

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Tahap pengujian dan analisis sistem akan dipaparkan mengenai hasil pengujian pembangkit listrik tenaga surya dalam menggerakkan pompa air pada sistem akuaponik. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi sejauh mana panel surya dapat menjadi alternatif yang efisien dan ekonomis dibandingkan dengan listrik dari PLN dalam konteks penggunaan sehari-hari pada sistem akuaponik. Hasil penelitian ini akan disajikan dalam tiga bagian utama, yaitu data hasil pengukuran akan dipaparkan, mencakup produksi energi dan efisiensi dari panel surya, efisiensi baterai, konsumsi energi oleh pompa air, dan biaya operasional masing-masing sistem, selanjutnya analisis data akan dilakukan untuk membandingkan pembangkit listrik panel surya dengan PLN dalam hal biaya pemakaian, terakhir pembahasan akan dilakukan untuk menginterpretasikan hasil penelitian terkait dampak lingkungan dari pemakaian panel surya sebagai pembangkit listrik pengganti energi konvensional berdasarkan pada penelitian sebelumnya, serta mengevaluasi implikasi dan keterbatasan dari penelitian ini.

#### **4.1 Hasil Pengujian Sistem**

##### **4.1.1 Pengujian Arus dan Tegangan Panel Surya dengan Beban dan tanpa Beban**

Pada pengujian ini dilakukan pengamatan terhadap data arus dan tegangan pada kondisi dengan beban dan tanpa beban. Pengambilan data pada hari Sabtu, 27 Juli 2024 pukul 07.00-18.00 WIB. Data dengan beban (baterai, SCC, inverter, sistem monitoring dan pompa air) dikumpulkan melalui layar monitor *Solar Charge Controller* (SCC) yang terhubung ke panel surya berkapasitas total 200 Wp, data tanpa beban dikumpulkan menggunakan multimeter melalui kabel yang terhubung dengan panel surya. Pengukuran dilakukan untuk mendapatkan gambaran yang akurat tentang variabilitas produksi energi harian, dapat dilihat pada tabel 4.1 dan tabel 4.2.

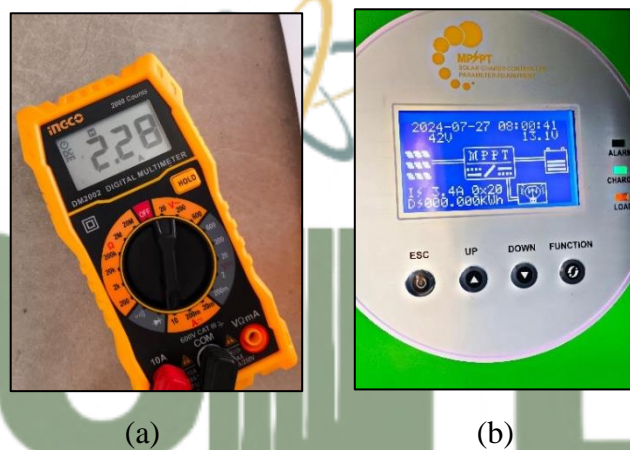
Tabel 4.1 Pengujian tanpa beban

Jam	Tegangan Panel Surya	Arus Panel Surya	Daya Panel Surya	Hambatan	Tegangan Baterai	Tegangan Inverter
07.00	46,4 V	0,20 A	9,28 W	232 Ohm	12,6 V	225,5 V
08.00	46,1 V	1,43 A	65,92 W	32,24 Ohm	12,8 V	225,5 V
09.00	48,6 V	2,28 A	110,80 W	21,32 Ohm	12,9 V	225,3 V
10.00	48,3 V	2,64 A	127,51 W	18,30 Ohm	13,0 V	225,0 V
11.00	47,9 V	3,20 A	153,28 W	14,97 Ohm	13,4 V	224,9 V
12.00	47,9 V	3,13 A	149,92 W	15,30 Ohm	13,6 V	226,8 V
13.00	48,0 V	2,87 A	137,76 W	16,72 Ohm	13,6 V	225,6 V
14.00	48,4 V	2,42 A	117,12 W	20 Ohm	13,6 V	225,0 V
15.00	48,3 V	1,60 A	77,28 W	30,19 Ohm	13,6 V	225,2 V
16.00	48,1 V	0,90 A	43,29 W	53,44 Ohm	13,6 V	225,3 V
17.00	46,2 V	0,37 A	17,09 W	124,8 Ohm	13,6 V	225,9 V
18.00	40,1 V	0,10 A	4,01 W	401 Ohm	13,6 V	225,3 V

Tabel 4.2 Pengujian dengan beban

Jam	Tegangan Panel Surya	Arus Panel Surya	Daya Panel Surya	Hambatan	Tegangan Baterai	Tegangan Inverter
07.00	44 V	0,2 A	8,8 W	220 Ohm	12,0 V	226,0 V
08.00	42 V	3,4 A	13,6 W	12,35 Ohm	13,1 V	226,5 V
09.00	40 V	5,1 A	204,0 W	7,84 Ohm	13,5 V	226,4 V
10.00	41 V	6,1 A	250,1 W	6,72 Ohm	13,9 V	226,1 V
11.00	26 V	5,4 A	140,4 W	4,81 Ohm	14,2 V	225,9 V
12.00	44 V	5,1 A	224,4 W	8,63 Ohm	13,6 V	226,9 V
13.00	39 V	6,7 A	261,3 W	5,82 Ohm	14,1 V	225,6 V
14.00	46 V	2,4 A	110,4 W	19,17 Ohm	13,6 V	225,0 V
15.00	46 V	2,0 A	92,0 W	23 Ohm	13,6 V	225,2 V
16.00	42 V	1,9 A	79,8 W	22,11 Ohm	13,7 V	225,3 V
17.00	41 V	1,0 A	41,0 W	41 Ohm	12,5 V	225,9 V
18.00	39 V	0,1 A	3,9 W	390 Ohm	12,7 V	225,3 V

Dari tabel 4.1 didapatkan rata-rata tegangan dan arus panel surya sebesar 47,025 V dan 1,76 A, daya melalui perkalian tegangan (V) dengan arus (I) didapatkan rata-rata 84,441 Watt dan hambatan melalui pembagian tegangan dan arus didapatkan rata-rata 81,695 Ohm. Pengumpulan data pengujian melalui multimeter digital yang dihubungkan ke kabel panel surya sesuai dengan kutubnya dengan syarat panel surya tidak dihubungkan ke komponen sistem yang lain seperti SCC, baterai dan inverter. Pada tabel 4.2 yaitu pengujian menggunakan beban, pengumpulan data dapat dilihat melalui layar monitor SCC setelah panel surya dihubungkan ke sistem. Didapatkan rata-rata tegangan dan arus panel surya sebesar 40,83 V dan 3,28 A, daya rata-rata 119,14 Watt dan hambatan rata-rata 63,454 Ohm.



Gambar 4.1 Hasil pengujian tegangan dan arus panel surya (a) tanpa beban (b) dengan beban

#### 4.1.2 Pengujian Intensitas Cahaya

Pada pengujian intensitas cahaya adalah jumlah daya cahaya yang dipancarkan matahari ke panel surya dalam arah atau sudut tertentu. Intensitas cahaya sangat mempengaruhi pengukuran arus dan tegangan pada panel. Pengujian dimulai pukul 07.00-18.00 WIB, dengan posisi sudut panel surya  $60^\circ$  di permukaan atap rumah. Hasil pengujian didapatkan melalui pengumpulan nilai lux menggunakan lux meter kemudian selanjutnya dikonversi menjadi nilai intensitas cahaya ( $1 \text{ lux} = 0,0079 \text{ W/m}^2$ ). Lux adalah satuan pencahayaan atau iluminasi, yang mengukur jumlah cahaya (lumen) yang jatuh pada satu meter persegi permukaan. Berbeda dengan candela adalah jumlah cahaya yang dipancarkan oleh sumber cahaya dalam arah tertentu. Lux meter mengukur pencahayaan pada suatu

permukaan, yang dipengaruhi oleh intensitas cahaya (candela) dari sumber cahaya dan jarak dari sumber cahaya ke permukaan, di mana semakin jauh jaraknya, semakin rendah nilai lux yang terukur, meskipun intensitas cahaya (candela) dari sumbernya tetap sama (Krismadinata et al, 2019). Pengujian intensitas cahaya ditunjukkan pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Pengujian Intensitas Cahaya

Jam	Pencahayaan (Lux)	Intensitas Cahaya (W/m <sup>2</sup> )	Suhu (°C)	Cuaca
07.00	20.340	160,686	29,90 °C	Cerah Berawan
08.00	24.500	193,55	31,50 °C	Cerah Berawan
09.00	30.720	242,688	34,70 °C	Cerah Berawan
10.00	24.180	191,022	36,40 °C	Cerah Berawan
11.00	28.690	226,651	37,70 °C	Cerah Berawan
12.00	43.980	347,442	38,60 °C	Cerah Berawan
13.00	45.460	359,134	38,20 °C	Cerah Berawan
14.00	45.720	361,188	38,00 °C	Cerah Berawan
15.00	39.310	310,549	38,00 °C	Cerah Berawan
16.00	30.720	242,688	36,00 °C	Cerah Berawan
17.00	24.500	193,55	35,60 °C	Cerah Berawan
18.00	20.290	160,291	34,70 °C	Cerah Berawan

Dari hasil pengujian pada tabel 4.3 didapatkan rata-rata intensitas cahaya sebesar 249,1199 W/m<sup>2</sup>. Kondisi cuaca cerah berawan sepanjang hari dengan suhu yang dipantau melalui sistem monitoring.



Gambar 4.2 Pengukuran intensitas cahaya menggunakan lux meter pada jam 14.00

## 4.2 Efisiensi Panel Surya

Pengujian intensitas cahaya yang dilakukan pukul 07.00-18.00 seperti pada tabel 4.3 didapatkan rata-rata intensitas cahaya sebesar 31.534,167 lux (249,1199 W/m<sup>2</sup>). Berdasarkan spesifikasi panel surya yang digunakan pada penelitian, nilai V<sub>max</sub> sebesar 45,6V; I<sub>max</sub> sebesar 4,39A; V<sub>oc</sub> sebesar 52,96V; dan I<sub>sc</sub> sebesar 4,94A. Dapat dihitung standar efisiensi panel surya dimana P<sub>in</sub> = I x A (Daya Masukan = Intensitas Cahaya x Luas Penampang Panel surya 200 Wp)

$$P_{in} = I \times A$$

$$P_{in} = 249,1199 \text{ W/m}^2 \times 1,0184 \text{ m}^2 \\ = 253,70 \text{ Watt}$$

dan P<sub>out</sub> = V<sub>rata-rata</sub> x I<sub>rata-rata</sub> x FF (Daya Keluaran = Tegangan *Open Circuit* x Arus *Short Circuit* x Faktor Pengisian (*fill factor*))

dimana:

$$FF = \frac{V_{max} \times I_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{45,6 \times 4,39}{52,96 \times 4,94} = \frac{200,184}{261,6224} = 0,77$$

Maka:

$$P_{out} = V_{rata-rata} \times I_{rata-rata} \times FF \\ P_{out} = 40,83 \times 3,28 \times 0,77 \\ = 103,12 \text{ Watt}$$

Hasil perhitungan daya keluaran dan masukan pada panel surya dapat digunakan untuk menghitung efisiensi panel surya menggunakan persamaan 2.1.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \\ = \frac{103,12 \text{ Watt}}{253,70 \text{ Watt}} \times 100\% \\ = 40,65 \%$$

Sehingga didapatkan efisiensi panel surya sebesar 40,65%. Pada kondisi cuaca cerah, intensitas iradiasi matahari dapat mencapai 1000 W/m<sup>2</sup>. Dengan asumsi sebuah panel surya memiliki luas 1 m<sup>2</sup> dan efisiensi sebesar 10%, maka daya listrik yang dihasilkan adalah 100 W. Efisiensi rata-rata suatu panel surya umumnya berkisar antara 8-18%, tergantung pada jenis panel dan bahan yang digunakan dalam pembuatannya. Pada penelitian ini menggunakan 2 (dua) panel surya monokristalin 100 Wp atau total daya 200 Wp yang disusun secara seri, sehingga

efisiensi 40,65% yang didapatkan bisa melebihi efisiensi rata-rata suatu panel surya. Panel surya yang berbeda akan memiliki tingkat efisiensi yang berbeda pula (Dahliyah, 2021).

### 4.3 Efisiensi Baterai

Dalam pengujian yang dilakukan didapatkan data energi listrik yang dikonsumsi oleh pompa air dalam sehari melalui Watt-meter sebesar 0,125 kWh (125 Wh) yang tampak pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 Total konsumsi energi oleh pompa dalam sehari

Penelitian ini menggunakan aki/baterai jenis VRLA sebagai komponen penyimpan energi pada pembangkit listrik panel surya dengan kapasitas 100Ah. Baterai berguna untuk membuat kinerja beban, dalam hal ini adalah pompa air pada sistem akuaponik lebih stabil saat digunakan. Apabila baterai terisi penuh dengan total konsumsi energi pompa air adalah 125 Wh setiap hari, arus yang keluar dapat dihitung dimana  $I = E/V$  (Arus keluar = konsumsi energi / tegangan nominal baterai)

$$I = \frac{E}{V} = \frac{125 \text{ Wh}}{12 \text{ V}} = 10,42 \text{ Ah}$$

kapasitas baterai 100 Ah – 10,42 Ah = 89,58 Ah sisa baterai setelah pemakaian pompa air setiap harinya. Kapasitas baterai dalam Wh dapat dihitung menggunakan rumus Kapasitas Wh = Kapasitas Ah x Tegangan Nominal

$$\text{Kapasitas Wh} = 100 \text{ Ah} \times 12 \text{ V} = 1200 \text{ Wh}$$

sehingga efisiensi pemakaian baterai dapat dihitung dengan rumus persamaan 2.2.

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{\text{Energi yang digunakan oleh beban (Wh)}}{\text{Kapasitas baterai (Wh)}} \times 100\% \\ &= \frac{125 \text{ Wh}}{1200 \text{ Wh}} \times 100\% \\ &= 10,42\%\end{aligned}$$

Maka didapatkan efisiensi baterai sebesar 10,42% atau penggunaan 10,42 Ah dari kapasitas baterai 100 Ah untuk menyalakan pompa air pada sistem akuaponik setiap harinya.

#### 4.4 Analisis Perbandingan Efisiensi Biaya Pembangkit Listrik Panel Surya dengan Pembangkit Listrik PLN

Untuk menghitung perbandingan efisiensi biaya antara pembangkit listrik panel surya dan pembangkit listrik PLN, beberapa parameter utama yang digunakan adalah konsumsi energi harian, biaya listrik dari PLN, serta biaya pemasangan dan pemeliharaan sistem panel surya. Analisis efisiensi biaya dilakukan menggunakan metode *Levelized Cost of Energy* (LCOE) untuk membandingkan efisiensi biaya antara pembangkit listrik panel surya dan pembangkit listrik PLN. LCOE memberikan gambaran tentang biaya per unit energi yang dihasilkan oleh suatu sumber daya selama masa pakainya. Perhitungan menggunakan rumus LCOE pada persamaan 2.3.

$$\text{LCOE} = \frac{\text{Investasi Awal} + \sum(\text{Biaya Operasi dan Pemeliharaan Tahunan})}{\sum \text{Energi yang Dihasilkan per Tahun}}$$

Karena tarif PLN adalah tetap, maka LCOE untuk PLN = tarif PLN untuk rumah dengan daya 1300 Watt = Rp1.444,70/kWh.

Pada pembangkit listrik panel surya, biaya investasi awal meliputi:

- 2 panel surya 100 Wp Rp965.000,
- 10 meter kabel listrik Rp130.000,
- 1 baterai VRLA Rp1.375.000,
- 1 inverter DC to AC Rp695.000,
- 1 *solar charge controller* MPPT Rp1.419.900,
- 1 box panel listrik Rp289.500, dan
- 5 mcb 10A Rp150.000,

sehingga total biaya investasi awal (CapEx) Rp5.023.500.

Biaya operasional dan pemeliharaan per tahun (OpEx) untuk pembangkit listrik panel surya umumnya diperhitungkan 1 - 2% dari biaya CapEx (Jais, 2012). Penelitian ini menetapkan persentase 1% biaya OpEx, yang mencakup pekerjaan pembersihan panel, karena di Indonesia hanya ada dua musim: musim hujan dan musim kemarau. Akibatnya, biaya operasional dan pemeliharaan panel surya tidak sebesar yang dikeluarkan di negara-negara dengan empat musim setahun. Maka biaya operasional dan pemeliharaan panel surya per tahun pada penelitian ini dapat dihitung  $1\% \times \text{Rp}5.023.500 = \text{Rp}50.235$ . Jika usia panel surya 25 tahun, total biaya operasional dan pemeliharaan (OpEx) selama 25 tahun  $\text{Rp}50.235 \times 25 = \text{Rp}1.255.875$  ditambahkan dengan biaya investasi awal (CapEx)  $\text{Rp}5.023.500 + \text{Rp}1.255.875 = \text{Rp}6.279.375$ . Energi yang dihasilkan panel surya per tahun  $1000 \text{ Wh/hari} \times 365 = 365 \text{ kWh}$  dan selama 25 tahun energi yang dihasilkan  $25 \times 365 \text{ kWh} = 9.125 \text{ kWh}$ . Sehingga dapat diperoleh LCOE untuk sistem panel surya:

$$LCOE = \frac{\text{Rp } 6.279.375}{9.125 \text{ kWh}} = \text{Rp}688,15/\text{kWh}$$

Maka didapatkan perbandingan LCOE PLN  $\text{Rp}1.444,70/\text{kWh}$  dengan sistem panel surya  $\text{Rp}688,15/\text{kWh}$ .

Pada pengujian yang dilakukan didapatkan konsumsi energi per hari  $125 \text{ Wh}$  ( $0,125 \text{ kWh}$ ). Dengan tarif PLN  $\text{Rp } 1.444,70/\text{kWh}$ , biaya harian listrik PLN untuk menggerakkan pompa air dapat dihitung  $0,125 \text{ kWh} \times \text{Rp}1444,70/\text{kWh} = \text{Rp}180,59$  dan biaya tahunan  $\text{Rp}180,59 \times 365 = \text{Rp}65.947,35$ . Untuk pembangkit listrik panel surya, biaya harian untuk menggerakkan pompa air  $0,125 \text{ kWh} \times \text{Rp}688,15/\text{kWh} = \text{Rp}86,02$  dengan biaya tahunan  $\text{Rp}86,02 \times 365 = \text{Rp}31.397,3$ , yang menunjukkan bahwa sistem panel surya lebih efisien secara biaya dibandingkan dengan pembangkit listrik dari PLN.

#### 4.5 Dampak Sistem Terhadap Lingkungan

Salah satu aspek penting yang perlu dipertimbangkan dalam perbandingan antara pembangkit listrik PLN dan pembangkit listrik tenaga surya adalah dampak terhadap lingkungan. Penggunaan energi memiliki konsekuensi lingkungan yang signifikan, baik dalam bentuk emisi gas rumah kaca, polusi udara, dan jejak ekologi secara keseluruhan.



Panel surya menghasilkan listrik dari sinar matahari, sumber energi yang bersih dan tidak menimbulkan polusi. Ini berbeda dengan pembangkit listrik PLN yang masih menggunakan energi konvensional, yaitu bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak, dan gas yang mengeluarkan emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dan polutan lainnya (Edenhofer, 2012).

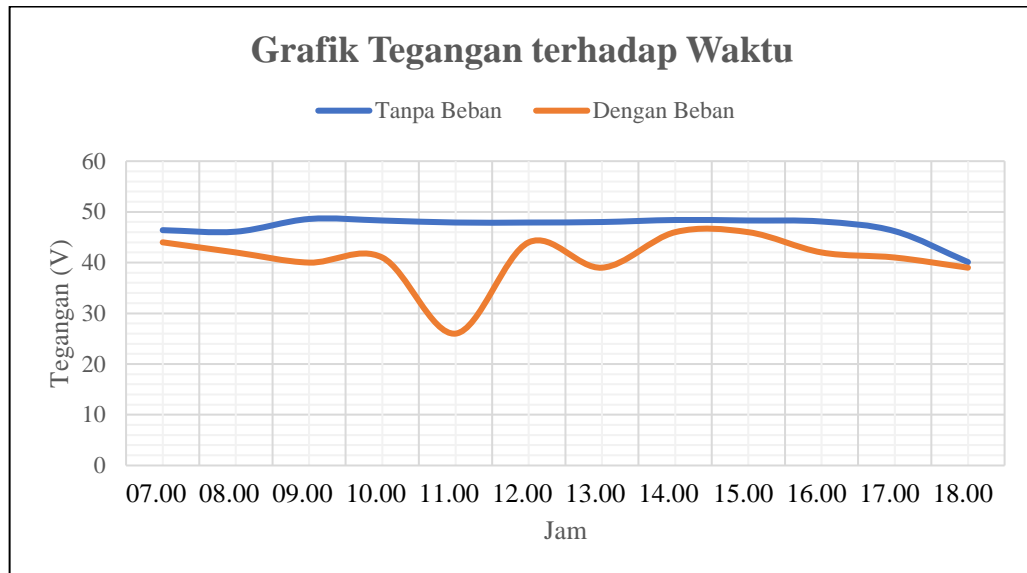
Hasil ekstraksi, pengangkutan, dan pembakaran dari pembangkit listrik PLN yang mengandalkan bahan bakar fosil juga menyebabkan degradasi lingkungan, hilangnya habitat, dan pencemaran air. Pembangkit listrik tenaga surya tidak mengeluarkan emisi gas rumah kaca ke atmosfer, 1 kWp pembangkit listrik tenaga surya dapat mengurangi emisi gas CO<sub>2</sub> sebanyak 9,3 ton dalam waktu 25 tahun (Djamin, 2010).

Pembangkit listrik tenaga surya tidak membutuhkan ekstraksi atau pembakaran bahan bakar, sehingga menghemat sumber daya alam yang terbatas dan mengurangi kerusakan lingkungan. Sebaliknya, penggunaan bahan bakar untuk pembangkit listrik PLN dalam jangka waktu yang lama akan menguras sumber daya minyak bumi, gas, dan batu bara yang semakin menipis, serta dapat menyebabkan pencemaran lingkungan. (Huda, 2018).

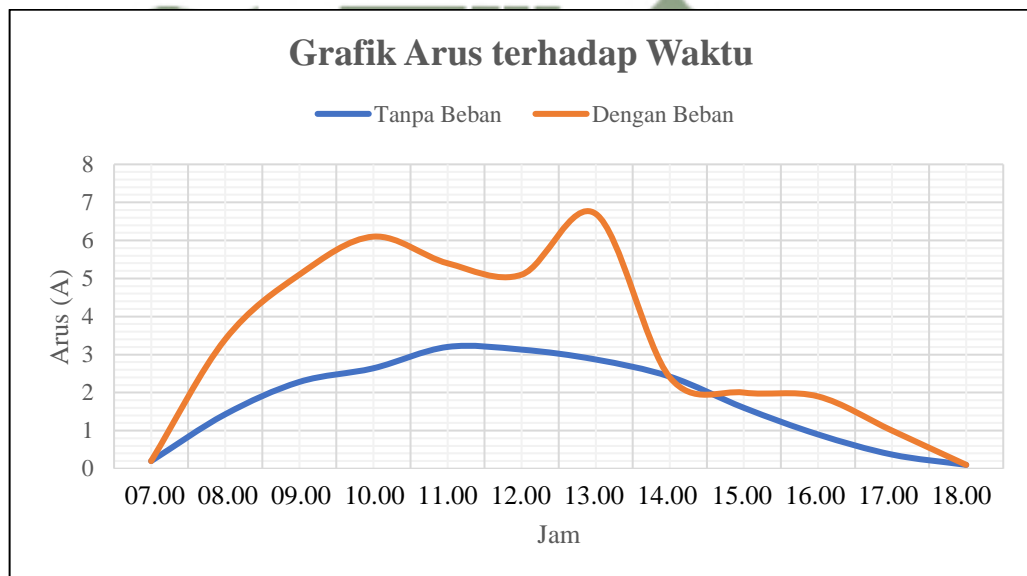
Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya, disimpulkan bahwa penggunaan panel surya memiliki peran yang lebih baik terhadap lingkungan dibandingkan dengan pembangkit listrik PLN yang masih menggunakan bahan bakar konvensional. Analisis perbandingan dampak penggunaan pembangkit listrik panel surya dengan PLN terhadap lingkungan penting untuk memahami implikasi lingkungan dari pilihan energi dan untuk mendukung keputusan yang lebih berkelanjutan dalam pemanfaatan energi untuk sistem akuaponik.

#### 4.6 Pembahasan Penelitian

Perbandingan hasil pengukuran tegangan dan arus berdasarkan tabel 4.1 dan tabel 4.2 dapat dilihat pada gambar 4.4.



(a)



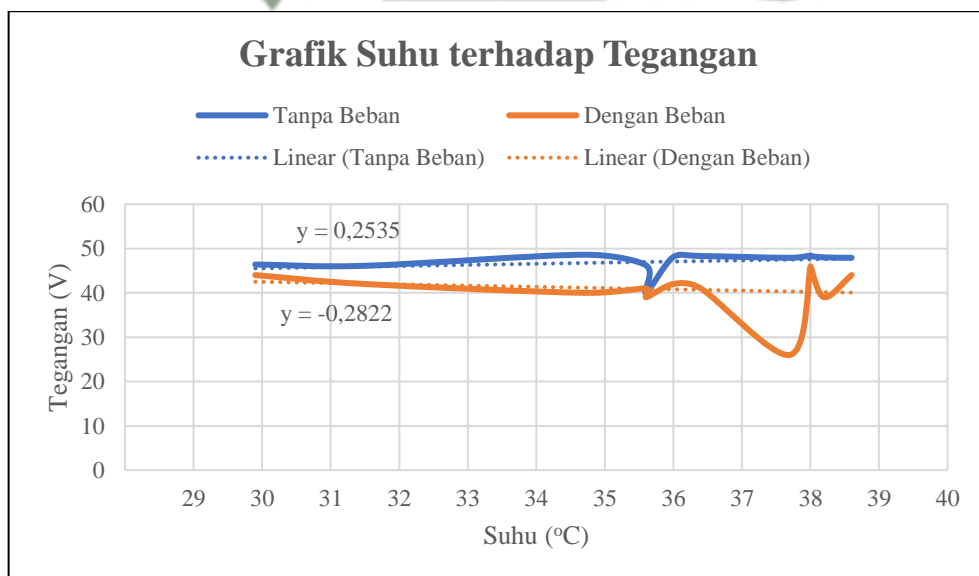
(b)

Gambar 4.4 Grafik perbandingan (a) tegangan terhadap waktu dan (b) arus terhadap waktu pada pengujian tanpa beban dan dengan beban

Hasil pengukuran jenis panel surya monokristalin 200 Wp yang terdiri dari tegangan panel, arus panel, daya panel, tegangan baterai dan tegangan inverter dengan pengujian menggunakan beban dan tanpa beban, dari tabel 4.1 didapatkan rata-rata tegangan dan arus panel surya sebesar 47,025 V dan 1,76 A dengan daya

rata-rata 84,441 Watt. Tegangan baterai terisi penuh pada pukul 12.00 yaitu 13,6 V dan tegangan inverter juga mencapai nilai tertinggi sebesar 226,8 V. Pada tabel 4.2 didapatkan rata-rata tegangan dan arus panel surya sebesar 40,83 V dan 3,28 A dengan daya rata-rata 119,14 Watt. Berbeda dengan tabel 4.1, ketika pengujian menggunakan beban tegangan pada inverter naik sebesar 1 V untuk memaksimalkan kinerja daripada beban dan tegangan pada baterai bisa melebihi 13,6 dikarenakan saat kondisi baterai sedang pengisian tegangan panel surya ditambahkan dari SCC ke baterai untuk memaksimalkan sumber tegangan ke beban. Gambar 4.4 menunjukkan grafik perbandingan tegangan dan arus pada pengukuran tanpa beban dan dengan beban, hasil tanpa beban menunjukkan perubahan naik dan turun yang tidak terlalu signifikan dibandingkan pengukuran dengan beban yang menunjukkan ada beberapa fluktuasi tegangan dan arus yang tidak konsisten.

Hasil pengujian intensitas cahaya seperti ditunjukkan pada tabel 4.3 didapatkan rata-rata intensitas cahaya sebesar 249,1199 W/m<sup>2</sup>. Nilai intensitas tertinggi terjadi pada pukul 14.00 yaitu sebesar 361,188 W/m<sup>2</sup> sedangkan suhu tertinggi terjadi pada pukul 12.00 yaitu 38,60 °C. Tegangan yang dihasilkan panel surya tidak hanya tergantung pada besar intensitas radiasi yang diterima, kenaikan temperatur pada permukaan panel juga dapat menurunkan tegangan yang dihasilkan seperti pada gambar 4.5.



Gambar 4.5 Grafik pengaruh suhu terhadap tegangan yang dihasilkan panel surya

Bahwa gambar 4.5 didapatkan nilai *slope* sebesar  $0,25 \text{ V}/^\circ\text{C}$  untuk pengaruh suhu terhadap tegangan yang dihasilkan panel surya tanpa beban, yang berarti secara rata-rata tegangan naik sebesar  $0,25$  untuk setiap kenaikan suhu  $1^\circ\text{C}$ , sedangkan dengan beban, *slope* menunjukkan nilai  $-0,28 \text{ V}/^\circ\text{C}$  yang berarti bahwa secara rata-rata tegangan menurun sebesar  $0,28$  Volt untuk setiap kenaikan suhu  $1^\circ\text{C}$ . Namun penurunan ini cukup kecil dan menunjukkan bahwa pengaruh suhu terhadap tegangan pada hasil pengukuran tidak terlalu kuat. Meskipun secara teori peningkatan suhu seharusnya menurunkan tegangan pada panel surya (Iqtimal, 2018), data hasil pengukuran tidak menunjukkan bukti yang jelas atau kuat dalam hal ini. Ada beberapa fluktuasi tegangan yang tidak konsisten dengan teori umum, yang mungkin disebabkan oleh faktor-faktor lain selain suhu yang mempengaruhi tegangan pada panel surya, seperti material silikon panel surya, spektrum cahaya, sudut dan orientasi panel surya, sirkuit listrik dan beban, dan faktor lainnya.

Perhitungan efisiensi panel surya dapat dilakukan setelah didapatkan daya masukan dan daya keluaran daripada panel surya. Daya masukan diperoleh melalui perkalian intensitas rata-rata dengan luas penampang panel surya, didapatkan nilai  $P_{in} = 253,70 \text{ Watt}$ . Daya keluaran diperoleh melalui perkalian tegangan *open circuit* dengan Arus *short circuit* dikalikan dengan fill factor  $0,77$  maka  $P_{out} = 103,12 \text{ Watt}$  sehingga efisiensi panel surya sebesar  $40,65\%$ . Ada beberapa faktor yang mempengaruhi efisiensi panel surya, seperti pengaruh sudut kemiringan, bayangan, tingkat kebersihan panel dll. Pada penelitian ini hanya difokuskan pada pengaruh suhu, intensitas cahaya dan kondisi cuaca.

Pada perhitungan efisiensi baterai dengan total energi listrik yang dikonsumsi pompa air dalam sehari  $125 \text{ Wh}$  ( $0,125 \text{ kWh}$ ) didapatkan pengurangan kapasitas baterai sebesar  $10,42 \text{ Ah}$  dari total kapasitas baterai  $100 \text{ Ah}$ . Hal ini sesuai dengan perhitungan efisiensi pemakaian baterai yang didapat sebesar  $10,42\%$ . Untuk meningkatkan efisiensinya kita bisa menjadikan baterai pada sistem panel surya ini sebagai alternatif untuk menghidupkan alat atau beban lain ketika tidak ada suplai listrik dari PLN, seperti saat padam listrik atau untuk mengurangi tarif pembayaran PLN. Dikarenakan beban pompa yang digunakan hanya menguras sedikit dari kapasitas baterai maka efisiensi pemakaian baterai juga kecil, tetapi perlu diingat bahwa tujuan penelitian ini adalah untuk menggerakkan pompa air

pada sistem akuaponik sebagai beban utamanya, sehingga tidak disarankan untuk terlalu sering menggunakan baterai untuk keperluan menghidupkan alat-alat listrik yang lain.

Analisis perbandingan efisiensi biaya antara pembangkit listrik panel surya dengan PLN, didapatkan hasil perhitungan menggunakan metode LCOE (*Levelized Cost of Energy*) yang membagi total biaya selama masa pakai dengan total energi yang dihasilkan selama masa pakai, memberikan biaya per unit energi. LCOE PLN Rp1.444,70/kWh dan LCOE panel surya Rp688,15/kWh, selanjutnya dihitung biaya tahunan listrik dari PLN dan biaya tahunan dari sistem panel surya pada penggunaan pompa air, diperoleh Rp31.397,3 per tahun untuk panel surya dan Rp65.947,35 per tahun untuk PLN yang menunjukkan bahwa sistem panel surya lebih efisien secara biaya dibandingkan dengan pembangkit listrik dari PLN. Dengan menggunakan LCOE, kita mendapatkan gambaran yang lebih realistis tentang biaya per unit energi yang dihasilkan oleh panel surya dan bagaimana biaya tersebut dibandingkan dengan tarif listrik dari PLN.

Dalam hal dampak lingkungan, pembangkit listrik panel surya memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan pembangkit listrik PLN. Panel surya menghasilkan listrik dari sinar matahari, yang merupakan sumber energi yang bersih dan tidak menimbulkan polusi. Berbeda dengan banyak pembangkit listrik PLN yang menggunakan bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak, dan gas, penggunaan panel surya menghasilkan emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dan polutan lainnya. Ini berarti udara yang lebih bersih dan kesehatan yang lebih baik bagi masyarakat. Energi surya tidak membutuhkan ekstraksi atau pembakaran bahan bakar, sehingga menghemat sumber daya alam yang terbatas dan mengurangi kerusakan lingkungan yang disebabkan oleh pertambangan dan pengeboran. Dengan meningkatkan penggunaan energi surya, kita dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil yang tidak terbarukan dan pada akhirnya akan habis. Ini juga meningkatkan keamanan energi dengan diversifikasi sumber energi.

## **4.7 Keandalan Sistem**

### **4.7.1 Keandalan Pembangkit Listrik PLN**

Sistem pembangkit listrik PLN dikenal memiliki keandalan tinggi dalam menyediakan energi listrik secara kontinu. Dengan jaringan distribusi yang luas dan dukungan infrastruktur yang kuat, PLN mampu menyediakan pasokan listrik yang stabil dan konsisten untuk berbagai kebutuhan, termasuk untuk sistem akuaponik.

Keunggulan keandalan sistem PLN antara lain:

1. Stabilitas Pasokan Energi: Listrik dari PLN tidak tergantung pada kondisi cuaca dan dapat diandalkan untuk menyediakan energi sepanjang waktu.
2. Infrastruktur Mendukung: Jaringan distribusi dan infrastruktur PLN yang luas memastikan akses yang mudah dan cepat untuk perbaikan dan pemeliharaan.
3. Ketersediaan Energi: Pasokan energi dari PLN biasanya tidak terbatas, sehingga dapat memenuhi kebutuhan energi yang lebih besar jika diperlukan.

Namun, ada beberapa keterbatasan terkait keandalan sistem PLN, seperti:

1. Ketergantungan pada Jaringan: Gangguan pada jaringan distribusi atau pemadaman listrik dapat mempengaruhi kontinuitas pasokan energi.
2. Biaya Operasional: Kenaikan tarif listrik dapat mempengaruhi biaya operasional jangka panjang.

### **4.7.2 Keandalan Pembangkit Listrik Panel Surya**

Keandalan sistem pembangkit listrik tenaga surya bergantung pada beberapa faktor, termasuk kondisi cuaca, kualitas instalasi, dan teknologi penyimpanan energi yang digunakan. Dalam penelitian ini, sistem tenaga surya dengan kapasitas 200 Wp dievaluasi untuk menilai keandalannya dalam menyediakan energi untuk menggerakkan pompa air pada sistem akuaponik.

Keunggulan keandalan sistem tenaga surya antara lain:

1. Independensi Energi: Sistem tenaga surya memberikan kemandirian energi dan mengurangi ketergantungan pada jaringan listrik PLN.
2. Pengurangan Risiko Pemadaman: Dengan penyimpanan energi yang memadai, sistem tenaga surya dapat tetap beroperasi meskipun terjadi gangguan pada jaringan listrik utama.

3. **Kontinuitas Pasokan Energi:** Teknologi penyimpanan energi (baterai) dapat membantu mengatasi variabilitas produksi energi dari panel surya, memastikan pasokan energi yang konsisten.

Namun, ada beberapa tantangan terkait keandalan sistem tenaga surya, seperti:

1. **Variabilitas Produksi Energi:** Produksi energi dari panel surya tergantung pada kondisi cuaca dan jumlah sinar matahari yang diterima, yang dapat bervariasi setiap hari.
2. **Kapasitas Penyimpanan Energi:** Keterbatasan kapasitas baterai dapat mempengaruhi kemampuan sistem untuk menyimpan energi yang cukup untuk penggunaan saat produksi energi rendah.
3. **Pemeliharaan dan Perawatan:** Sistem tenaga surya memerlukan pemeliharaan rutin untuk memastikan performa optimal dan mencegah kerusakan.

#### **4.7.3 Perbandingan Keandalan**

Sistem pembangkit listrik PLN dan sistem tenaga surya masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan dalam hal keandalan. PLN menawarkan stabilitas dan kontinuitas pasokan energi yang tinggi, namun bergantung pada jaringan distribusi yang rentan terhadap gangguan eksternal. Di sisi lain, sistem tenaga surya menawarkan kemandirian energi dan pengurangan risiko pemadaman, namun produksinya sangat bergantung pada kondisi cuaca dan memerlukan penyimpanan energi yang memadai untuk memastikan kontinuitas pasokan.

Dalam konteks sistem akuaponik, pemilihan antara kedua sistem harus mempertimbangkan kebutuhan spesifik, termasuk keandalan pasokan energi, biaya operasional, dan dampak lingkungan. Kombinasi penggunaan kedua sistem dengan sistem hibrida juga dapat menjadi solusi yang menggabungkan keandalan tinggi dari PLN dan kemandirian energi dari tenaga surya.