

Investigasi Unjuk Kerja Sistem Penerangan Tenaga Surya Tipe Berdiri-Sendiri Setelah Beroperasi Satu Tahun Di Sleman, Yogyakarta

Muhammad Nadjib

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta

Email: nadjibar@umy.ac.id

Abstrak

Berubah-ubahnya intensitas radiasi matahari menyebabkan berfluktuasinya energi yang diterima sistem fotovoltaik (PV). Sementara itu, penggunaan listrik sistem PV tergantung oleh kebutuhan yang berubah-ubah setiap saat. Kondisi ini dapat mempengaruhi unjuk kerja sistem PV setelah beroperasi dalam kurun waktu tertentu. Di Sleman Yogyakarta terdapat instalasi sistem penerangan tenaga surya (SPTS) tipe berdiri-sendiri yang digunakan untuk penerangan kandang ternak sapi. SPTS ini berjumlah 6 unit dan masing-masing berkapasitas 50 Wp. Tujuan penelitian ini adalah untuk menginvestigasi unjuk kerjanya setelah beroperasi selama satu tahun, khususnya pada modul surya dan baterai. Kondisi fisik komponen semua unit SPTS diperiksa. Waktu pemakaian beban, tegangan keluaran modul surya dan tegangan baterai setelah pengisian dan pembebatan diukur untuk tiap SPTS. Data yang diperoleh digunakan untuk menganalisis energi harian rata-rata dan unjuk kerja baterai. Untuk SPTS yang memiliki unjuk kerja terendah, dilakukan pengujian lebih lanjut yaitu memberikan beban dengan waktu maksimum. Berdasarkan pengujian diketahui bahwa SPTS memiliki kondisi fisik yang bagus tetapi semua komponennya kotor dan air di dalam baterai kurang. Secara umum SPTS telah beroperasi dengan baik dan memiliki *depth of discharge* (DOD) tertinggi sebesar 18,61%. Selanjutnya, SPTS unit 6 terindikasi memiliki rugi-rugi energi paling besar karena DOD tinggi, sedangkan konsumsi energi, *performance ratio* dan efisiensi baterainya rendah. Dari penelitian ini disimpulkan bahwa permasalahan mendasar yang terjadi adalah rendahnya pemeliharaan. Untuk mempertahankan unjuk kerja SPTS perlu ditingkatkan kualitas sistem pemeliharaannya.

Kata kunci: fotovoltaik, sistem penerangan tenaga surya, modul surya, baterai, unjuk kerja sistem

Abstract

The fluctuation of solar radiation intensity caused fluctuate energy received by photovoltaic (PV) systems. Meanwhile, the electricity usage from PV systems is depending on a difference needs every time. These conditions can be influence on PV systems performance after use for some period. Currently, there are six of 50 Wp of standalone solar lighting systems (SLS) installed for cow-stable lighting purpose in Sleman, Yogyakarta. The aims of this research are to investigate the performance of SLS, especially in the solar modules and their batteries after one year period of operation. The physical conditions of all SLS's component are checked. The load consumption time, the output voltage of solar module, and the battery voltage after charging and discharging are measured for each SLS. The data are used to analyze the average daily energy and the battery performance. Then the SLS which has the lowest performance is continued to investigate with maximum time loading. According to the test result, the physical conditions of SLS's components are good but all of the components were dirty and the water in the batteries was low level. Overall, the SLS have been well-operated and the maximum DOD is 18.61%. Furthermore, the sixth SLS indicates that its battery have highest energy losses because the DOD is high, whereas the energy consumption, performance ratio, and battery efficiency are low. It appears that the basic problem is low maintenance. To maintain the SLS's performance it needs to improve the quality of maintenance system.

Keywords: photovoltaic, solar lighting system, solar module, battery, systems performance

1. Pendahuluan

Pemanfaatan energi matahari dapat diklasifikasikan dalam dua hal yaitu secara alamiah dan secara buatan [1]. Oleh alam, energi matahari digunakan untuk proses fotosintesis tumbuh-tumbuhan, membentuk iklim, dan lain-lain. Pemanfaatan energi matahari secara buatan terdiri dari dua bentuk energi yaitu energi termal dan energi listrik. Energi matahari mengandung energi panas/termal yang dapat dimanfaatkan untuk memanaskan benda. Foton yang terkandung pada energi matahari dapat diubah menjadi energi listrik secara langsung dengan menggunakan sel surya. Sistem ini menggunakan teknologi fotovoltaik (*photovoltaic*, PV) dimana radiasi matahari yang menimpa modul surya dapat menghasilkan listrik DC.

Kondisi kerja sistem PV selama beroperasi adalah berubah-ubah. Perubahan ini terjadi karena pengaruh lingkungan dan operasional. Cuaca yang fluktuatif mengakibatkan intensitas radiasi matahari yang mengenai modul surya berubah-ubah sehingga energi yang diterima modul surya juga berubah-ubah. Bila intensitas radiasinya rendah maka perolehan energi listrik yang disimpan di baterai berkurang sehingga dapat mengurangi kemampuan melayani kebutuhan energi. Dari aspek operasional, pemakaian energi listrik adalah faktor penting yang mempengaruhi unjuk kerja sistem. Bila pemakaian energinya rendah maka kelebihan energi akan disimpan di baterai. Namun apabila penggunaan energinya berlebihan maka komponen yang cepat rusak adalah baterai [2]. Setelah sistem PV dioperasikan, umumnya terjadi penurunan unjuk kerja sistem khususnya pada baterai karena baterai adalah komponen yang paling lemah. Oleh karena itu, untuk menjaga unjuk kerja sistem diperlukan pemantauan operasional sistem PV secara periodik.

Penelitian ini bertujuan menginvestigasi unjuk kerja Sistem Pembangkit Tenaga Surya (SPTS) setelah beroperasi selama satu tahun. SPTS sebanyak 6 unit masing-masing berkapasitas 50 *wattpeak* digunakan untuk melayani penerangan kandang ternak sapi di Sleman, Yogyakarta. Dalam kurun waktu operasional tersebut, perlu diketahui kondisi fisik komponen-komponennya, profil pemakaian energi harian, dan unjuk kerjanya khususnya pada komponen modul surya dan baterai. SPTS dengan unjuk kerja terlemah dikaji lebih lanjut dengan pembebanan maksimal untuk mengetahui apakah masih beroperasi normal. Selama ini pemeliharaan SPTS sangat minimal yaitu hanya cek air pada baterai. Pemeliharaan komponen-komponen lainnya praktis tidak diperhatikan. Oleh katena itu hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan dalam pemeliharaan SPTS.

2. Kajian Pustaka

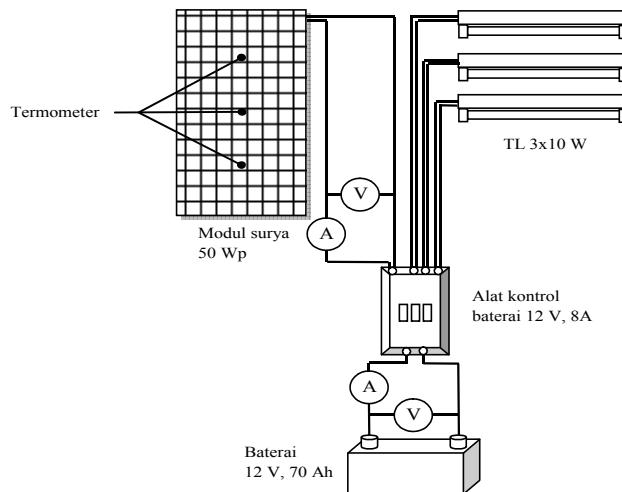
Komponen utama sistem PV adalah modul surya, alat kontrol baterai, baterai, lampu beban DC dan inverter untuk melayani beban AC. Sistem PV termasuk alat yang mahal karena harga investasinya tinggi, khususnya modul surya [3] dan baterai [4]. Referensi [1] kembali menyatakan bahwa biaya operasional sistem PV relatif lebih rendah jika dibanding dengan pembangkit listrik konvensional. Untuk mengimbangi harga investasi yang tinggi dan menekan biaya operasional maka sistem PV harus bekerja dengan optimal. Mengingat mahalnya harga modul surya dan tingginya biaya operasional baterai maka pengontrolan strategis sistem PV merupakan langkah yang penting [5].

Kajian sistem PV setelah dioperasikan dalam kurun waktu tertentu telah dilakukan beberapa peneliti. Referensi [6] melakukan monitoring *Solar Home System* (SHS) di daerah transmigrasi Kolaka setelah beroperasi selama dua tahun. Secara umum dikatakan bahwa SHS masih beroperasi. Namun demikian diketahui bahwa persentase penggunaan energinya rendah yaitu sebesar 40%-50%. Rugi-rugi energi terdapat pada modul surya karena kondisi permukaannya kotor. Referensi [7] mengemukakan hasil penelitiannya bahwa pada SHS di Sukatani terjadi penurunan efisiensi pemakaian energi setelah beroperasi lima tahun. *Performance ratio* yang terukur berkisar antara 36% sampai 62% dengan rata-rata 49%, sedangkan *performance ratio* pada perencanaan adalah 70%. Faktor penyebab yang dominan terhadap penurunan ini adalah terjadinya rugi-rugi energi pada sistem termasuk rugi-rugi pada kabel instalasi. Kondisi baterai umumnya baik dengan *depth of discharge* rata-rata 12,7%. Referensi [8] pernah melakukan survei 21 unit instalasi SHS di Yogyakarta setelah terpasang selama dua tahun. Secara umum SHS masih berfungsi baik namun dijumpai permasalahan pada lampu TL dimana 47,6% lampu dalam kondisi mati.

3. Metodologi

3.1 Alat

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah instalasi SPTS berjumlah 6 unit, *auto-ranging digital multimeter*, *non-contact infrared thermometer* dan timer. Skema penelitian SPTS tersusun seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema Penelitian SPTS Tipe Berdiri-Sendiri

3.2 Jalan Penelitian

a. Pemeriksaan kondisi fisik komponen SPTS

Kondisi fisik semua unit SPTS diperiksa yaitu meliputi modul surya, alat kontrol baterai, baterai, lampu, dan sistem pengkabelan. Adanya ketidakwajaran, perubahan dari kondisi awal dan keadaan yang lain pada semua komponen dicatat.

b. Mengukur tingkat pemakaian energi listrik

Pengukuran dilakukan dengan mencatat lama waktu lampu menyala aktual untuk penerangan kandang. Pencatatan ini dilakukan untuk semua lampu selama tiga malam. Untuk lampu yang menyala lebih dari satu kali, pencatatan waktu menyala dihitung secara total. Tegangan baterai diukur pada pukul 05.00 dan 18.00. Dari data yang diperoleh dapat diketahui unit SPTS yang mempunyai tingkat pemakaian energi listrik terbesar dan dievaluasi sejauh mana keamanan sistem dengan membandingkan ketersediaan energinya. Analisis dari data ini digunakan untuk menentukan unit SPTS yang mempunyai unjuk kerja terburuk (selanjutnya disebut SPTS terpilih) dan kemudian dilakukan evaluasi lebih lanjut dengan pembebanan penuh yaitu lampu dinyalakan sesuai standar waktu penyalaan.

c. Mengukur tegangan, arus dan temperatur modul surya

Tegangan dan arus yang keluar dari modul surya (saat *charging*) dicatat untuk SPTS terpilih. Pengukuran dilakukan di terminal input pada alat kontrol baterai agar data terukur adalah besaran yang nyata diterima sistem. Temperatur modul surya diukur pada beberapa tempat, yaitu di tengah-tengah, di sisi atas dan di sisi bawah permukaan modul. Data diambil selama tiga hari antara pukul 05.00 sampai pukul 18.00.

d. Mengukur tegangan dan arus baterai

Tegangan baterai diukur baik pada saat *charging* maupun *discharging*, sedangkan arus yang keluar baterai diukur saat *discharging*. Pelaksanaan pengukuran ini dilakukan pada hari yang sama saat waktu pengukuran di butir c. Untuk memaksimalkan pemakaian beban maka lampu dinyalakan pada kapasitas penuh sebagaimana standar waktu penyalaan. Data tegangan dan arus diambil mulai pk. 18.30 sampai dengan pk. 22.30. Khusus pada pukul 05.10 dan pukul 18.10, dilakukan pengukuran tegangan baterai dengan cara melepas koneksi kabel terminal baterai untuk mendapatkan tegangan baterai yang tidak dipengaruhi oleh rugi-rugi elektrikal dari sistem.

3.3 Analisis Data

Hasil cek kondisi fisik komponen SPTS dirangkum dalam bentuk tabel. Dari tabel ini dapat diketahui kondisi aktual komponennya. Setiap komponen diberi kategori antara lain keutuhan (tidak cacat), kebersihan, kekencangan koneksi kabel, level air (untuk baterai) dan warna ujung lampu. Cek fisik ini dijadikan salah satu acuan dalam pemeliharaan sistem SPTS.

Berdasarkan data menyala tiap lampu pada butir 3.2.b., dicari rata-rata penyalaan tiap lampu. Hasilnya digunakan untuk mengetahui profil penyalaan 19 buah lampu yang digunakan. Karena ke 19 lampu terdiri dari beberapa unit SPTS maka dari profil ini dapat ditentukan unit SPTS yang mempunyai tingkat pembebahan energi dan tingkat pemakaian energi di baterai yang paling besar. Unjuk kerja baterai dapat diketahui dari data butir 3.2.b. Data yang diperoleh dari butir 3.2.c. digunakan untuk mengetahui daya listrik yang dihasilkan oleh modul surya untuk unit SPTS terpilih. Kondisi perolehan daya listrik pada sistem dapat diketahui selama *charging*. Dari data ini juga dapat diketahui efisiensi modul surya.

Dari data butir 3.2.d., dihitung energi harian (dalam Wh) yang dikeluarkan seluruh lampu pada unit SPTS terpilih yaitu dengan cara mengalikan lama menyala dan daya tiap lampu. Kapasitas energi harian (Ah) yang dikeluarkan oleh baterai untuk menyalaan semua lampu unit SPTS terpilih juga dihitung, yaitu berdasar lama waktu menyala dan arus pada lampu. Jumlah energi harian yang dihasilkan oleh modul surya dihitung berdasar insolasi matahari, efisiensi dan luas modul surya. Parameter penilaian untuk mengetahui sejauh mana penggunaan energi listrik dari energi matahari yang dihasilkan modul surya maka ditentukan *performance ratio* berbasis arus (PR_I) untuk SPTS terpilih yang dihitung berdasar rumus berikut [7]:

$$PR_I = \frac{E_{I,LOAD} V_{TB,mean}}{H \eta_{STC} A_{PV}} \quad (1)$$

dimana $E_{I,LOAD}$ adalah total energi yang dikeluarkan baterai (Ah/hari), $V_{TB,mean}$ adalah tegangan baterai rata-rata saat *charging* (V), H adalah insolasi harian (W.jam/m²/hari), η_{STC} adalah efisiensi modul surya pada *Standard Test Condition* (ex. BP Solar = 11,1% [8]) dan A_{PV} adalah luas modul surya (0,45 m²). Selanjutnya dari data butir ini dapat diketahui tegangan dan kapasitas baterai saat akhir *charging* dan akhir *discharging*. Data ini untuk mencari *state of charge* (SOC) dan total *discharging* baterai sehingga diketahui *depth of discharge* (DOD) nya [7]:

$$DOD = \frac{E_{I,LOAD}}{C_{I,nom}} \quad (2)$$

dengan $C_{I,nom}$ adalah kapasitas nominal baterai (70 Ah). Parameter lain yang diketahui dari data butir 3.2.d. adalah efisiensi baterai berbasis arus [7], yaitu:

$$\eta_{I,B} = \frac{E_{I,LOAD}}{E_{I,A}} \quad (3)$$

dimana $E_{I,A}$ adalah energi rata-rata harian dari modul surya (Ah/hari). Langkah berikutnya adalah mencari rasio C:L (*Charge:Load*) yang terjadi di lapangan dan membandingkan dengan rasio C:L disain. Kombinasi dari data butir 3.2.c dan butir 3.2.d dibuat pola tegangan yang terjadi pada modul surya dan baterai selama pengukuran.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Kondisi Fisik SPTS

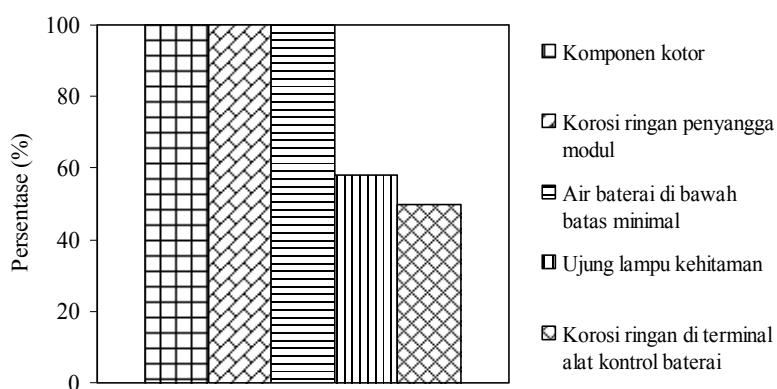
Semua komponen di setiap SPTS dilakukan cek kondisi fisik dengan hasil sebagaimana tertera pada Tabel 1. Berdasar Tabel 1, kondisi fisik tiap komponen hampir sama untuk semua SPTS. Dari tabel tersebut dapat diketahui penyimpangan utama kondisi fisik seperti pada Gambar 2.

Setelah SPTS beroperasi selama satu tahun, semua komponen kotor. Untuk modul surya, kotoran berupa debu sedang untuk komponen yang lain kotoran berupa debu maupun sarang laba-laba. Peletakan komponen di dalam kandang ternak mempercepat proses pengotoran. Oleh karena itu perlu dilakukan pembersihan di semua komponen SPTS. Semua penyangga modul surya dan baut-bautnya kuat, namun terdapat korosi ringan pada besi siku terutama di daerah pengelasan. Korosi ini wajar terjadi karena pengaruh kondisi lingkungan yaitu akibat pengaruh kotoran ternak. Penyimpangan lain yang serius adalah berkurangnya air baterai sampai di bawah batas minimal untuk semua unit SPTS. Kondisi ini dapat menyebabkan menurunnya kualitas baterai. Semua lampu masih menyala, hanya saja 57,9% lampu terdapat warna kehitaman di ujung-ujungnya. Keadaan ini wajar mengingat umur lampu telah satu tahun. Warna kehitaman di ujung-ujung lampu perlu dipantau sebab bila warnanya lebih pekat maka tandanya lampu akan mati. Permasalahan lampu pada SPTS perlu mendapat perhatian khusus. Hal ini senada dengan hasil survei bahwa pada instalasi SHS, permasalahan yang paling banyak terjadi

Tabel 1. Hasil Cek Kondisi Fisik SPTS

No.	Komponen	Parameter Fisik	Unit SPTS					
			SPTS 1	SPTS 2	SPTS 3	SPTS 4	SPTS 5	SPTS 6
1	Modul surya	a. Permukaan kotor/berdebu	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		b. Permukaan ada kotoran burung	-	✓	-	-	-	✓
		c. Permukaan ada daun menempel	-	-	-	-	-	-
		d. Kaca retak	-	-	-	-	-	-
		e. Terdapat embun	-	-	-	-	-	-
		f. Baut-baut pada frame kencang	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		g. Koneksi kabel kencang	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		h. Junction box rapat dan kencang	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		i. Ada korosi di frame modul / di penyangga	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2	Alat kontrol baterai	a. Ada kotoran di casing	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		b. Ada kotoran di terminal (debu, dll)	-	-	-	-	-	✓
		c. On-off saldar berfungsi	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		d. Led "charging" menyala di siang hari	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		e. Led "batt. low" menyala di siang hari	-	-	-	-	-	-
		f. Led "load cut-off" menyala di siang hari	-	-	-	-	-	-
		g. Baut-baut dudukan kencang	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		h. Koneksi kabel kencang	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		i. Ada korosi di terminal	-	✓	-	✓	-	✓
3	Baterai	a. Kotak penutup kencang	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		b. Ventilasi baik	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		c. Bodi kotor	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		d. Bodi menggelembung	-	-	-	-	-	-
		e. Terminal kotor	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		f. Terminal terdapat kapur	-	-	-	-	-	-
		g. Ada korosi di terminal	-	-	-	-	-	-
		h. Koneksi kabel kencang	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		i. Air aki dalam batas normal	-	-	-	-	-	-
		j. Ada cairan di tutup2 sel aki	-	-	-	-	-	-
		k. Ada cairan di bagian bawah aki	-	-	-	-	-	-
		l. Ada keretakan di bodi aki	-	-	-	-	-	-
4	Lampu	a. Lampu menyala terang	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		b. Lampu menyala redup	-	-	-	-	-	-
		c. Lampu mati	-	-	-	-	-	-
		d. Terdapat warna kehitaman di ujung	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		e. Koneksi kabel kencang	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		f. Lampu kotor	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		g. Armatur lampu kotor	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		h. Inverter rusak	-	-	-	-	-	-

Catatan: ✓ (ya), - (tidak)



Gambar 2. Penyimpangan Utama Kondisi Fisik SPTS

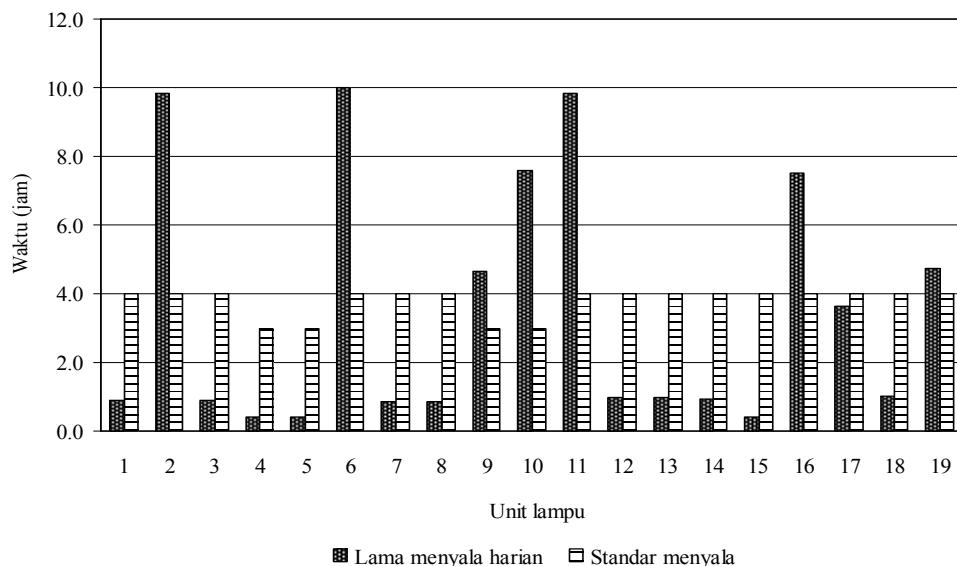
adalah pada lampu [9]. Kondisi lain yang dijumpai adalah 50% terminal alat kontrol baterai terdapat korosi ringan. Korosi ini merupakan dampak peletakannya yang berada di dalam kandang.

Melihat kenyataan di atas maka diketahui bahwa pemeliharaan SPTS sangat kurang. Hal ini dapat terjadi karena terbatasnya pemahaman pengelola ternak tentang arti pentingnya pemeliharaan. Untuk memudahkan pelaksanaan pemeliharaan perlu dibentuk satuan kerja yang dibekali dengan pengetahuan tentang sistem SPTS dan pemeliharaannya. Langkah pemeliharaan minimal yang perlu dilakukan adalah pembersihan komponen secara rutin dan pengisian air baterai.

4.2 Unjuk Kerja Seluruh SPTS

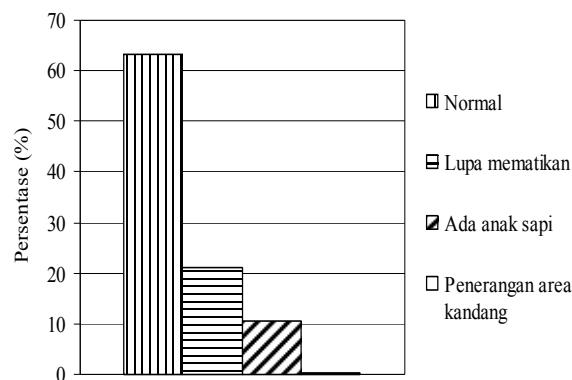
a. Penggunaan beban

Referensi [10] menyatakan bahwa lampu didesain menyala tiap malam dengan standar 4 jam untuk SPTS dengan 3 buah lampu dan 3 jam untuk SPTS dengan 4 buah lampu. Waktu tersebut diambil dengan mempertimbangkan lama waktu ternak makan di malam hari. Berdasarkan pemantauan lapangan selama 3 malam, diperoleh profil pemakaian beban rata-rata untuk penyalaan semua lampu di kandang ternak seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Profil Penyalaan Harian Lampu SPTS

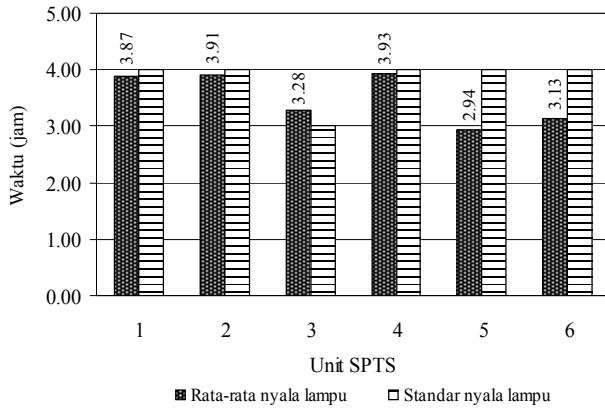
Pada Gambar 3 kelihatan bahwa lama menyala semua lampu berbeda-beda. Lampu 2, 6, 9, 10, 11, 16, dan 19 menyala lebih dari 4 jam dengan waktu menyala terbesar terjadi pada lampu 6 yaitu 10 jam. Besarnya nyala lampu ini disebabkan warga lupa mematikan (21,05%), ada anak sapi yang memerlukan penerangan lebih di malam hari (10,53%), dan untuk penerangan malam area kandang (0,19%). Ilustrasi lampu dengan menyala normal (di bawah standar) dan menyala lebih diberikan pada Gambar 4. Lupa mematikan lampu merupakan fenomena yang memerlukan perhatian karena hal ini mengakibatkan pemborosan energi. Menurut warga, penanganan ternak yang baik tidak perlu membutuhkan penerangan sepanjang malam. Untuk mengetahui apakah besarnya waktu menyala lampu tersebut melebihi standar menyala SPTS maka harus dilihat rata-rata menyalanya sesuai letak lampu di tiap unit SPTS seperti pada Tabel 2. Hasilnya disajikan pada Gambar 5 dimana hanya SPTS unit 3 yang memiliki waktu menyala di atas standar yaitu 3,28 jam (standar menyala unit SPTS dengan 4 buah lampu adalah 3 jam). Penyalaan lampu 9 dan 10 memberi kontribusi terjadinya kelebihan waktu menyala ini. Kejadian ini disebabkan lampu-lampu tersebut jarang dimatikan karena lupa. Seberapa jauh pengaruh kelebihan menyala ini harus dilihat dari aspek ketersediaan energinya dan unjuk kerja baterai. Secara individual, waktu menyala lampu 2, 6, 11, 16, dan 19 yang lebih dari 4 jam. Namun karena rata-rata penyalaan unit SPTS lampu terkait kurang dari 4 jam maka tidak menjadi permasalahan.



Gambar 4. Profil Penyalaan Lampu

Tabel 2. Pembagian Lampu Tiap Unit SPTS

Lampu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
SPTS	Unit 1		Unit 3		Unit 2		Unit 3		Unit 4		Unit 5			Unit 6					



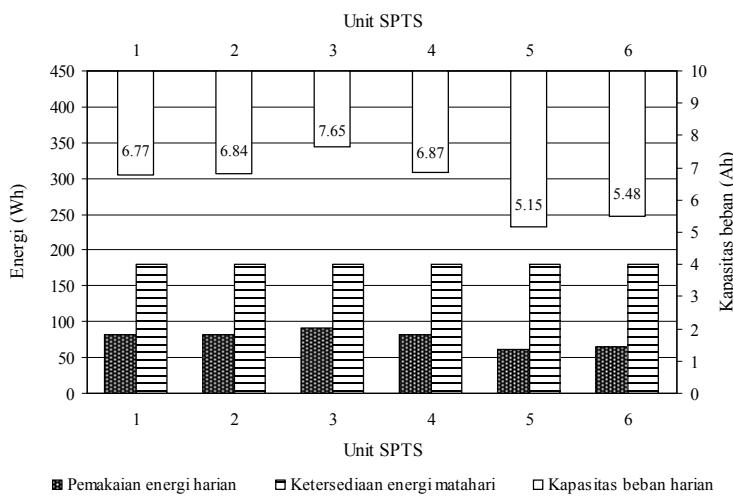
Gambar 5. Rata-rata Penyalaan Lampu Tiap SPTS

b. Energi harian

Pemakaian energi harian adalah jumlah energi yang digunakan untuk menyalaakan lampu tiap hari. Perolehan energi harian adalah sejumlah energi yang tersedia dari matahari dan diterima oleh modul surya. Referensi [7] memberikan acuan perhitungan energi ini, yaitu:

$$W_{PV} = H \cdot \eta_{STC} \cdot A_{PV} \quad (4)$$

dimana H sebesar $4,5 \text{ kW.jam}/(\text{m}^2.\text{hari})$ [11] dengan rug-rugi karena pengaruh lingkungan sebesar 0.8 [9]. Kapasitas beban menunjukkan akumulasi arus pemakaian beban selama waktu penyalaan lampu. Pemakaian energi harian, ketersediaan energi harian dan kapasitas beban harian ditunjukkan pada Gambar 6.



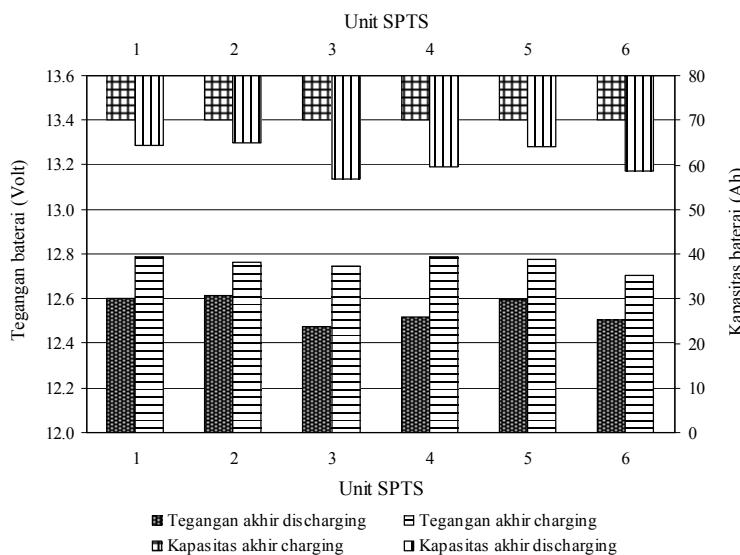
Gambar 6. Energi Harian SPTS

Dari Gambar 6 diketahui bahwa pemakaian energi harian tiap unit SPTS lebih rendah daripada energi yang tersedia. Pemakaian energi harian minimal sebesar 61,83 Wh/hari terjadi pada SPTS unit 5 dan maksimal 91,78 Wh/hari terjadi di SPTS unit 3 dengan nilai rata-rata 77,52 Wh/hari. Kejadian rata-rata menyala lampu SPTS unit 3 yang melebihi standar (Gambar 5) tidak menjadi masalah karena energi yang digunakan berada di bawah ketersediaan energi. Rendahnya pemakaian energi SPTS di kandang ternak ini terjadi karena lampu penerangan hanya dipakai dalam waktu tertentu saja. Hal yang sama juga terjadi pada instalasi SHS. Referensi [9] menginformasikan bahwa penggunaan daya listrik dari SHS yang telah terpasang di wilayah Yogyakarta umumnya belum optimal. Rata-rata kapasitas beban yang terjadi pada penelitian ini adalah 6,46 Ah/hari. Harga

kapasitas beban ini lebih rendah dari yang diprediksi perencana yaitu 7 Ah/hari [10]. Dengan demikian operasional SPTS masih aman karena harga rata-rata kapasitas beban di bawah harga perencanaan.

c. Unjuk kerja baterai

Setiap baterai SPTS diperiksa langsung di lokasi. Referensi [2] mengusulkan parameter pemeriksaan yang meliputi kondisi fisik, pemeriksaan densitas dan pengukuran tegangan. Namun pemeriksaan densitas hanya menghasilkan perkiraan kasar terhadap tingkat pengisian baterai [4]. Dengan mengacu pendapat referensi [4] dan mempertimbangkan kepraktisan di lapangan maka pemeriksaan baterai dilakukan memakai pengukuran tegangan. Hasil tes baterai ditampilkan pada Gambar 7. Gambar 7 memperlihatkan tegangan di akhir proses *discharging* (pagi hari) berada cukup jauh di bawah tegangan saat akhir *charging* (sore hari) yang berarti operasional SPTS aman. Selain itu kondisi ini menandakan bahwa modul surya berfungsi baik dalam menyuplai energi ke baterai.

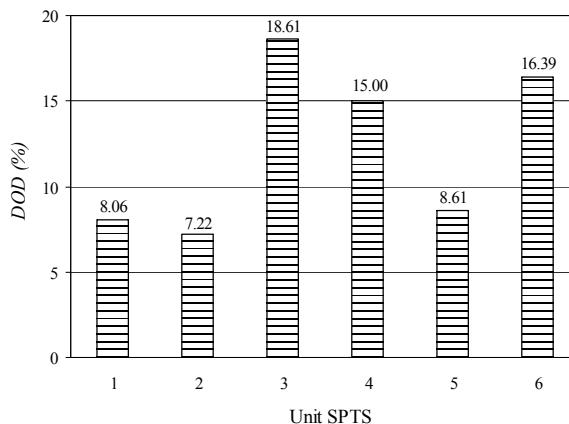


Gambar 7. Kondisi Tegangan dan Kapasitas Baterai

Untuk mengetahui kapasitas/energi baterai saat akhir *charging* dan di akhir *discharging*, tegangan tersebut dikonversikan dalam tabel SOC untuk baterai 12 V tipe *lead acid*. SOC adalah jumlah energi dalam baterai yang diekspresikan dengan persentase energi yang disimpan setelah pengisian. Harga SOC dikalikan dengan kapasitas nominal baterai (70 Ah) menghasilkan perkiraan kapasitas pemakaian dan hasilnya ditunjukkan juga pada Gambar 7. Dari gambar tersebut diketahui bahwa semua baterai berkapasitas penuh di akhir proses pengisian. Pada akhir *discharging* kapasitasnya berbeda-beda sesuai dengan tingkat penggunaannya. Rata-rata kapasitas baterai setelah pembebaan adalah 61,38 Ah dengan harga tertinggi 64,94 Ah (SPTS unit 2) dan harga terendah 56,97 Ah (SPTS unit 3). Rendahnya kapasitas baterai SPTS unit 3 ini karena penggunaan energinya terbesar sebagaimana terlihat pada Gambar 6.

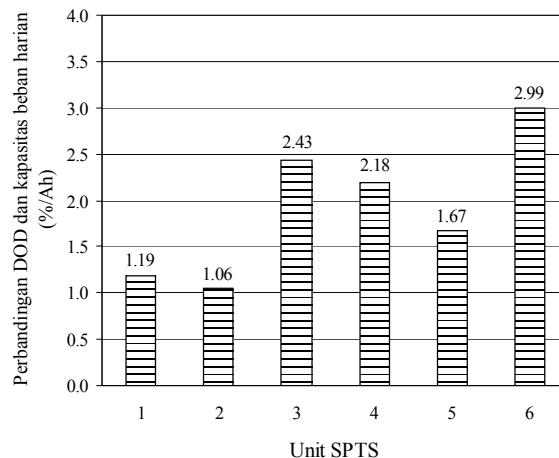
Kinerja baterai dapat diketahui dari DOD yaitu persentase kapasitas pemakaian energi baterai terhadap kapasitas penuhnya. DOD baterai semua SPTS disajikan dalam Gambar 8. Dari Gambar 8 diketahui bahwa DOD rata-rata 12,31% dan DOD terbesar terjadi pada baterai SPTS unit 3 yaitu 18,61%. Harga ini berada di bawah standar yang diijinkan untuk baterai tipe *lead acid* yaitu 20% [12]. Tingginya DOD baterai SPTS unit 3 disebabkan tingkat pemakaian energinya yang besar. Berdasar harga DOD ini maka rata-rata penyalakan lampu untuk SPTS unit 3 yang tinggi seperti pada Gambar 5 tidak menjadi masalah karena harganya masih berada di bawah 20%. Sebaliknya bila DOD lebih besar dari standar tersebut maka baterai akan mengalami *over-discharge* dan jika kejadian ini berulang lama maka baterai akan cepat rusak [13]. DOD berhubungan dengan umur pemakaian baterai. Harga DOD yang kurang dari 20% dapat meningkatkan umur baterai lebih dari dua tahun [14]. Dengan demikian seluruh baterai yang terpasang berada pada kondisi yang baik dan aman.

Kondisi yang memerlukan perhatian adalah SPTS unit 6. Rata-rata penyalakan SPTS ini rendah (Gambar 5) dan kapasitas beban harian juga rendah (Gambar 6), namun memiliki DOD yang cukup tinggi. Untuk mengetahui kondisi ini lebih lanjut maka disajikan perbandingan antara DOD dengan kapasitas beban harian seperti ada di Gambar 9. Berdasar Gambar 9 diketahui bahwa SPTS unit 6 mempunyai harga perbandingan DOD



Gambar 8. DOD Baterai Unit SPTS

dan kapasitas beban harian yang terbesar yaitu 2,99 %/Ah. Berarti untuk setiap Ah kapasitas beban, energi yang dikeluarkan baterai paling besar. Hal ini dapat menjadi indikasi bahwa laju kapasitas pemakaian energi baterai pada SPTS unit 6 paling tinggi. Pada SPTS unit 3 justru memiliki harga perbandingan tersebut yang lebih rendah walaupun rata-rata penyalannya lebih tinggi dan kapasitas beban hariannya juga lebih besar. Menurut referensi [13,5], evolusi energi baterai selama operasional PV dibagi menjadi tiga proses yaitu *charging*, *discharging* dan *stand-by/self-discharging*. Selama proses tersebut pasti terdapat rugi-rugi energi baik dari baterai sendiri karena kebocoran maupun dari luar baterai yang disebabkan antara lain konsumsi energi di BCR, inverter, dan lampu serta rugi-rugi di kabel instalasi. Pada SPTS unit 6 ini diduga memiliki tingkat rugi-rugi energi yang besar. Oleh karena itu SPTS unit 6 dipilih untuk dilakukan eksaminasi lebih lanjut dengan memberi beban penuh yaitu semua lampu dinyalakan selama 4 jam.

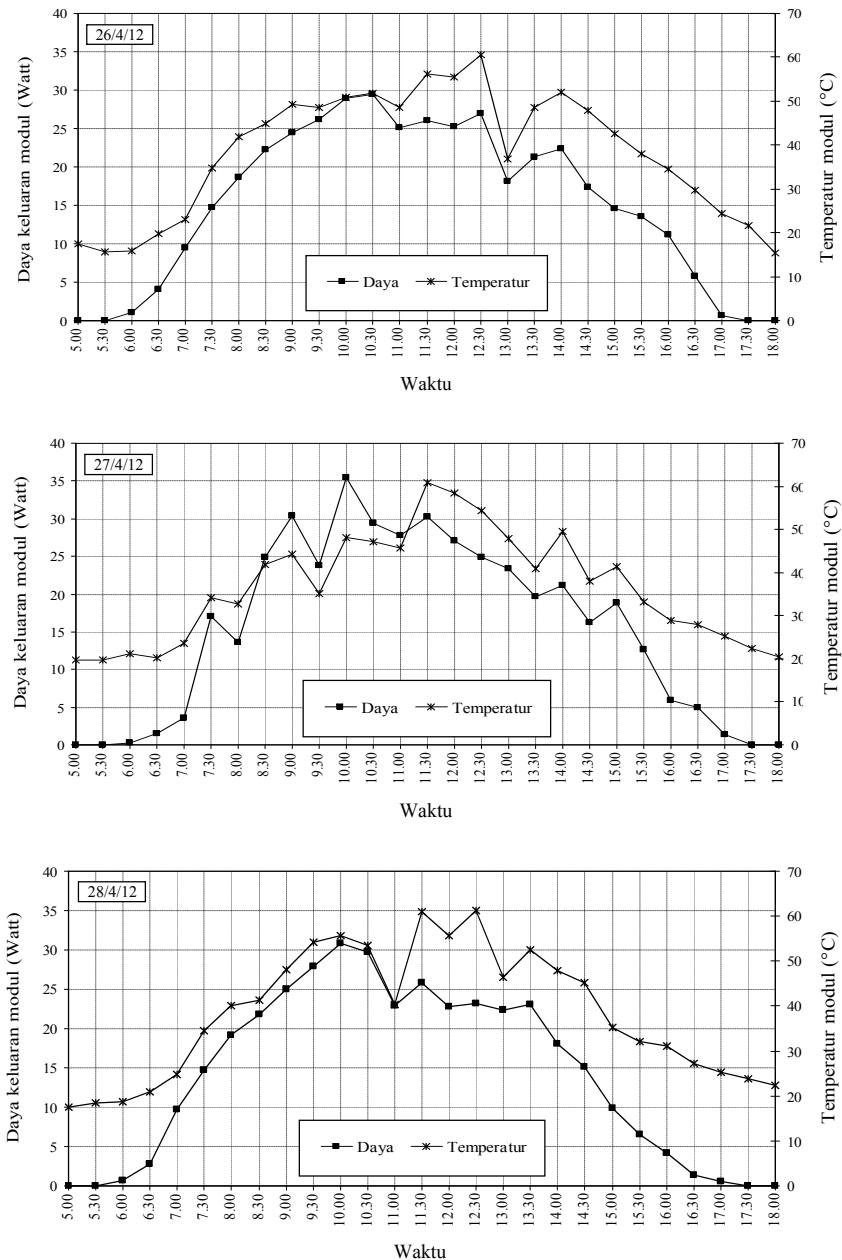


Gambar 9. Perbandingan DOD dan Kapasitas Beban Harian

4.3 Unjuk Kerja SPTS Unit 6

a. Daya listrik, temperatur dan efisiensi modul surya

Gambar 10 menunjukkan daya listrik dan temperatur modul surya pada SPTS unit 6 selama pengamatan yaitu tanggal 26/4/2012, 27/4/2012 dan 28/4/2012. Salah satu ciri instalasi PV adalah menghasilkan daya listrik yang tergantung oleh intensitas radiasi matahari yang sampai di permukaan modul surya. Intensitas radiasi matahari yang berubah-ubah menyebabkan terjadinya fluktuasi perolehan daya listrik dari modul surya. Kondisi cuaca yang ekstrim menyebabkan tingkat fluktuasi perolehan dayanya tinggi seperti yang terjadi pada hari kedua. Walaupun demikian, berdasar Gambar 10 diketahui bahwa SPTS ini telah berfungsi membangkitkan daya listrik. Daya maksimum yang dihasilkan adalah 35,5 watt yang terjadi pada hari kedua. Daya listrik yang diperoleh cukup jauh dari nilai nominal modul surya yaitu 50 watt. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh intensitas radiasi matahari, efisiensi modul surya dan rugi-rugi yang terjadi pada instalasi. Kotornya permukaan modul surya sebagaimana terkam pada Tabel 1, memberikan kontribusi signifikan terhadap penurunan perolehan daya listrik.



Gambar 10. Daya Listrik dan Temperatur Modul Surya Tanggal 26, 27 dan 28 April 2012

Daya listrik yang dihasilkan modul surya dipengaruhi oleh temperatur permukaan modul surya [15]. Menurut Gambar 10, kenaikan perolehan daya cukup tajam saat temperatur modul surya kurang dari 50°C dan bila temperaturnya lebih dari harga tersebut maka kenaikan perolehan daya tidak cukup signifikan. Hal ini menggambarkan bahwa unjuk kerja modul surya dalam menghasilkan daya semakin baik apabila temperatur permukaannya tidak tinggi. Referensi [16] menyatakan bahwa efisiensi modul surya (η) tergantung oleh efisiensi nominal pada STC (η_{STC}) dan perubahan efisiensi karena pengaruh temperatur ($\Delta\eta$) dengan persamaan sebagai berikut:

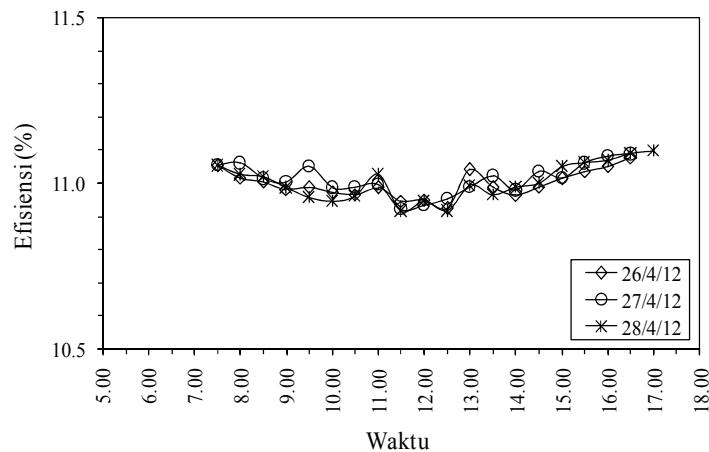
$$\eta = \eta_{STC} - \Delta\eta \quad (5)$$

Sedangkan,

$$\Delta\eta = -0,045\% \times (25^\circ\text{C} - T_{\text{mod}}) \times \eta_{STC} \quad (6)$$

dimana T_{mod} adalah temperatur modul surya.

Efisiensi modul surya selama pengujian disajikan pada Gambar 11. Gambar 11 dibuat dengan mengambil temperatur modul surya dari Gambar 10 dan memilih yang lebih besar dari 25°C. Berdasarkan gambar tersebut diketahui bahwa semakin tinggi temperatur modul surya maka semakin tinggi perubahannya efisiensinya sehingga semakin rendah efisiensi modul surya. Modul surya pada instalasi SPTS beroperasi dengan baik karena efisiensinya tidak jauh berkurang dari efisiensi kondisi STC.



Gambar 11. Efisiensi Modul Surya

b. Tegangan modul surya dan baterai

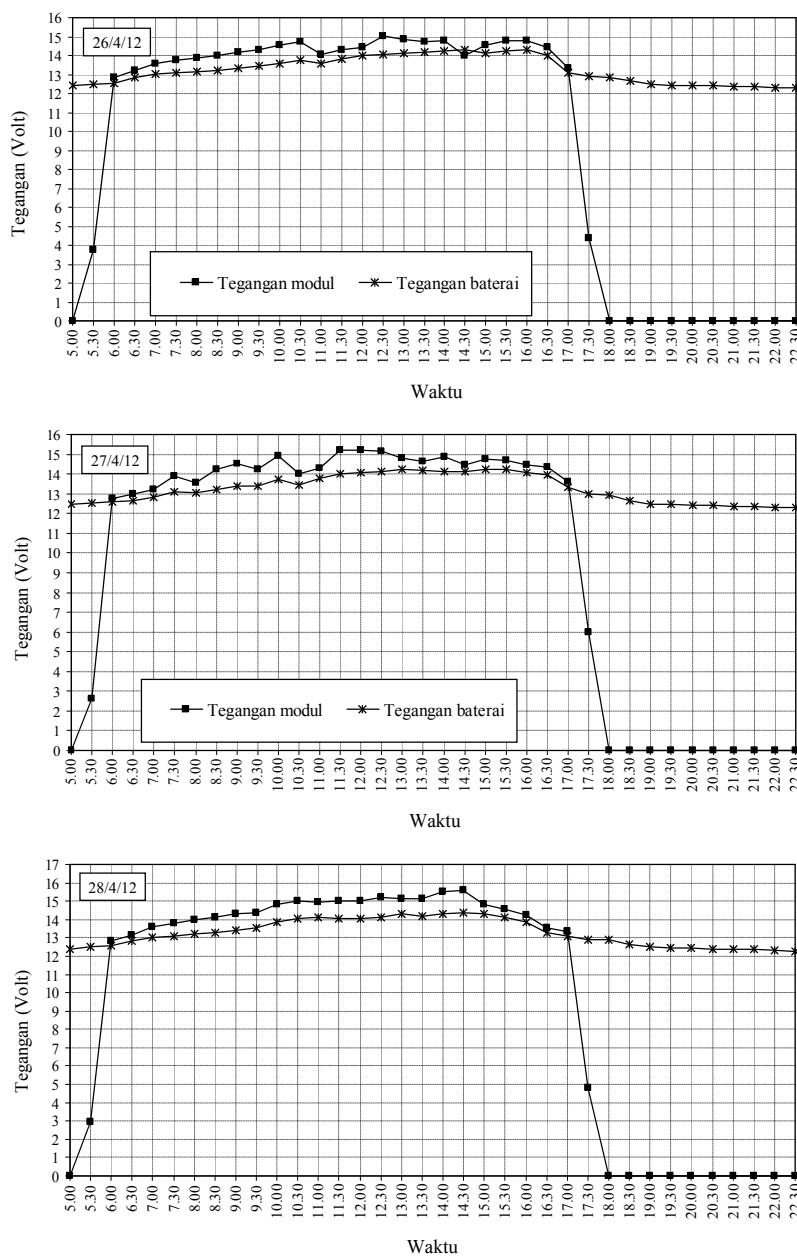
Selama penelitian, tegangan modul surya dan tegangan baterai SPTS unit 6 diukur bersamaan dengan hasil seperti pada Gambar 12. Ketiga grafik pada gambar tersebut menunjukkan bahwa modul surya mulai efektif menghasilkan tegangan dari pukul 06.00 dan menurun secara drastis sejak pukul 17.00. Penurunan ini disebabkan berkurangnya radiasi matahari. Tegangan yang terjadi di antara waktu tersebut berharga lebih tinggi dari tegangan baterai. Hal ini wajar mengingat syarat pengisian baterai adalah tegangan inputnya harus lebih besar. Kondisi tersebut membuktikan bahwa modul surya bekerja normal.

Pada pukul 6.00 sampai pukul 17.00, pola tegangan baterai mengikuti pola tegangan modul surya. Selama tiga hari pengamatan, rata-rata tegangan baterai di akhir *charging* adalah 12,88 volt. Harga ini yang menandakan kapasitas baterai dalam kondisi *full-charge* karena lebih dari 12,7 volt [17]. Dengan demikian baterai pada SPTS unit 6 mampu menampung energi listrik secara penuh. Setelah pukul 18.30, tegangan baterai menurun secara perlahan karena mulai waktu itu lampu dinyalakan. Pada pukul 22.30 lampu dimatikan dan ternyata rata-rata tegangan baterai setelah *discharging* adalah 12.42 volt. Penurunan tegangan ini cukup signifikan. Untuk mengetahui unjuk kerja baterai maka perlu diketahui *performance ratio*, efisiensi dan DOD baterai.

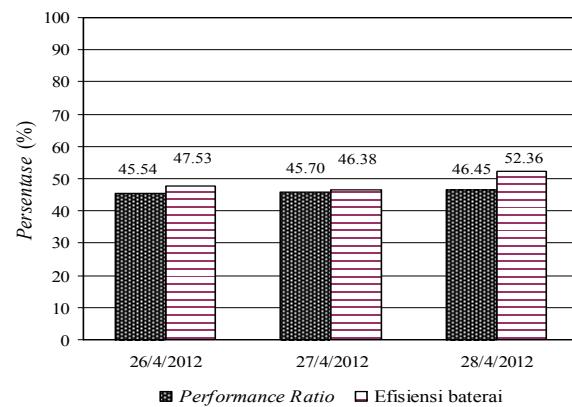
c. Performance ratio, efisiensi dan DOD baterai

Unjuk kerja baterai dapat diketahui dari *performance ratio* (PR_I), efisiensi, dan DOD baterai. PR_I dan efisiensi baterai untuk SPTS unit 6 selama pengamatan diberikan pada Gambar 13. PR_I menggambarkan seberapa besar pemakaian energi listrik oleh baterai terhadap ketersediaan energi dari matahari. Dari Gambar 13 diketahui rata-rata persentase pemakaian energi adalah 45,9% yang berarti ada 54,1% energi belum termanfaatkan dari ketersediaan energi matahari. Dengan kata lain, tingkat pemakaian energi listrik SPTS ini rendah. Besarnya PR_I tersebut masuk dalam jangkauan yaitu sebesar 40%-50% [6]. Konsumsi penggunaan energi sistem PV juga terjadi di Sukatani. Referensi [7] menyebutkan bahwa SHS di Sukatani mempunyai PR_I yang berkisar antara 36% sampai 62% dengan rata-rata 49%. Rendahnya pemakaian energi ini di satu pihak menguntungkan karena tingkat keamanan sistem PV terjaga. Apabila modul surya tidak cukup mensuplai energi listrik sementara pembebanan sistem PV berlebihan maka dapat mengakibatkan baterai cepat rusak. Di lain pihak, pemakaian energi yang rendah berarti energi yang tersedia dari energi matahari belum dimanfaatkan secara optimal. Kondisi ini menjadi tantangan para pihak yang bergelut di bidang PV dalam mendesain sistem. Mahalnya harga awal sistem PV khususnya modul surya dan baterai harus diimbangi dengan optimalisasi desain dengan mempertimbangkan aspek operasional.

Efisiensi baterai didefinisikan sebagai tingkat penggunaan energi listrik pada baterai terhadap energi listrik yang disuplai oleh modul surya dengan basis arus. Berdasarkan Gambar 13, rata-rata efisiensi baterai SPTS unit 6



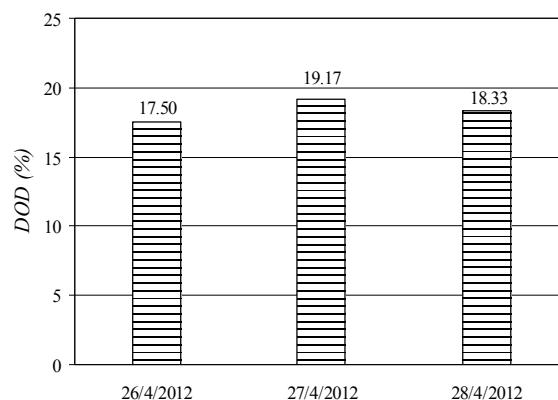
Gambar 12. Tegangan Modul Surya dan Baterai Tanggal 26, 27 dan 28 April 2012

Gambar 13. *Performance Ratio* dan Efisiensi Baterai

adalah 48,76%. Hal ini membuktikan bahwa pada SPTS unit 6, energi yang tersimpan di baterai belum digunakan secara optimal. Rata-rata efisiensi ini tergolong rendah. Hasil tersebut lebih rendah dari efisiensi baterai SHS di Sukatani yaitu dengan rata-rata 92% [7]. Tingginya efisiensi baterai SHS di Sukatani disebabkan tingginya penggunaan energi harian yaitu 17,3 Ah/hari, sedangkan pada SPTS unit 6 ini pemakaian energi harian hanya 5,77 Ah/hari.

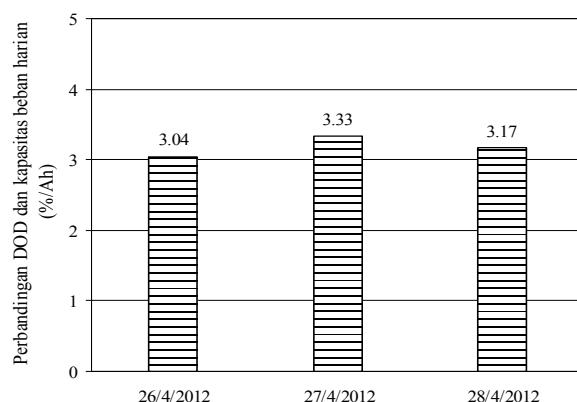
DOD baterai SPTS unit 6 disajikan pada Gambar 14. Pada Gambar 14 terlihat bahwa DOD baterai cukup tinggi dan hampir mencapai batas maksimal (20%) pada pengamatan hari kedua. Tingginya DOD ini kontradiktif dengan rendahnya PR_I dan efisiensi baterai. Tingkat pemakaian energi listrik SPTS unit 6 adalah kecil. Mengingat kapasitas energi yang dikeluarkan baterai rendah dan pada akhir *charging* kapasitas baterai penuh maka semestinya DOD baterai rendah. Tingginya DOD ini dapat terjadi dengan penyebab antara lain:

- (1). Terdapat rugi-rugi energi yang cukup besar pada instalasi selama *discharging*, baik di peralatan maupun sistem pengkabelan.
- (2). *Self discharging* baterai tinggi yang berarti kemampuan baterai menyimpan energi kurang baik.



Gambar 14. DOD Baterai SPTS Unit 6

Perbandingan antara DOD dan pemakaian beban harian SPTS unit 6 diberikan pada Gambar 15. Pada operasi normal, SPTS ini memiliki perbandingan 2,99%/Ah (Gambar 9). Setelah SPTS dibebani penuh ternyata harga perbandingannya tinggi dengan rata-rata 3,18%/Ah. Hal ini semakin menguatkan dugaan bahwa kehilangan energi pada baterai SPTS unit 6 tinggi.

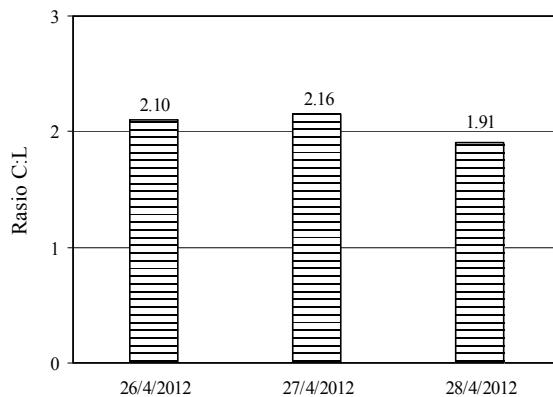


Gambar 15. Perbandingan DOD dan Kapasitas Beban Harian

d. Rasio C:L

Rasio C:L memberi gambaran tentang perbandingan jumlah energi listrik yang dihasilkan modul surya terhadap energi listrik yang digunakan. Gambar 16 menunjukkan bahwa rasio C:L berharga tinggi dengan rata-rata sebesar 2,06. Angka sebesar ini mengindikasikan bahwa suplai energi dari modul surya tinggi tetapi energi listrik yang digunakan dari baterai untuk melayani beban masih rendah. Dalam mendisain sistem di kandang ternak ini,

referensi [10] mengambil rasio C:L sebesar 1,8. Lebih tingginya harga rasio C:L aktual (=2,06) dibandingkan harga disain (=1,8) disebabkan pemakaian energi listrik aktual lebih rendah dari pada kondisi desain. Untuk SPTS unit 6, harga disain rasio C:L telah terpenuhi karena lebih besar dari syarat minimal yaitu 1,3 [18]. Namun untuk optimalisasi perolehan energi maka penggunaan energinya dapat ditingkatkan.



Gambar 16. Rasio C:L

Permasalahan-permasalahan di atas yaitu kotornya komponen SPTS, air baterai yang berada di bawah batas minimal, beberapa unit lampu menyala melebihi standar dan terjadinya kehilangan energi yang tinggi pada SPTS unit 6, bersumber dari rendahnya kualitas pemeliharaan. Pemeliharaan SPTS memegang peranan penting untuk mempertahankan baik umur komponen maupun unjuk kerjanya. Apalagi SPTS ini dipasang di sekitar kandang ternak yang relatif lebih kotor. Pembentukan satuan kerja yang khusus menangani pemeliharaan SPTS sebagaimana diusulkan di muka merupakan langkah yang tepat. Langkah berikutnya adalah memberikan pelatihan tentang sistem pemeliharaan SPTS kepada satuan kerja dan mengimplementasikannya sesuai dengan petunjuk dari produsen. Disamping itu, sosialisasi sistem SPTS dan pemeliharaannya juga sebaiknya diberikan kepada anggota ternak agar mereka lebih peduli terhadap operasionalnya agar umur SPTS optimal. Hal yang tidak kalah penting adalah meningkatkan komitmen manajemen/pengurus kelompok ternak terhadap pemeliharaan. Komitmen manajemen yang tinggi terhadap pemeliharaan akan mendorong terlaksananya sistem pemeliharaan yang efektif. Tantangan manajemen yang paling berat adalah penyediaan biaya pemeliharaan. Biaya tersebut diperlukan untuk kebutuhan alat, material dan sumber daya manusia. Mengingat sistem SPTS memiliki harga investasi yang tinggi dan umumnya sistem elektrikal seperti baterai, lampu dan alat kontrol baterai bergaransi selama 1 tahun maka pemeliharaan SPTS tidak dapat ditawar lagi.

5. Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah:

1. Setelah beroperasi satu tahun, kondisi fisik komponen SPTS umumnya masih baik. Namun terbukti bahwa kualitas pemeliharaannya rendah.
2. Secara umum unjuk kerja semua SPTS masih baik, hanya saja penggunaan SPTS di kandang ternak ini perlu ditingkatkan mengingat pemakaian energi harian rendah. Adanya penggunaan energi harian dengan perbedaan yang ekstrim antar unit lampu, utamanya disebabkan oleh rendahnya kedisiplinan warga dalam mematikan lampu.
3. Baterai pada SPTS unit 6 terindikasi mempunyai rugi-rugi energi yang terbesar dibanding unit lainnya. Walaupun demikian, baterai SPTS unit ini aman pada saat pembebahan penuh karena DOD nya masih di bawah 20%.
4. Keawetan dan kehandalan sistem SPTS tergantung oleh tingkat pemeliharaannya. Sistem pemeliharaan memerlukan dukungan komitmen manajemen yang dapat menentukan langkah-langkah strategis.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada LP3M Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Penelitian ini terlaksana dari dana LP3M UMY melalui Program Penelitian Strategis dengan Nomor Kontrak 582/LP3M- UMY/PL/XII/2011.

Nomenklatur

<i>PR</i>	performance ratio (%)
<i>E</i>	energi (Ah/hari)
<i>V</i>	tegangan (volt)
<i>H</i>	insolasi matahari (W.jam.m ⁻² /hari)
<i>A</i>	luas permukaan (m ²)
<i>DOD</i>	depth of discharge (%)
<i>C</i>	kapasitas baterai (Ah)
<i>W</i>	daya (watt)
<i>T</i>	temperatur (°C)

Greek letters

η	efisiensi (%)
--------	---------------

Subscripts

<i>I</i>	basis arus
<i>Load</i>	beban baterai
<i>TB,mean</i>	rata-rata baterai
<i>PV</i>	photovoltaic
<i>STC</i>	standard test condition
<i>nom</i>	nominal
<i>B</i>	baterai
<i>A</i>	array
<i>mod</i>	modul surya

Daftar Pustaka

- [1] Sen, Z, "Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques", Springer, London, pp: 239 – 241, 2008.
- [2] Huacuz, J.M., Flores, R., Agredano, J., and Munguia, G., "Field performance of lead-acid batteries in photovoltaic rural electrification kits", Solar Energy, vol. 55, No. 4, 1995, pp. 287 – 299.
- [3] Nieuwenhout, F.D.J., van Dijk, A., van Dijk, V.A.P., Hirsch, D., Lasschuit, P.E., van Roekel, G., Arriaza, H., Hankins, M., Sharma, B.D., and Wade, H., "Experience with solar home systems in developing countries: a review", Progress in Photovoltaic: Research and Applications, vol. 9, 2001, pp. 455 – 474.
- [4] Gustavsson, M. and Mtonga, D., "Lead-acid battery capacity in solar home systems: field test and experiences in Lundazi, Zambia", Solar Energy, vol. 79, 2005, pp. 551– 558.
- [5] Jossen, A., Garche, J., and Sauer, D.U., "Operation conditions of batteries in PV applications", Solar Energy, vol. 76, 2004, pp. 759 – 769.
- [6] Nieuwenhout, F.D.J. and Djamin, M., "Monitoring solar home system in Indonesia", Tersedia di: <http://roo.undp.org/gef/solarpv/docs/>. Diakses 25-10-2010.
- [7] Reinders, A.H.M.E., Pramusito, Sudradjat, A., van Dijk, V.A.P., Mulyadi, R., and Turkenburg, W.C., "Sukatani revisited: on the performance of nine-year-old solar home systems and street lighting systems in Indonesia", Renewable & Sustainable Energy Reviews, vol. 3, 1999, pp. 1 – 47.
- [8] Nadjib, M., "Pemantauan Lapangan Sistem Penerangan Tenaga Surya 6 x 50 Wp di Sleman", Semesta Teknika, vol. 14, No. 2, 2011, pp. 117 – 126.
- [9] Suhono. "Inventarisasi Permasalahan Pada Instalasi Solar House System di Wilayah Daerah Istimewa Yogyakarta", Jurusan Teknik Fisika UGM Yogyakarta, pp. 62 – 63, 2009.
- [10] Nadjib, M., Wahyudi, dan Rahmat, A.P., "Penerapan Energi Terbarukan pada Kelompok Ternak Andini Rahayu di Sleman DIY", LP3M UMY Yogyakarta, 2010.
- [11] Sugiyono, A., Pengembangan Energi Alternatif di Daerah Istimewa Yogyakarta: Prospek Jangka Panjang. In: Proceeding Call for Paper Seminar Nasional VI Universitas Teknologi Yogyakarta, Buku 4: Teknologi Industri ISBN No. 978-979-1334-29-7, pp.1 – 13, Universitas Teknologi Yogyakarta, 2010.
- [12] Khatib, T., "A review of designing, installing and evaluating standalone photovoltaic power systems", Journal of Applied Sciences, vol. 10, No. 13, 2010, pp. 1212 – 1228.
- [13] Armenta-Deu, C., "Prediction of battery behavior in SAPV applications", Renewable Energy, vol. 28, 2003, pp. 1671 – 1684.

- [14] Dunlop, J.P., "Batteries and Charge Control in Stand-alone Photovoltaic, Fundamentals and Application", Florida Solar Energy Center, 1997.
- [15] Patel, M.R., "Wind and solar power systems", CRS Press. New York, pp. 149 – 150, 1999.
- [16] Anonim, "Planning and Installing Photovoltaic Systems", Second Edition, DGS LV Berlin, 2008.
- [17] Anonim, "Maintenance and Operation of Stand Alone Photovoltaic Systems", Architectural Energy Corporation Colorado, 1991.
- [18] Chow, J.T., "Assessment of Solar Home Systems (SHS) for Isolated Rural Communities in Vanuatu Using Project Lifecycle/Sustainability Framework", Michigan Technological University, pp. 9 – 11, 2010.