

Pengaruh Perawatan Preventif *Lifetime* Baterai *Lead Acid* Untuk Persinyalan Kereta Api Listrik

Effects of Preventive Maintenance Lifetime Battery Lead Acid for Signaling Electric Train

Al Fath Rizki Fajari¹, Muhammad Fahmi Arsyad^{2*}, Ponco Hadi Prasteyo³,

^{1,2,3}Program Studi Rekayasa Infrastruktur dan Lingkungan, Fakultas Teknik Transportasi dan Logistik, Institut
Transportasi dan Logistik Trisakti, Jln. IPN No.2, Cipinang Besar Selatan, Jakarta Timur 13410, Indonesia

*Email Korespondensi: Arsyadmuhammadfahmi@gmail.com

Abstract

Trains operate supported by many factors, one of which is signaling and telecommunications equipment. This equipment must get a continuous supply of electricity, so that train operations are safe and smooth. One way to protect the power supply is by installing a battery uninterrupted power supply (UPS), as a source of electrical energy storage as a backup. To keep the battery in optimal condition, 1 month, 3 months and 12 months preventive maintenance is carried out. Treatment 12 months, tested with the method coulomb counting with discharge against the battery up to 80% total wasted capacity, to get the value state of health battery. There are 54 batteries valve-regulated lead acid (VRLA) with a voltage of 2 V and a nominal capacity of 200 Ah, which is connected in series with the voltage cut off 1.85 V. The results of preventive maintenance are seen by testing discharge battery at station A, namely the SoH condition where all the batteries are above the value of 80%, while at station B there are 5 batteries with SoH values of 78%, 80%, 58%, 74%, and 72%, so the batteries must be replaced at fifth batteries with SoH rating of 80% and below.

Keywords: *backup supply power, preventive maintenance, state of health battery, discharge*

Abstrak

Kereta api beroperasi dengan didukung oleh banyak faktor, salah satunya ialah peralatan persinyalan dan telekomunikasi. Peralatan tersebut harus mendapatkan suplai listrik terus menerus, agar operasional kereta api aman dan lancar. Salah satu cara proteksi suplai listrik dilakukan dengan memasang baterai *uninterrupted power supply* (UPS), sebagai sumber penyimpanan energi listrik sebagai cadangan. Agar kondisi baterai tetap optimum, dilakukan perawatan preventif 1 bulan, 3 bulan, dan 12 bulan. Perawatan 12 bulan, dilakukan pengujian dengan metode *coulomb counting* dengan *discharge* terhadap baterai hingga 80% total kapasitas terbuang, untuk mendapatkan nilai *state of health* baterai. Terdapat 54 baterai *valve-regulated lead acid* (VRLA) dengan tegangan 2 V dan kapasitas nominal 200 Ah, yang dirangkai secara seri dengan tegangan *cut off* 1,85 V. Hasil perawatan preventif dilihat dengan pengujian *discharge* baterai pada stasiun A, yaitu kondisi SoH dimana semua baterai berada di atas nilai 80%, sedangkan pada stasiun B terdapat 5 baterai dengan nilai SoH 78%, 80%, 58%, 74%, dan 72%, sehingga harus penggantian baterai pada ke-5 baterai dengan nilai SoH 80% kebawah.

Kata kunci: *cadangan listrik, perawatan preventif, state of health baterai, discharge*

A. Pendahuluan

Kereta api di Indonesia mulai berubah penggunaan jenis bahan bakarnya, yaitu menggunakan energi listrik. Penggunaan energi listrik akhir-akhir ini sangat signifikan meningkat, karena ramah lingkungan dan dipicu menipisnya bahan bakar fosil, sehingga dengan kelebihan tersebut, kereta api listrik banyak digunakan saat ini. Salah satu operator kereta api listrik di Indonesia menggunakan sistem *communications-based train control* (CBTC), yaitu sistem persinyalan yang memantau semua pergerakan kereta dan dikendalikan oleh *operator control center* (OCC), dengan didukung oleh peralatan persinyalan dan peralatan komunikasi yang memerlukan sumber daya listrik (Dahlan et al., 2021).

Guna menjaga seluruh suplai listrik yang tersedia dapat bekerja, dilakukan perawatan pada baterai, agar operator kereta api listrik tidak mendapatkan permasalahan dalam persinyalan, untuk memantau pergerakan kereta api. Perawatan preventif dapat dilakukan guna memastikan baterai *uninterrupted power supply* (UPS) dapat bekerja dengan normal. Perawatan preventif yang dilakukan, dengan memeriksa indikator *state of charge* (SoC) dan *state of health* (SoH) baterai. Indikator SoC maupun SoH baterai, menandakan kemampuan baterai dalam menyimpan dan mengeluarkan arus listrik (Ren et al., 2019).

Walaupun perawatan preventif yang dilakukan dapat membuat umur baterai menjadi bertahan lama, namun kondisi umur aktual baterai UPS pada sebagian operator perkeretaapian di Indonesia, tidaklah sesuai dengan spesifikasi baterai. Kondisi baterai yang optimum, ialah mampu mendukung peralatan listrik agar tetap hidup minimal, dalam kurun waktu 2 jam (Kementerian Perhubungan, 2018). Fungsi baterai dalam mendukung peralatan listrik untuk memantau pergerakan kereta api menjadi sangat penting.

Terdapat 2 jenis baterai yaitu baterai primer dan baterai sekunder. Baterai primer ialah baterai yang hanya dapat digunakan sekali pakai dan tidak bisa diisi ulang daya, sedangkan baterai sekunder ialah baterai yang dapat digunakan berkali-kali dan dapat dilakukan proses pengisian kembali atau *charging*, apabila baterai sudah berkurang atau habis. Berikut terdapat beberapa baterai sekunder, antara lain:

1. Baterai *lithium ion* (Li-ion), baterai jenis ini merupakan baterai yang paling sering ditemui pada peralatan elektronik portabel karena memiliki kepadatan energi terbaik, mengalami *self discharge* yang lambat saat tidak digunakan. Perpindahan arus pada baterai ini dimulai dari elektroda negatif ke elektroda positif, saat proses *discharge* dan kembali pada saat *recharge* atau pengisian ulang arus;

2. Baterai *lithium polymer* (Li-Po), baterai ini hampir sama dengan baterai Li-ion, akan tetapi baterai Li-Po tidak menggunakan cairan sebagai elektrolit, melainkan menggunakan elektrolit polimer kering yang berbentuk seperti lapisan plastik film tipis. Lapisan film ini disusun berlapis-lapis diantara anoda dan katoda yang mengakibatkan pertukaran ion. Baterai Li-Po dapat dibuat dalam berbagai bentuk dan ukuran;
3. Baterai *valve regulated lead acid* (VRLA), baterai ini mempunyai katup pengaman, sehingga cairan aki atau elektrolit tidak mengalami penguapan;
4. Baterai *nickel-metal hydride* (Ni-MH), baterai ini menggunakan *ion hydrogen* untuk menyimpan energi. Baterai ini terdiri dari campuran nikel dan logam lain seperti titanium, juga mengandung logam seperti aluminium, kobalt, dan sebagainya, yang berfungsi menangkap *ion hydrogen* yang dilepaskan untuk memastikan tidak mencapai fase gas.

Selanjutnya pada baterai untuk memantau pergerakan kereta api listrik, dikenal juga tegangan yaitu beda potensial pada baterai antara kutub positif dan negatif. Pada baterai terdapat tegangan *cut-off* yang artinya batas dari pelepasan arus baterai (Wang et al., 2021). Sedangkan *float charge*, berguna untuk tetap menjaga kapasitas baterai yang tersedia, agar selalu dalam keadaan penuh, dikarenakan terjadinya *self discharge* pada baterai.

Guna menghitung arus listrik yang masuk ataupun keluar dari baterai dalam satuan waktu, dapat menggunakan metode *coulomb counting*. Metode ini biasa disebut juga dengan nama perhitungan *ampere hour* (Liu et al., 2019). *State of charge* (SoC) adalah estimasi energi yang tersedia dalam baterai dengan total kapasitas yang tersedia pada baterai. *State of charge* yang baik ialah pada kondisi penuh sehingga baterai dapat digunakan dalam rentang waktu yang lebih lama (Zhou et al., 2021).

Dikenal juga *state of health* (SoH), adalah presentase dari tingkat kesehatan baterai yang diukur dari kondisi baterai sekarang dibandingkan dengan kondisi awal baterai (Xiong et al., 2018). Apabila nilai dari SoH adalah 100%, ini menandakan bahwa baterai masih dalam keadaan baru dan akan berkurang seiring dengan waktu dan lama penggunaan (Hasanah et al., 2021). SoH pada baterai harus dijaga diatas nilai 80 %, dikarenakan jika baterai mencapai nilai 80%, maka akan menandakan bahwa baterai tidak layak pakai dan harus segera diganti. Bahwa nilai SoH baterai 80 % membuat performa dari baterai tersebut akan menurun drastis (Gou, et al., 2020).

Berdasar berbagai uraian tersebut diatas, baik terkait pentingnya baterai dan perawatan baterai dalam persinyalan untuk memantau pergerakan kereta api listrik, juga landasan teori yang telah dijelaskan, beberapa permasalahan sering dijumpai pada penggunaan baterai. Permasalahan tersebut diantaranya: (a) apa saja perawatan preventif yang dilakukan pada

baterai UPS yang berada di dua tempat atau stasiun yang berbeda; (b) bagaimana cara mencari nilai *state of charge* (SoH) pada baterai berdasarkan data tegangan, arus, dan kapasitas baterai; (c) bagaimana cara menentukan nilai *state of health* pada baterai berdasarkan data SoC. Permasalahan tersebut penting untuk dicarikan solusi, karena baterai penting dalam persinyalan untuk memantau pergerakan kereta api listrik.

Beberapa hasil penelitian terdahulu terkait perawatan preventif baterai, dapat digunakan untuk mengetahui apakah permasalahan tersebut telah terjawab. Misalnya penelitian sebelumnya terkait hal yang berpengaruh terhadap umur baterai adalah suhu ruangan pada penyimpanan baterai *valve-regulated lead acid* (VRLA). Perubahan suhu ruangan sangat mempengaruhi *lifetime* baterai (Ma et al., 2018). Biasanya pabrik baterai akan mencantumkan berapa suhu ruangan yang harus ditetapkan pada ruangan penyimpanan baterai VRLA. Suhu ruangan disarankan berkisar 20-25°C dan jika suhu ruangan melebihi dari suhu yang telah ditetapkan, maka *lifetime* baterai akan berkurang secara signifikan (Kaur et al., 2021).

Penelitian yang lain, bahwa nilai SoC berhasil dimonitor menggunakan metode *fuzzy logic* dan juga adanya pengaruh tegangan dan *temperature* yang mempengaruhi nilai SoC (Feng et al., 2020). Guna mencari nilai SoC dan SoH perlu diketahui kapasitas baterai dengan menggunakan proses *charge-discharge* (Maulidina et al., 2021). Metode *hybrid* dapat secara akurat dan tepat untuk mengestimasi nilai SoH dan *remaining usefull life* (RUL) dengan tingkat *error* yang lebih rendah (Gou et al., 2020).

Berdasar permasalahan dan *research gab* yang telah diuraikan diatas, observasi perlu dilakukan melalui penelitian ini. Observasi diarahkan untuk menjawab permasalahan, sehingga solusi yang sesuai akan diperoleh. Oleh sebab itu penelitian ini *urgent* dilakukan, dengan tujuan untuk melakukan observasi terhadap baterai UPS di dua tempat yang berbeda, yaitu stasiun A dan stasiun B, guna melihat pengaruh perawatan preventif apakah perawatan yang dilakukan sudah benar dan sesuai dengan *standard operating procedure* (SOP) dan bagaimana pengaruh terhadap umur baterai.

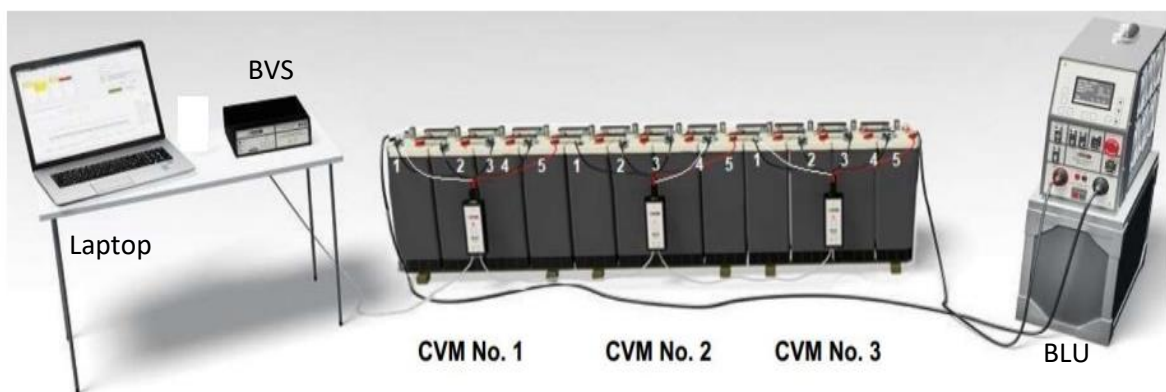
B. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan di dua tempat atau stasiun yang berbeda, yaitu stasiun A pada kondisi SoH dimana semua baterai berada di atas nilai 80%, dan pada stasiun B yaitu terdapat 5 baterai dengan nilai SoH 78%, 80%, 58%, 74%, dan 72%. Baterai yang digunakan sebagai bahan uji adalah baterai UPS, dengan menggunakan metode observasi terhadap perawatan preventif. Observasi dilakukan terhadap baterai UPS yang berada di stasiun A dan stasiun B

sebagaimana yang telah disebutkan diatas. Metode ini dilakukan untuk menganalisis, apakah perawatan preventif baterai yang dilakukan sudah benar dan sesuai dengan *standard operating procedure* (SOP) pada tata cara perawatan yang ditetapkan. Perawatan preventif yang dilakukan terhadap baterai tersebut adalah:

1. Perawatan 1 bulanan, yaitu pengecekan tegangan total baterai, dengan cara menggunakan multimeter pada terminal baterai yang terangkai seri, dan pengukuran suhu ruangan;
2. Perawatan 3 bulanan, yaitu perawatan 1 bulanan dan pengecekan tegangan per baterai;
3. Perawatan 12 bulanan, yaitu perawatan 1 dan 3 bulanan, serta melakukan pengujian *discharge* baterai.

Terdapat 2 variabel pada penelitian ini, yaitu *lifetime* baterai *lead acid* (variabel terikat) dan pengaruh *preventive maintenance* baterai (variabel bebas). Kemudian terhadap ketiga metode perawatan preventif tersebut diatas, dilakukan observasi untuk mendapatkan data primer. Bahwa data pengamatan didapatkan secara langsung, yang kemudian didukung juga oleh data sekunder dari penelitian terdahulu yang relevan. Setelah data primer diperoleh, analisis selanjutnya dengan melakukan perhitungan, dengan metode kuantitatif menggunakan rumus yang terkait, guna menganalisis data hasil penelitian. Data kemudian diolah menggunakan *microsoft excel*, dengan formula atau rumus yang terkait melalui input data hasil observasi (data primer) ataupun data sekunder.



Sumber: Dokumen Produsen Baterai (2022)
Gambar 1 Instrumen Penelitian

Alat yang digunakan pada penelitian ini, yaitu untuk pengujian baterai *valve-regulated lead acid* (VRLA) adalah: (a) 54 baterai VRLA yang dirangkaikan secara seri; (b) *battery load unit* (BLU); (c) *battery voltage supervisory* (BVS); (d) *cell voltage module* (CVM), dan (e) laptop (Gambar 1). Sedangkan pengujian baterai menggunakan metode *coulomb counting* dengan *discharging* pada baterai rangkaian seri, selanjutnya data diambil setiap 20 menit dalam waktu pengujian selama 4 jam. Hasil yang didapatkan dari pengujian yaitu arus,

tegangan, kapasitas, dan waktu. Kemudian dari hasil data dapat diketahui nilai *state of health* (SoH) baterai.

Pengecekan tegangan bertujuan untuk mengetahui kondisi baterai, yang ditandai jika baterai masih dalam keadaan baik, maka tegangan per-baterai bernilai 2,25 V. Jika baterai mengalami penurunan kondisi, maka nilai tegangan yang didapat berkurang dari nominal tegangan 2,25 V (Leadline, 2020). Persamaan untuk menghitung tegangan total yaitu:

$$V_{total} = 2,25 \times n \text{ baterai} \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan: V_{total} adalah tegangan total baterai, n baterai adalah banyaknya baterai yang diuji.

Pengukuran batas akhir tegangan atau tegangan *cut off* baterai dalam suatu rangkaian seri, juga memiliki kesamaan seperti persamaan (1), akan tetapi nilai tegangannya yang berbeda. Nilai *cut-off* baterai juga berbeda-beda tergantung merk dan tipe baterai yang dipakai. Tujuan adanya tegangan *cut-off*, yaitu untuk memproteksi baterai ketika proses *discharge* dilakukan. Nilai tegangan *cut-off* juga dapat dijadikan sebagai acuan untuk mengetahui tegangan itu sehat atau tidak, dengan menggunakan metode *coulomb counting*. Nilai tegangan *cut off* total baterai yaitu 1,85 V yang dapat ditunjukkan pada persamaan (2) (Leadline, 2020).

$$V_{total} = 1,85 \times n \text{ baterai} \dots \dots \dots (2)$$

Keterangan: V_{total} adalah tegangan total baterai, n baterai adalah banyaknya baterai yang diuji.

Sebelum dilakukan *discharging* baterai, pastikan baterai dalam kondisi penuh atau dalam keadaan *state of charge* (SoC) baterai 100%. Berikut cara mendapatkan nilai *state of charge* (SoC) dengan menggunakan metode *coulomb counting* (Movassagh et al., 2021) yang ditunjukkan pada persamaaan sebagai berikut:

$$SoC_t = SoC(t_0) + \frac{1}{C_{rated}} \int_{t_0}^{t_0+\tau} (I_{batt} - I_{loss}) dt \dots \dots \dots (3)$$

Keterangan: SoC_t adalah persentase kapasitas baterai saat ini (%), $SoC(t_0)$ adalah persentase kapasitas awal baterai (%), $(I_{batt} - I_{loss})$ adalah arus keluar dari baterai menuju beban (A), C_{rated} adalah kapasitas baterai (Ah), dan t adalah waktu (h).

Guna mencapai nilai SoC 100%, baterai yang dirangkakan secara seri, harus terlebih dahulu di *charge* selama beberapa waktu, sampai kondisi penuh dan nilai tegangan tiap baterai sama besarnya atau sejenis. Hal ini dilakukan dengan cara menaikkan nilai tegangan *output charger* baterai selama 24 jam. Sesudah waktu 24 jam berlalu, ubah tegangan *output charger* menjadi tegangan pada mode *float charge*. Mode *float charge* untuk menjaga kapasitas baterai tetap dalam kondisi *full* 100%, baterai diharuskan untuk tetap dilakukan

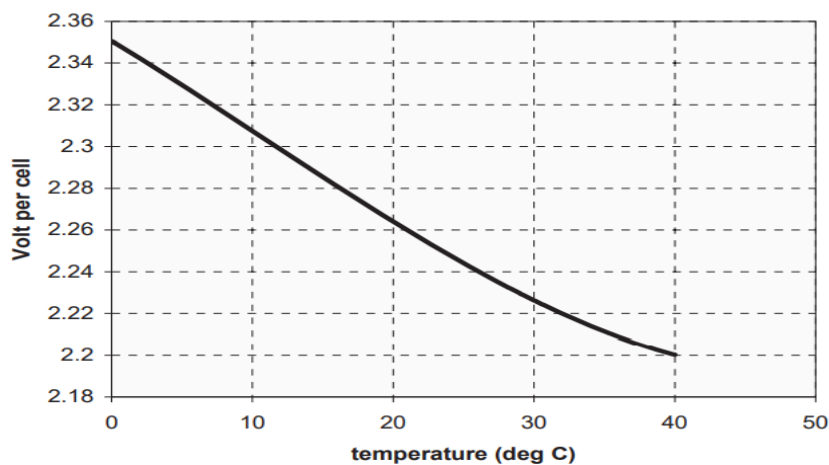
pengisian arus atau yang dikenal dengan sebutan *charge*. Tetapi pada saat baterai mendekati, bahkan sudah mencapai kondisi penuh, jika tetap dilakukan pengisian akan membuat baterai mengalami *overcharge*. Kondisi *overcharge* ini dapat membuat kapasitas baterai dan umur baterai berkurang. Oleh sebab itu diperlukan mode *float charge* dengan tetap melakukan pengisian terhadap baterai, namun tegangan dan arus yang masuk kedalam baterai akan dibatasi. Adapun standar nilai tegangan pada *float charge* dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Nilai Tegangan *Float Charge* Terhadap Suhu Ruangan

Suhu Penyimpanan Baterai (°C)	Tegangan Per Baterai (V)
0	2,35-2,4
10	2,3-2,35
20	2,25-2,3
30	2,2-2,25
40	2,25-2,2

Sumber: Dokumen Produsen Baterai (2022)

Kemudian jika kapasitas baterai kosong akan membuat baterai menjadi rusak. Penggunaan *float charge* memiliki tegangan *charge* yang dipengaruhi oleh suhu ruangan penyimpanan baterai, semakin rendah suhu ruangan penyimpanan baterai membuat nilai tegangan *float charge* menjadi lebih besar yang dapat dilihat pada Gambar 2.



Sumber: Dokumen Produsen Baterai (2022)

Gambar 2 Pengaruh Temperatur Terhadap *Float Charge* Baterai

Pengujian dilakukan dengan cara mengosongkan baterai VRLA. Bahwa dalam baterai VRLA ada katup pengaman, sehingga membuat tidak ada akses ke elektrolit atau dengan kata lain *total sealed*, sehingga baterai VRLA bebas *maintenance*. Baterai ini mampu *discharge* sampai dengan 80% kapasitas baterai, serta mempunyai ketahanan yang cukup kuat pada *cycle* pengisian-pelepasan secara berulang-ulang. Melakukan perawatan preventif yang baik pada baterai VRLA, umur baterai ini bisa bertahan lebih lama yakni kurang lebih 10 tahun (Gou et al., 2020).

Pada observasi tahap ini, baterai VRLA yang di kosongkan hingga 80%, total kapasitas baterai hilang atau sampai 20% total kapasitas baterai. Selama pengujian berlangsung, *battery voltage supervisory* (BVS) akan mencatat berdasarkan waktu, arus yang keluar, tegangan dan suhu baterai, yang selanjutnya disimpan di dalam laptop yang sudah terinstal *software* DV-BWin, yaitu *software* untuk melihat hasil pengujian yang telah dilakukan berupa spesifikasi baterai yang diuji, durasi pengujian, total kapasitas baterai yang telah di *discharge* dan keterangan kesehatan baterai.

Guna melihat kondisi baterai, dilakukan pengujian baterai dengan metode *coulomb counting*. Sebanyak 54 baterai *valve regulated lead acid* (VRLA) yang dirangkai secara seri dengan spesifikasi tegangan per baterai 2 V dan total kapasitas baterai 200 Ah, diuji untuk mengetahui berapa nilai estimasi *state of health* (SoH) baterai. Langkah pertama untuk melakukan pengujian baterai ialah dengan memastikan bahwa *state of charge* (SoC) baterai bernilai 100%, hal ini dilakukan agar setiap baterai dapat diuji dengan akurat. Baterai yang diuji merupakan baterai yang dirangkai secara seri, sehingga total arus pada ke-54 baterai ialah sama. Nilai arus 40,7 A merupakan arus *discharge* yang ditentukan untuk pengujian selama 4 jam. Penggunaan nilai arus tersebut karena mengacu pada Peraturan Menteri Perhubungan No. 44 Tahun 2018 Tentang Persyaratan Teknis Peralatan Persinyalan Perkeretaapian, yang mengatur terkait catu daya darurat harus dapat berfungsi minimal 2 jam. Oleh sebab itu pengujian dilakukan selama 4 jam, karena baterai yang diuji 200 Ah, maka 80% dari total kapasitas baterai yaitu 160 Ah. Menggunakan persamaan 4, maka nilai arus sebesar 40 A, nilai tersebut tidak jauh berbeda dengan nilai 40,7 A yang didapatkan dari uji awal peneliti ini dengan menggunakan alat BVS.

Hal ini dilakukan untuk menghabiskan 80% total kapasitas baterai yaitu 200 Ah. Tujuannya untuk menghabiskan 80% total kapasitas baterai, yaitu untuk mengetahui nilai tegangan yang telah dimonitor selama pengujian, yang mana jika tegangan akhir mencapai nilai 1,85 V, maka baterai tersebut memiliki nilai *state of health* (SoH) baterai kurang dari 80%, sehingga baterai tersebut harus diganti. Guna memastikan bahwa 80% total kapasitas baterai ter-*discharge* berdasarkan metode *coulomb counting*, dapat dilihat pada persamaan berikut (4) (Harahap, 2018):

$$CC = \text{Ampere} \times \text{waktu} \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan: CC adalah *coulomb counting*, Ampere adalah arus *discharge*.

State of health (SoH) pada baterai harus dijaga diatas nilai 80 %, dikarenakan jika baterai mencapai nilai 80% maka akan menandakan bahwa baterai tidak layak pakai dan harus segera diganti (Gou et al., 2020). Bahwa dengan nilai SOH baterai 80 %, membuat

performa dari baterai tersebut akan menurun drastis. *State of health* (SoH) baterai yang telah mencapai nilai 80% atau dibawah dari itu, dapat diketahui dengan melihat nilai tegangan akhir pada Tabel 2, baterai dapat dikatakan sehat jika nilai tegangan akhir bernilai diatas 1,85 *voltage*. Pada sebuah baterai VRLA mempunyai sebuah keterbatasan, yaitu tidak dapat mengosongkan kapasitas baterai hingga 0%, sehingga terdapat sebuah batas pada baterai VRLA yang dapat diketahui dari nilai tegangan.

Tabel 2 Tegangan baterai VRLA

Tegangan	Keterangan
2,25 V	Kondisi baterai penuh
1,86 V	Peringatan batas akhir baterai
1,85 V	Batas akhir atau Tegangan <i>Cut Off</i> baterai

Sumber: Dokumen Produsen Baterai (2022)

Guna mengestimasi nilai SoH, dapat menggunakan data *internal resistance* dan data kapasitas baterai (Harahap, 2018). Perhitungan dengan menggunakan *internal resistance* dapat dilakukan sebagai berikut:

$$\text{SoH} = (\text{Ri}/\text{R0}) \times 100\% \dots \dots \dots (5)$$

Keterangan: SoH adalah nilai *state of health* baterai saat ini (%), Ri adalah resisten baterai pada saat pengukuran ke-I (*ohm*), R0 adalah resisten baterai pada saat pengukuran pertama kali (*ohm*).

Pehitunggan dengan menggunakan kapasitas baterai dapat dilakukan sebagai berikut:

$$\text{SoH} = (\text{Ci}/\text{C0}) \times 100\% \dots \dots \dots (6)$$

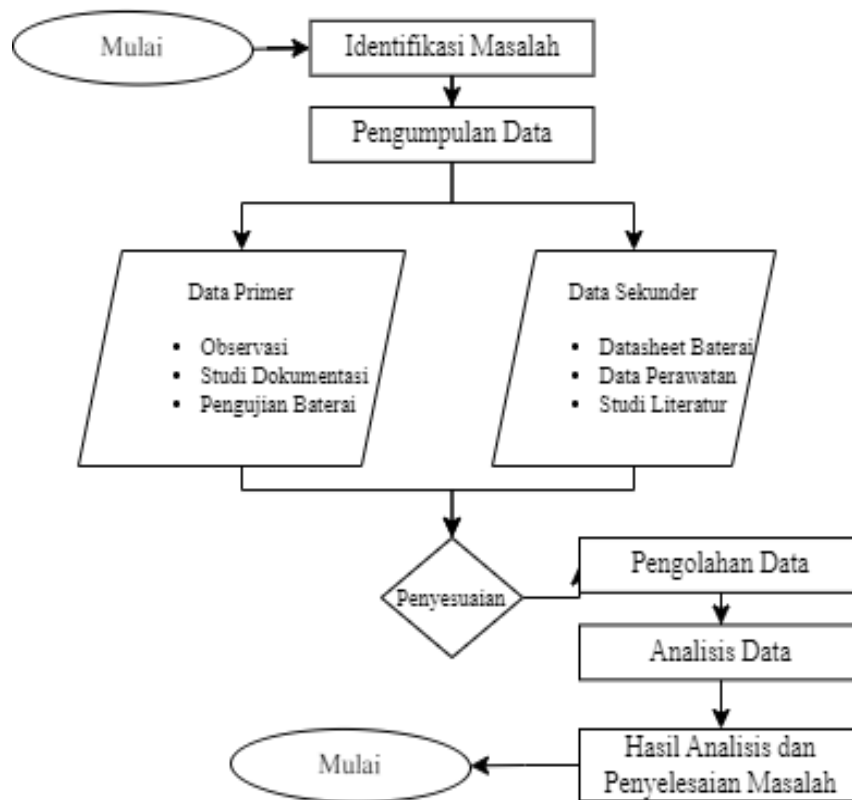
Keterangan: SoH adalah nilai *state of health* baterai saat ini (%), Ci adalah kapasitas baterai pada saat pengukuran ke-I (Ah), C0 adalah kapasitas baterai pada saat pengukuran pertama kali (Ah).

Tahap akhir penelitian ini adalah uji korelasi untuk mengetahui apakah terdapat hubungan antar variabel, serta menentukan seberapa kuat hubungan antar variabel. Analisis tersebut dengan uji korelasi *Pearson Product Moment*, yang dapat dilakukan dengan perhitungan melalui persamaan sebagai berikut:

$$r_{xy} = \frac{n\sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{(n\sum X^2 - (\sum X)^2)(n\sum Y^2 - (\sum Y)^2)}} \dots \dots \dots (7)$$

Keterangan: rxy adalah koefisien korelasi Pearson, n adalah banyak pasangan nilai X dan Y, $\sum XY$ adalah jumlah dari hasil kali nilai X dan nilai Y, $\sum X$ adalah jumlah dari nilai X, $\sum Y$ adalah jumlah dari nilai Y, $\sum X^2$ adalah jumlah dari kuadrat nilai X, dan $\sum Y^2$ adalah jumlah dari kuadrat nilai Y.

Secara lengkap urutan prosedur penelitian ini sebagaimana diagram Gambar 3.



Gambar 3 Diagram Prosedur Penelitian

C. Hasil dan Pembahasan

Berikut pada Tabel 3 adalah hasil pengukuran suhu ruangan tempat penyimpanan baterai VRLA, suhu ini menjadi salah satu faktor yang diteliti, untuk melihat pengaruh suhu terhadap *lifetime* baterai.

Tabel 3 Suhu Ruangan

Bulan	Suhu Ruangan di Stasiun A	Suhu Ruangan di Stasiun B
Januari	20°C	20°C
Februari	20°C	23°C
Maret	20°C	22°C
April	20°C	23°C
Mei	20°C	24°C
Juni	20°C	23°C
Juli	20°C	24°C
Agustus	20°C	23°C
September	20°C	24°C
Oktober	20°C	23°C
November	20°C	24°C
Desember	20°C	25°C

Sumber: Hasil Analisis Penelitian (2022)

Suhu ruangan merupakan salah satu parameter pada perawatan preventif yang dilakukan untuk interval waktu 1 bulan, yang artinya pengukuran suhu dilakukan pada tiap bulan sampai dengan bulan ke 12. Pengukuran suhu ruangan juga termasuk ke dalam perawatan preventif 3 bulanan dan juga 12 bulanan. Pengukuran suhu ruangan dilakukan dengan menggunakan digital temperature, yang terpasang pada ruangan tempat

penyimpanan baterai. Nilai suhu ruangan untuk tempat penyimpanan baterai yang ideal yaitu 20-25°C. Terlihat jelas pada Tabel 3 perbedaan nilai suhu, terdapat perbedaan yang signifikan, dimana suhu ruangan di stasiun A ialah konstan di angka 20°C, sedangkan suhu ruangan di Stasiun B bervariasi mulai dari 20-25°C. Selama pelaksanaan penelitian ini dipastikan bahwa, terhadap stasiun A dan stasiun B sebagai tempat pengambilan data, nilai suhu ruangan yang didapatkan benar.

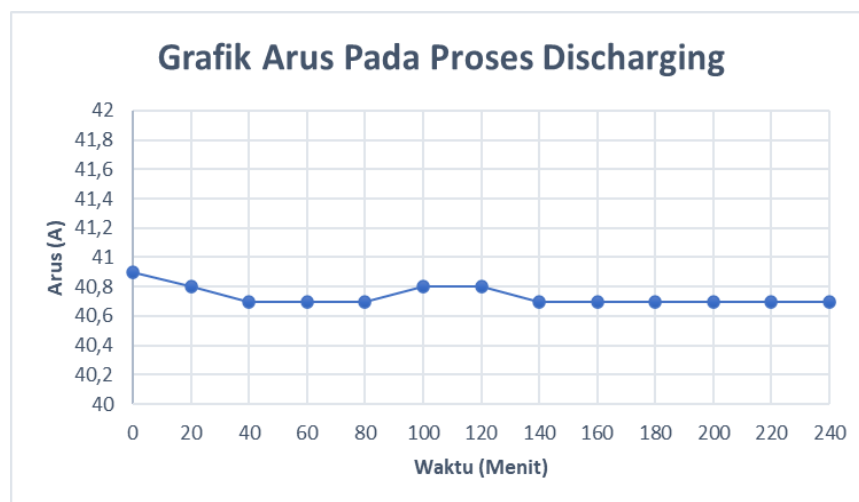
Kemudian parameter yang diukur adalah tegangan dan Tabel 4 adalah hasil pengukuran total tegangan yang diukur setiap 1 bulan hingga bulan ke 12.

Tabel 4 Tegangan Total Baterai

Bulan	Tegangan Total di Stasiun A	Tegangan Total di Stasiun B
Januari	121,574 V	121,943 V
Februari	121,476 V	121,869 V
Maret	121,399 V	121,829 V
April	121,123 V	121,795 V
Mei	120,986 V	121,723 V
Juni	120,816 V	121,630 V
Juli	120,609 V	121,514 V
Agustus	120,358 V	121,403 V
September	120,215 V	121,329 V
Oktober	119,896 V	121,197 V
November	119,784 V	121,064 V
Desember	119,687 V	120,969 V

Sumber: Hasil Analisis Penelitian (2022)

Nilai total tegangan yang didapatkan, menandakan bahwa total tegangan masih berada dalam kondisi aman. Kondisi aman dinyatakan dengan menilai tegangan yang berada diatas dari nilai tegangan *cut off* perbaterai yaitu 99,9 V. Nilai tersebut diambil berdasarkan Tabel 2 yang mana $1,85 \times 54$ baterai menghasilkan nilai 99,9 V. Guna memastikan pengujian sudah berjalan dengan benar, dilakukan dengan mengukur nilai arus yang ter-discharge selama pengujian, dapat dilihat pada grafik Gambar 4.



Sumber: Hasil Analisis Penelitian (2022)

Gambar 4 Grafik Arus Pada Proses Discharging

Berdasarkan grafik Gambar 4, diketahui bahwa nilai *discharging* arus sudah sesuai dengan nilai yang telah ditentukan pada saat penelitian. Pengujian selanjutnya adalah arus *discharge* pada baterai, hasil pengujian arus *discharge* baterai menggunakan rumus *coulomb counting* ialah:

$$CC = 40,7 A \times 4 \text{ jam}$$

$$CC = 162,8 A$$

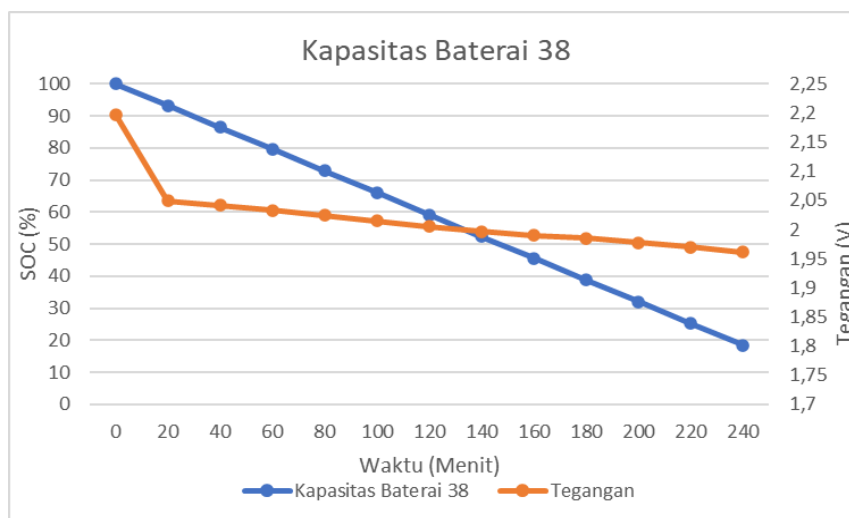
Keterangan: CC adalah *coulomb counting*, A adalah *ampere* (arus *discharge*).

Sesuai hasil perhitungan diatas, dilakukan perbandingan antara kapasitas baterai yang terbuang yaitu 162,8 A, terhadap total kapasitas nominalnya yaitu 200 Ah. Perbandingan dapat dilihat pada perhitungan sebagai berikut:

$$CC (\%) = \frac{162,8}{200} \times 100 = 81,4 \%$$

Parameter pengukuran atau pengujian selanjutnya adalah, melihat hasil pengujian per-baterai, saat proses *discharging* baterai dapat dikatakan masih dalam kondisi baik yaitu berada di atas 80% dari kesehatan baterai. Setelah dilakukan pengujian, didapatkan hasil pada Stasiun A yaitu semua baterai memiliki tegangan yang berada di atas 1,85 V. Nilai tegangan terkecil baterai di Stasiun A dengan tegangan akhir yaitu 1,961 V pada baterai 38, yang dapat dilihat sesuai grafik pada Gambar 5.

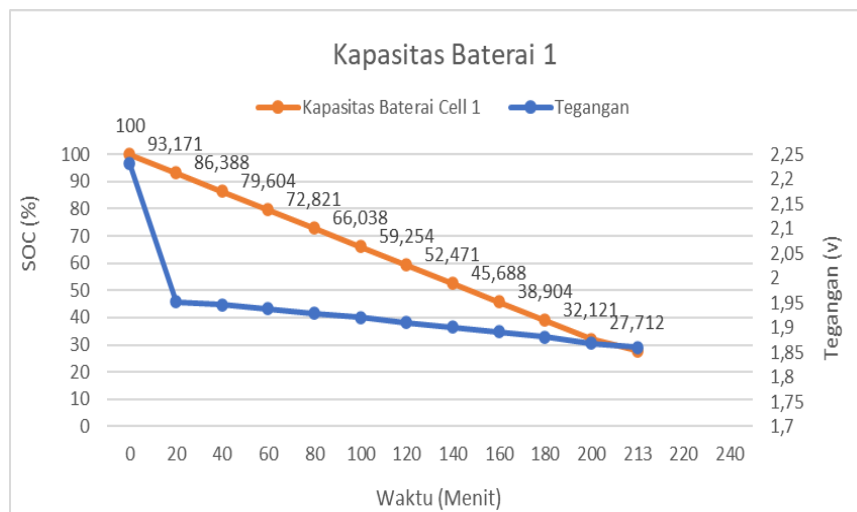
Berdasarkan grafik pada Gambar 5, dapat dilihat bahwa, setelah dilakukan pengujian *discharging* arus selama 4 jam, nilai tegangan akhir baterai berada diatas nilai tegangan 1,85 V, yang merupakan tegangan batas akhir baterai. Karena baterai nomor 38 merupakan tegangan terkecil yang didapatkan dari ke-54 baterai. Hal ini menandakan bahwa semua baterai di stasiun A dapat dikatakan sehat atau bernilai SoH diatas 80%.



Sumber: Hasil Analisis Penelitian (2022)
Gambar 5 Kapasitas Baterai Nomor 38

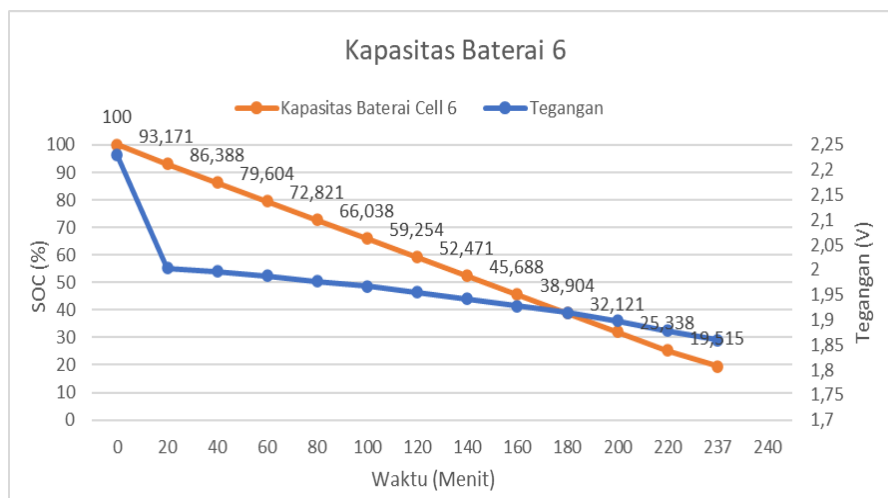
Sedangkan untuk pengujian di Stasiun B, didapatkan hasil yaitu memiliki beberapa baterai yang telah teridentifikasi mengalami kerusakan, dengan melihat hasil batas akhir tegangan yang didapat. Baterai yang mengalami kerusakan yaitu berada pada baterai nomor 1 dengan nilai 1,857 V pada menit 220, baterai nomor 6 dengan nilai 1,856 V pada menit 240, baterai nomor 15 dengan nilai 1,848 V pada menit 180, baterai nomor 17 dengan nilai 1,858 V pada menit 220 dan baterai nomor 50 dengan nilai 1,848 V pada menit 220.

Guna memudahkan bagaimana memahami hasil penelitian ini, dijabarkan hasil pengujian per baterai yang dapat dilihat pada grafik sesuai Gambar 6.



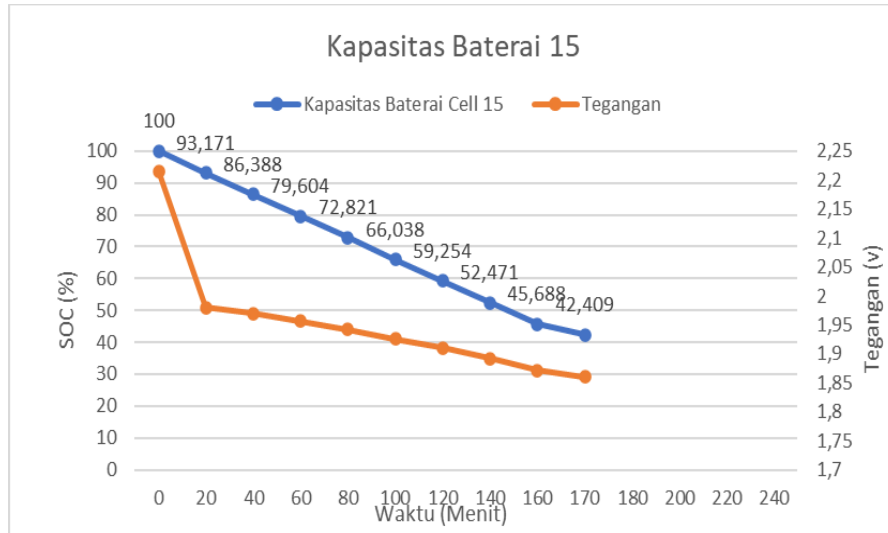
Sumber: Hasil Analisis Penelitian (2022)
Gambar 6 Kapasitas Baterai Nomor 1

Berdasarkan grafik pada Gambar 6, bahwa baterai *cell 1* mampu *discharge* kapasitas baterai dari 100% sampai dengan 28%, sehingga total kapasitas baterai yang ter-*discharge* ialah 72%. Nilai ini dapat diartikan sebagai nilai *state of health* (SoH) baterai dengan melihat total kapasitas baterai yang aktual saat ini.



Sumber: Hasil Analisis Penelitian (2022)
Gambar 7 Kapasitas Baterai Nomor 6

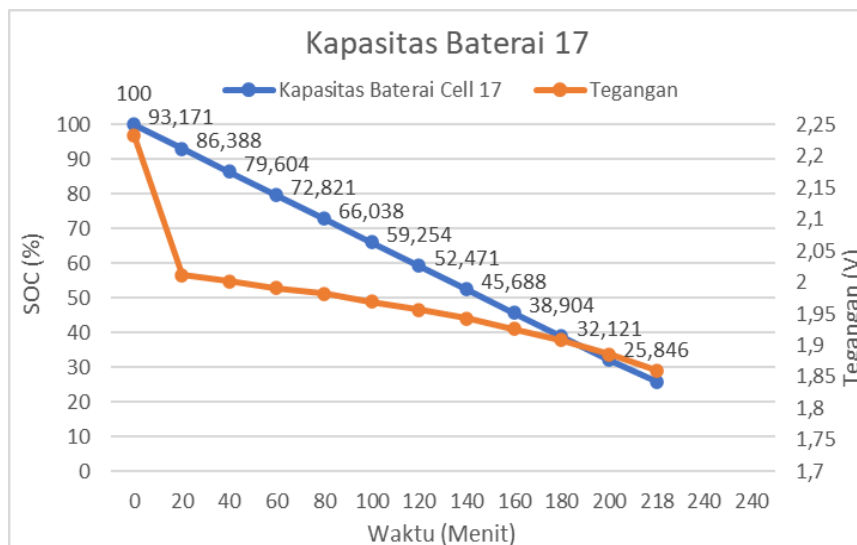
Berdasarkan grafik pada Gambar 7, bahwa baterai *cell* 6 mampu *discharge* kapasitas baterai dari 100% sampai dengan 20%, sehingga total kapasitas baterai yang ter-*discharge* ialah 80%. Sesuai dengan teori yang telah disebutkan sebelumnya, SoH dengan nilai 80% sudah dapat dikatakan sudah tidak layak pakai dan harus segera dilakukan penggantian.



Sumber: Hasil Analisis Peneliti (2022)
Gambar 8 Kapasitas Baterai Nomor 15

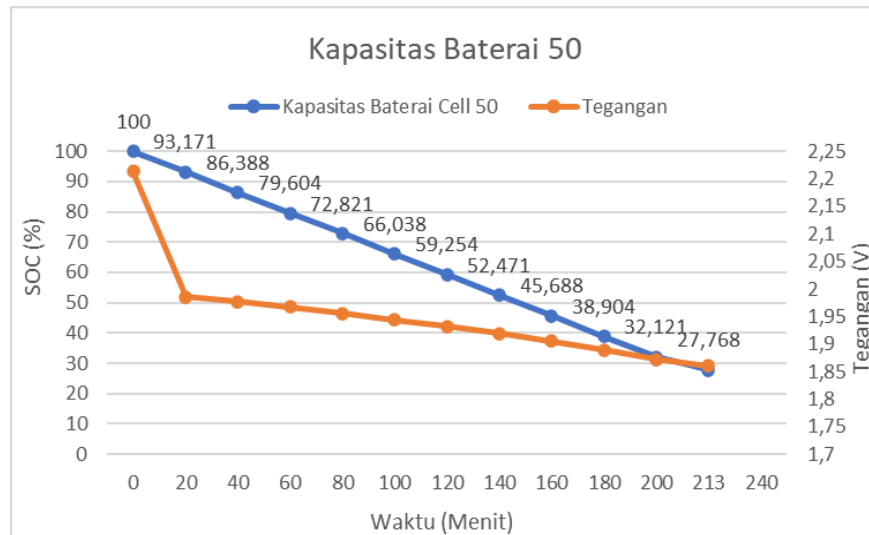
Kemudian berdasarkan grafik pada Gambar 8, bahwa baterai *cell* 15 mampu *discharge* kapasitas baterai dari 100% sampai dengan 42%, sehingga total kapasitas baterai yang ter-*discharge* ialah 58%.

Berdasarkan grafik pada Gambar 9, bahwa baterai *cell* 17 mampu *discharge* kapasitas baterai dari 100% sampai dengan 26%, sehingga total kapasitas baterai yang ter-*discharge* ialah 74%.



Sumber: Hasil Analisis Penelitian (2022)
Gambar 9 Kapasitas Baterai Nomor 17

Berdasarkan grafik pada Gambar 10, bahwa baterai *cell* 15 mampu *discharge* kapasitas baterai dari 100% sampai dengan 28%, sehingga total kapasitas baterai yang ter-*discharge* ialah 72%.



Sumber: Hasil Analisis Penelitian (2022)
Gambar 10 Kapasitas Baterai Nomor 50

Bahwa dengan analisis kapasitas baterai saat ini dengan melihat *state of charge* (SoC) dan waktu, selanjutnya dapat diketahui berapa kapasitas baterai yang terbuang. Tegangan 1,85 V juga menandakan bahwa baterai sudah tidak lagi dapat di *discharge*. Oleh sebab itu ketika tegangan baterai menurun hingga 1,85 V, dapat diambil kesimpulan bahwa kondisi tersebut adalah kapasitas baterai saat ini. Guna mencari nilai *state of health* (SoH), dapat diketahui dengan membandingkan kapasitas baterai saat ini, dengan kapasitas baterai pada saat baterai dalam kondisi baru, yang dapat dilihat pada persamaan (Tabel 5).

Tabel 5 Baterai Mencapai Tegangan *Cut Off*

Baterai	Tegangan	Waktu	<i>State of Health</i>
1	1,85 V	3 jam 33 menit	72%
6	1,85 V	3 jam 57 menit	80%
15	1,85 V	2 jam 50 menit	58%
17	1,85 V	3 jam 38 menit	74%
50	1,85 V	3 jam 33 menit	72%

Sumber: Hasil Analisis Penelitian (2022)

Hasil uji korelasi yang dilakukan untuk mengetahui apakah terdapat hubungan antar variabel, bahwa hasil uji korelasi *Pearson Product Moment* (Tabel 6), membuktikan adanya hubungan positif antara perawatan preventif dengan *lifetime* baterai. Selanjutnya adanya korelasi positif tersebut, kemudian dilakukan pengujian hipotesis, untuk menentukan seberapa kuat hubungan antar variabel. Hasilnya bahwa berdasar hipotesis asosiatif, sesuai Tabel 7, diperoleh nilai koefisien korelasi antara rata-rata tegangan per-baterai dengan

tegangan akhir baterai yaitu 0,741663798. Disimpulkan bahwa koefisien korelasi yang didapatkan berarti terdapat pengaruh positif yang kuat antar variabel.

Tabel 6 Interpretasi Terhadap Koefisien Korelasi

Interval Koefisien	Tingkat Keeratan Hubungan
0,00 – 1,999	Sangat Rendah
0,20 – 0,399	Rendah
0,40 – 0,599	Sedang
0,60 – 0,799	Kuat
0,80 – 1,00	Sangat Kuat

Sumber: Sarwono (2006)

Tabel 7 Hasil Pengujian Hipotesis

	Rata-Rata Tegangan Per Baterai	Tegangan Akhir Baterai
Rata-rata tegangan per baterai	1	
Tegangan akhir baterai	0,741663798	1

Sumber: Hasil Analisis Penelitian (2022)

D. Kesimpulan

Perawatan baterai untuk kereta api listrik, yang dilakukan pada kedua tempat yaitu di stasiun A dan stasiun B, bahwa dilakukan perawatan preventif dengan interval waktu 1 bulanan dengan mengecek total tegangan baterai dan suhu ruangan, 3 bulanan dengan mengecek tegangan per-baterai, dan 12 bulanan dengan mengecek *state of health* (SoH) baterai. *State of charge* (SoC) baterai dapat diketahui dengan mengecek tegangan per-baterai, bahwa dengan nilai tegangan 2,25 V menandakan bahwa baterai dalam kondisi terisi penuh. Pada stasiun A, nilai SoC semua baterai yang telah di *discharge* di angka 80% atau lebih, dikarenakan hasil yang didapatkan selama pengujian nilai tegangan, belum mencapai batas akhir atau *cut-off* baterai yaitu 1,85 V. Sedangkan untuk stasiun B, memiliki 5 baterai dengan SoC yang tidak dapat di *discharge* sampai 80% dari kapasitas baterai tersebut. Sesuai yang telah diuraikan, bahwa saat pengujian baterai *discharge* selama 4 jam belum selesai, menghasilkan 5 baterai yang sudah mencapai nilai tegangan akhir baterai yaitu 1,85 V.

Nilai *state of health* (SoH) baterai berhasil didapatkan dengan menggunakan metode *coulomb counting discharge* baterai. Pada stasiun A, SoH baterai berada di atas 80%, sedangkan pada stasiun B memiliki 5 baterai dengan kondisi baterai sudah mencapai *end of life* dengan nilai SOH 58% - 80%. Kemudian dapat disimpulkan bahwa ada hubungan positif antara perawatan preventif dengan *lifetime* baterai. Nilai koefisien korelasi antara rata-rata tegangan per baterai dengan tegangan akhir baterai yaitu 0,741663798. Disimpulkan bahwa berdasar koefisien korelasi tersebut, berarti terdapat pengaruh positif yang kuat antar 2

variabel yang ada, yaitu variabel *lifetime* baterai *lead acid* (variabel terikat) dan variabel *preventive maintenance* baterai (variabel bebas).

E. Daftar Pustaka

- Dahlan, D., Wibowo, H., Arsyad, M. F., Abdurachman, A. A., & Puspita, S. M. R. (2021). Transformasi Digital Perkeretaapian Di Eropa Dan Indonesia. *Jurnal Sistem Transportasi & Logistik*, 1(1).
- Feng, F., Teng, S., Liu, K., Xie, J., Xie, Y., Liu, B., & Li, K. (2020). Co-estimation of lithium-ion battery state of charge and state of temperature based on a hybrid electrochemical-thermal-neural-network model. *Journal of Power Sources*, 455, 227935. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2020.227935>
- Gou, B., Xu, Y., & Feng, X. (2020). State-of-Health Estimation and Remaining-Useful-Life Prediction for Lithium-Ion Battery Using a Hybrid Data-Driven Method. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(10), 10854–10867. <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3014932>
- Harahap, R. A. (2018). Identifikasi rentang waktu pengisian terhadap state of health baterai valve-regulated lead acid (vrla). In *Garuda.Kemdikbud.Go.Id*. Universitas Brawijaya.
- Hasanah, A. W., Pujotomo, I., Hariyati, R., Qosim, M. N., Sabaryati, J., & Viridi, S. (2021). Modeling of the Relation of SoC, SoH, DoD for VRLA Battery of Solar Power Plant in IT-PLN. *International Conference on Innovation in Science and Technology (ICIST 2020)*, 24–28.
- Kaur, K., Garg, A., Cui, X., Singh, S., & Panigrahi, B. K. (2021). Deep learning networks for capacity estimation for monitoring SOH of Li-ion batteries for electric vehicles. *International Journal of Energy Research*, 45(2), 3113–3128.
- Kementerian Perhubungan. (2018). *Peraturan Menteri Perhubungan No. 44 Tahun 2018 tentang Persyaratan Teknis Peralatan Persinyalan Perkeretaapian*. https://djka.dephub.go.id/uploads/201908/PM_44_TAHUN_2018.compressed_.pdf
- Leadline. (2020). *Dokumen Produsen Baterai*.
- Liu, Z., Li, Z., Zhang, J., Su, L., & Ge, H. (2019). Accurate and Efficient Estimation of Lithium-Ion Battery State of Charge with Alternate Adaptive Extended Kalman Filter and Ampere-Hour Counting Methods. *Energies*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/en12040757>
- Ma, S., Jiang, M., Tao, P., Song, C., Wu, J., Wang, J., Deng, T., & Shang, W. (2018). Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review. *Progress in Natural Science: Materials International*, 28(6), 653–666. <https://doi.org/10.1016/J.PNSC.2018.11.002>
- Maulidina, N. A., Saputra, R. E., & Setianingsing, C. (2021). Estimasi State Of Charge Dan State Of Health Pada Baterai Lithium ION Dengan Metode Perhitungan Coulomb. *EProceedings ...*, 8(6), 11985–11992.

- Movassagh, K., Raihan, A., Balasingam, B., & Pattipati, K. (2021). A critical look at coulomb counting approach for state of charge estimation in batteries. *Energies*, 14(14), 4074.
- Ren, H., Zhao, Y., Chen, S., & Wang, T. (2019). Design and implementation of a battery management system with active charge balance based on the SOC and SOH online estimation. *Energy*, 166, 908–917.
- Wang, L., Zhang, B., Hu, Y., Su, Z., Zhao, T., & Li, A. (2021). Effect of lower cut-off voltage on LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O₂/graphite–SiO_x pouch battery. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 25(6), 1743–1751. <https://doi.org/10.1007/s10008-021-04948-4>
- Xiong, R., Li, L., & Tian, J. (2018). Towards a smarter battery management system: A critical review on battery state of health monitoring methods. *Journal of Power Sources*, 405, 18–29.
- Zhou, W., Zheng, Y., Pan, Z., & Lu, Q. (2021). Review on the Battery Model and SOC Estimation Metho. *Processes*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/pr9091685>