

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

A. Kajian Teori

1. Manajemen Beban Adaptif

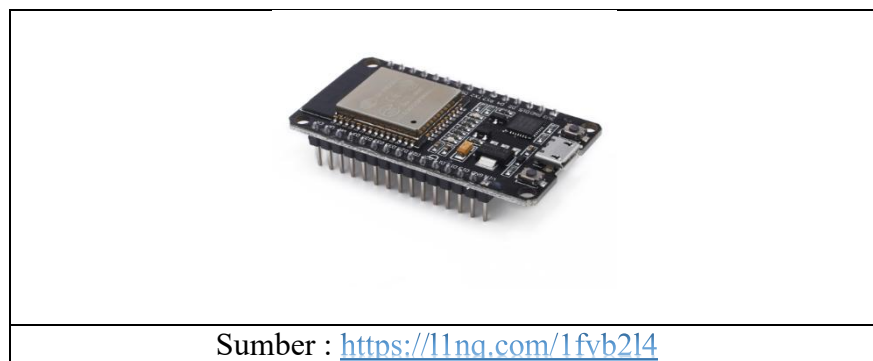
Manajemen beban adaptif merupakan metode pengaturan energi yang memantau kondisi daya secara *real-time* untuk mengatur operasi beban sesuai ketersediaan energi dan tingkat prioritasnya. Sistem ini mampu menjaga keseimbangan antara suplai dan kebutuhan energi yang fluktuatif dimana dalam penerapannya, *Sistem Manajemen Energi (SME)* berfungsi mengatur aliran energi secara cerdas dan responsif agar sistem bekerja lebih andal dan berkelanjutan (Mangate dkk. 2024). Adapun komponen – komponen yang akan digunakan dalam sistem proteksi sebagai berikut :

a. Mikrokontroler ESP 32

ESP32 merupakan mikrokontroler berbasis *Internet of Things (IoT)* yang dikembangkan oleh *Espressif Systems* dan telah dilengkapi dengan modul *WiFi* di dalam chip sehingga mampu melakukan komunikasi data secara nirkabel. ESP32 dirancang untuk mendukung berbagai sistem monitoring dan kontrol secara *real-time* melalui koneksi internet. Mikrokontroler ini banyak digunakan dalam pengembangan sistem otomatis karena memiliki kemampuan pemrosesan data yang baik, konsumsi daya yang rendah, serta mudah diintegrasikan dengan berbagai sensor dan perangkat

elektronik lainnya. Pada penelitian ini, ESP32 digunakan sebagai pusat pengendali untuk memproses data sensor tegangan, arus, dan kondisi baterai pada sistem *hybrid* angin dan surya (Yuniarto dan Diponegoro 2023).

Adapun *hardware* ESP 32 dapat dilihat pada gambar 2.1 berikut:

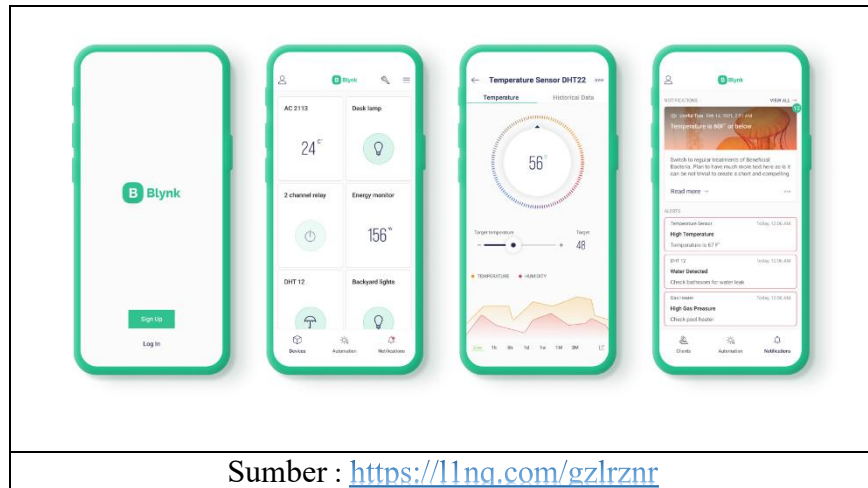


Gambar 2. 1 ESP 32

b. *Blynk*

Blynk merupakan platform berbasis *Internet of Things (IoT)* yang digunakan untuk monitoring dan pengendalian perangkat elektronik secara *real-time* melalui koneksi internet. Platform ini dirancang untuk memudahkan pengguna dalam memantau kondisi sistem menggunakan *smartphone* yang terhubung dengan mikrokontroler seperti ESP32 melalui jaringan *WiFi*. *Blynk* mampu menampilkan data sensor, status perangkat, serta menerima informasi dari sistem secara jarak jauh sehingga proses monitoring menjadi lebih mudah dan efisien. Pada penelitian ini, *Blynk* digunakan sebagai media monitoring kondisi tegangan, arus, daya,

dan status baterai pada sistem *hybrid* angin dan surya(Asry dkk. 2024).



Sumber : <https://11ng.com/gzlrznr>

Gambar 2. 2 Blynk IOT

c. Relay

Relay merupakan komponen elektromekanik yang berfungsi sebagai saklar otomatis untuk memutus dan menghubungkan aliran listrik berdasarkan sinyal kendali yang diberikan oleh mikrokontroler. *Relay* banyak digunakan pada sistem kendali karena mampu mengoperasikan beban bertegangan dan berarus lebih tinggi menggunakan sinyal kendali bertegangan rendah. Dalam sistem berbasis *Internet of Things (IoT)*, *Relay* sering dimanfaatkan sebagai aktuator untuk mengontrol beban listrik secara otomatis sesuai kondisi yang telah ditentukan. Pada penelitian ini, *Relay* digunakan sebagai pengendali beban dalam sistem manajemen beban adaptif untuk mengatur distribusi energi berdasarkan kondisi daya dan kapasitas baterai secara *real-time* (Khafidhoh dan Holis 2026).



Sumber : <https://11nq.com/gzlrznr>

Gambar 2. 3 Relay 5v 2 Channel

d. *Power supply*

Power supply merupakan perangkat yang berfungsi untuk menyuplai energi listrik pada berbagai peralatan elektronika. Catu daya diperlukan untuk menghasilkan tegangan yang stabil agar sistem dapat bekerja dengan baik sesuai kebutuhan. Pada penelitian ini, *Power supply* digunakan sebagai sumber energi utama untuk menyuplai ESP32, sensor, *relay*, OLED, dan komponen pendukung lainnya pada sistem *hybrid* angin dan surya (K. Effendi dkk. 2020).

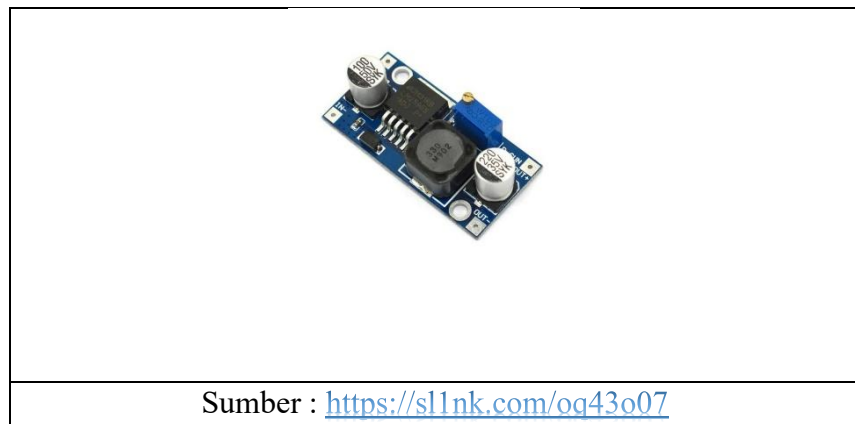


Sumber : <https://11nq.com/bttaa3q>

Gambar 2. 4 Power supply 12v

e. *Step Down*

Step-down merupakan rangkaian yang berfungsi menurunkan tegangan DC menjadi tegangan yang lebih rendah. IC LM2596 banyak digunakan pada rangkaian ini karena mampu menghasilkan tegangan keluaran yang stabil dengan efisiensi yang tinggi. Pada penelitian ini, modul *step-down* LM2596 digunakan untuk menurunkan tegangan *power supply* 12 V menjadi 5 V sebagai sumber daya komponen sistem (Raka Dian Mahardi dkk. 2024).



Gambar 2. 5 *Step Down*

f. Sensor ACS 712

Sensor ACS712 merupakan sensor arus berbasis efek *Hall* yang digunakan untuk mengukur besar arus listrik pada suatu rangkaian. Sensor ini mengubah medan magnet yang dihasilkan oleh aliran arus menjadi sinyal tegangan yang proporsional. Pada penelitian ini, ACS712 digunakan untuk memantau arus pada sistem *hybrid* angin dan surya sebagai bagian dari proses monitoring energi

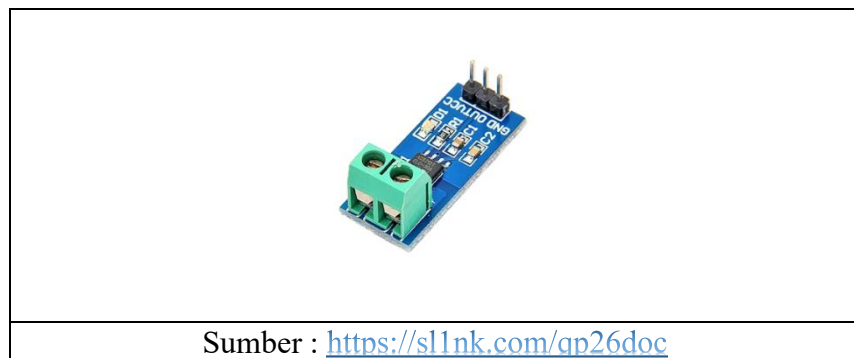
(Fasha Nur Fauzan, Sri Utami, dan Mulki Rezka Budi Pratama 2024).



Gambar 2. 6 sensor ACS 712

g. Sensor Tegangan

Sensor tegangan ZMPT101B merupakan sensor yang digunakan untuk mengukur tegangan listrik dan mengirimkan hasil pengukuran ke mikrokontroler untuk diproses lebih lanjut. Sensor ini banyak digunakan pada sistem monitoring karena mampu melakukan pengukuran secara *real-time*. Pada penelitian ini, sensor ZMPT101B digunakan untuk memantau tegangan pada sistem *hybrid* angin dan surya sebagai bagian dari proses monitoring energi (Adam, Purwanto Gendroyono, dan Nur Hanifah Yuninda 2020).



Gambar 2. 7 sensor Tegangan

h. Inverter

Inverter merupakan perangkat yang berfungsi mengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC). Pada sistem energi terbarukan, inverter digunakan untuk mengubah energi listrik dari baterai atau panel surya menjadi tegangan AC yang dapat digunakan oleh peralatan listrik. Pada penelitian ini, inverter digunakan untuk mengonversi tegangan baterai menjadi tegangan AC 220 V sebagai sumber daya beban listrik (Pratama 2024).



Sumber : <https://11ng.com/exp153a>

Gambar 2. 8 Inverter

i. TFT LCD (*Thin Film Transistor Liquid Crystal Display*)

TFT LCD (*Thin Film Transistor Liquid Crystal Display*) merupakan perangkat tampilan elektronik yang digunakan untuk menampilkan data dalam bentuk huruf, angka, maupun grafik. TFT LCD memiliki tampilan yang jelas, berwarna, dan informatif sehingga memudahkan pengguna dalam memantau informasi yang ditampilkan secara *real-time*. Pada sistem berbasis mikrokontroler, TFT LCD berfungsi sebagai media antarmuka untuk menampilkan

data hasil pengolahan sensor yang telah diproses oleh ESP32. Pada penelitian ini, TFT LCD digunakan untuk menampilkan informasi tegangan, arus, daya, persentase baterai (*State of Charge*), serta status beban pada sistem *hybrid* angin dan surya (Jasman 2025).



Gambar 2. 9 TFT LCD (*Thin Film Transistor Liquid Crystal Display*) 2.8 inch

2. Tingkat Efisiensi

Merupakan indikator yang digunakan untuk mengetahui seberapa baik suatu sistem atau peralatan dalam memanfaatkan sumber daya yang tersedia untuk menghasilkan output yang diinginkan. Nilai efisiensi menunjukkan perbandingan antara hasil yang diperoleh dengan sumber daya yang digunakan selama proses berlangsung. Semakin besar tingkat efisiensi, maka semakin kecil pula kerugian atau pemborosan yang terjadi. Dalam bidang teknik, efisiensi menjadi salah satu aspek yang perlu diperhatikan karena berhubungan dengan performa, keandalan, dan biaya operasional suatu sistem. Oleh sebab itu, setiap komponen dalam suatu sistem harus dirancang dan dipilih dengan

mempertimbangkan tingkat efisiensinya agar mampu bekerja secara optimal serta mengurangi rugi-rugi yang dapat memengaruhi kinerja keseluruhan sistem. Pendapat ini didukung oleh (Siregar 2020) yang menyatakan bahwa efisiensi komponen merupakan faktor penting dalam perancangan sistem karena berpengaruh terhadap efektivitas dan kestabilan operasi sistem.

a. Tingkat Efisiensi Energi

Tingkat efisiensi energi merupakan ukuran yang menunjukkan kemampuan suatu sistem dalam mengubah energi masukan menjadi energi keluaran yang dapat dimanfaatkan dengan meminimalkan kerugian energi selama proses konversi. Semakin tinggi nilai efisiensi energi, semakin optimal pemanfaatan energi yang dilakukan oleh sistem tersebut. Peningkatan efisiensi energi dapat dicapai melalui integrasi teknologi yang mampu mengurangi kerugian energi dan mengoptimalkan proses konversi energi sehingga kinerja sistem menjadi lebih efektif, andal, dan berkelanjutan (R. Effendi 2024).

Rumus efisiensi energi :

$$EE = \frac{E_{sebelum} - E_{sesudah}}{E_{sebelum}} \times 100\% \quad 2.1$$

Keterangan:

EE	= Efisiensi energi (%)
$E_{sebelum}$	= Energi yang digunakan sebelum penerapan sistem (Wh)
$E_{sesudah}$	= Energi yang digunakan setelah penerapan sistem (Wh)
100%	= Konstanta

b. Tingkat Efisiensi Baterai

Efisiensi baterai adalah kemampuan baterai untuk menyimpan dan melepaskan energi dengan kehilangan energi yang minimal selama proses pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*). Efisiensi yang tinggi dapat membantu memperpanjang umur baterai karena mengurangi kerusakan atau degradasi pada sel baterai. Salah satu parameter penting dalam pengelolaan baterai adalah *State of Charge (SoC)*, yaitu nilai yang menunjukkan jumlah energi yang masih tersimpan di dalam baterai. Pemantauan SoC sangat penting untuk menjaga kinerja dan kesehatan baterai. Selain itu, umur baterai juga dipengaruhi oleh jumlah siklus pengisian dan pengosongan (*cycle life*) (Zhao dkk. 2023), dimana semakin banyak siklus yang digunakan maka kondisi baterai akan semakin menurun. Oleh karena itu, pengaturan SoC dan siklus baterai yang tepat dapat meningkatkan efisiensi penggunaan serta membantu memperpanjang umur baterai.

1) *State of Charge (SoC)*

SoC digunakan untuk mengetahui persentase energi yang masih tersimpan di dalam baterai dibandingkan kapasitas maksimumnya.

$$\Delta SoC = SoC_{sesudah} - SoC_{sebelum} \quad 2.2$$

Keterangan:

SOC = State of Charge (%)

$E_{tersimpan}$ = Energi yang tersimpan dalam baterai (kWh)

C_{bat} = Kapasitas nominal baterai (kWh)

2) Energi *Charge* dan *Discharge*

Perubahan SoC digunakan untuk menghitung energi yang masuk atau keluar dari baterai selama proses operasi.

$$E = \frac{\Delta SOC}{100} \times C_{bat} \quad 2.3$$

Keterangan:

E = Energi charge atau discharge (kWh)

ΔSOC = Perubahan State of Charge (%)

C_{bat} = Kapasitas baterai (kWh)

3) Efisiensi Baterai

Efisiensi baterai digunakan untuk mengetahui kemampuan baterai mengembalikan energi yang telah disimpan.

$$\eta_{bat} = \frac{E_{discharge}}{E_{charge}} \times 100\% \quad 2.4$$

Keterangan:

η_{bat} = Efisiensi baterai (%)

$E_{discharge}$ = Energi yang dikeluarkan baterai (kWh)

E_{charge} = Energi yang masuk ke baterai (kWh)

Sebagai contoh, baterai yang mengalami pengosongan 50% dan pengisian kembali 50% dianggap telah mengalami satu siklus penuh.

4) *Equivalent Full Cycle (EFC)*

EFC digunakan untuk menghitung jumlah siklus baterai berdasarkan total perubahan SoC yang terjadi selama operasi.

$$EFC = \frac{\sum |\Delta SOC|}{100} \quad 2.5$$

Keterangan:

EFC	=	Equivalent Full Cycle (siklus penuh ekuivalen)
$\sum \Delta SOC $	=	Total perubahan State of Charge (%)
ΔSOC	=	Perubahan State of Charge pada setiap interval (%)

Sebagai contoh, baterai yang mengalami pengosongan 50% dan pengisian kembali 50% dianggap telah mengalami satu siklus penuh.

3. Sistem Penyimpanan Energi

a. Baterai

Baterai VRLA (*Valve Regulated Lead Acid*) merupakan jenis baterai timbal-asam tertutup yang banyak digunakan pada sistem energi terbarukan karena memiliki perawatan yang relatif mudah dan mampu menyimpan energi listrik secara stabil. Energi yang dihasilkan oleh panel surya disimpan dalam baterai melalui proses *charging* dan digunakan kembali untuk menyuplai beban melalui proses *discharging*. Kinerja dan umur baterai dipengaruhi oleh jumlah siklus pengisian dan pengosongan serta nilai *Depth of Discharge (DoD)* yang terjadi selama pengoperasian. Pada

penelitian ini digunakan baterai aki 12 V sebagai media penyimpanan energi dari sistem *hybrid* angin dan surya sebelum disalurkan ke beban (Iskandar dkk. 2021a).



Gambar 2. 10 Baterai Aki 12v

4. Sumber Energi *Hybrid*

a. Panel Surya (*Solar Panel*)

Panel surya merupakan perangkat yang berfungsi mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaiik. Besarnya energi listrik yang dihasilkan panel surya dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari yang diterima permukaan panel. Tegangan, arus, dan daya keluaran panel dapat berubah sesuai kondisi cuaca dan tingkat penyinaran matahari. Oleh karena itu, panel surya banyak digunakan sebagai sumber energi terbarukan pada sistem pembangkit listrik karena mampu menghasilkan energi listrik tanpa menimbulkan polusi. Pada penelitian ini, panel surya digunakan sebagai salah satu sumber

energi utama pada sistem *hybrid* untuk mengisi baterai dan menyuplai kebutuhan beban listrik(Hasrul 2021).



Sumber : <https://s11nk.com/zq959qs>

Gambar 2. 11 Panel Surya 50 Wp

b. Turbin Angin (*Wind Turbin*)

Turbin Angin merupakan perangkat yang berfungsi mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik melalui putaran sudu turbin, kemudian energi tersebut dikonversi menjadi energi listrik menggunakan generator. Besarnya energi listrik yang dihasilkan dipengaruhi oleh kecepatan angin yang diterima oleh sudu turbin. Oleh karena itu, turbin angin banyak dimanfaatkan sebagai salah satu sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan dan dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik pada berbagai aplikasi. Pada penelitian ini, turbin angin digunakan sebagai salah satu sumber energi pada sistem *hybrid* untuk membantu pengisian baterai dan menyuplai beban listrik (H. Anwar 2021).



Gambar 2. 12 Turbin Angin 400 watt

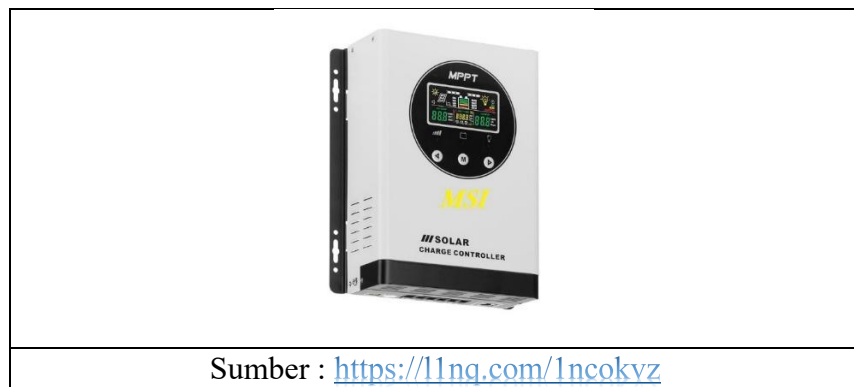
c. *Charge controller Hybrid*

Charge Controller Hybrid merupakan perangkat yang digunakan untuk mengatur proses pengisian baterai dari panel surya dan turbin angin dalam satu sistem terintegrasi. Komponen ini berfungsi mengelola aliran energi dari kedua sumber agar pengisian baterai berlangsung lebih optimal dan sistem dapat bekerja secara stabil. Pada penelitian ini, *charge controller hybrid* digunakan untuk mengendalikan pengisian baterai dan mendukung pengoperasian sistem *hybrid* angin dan surya (Vrathama dan Silalahi 2025).



Gambar 2. 13 *Charge controller Hybrid MPPT (Maximum Power Point Tracking)*

Maximum Power Point Tracking (MPPT) merupakan metode yang digunakan untuk memperoleh dan mempertahankan daya maksimum yang dihasilkan oleh panel surya. MPPT bekerja dengan melakukan pelacakan titik daya maksimum (*Maximum Power Point*) sehingga panel surya dapat beroperasi pada kondisi yang paling optimal meskipun terjadi perubahan intensitas radiasi matahari. Penggunaan MPPT terbukti mampu meningkatkan daya keluaran sistem dibandingkan tanpa menggunakan MPPT, sehingga energi yang dihasilkan panel surya dapat dimanfaatkan secara lebih efisien. Pada penelitian ini, MPPT digunakan untuk mengoptimalkan energi yang dihasilkan panel surya sebelum disimpan ke dalam baterai pada sistem *hybrid* angin dan surya (Mahmudatul Ula dan Arief Rahmadani 2023).



Gambar 2. 14 MPPT (*Maximum Power Point Tracking*)

d. *WTC (Wind turbine controller)*

Wind Turbine Controller (WTC) merupakan perangkat yang digunakan untuk mengatur dan melindungi sistem turbin angin selama proses pembangkitan energi listrik. Perangkat ini bekerja dengan memantau kondisi keluaran generator serta mengendalikan operasi turbin agar tetap berada pada batas kerja yang aman. Penggunaan *controller* pada turbin angin diperlukan untuk mencegah terjadinya putaran berlebih (*overspeed*) yang dapat menyebabkan ketidakstabilan sistem maupun kerusakan pada komponen pembangkit. Pada penelitian ini, *Wind Turbine Controller* digunakan untuk mengatur energi yang dihasilkan turbin angin sebelum disalurkan ke baterai dan beban pada sistem *hybrid* angin dan surya (Sutikno dkk. 2022).



Sumber : <https://11nq.com/o9uogx5>

Gambar 2. 15 *wind turbine controller*

B. Kajian Penelitian yang Relevan

Tabel 2. 1 Penelitian yang relevan

No	Nama Penelitian	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Perbedaan dengan Penelitian Skripsi ini
1.	Hartawan Abdillah, Tamam Asrori, Mas Ahmad Baihaqi, Dani Hari Tunggal Prasetyo, Alief Muhamma d.	Sistem Monitoring dan Manajemen Energi pada Pembangkit <i>Hybrid</i> PLTS, PLTB, dan PLN berbasis <i>Internet of Things</i> .	Menghasilkan sistem monitoring energi berbasis IoT dengan tingkat ketepatan pembacaan tegangan sebesar 97% dan arus sebesar 98%. Pengujian menunjukkan tegangan maksimum panel surya 20,42 V, arus maksimum 759,75 mA, dan daya maksimum turbin angin 35,78 W pada kecepatan angin 12,72 m/s (Abdillah dkk. 2023).	Penelitian ini berfokus pada pengembangan sistem manajemen beban adaptif berbasis <i>State of Charge (SoC)</i> untuk mengendalikan beban secara otomatis sedangkan (Abdillah dkk. 2023) berfokus pada monitoring dan pengiriman data energi secara <i>real-time</i> berbasis IoT.
2.	Dr. L D Mangate, Haider Alabdeli, Rohit Agarwal, Dr.T.Saravanan, Janakiraman V, Nitin Sherje, K.	<i>Adaptive Energy Management System for Enhancing Efficiency and Reliability in Hybrid Renewable Energy Systems</i> .	Menghasilkan sistem manajemen energi adaptif yang mampu mengoptimalkan distribusi daya sebesar 250 MW, dengan pembagian daya 100 MW Generator 1 dan	Penelitian ini diterapkan pada skala <i>Prototype</i> sistem <i>hybrid</i> angin dan surya menggunakan baterai aki 12 V, sedangkan (Mangate dkk. 2024) berfokus pada optimasi distribusi daya

No	Nama Penelitian	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Perbedaan dengan Penelitian Skripsi ini
	Kumaraswamy Naidu.		150 MW Generator sehingga kebutuhan daya dapat terpenuhi secara optimal dengan biaya operasi yang lebih rendah (Mangate dkk. 2024).	sistem kelistrikan skala besar menggunakan metode <i>Mixed-Integer Linear Programming (MILP)</i> .
3.	Kesya M. M. Bawango, Hesky S. Kolibu, dan Seni H. J. Tongkukut	Estimasi <i>State of Charge</i> Pada Baterai Li-ion Dengan Menggunakan Metode <i>Coulomb Counting</i>	Menghasilkan estimasi <i>State of Charge (SoC)</i> menggunakan metode <i>Coulomb Counting</i> , dengan waktu mencapai batas bawah SoC masing-masing baterai sebesar 31 menit (Baterai A), 137 menit (Baterai B), 88 menit (Baterai C), dan 130 menit (Baterai D). Hasil terbaik diperoleh pada Baterai B yang mampu mempertahankan SoC hingga 137 menit (Bawango dan Kolibu 2024).	Penelitian ini tidak hanya melakukan monitoring dan estimasi SoC baterai, tetapi juga memanfaatkan nilai SoC sebagai dasar pemutusan beban (<i>cut-off</i>) secara otomatis untuk melindungi baterai dan meningkatkan efisiensi energi.

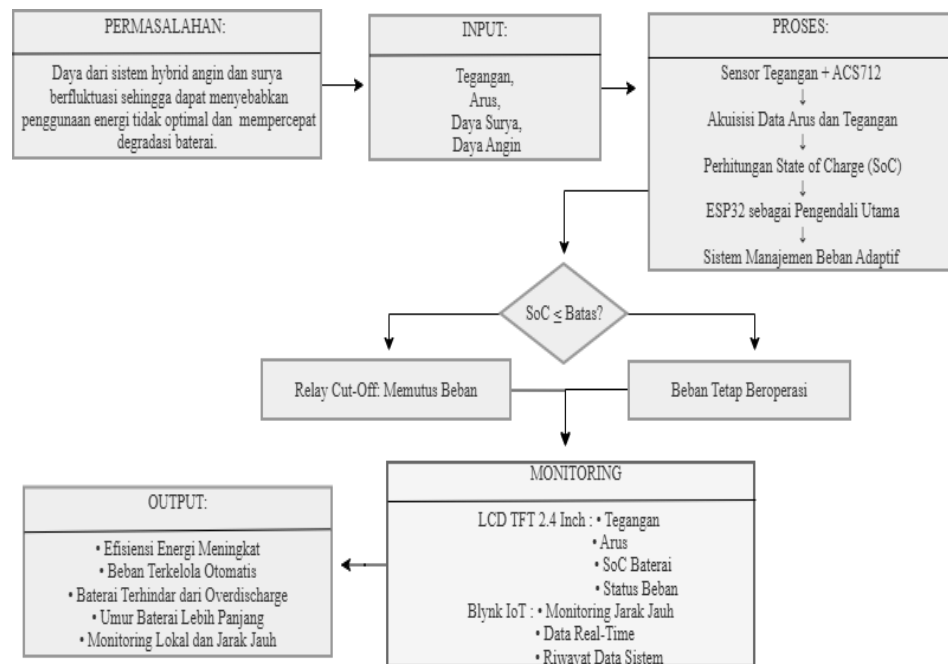
No	Nama Penelitian	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Perbedaan dengan Penelitian Skripsi ini
4.	Handoko Rusiana Iskandar, Clarez Bebby Elysees, Rijal Ridwanullo h, Atik Charisma, Hajiar Yuliana	Analisis Performa Baterai Jenis <i>Valve Regulated Lead Acid</i> pada PLTS <i>Off-Grid</i> 1 Kwp	Menghasilkan DoD ideal 60% (SoC 40%) dengan 1.000 siklus, dibandingkan DoD 80% (700 siklus) dan DoD 20% (1.600 siklus), dengan penyusutan efisiensi 2,4% per tahun (Iskandar dkk. 2021)	Penelitian ini diterapkan pada skala <i>prototype</i> sistem hybrid angin dan surya menggunakan baterai aki 12 V dengan cut-off beban otomatis berbasis SoC 40%, sedangkan (Iskandar dkk. 2021) berfokus pada analisis simulasi performa baterai VRLA pada PLTS off-grid 1 kWp tanpa mekanisme kontrol otomatis.

C. Kerangka Berpikir

Sistem *hybrid* angin dan surya merupakan salah satu solusi energi terbarukan yang memanfaatkan dua sumber energi secara bersamaan. Namun, daya yang dihasilkan cenderung tidak stabil karena dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari dan kecepatan angin yang berubah-ubah. Kondisi ini dapat menyebabkan ketidakseimbangan antara energi yang tersedia dan kebutuhan beban. Untuk menjaga kontinuitas suplai energi, digunakan baterai sebagai media penyimpanan dan penyuplai daya saat produksi energi menurun. Akan tetapi, penggunaan baterai yang tidak terkontrol dapat mempercepat penurunan kapasitas dan umur pakainya.

Permasalahan tersebut dapat diatasi dengan menerapkan sistem manajemen beban adaptif yang mampu mengelola penggunaan energi secara cerdas dan fleksibel. Sistem ini memonitor tegangan, arus, dan *State of Charge* (SoC) baterai menggunakan ESP32, sensor ACS712, sensor tegangan, dan LCD TFT. Data yang diperoleh digunakan untuk mengatur prioritas beban berdasarkan kondisi SoC baterai dan ketersediaan energi. Ketika nilai SoC berada di bawah batas yang ditentukan, sistem akan melakukan *cut-off* beban secara otomatis untuk mencegah pengosongan baterai berlebih. Penerapan sistem ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi penggunaan energi sekaligus memperpanjang umur pakai baterai pada sistem *hybrid* angin dan surya.

Kerangka berpikir pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 2. 16 Kerangka berpikir