19 V dan arus 1,2–1,8 A, sedangkan PLTB menyumbang energi tambahan dengan tegangan sekitar 12–14 V dan arus 0,4–0,9 A.

## 5. SARAN

Bagian Setelah melakukan penelitian dan pengujian terhadap sistem pembangkit listrik tenaga Hybrid (PLTS & PLTB) serta analisa kebutuhan baterai dan sistem pengisian dan pengosongan baterai dapat penulis menyarankan untuk :

- Monitoring jangka panjang perlu dilakukan untuk memvalidasi degradasi kapasitas baterai LiFePO<sub>4</sub> dari waktu ke waktu. Hal ini penting untuk memastikan umur pakai aktual sesuai dengan spesifikasi pabrikan.
- Perlu dilakukan analisis ekonomi mendalam, dengan membandingkan investasi awal LiFePO<sub>4</sub> dengan baterai lead-acid dan VRLA, agar dapat diketahui kelayakan finansial penerapan sistem ini pada masyarakat pesisir Danau Tondano.
- Implementasi nyata sistem hybrid PLTS–PLTB sebaiknya melibatkan pelatihan teknis bagi masyarakat setempat, sehingga mereka mampu melakukan perawatan rutin dan mengoptimalkan penggunaan energi terbarukan secara berkelanjutan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] V. Dwisari, “Pemanfaatan Energi Matahari: Masa Depan Energi Terbarukan.”
- [2] J. E. Elektro, H. B. Nurjaman, And T. Purnama, “Pembangkit Listrik Tenaga Surya (Plts) Sebagai Solusi Energi Terbarukan Rumah Tangga.” [Online]. Available: <Https://Journal.Uny.Ac.Id/Index.Php/Jee>
- [3] J. Teknologi, R. I. Listrik, D. A. Fadilla, D. Matthew, And R. Alfarizi, “Design And Testing Of Charging System And Discharge Of Li-Ion And Lead-Acid Batteries With A Lead-Acid With Plts Source.”
- [4] H. Rusiana Iskandar *Et Al.*, “Analisis Performa Baterai Jenis Valve Regulated Lead Acid Pada Plts Off-Grid 1 Kwp,” Vol. 13, No. 2, 2021, Doi: 10.24853/Jurtek.13.2.129-140.
- [5] D. Nabiil Akbar, B. Surya Gumilang, And A. Zuroida, “Studi Potensi Pengembangan Pembangkit Listrik Hybrid Genset-Pv Di Wilayah Pesisir Kabupaten Malang,” *Elposys: Jurnal Sistem Kelistrikan*, Vol. 10, No. 1.
- [6] S. Saodah, N. Hariyanto, And J. Teknik Konversi Energi Politeknik Negeri Bandung Jalan Gegerkalong Hilir Desa Ciwaruga Kab Bandung, *Perancangan Sistem Pembangkit Listrik Hybrid Dengan Kapasitas 3 Kva*.
- [7] D. I. Syam, S. Thamrin, And C. Maharani B.Z, “Perkembangan Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida (Plt Hibrida) Di Indonesia Guna Mendukung Ketahanan Nasional,” *Pendipa Journal Of Science Education*, Vol. 8, No. 2, Pp. 231–238, Jul. 2024, Doi: 10.33369/Pendipa.8.2.231-238.
- [8] J. Teknik Elektro, Y. Arif Santoso, And U. Jember Bambang Sri Kaloko, “Rancang Bangun Sistem Pengisi Baterai Lead Acid Berbasis Mikrokontroler Atmega328 Dengan Sumber Stand-Alone Pv System.”



- 
- [9] F. Rosikin *Et Al.*, “Literature Review Dan Perbandingan Baterai Lithium-Ion, Nikel-Kadmium, Lifepo4, Dan Perak Oksida Di Indonesia.”
  - [10] R. G. Widjaja *Et Al.*, “State Of Charge Estimation Of Lead Acid Battery Using Neural Network For Advanced Renewable Energy Systems,” *Emerging Science Journal*, Vol. 7, No. 3, Pp. 691–703, Jun. 2023, Doi: 10.28991/Esj-2023-07-03-02.
  - [11] D. Lestari And B. Widodo, “Analisa Ketahanan Baterai Lithium Ion Pada Sepeda Listrik Roda Tiga,” 2022.