

ID: 17

Konversi Energi Listrik Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Sebagai Perencanaan Pembangkit Hybrid

Conversion of Electrical Energy in Solar Power Plants and Bayu Power Plants as a Hybrid Generation Planning

Deni Irwansyah¹, Welly Yandi², Wahri Sunanda³, M Yonggi Puriza⁴

^{1,2,3,4} Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Bangka Belitung
Balun Ijuk, Merawang, Kabupaten Bangka, Kepulauan Bangka Belitung 33172

Email: wellyyandi.koto@gmail.com

Abstrak – Pada pemanfaatan energi surya dan angin menjadi energi listrik masih memiliki kendala pada konversi energi yang memiliki efisiensi yang masih kecil dan sangat berpengaruh terhadap kondisi lingkungan seperti cuaca dan iklim. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan analisis konversi energi berdasarkan nilai keluaran, kinerja serta efisiensi dari PLTS dan PLTB. Pengambilan data dilakukan di lapangan parkir Fakultas Teknik (UBB) selama 3 hari sehingga didapatkan data tegangan, arus, daya, intensitas cahaya (PLTS), Kecepatan putaran turbin (PLTB) dan jumlah energi harian. Daya tertinggi yang dihasilkan PLTS sebesar 21,96 Watt pada hari jum'at (10/7) pukul 10.30 WIB dengan tegangan dan arus sebesar 18,3 Volt dan 1,2 A. Jumlah energi tertinggi yang dihasilkan sebesar 124 Wh. Kinerja rata-rata dan efisiensi PLTS sebesar 47,47 % dan 12,62 % pada penyinaran sebesar 1.000 W/m². Daya tertinggi yang dihasilkan PLTB sebesar 21,25 Watt pada hari Sabtu (11/7) pukul 15.10 WIB dengan nilai tegangan dan arus tertinggi sebesar 20,24 Volt dan 1,05 Ampere. Jumlah energi tertinggi yang dihasilkan sebesar 56 Wh. Kinerja rata-rata dan efisiensi PLTB sebesar 23,27 % dan 15,91 % pada kecepatan angin sebesar 7 m/s.

Kata Kunci: Konversi Energi, PLTS, PLTB, Kinerja, Efisiensi

Abstract – The utilization of solar and wind energy into electrical energy still has constraints on energy conversion which is still low in efficiency and greatly affects environmental conditions such as weather and climate. The purpose of this research is to analyze energy conversion based on the output value, performance, and efficiency of PLTS and PLTB. Data were collected in the parking lot of the Faculty of Engineering (UBB) for 3 days so that data on voltage, current, power, light intensity (PLTS), turbine rotation speed (PLTB), and the amount of daily energy was obtained. The highest power produced by PLTS is 21.96 Watt on Friday (10/7) at 10.30 WIB with a voltage and current of 18,3 volts and 1,2 A. The highest amount of energy produced is 124 Wh. The average performance and efficiency of PLTS is 47,47 % and 12,62 % at 1,000 W / m² irradiation. The highest power generated by PLTB is 21.25 Watts on Saturday (11/7) at 15.10 WIB with the highest voltage and current values of 20,24 volts and 1,05 amperes. The highest amount of energy produced is 56 Wh. The average performance and efficiency of PLTB are 23,27 % and 15,91 % at wind speeds of 7 m/s.

Keywords: Energy Conversion, PLTS, PLTB, Performance, Efficiency

1. Pendahuluan

Sumber energi listrik sudah berkembang pesat saat ini guna mengurangi penggunaan bahan bakar minyak yang kini mulai sedikit jumlahnya. Salah satu diantara sumber energi terbarukan yaitu; energi dari sinar matahari atau surya dan angin atau bayu. Energi surya hanya diterima oleh permukaan bumi sebesar 69 % dari total energi pancaran matahari. Sementara suplai energi surya dari matahari sebesar 69% tersebut mencapai 3 x 1.024 joule per tahun, energi ini setara dengan 2 x 1.017 Watt[1]. Jumlah energi ini setara dengan 10.000 kali konsumsi energi di seluruh dunia saat ini. Dengan kata lain, dengan menutup 0,1 persen saja permukaan bumi dengan sel surya yang memiliki efisiensi 10 persen sudah mampu untuk

menutupi kebutuhan energi diseluruh dunia saat ini[2]. Energi terbarukan yang banyak banyak dikembangkan saat ini adalah panel surya. Penggunaan cahaya matahari sebagai sumber energi sangat memungkinkan dalam pembangkitan energi listrik terutama pada daerah katulistiwa khususnya Indonesia[3]. Angin merupa-kan udara bergerak akibat adanya perbedaan tekanan. Selain itu, angin juga disebabkan perbedaan pemanasan sehingga terjadi perpindahan udara panas ke dingin. Bumi menerima daya matahari $1,74 \times 10^{17}$ watt per jam dan sekitar 1- 2 %-nya diubah menjadi energi angin. Nilai ini setara 50 - 100 kali energi matahari yang dikonversi oleh semua tumbuhan di bumi menjadi biomassa[4]. Dengan potensi tersebut sudah semestinya setiap negara didunia lebih memperhatikan pemanfaatan energi angin dan surya sebagai tambahan energi listrik bagi negaranya.

Namun dalam pengaplikasiannya kedua sumber energi ini masih memiliki kendala yaitu; konversi energi yang memiliki efisiensi yang masih kecil dan sangat berpengaruh terhadap kondisi lingkungan seperti; cuaca dan iklim. Selain itu terdapat pengaruh dari mekanik pembangkit itu sendiri. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk melakukan analisis kinerja dan efisiesi dari keluaran panel surya (PLTS) serta generator *DC* dan turbin angin (PLTB) di Laboratorium Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Bangka Belitung. Data yang didapatkan akan dijadikan referensi untuk mengembangkan pembuatan pembangkit listrik tenaga surya dan angin atau bayu dengan model *Hybrid Powerplant*. Penelitian difokuskan pada hasil keluaran dari kedua pembangkit listrik dan analisa kinerja serta efisiensi

2. Metode Penelitian

2.1. Lokasi dan Waktu Penelitian

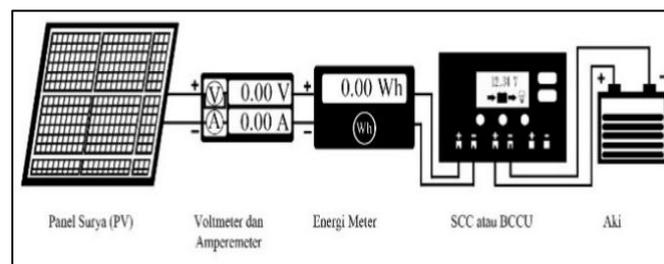
Lokasi penelitian berada di Lapangan Parkir Fakultas Teknik Universitas Bangka Belitung, Bangka, Kepulauan Bangka Belitung. Berdasarkan informasi dari aplikasi *Google Maps*. Didapatkan lokasi penelitian berada di Latitude (Lintang) : -2.070257 dan Longitude (Bujur) : 106.078567. Pengambilan data terbagi menjadi dua yaitu;

1) Pengambilan data untuk PLTS yang dilakukan dari hari Rabu tanggal 8 Juli 2020 sampai dengan Jum'at Tanggal 10 Juli 2020 diukur setiap 5 Menit sekali dari pukul 07.00-17.00 WIB (10 Jam). 2) Pengambilan data untuk PLTB yang dilakukan dari hari Sabtu tanggal 11 Juli 2020 sampai dengan hari Senin tanggal 13 Juli diukur setiap 10 Menit sekali selama 24 Jam.

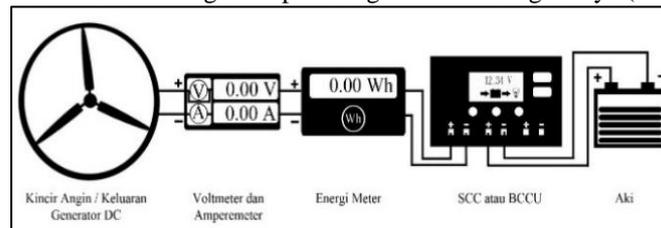
2.2. Prosedur Penelitian

Terdapat tiga model skema rangkaian yang dibuat untuk pengambilan data yaitu;

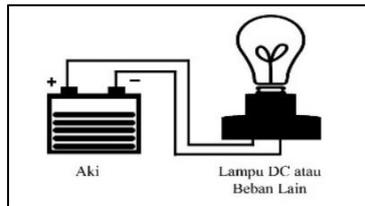
- Skema Rangkaian Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).
- Skema Rangkaian Pembangkit Listrik Tenaga Bayu atau Angin (PLTB).
- Skema Rangkaian untuk Pengosongan Aki.



Gambar 2. Skema rangkaian pembangkit listrik tenaga surya (PLTS).

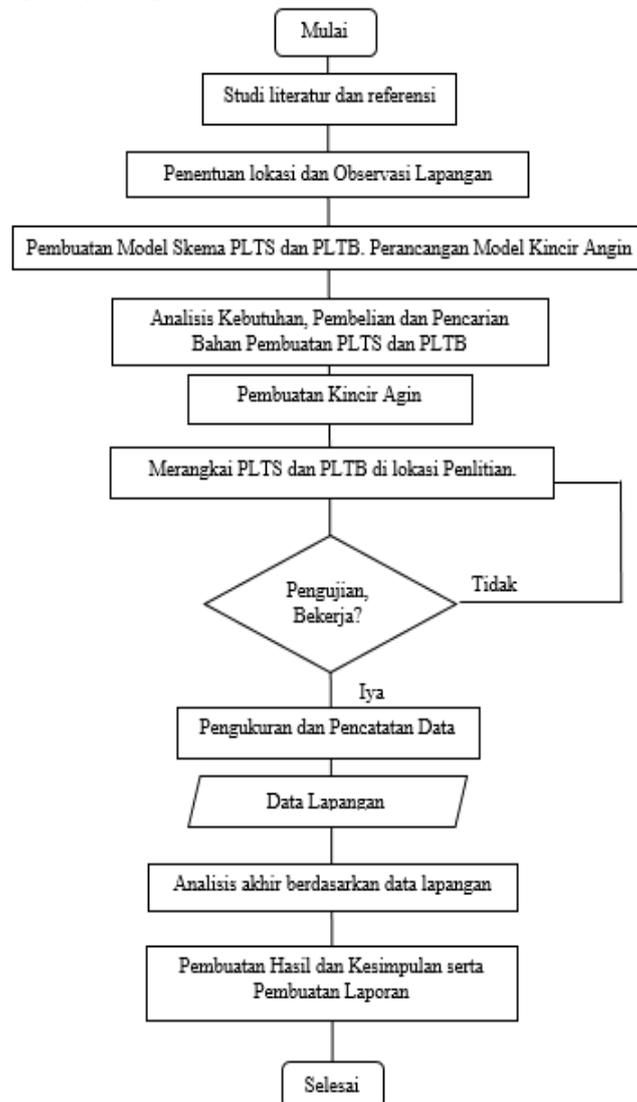


Gambar 3. Skema rangkaian pembangkit listrik tenaga bayu atau angin (PLTB).



Gambar 4. Skema rangkaian untuk pengosongan aki.

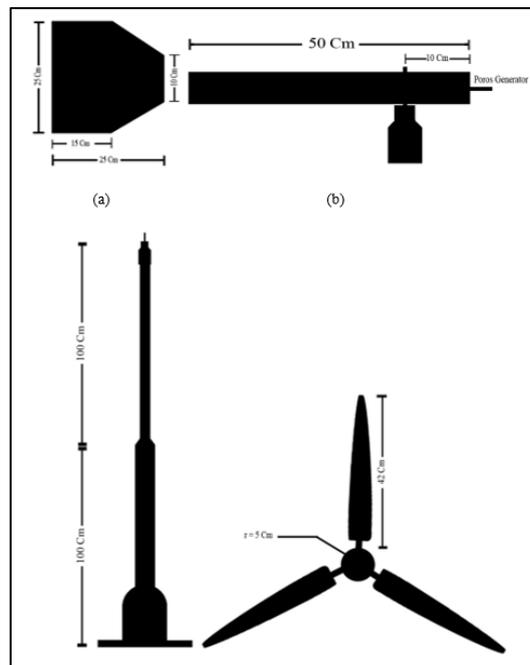
Langkah-langkah yang dilakukan oleh peneliti disajikan dalam bentuk diagram alir prosedur penelitian seperti pada gambar berikut.



Gambar 1. Diagram alir penelitian.

Pada skema pertama dan kedua terdapat kesamaan yaitu pada sistem pengontrol hanya saja berbeda pada sumber awal yaitu; bersumber dari kincir angin atau bersumber dari panel surya (PV). Adapun pada skema rangkaian untuk pengosongan aki, lampu DC dapat digantikan oleh beban DC lain. Beban tidak langsung dihubungkan dengan SCC atau kontroller melainkan digunakan sebagai beban untuk mengosongkan aki di luar rangkaian utama. Hal ini dilakukan untuk melihat perubahan tegangan input dari kincir angin dan panel surya (PV) apabila kondisi aki mendekati penuh. Terdapat 4 bagian dari kincir angin, yaitu; Ekor, Badan, Baling-baling dan Tiang. Ekor diguna-kan untuk merubah arah kincir angin agar dapat berputar sesuai dengan arah

datangnya angin. Kincir angin dibuat dengan model *HAWT* atau *Horizontal Axis Wind Turbine*. Adapun rancangan dari model kincir angin yang akan dibuat adalah sebagai berikut.



Gambar 5. Model kincir angin PLTB. (a) ukuran ekor, (b) ukuran badan kincir, (c) ukuran tiang, (d) ukuran baling-baling.

Generator *DC* dikopel dengan baling-baling yang mempunyai 3 sudu terbuat dari bahan plastik dan dihubungkan dengan piringan yang terbuat dari kayu. Kaki tiang ditambahkan pemberat agar dapat berdiri dengan tegak dan tidak bergerak ketika baling-baling berputar. Bagian poros juga terbuat dari sambungan pipa dan digunakan *bearing* sehingga dapat berputar sesuai dengan arah datangnya angin. Pada pembuatan PLTS digunakan Panel Surya tipe *Polycrystalline* dengan spesifikasi sebagai berikut;

Tabel 1 Spesifikasi panel surya.

Spesifikasi	Ukuran
Daya Maksimum (P_{Max})	50 Wp
Tegangan Maksimum (V_{Max})	16 Volt
Arus Maksimum (I_{Max})	3,13 Ampere
Tegangan Kondisi Terbuka (V_{oc})	19,7 Volt
<i>Fuse Rating</i>	10 A
Ukuran	784 x 506 x 35 mm
Berat	5 kg

Pada pembuatan PLTB digunakan generator *DC* dengan spesifikasi sebagai berikut;

Tabel 2. Spesifikasi generator *dc*.

Spesifikasi	Ukuran
Tegangan Keluaran (V)	12 – 90 Volt
Arus Maksimum (I_{Max})	1,25 A (24 Volt)
Daya Maksimum (P_{Max})	30 Watt
Rentang Putaran (<i>rpm</i>)	500– 1.000 <i>rpm</i>

2.3. Metode Analisis Data

Data yang telah didapatkan dari hasil pengukuran dalam bentuk kurva parameter terhadap waktu. Kurva parameter keluaran akan dibandingkan dengan kurva parameter masukan. Kemudian, dilakukan pengolahan data statistik sederhana untuk mencari nilai rata-rata, maksimum, minimum, range dan rangkuman kesalahan.

$$x_{rata-rata} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (1)$$

$$x_x = x_{maksimum} - x_{rata-rata} \quad (2)$$

$$x_p = x_{rata-rata} - x_{minimum} \quad (3)$$

$$x_q = \frac{x_x + x_p}{2} \quad (4)$$

$$Range = x_{maksimum} - x_{minimum} \quad (5)$$

$$Nilai Sebenarnya = x_{rata-rata} \pm x_q \quad (6)$$

Data parameter keluaran yang sudah diolah akan digunakan sebagai penentuan besar kinerja pembangkit. Sedangkan, efisiensi yang didapatkan dari nilai yang tertera pada *nampelate* atau referensi lain.

a. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Kinerja PLTS dapat didasarkan pada nilai harian dengan membandingkan besar energi harian dengan perkiraan total energi harian. Perkiraan energi total harian dalam kondisi penyinaran yang cerah dihitung dengan mengalikan ukuran panel dengan waktu efektif selama satu hari dikali dengan efisiensi sistem akibat rugi-rugi daya sistem. Dengan mengasumsikan $\eta_{sistem} = 0,85$ [5], sehingga didapatkan;

$$W_{efektif-total} = P_{panel} \times \eta_{sistem} \times t_{efektif} \quad (7)$$

Selain itu, persamaan tersebut dapat juga digunakan untuk mencari energi total efektif berdasarkan jam efektif panel surya.

$$Kinerja_{PLTS-harian} = \frac{W_{harian}}{W_{efektif-total}} \times 100\% \quad (8)$$

Pada kinerja PLTS ini juga terdapat efisiensi sel *photovoltaic*, dimana untuk efisiensi dari sel *photovoltaic* ini dirumuskan berdasarkan Hukum Thermo-dinamika II[6][7]. Persamaan yang digunakan untuk menentukan efisiensi modul adalah sebagai berikut[8].

$$\eta_{PLTS} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{P_i \cdot A} \cdot 100\% \quad (9)$$

Persamaan yang digunakan untuk menentukan factor pengisian (FF) adalah sebagai berikut[9]

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{oc}} \quad (10)$$

$$\eta_{PLTS} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_m \cdot I_m}{P_i \cdot A} \cdot 100\% \quad (11)$$

Keterangan :

η_{PLTS} : Efisiensi Panel Surya atau PLTS (%)

I_{sc} : Arus *Short Circuit* (Ampere)

V_{oc} : Tegangan *Open Circuit* (Volt)

I_m : Arus maksimum (Ampere)

V_m : Tegangan maksimum (Volt)

P_i : Intensitas radiasi matahari (W/m^2)

A : Luas Penampang (m^2)

b. Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

Perkiraan energi total harian dalam kondisi angin berhembus sepanjang hari dihitung dengan mengalikan ukuran generator DC dengan waktu efektif selama satu hari dikali dengan

efisiensi sistem akibat rugi-rugi daya siste akibat rugi-rugi daya generator dan transmisi. Dengan mengasumsi-kan $\eta_{sistem} = 0,8$, sehingga didapatkan;

$$W_{efektif-total} = P_{gen} \times \eta_{sistem} \times t_{efektif} \quad (12)$$

Selain itu, persamaan tersebut dapat juga digunakan untuk mencari energi total efektif berdasarkan jam efektif hembusan angin.

$$Kinerja_{PLTB-harian} = \frac{W_{harian}}{W_{efektif-total}} \times 100\% \quad (13)$$

Efisiensi PLTB dihitung berdasarkan per-bandingan daya kinetik terhadap daya listrik yang dihasilkan. Laju aliran massa udara yang mengalir pada suatu penampang A dengan kecepatan v , maka daya kinetik dapat dihitung dengan menggunakan rumus berdasarkan Hukum Kekekalan Energi yaitu sebagai berikut[6][7].

$$P_k = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (14)$$

Keterangan :

- P_k : Daya kinetik (W)
- ρ : Rapat Jenis Udara (1,2 Kg/M³)
- A : Luas sapuan blade turbin (m²)
- v : Kecepatan angin (m/s)

Tenaga dari aliran udara bebas sebagiannya tidak dapat dikonversi dikarenakan ada aliran udara yang tidak “ditangkap” oleh PLTB. Menurut Hukum Betz, “ *Banyaknya energi kinetik angin yang dapat menjadi energi yang menggerakkan rotor maksimal hanya 59,3%* ” yang dikenal sebagai *Betz Limit*, sehingga daya yang dihasilkan turbin angin adalah:

$$P_k = \frac{1}{2} \rho \cdot C_p \cdot A \cdot v^3 \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{gearbox} \quad (15)$$

Sehingga untuk daya outputnya dapat dihitung berdasarkan Hukum Kekekalan Energi yaitu dengan rumus sebagai berikut[6][7].

$$P_{out\ angin} = V_a \cdot I_a \quad (16)$$

Keterangan :

- C_p : Koefisien daya (0,59 *Betz Limit*)
- η_{gen} : Efisiensi generator (Rata-rata 0,8 %)
- $\eta_{gearbox}$: Efisiensi *gearbox*
- $P_{out\ angin}$: Daya keluar generator DC (W)
- V_a : Tegangan keluar generator DC (V)
- I_a : Arus keluar generator DC (A)

Menghitung efisiensi berdasarkan Hukum Termodinamika II menggunakan rumus sebagai berikut[6][7].

$$\eta_{PLTB} = \frac{P_{out\ angin}}{P_k} \cdot 100\% \quad (17)$$

Keterangan :

- η_{PLTB} : Efisiensi PLTB(%)

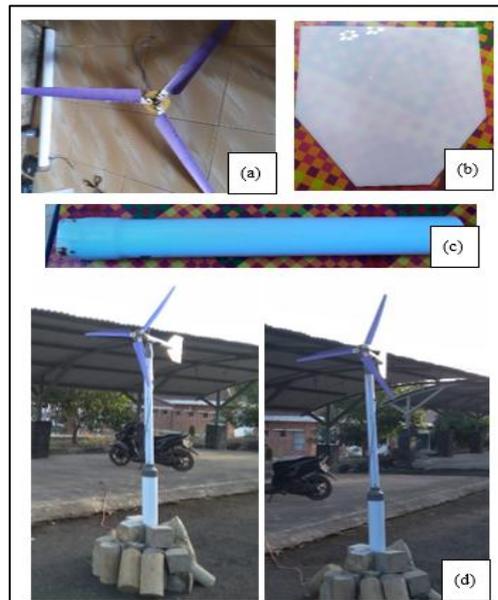
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pembuatan Kincir Angin (PLTB) serta Perangkaian komponen PLTS dan PLTB

Generator DC dan kincir angin merupakan komponen peng-konversi energi pada PLTB. Pada PLTS, komponen yang melakukan konversi energi adalah panel surya.



Gambar 6. Panel surya dan generator *dc*.



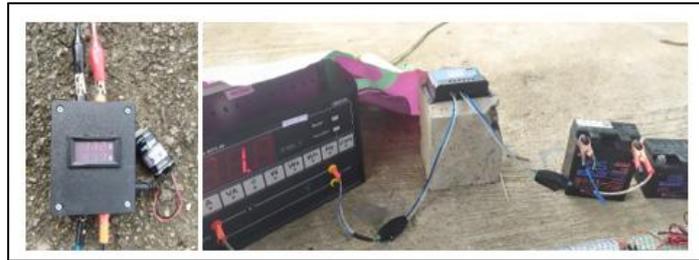
Gambar 7. Kincir angin (PLTB). (a) baling-baling, (b)ekor, (c)badan, (d)PLTB yang sudah dirakit.

Ketahanan tiang kincir angin ketika kondisi angin berhembus kencang dan pengaruh aerodinamis pada baling-baling akibat adanya gaya berat pada poros generator dapat menyebabkan timbulnya getaran dan ketidakseimbangan badan saat baling-baling berputar sehingga menyebabkan tiang kincir menjadi bergerak atau bergoyang. Dikarenakan konstruksi kincir angin yang tidak ditanamkan kedalam tanah sehingga peneliti menambahkan banyak penyangga pada bagian bawah tiang agar memperkuat konstruksi kincir tersebut. Komponen controller yang digunakan adalah *SCC* tipe *PWM* dengan *rating* 10 A. Sedangkan komponen penyimpanan yang digunakan adalah aki basah 12 Volt 5 Ah dan 7 Ah. Untuk pengosongan aki digunakan beberapa beban *DC* seperti lampu LED, lampu motor dan sebagainya.



Gambar 8. *SCC*, aki dan *Energi meter*.

Komponen pengukuran keluaran pembangkit terdiri dari volt-ampere meter dan energi meter. Adapun penyusunan komponen rangkaian pengukur-an dan pembebanan pada PLTS dan PLTB dimulai dari voltmeter dan amperemeter menuju energi meter. Selanjutnya menuju *SCC* dan ke aki seperti pada gambar dibawah ini.

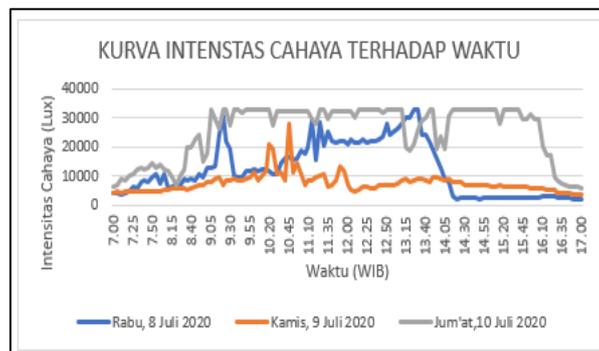


Gambar 9. Penyusunan komponen rangkaian pengukuran dan pembenaran pada PLTS dan PLTB.

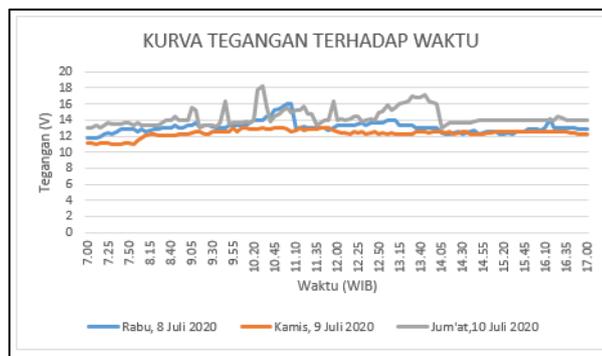
3.2. Analisis Kinerja berdasarkan Keluaran Panel Surya pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

a. Analisis Keluaran Tegangan, Arus dan Daya pada Panel Surya Terhadap Kondisi Cuaca atau Intensitas Penyerapan

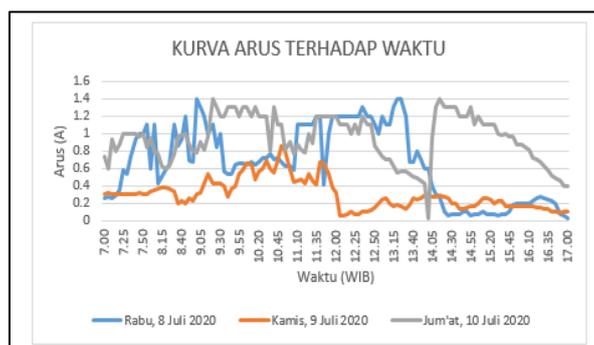
Pengukuran besar intensitas cahaya dapat menunjukkan kondisi cuaca saat dilakukannya pengukuran. Kondisi cuaca merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kinerja panel surya.



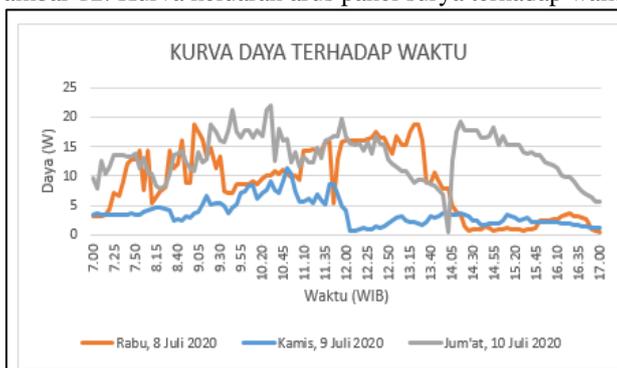
Gambar 10. Kurva intensitas cahaya pada panel surya terhadap waktu.



Gambar 11. Kurva keluaran tegangan panel surya terhadap waktu.



Gambar 12. Kurva keluaran arus panel surya terhadap waktu.



Gambar 13. Kurva keluaran daya panel surya terhadap waktu.

Pada pengukuran besar *lux* atau intensitas cahaya, digunakan aplikasi pada *smartphone* O.S. Android yang bernama *Sensors* (utama) dan *Lux Light Meter* (referensi). Rentang pengukuran pada Aplikasi *Sensors* antara 0 *Lux* -32.767 *Lux* dengan nilai ketelitian sebesar 0,1 *Lux* setiap 0,5 detik. Kondisi cuaca pada hari rabu (8/7) yaitu; berawan dipagi hari dan pada siang hari terjadi penyinaran penuh sebentar sedangkan saat menjelang sore hari terjadi perubahan yang signifikan. Penyinaran tertinggi terjadi pada pukul 13.25 WIB dan 13.30 WIB nilai intensitas cahaya maksimum (sensor) sebesar 32.767 *lux*.

Kondisi cuaca pada hari kamis (9/7) yaitu; berawan dan mendung dipagi hari dan hujan pada siang hari sehingga tidak terjadi penyinaran yang tinggi. kondisi rata-rata cuaca harian mendung disertai hujan dan gerimis. Penyinaran tertinggi hanya terjadi pada pukul 10.20 WIB dengan nilai intensitas cahaya sebesar 20.746 *lux*. Kondisi cuaca pada hari Jum'at (10/7) yaitu; cerah dan diselingi berawan sehingga terjadi penyinaran matahari yang cukup tinggi (cerah) dan lama. Penyinaran tertinggi dengan nilai intensitas cahaya maksimum (sensor) sebesar 32.767 *lux* diawali pada Pukul 9.05 WIB dan diakhiri pada pukul 15.40 WIB.

Dari kurva tegangan, kurva arus dan daya, apabila dibandingkan dengan kurva intensitas cahaya terhadap waktu dapat dilihat bahwa semakin lama penyinaran matahari atau kondisi cuaca yang cerah, maka kurva tegangan, arus dan daya akan lebih variatif serta lebih banyak menghasilkan energi dan lebih efisien begitupula sebaliknya. Pada data hari rabu (8/7) dan jum'at (10/7) terdapat beberapa kondisi ketika tegangan terukur memiliki kenaikan yang tinggi sedangkan nilai arus mengalami penurunan. Berdasarkan kurva intensitas cahaya, kondisi cuaca dapat dikatakan cukup cerah dan penyinaran matahari cukup tinggi. Pada kondisi ini menunjukkan bahwa aki sudah terisi penuh sehingga perlu diganti dengan aki lain. Kondisi tersebut ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 3. Kondisi arus dan tegangan ketika pergantian aki.

Hari/Tanggal	Kondisi Aki	Waktu (WIB)	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)
Rabu, 8 Juli 2020	Sebelum	11.00	16,1	0,63
	Pergantian	11.05	16,1	0,58
	Sesudah	11.10	12,9	1,1
	Pergantian	11.20	13,1	1,1
Jum'at, 10 Juli 2020	Sebelum	13.55	16,2	0,42
	Pergantian	14.00	16,1	0,03
	Sesudah	14.05	13,1	0,95
	Pergantian	14.10	13,4	1,3

Hal tersebut merupakan mekanisme pengisi-an aki yang dilakukan oleh SCC. SCC akan menyesuaikan keluaran daya menuju aki. Ketika aki mulai terisi penuh, arus yang masuk ke aki

dibatasi sedangkan tegangan yang masuk ke aki dijaga agar tetap berada sedikit diatas tegangan aki. Hal ini menyebabkan tegangan pada sisi panel meningkat dan arus menjadi berkurang.

Tabel 4. Keluaran arus, tegangan dan daya PLTS.

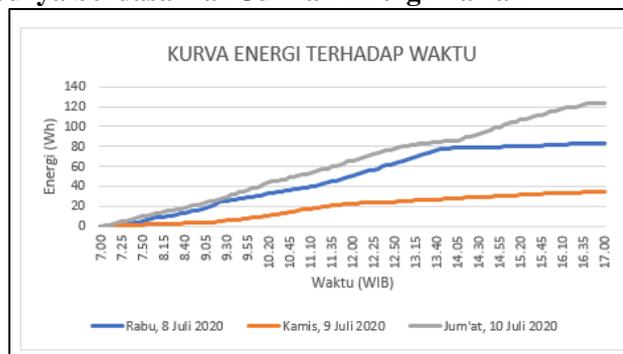
Parameter	Rabu (8/7/20)	Kamis (9/7/20)	Jum'at (10/7/20)
Tegangan Rata-rata (V)	13,34	12,36	14,33
Tegangan Maksimum (V)	16,10	13,10	18,3
Arus Rata-Rata (A)	0,66	0,30	0,94
Arus Maksimum (A)	1,4	0,86	1,4
Daya Rata-Rata (Watt)	8,76	3,77	13,38
Daya Maksimum (Watt)	18,76	11,27	21,96

Nilai maksimum tegangan pada hari rabu (8/7) yaitu sebesar 16,10 Volt dengan arus sebesar 0,63 A pada pukul 11.00 WIB dan 0,58 A pada pukul 11.05 WIB. Dikarenakan besar tegangan melebihi dari tegangan maksimum pada *namplate* dapat dikatakan kondisi tersebut akibat aki yang mulai terisi penuh sehingga tegangan mendekati nilai tegangan terbuka. Sedangkan nilai arus tertinggi yaitu sebesar 1,4 Ampere pada pukul 13.20 dan 13.25 WIB dengan nilai tegangan sebesar 13,4 Volt. Daya maksimal yang dihasilkan sebesar 18,76 Watt pada pukul 13.20 dan 13.25 WIB dengan tegangan sebesar 13,4 Volt dan arus sebesar 1,4 A.

Nilai maksimum tegangan pada hari kamis (9/7) yaitu sebesar 13,10 Volt yang terjadi pada beberapa waktu antra pukul 09.55 WIB sampai dengan 11.50 WIB. Sedangkan nilai arus tertinggi yaitu sebesar 0,86 Ampere pada pukul 10.50 WIB dengan nilai tegangan sebesar 13,1 Volt. Hal ini menyebabkan tidak terjadinya pertukaran aki. Daya maksimal yang dihasilkan sebesar 11,27 Watt pada pukul 10.50 WIB dengan tegangan sebesar 13.1 Volt dan arus sebesar 0,86 A.

Nilai maksimum tegangan pada hari jum'at (10/7) yaitu sebesar 18,30 Volt dengan arus sebesar 1,2 A pada pukul 10.30 WIB.. Sedangkan untuk nilai arus tertinggi yaitu sebesar 1,4 Ampere pada pukul 14.15 WIB dengan nilai tegangan sebesar 13,7 Volt. Pada kondisi ini arus dan tegangan masih berada dibawah arus dan tegangan maksimum yang tertulis pada *nameplate*. Kondisi ini merupakan kondisi ideal maksimal kinerja panel surya pada hari jum'at (10/7). Daya maksimal yang dihasilkan sebesar 21,96 Watt pada pukul 10.30 WIB dengan tegangan sebesar 18,3 Volt dan arus sebesar 1,2 A. Pada kondisi ini daya maksimum terjadi ketika tegangan maksimum. Namun dalam kondisi ini tegangan berada diatas kondisi maksimum. Berdasarkan kondisi yang terjadi, dapat dikatakan bahwa daya maksimum dalam kinerja yang efisien (ideal) terjadi pada arus maksimum. Namun pada beberapa kondisi, terjadi pada saat tegangan maksimum. Sedangkan kondisi ideal maksimum terjadi ketika nilai tegangan sesuai terhadap tegangan pengisian pada aki atau baterai.

b. Kinerja Panel Surya berdasarkan Jumlah Energi Harian



Gambar 14. Kurva keluaran energi panel surya terhadap waktu.

Pada perhitungan, untuk menghitung energi yang dihasilkan terhadap beban secara ideal selama 4 Jam Efektif. Dengan daya maksimum panel sebesar 50 Watt dan asumsi untuk faktor sistem sebesar 85%[5], Sehingga didapatkan;

$$W_{total\ efektif} = 50\ Watt \times 0,85 \times 4\ Jam = 170\ Wh$$

Hasil pengukuran menunjukkan jumlah energi tertinggi yang dihasilkan panel surya yaitu sebesar 124 Wh yang terjadi pada hari jum'at (10/7) dengan kondisi cuaca cerah dan diselingi berawan sehingga terjadi penyinaran matahari yang cukup tinggi dan lama. Untuk hari rabu (9/7) jumlah energi sebesar 83,5 Wh. Sedangkan jumlah energi terendah yang dihasilkan panel surya yaitu sebesar 34,6 Wh pada hari kamis (11/7) dengan kondisi rata-rata cuaca mendung disertai hujan dan gerimis.

Kinerja PLTS berdasarkan pada persamaan (7) dan (8) adalah sebagai berikut;

$$Kinerja_{PLTS-1} = \frac{83,5}{170} \cdot 100\% = 49,12\%$$

$$Kinerja_{PLTS-2} = \frac{34,6}{170} \cdot 100\% = 20,35\%$$

$$Kinerja_{PLTS-3} = \frac{124}{170} \cdot 100\% = 72,94\%$$

$$Kinerja_{Rata-rata} = \frac{49,12 + 20,35 + 72,94}{3} = 47,47\%$$

Dari perhitungan didapatkan besar kinerja rata-rata PLTS adalah 47,47 %.

c. Perhitungan Efisiensi Panel Surya (PLTS)

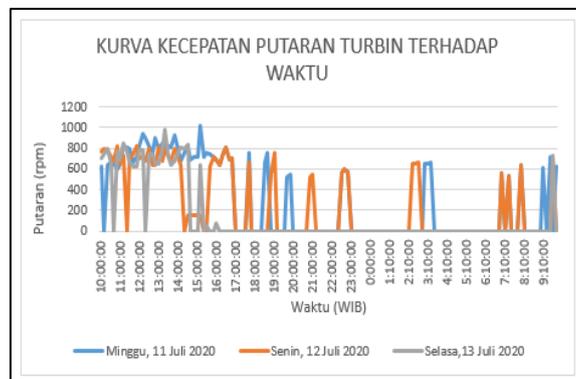
Pada perhitungan efisiensi panel surya berdasarkan persamaan (11), diasumsikan tingkat radiasi 1000 W/m² (sesuai dengan nameplate), Tegangan Maksimum (*V_{Max}*) sebesar 16 Volt, Arus Maksimum (*I_{Max}*) sebesar 3,13 Ampere serta dimensi panel surya berukuran 784 x 506 x 35 mm. Sehingga didapatkan efisiensi panel surya yaitu;

$$\eta_{PLTS} = \frac{16 \cdot 3,13}{1000 \cdot (0,784 \times 0,506)} \cdot 100\% = 12,62\%$$

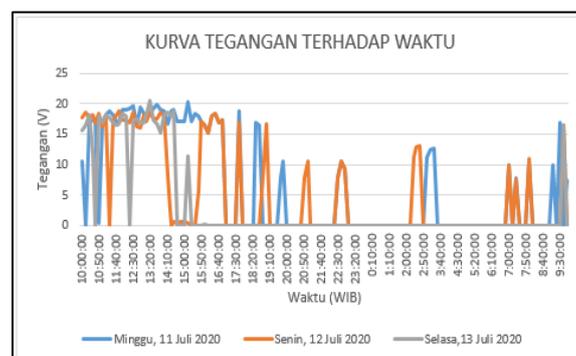
Pada kondisi penyinaran matahari yang baik, efisiensi harian panel surya dapat melebihi efisiensi terhitung dengan nilai yang tertera pada nameplate sebesar 12,62%.

3.3. Analisis Keluaran Generator DC pada Pembangkit Lisrik Tenaga Bayu (PLTB)

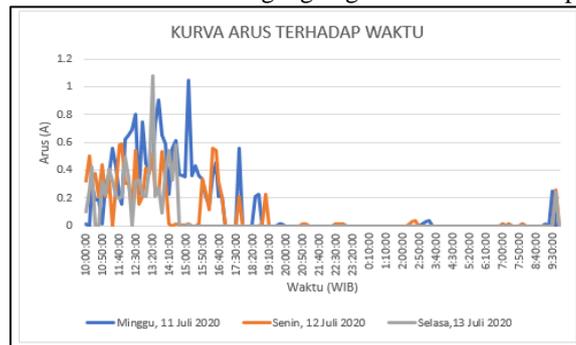
a. Analisis Keluaran Tegangan, Arus dan Daya pada Panel Surya Terhadap Kecepatan Putaran Turbin



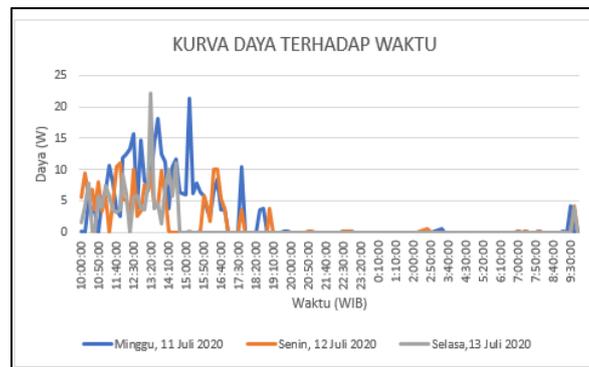
Gambar 15. Kurva kecepatan putaran turbin terhadap waktu.



Gambar 16. Kurva keluaran tegangan generator *dc* terhadap waktu.



Gambar 17. Kurva keluaran arus generator *dc* terhadap waktu.



Gambar 18. Kurva daya generator *dc* terhadap waktu.

Pada kerja generator *DC*, turbin (kincir) akan memutar poros generator sehingga rotor pada generator akan berputar dan menghasilkan perubahan medan magnet dan terjadi pergerakan elektron pada stator generator sehingga menimbulkan gaya gerak listrik. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan putaran pada turbin (kincir) merupakan parameter utama masukan generator *DC*. Dapat dilihat bahwa waktu efektif terjadinya hembusan angin yaitu pada rentang pukul 10.00 – 16.50 WIB. Pada malam hari, angin kurang berhembus sehingga turbin cenderung diam. Kecepatan putaran turbin (kincir) rata-rata pada hari Sabtu (11/7) yaitu sebesar 292.467 *rpm* dengan kecepatan tertinggi sebesar 1025,2 *rpm* pada pukul 15.10 WIB. Pada hari Minggu (12/7), kecepatan putaran rata-rata sebesar 236,441 *rpm* dengan kecepatan putaran tertinggi yaitu sebesar 826,82 *rpm* pada pukul 11.50 WIB. Sedangkan Pada hari Senin (13/7), kecepatan putaran rata-rata sebesar 145,141 *rpm* dengan kecepatan putaran tertinggi yaitu sebesar 979,97 *rpm* pada pukul 13.20 WIB.

Tabel 5. Keluaran arus, tegangan dan daya PLTB.

Parameter	Sabtu (11/7/20)	Minggu (12/7/20)	Senin (13/7/20)
Tegangan Rata-rata (V)	6,36	5,10	3,34
Tegangan Maksimum (V)	20,24	18,79	20,54
Arus Rata-Rata (A)	0,13	0,08	0,06
Arus Maksimum (A)	1,05	0,59	1,08
Daya Rata-Rata (Watt)	2,40	1,44	1,11
Daya Maksimum (Watt)	21,25	11,09	22,18

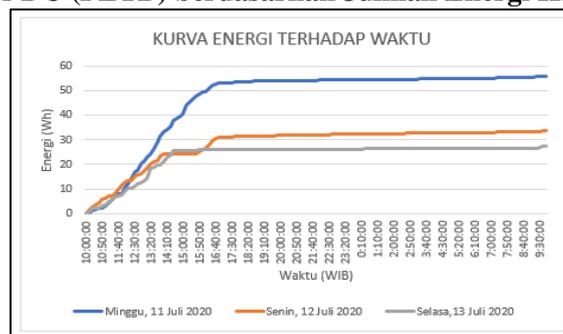
Dapat diperhatikan bahwa nilai rata-rata keluaran tegangan, arus dan daya sangat kecil. Hal ini dikarenakan persebaran data yang memiliki jarak (*range*) yang jauh sehingga data tidak seragam. Selain itu, terdapat kondisi tidak terdapatnya angin sehingga turbin tidak berputar dan tidak menghasilkan tegangan. Pada pengukuran parameter keluaran, pengujian tidak dilakukan dengan menggunakan skema yang telah dibuat sebelumnya. Hal ini dikarenakan kemampuan generator *DC* yang tidak lagi sesuai sehingga beban lampu *DC* (Tegangan seri 24 Volt, 24 Watt)

langsung dihubungkan dengan alat ukur tanpa melalui SCC. Hal ini menyebabkan tidak adanya terjadi proses pengisian aki.

Pada hari Sabtu (11/7), nilai tegangan tertinggi sebesar 20,24 Volt terjadi pada pukul 15.10 WIB dengan arus masukan sebesar 1,05 Ampere. Adapun tegangan tertinggi menyebabkan arus tertinggi pada keluaran generator DC. Hal ini juga menyebabkan daya yang dihasilkan pada waktu tersebut merupakan daya tertinggi yaitu sebesar 21,25 Watt. Pada pukul 15.10 WIB, nilai kecepatan putaran turbin merupakan nilai kecepatan putaran tertinggi yaitu sebesar 1025,2 rpm. Pada hari Minggu (12/7), nilai tegangan tertinggi sebesar 18,79 Volt terjadi pada pukul 11.50 WIB dengan arus masukan sebesar 0,59 Ampere. Daya tertinggi yang dihasilkan yaitu sebesar 11,09 Watt. Pada pukul 11.50 WIB, nilai kecepatan putaran turbin yaitu sebesar 826,82 rpm.

Pada hari Senin (13/7), nilai tegangan tertinggi sebesar 20,54 Volt terjadi pada pukul 13.20 WIB dengan arus masukan sebesar 1,08 Ampere. Sehingga daya tertinggi yang dihasilkan yaitu sebesar 22,18 Watt. Pada pukul 13.20 WIB, nilai kecepatan putaran turbin yaitu sebesar 978,97 rpm. Nilai tertinggi kecepatan putaran turbin menyebabkan keluaran tegangan, arus dan daya yang dihasilkan merupakan nilai tertinggi. Jika terdapat kontroller, sama seperti pada panel surya (PLTS) yang kondisi ideal maksimum dominan dipengaruhi nilai arus dikarenakan mekanisme kontroller. Pada pengujian ini, turbin (kincir) terlalu lambat merespon hembusan angin sehingga diperlukan waktu untuk mencapai putaran tertentu. Hal ini menyebabkan rentang data yang memiliki jarak cukup jauh. Sehingga, tidak memungkinkan untuk digunakan DC Converter atau SCC.

b. Kinerja Generator DC (PLTB) berdasarkan Jumlah Energi Harian



Gambar 19. Kurva keluaran energi generator dc terhadap waktu.

Pada perhitungan, untuk menghitung energi yang dihasilkan terhadap beban dapat diperhitungkan pada jam efektif kincir angin berputar yaitu pada ideal selama 4 Jam efektif yaitu pada pukul 10.00 – 16.50 WIB dengan pembualatan waktu selama 7 Jam. Besar daya maksimum generator DC adalah 30 Watt dan efisiensi sistem sebesar 80 %. Sehingga didapatkan;

$$W_{\text{efektif-total}} = 30 \text{ Watt} \times 0,80 \times 7 \text{ Jam} = 168 \text{ Wh}$$

Hasil pengukuran menunjukkan jumlah energi tertinggi yang dihasilkan generator DC (PLTB) yaitu sebesar 56 Wh yang terjadi pada hari Sabtu (11/7). Untuk hari Minggu (12/7) jumlah energi sebesar 33,7 Wh. Sedangkan jumlah energi terendah yang dihasilkan oleh PLTB yaitu sebesar 27,6 Wh pada hari Senin (13/7). Dari ketiga hari pengukuran, besar energi yang dihasilkan jauh berada dibawah energi yang terhitung dalam waktu efektif. Kinerja PLTB berdasarkan pada persamaan (12) dan (13) adalah sebagai berikut;

$$Kinerja_{PLTB-1} = \frac{56}{168} \cdot 100\% = 33,33 \%$$

$$Kinerja_{PLTB-2} = \frac{33,7}{168} \cdot 100\% = 20,06 \%$$

$$Kinerja_{PLTB-3} = \frac{27,6}{168} \cdot 100\% = 16,43 \%$$

$$Kinerja_{Rata-rata} = \frac{33,33 + 20,06 + 16,43}{3} = 23,27 \%$$

Daya yang dihasilkan akan mengalami pe-rubahan setiap waktu sehingga energi yang dihasilkan lebih sedikit daripada PLTS. Selain itu, jam kerja PLTB lebih lama dibanding dengan panel surya. Hal ini dikarenakan hembusan angin dapat terjadi pada siang maupun malam hari. Sedangkan pada PLTS, waktu penyinaran atau jam kerja terbatas dari terbitnya matahari dipagi hari dan terbenamnya matahari disore hari.

c. Perhitungan Efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

Pada perhitungan efisiensi PLTB berdasarkan persamaan (14) sampai dengan (17), diasumsikan kecepatan angin maksimal rata-rata yaitu sebesar 7 m/s (BMKG). Jari-jari turbin 42 cm + 5 cm = 47 cm (0,47 m), $V_{Max} = 19,86$ V, $I_{Max} = 0,91$ A, $\eta_{gen} = 0,8$ dan $\eta_{gearbox} = 1$ karena tidak menggunakan *gearbox*. Sehingga didapatkan efisiensi PLTB yaitu;

$$P_k = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot (3,14 \cdot 0,47^2) \cdot 7^3 \cdot 0,8 \cdot 1 = 114,2 \text{ Watt}$$

$$P_{out \text{ angin}} = 19,86 \cdot 0,91 = 18,07 \text{ Watt}$$

$$\eta_{PLTB} = \frac{18,07 \text{ Watt}}{114,2 \text{ Watt}} \cdot 100\% = 15,91 \%$$

Untuk efisiensi pada kecepatan angin rata-rata (3 m/s) dan daya rata-rata (1,65 Watt) didapat-kan efisiensi sebesar 18,35 %. Dengan kecepatan putaran turbin ± 1000 rpm.

3.4. Perencanaan Kapasitas Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (PLTH) Untuk Lampu Penerangan Jalan

Berdasarkan besar kinerja rata-rata pem-bangkit listrik didapatkan pembagian suplai listrik yang sesuai adalah 70% PLTS dan 30% PLTB. Dengan daya lampu yang digunakan sebesar 60 watt (12 Volt). Untuk waktu nyala lampu dari pukul 17.00 WIB – 05.00 WIB yaitu selama 12 Jam didapatkan besar energi yang diperlukan[10].

$$W_{Beban} = 60 \text{ Watt} \times 12 \text{ Jam} = 720 \text{ Wh}$$

$$Baterai (80\%) = 60 \text{ Ah} \times 100/80 = 75 \text{ Ah}$$

Kapasitas baterai (80%) yang digunakan adalah baterai 12 Volt/75 Ah. Untuk perencanaan terjadinya hujan selama 3 hari, kapasitas yang di-perlukan yaitu 3 buah baterai 12 Volt/ 75 Ah. Besar energi yang disuplai dari kedua pembangkit yaitu; untuk PLTS sebesar 504 Wh dan PLTB sebesar 216 Wh.

$$P_{Panel} = (W_{suplai} / W_{terukur}) \times 50 \text{ Wp}$$

$$= (504 / 124) \times 50 \text{ Wp} = 203,22 \text{ Watt}$$

Untuk mendapatkan besar energi cadangan apabila terjadi hujan atau kondisi penyinaran minimum dapat menggunakan panel surya ukuran 200 Wp (ukuran menyesuaikan terhadap efisiensi).

$$P_{Gen. DC} = (W_{suplai} / W_{terukur}) \times 30 \text{ W}$$

$$= (216 / 56) \times 30 \text{ Wp} = 115,71 \text{ Watt}$$

Besar kapasitas generator DC yang diguna-kan adalah sebesar 150 Watt sesuai dengan ukuran pasar. Pada panel surya sebesar 150 Wp, arus *short circuit* yaitu sebesar 8,33 A sehingga diperlukan SCC dengan *rating* arus sebesar 10 A. Untuk PLTB, jenis SCC yang digunakan berdasarkan arus mak-simum generator DC yaitu sebesar 150/12 = 12,5 A sehingga digunakan SCC dengan *rating* 20 A.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang telah didapatkan dan Pembahasan, dapat disimpulkan bahwa;

1. Daya maksimal PLTS yang dihasilkan sebesar 21,96 Watt pada hari jum'at (10/7) pukul 10.30 WIB dengan tegangan sebesar 18,3 Volt dan arus sebesar 1,2 A. Daya tertinggi PLTB yaitu dihasil-kan sebesar 21,25 Watt pada hari Sabtu (11/7). dengan nilai tegangan

tertinggi sebesar 20,24 Volt terjadi pada pukul 15.10 WIB dan arus masukan sebesar 1,05 Ampere.

2. Jumlah energi tertinggi yang dihasilkan oleh panel surya (PLTS) yaitu sebesar 124 Wh pada hari jum'at (10/7). Kinerja rata-rata dan efisiensi PLTS sebesar 47,47 % dan 12,62 %. Jumlah energi tertinggi yang dihasilkan oleh generator DC (PLTB) yaitu sebesar 56 Wh pada hari Sabtu (11/7). Kinerja rata-rata dan efisiensi PLTB sebesar 23,27 % dan 15,91 %.
3. Pada perencanaan PLTH (70% PLTS dan 30% PLTB), daya lampu yang digunakan sebesar 60 watt (12 Volt). Didapatkan kapasitas baterai yaitu 12 Volt/75 Ah. Panel surya (PLTS) yang digunakan yaitu panel surya ukuran 200 Wp dan kapasitas generator DC (PLTB) yang digunakan adalah sebesar 150 Watt. Digunakan 2 buah SCC dengan rating 10 A (PLTS) dan 20 A (PLTB).

Referensi

- [1] K. West, "Solar Cell Beyond Silicon," *Riso International*, pp. -, 2003.
- [2] M. Gratzel, "Photoelectrochemical cells," *Nature*, vol. 414, p. 338–344, 2001.
- [3] W. Yandi, Syafii and A. B. Pulungan, "Tracker Tiga Posisi Panel Surya Untuk Peningkatan," *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, pp. Vol. 6, No.3, 2017.
- [4] A. Putranto, A. Prasetyo and A. Z. U, "Rancang bangun turbin angin vertikal untuk penerangan rumah tangga," *Diploma III Teknik Mesin Universitas Diponegoro, Semarang*, 2011.
- [5] S. Putra and C. Rangkuti, "Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Secara Mandiri Untuk Rumah," *SEminar Nasional Cendekiawan 2016*, pp. ISSN (E) : 2540-7589, ISSN (P) : 2460-8696, 2016.
- [6] D. Hidayanti, G. Dewangga and etc. all, "Rancang Bangun Pembangkit Hybrid Tenaga Angin dan Surya Dengan Penggerak Otomatis Pada Panel Surya," *EKSERGI*, pp. 93-101, 2019.
- [7] F. Kreith, *Prinsip-prinsip Perpindahan Panas Edisi Ketiga*, Jakarta: Erlangga, 1997.
- [8] E. Hau, *Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, 2nd Editions terjemahan Horst von Renuard, Germany: Springer, 2005.
- [9] N. Bansai and et.al, *Renewable Energy Sources AND Conversation Technology*, New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Co. Limited, 1990.
- [10] W. Yandi, "Prototipe Data Logging Monitoring System Untuk Konversi Energi," *ECOTIPE*, vol. 7, pp. 55-60, April 2020.