



UNJUK KERJA BATERAI VRLA (*VALVE REGULATED LEAD ACID*) TERHADAP PEMBEBANAN DAN USIA PAKAI

Suprianto^{a*}

^aProgram Studi Teknologi Rekayasa Instalasi Listrik, Politeknik Negeri Medan, Jl. Almamater No. 1, Kampus USU, Medan, 20155, Indonesia

*Corresponding authors at: suprianto@polmed.ac.id Tel.: +6285-228-131336

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 16 Juni 2025

Direvisi pada 28 Juli 2025

Disetujui pada 16 Agustus 2025

Tersedia daring pada 30 Agustus 2025

Kata kunci:

Baterai, beban, energi.

Keywords:

Battery, load, energy.

ABSTRAK

Penelitian unjuk kerja baterai VRLA terhadap pembebanan dan usia pakai bertujuan untuk mengetahui karakteristik baterai berdasarkan pembebanan dan usia pakai baterai. Objek penelitian ini adalah baterai 24 Volt 100 ampere-jam (Ah) merek x dengan usia pakai 6 tahun, baterai 24 Volt 100 Ah merek y dengan usia pakai 2 tahun, baterai 24 Volt 20 Ah dan baterai 24 Volt 12 Ah masing-masing merek y dengan usia pakai 0,5 tahun. Target khusus yang dicapai adalah mengetahui tingkat DoD (*Depth of Discharge*) dari baterai terhadap pembebanan dan usia pakai. Metode yang digunakan adalah metode eksperimen yaitu mengumpulkan data dari hasil pengukuran besaran-besaran listrik pada sistem. Peralatan yang digunakan adalah baterai 24 Volt 100 Ah merek x, baterai 24 Volt 100 Ah merek y, baterai 24 Volt 20 Ah merek y, baterai 24 Volt 12 Ah merek y, inverter 2000 watt, multimeter digital, *circuit breaker* 100 ampere, *solar charge controller* dan peralatan pendukung lainnya. Hasil penelitian menunjukkan nilai DoD baterai 24 Volt 100 Ah merek x dengan usia pakai 6 tahun adalah 20%, sedangkan nilai DoD baterai 24 Volt 100 Ah merek y dengan usia pakai 2 tahun adalah 4%, kedua baterai memiliki nilai DoD dibawah standar yaitu dibawah 30%. Untuk baterai 24 Volt 20 Ah merek y dengan usia pakai 0,5 tahun dan baterai 24 Volt 12 Ah merek y dengan usia pakai 0,5 tahun memiliki nilai DoD diatas 30%, hal ini menunjukkan bahwa baterai dalam kondisi baik. Dengan demikian hasil penelitian menunjukkan tidak semua baterai dengan usia pakai yang lebih lama menyebabkan nilai DoD menjadi lebih rendah dibandingkan dengan baterai dengan usia pakai yang lebih baru. Jenis baterai dan bagaimana perlakuan pembebanan baterai itu sendiri pada saat beroperasi adalah merupakan hal yang mempengaruhi tingkat DoD.

ABSTRACT

The aim of this study was to assess the performance of VRLA batteries with respect to loading and battery lifespan. Four types of batteries were assessed in this study: (1) brand x with 24 V, 100 Ah, and lifespan of 6 years, (2) brand y with 24 V, 100 Ah, and lifespan of 2 years, (3) battery y with 24 V, 20 Ah, and lifespan of 0.5 years, and (4) brand y with 24 V, 12 Ah, and lifespan of 0.5 years. The depth of discharge (DoD) of the batteries were determined with respect to the loading and lifespan. Experiments were carried out on the batteries using a 2000-W inverter, digital multimeter, 100-W circuit breaker, solar charge controller, and other supporting equipment. The results showed that the DoD of battery brand x with 24 V 100 Ah, and lifespan of 6 years was 20%, whereas the DoD of battery brand y with 24 V, 100 Ah, and lifespan of 2 years was 4%. Both batteries had a DoD below 30%, which was well below the standard. The DoDs for battery brand y with 24 V and 20 Ah and battery brand y with 24 V and 12 Ah were more than 30%, indicating that these batteries were in good condition. The results revealed that not all batteries with a longer lifespan resulted in a lower DoD compared with batteries with a shorter lifespan. The type of battery and how the battery is charged during operation were the factors that influenced the DoD.

1. PENGANTAR

Baterai merupakan sumber listrik yang sangat dibutuhkan dan berguna untuk menjaga kontinuitas pelayanan daya yang baik pada sistem pembangkit listrik tenaga surya. Baterai selalu digunakan untuk sistem PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) *off grid* dan keberadaannya merupakan pelengkap utama sebuah sistem PLTS. Jenis baterai *lead acid* paling banyak digunakan untuk sistem PLTS *off-*

grid karena memiliki beberapa keunggulan dibanding jenis baterai lainnya yaitu memiliki usia pakai yang lama, aman, mudah digunakan, dan murah. Saat ini komponen yang paling mahal dari sistem PLTS adalah baterai sehingga pembangunan PLTS masih sangat terbatas. Pembangkit Listrik Tenaga Surya merupakan solusi pembangkit listrik dengan energi terbarukan yang dapat diaplikasikan baik secara komunal maupun bersifat mandiri. Peran utama *storage system* khususnya baterai menjadi dasar keberlangsungan energi yang dapat disalurkan dalam sistem PLTS jenis *off-grid* (Rusiana Iskandar dkk., 2021). Baterai merupakan cara paling praktis untuk menyimpan tenaga listrik yang dihasilkan oleh rangkaian modul fotoVoltaik. Desain yang kurang baik atau ukuran baterai yang tidak tepat dapat mengurangi umur pakai, berkurangnya energi, kerusakan, hingga bahaya keselamatan pada pengguna. Baterai *lead acid* memiliki efisiensi 85% dan baterai *lithium ion* memiliki efisiensi 95%. Setiap baterai memiliki umur pakai dan bergantung pada perilaku penggunaan serta temperatur pengoperasian. baterai VRLA merupakan sumber listrik cadangan untuk menjamin kontinuitas pengoperasian sistem tenaga listrik. *State of Health* (SoH) dari baterai secara langsung akan mempengaruhi stabilitas sistem tenaga listrik, untuk itu evaluasi terhadap nilai SoH dari baterai merupakan hal yang sangat penting. Estimasi SoH baterai yang akurat akan memberikan jaminan yang andal untuk sistem. Penggunaan baterai sebagai sumber daya listrik cadangan harus memperkirakan tambahan jumlah pelanggan listrik dan pemantauan terhadap kondisi SoH dari baterai (Yu dkk., 2023).

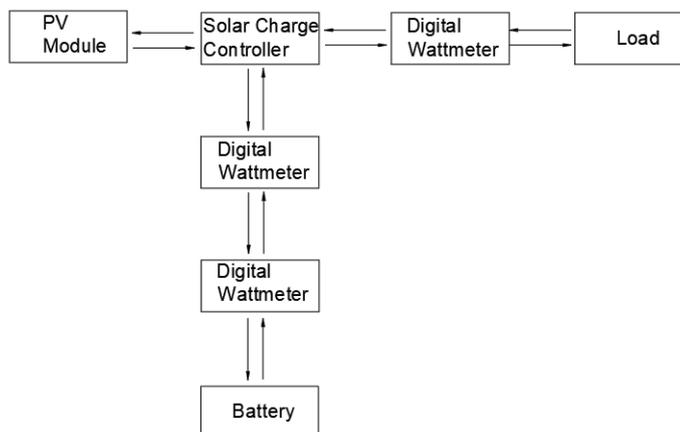
Beberapa penelitian yang dilakukan harus didasarkan atas pemahaman dasar tentang baterai termasuk beberapa istilah penting yang sering digunakan tentang baterai diantaranya kapasitas nominal, *state of charge* (SoC), *depth of discharge* (DoD), *deep discharge*, tegangan *end of discharge*, *round trip efficiency*, *overcharge*, *state of health* (SoH), *self discharge rate*, *swallow discharge*, siklus, *low Voltage disconnection* (LVD), dan lain-lain. Pengisian baterai dilakukan dengan memperhatikan beberapa ketentuan yaitu dengan memperhatikan *c-rate* baterai, tegangan dan arus pengisian yang tidak terlalu besar. Jika pengisian tidak memperhitungkan hal tersebut maka akan terjadi pembentukan gas dan berkurangnya cairan. Pembentukan gas dengan tekanan rendah akan terperangkap di dalam baterai yang kemudian akan kembali bereaksi menjadi air (Ma'arif & Suprpto, 2023). Pembentukan gas hidrogen yang mengandung tekanan tinggi akan dialirkan melalui katup sehingga kadar cairan elektrolit didalam baterai berkurang. Ruang baterai harus memiliki ventilasi yang cukup untuk membuang kadar gas hirogen karena jika tidak, kadar gas hidrogen yang melebihi 4% dapat bereaksi dengan oksigen dan bila terjadi percikan api akan mengakibatkan ledakan, oleh karena itu perlu ada peringatan tertulis pada ruang baterai untuk tidak merokok. Pemeriksaan terhadap katup baterai harus rutin dilakukan untuk menghindari kehilangan gas dan oksigen yang tidak perlu pada tekanan rendah, kehilangan oksigen akibat rusaknya katup akan mengakibatkan kerusakan pada baterai yang tidak dapat diperbaiki. Pelepasan energi baterai yang mencapai *deep discharge* akan mengakibatkan berkurangnya konsentrasi asam pada baterai dan menimbulkan sulfida pada terminal baterai. Efek munculnya gas akan menimbulkan korosi pada terminal positif sementara pengisian baterai yang tidak mencapai status penuh akan menimbulkan korosi pada terminal negatif baterai. Proses pengisian dan pelepasan energi baterai harus memperhatikan ketentuan sehingga baterai dapat berfungsi dengan baik dan memiliki umur pakai yang lebih lama. Proses pengisian dan pelepasan energi pada baterai harus dilakukan secara rutin agar baterai siap digunakan. Untuk pasokan listrik yang tidak stabil dapat menggunakan C-rate dengan kapasitas C10 dan C15 untuk mendukung proses *fastcharging* (Simanjuntak dkk., 2021).

Siklus baterai merupakan ukuran pengisian dan pelepasan energi baterai. Satu siklus adalah satu kali pengisian dan pelepasan energi. Baterai yang baik memiliki siklus antara 1500 hingga 1825 siklus atau di atasnya, dengan kata lain baterai yang baik dan normal akan memiliki usia pakai kurang lebih selama 5 tahun. Untuk menjaga kondisi baterai selalu dalam keadaan baik, diperlukan pemeliharaan dengan memperhatikan aspek-aspek teknis. Aspek-aspek teknis tersebut diantaranya adalah menjaga temperatur baterai pada batas temperatur 20 °C karena kenaikan temperatur 10°C akan mengakibatkan berkurangnya setengah usia baterai, untuk itu temperatur dalam ruang baterai perlu dijaga dengan memberikan ventilasi ruang baterai yang cukup dan menghindarkan baterai dari terkena sinar matahari langsung. Selain faktor temperatur, tingkat kedalaman pelepasan energi baterai atau *depth of discharge* juga menentukan usia pakai. Untuk DoD baterai dibawah 75%, dapat memperpanjang usia pakai baterai hingga 5 tahun. Semakin rendah DoD maka akan semakin lama usia pakai baterai dapat bertahan. Untuk nilai DoD dibawah 30% akan mengakibatkan efisiensi rendah pada sistem. Di dalam sebuah sistem bank baterai, kondisi SoH dan SoC pada masing-masing baterai harus sama untuk meningkatkan kinerja pelayanan beban dan efisiensi pembangkitan daya. Sebaiknya bank baterai terdiri dari baterai dengan jenis, kapasitas nominal, pabrikan, dan teknologi yang sama, agar tidak terjadi kerusakan dini. Untuk kapasitas nominal baterai yang tidak sama, maka akan ada baterai yang cepat terisi penuh dan ada juga yang lambat terisi penuh. Sebaliknya pada proses pelepasan baterai ada baterai yang lebih awal habis dan ada juga baterai yang lebih lama habis. Keadaan demikian akan menyebabkan ketidakstabilan pada sistem beterei dan berujung pada kemungkinan kerusakan. Ciri-ciri baterai dalam kondisi buruk adalah meningkatnya tahanan internal didalam baterai yang biasanya ditandai dengan pengisian yang lebih cepat dan pelepasan tegangan baterai yang lebih awal. Ciri-ciri selanjutnya adalah dengan cepatnya temperatur baterai naik, sehingga temperaur baterai dalam waktu singkat mencapai temperatur yang tinggi (Idris, 2020). Berikutnya terjadinya penyimpangan tegangan baterai pada rangkaian terbuka yang lebih besar dari 0,5 Volt, yang sekaligus menandakan kondisi SoC dan SoH baterai yang tidak sama. Sebaiknya susunan bank baterai menggunakan susunan bank baterai yang tidak melebihi dari konfigurasi 4 sting. Elektrolit gel merupakan aspek penting dan indikator baik dan buruknya kinerja dari sebuah baterai VRLA. Pada keadaan operasional dan non operasional baterai selalu mengalami penyusutan kapasitas dari tahun ke tahun karena kenaikan terjadinya tahanan internal baterai sebagai akibat proses kimiawi yang terjadi didalam baterai tersebut. Pada umumnya ukuran untuk menunjukkan kondisi ideal sebuah baterai adalah ditunjukkan dengan SoH. (Chikkatti dkk., 2023). Baterai VRLA merupakan bagian penting dari sistem catu daya untuk sebuah pusat data. Terjadinya kegagalan baterai akan mengancam keselamatan operasional pusat data. Prediksi terhadap kegagalan baterai merupakan hal yang sangat penting untuk menjamin keselamatan operasional pusat data. Untuk itu perlu menganalisis karakteristik kerja baterai untuk mengetahui kondisi dan prediksi kerusakan baterai (Pang dkk., 2023).

2. METODE

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode eksperimen yaitu mengumpulkan data dan melaksanakan perancangan serta kemudian melakukan pengujian terhadap hasil perancangan. Pengujian dilaksanakan berulang kali untuk mendapatkan hasil dan data yang lebih akurat dan representatif sehingga setelah dianalisa dan dilakukan pembahasan dapat di temukan kesimpulan ilmiah yang dapat

dipertanggungjawabkan. Pemilihan baterai dengan usia pakai yang berbeda bertujuan untuk mengetahui tingkat DoD baterai berdasarkan usia pakai sedangkan baterai dengan merek yang berbeda dan kapasitas yang sama bertujuan untuk mengetahui tingkat DoD baterai dari masing-masing merek. Sedangkan untuk usia pakai, merek dan pembebanan yang sama namun dengan kapasistas baterai yang berbeda bertujuan untuk mengetahui apakah tingkat DoD sebanding dengan kapasitas baterai. Demikian pula halnya untuk usia pakai, merek dan kapasitas yang sama namun dengan pembebanan yang bertambah dua kali lipatnya. Dengan pembebanan yang bertambah dua kali lipatnya untuk baterai yang sama apakah tingkat DoD juga sebanding dengan tingkat pembebanannya. Peralatan yang digunakan adalah baterai 24 Volt 100 Ah merek x dengan usia pakai 6 tahun, baterai 24 Volt 100 Ah merek y dengan usia pakai 2 tahun, baterai 24 Volt 20 Ah merek y dengan usia pakai 0,5 tahun, baterai 24 Volt 12 Ah merek y dengan usia pakai 0,5 tahun, inverter 2000 watt, multimeter digital, *circuit breaker* 100 ampere, *solar charge controller* dan peralatan pendukung lainnya.



Gambar 1: Diagram Blok Peralatan Penelitian

Proses pengisian baterai sesuai diagram blok penelitian pada gambar 1, menggunakan modul *photoVoltaic*. Pelepasan energi baterai dalam penelitian ini dilakukan dengan menonaktifkan modul *photoVoltaic*. Hal ini dilakukan agar beban hanya dilayani dengan menggunakan energi yang berasal dari pelepasan energi baterai, sehingga akan diketahui unjuk kerja baterai dengan pembebanan dan berdasarkan usia pakai. Pembebanan dilakukan sebesar 400 watt untuk baterai 24 Volt 100 Ah merek x dengan usia pakai 6 tahun dan baterai 24 Volt 100 Ah merek y dengan usia pakai 2 tahun. Untuk pembebanan 80 watt dan 160 watt dilakukan dengan menggunakan baterai 24 Volt 20 Ah merek y dengan usia pakai 0,5 tahun. Sedangkan untuk pembebanan 48 watt untuk baterai 24 Volt 12 Ah merek y dengan usia pakai 0,5 tahun. Pembebanan dilakukan dengan persentasi pembebanan yang sama yaitu sebesar 16,7% sedangkan untuk baterai 24 Volt 20 Ah dengan usia pakai 0,5 tahun dilakukan pembebanan pertama 80 watt dan kemudian pembebanan kedua untuk baterai yang berbeda namun dengan kapasitas nominal yang sama, pembebanan dilakukan sebesar 160 watt atau sebesar 33,3%. Penelitian dilakukan dengan melaksanakan pengujian melalui pengukuran sampai ketika baterai mengalami pemutusan oleh inverter. Hasil pengujian berdasarkan kapasitas nominal yang sama untuk kedua baterai dengan merek yang berbeda yaitu 24 Volt 100 Ah dengan pembebanan 400-watt dengan usia pakai yang berbeda dapat dilihat pada tabel 1 dan tabel 2 berikut:

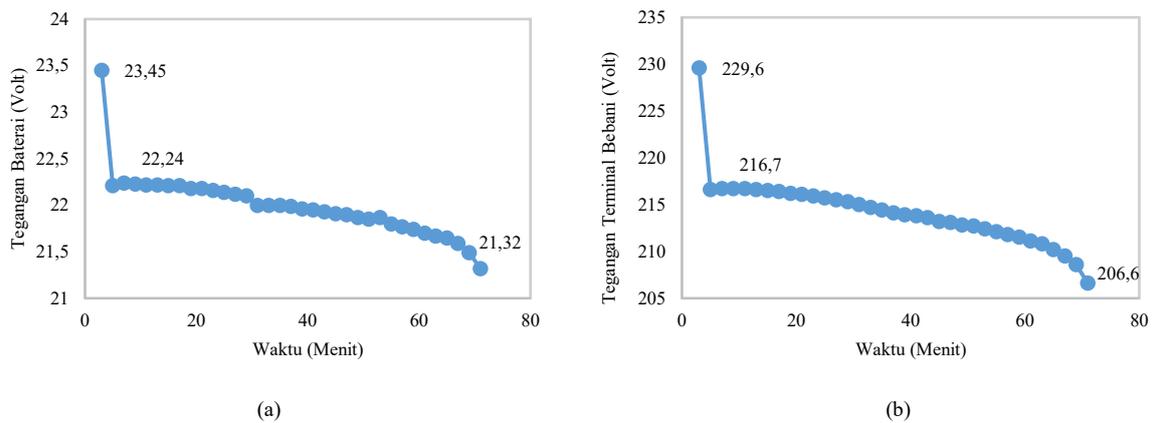
Tabel 1: Pembebanan 400 watt pada Baterai 24 Volt 100 Ah Merek X dengan Usia Pakai 6 Tahun

Lama Pembebanan (menit)	Waktu (WIB)	Tegangan Baterai (V)	Arus Baterai (A)	Arus Inverter (A)	Tegangan Terminal Beban (V)	Arus Beban (A)	Beban (W)	Faktor Daya
3	14:50	23,45	18,24	16,14	229,6	1,67	374	1
5	14:53	22,21	17,94	15,87	216,6	1,62	352,8	1
7	14:55	22,24	17,1	15,76	216,7	1,62	353,3	1
9	14:57	22,23	17,99	15,83	216,7	1,62	353,4	1
11	14:59	22,22	17,13	15,76	216,7	1,62	353,4	1
13	15:01	22,22	17,1	15,8	216,6	1,62	353	1
15	15:03	22,21	17,92	15,76	216,5	1,63	353,3	1
17	15:05	22,21	17,97	15,76	216,4	1,62	352,8	1
19	15:07	22,18	17,9	15,83	216,2	1,62	352,5	1
21	15:09	22,18	17,91	15,8	216,1	1,62	352,2	1
23	15:11	22,16	17,91	15,72	215,9	1,62	351,9	1
35	15:23	22	17,91	15,72	214,4	1,62	348,1	1
37	15:25	21,99	17,82	15,72	214,1	1,62	347,5	1
45	15:33	21,91	17,88	15,68	213,2	1,61	345,5	1
47	15:35	21,9	17,88	15,68	213,1	1,61	345,3	1

61	15:49	21,7	17,69	15,57	211,1	1,61	340,22	1
63	15:51	21,67	17,75	15,57	210,8	1,6	339,3	1
65	15:53	21,65	17,69	15,64	210,2	1,61	339	1
67	15:55	21,59	17,8	15,64	209,5	1,6	337,2	1
69	15:57	21,49	17,67	15,57	208,6	1,6	334,9	1
71	15:59	21,32	17,56	15,48	206,6	1,59	330,1	1

Sumber: data eksperimen 2025

Pada tabel 1 terlihat bahwa pembebanan dilakukan selama 71 menit dengan data yang tidak sepenuhnya ditampilkan secara lengkap dari menit ke menit, namun data yang ditampilkan pada tabel 1 dapat merepresentasikan data keseluruhan pengukuran dilakukan pada pukul 14:50 WIB sampai dengan pukul 15:59 WIB. Pada tabel juga ditampilkan besaran-besaran listrik lain yang mengikuti besaran listrik untuk tegangan baterai. Untuk dapat merepresentasikan secara lengkap data tersebut maka pada gambar 1 ditampilkan grafik yang merupakan representasi lengkap dari hasil penelitian melalui pengukuran besaran listrik.



Gambar 2: Grafik karakteristik baterai 24 V 100 Ah merek x dengan usia pakai 6 tahun dengan pembebanan 400 watt (a) penurunan tegangan baterai (b) penurunan tegangan terminal beban

Pada gambar 2 ditampilkan grafik pelepasan energi untuk baterai 24 Volt 100 Ah merek x dengan usia pakai 6 tahun, sesuai dengan standar karakteristik grafik untuk pelepasan energi baterai terlihat bahwa grafik menunjukkan penurunan tegangan baterai dari waktu ke waktu setelah diberikan pembebanan tetap 400 watt. Tegangan baterai pada saat awal sebesar 23,45 Volt setelah selama 71 menit pembebanan, tegangan baterai sesaat sebelum inverter trip sebesar 21,32 Volt. Lama pembebanan pada setiap tabel memiliki selisih 1 sampai 3 menit, hal ini disebabkan karena untuk perkiraan usia pakai dan merek tertentu memiliki nilai besaran listrik yang cepat berubah dari menit ke menit. Sedangkan untuk usia pakai dan merek lainnya cenderung konstan sehingga untuk pengambilan data dari menit ke menit dibedakan untuk representasi data yang lebih efektif.

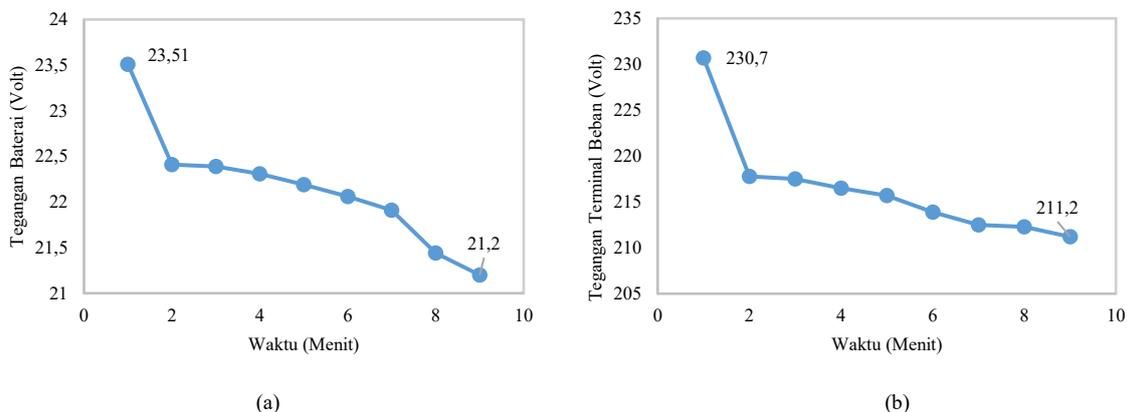
Tabel 2: Pembebanan 400 watt pada Baterai 24 Volt 100 Ah Merek Y dengan Usia Pakai 2 Tahun

Lama Pembebanan (menit)	Waktu (WIB)	Tegangan Baterai (V)	Arus Baterai (A)	Arus Inverter (A)	Tegangan Terminal Beban (V)	Arus Beban (A)	Beban (W)	Faktor Daya
1	15:30	23,51	16,82	16,01	230,7	0	0	0
2	15:32	22,41	18,75	16,41	217,8	1,69	369,1	1
4	15:34	22,39	18,67	16,37	217,5	1,69	368,1	1
6	15:36	22,31	18,7	16,33	216,5	1,68	365,7	1
8	15:38	22,19	18,7	16,29	215,7	1,68	362,3	1
10	15:40	22,06	18,45	16,14	213,9	1,67	359,3	1
12	15:42	21,91	18,4	16,1	212,5	1,67	354,3	1
14	15:44	21,44	18,29	15,87	212,3	1,65	340,6	1
15	15:45	21,2	18,1	14,9	211,2	1,65	340,1	1

Sumber: data eksperimen 2025

Pembebanan pada baterai 24 Volt 100 Ah merek y dengan usia pakai 2 tahun, menunjukkan pembebanan 400 watt yang cukup singkat yaitu 15 menit. Pembebanan tersebut diterapkan sama untuk baterai 24 Volt 100 Ah merek x dengan usia pakai 6 tahun. Selama 15 menit dari tegangan baterai 23,51 Volt, penurunan tegangan baterai secara signifikan turun hingga mencapai tegangan pemutusan sebesar 21,2 Volt. Pada tegangan terminal beban juga mengalami hal yang sama yaitu penurunan tegangan terminal beban dari 230,7 Volt

tegangan ac menjadi 211,2 Volt tegangan ac. Tabel 2 tersebut menunjukkan bahwa daya tahan baterai merek x dengan usia pakai 2 tahun untuk pembebanan 400 watt adalah kurang baik jika dibandingkan dengan merek baterai sebelumnya.



Gambar 3: Grafik karakteristik baterai 24 V 100 Ah merek y dengan usia pakai 2 tahun dengan pembebanan 400 watt (a) penurunan tegangan baterai (b) penurunan tegangan terminal beban.

Karakteristik baterai 24 Volt 100 Ah merek y dengan usia pakai 2 tahun yang ditunjukkan pada gambar 3, menunjukan baterai tidak mampu mempertahankan stabilitas tegangan output pada waktu yang cukup lama. Hal tersebut disebabkan kualitas produk merek y kurang baik dibandingkan dengan kualitas produk merek x. Dari hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan peneliti untuk baterai merek x menunjukkan hasil yang kurang lebih sama, namun untuk merek y bagaimana karakteristik baterai tersebut, belum pernah ada penelitian yang dilakukan untuk baterai jenis tersebut. Pada gambar 3, grafik terlihat menurun tajam dalam waktu yang singkat meskipun besaran-besaran lain seperti arus baterai, arus pembebanan, dan arus inverter secara stabil mengalir, namun karena karakteristik di dalam baterai menyebabkan pembebanan sebesar 16,7% hanya mampu bertahan selama 15 menit.

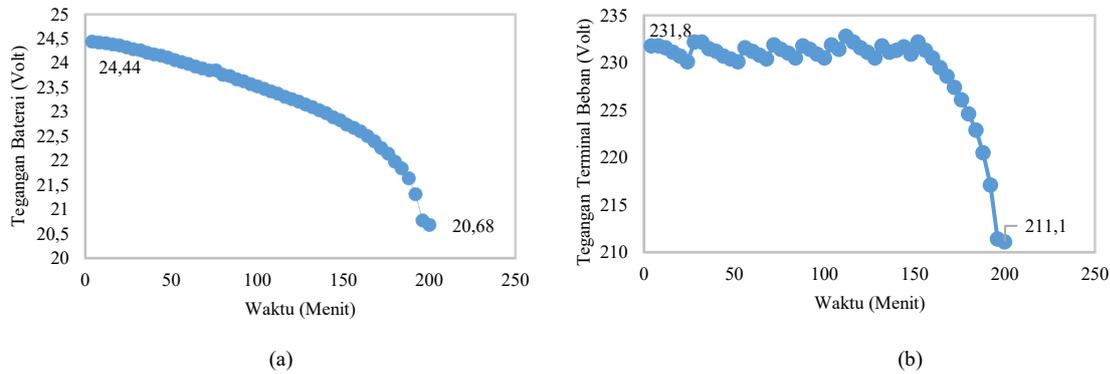
Tabel 3: Pembebanan 80 watt pada Baterai 24 Volt 20 Ah Merek Y dengan Usia Pakai 0,5 Tahun

Lama Pembebanan (menit)	Waktu (WIB)	Tegangan Baterai (V)	Arus Baterai (A)	Arus Inverter (A)	Tegangan Terminal Beban (V)	Arus Beban (A)	Beban (W)	Faktor Daya
4	10:16	24,44	2,58	4,64	231,8	0,35	82,7	1
8	10:20	24,42	2,56	4,54	231,8	0,35	82,9	1
12	10:24	24,41	2,53	4,54	231,6	0,35	82,9	1
16	10:28	24,38	2,53	4,48	231,1	0,35	82,7	1
20	10:32	24,36	2,5	4,53	230,7	0,35	82,3	1
24	10:36	24,32	2,47	4,49	230,1	0,35	82,2	1
28	10:40	24,28	2,56	4,55	232,2	0,35	83,2	1
32	10:44	24,26	2,53	4,51	232,2	0,35	82,7	1
36	10:48	24,21	2,53	4,51	231,5	0,35	82,9	1
40	10:52	24,18	2,53	4,51	231,2	0,35	82,8	1
44	10:56	24,15	2,53	4,52	230,7	0,35	82,6	1
48	11:00	24,11	2,53	4,52	230,4	0,35	82,4	1
56	11:08	24,02	2,53	4,63	231,6	0,35	83,1	1
80	11:32	23,76	2,58	4,63	231	0,35	83	1
164	12:56	22,5	2,69	4,78	229,5	0,35	82,4	1
168	13:00	22,4	2,72	4,76	228,6	0,35	81,9	1
172	13:04	22,26	2,69	4,66	227,4	0,35	81,3	1
176	13:08	22,14	2,69	4,66	226,1	0,35	80,5	1
180	13:12	21,98	2,68	4,63	224,6	0,35	79,7	1
184	13:16	21,84	2,66	4,61	222,9	0,35	78,7	1
188	13:20	21,64	2,64	4,63	220,5	0,35	77,5	1
192	13:24	21,31	2,58	4,61	217,1	0,34	75,7	1
196	13:28	20,77	2,53	4,49	211,4	0,34	72,8	1

200	13:29	20,68	2,53	4,51	211,1	0,34	72,7	1
-----	-------	-------	------	------	-------	------	------	---

Sumber: data eksperimen 2025

Pembebanan 80 watt untuk baterai, atau pembebanan sebesar 16,7% dari kapasitas nominal baterai 24 Volt 20 Ah merek y dengan usia pakai 0,5 tahun, dapat bertahan selama 200 menit atau 3 jam 20 menit. Pada kondisi ini baterai masih dalam keadaan baik atau nilai SoC dari baterai masih diatas 95%, sehingga pembebanan konstan 80 watt dapat berlangsung cukup lama. Hal ini berbeda dengan ketahanan baterai untuk merek yang sama pada kapasitas nominal baterai 24 Volt 100 Ah dengan usia pakai 2 tahun, meskipun pembebanan yang diterapkan sama yaitu sebesar 16,7% pembebanan.



Gambar 4: Grafik karakteristik baterai 24 V 20 Ah merek y dengan usia pakai 0,5 tahun dengan pembebanan 80 watt (a) penurunan tegangan baterai (b) penurunan tegangan terminal beban

Grafik pada gambar 4, menunjukkan stabilitas tegangan baterai dengan waktu yang cukup lama yaitu 200 menit. Walaupun pembebanan pada baterai 24 Volt 20 Ah merek y dengan usia pakai 0,5 tahun dapat lebih stabil dalam waktu yang lebih lama, namun proteksi inverter membatasinya pada tegangan 20,68 Volt. Hal tersebut bertujuan agar inverter dapat bekerja optimal bersama baterai sehingga batas usia pakai dapat berlangsung selama 1825 siklus baterai.

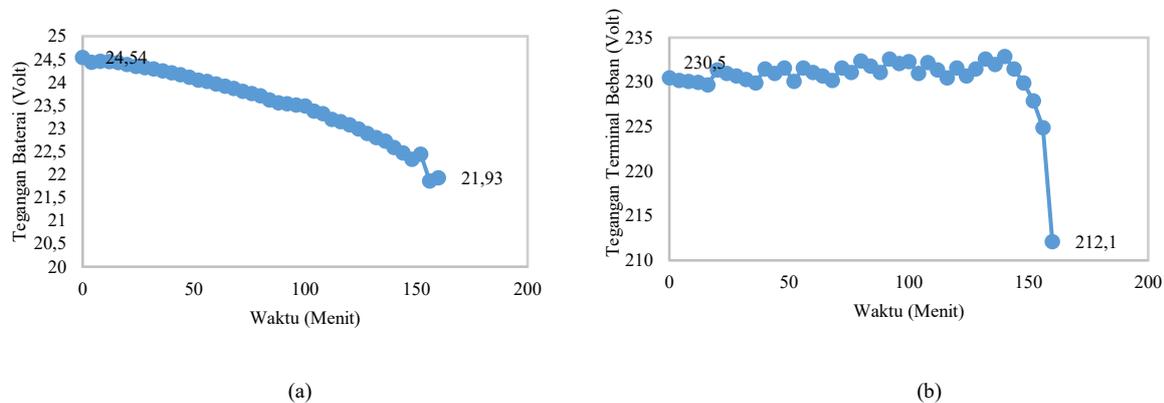
Tabel 4: Pembebanan 48 watt pada Baterai 24 Volt 12 Ah Merek Y dengan Usia Pakai 0,5 Tahun

Lama Pembebanan (menit)	Waktu (WIB)	Tegangan Baterai (V)	Arus Baterai (A)	Arus Inverter (A)	Tegangan Terminal Beban (V)	Arus Beban (A)	Beban (W)	Faktor Daya
4	15:20	24,44	3,14	3,16	230,2	0,21	48,56	0,97
8	15:24	24,46	3,06	3,14	230,1	0,21	48,5	0,97
12	15:28	24,45	3,06	3,07	230	0,21	48,5	0,97
16	15:32	24,43	3,06	3,12	229,7	0,21	48,4	0,97
20	15:36	24,39	3,06	3,07	231,4	0,21	48,8	0,97
24	15:40	24,35	3,06	3,13	231	0,21	48,7	0,97
28	15:44	24,32	3,06	3,41	230,7	0,21	48,6	0,97
128	09:32	22,89	3,17	3,22	231,5	0,21	48,9	0,97
132	09:36	22,8	3,2	3,23	232,6	0,21	49,2	0,97
136	09:40	22,73	3,17	3,24	232	0,21	49	0,97
140	09:44	22,59	3,2	3,2	232,9	0,21	49,4	0,97
144	09:48	22,47	3,2	3,24	231,5	0,21	49	0,97
148	09:52	22,33	3,17	3,19	229,9	0,21	48,4	0,97
152	09:56	22,44	3,17	3,17	227,9	0,21	47,8	0,97
156	10:00	21,86	3,14	3,15	224,9	0,21	46,6	0,97
160	10:02	21,93	2,13	2,12	212,1	0,2	43,4	0,97

Sumber: data eksperimen 2025

Baterai 24 Volt 12 Ah merek y dengan usia pakai 0,5 tahun, dengan pembebanan tetap sebesar 48-watt atau sebesar 16,7%, mampu bertahan menyuplai beban selama 160 menit. Dengan kapasitas nominal yang lebih rendah dari baterai 24 Volt 20 Ah, baterai 24 Volt 12 Ah merek y dengan usia pakai 0,5 tahun, mampu menjaga kestabilan tegangan yang cukup lama. Meskipun jika dibandingkan kedua baterai tersebut, maka pemutusan tegangan baterai oleh inverter untuk baterai 24 Volt 12 Ah lebih cepat 40 menit. Tegangan terminal baterai pada saat awal pembebanan sebesar 230,2 Volt, dan pada akhir pelepasan mencapai 212,1-Volt atau turun sebesar 8,1 Volt. Waktu pengukuran dilakukan mulai pukul 15:20 WIB dan dilanjutkan keesokan harinya sampai dengan pukul 10:02 WIB. Selama 4 menit sekali pengambilan

data melalui alat ukur dilakukan, hal ini agar perubahan besaran-besaran listrik dapat lebih representatif untuk dianalisa meskipun kondisi baterai masih tergolong baru atau dengan nilai SoC diatas 98%. Baterai 24 Volt 12 Ah atau dengan kapasitas nominal energi sebesar 288 Wh memiliki nilai *deep of discharge* sebesar 44%. Sementara itu menurut standar baterai *lead acid* nilai DoD tersebut masih dalam batas standar yang diizinkan yaitu diatas 30% dan dibawah 80%, dengan demikian efisiensi baterai dapat maksimum dilakukan. Secara umum untuk usia pakai baterai yang tidak terlalu lama, maka baterai masih dalam keadaan baik terkecuali jika mendapat perlakuan yang dapat merusak kondisi baterai. Perlakuan yang buruk terhadap penggunaan baterai misalnya dengan memberikan tegangan dan arus pengisian yang berlebih. Seringnya terjadinya *overcharging* dan terjadinya perlakuan pelepasan energi yang berlebihan pada baterai akan menyebabkan baterai cepat menuju pada kondisi abnormal.



Gambar 5: Grafik karakteristik baterai 24 V 12 Ah merek y dengan usia pakai 0,5 tahun dan pembebanan 48 watt (a) penurunan tegangan baterai (b) penurunan tegangan terminal beban

Baterai 24 V 12 Ah merek y dengan usia pakai 0,5 tahun dengan pembebanan 48 watt seperti yang ditunjukkan pada gambar 5, bahwa baterai mampu bertahan stabil selama 160 menit. Kondisi baterai pada kondisi demikian dapat dikatakan pada kondisi normal. Untuk tegangan output ac yang dihasilkan melalui *inverter*, sebagaimana terlihat pada gambar 5b, baterai cenderung stabil dan sedikit berfluktuasi pada saat tegangan *end of discharge*. Baterai menunjukkan penurunan yang signifikan yaitu pada tegangan ac sebesar 212,1 Volt. Untuk baterai dengan usia pakai 0,5 tahun diberikan tiga jenis pengujian yaitu dua pengujian untuk usia pakai dan kapasitas yang sama, namun pembebanannya berbeda yaitu 16,7% dan 33%. Hal ini untuk mengetahui apakah dengan pembebanan yang besarnya dua kali lipat akan menyebabkan tingkat DoD berkurang secara linier. Untuk pengujian yang ketiga dilakukan untuk usia pakai dan kapasitas yang berbeda namun pembebanannya sama (16,7%). Hal ini untuk mengetahui apakah dengan kapasitas baterai yang berbeda dengan usia pakai dan pembebanan yang sama, akan mengakibatkan tingkat DoD yang sama atau sebaliknya. Sedangkan untuk usia pakai baterai yang lebih lama dengan usia 2 tahun dan 6 tahun, maka perbandingan bebannya tetap sama, yaitu 16,7% (400 watt), sehingga dengan demikian persentase pembebanan akan tetap sama.

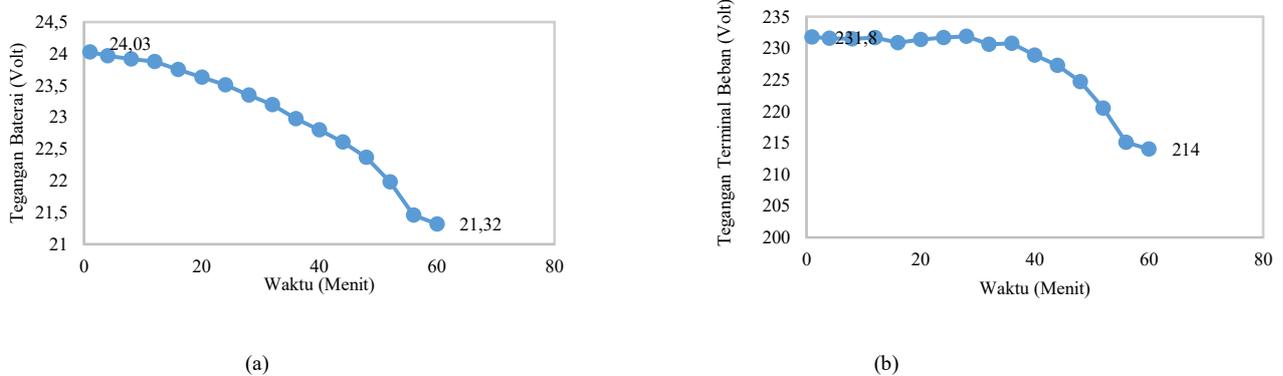
Tabel 5: Pembebanan 160 watt pada Baterai 24 Volt 20 Ah Merek Y dengan Usia Pakai 0,5 Tahun

Lama Pembebanan (menit)	Waktu (WIB)	Tegangan Baterai (V)	Arus Baterai (A)	Arus Inverter (A)	Tegangan Terminal Beban (V)	Arus Beban (A)	Beban (W)	Faktor Daya
1	10:25	24,03	7,54	7,55	231,8	0	0	0
4	10:29	23,97	7,46	7,49	231,6	0,65	148,7	0,97
8	10:33	23,92	7,43	7,36	231,5	0,65	147,5	0,97
12	10:37	23,88	7,49	7,48	231,7	0,65	147,2	0,97
16	10:41	23,75	7,41	7,23	230,9	0,64	146,7	0,97
20	10:45	23,63	7,46	7,4	231,4	0,65	147,3	0,97
24	10:49	23,51	7,51	7,48	231,7	0,65	147,5	0,97
28	10:53	23,35	7,54	7,55	231,9	0,65	147,6	0,97
32	10:57	23,2	7,51	7,5	230,6	0,64	146	0,97
36	11:01	22,98	7,6	7,53	230,8	0,64	146,4	0,97
40	11:05	22,8	7,57	7,57	228,9	0,64	145,2	0,97
44	11:09	22,61	7,57	7,5	227,3	0,64	143,6	0,97
48	11:13	22,37	7,54	7,44	224,7	0,64	141,6	0,97
52	11:17	21,98	7,43	7,44	220,5	0,63	137,5	0,97
56	11:21	21,46	7,43	7,31	215,1	0,63	133	0,97

60	11:25	21,32	7,43	7,31	214	0,63	133	0,97
----	-------	-------	------	------	-----	------	-----	------

Sumber: data eksperimen 2025

Tabel 5 menunjukkan pembebanan terhadap baterai 24 Volt 20 Ah merek y dengan usia pakai 0,5 tahun. Pengujian dilakukan dengan menaikkan dua kali lipat pembebanan dari yang sebelumnya. Pada pengujian yang pertama, baterai 24 Volt 20 Ah merek y dengan usia pakai 0,5 tahun diberi pembebanan sebesar 80 watt. Kemudian dengan jenis, pabrikan, merek, dan teknologi baterai yang sama untuk kapasitas nominal baterai 24 Volt 20 Ah diberi pembebanan sebesar 160 watt. Dari hasil pengukuran menunjukkan bahwa baterai dalam hal ini mengalami penurunan tegangan hingga sampai pada tegangan pemutusan sebesar 21,32 Volt dc dari tegangan awal baterai sebesar 24,03 Volt. Pengukuran dimulai pada pukul 10.25 wib sampai dengan pukul 11.25 wib. Waktu ketika kapan dimulainya pengukuran tidak mempengaruhi hasil pengujian, karena pengujian dilakukan hanya untuk proses pelepasan energi baterai dan bukan pada saat pengisian. Dengan demikian pengukuran tidak dipengaruhi oleh kondisi intensitas matahari. Untuk pembebanan 160 watt dengan beban lampu jenis led, maka sebagaimana yang terdapat pada tabel 5, hasil pengukuran daya ril berfluktuasi. Pada umumnya lampu led memiliki rating daya ril dibawah nilai rating nominalnya sebagaimana yang tertulis pada nameplate lampu led. Daya lampu led 160 watt yang diukur memiliki nilai ril kurang dari 160 watt dengan faktor daya dibawah satu. Hal tersebut menunjukkan bahwa lampu led dengan intensitas cahaya yang sama dengan lampu lain, akan menyerap energi listrik yang lebih hemat.



Gambar 6: Grafik karakteristik baterai 24 V 20 Ah merek y dengan usia pakai 0,5 tahun dan pembebanan 160 watt (a) penurunan tegangan baterai (b) penurunan tegangan terminal beban

Pembebanan 160 watt atau pembebanan sebesar 33,3% untuk baterai 24 V 20 Ah merek y, dengan usia pakai 0,5 tahun mencapai tegangan end of discharge pada tegangan 21,32 Volt. Hasil pengujian menunjukkan tegangan baterai turun sebesar 11,3% dari tegangan awal pembebanan. Jika dibandingkan dengan pembebanan 16,7%, maka penurunan tegangan akibat penambahan beban 16,7% menjadi 33% akan menyebabkan tegangan end of discharge dari baterai mengikuti pola perubahan pembebanan. Inverter merupakan peralatan utama yang menentukan nilai tegangan end of discharge, sehingga ketepatan dan sensitivitas tegangan end of discharge tergantung dari sensitivitas inverter itu sendiri.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian dari kelima baterai lead acid jenis VRLA yaitu baterai 24 Volt 100 Ah merek x dengan usia pakai 6 tahun (klasifikasi A), baterai 24 Volt 100 Ah merek y dengan usia pakai 2 tahun (klasifikasi B), baterai 24 Volt 20 Ah merek y dengan usia pakai 0,5 tahun dengan pembebanan 80 watt (klasifikasi C), baterai 24 Volt 20 Ah merek y dengan usia pakai 0,5 tahun dengan pembebanan 160 watt (klasifikasi D), baterai 24 Volt 12 Ah merek y dengan usia pakai 0,5 tahun (klasifikasi E) menunjukkan unjuk kerja masing-masing baterai VRLA terhadap pembebanan dan usia pakai. Hasil penelitian berdasarkan pengujian yaitu dengan melakukan pengukuran besaran-besaran listrik diperoleh hasil data pada tabel 6 berikut:

Tabel 6: Perbandingan Karakteristik Baterai Terhadap Pembebanan dan Usia Pakai

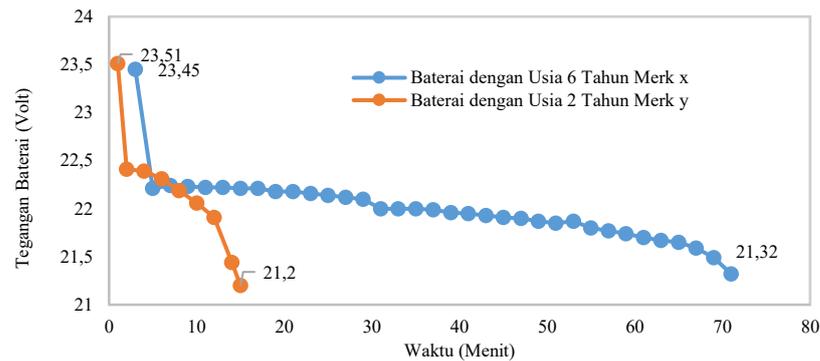
Klasifikasi Baterai	Usia Pakai (Tahun)	Teg. Awal Baterai (V)	Teg. Trip Baterai (V)	Teg. Awal Inverter (V)	Teg. Trip Inverter (V)	Daya Beban (Watt)	Persentase Pembebanan (%)	Lama Pembebanan (Menit)	Selisih Teg. Baterai	Penurunan Teg. Baterai (%)	DOD (%)
Klasifikasi A	6	23,45	21,32	230	206,6	400	16,7%	71	2,13	9,1%	20%
Klasifikasi B	2	23,51	21,2	230,7	211,2	400	16,7%	15	2,31	9,8%	4%
Klasifikasi C	0,5	24,86	20,68	230,1	211,1	80	16,7%	200	4,18	16,8%	56%

Klasifikasi D	0,5	24,83	21,32	231,8	214	160	33,3%	60	3,51	14,1%	33%
Klasifikasi E	0,5	25,4	21,83	230,5	212,1	48	16,7%	160	3,57	14,1%	44%

Sumber: data eksperimen 2025

3.1 Unjuk Kerja Baterai Terhadap Usia Pakai

Unjuk kerja baterai klasifikasi A, dengan baterai klasifikasi B memiliki unjuk kerja yang berbeda meskipun memiliki kapasitas yang sama. Berdasarkan hasil penelitian ini menunjukkan bahwa dalam sebuah sistem bank baterai yang besar khususnya untuk PLTS *off-grid* sebaiknya harus menggunakan baterai dari pabrikan, jenis teknologi, SoH dan merek yang sama. Berikut hasil penelitian dan pembahasan dari perbandingan unjuk kerja kedua baterai dengan kapasitas nominal yang sama 24 Volt 100Ah



Gambar 7: Grafik perbandingan unjuk kerja baterai 24 V 100 Ah merek x dengan usia pakai 6 tahun dan baterai 24 V 100 Ah merek y dengan usia pakai 2 tahun.

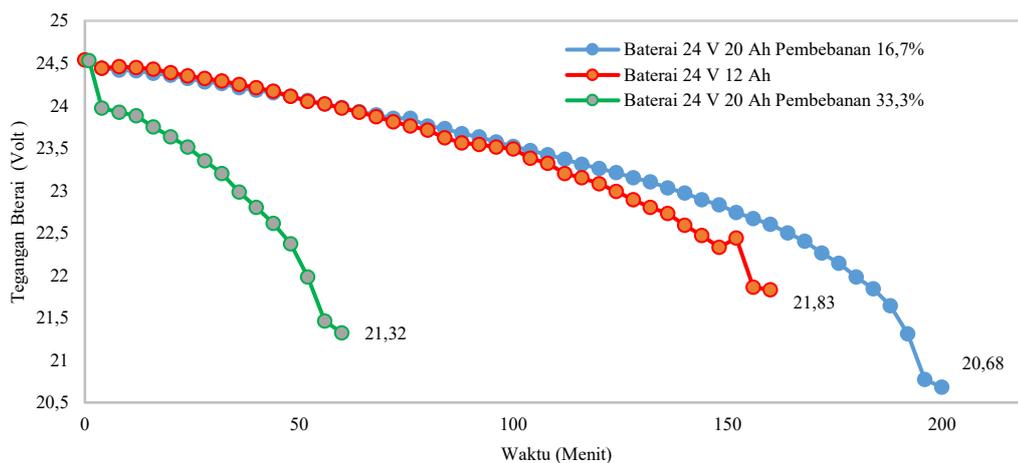
Unjuk kerja baterai VRLA dengan merek yang berbeda menunjukkan perbedaan karakteristik baterai. Hasil penelitian menunjukkan untuk baterai merk x mampu bertahan menyuplai beban secara kontiniu selama 71 menit sedangkan baterai merk y hanya mampu menyuplai beban secara kontiniu selama waktu 15 menit. Usia pakai baterai merk x memiliki usia pakai yang lebih lama yaitu 6 tahun. Usia pakai dari baterai selama 6 tahun sudah melebihi dari batas usia pakai sebuah baterai *lead acid*. Baterai yang biasanya hanya sampai 1825 siklus, atau jika di konversi dalam tahun yaitu kurang lebih selama 5 tahun. Baterai VRLA jenis ini termasuk memenuhi kategori dengan SoH yang normal sekalipun batas DoD yang mampu dipertahankan hanya sampai 20 %. Sedangkan untuk baterai merk y memiliki DoD hanya 4 %, nilai ini jauh dari kategori kondisi baterai yang baik karena effisiensinya sangat rendah, dan jauh dibawah DoD minimal yaitu sebesar 30 %. Faktor yang menyebabkan baterai VRLA merk x bertahan hingga selama usia pakai 6 tahun adalah jenis baterai dan pabrikannya yang membuat kualitas baterai pada mutu tinggi oleh karenanya dari segi harga pembelian harga baterai merk x jauh lebih mahal dua kali lipat dari baterai merk y. Baterai merk x memiliki daya tahan yang baik pada saat *overcharging* dan *deep discharge*, sehingga penguapan gas hidrogen didalam baterai mampu terjaga pada kondisi tekanan rendah dan kadar gas hidrogennya bereaksi kembali secara kimia menjadi cairan di dalam baterai yang menyebabkan tidak berkurangnya cairan elektrolit di dalam baterai.

Dari segi fisik, baterai merk x tidak terlihat memiliki korosi dan kristal sulfida yang dapat menurunkan efisiensi baterai. Meskipun baterai mengalami *self discharging* namun masih dalam kondisi normal. Pengisian baterai menggunakan peralatan proteksi yang baik akan menambah terjaganya baterai dari kenaikan tahanan *internal* baterai. Faktor lain yang menyebabkan terjaganya kondisi baterai adalah perawatan yang rutin dengan selalu membersihkan permukaan baterai sehingga partikel-partikel seperti debu dan sejenisnya tidak menyebabkan dan mempengaruhi kinerja baterai. Temperatur baterai yang terjaga pada suhu dibawah 20°C menyebabkan usia pakai baterai mampu bertahan hingga diatas 5 tahun. Untuk baterai merk y dengan nilai DoD hanya 4% dan dengan pembebanan sebesar 16,7% hanya mampu bertahan selama 15 menit. Hal tersebut menunjukkan bahwa kondisi baterai merk y dengan usia pakai 2 tahun tidak memenuhi standar. Beberapa faktor yang menyebabkan baterai merk y tidak memiliki efisiensi tinggi kemungkinan diantaranya adalah baterai sering dioperasikan dalam keadaan *overcharging*, sehingga standar arus pengisian C10 tidak dipenuhi, atau dengan kata lain arus pengisian untuk baterai 100 Ah dengan arus pengisian 10 Ampere tidak dipenuhi. Jika pembebanan lebih dari 10 ampere akan menyebabkan usia pakai baterai menurun meskipun baterai digunakan untuk sistem PLTS yang nilai arus pengisiannya tergantung intensitas cahaya matahari. Keberadaan *solar charge controller* digunakan untuk membatasi arus pengisian sesuai standar C rate baterai. Jika *solar charge controller* tidak berfungsi dengan baik, maka arus pengisian dan tegangan pengisian tidak dapat dikendalikan dan mungkin akan mencapai diatas nilai yang diizinkan. Jika hal tersebut terjadi cairan elektrolit di dalam baterai selalu berkurang sebagai akibat dari penguapan gas hidrogen bertekanan tinggi. Jika cairan elektrolit berkurang, maka proses pengisian dan penyimpanan energi baterai tidak akan efektif. Demikian juga kemungkinan seringnya baterai dioperasikan diatas suhu 20°C. Kemungkinan lain adalah pabrikan baterai membatasi penggunaan material dengan memilih material yang kurang baik untuk tujuan faktor bisnis sehingga dengan harga murah, harapannya baterai akan lebih laku di jual di pasaran. Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa baterai 24 V 100 Ah merk y dengan usia 2 tahun hanya memiliki 730 siklus atau 730 kali proses pengisian dan penyimpanan energi.

3.2 Unjuk Kerja Baterai Terhadap Pembebanan

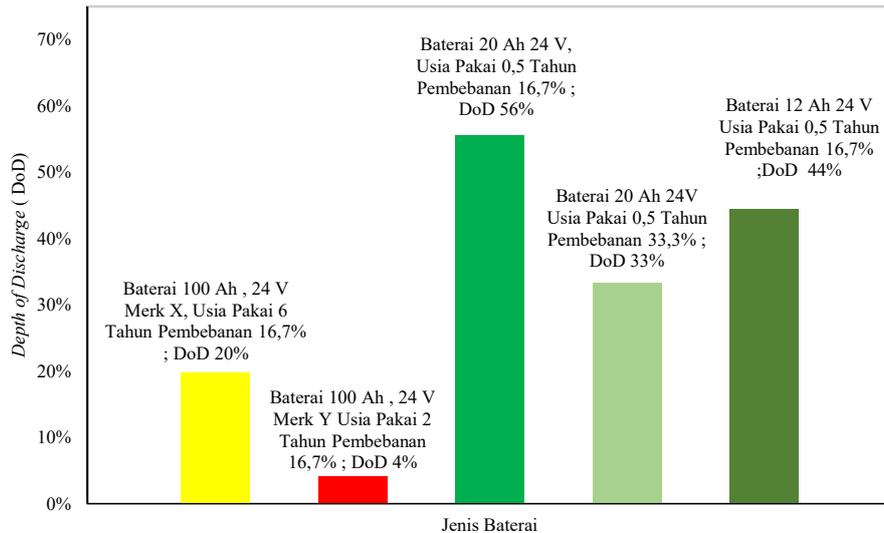
Unjuk kerja baterai 24 V 20 Ah dengan pembebanan 16,7% dan pembebanan 33,3% serta baterai 24 V 12 Ah dengan pembebanan 16,7%, menunjukkan kinerja masing-masing baterai masih dalam kondisi baik. Dari hasil penelitian nilai DoD masing-masing baterai

masih dibawah nilai standar yaitu 56%, 33% dan 44%. Nilai standar dari DoD yaitu diantara 30% sampai dengan 80%. Jika untuk selanjutnya perlakuan pembebanan dan pemeliharaan baterai dilakukan secara rutin maka usia pakai baterai dapat mampu bertahan selama 1825 siklus atau 5 tahun. Baterai 24 V 20 Ah untuk pembebanan 16,7% dengan Baterai 24 V 20 Ah untuk pembebanan 33,3% memiliki perbandingan yang mendekati linier. Meskipun pembebanan 33,3% merupakan pembebanan dua kali lipat dari pembebanan 16,7%, namun tidak serta merta lama waktu suplai energi oleh baterai menjadi setengahnya. Kenyataannya hal tersebut tidak terjadi namun justru untuk kenaikan beban dua kali lipatnya lama waktu pelepasan beban oleh inverter adalah lebih cepat, yaitu sepertiga kali lebih cepat dari waktu pembebanan normalnya. Penyerapan energi oleh beban dari sumber energi baterai berlangsung dan sesuai dengan besaran listrik beban. Semakin besar beban meminta energi listrik maka akan semakin besar pula arus yang dialirkan oleh baterai. Semakin besar arus yang dialirkan maka akan semakin cepat menyebabkan drop tegangan baterai. Arus baterai yang lebih kecil akan menyebabkan drop tegangan baterai tidak terjadi setidaknya dalam waktu yang cukup lama. Dengan kondisi, merek, SoH dan kapasitas nominal yang sama bukan berarti karakteristik baterai identik namun bergantung dari penggunaan dan perlakuan baterai selama operasi dan non operasi serta jenis dan besar pembebanan yang diberikan. Untuk kondisi, merek, SoH dan kapasitas nominal yang sama dan dengan jenis dan besar pembebanan yang sama, seharusnya memiliki karakteristik pembebanan yang sama. Untuk itu penting dalam PLTS off-grid menggunakan baterai dari teknologi, jenis, merek, kapasitas nominal, SoH yang sama. Untuk pengujian dengan kapasitas nominal dan merek yang sama dan pembebanan yang tidak sama, akan terjadi karakteristik pembebanan yang tidak mengikuti perbandingan besaran beban, apalagi jika baterai berasal dari merek dan kapasitas nominal yang berbeda. Untuk pembebanan pada baterai 24 V 12 Ah terlihat bahwa dengan pembebanan 16,7% yang diperlakukan sama untuk baterai 24 V 20 Ah, terjadi perbedaan karakteristik penurunan tegangan baterai. Kedua baterai dibebani dengan beban yang sama yaitu sebesar 16,7% atau 48 watt. Untuk baterai 24 V 20 Ah pembebanan 16,7% atau 80 watt. Jika hanya memperhitungkan perbandingan secara linier seharusnya lama waktu pembebanan untuk kedua baterai adalah sama, namun justru terjadi perbedaan. Untuk kapasitas nominal baterai yang lebih rendah, waktu pembebanan lebih cepat dibandingkan dengan kapasitas nominal baterai yang lebih besar meskipun pembebanan sama-sama diberikan sebesar 16,7%. Untuk baterai dengan kapasitas nominalnya yang lebih rendah mengalami pelepasan beban yang lebih awal yaitu 40 menit lebih awal dari baterai dengan kapasitas nominalnya yang lebih besar. Semakin besar kapasitas nominal baterai dengan persentase pembebanan yang sama maka akan semakin lama waktu pelepasan tegangan baterai. Hal tersebut menunjukkan bahwa dengan kapasitas nominal yang lebih besar baterai mampu memiliki stabilitas tegangan terhadap pembebanan meskipun untuk baterai dengan kapasitas nominal yang lebih kecil tegangan ac terminal beban lebih stabil namun penurunan tegangan baterai lebih cepat.



Gambar 8: Grafik perbandingan unjuk kerja baterai 24 V 20 Ah dengan pembebanan 16,7% , dengan baterai 24 V 20 Ah dengan pembebanan 33,3% dan baterai 24 V 12 Ah dengan pembebanan 16,7% dan dengan usia pakai masing-masing selama 0,5 tahun.

Dari grafik pada gambar 8, menunjukkan untuk baterai 24 V 20 Ah dengan pembebanan dua kali lipatnya atau pembebanan 33,3%, penurunan tegangan baterainya lebih curam. Tegangan baterai trip pada tegangan 21,32 Volt dalam waktu 60 menit atau satu jam pembebanan. Sementara untuk baterai dengan kapasitas nominal yang sama dan dengan pembebanan setengahnya, tegangan baterai trip pada tegangan 20,68 Volt, dengan lama pembebanan 200 menit. Untuk baterai 24 v 12 Ah dengan persentase pembebanan yang sama tegangan baterai trip pada tegangan 21,83 Volt, dengan lama pembebanan sebesar 160 menit. Meskipun baterai 24 V 12 Ah mampu mempertahankan kestabilan tegangan, namun untuk tegangan baterai tetap mengalami penurunan meskipun tidak selalu berbanding lurus dengan penurunan tegangan pada terminal beban. Sampai pada menit yang ke tujuh puluh karakteristik pembebanan antara baterai 24 V 12 Ah dan baterai 24 V 20 Ah masih cenderung sama namun setelah menit selanjutnya terjadi selisih penurunan yang terus semakin lebar. Hal ini menunjukkan bahwa untuk kapasitas nominal baterai yang lebih kecil memiliki kemampuan mempertahankan muatan lebih rendah.



Gambar 9: Perbandingan *Depth of Discharge* dari berbagai jenis kapasitas nominal, pembebanan dan usia pakai

Dari gambar 9 menunjukkan bahwa hasil perbandingan DoD pada setiap jenis baterai bervariasi. Baterai dengan usia pakai yang lebih lama memiliki DoD yang lebih rendah. Untuk baterai 24 Volt 100 Ah merk y yang memiliki usia pakai 2 tahun, tetapi baterai sudah memiliki masalah bila ditinjau dari nilai DoD nya yaitu sebesar 4%. Nilai DoD tersebut sangat jauh dari kondisi normal sehingga baterai tersebut dapat diduga mempunyai permasalahan dalam proses pengisian dan penyimpanan energi. Semakin lama usia pakai baterai maka nilai DoD nya akan semakin kecil, yang berarti bahwa terjadi penurunan efisiensi pada baterai tersebut. Untuk usia pakai yang sama yaitu 0,5 tahun dan dari merk yang sama, dari hasil penelitian menunjukkan DoD berada di antara batas 30% hingga 75%. Hal ini menunjukkan bahwa nilai SoH nya juga masih tinggi atau dengan kata lain kondisi baterai masih dalam keadaan baik. Untuk nilai DoD baterai 24 V 20 Ah dengan pembebanan 16,7% memiliki DoD yang lebih tinggi yaitu 56% yang berarti efisiensinya lebih tinggi, karena mampu menyerap energi baterai lebih banyak. Sedangkan untuk kapasitas nominalnya yang lebih rendah dalam hal ini baterai 24 V 12 Ah memiliki nilai DoD sebesar 33% atau lebih rendah jika dibandingkan dengan baterai dengan kapasitas nominal yang lebih tinggi. Dari hasil penelitian untuk kapasitas nominal dan merk yang sama, namun pembebanan yang berbeda menunjukkan bahwa pembebanan yang semakin besar mengakibatkan nilai DoD menjadi menurun. Baterai 24 V 20 Ah dengan pembebanan 16,7% nilai DoD nya lebih besar dari baterai 24 V 20 Ah dengan pembebanan 33,3%. Hal ini terjadi karena semakin besar beban maka arus yang dibutuhkan semakin besar dan menyebabkan turunnya tegangan baterai sebagai sumber tegangan.

4. KESIMPULAN

Unjuk kerja baterai VRLA terhadap pembebanan menunjukkan bahwa, untuk baterai dengan merk dan persentase pembebanan yang sama, namun dengan kapasitas nominal yang lebih rendah, dalam hal ini baterai 24 Volt 120 Ah, maka tegangan *end of discharge* atau tegangan pemutusan beban akan dicapai dalam waktu yang lebih cepat. Waktu pembebanan hanya berlangsung selama 160 menit, dan tegangan pemutusan yang lebih tinggi yaitu 21,83 Volt. Sedangkan untuk kapasitas nominal baterai yang lebih tinggi, dalam hal ini baterai 24 Volt 20 Ah, maka waktu pemutusan beban terjadi lebih lama yaitu selama 200 menit dengan tegangan pemutusan baterai yang lebih rendah yaitu 20,68 Volt. Demikian halnya untuk nilai DoD, untuk kapasitas nominal baterai yang lebih tinggi dalam hal ini baterai 24 Volt 20 Ah memiliki nilai DoD 56%, sedangkan kapasitas nominal baterai yang lebih rendah, untuk baterai 24 Volt 12 Ah nilai DoD nya lebih rendah yaitu 44%. Untuk jenis, merk, dan kapasitas nominal baterai yang sama, dalam hal ini baterai 24 V 20 Ah, namun dengan persentase pembebanan yang berbeda maka hasil penelitian menunjukkan untuk kapasitas nominal baterai dengan persentase pembebanan yang lebih kecil akan menunjukkan waktu pembebanan lebih lama sedangkan untuk persentase pembebanan yang lebih tinggi, waktu pembebanan hanya mampu bertahan selama 60 menit. Berdasarkan usia pakai, hasil penelitian menunjukkan bahwa untuk baterai 24 Volt 100 Ah merk x dengan usia pakai 6 tahun, memiliki DoD 20% dengan pembebanan sebesar 16,7%, selama 71 menit. Sedangkan untuk baterai 24 Volt 100 Ah merk y dengan usia pakai 2 tahun, memiliki DoD 4%. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa tidak semua baterai dengan siklus yang lebih tinggi atau usia pakai yang lebih lama menyebabkan efisiensi dan DoD nya lebih rendah dibandingkan dengan baterai dengan usia pakai yang lebih kecil. Nilai DoD juga dipengaruhi oleh jenis dan pabrikan baterai, harga baterai, dan perlakuan dan pemeliharaan ketika pada keadaan operasional dan non operasional.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains dan Teknologi melalui Politeknik Negeri Medan pada Tahun 2025, yang telah memberikan izin kepada peneliti untuk menggunakan fasilitas sarana dan prasarana laboratorium dan *workshop* listrik untuk pelaksanaan kegiatan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Chikkatti, B. S., Sajjan, A. M., Kalahal, P. B., Banapurmath, N. R., & Angadi, A. R. (2023). Insight into the performance of VRLA battery using PVA-TEOS hybrid gel electrolytes with titania nanoparticles. *Journal of Energy Storage*, 72.
- Idris, M. (2020). Rancang Panel Surya Untuk Instalasi Penerangan Rumah Sederhana Daya 900 Watt. *Jurnal Elektronika Listrik Dan Teknologi Informasi Terapan*, 1(1), 17.
- Ma'arif, E. S., & Suprpto, T. (2023). Perbandingan Baterai Lithium Ion dan Baterai Valve Regulated Lead Acid 48 Volt 20 Ampere terhadap Kelayakan Pakai Sepeda Motor Listrik Konversi SMK Negeri *Kendali Telekomunikasi Tenaga Listrik ...*, 6(2), 119–124.
- Pang, A., Yang, W., & Zhao, Q. (2023). VRLA battery fault prediction for data center based on random forest model and feature enhancement method. *Journal of Energy Storage*, 72.
- Rusiana Iskandar, H., Beby Elysees, C., Ridwanulloh, R., Charisma, A., Yuliana, H., Elektro, J. T., Teknik, F., Jenderal, U., Yani, A., Terusan, J., & Sudirman, J. (2021). Analisis Performa Baterai Jenis Valve Regulated Lead Acid Pada PLTS Off-Grid 1 Kwp. *Jurnal Teknologi*, 13(2).
- Simanjuntak, I. U. vistalina, Heryanto, H., Rahmawaty, Y., & Manurung, T. (2021). Performance Analysis of VRLA Battery for DC Load at Telecommunication Base Station. *ELKHA*, 13(2).
- Yu, R., Liu, G., Xu, L., Ma, Y., Wang, H., & Hu, C. (2023). Review of Degradation Mechanism and Health Estimation Method of VRLA Battery Used for Standby Power Supply in Power System. In *Coatings*, 13(3).