

ANALISIS SIMULASI PENGGUNAAN MPPT PADA PROSES PENGISIAN BATERAI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU DENGAN MATLAB SIMULINK

Rivan Bagas Satria¹, Kartiko Ardi Widodo², Irrine Budi Sulistiawati³

Teknik Elektro S1, Institut Teknologi Nasional, Malang Indonesia

¹rivanbagas24@gmail.com, ²tiko_@lecturer.itn.ac.id, ³irrine@lecturer.itn.ac.id

Abstrak— Kebutuhan energi terbarukan semakin meningkat seiring dengan kesadaran terhadap dampak negatif penggunaan bahan bakar fosil. Salah satu solusi potensial adalah Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), yang memanfaatkan energi angin untuk menghasilkan listrik secara ramah lingkungan. Namun, fluktuasi kecepatan angin mengakibatkan tegangan dan arus keluaran yang tidak stabil. Oleh karena itu, penelitian ini mengimplementasikan metode *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) untuk mengoptimalkan pengisian daya ke baterai dalam sistem PLTB. Penelitian dilakukan dengan pendekatan eksperimental melalui pengambilan data langsung di wilayah perbukitan serta simulasi menggunakan MATLAB Simulink. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa sistem mulai menghasilkan listrik pada kecepatan angin 3 m/s dan mencapai efisiensi tertinggi pada kecepatan di atas 7 m/s. Sistem MPPT terbukti mampu menstabilkan output daya dan meningkatkan efisiensi pengisian baterai hingga tegangan keluaran mencapai nilai optimal sebesar 24V, baik secara simulasi maupun pengujian lapangan. Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi PLTB dan MPPT sangat efektif untuk daerah terpencil, serta dapat menjadi solusi energi mandiri yang andal dan ramah lingkungan.

Kata kunci: Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), *Maximum Power Point Tracking*, Energi Terbarukan, simulasi MATLAB Simulink, Pengisian Baterai.

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Kebutuhan akan sumber energi terbarukan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya kesadaran akan dampak lingkungan dari penggunaan bahan bakar fosil. Salah satu sumber energi terbarukan yang banyak dikembangkan adalah energi angin yang dimanfaatkan dalam Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Energi listrik merupakan kebutuhan vital bagi masyarakat dan merupakan sumber daya yang paling ekonomis yang dapat digunakan dalam berbagai macam kegiatan. Bahan bakar fosil yang saat ini digunakan

sebagai komponen utama pembangkit listrik semakin terbatas, belum lagi polusi yang diakibatkan dalam pengkonversi bahan bakar fosil menjadi listrik. Untuk itu sangat dibutuhkan sumber energi alternatif yang berpotensi menghasilkan energi listrik yang ramah lingkungan dalam prosesnya. Salah satu solusi untuk berkurangnya dampak negatif yang terjadi di lingkungan adalah dengan memanfaatkan energi yang terbarukan. Energi yang terbarukan ialah energi yang dapat diperbarui dan dapat digunakan secara terus menerus dengan pemanfaatan yang bersumber dari alam seperti matahari, pemanfaatan air terjun, dan angin. Energi Angin di Indonesia pemanfaatannya masih bisa dikatakan rendah untuk pemanfaatan energi terbarukan. Pasalnya rata-rata kecepatan angin di wilayah Indonesia masih tergolong rendah, berkisar antara 3 m/s hingga 4 m/s, sehingga pemanfaatan untuk skala besar masih tergolong sulit. Untuk mendapatkan angin yang besar untuk pemanfaatan skala besar hanya bisa dilakukan di daerah tertentu seperti pantai, pegunungan, dan wilayah dataran tinggi [1].

Data dari Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Pada bulan Maret 2023, arah angin dominan bertiup dari arah barat. Kecepatan angin maksimum didominasi dari arah barat. Kecepatan angin maksimum tertinggi sebesar 14.7 knots atau 27 km/jam berhembus dari barat kecepatan angin rata-rata sebesar 1.9 knots atau 3.5 km/jam. Memanfaatkan angin di tempat tersebut merupakan salah satu alternatif untuk menghasilkan energi listrik yang ramah lingkungan dan dapat dimanfaatkan secara efektif [2].

Indonesia salah satu negara kepulauan dan negara yang terlatak di garis khatulistiwa merupakan faktor, bahwa Indonesia memiliki potensi energi angin yang melimpah yang menjadikan PLTB cocok untuk di gunakan di Indonesia [3].

Maximum Power Point Tracking (MPPT) merupakan perangkat sistem di fungsikan pada *charge control* yang dapat menghasilkan nilai daya tegangan yang dikeluarkan. *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) dapat mengubah tegangan DC yang tingkatannya besar ke tingkatan yang lebih

kecil atau sebaliknya sebagai pengisian baterai. Maka MPPT lebih bisa mengisi baterai pada iklim yang ada di Indonesia, dikarenakan pada MPPT bisa memanfaatkan kelebihan tegangan yang dikonversi menjadi arus yang besar ke baterai[4]. [Pada tahun 2016, Hidayatullah dan Ningrum] membahas masalah peningkatan efisiensi rasio daya keluaran pembangkit listrik tenaga angin. Pembangkit listrik tenaga angin memiliki efisiensi daya yang rendah, sehingga hanya sekitar 30% hingga 40% energi angin yang dapat diolah. Metode yang digunakan adalah *Maximum Power Point Tracker* (MPPT). MPPT merupakan salah satu metode untuk mengoptimalkan daya keluaran pembangkit listrik tenaga angin. MPPT dapat digunakan untuk mengoptimalkan daya yang keluar dari genset. Selain itu, fungsi MPPT dapat digunakan untuk mengontrol daya berlebih ketika kecepatan angin melebihi beban pada turbin angin. Hasil dari metode MPPT ini adalah sistem ini dapat meningkatkan efisiensi daya keluaran. Rasio daya keluaran lebih tinggi menggunakan MPPT.

Pada penelitian ini baterai merupakan salah satu komponen yang paling penting karena digunakan untuk menyimpan daya yang dihasilkan dari PLTB. Baterai adalah untuk menyimpan energi dalam bentuk muatan listrik, hal ini dibutuhkan karena kondisi angin yang tidak stabil sehingga tegangan yang dikeluarkan juga tidak stabil. Pada kondisi ini, energi yang dihasilkan tidak dapat digunakan untuk menghidupkan beban. Dengan alasan tersebut, baterai dibutuhkan agar ketersediaan energi tetap ada [5].

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan hasil tegangan dan arus pada pengambilan data secara langsung dengan simulasi matlab dari PLTB dan MPPT dengan menyimulasikan hasil data yang diperoleh dari PLTB untuk mendapatkan data akurat mengenai respons sistem dalam berbagai kondisi kecepatan angin. Penulis membuat pemodelan sekaligus memvalidasikan dari model Pembangkit Listrik Tenaga Bayu studi kasus di wilayah perkebunan dengan menggunakan *software* MATLAB Simulink.

II. KAJIAN PUSTAKA

A. Penelitian Terdahulu

Berkurangnya efisiensi daya yang dihasilkan pada suatu sistem turbin ketika terjadi perubahan pada beban atau kecepatan angin, mengakibatkan sistem turbin menghasilkan daya yang tidak maksimal. Agar sistem turbin mampu menghasilkan daya yang maksimal maka perlu dilakukan optimasi, salah satunya menggunakan MPPT. Terdapat berbagai metode yang digunakan dalam MPPT agar dapat mendapatkan titik daya maksimum pada suatu sistem turbin.

Pada penelitian Musthafa, R.D tentang studi tentang turbin angin sistem mandiri (stand-alone) membahas mengenai pemodelan terhadap pelacakan titik daya maksimum dengan menggunakan MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) dengan metode *gradient approximation*. Metode tersebut bekerja dengan mengukur tegangan dan arus pada beban, kemudian merubah besar *duty cycle* pada dc-dc konverter untuk mendapatkan daya maksimal. Untuk mendapatkan tegangan *output* AC dipergunakan *single phase full bridge*

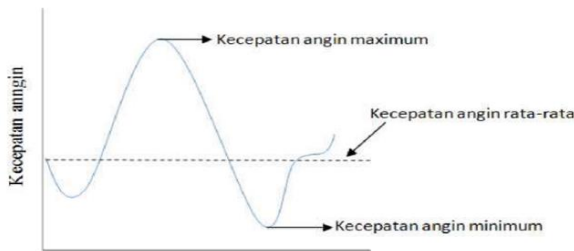
inverter. Dari hasil simulasi menunjukkan perbandingan daya rata-rata tanpa MPPT dengan daya maksimum = 79.408% dan perbandingan daya rata-rata menggunakan MPPT dengan daya maksimum = 94.5%. Dapat disimpulkan bahwa turbin angin yang menggunakan MPPT memiliki daya rata-rata yang lebih besar daripada tidak menggunakan MPPT.

Pada Penelitian Effendy, M ada beberapa cara untuk meningkatkan kapasitas daya listrik Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) misalnya dengan menambah jumlah pembangkit, namun cara ini cukup mahal, karena harus membangun pembangkit baru. Cara lain yaitu dengan meningkatkan efisiensi daya keluaran listrik pembangkit listrik tenaga bayu yang sudah ada. Salah satu cara adalah menggunakan teknologi *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Dimana teknologi ini mampu menaikkan keluaran daya listrik generator pada saat terjadi perubahan laju angin. Dalam Penelitian ini, teknologi MPPT bertugas mengatur tegangan keluaran generator melalui rangkaian DC-DC Converter jenis Cuk Converter, dimana teknik pensaklarannya menggunakan PWM (Pulse Width 4 Modulation) dengan mengatur besarnya *duty cycle*. Perubahan nilai *duty cycle* tergantung dari besar kecilnya laju angin, sehingga untuk mengatur nilai *duty cycle* dan mempercepat respon pensaklaran control PWM digunakan sebuah algoritma modern yaitu *Fuzzy Logic Controller* (FLC). Hasil penelitian menunjukkan bahwa, dengan teknologi MPPT berbasis FLC mampu meningkatkan prosentasi efisiensi daya keluaran PLTB dari 45.5% menjadi 87%. Penelitian robyo ardiles pakpahan yang berjudul Optimasi daya maksimum *Offshore Wind Turbine* Dengan MPPT *Perturb And Observe* membahas potensi tenaga angin yang besar. Pulau Nias merupakan salah satu pulau yang sebagian besar pembangkitnya masih menggunakan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD). Pemanfaatan *wind turbine* dengan MPPT di pesisir pantai Nias Timur mampu menghasilkan daya listrik secara optimal sebesar 1100 Watt saat kecepatan angin rata-rata 7.8 m/s. MPPT berbasis metode *Perturb and Observe* (P&O) diterapkan untuk melacak titik daya maksimum dari *wind turbine* dengan waktu tempuh yang lebih singkat. Pada Tugas Akhir ini menggunakan simulasi MATLAB untuk memodelkan dan mengendalikan daya keluaran dari *wind turbine* yang terhubung dengan *boost converter*. Dari hasil simulasi pada kecepatan angin rata rata, MPPT mampu meningkatkan kecepatan putaran rotor *wind turbine* dengan rata-rata kenaikan sebesar 0.96 rad/s serta daya keluaran menjadi maksimum dengan rata-rata kenaikan sebesar 7.22 %. Rata-rata waktu tempuh titik maksimum oleh MPPT juga lebih singkat yakni 0.67 s dibandingkan tanpa adanya MPPT sebesar 0.84 s[6].

B. Energi Angin

Energi angin merupakan sumber energi terbarukan yang berlimpah serta tidak menghasilkan polusi atau meningkatkan gas rumah kaca. Angin yang bergerak terjadi karena perbedaan suhu tidak merata oleh matahari terhadap permukaan bumi. Angin akan bertiup dari wilayah yang bertekanan udara lebih tinggi menuju ke wilayah yang bertekanan udara lebih rendah. Perbedaan tekanan udara disebabkan oleh perbedaan suhu udara akibat persamaan

atmosfir yang tidak merata oleh sinar matahari. Gerakan udara tersebut menimbulkan adanya energi 5 kinetik yang bisa dimanfaatkan menjadi energi mekanik dan energi listrik. Aliran angin bisa diilustrasikan sesuai Gambar 1.



Gambar 2. 1 Ilustrasi laju angin (Pakpahan,2016)

Gambar 1. Ilustrasi Laju Angin

Pada gambar 1 menunjukkan ilustrasi laju kecepatan angin yang berfluktuasi terhadap waktu. Terlihat bahwa kecepatan angin tidak selalu konstan, melainkan berubah-ubah dari nilai terendah (kecepatan minimum) hingga nilai tertinggi (kecepatan maksimum).

Tabel 1. Skala dan klasifikasi kecepatan angin

Klas	Sebutan	Indikator	V(m/s)
0	Hening	Asap bergerak vertical	0
1	Udara ringan	Arahnya ditunjukkan oleh Gerak asap	1
2	Tiupan ringan	Terasa di wajah, daun-daunan berdesir	2-3
3	Tiupan sopan	Daun,bendera, ranting kecil bergerak	4-5
4	Tiupan sedang	Debu dan potongan kertas berterbangan, dahan kecil bergerak	6-8
5	Tiupan segar	Pohon-pohon kecil bergoyang	9-11
6	Tiupan kuat	Dahan besar ber-goyang, kawat bersiu	12-14
7	Sedikit ribut	Seluruh pohon bergerak, orang berjalan agak terhalang	15-17
8	Ribut	Ranting pohon patah, berjalan sulit	18-20
9	Sangat ribut	Struktur ringan mulai rusak	21-24
10	Topan badai	Pohon tercabut sampai akarya, beberapa bangunan runtuh	>24

Pada Tabel 1 menunjukkan skala dan klasifikasi kecepatan angin berdasarkan berbagai tingkat kecepatan dan istilah atau sebutan yang menyertainya. Istilah atau sebutan tersebut lebih sebagai indikator atas besarnya kecepatan angin yang terjadi[7].

C. Turbin Angin

Turbin angin adalah sistem konversi energi untuk menghasilkan energi listrik dengan proses pengubahan energi angin menjadi putaran mekanis rotor. Dan selanjutnya menjadi energi listrik melalui sebuah generator. Sistem konversi energi angin ini merupakan suatu sistem/peralatan

yang berfungsi untuk mengubah energi angin menjadi energi listrik, mekanis, atau bentuk energi lainnya. Turbin angin mengambil energi angin dengan menurunkan kecepatannya. Untuk bisa mencapai 100% efisien, maka sebuah turbin angin harus menahan 100% kecepatan angin yang ada, dan rotor harus terbuat dari piringan solid dan tidak berputar sama sekali, yang artinya tidak ada energi kinetik yang akan dikonversi. Ada banyak tipe dari turbin angin menurut bentuknya. Antara lain jenis *propeller*, *darrieus*, *sailwing*, *fan type*, *savious*, tipe vertikal dan horizontal [8]. persamaan untuk menghitung daya (P) yang dihasilkan oleh angin, yang sering digunakan dalam konteks turbin angin. Dalam rumus (1)[9]:

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \tag{1}$$

Dimana:

P : adalah daya (dalam watt).

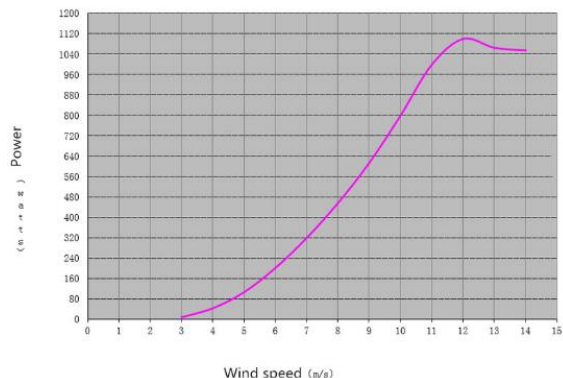
ρ : (rho) adalah massa jenis udara (dalam kg/m³).

A : adalah luas area sapuan (area yang disapu oleh bilah turbin) dalam meter persegi (m²).

v : adalah kecepatan angin (dalam meter per detik).

D. Karakteristik Turbin Angin

Karateristik dari tubrin angin dapat dilihat dari kurva hubungan antara kecepatan rotor (ω_r) dengan daya yang dihasilkan (ω_r -P) dan kurva hubungan kecepatan angin dengan daya. kurva hubungan kecepatan angin dengan daya. Berdasarkan gambar 2 dapat dilihat bahwa daya maksimal yang dihasilkan setiap kecepatan angin berbeda. Daya yang ditangkap oleh turbin angin Pm adalah fungsi dari bentuk dari baling-baling, *pitch angle*, diameter baling-baling dan kecepatan rotasi motor.



Gambar 2. Karakteristik Turbin Angin

Berdasarkan gambar 2 menunjukkan kurva daya turbin angin 1000 W yang menggambarkan hubungan antara kecepatan angin (m/s) dan daya keluaran turbin (W). Pada grafik terlihat bahwa turbin mulai menghasilkan daya pada kecepatan angin sekitar 3 m/s (cut-in speed). Setelah itu, daya meningkat seiring bertambahnya kecepatan angin.

Kenaikan daya terjadi secara eksponensial pada rentang kecepatan angin 3–9 m/s, yang menunjukkan bahwa energi kinetik angin dimanfaatkan secara efektif oleh turbin. Pada kecepatan 12,5 m/s, daya keluaran mencapai titik maksimum 1050 W, sesuai dengan kapasitas nominal turbin. Dengan demikian, karakteristik turbin ini menunjukkan: *Cut-in speed*: 3 m/s

Rated speed: sekitar 11–12 m/s, daya maksimum 1050 W
Cut-out speed: 12,5 m/s

E. Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) adalah pembangkit yang memanfaatkan tenaga angin untuk menghasilkan energi listrik (Arifin, Suyanto, Aziz, & Elektro, 2018). Lebih lanjut, PLTB adalah pembangkit listrik yang dapat mengkonversi energi angin menjadi energi listrik. Energi angin memutar turbin angin/ kincir angin dan menyebabkan berputarnya rotor generator sehingga dapat menghasilkan energi listrik. Prinsip kerja PLTB adalah dengan memanfaatkan energi kinetik angin yang masuk ke dalam area efektif turbin untuk memutar baling-baling atau kincir angin, kemudian energi putar ini diteruskan ke generator untuk membangkitkan energi Listrik[9].



Gambar 3. Pembangkit Listrik Tenaga Bayu

Pada gambar 3 merupakan sebuah turbin angin yang digunakan pada pengukuran pengambilan data lapangan. Turbin angin ini terdiri dari bilah (blade) yang berfungsi menangkap energi kinetik angin, serta ekor (tail) untuk menjaga arah turbin agar selalu menghadap ke arah datangnya angin.

F. Generator

Generator merupakan pengubah energi mekanik menjadi energi listrik (Adam, dkk, 2019)[10]. Prinsip kerjanya seperti hukum faraday, apabila pada penghantar diputar di dalamnya sebuah medan magnet hingga terjadi perpotongan garis-garis gaya magnet, pada ujungnya timbulah garis gaya listrik (ggl) dengan satuan volt[11]. Prinsip dasar kerja turbin angin adalah merubah energi kinetik dari angin menjadi energi putar pada kincir, lalu putaran kincir digunakan untuk memutar generator, yang akhirnya menghasilkan Listrik. Untuk aplikasi daya yang besar menggunakan generator sinkron, generator sinkron menghasilkan menggunakan eksitasi diciptakan rotor. Ada beberapa jenis generator yang digunakan pada pembangkit listrik tenaga angin, yaitu generator induksi rotor sangkar (squirrel cage induction generator (SCIG)), generator induksi rotor lilit (wound rotor induction generator (WRIG)) atau disebut juga dengan *doubly fed induction generator* (DFIG), generator sinkron magnet permanen (permanent magnet synchronous generator (PMSG)), dan generator sinkron rotor lilit (wound rotor synchronous generator (WRSG)). Rumus generator bisa dihitung dengan persamaan (2)[12].

$$P_g = V_g \cdot I_g \quad (2)$$

Dimana :

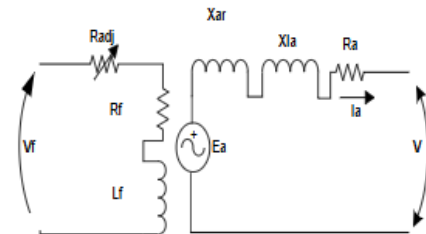
P_g = Daya Generator (W),

V_g = Tegangan Generator (V),

I_g = Arus Generator (A).

• Generator Sinkron Magnet Permanen

Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) adalah generator yang medan eksitasinya dihasilkan oleh magnet permanen bukan kumparan sehingga fluks magnetik dihasilkan oleh medan magnet permanen. Jenis generator ini adalah salah satu jenis generator yang memiliki tingkat efisiensi tinggi karena tidak ada rugi – rugi eksitasi yang dihasilkan sehingga cocok digunakan untuk sumber energi terbarukan seperti air, angin, gelombang laut dan lain-lain.



Gambar 4. Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron

Berdasarkan gambar 4 menjelaskan bahwa generator sinkron bekerja dengan memberikan arus eksitasi pada medan, sehingga menghasilkan tegangan induksi E_a . Tegangan ini kemudian disalurkan melalui rangkaian jangkar, yang dipengaruhi oleh tahanan dan reaktansi, hingga akhirnya menghasilkan tegangan keluaran V pada terminal generator.

Dimana:

R_1 = Resistansi stator

X_1 = Reaktansi bocor stator

R_2 = Resistansi rotor

X_2 = Reaktansi bocor rotor

R_c = Resistansi rugi-rugi inti

X_m = Reaktansi *magnetic*

K = Bus

P_m = Daya yang dikirimkan oleh turbin angin

• Sistem Eksitasi pada Generator Sinkron

Sistem eksitasi merupakan sistem kelistrikan DC yang mempunyai efek siklik yang menggerakkan generator untuk menghasilkan arus dan tegangan keluaran tergantung besarnya arus eksitasi [10]. Mengontrol sistem eksitasi menghasilkan tegangan yang menciptakan EMF (gaya gerak listrik). Oleh karena itu, tujuan pengendalian tidak hanya untuk mengendalikan faktor daya, penyearah arus dan variabel lainnya. Fungsi dasar dari setiap sistem eksitasi adalah untuk menghasilkan arus searah (DC) untuk belitan medan generator sinkron. Meskipun sistem simulasi arus searah masih digunakan, sistem eksitasi biasanya berjenis arus bolak-balik (AC). Oleh karena itu, perlu dilakukan konversi Keluaran sistem eksitasi adalah dari AC ke DC sehingga dapat digunakan sebagai arus medan generator utama. Selain itu, sistem eksitasi juga memiliki fungsi mengatur arus eksitasi

DC secara otomatis untuk mengontrol tingkat eksitasi. generator alat pacu jantung [11]. Persamaan eksitasi generator sinkron yang mengontrol besar kecilnya medan eksitasi yang diterapkan pada medan generator bisa menggunakan persamaan (3)

$$f = \frac{np}{120} \quad (3)$$

dimana:

f = frekuensi(Hz)

p = jumlah kutub

n = kecepatan putaran rotor (RPM)

G. Penyearah 3 fasa

Penyearah tiga fasa tak terkontrol adalah suatu converter elektronika daya yang mengubah tegangan AC tiga fasa menjadi tegangan DC [8]. Rangkaian ini mempunyai sifat bahwa diode dengan nomor ganjil akan konduksi bila tegangan anodanya mempunyai harga yang paling tinggi dibandingkan dengan tegangan anoda dari komponen-komponen dengan nomor ganjil yang lain. Tegangan keluaran dari penyearah tiga fasa dapat dicari dengan persamaan (4)[2].

$$V_{rms} = 16654 \text{ Vm} \quad (4)$$

Dimana:

V_{rms} = Tegangan rms Keluaran (V)

V_m = Tegangan Puncak Input (V)

Pada penelitian ini juga menggunakan penyearah 3 fasa gelombang penuh untuk mengubah tegangan AC menjadi tegangan DC. Perhitungan perancangan penyearah dilakukan dengan menggunakan persamaan (5) [6].

Perhitungan VDC

$$\begin{aligned} V_{dc} &= \frac{2}{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{6}} \sqrt{3} x V_m \cos \omega t d(\omega t) \\ &= \frac{3\sqrt{3}}{\pi} x V_m = 1,654 x V_m \\ V_m &= V_{L-L \text{ peak}} : \sqrt{3} \\ V_{L-L \text{ peak}} &= V_{L-L \text{ RMS}} x \sqrt{2} \end{aligned} \quad (5)$$

Dimana :

V_{dc} = tegangan DC rata-rata (V)

V_m = tegangan maksimum line to neutral (V)

$V_{L-L \text{ peak}}$ = tegangan puncak line to line (V)

$V_{L-L \text{ RMS}}$ = tegangan rms line to line (V)

H. Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Pengontrol pengisian (charge controller) berfungsi untuk Charger Controller berfungsi untuk mengontrol arus yang masuk dan keluar dari baterai, mengamankan baterai dari *overcharging* dan *over discharge* yang dapat membuat umur baterai lebih pendek [14]. Proses pengisian ini berlangsung otomatis (smart charging) selama Energi Terbarukan menerima cukup daya. Fungsi lain dari pengontrol pengisian adalah melindungi baterai dari arus berlebih selama proses pengisian. Hal ini penting untuk mencegah kerusakan pada baterai akibat arus berlebih. Dengan perlindungan ini, usia

pakai baterai dapat diperpanjang. Pengontrol pengisian beroperasi secara otomatis, mengatur aliran ke baterai dan sebaliknya sesuai dengan kondisi terisi baterai dan ketersediaan energi pembangkit. Efisiensi *tracking* yang dihasilkan MPPT dapat dihitung menggunakan Persamaan (6)[15].

$$\eta = \frac{p_o}{p_{max}} \times 100\% \quad (6)$$

Dimana:

η = efisiensi *tracking*

P_o = daya keluaran yang terlacak

P_{max} = daya maksimum sebenarnya



Gambar 5. Maximum Power Point Tracking

Pada gambar 5 merupakan Solar Charge Control jenis Maximum Power Point Tracking (MPPT) Hybrid adalah teknologi pengatur daya yang digunakan pada sistem energi terbarukan, khususnya ketika terdapat lebih dari satu sumber energi, seperti panel surya (PLTS) dan pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB). MPPT hybrid berfungsi untuk menyesuaikan tegangan dan arus dari masing-masing sumber agar selalu bekerja pada titik daya maksimum.

I. Battery

Baterai adalah kumpulan dari beberapa sel listrik yang digunakan untuk menyimpan energi kimia untuk selanjutnya diubah menjadi energi listrik. Sel listrik terdiri dari elektroda dan elektrolit, dimana elektroda positif adalah katoda dan elektroda negatif adalah anoda. Kapasitas baterai dapat dinyatakan dengan persamaan (7)[16]:

$$Ah = I \times t \quad (7)$$

Dimana:

Ah = kapasitas baterai aki

I = kuat arus (ampere)

t = waktu (jam/sekon)

Efisiensi baterai didapat dari membandingkan daya yang dibutuhkan saat pengosongan dan dayang yang masuk saat pengisian. Perhitungan efisiensi baterai sesuai dengan persamaan (8)[17]:

$$\eta = \frac{p_o}{p_i} \times 100\% \quad (8)$$

Dimana:

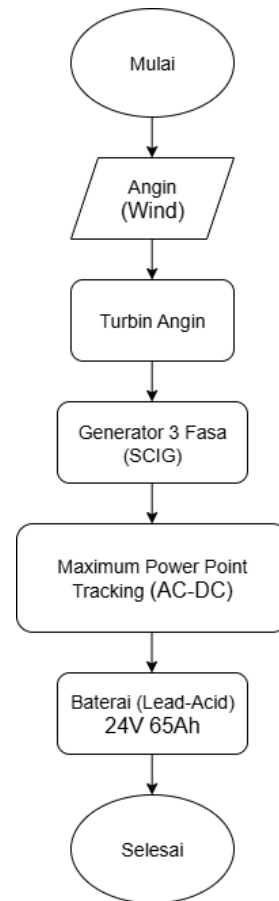
η = efisiensi
 P_o = daya keluar
 P_i = daya masuk

III. METODOLOGI PENELITIAN

Bagian ini akan membahas mengenai perancangan alat dan metodologi penelitian yang digunakan oleh penulis. Alasan menggunakan sistem off-grid pada perancangan sistem dan PLTB di daerah perbukitan adalah:

1. Lokasi terpencil dan sulit dijangkau jaringan listrik utama.
2. Kebutuhan energi listrik skala rumah tangga yang relatif kecil.
3. Potensi sumber energi terbarukan yang melimpah di daerah perbukitan.
4. Memberikan kemandirian dan keandalan pasokan energi.
5. Fleksibilitas dan skalabilitas sesuai kebutuhan.
6. Ramah lingkungan dengan memanfaatkan energi terbarukan.

A. Flowchart Alur Sistem



Gambar 6. Flowchart Alur Sistem

Untuk penjelasan gambar 6 algoritma *flowchart* Alur Sistem adalah sebagai berikut:

1. Mulai.
2. Sistem dimulai saat kecepatan angin cukup untuk menggerakkan turbin.
3. Turbin angin mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik rotasi pada poros utama. Energi mekanik dari turbin disalurkan ke generator 3 fasa.
4. Generator menghasilkan energi listrik dalam bentuk tegangan AC 3 fasa. Kecepatan putaran dan kecepatan angin sangat memengaruhi besar kecilnya tegangan yang dihasilkan oleh generator.
5. Tegangan AC 3 fasa yang dihasilkan oleh generator langsung masuk ke dalam MPPT *hybrid*. Di dalam MPPT *hybrid* ini, terdapat penyearah internal yang akan mengubah tegangan AC menjadi tegangan DC. Selanjutnya, MPPT akan mendeteksi dan menyesuaikan titik daya maksimum (Maximum Power Point) dari output generator agar efisiensi daya yang disalurkan ke baterai menjadi optimal. Ini dilakukan dengan mengatur *duty cycle* pada rangkaian konversi DC-DC internal.
6. Setelah MPPT menentukan titik daya maksimum dan menyesuaikan output-nya, energi DC disalurkan ke baterai 24V 65Ah. Arus pengisian ini disesuaikan agar tidak melebihi kapasitas maksimum pengisian

baterai, guna menjaga umur dan keamanan baterai. Proses ini berlangsung secara berkelanjutan selama ada suplai energi dari generator dan kapasitas baterai belum penuh.

7. Selesai

B. Alat dan Bahan

Untuk alat dan bahan penelitian yang akan diperlukan dalam sistem PLTB ini terdiri dari beberapa komponen yaitu:

Tabel 2. Alat dan Bahan Sistem

Nama Perangkat	Jenis	Jumlah
Turbin Angin (PLTB)	Horizontal	1
Maximum Power Point Tracking (MPPT)	MPPT (MARSROCK)	1
Baterai	12V 65 Ah	2
Breaking resistor	1000 W / 5 Ohm	1

Pada tabel 2 berisi tentang alat dan bahan sistem yang digunakan pada penelitian ini komponen utama yang digunakan dalam sistem pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) skala kecil. Sistem ini menggunakan satu unit turbin angin tipe *horizontal*, yang berfungsi sebagai sumber utama untuk mengubah energi angin menjadi energi listrik. Untuk mengoptimalkan daya keluaran dari turbin, sistem dilengkapi dengan satu unit MPPT (Maximum Power Point Tracking), dan juga dua buah baterai berkapasitas 65 Ah dengan tegangan 12V, yang berfungsi sebagai penyimpan energi agar listrik tetap tersedia saat angin tidak bertiup. Komponen terakhir adalah *breaking resistor* dengan spesifikasi 1000 W dan 5 Ohm.

Untuk detail spesifikasi alat dan bahan yang dipakai pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Spesifikasi Turbin Angin (Wind Turbine)

Tabel 3. Spesifikasi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu

Spesifikasi	Keterangan
Model	ATO-WT-1000M5
Rated Power	1000W
Maximum Power	1050W
Rated Voltage	12V/24V/48V
Start Up Wind Speed	2.5 m/s
Rated Wind Speed	12,5 m/s
Survival Wind Speed	40 m/s
Wheel Diameter	2.4 m
Blase Number	Reinforced Glass Fiber
Generator	Three Phase Permanent Magnet AC Generator
Magnetic Steel	NdFeB
Generator Case	Die-Casting Aluminum
Controller System	Electromagnet
Speed Regulation	Automatically Adjust Windard
Installation Flange	DN40
Gross Weight	30 kg
Top Net Weight	31 kg
Dimension	1320*395*300mm

Pada tabel 3 merupakan spesifikasi sistem PLTB yang digunakan dari turbin angin dengan model ATO-WT-

1000M5, yaitu turbin angin berkapasitas 1000 watt (1 kW). Turbin ini dirancang untuk menghasilkan listrik dari tenaga angin, dan dapat bekerja pada tegangan 12V, 24V, atau 48V. Turbin ini bisa mulai berputar saat kecepatan angin mencapai 2,5 meter per detik, dan bekerja optimal pada kecepatan angin 12,5 meter per detik.

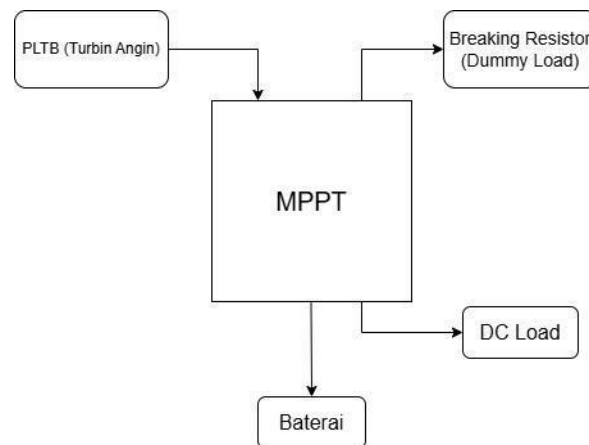
2. Spesifikasi Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Tabel 4. Spesifikasi Spesifikasi MPPT

Spesifikasi	Keterangan
System Rated Voltage	24V(18V-32VDC)
Fan rated voltage level (V)	12 , 24 & 48 (83.32 VDC)
Fan rated current	25/40 & 25/33
Wind Turbine Power (W)	<=600/<=800 & <=800/<=1000
DC load output rated current / A(LOAD1+LOAD2)	60A (Maximum one-way 30A)

Pada tabel 4 merupakan spesifikasi sistem MPPT ini memiliki tegangan kerja yang dinilai sebesar 24V dengan rentang operasional antara 18V hingga 32VDC. Sistem ini juga mendukung kipas dengan level tegangan 12V, 24V, dan 48V (hingga 83,32VDC), Untuk pembangkit listrik tenaga angin, sistem dapat menangani daya hingga 1000W. Beban keluaran DC memiliki arus maksimum total 60A, dengan arus satu arah maksimum sebesar 30A.

C. Blok Diagram



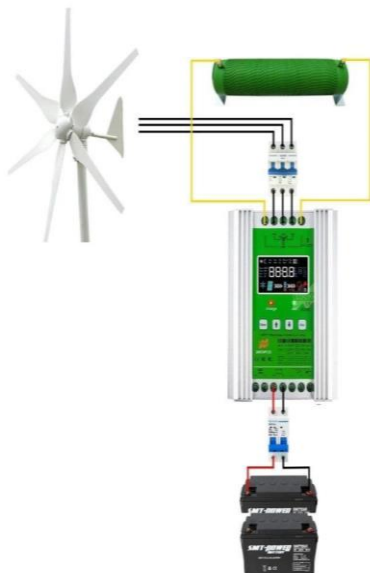
Gambar 7. Blok Diagram

Pada gambar 7 penelitian ini menggunakan jenis pembangkit yaitu pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) yang memiliki kapasitas berbeda, kemudian menggunakan solar charge controller jenis *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) untuk mengoptimalkan keluaran energi listrik yang dihasilkan oleh turbin angin dengan menyesuaikan kondisi operasinya agar selalu bekerja pada titik daya maksimum. Walaupun MPPT lebih dikenal pada sistem tenaga surya, prinsip yang sama berlaku untuk turbin angin karena keluaran daya dari turbin juga sangat bergantung pada kondisi lingkungan (terutama kecepatan angin). Karena sistem PLTB yang bersifat fluktuasi maka dibutuhkan MPPT, tanpa MPPT

turbin angin bisa menghasilkan daya yang jauh lebih rendah dari pada potensinya, terutama saat angin tidak konstan.

1. Sumber energi: Memanfaatkan energi angin yang tersedia di lokasi. Dengan komponen utama yaitu:
 - a. Turbin angin
 - b. Baterai penyimpanan
 - c. *Breaking Resistor*
 - d. *Maximum Power Point Tracking (MPPT)*
2. Pengumpulan energi menggunakan turbin angin mengonversi energi angin menjadi Listrik.
3. Penyimpanan energi listrik disimpan dalam baterai untuk digunakan saat beban sedang berjalan.
4. *Breaking Resistor* berfungsi sebagai pengereman turbin angin, Ketika angin kencang melebihi batas maka otomatis tegangan masuk ke braking resistor
5. MPPT yang fungsinya kontroler pengisian mengatur aliran listrik dari sumber ke baterai dan beban juga memiliki fungsi mengatur *breaking resistor*.
6. Sistem ini dirancang untuk memaksimalkan efisiensi dan keandalan pasokan listrik yang digunakan untuk pengisian baterai

D. Rangkaian Sistem



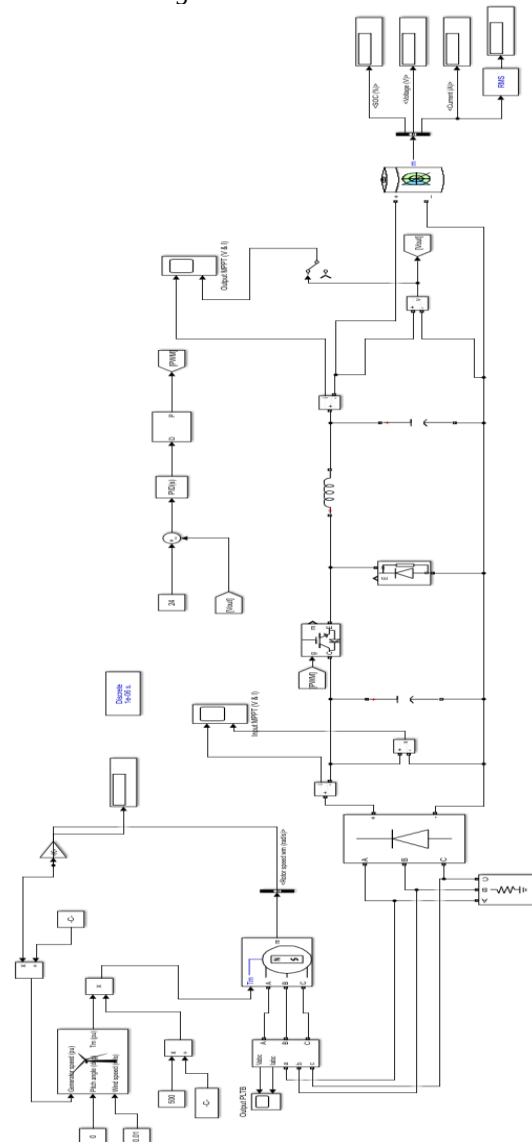
Gambar 8. Rangkaian Sistem

Berdasarkan gambar 8 rangkaian dapat dijelaskan cara merangkai komponen-komponen sistem Off-Grid Energi Terbarukan tersebut:

1. Sumber energi:
Wind Turbine Horizontal (turbin angin).
2. Pengontrol pengisian:
Perangkat pengontrol hijau yang terhubung ke jaringan.
3. Penyimpanan energi:
Baterai untuk menyimpan energi yang dihasilkan.
4. Beban:
 - a. *Dump load* (beban buang) untuk kelebihan energi.

- b. *DC load* (beban DC) langsung dari baterai.

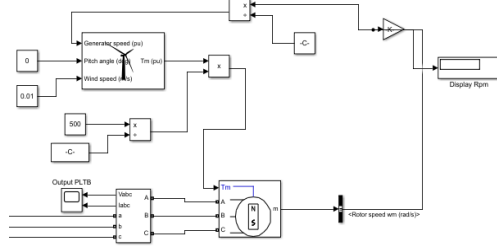
E. Desain Rangkaian Simulasi Matlab



Gambar 9. Desain Rangkaian Simulasi Matlab

Pada gambar 9 merupakan sistem Simulasi pemodelan pada PLTB lapangan. Dimulai Proses konversi energi angin menjadi energi listrik menggunakan PLTB dengan generator PMSG. Energi listrik yang dihasilkan diatur melalui penyearah, dikontrol dengan metode MPPT berbasis PI Controller, lalu disalurkan melalui SCC agar dapat mengisi baterai dengan aman. Hasil pengisian ditunjukkan dalam bentuk SOC, tegangan, dan arus pada baterai.

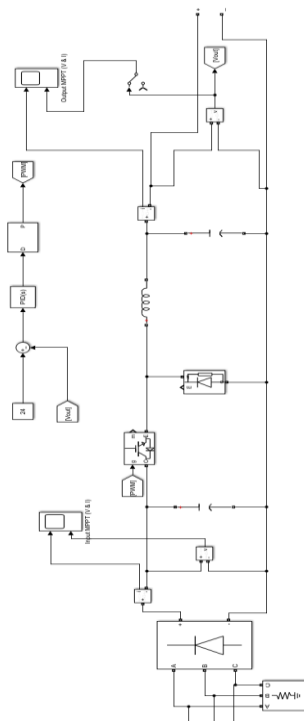
F. Desain Generator Menggunakan Matlab Simulink



Gambar 10. Desain Generator

Pada Gambar 10 menunjukkan model simulasi dari sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) menggunakan blok diagram. Sistem ini terdiri dari beberapa komponen utama seperti generator, turbin angin, dan pengatur sinyal. Input utama sistem adalah kecepatan angin, sudut *pitch*, dan kecepatan generator, yang kemudian digunakan untuk menghasilkan torsi mekanik (T_m). Torsi ini menggerakkan generator untuk menghasilkan energi listrik. Output dari generator berupa tegangan (V_{abc}) dan arus (I_{abc}) disalurkan ke *Solar Control Charge* (Maximum Power Point Tracking). Dalam sistem ini juga terdapat pemantauan kecepatan rotor (ω_m) yang berguna untuk analisis performa turbin. Model ini dapat digunakan untuk mempelajari bagaimana perubahan kecepatan angin dan pengaturan sudut *pitch* memengaruhi kinerja pembangkit listrik tenaga angin.

G. Desain MPPT Menggunakan Matlab Simulink

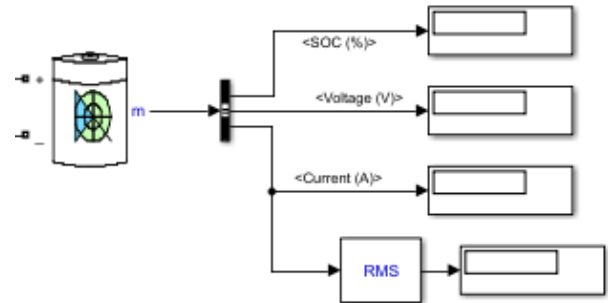


Gambar 11. Desain Maximum Power Point Tracking

Pada gambar 11 menunjukkan desain sistem MPPT (Maximum Power Point Tracking) yang digunakan untuk mengoptimalkan daya keluaran dari turbin angin. Sistem ini bekerja dengan cara menyesuaikan titik kerja agar selalu berada pada titik daya maksimum. Pada bagian atas diagram,

terlihat adanya blok kontrol yang mengatur parameter seperti tegangan dan arus, serta memproses sinyal untuk menghasilkan sinyal kendali. Sinyal ini kemudian digunakan untuk mengatur konverter daya (seperti DC-DC converter atau inverter) yang terlihat pada bagian bawah diagram. Komponen seperti penyearah, kapasitor, resistor, dan saklar daya digunakan untuk mengatur aliran energi dan menjaga kestabilan tegangan. Sistem MPPT ini sangat penting untuk meningkatkan efisiensi pembangkit listrik, terutama dalam kondisi lingkungan yang berubah-ubah seperti kecepatan angin.

H. Desain Pengisian baterai Menggunakan Matlab Simulink



Gambar 12. Desain Pengisian Baterai

Pada Gambar 12 menunjukkan model simulasi sistem pengecasan baterai yang dirancang di MATLAB Simulink. Baterai sebagai komponen utama ditampilkan di sebelah kiri, dengan koneksi positif dan negatif. Sistem ini dilengkapi dengan sensor yang memantau tiga parameter penting, yaitu *State of Charge* (SOC), tegangan (*Voltage*), dan arus (*Current*). Ketiga parameter ini dihubungkan ke tampilan output berbentuk display, yang memungkinkan pengguna untuk memantau kondisi baterai secara *real-time* selama proses pengisian. Arus keluaran baterai juga diukur nilai RMS (Root Mean Square)-nya dan ditampilkan di display. Desain ini sangat berguna dalam mengembangkan sistem manajemen baterai (Battery Management System/BMS) agar pengisian berjalan efisien dan aman, serta untuk menghindari *overcharging* atau *overdischarging*.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Teknik Pengujian

Pada penelitian ini, pengujian akan dilakukan dengan cara mengukur hasil keluaran pada sistem turbin angin dan keluaran *maximum power point tracking* menentukan dan mengukur tegangan keluaran (V) dan dengan arus (A) sesuai dengan pembacaan voltmeter. Setelah itu hasil pada pengukuran pada turbin angin dan generator akan disimulasikan pada *software* Matlab Simulink.

B. Proses Pengukuran Turbin Angin (PLTB)

1. Proses Pengukuran Turbin Angin (PLTB) Lapangan

Tabel 5. Hasil Pengukuran Output PLTB Berdasarkan Kecepatan Angin

Data Hasil Pengukuran PLTB		
Kecepatan Angin (m/s)	V PLTB	I PLTB
2,3	0	0
2,8	0	0
3,1	13,1	2,54
3,5	14,4	3,15
3,8	15,1	3,53
4,1	17,5	3,88
4,5	18,2	4,12
5,2	22,8	5,05
5,6	24,92	5,45
5,9	25,8	5,87
6,3	28,01	6,11
6,7	30	6,74
7	31,25	7,03
7,4	33,67	7,25
7,8	35,22	8,08

Pada tabel 5 berdasarkan hasil pengukuran Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), dapat dilihat hubungan antara kecepatan angin terhadap tegangan (V PLTB) dan arus (I PLTB) yang dihasilkan. Pada kecepatan angin rendah, yaitu 2,3 m/s dan 2,8 m/s, PLTB belum mampu menghasilkan tegangan maupun arus (nol). Hal ini menunjukkan bahwa turbin belum mencapai *cut-in speed*, yaitu kecepatan minimum angin yang dibutuhkan untuk mulai menghasilkan energi listrik. Ketika kecepatan angin meningkat menjadi 3,1 m/s, PLTB mulai menghasilkan tegangan sebesar 13,1 V dengan arus 2,54 A. Peningkatan kecepatan angin selanjutnya menunjukkan adanya kenaikan signifikan pada tegangan dan arus. Misalnya, pada kecepatan 4,5 m/s diperoleh tegangan 18,2 V dan arus 4,12 A, sedangkan pada kecepatan 5,9 m/s meningkat menjadi 25,8 V dan 5,87 A. Kecepatan angin tertinggi yang diukur, yaitu 7,8 m/s, di mana PLTB menghasilkan tegangan sebesar 35,22 V dengan arus 8,08 A.

C. Proses Pengukuran MPPT Lapangan

Tabel 6. Hasil Pengukuran Output MPPT Berdasarkan Kecepatan Angin

Data Hasil Pengukuran MPPT		
Kecepatan Angin (m/s)	V MPPT	I MPPT
2,3	0	0
2,8	0	0
3,1	0	0
3,5	0	0
3,8	0	0
4,1	0	0
4,5	24	0,028
5,2	24	0,043
5,6	24	0,26
5,9	24	1,86
6,3	24	3,78
6,7	24	5,87
7	24	8,43
7,4	24	00.28
7,8	24	14,98

Pada tabel 6 berdasarkan hasil pengukuran pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) yang dilengkapi dengan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), terlihat perbedaan karakteristik keluaran dibandingkan data sebelum masuk MPPT. Pada kecepatan angin rendah (2,3–4,1 m/s), sistem belum menghasilkan tegangan maupun arus, hal ini menunjukkan bahwa turbin belum mencapai *cut-in speed* dan beban MPPT belum menerima daya listrik. Mulai pada kecepatan 4,5 m/s, tegangan keluaran MPPT stabil di angka 24 V, sedangkan arus yang dihasilkan masih sangat kecil yaitu 0,028 A. Seiring peningkatan kecepatan angin, arus yang dihasilkan bertambah signifikan. Pada kecepatan 5,9 m/s arus meningkat menjadi 1,86 A, dan terus naik hingga mencapai 14,98 A pada kecepatan tertinggi yang diukur, yaitu 7,8 m/s.

D. Proses Pengukuran Turbin Angin (PLTB) Simulasi Matlab Simulink

Tabel 7. Hasil Pengukuran Output PLTB Berdasarkan Kecepatan Angin

Data Hasil Pengukuran PLTB		
Kecepatan Angin (m/s)	V PLTB	I PLTB
2,3	0	0
2,8	0	0
3,1	12,3	2,8
3,5	14,2	3,2
3,8	15,6	3,6
4,1	17	3,9
4,5	18,9	4,3
5,2	22,3	5,1
5,6	24,2	5,5
5,9	25,6	5,9
6,3	27,6	6,3
6,7	29,5	6,8
7	31	7,1
7,4	33,1	7,6
7,8	34,8	8

Pada tabel 7 berdasarkan hasil simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) menggunakan MATLAB Simulink, terlihat bahwa keluaran tegangan (V PLTB) dan arus (I PLTB) sangat dipengaruhi oleh kecepatan angin. Pada kecepatan rendah, yaitu 2,3 m/s dan 2,8 m/s, sistem tidak menghasilkan tegangan maupun arus, menandakan bahwa turbin belum mencapai *cut-in speed*. Mulai kecepatan angin 3,1 m/s, PLTB mulai menghasilkan tegangan sebesar 12,3 V dengan arus 2,8 A. Nilai ini terus meningkat seiring kenaikan kecepatan angin. Terlihat pada 4,5 m/s, tegangan yang dihasilkan adalah 18,9 V dengan arus 4,3 A, sementara pada 5,9 m/s meningkat menjadi 25,6 V dengan arus 5,9 A. Kenaikan ini berlanjut secara linier hingga kecepatan tertinggi yang disimulasikan, yaitu 7,8 m/s, di mana tegangan mencapai 34,8 V dengan arus 8 A.

E. Proses Pengukuran MPPT Simulasi Matlab Simulink

Tabel 8. Hasil Pengukuran Output MPPT Berdasarkan Kecepatan Angin

Data Hasil Pengukuran MPPT		
Kecepatan Angin (m/s)	V PLTB	I PLTB
2,3	0	0
2,8	0	0
3,1	0	0
3,5	0	0
3,8	0	0
4,1	0	0
4,5	23,57	0,003
5,2	23,57	0,0035
5,6	23,57	0,021
5,9	23,57	1,43
6,3	23,57	3,23
6,7	23,57	5,4
7	23,57	8,1
7,4	23,57	11,5
7,8	23,57	14,3

Pada tabel 8 berdasarkan hasil simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dengan penerapan Maximum Power Point Tracking (MPPT) pada MATLAB Simulink, terlihat bahwa sistem mampu menjaga tegangan keluaran pada nilai konstan sebesar 23,57 V, meskipun kecepatan angin bervariasi. Hal ini menunjukkan bahwa algoritma MPPT bekerja efektif dalam menstabilkan tegangan sesuai titik operasi optimal. Pada kecepatan angin rendah (2,3–4,1 m/s), PLTB belum menghasilkan tegangan maupun arus karena turbin belum mencapai cut-in speed. Mulai dari kecepatan 4,5 m/s, sistem mulai menghasilkan tegangan 23,57 V dengan arus yang masih kecil, yaitu 0,003 A. Seiring peningkatan kecepatan angin, arus meningkat secara signifikan. Pada kecepatan angin 5,9 m/s arus mencapai 1,43 A, pada 6,7 m/s sebesar 5,4 A, hingga pada 7,8 m/s mencapai arus maksimum 14,3 A.

F. Perbandingan Output PLTB Data Lapangan dan Simulasi Matlab Simulink

Tabel 9. Perbandingan Error Output PLTB Data Lapangan dan Simulasi Matlab Simulink

Kec Angin (m/s)	Data Output Pengukuran Lapangan		Data Output Hasil Simulasi Matlab		Persentase Error	
	PLTB (V)	PLTB (I)	PLTB (V)	PLTB (I)	V	I
2,3	0	0	0	0	0	0
2,8	0	0	0	0	0	0
3,1	12,5	2,98	12,3	2,8	1,6	1,4
3,5	14,4	3,15	14,2	3,2	1,3	-0,3
3,8	15,45	3,53	15,6	3,6	-0,9	-0,4
4,1	17,21	3,88	17	3,9	1,2	-0,1
4,5	18,66	4,45	18,9	4,3	-1,2	0,7
5,2	22,52	5,05	22,3	5,1	0,9	-0,2
5,6	24,32	5,45	24,2	5,5	0,4	-0,2
5,9	25,8	5,87	25,6	5,9	0,7	-0,1
6,3	28,01	6,11	27,6	6,3	1,4	-0,6
6,7	30	6,74	29,5	6,8	1,6	-0,2
7	31,25	7,03	31	7,1	0,8	-0,2
7,4	33,67	7,25	33,1	7,6	1,6	-1
7,8	35,21	8,08	34,8	8	1,1	0,2

Pada tabel 9 hasil perbandingan data PLTB pada pengukuran lapangan dan hasil simulasi MATLAB Simulink,

terlihat bahwa keluaran tegangan dan arus PLTB memiliki pola yang relatif sama dengan tingkat kesalahan (error) yang cukup kecil. Pada kecepatan angin rendah (2,3 m/s dan 2,8 m/s), baik pengukuran lapangan maupun simulasi tidak menghasilkan tegangan maupun arus, sehingga error bernilai nol. Mulai dari kecepatan 3,1 m/s, PLTB mulai menghasilkan tegangan sebesar 12,5 V dengan arus 2,98 A pada hasil pengukuran, sementara hasil simulasi menunjukkan 12,3 V dan 2,8 A. Persentase error pada titik ini masih kecil, yaitu 1,6% untuk tegangan dan 1,4% untuk arus. Secara umum, nilai error tegangan yang diperoleh berada pada rentang 0–1,6%, sedangkan error arus berada pada rentang 0–1,4%. Misalnya, pada kecepatan 5,9 m/s, hasil pengukuran menunjukkan tegangan 25,8 V dan arus 5,87 A, sementara hasil simulasi menunjukkan 25,6 V dan 5,9 A. Error yang dihasilkan sangat kecil, yaitu 0,7% untuk tegangan dan –0,1% untuk arus. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi sangat mendekati kondisi nyata di lapangan. Pada kecepatan tertinggi, yaitu 7,8 m/s, data pengukuran menunjukkan tegangan 35,21 V dan arus 8,08 A, sementara hasil simulasi memberikan nilai 34,8 V dan 8 A. Error yang terjadi masih kecil, yaitu 1,1% untuk tegangan dan 0,2% untuk arus.

G. Perbandingan Output MPPT Data Lapangan dan Simulasi Matlab Simulink

Tabel 10. Perbandingan Error Output MPPT Data Lapangan dan Simulasi Matlab Simulink

Kec Angin (m/s)	Data Output Pengukuran Lapangan		Data Output Hasil Simulasi Matlab		Persentase Error	
	MPPT (V)	MPPT (I)	MPPT (V)	MPPT (I)	V	I
2,3	0	0	0	0	0	0
2,8	0	0	0	0	0	0
3,1	0	0	0	0	0	0
3,5	0	0	0	0	0	0
3,8	0	0	0	0	0	0
4,1	0	0	0	0	0	0
4,5	24	0,003	23,57	0,003	1,79	-1,6
5,2	24	0,003	23,57	0,003	1,79	-0,9
5,6	24	0,02	23,57	0,020	1,79	-1
5,9	24	1,45	23,57	1,43	1,79	1,3
6,3	24	3,24	23,57	3,23	1,79	0,3
6,7	24	5,48	23,57	5,4	1,79	1,4
7	24	8,21	23,57	8,1	1,79	1,3
7,4	24	11,73	23,57	11,5	1,79	1,9
7,8	24	14,41	23,57	14,3	1,79	0,7

Berdasarkan tabel 10 data hasil pengukuran lapangan dan hasil simulasi MATLAB Simulink pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dengan penerapan Maximum Power Point Tracking (MPPT), diperoleh hasil bahwa keluaran tegangan MPPT relatif stabil baik pada pengukuran maupun simulasi, yaitu sekitar 24 V pada lapangan dan 23,57 V pada simulasi. Selisih yang terjadi hanya sekitar 1,79%, sehingga dapat dikatakan sangat akurat. Pada kecepatan angin rendah (2,3–4,1 m/s), baik pengukuran maupun simulasi tidak menunjukkan adanya keluaran tegangan maupun arus karena turbin belum mencapai cut-in speed. Mulai pada 4,5 m/s, sistem mulai menghasilkan tegangan konstan dengan arus yang masih sangat kecil, yaitu 0,003 A pada lapangan dan

0,00305 A pada simulasi. Nilai error pada titik ini pun rendah, yaitu sekitar $-1,6\%$. Seiring peningkatan kecepatan angin, arus keluaran meningkat signifikan. Misalnya, pada 5,9 m/s pengukuran lapangan menunjukkan arus 1,45 A, sedangkan simulasi menghasilkan 1,43 A, dengan error hanya $1,3\%$. Demikian pula pada 7,8 m/s, arus keluaran mencapai 14,41 A pada pengukuran dan 14,3 A pada simulasi dengan error sekitar $0,7\%$. Secara umum, error tegangan konstan sekitar $1,79\%$ di semua titik pengukuran, sementara error arus bervariasi antara $-1,6\%$ hingga $1,4\%$, namun tetap berada pada kisaran yang kecil.

H. Analisa Pengisian Baterai Pada Matlab Simulink

Hasil yang ditampilkan merupakan tampilan hasil simulasi dari sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dengan metode *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) untuk proses pengisian baterai. Output yang ditunjukkan terdiri dari empat parameter penting: *State of Charge* (SOC), tegangan (Voltage), dan arus (RMS). analisa yang didapat pada pengisian baterai sebagai berikut:

Tabel 11. Pengisian Baterai Terhadap Kecepatan Angin

No	Kecepatan Angin (m/s)	SOC % (Awal)	SOC % (Akhir)	V Baterai	STOP TIME
1	2,3	40	40	23,57	300
2	2,8	40	40	23,57	300
3	3,1	40	40	23,57	300
4	3,5	40	40	23,57	300
5	3,8	40	40	23,57	300
6	4,1	40	40	23,57	300
7	4,5	40	40	23,57	300
8	5,2	40	40	23,57	300
9	5,6	40	41	23,59	300
10	5,9	40	41	23,65	300
11	6,3	40	42,5	23,7	300
12	6,7	40	45	23,91	300
13	7	40	47,5	24,06	300
14	7,4	40	52,5	24,3	300
15	7,8	40	55	24,39	300

Berdasarkan tabel 11 hasil simulasi pengisian baterai 24V 65Ah pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) terlihat bahwa proses pengisian baterai dipengaruhi oleh variasi kecepatan angin yang menggerakkan turbin. Pada kondisi awal, *State of Charge* (SOC) baterai ditetapkan sebesar 40%. Pada kecepatan angin rendah (2,3–4,5 m/s), meskipun tegangan baterai stabil di sekitar 23,57 V, pengisian belum menunjukkan perubahan SOC, sehingga nilai SOC akhir tetap 40%. Hal ini menunjukkan bahwa daya yang dihasilkan oleh turbin belum cukup untuk menaikkan kapasitas baterai. Mulai kecepatan 5,2 m/s, terjadi peningkatan kecil pada SOC, yaitu mencapai 41% dengan tegangan baterai 23,59 V. Seiring bertambahnya kecepatan angin, proses pengisian menjadi lebih signifikan. Misalnya, pada kecepatan 6,3 m/s, SOC naik menjadi 42,5%, pada 7,0 m/s SOC meningkat hingga 47,5%, dan pada 7,4 m/s SOC mencapai 52,5%. Pada kecepatan tertinggi yang

disimulasikan, yaitu 7,8 m/s, SOC baterai meningkat hingga 55% dengan tegangan baterai mencapai 24,39 V.

V. KESIMPULAN

1. Sistem PLTB menunjukkan pola produksi energi yang dapat mengkompensasi dengan tegangan output yang bervariasi antara 10V hingga 50V pada waktu- waktu tersebut, memungkinkan pasokan listrik untuk pengisian baterai.
2. Berdasarkan hasil pengambilan data tertinggi pengukuran manual, dihasilkan pada MPPT sebesar 24V karena pada MPPT disetting 24V untuk pengisian baterai 24V 65Ah, maka tegangan yang dihasilkan pada PLTB melebihi 24V maka MPPT akan di buck menjadi 24V dan ketika dibawah 24V akan di boost pada saat MPPT mendapatkan suplay 18V – 24V dari tegangan yang dihasilkan oleh PLTB.
3. Berdasarkan hasil simulasi pengisian baterai 24V 65Ah menggunakan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dengan waktu simulasi selama 5 menit, dapat disimpulkan bahwa pada kecepatan angin rendah (2,3 – 4,1 m/s), sistem belum mampu memberikan daya pengisian yang signifikan. Tegangan dan arus pengisian masih sangat rendah ($V = 0$ V, $I = 0$ A) dan SOC masih sama 40% dari nilai awal 40%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem berada di bawah ambang batas tegangan pengisian dan belum efektif dalam mengisi baterai. Pada kecepatan angin sedang (5,6 m/s), sistem mulai menunjukkan performa pengisian. Tegangan mendekati tegangan nominal baterai (23,59 V), dan meskipun arus rata-rata hanya 0,003 A, nilai RMS arus yang lebih tinggi (3A) menunjukkan adanya aliran daya yang fluktuatif namun mulai mengisi baterai secara perlahan. SOC juga mengalami kenaikan yang signifikan dari 40% menjadi 55%.

Saran

Diharapkan penelitian selanjutnya dapat mengembangkan model simulasi yang lebih kompleks dengan mempertimbangkan faktor gangguan cuaca, variasi beban, dan efisiensi konverter secara lebih rinci agar mendekati kondisi nyata di lapangan.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Putri, R., Hasibuan, A., Ezwarsyah, E., Jannah, M., Kurniawan, R., Siregar, W. V., & Sayuti, M. S. (2022). Pembangkit Listrik Tenaga Bayu sebagai Sumber Alternatif pada Mesjid Tengku Bullah Universitas Malikussaleh. *RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi): Jurnal Teknik Elektro*, 5(1), 39-44.

- [2] Arianto, N., & Basri, M. H. (2020). Designing Maximum Power Point Tracking (MPPT) Control On Prototype Traffic Light System Using PID C. *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, 5(2), 109-118.
- [3] Basri, M. H. (2019). Rancang Bangun dan Desain Prototype Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Model Savonius. *Jurnal Simetrik*, 9(2), 208-214.
- [4] Ivannuri, F., Nugraha, A. T., & Subiyanto, L. (2022). Prototype Turbin Ventilator Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Angin. *Journal of Computer, Electronic, and Telecommunication*, 3(2).
- [5] Aditya, G., & Safril, M. (2022). Rancang Bangun Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Agin Pembaruan Menggunakan Tenaga Generator AC. *MeSTERI Journal*, 1(1), 33-40.
- [6] Kardan, M. (2022). Desain Simulasi Kontrol Maximum Power Point Tracker (MPPT) Pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin Dengan Metode Perturb And Observe (P&O).
- [7] Nurdianto, A., & Haryudo, S. I. (2020). Rancang bangun prototype pembangkit listrik tenaga angin menggunakan turbin angin savonius. *Jurnal Teknik Elektro*, 9(1).
- [8] Siagian, P., & Fahreza, F. (2020). Rekayasa Penanggulangan Fluktuasi Daya Pembangkit Listrik Tenaga Angin Dengan Vehicle To Grid (V2G). In *Seminar Nasional Teknologi Komputer & Sains (SAINTEKS)* (Vol. 1, No. 1, pp. 356-361).
- [9] Wafik, A. Z. (2023). Analisis Persepsi Masyarakat terhadap Rencana Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (Pltb) di Kecamatan Jerowaru. *Jurnal Ilmu Ekonomi*, 2(1).
- [10] Adam, M., Harahap, P., & Nasution, M. R. (2019). Analisa pengaruh perubahan kecepatan angin pada pembangkit listrik tenaga angin (PLTA) terhadap daya yang dihasilkan generator DC.
- [11] Haryanti, M., Yulianti, B., & Ningrum, N. K. (2023). Pembangkit Listrik Tenaga Angin untuk Aplikasi Mikropower menggunakan Mikroturbin Generator. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 11(1), 143.
- [12] Haikal, M. F. (2021). Prototipe Pembangkit Listrik Tenaga Angin Dengan Turbin Sumbu Horizontal Dan Analisis Efek Pembebanan Rlc.
- [13] Niko, D. (2017). Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Angin Untuk Analisis Aliran Daya. *Journal of Electrical Engineering, Energy, and Information Technology (J3EIT)*, 5(1).
- [14] Eryk, I. H., Akbar, D. N., & Giffari, A. (2023). Analysis of Dual Input Charge Controller on Hybrid Solar Photovoltaic and Picohydro Power Plant. In *Seminar Nasional Teknik Elektro* (Vol. 8, No. 1, pp. 50-55).
- [15] Al Haqq, M. R., Cholissodin, I., & Soebroto, A. A. (2021). Maximum Power Point Tracking (MPPT) pada Panel Surya dalam Kondisi Berbayang Sebagian dengan Particle Swarm Optimization (PSO). *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, 5(8), 3524-3537.
- [16] Juswan, R., Sukmadi, T., & Sinuraya, E. W. (2020). Perancangan sistem charging pada baterai purwarupa mobil listrik. *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 9(4), 644-650.
- [17] Karimah, C. N., Zain, A. T., & Nofiansyah, A. L. (2023). Analisa Baterai Sebagai Sumber Kelistrikan Kendaraan Roda Dua Ditinjau Dari Kapasitas Dan Efisiensi. *Jurnal Teknik Terapan*, 2(1), 1-11.

VII. BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Kabupaten Bojonegoro tanggal 24 Oktober 2002 dengan latar belakang pendidikan di SMKN 2 Bojonegoro pada tahun 2018 dengan mengambil jurusan Teknik Elektronika Industri dan lulus pada tahun 2021. Kemudian melanjutkan kuliah strata-1 di Institut Teknologi Nasional Malang dengan konsentrasi Energi Listrik. Penulis aktif dalam kegiatan asisten Laboratorium Transmisi dan Distribusi Daya Elektrik, Prodi Teknik Elektro S1 ITN Malang. Email Penulis yaitu: rivanbagas24@gmail.com