

PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI ALAT UKUR STATE OF CHARGE SISTEM PENGAWASAN PADA BATERAI LEAD ACID MENGUNAKAN METODE OPEN CIRCUIT VOLTAGE

DESIGNING AND IMPLEMENTATION MEASURING INSTRUMENT STATE OF CHARGE MONITORING SYSTEM FOR LEAD ACID BATTERY USING OPEN CIRCUIT VOLTAGE METHODE

Anggita Bayu¹, Dudi Darmawan², Ahmad Qurthobi³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹anggita_bayu@gmail.com, ²dudidw@telkomuniversity.ac.id,

³qurthobi@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Baterai merupakan salah satu alat penting untuk menyimpan dan konversi energi yang bekerja berdasarkan prinsip elektrokimia. Permasalahan yang sering terjadi pada baterai adalah mengalami *overcharging* atau *overdischarging* yang dapat mempengaruhi performansi dari baterai itu sendiri. Pada penelitian ini dirancang alat ukur state of charge sistem pengawasan untuk dapat mengetahui status pengisian dari baterai sehingga dapat menjaga performansi baterai. Sistem yang dibuat berupa purwarupa menggunakan sensor pembagi tegangan dan mikrokontroler sebagai pemroses data. Pengujian dilakukan dengan baterai lead acid 12 volt dengan kapasitas 12 Ah menggunakan lampu LED

10 watt sebagai beban untuk pengujian. Perancangan sistem menggunakan metode *Open circuit voltage* dengan melakukan pencuplikan data tegangan dari baterai hingga mencapai rest period untuk mendapatkan algoritma konstanta derivatif (K_v). Dari pengujian dapat diketahui bahwa tegangan baterai dapat dijadikan parameter *State of charge* karena mempunyai hubungan yang linier. Dari hasil pencuplikan data untuk mendapatkan nilai K_v didapatkan baterai akan mencapai rest period setelah 3-4 jam setelah beban dilepas dari terminal, dan mengalami perubahan tegangan tercepat pada 30 menit pertama. Hasil prediksi SoC menggunakan metode *Open circuit voltage* saat baterai terbebani hingga cut-off voltage menunjukkan status 30% sehingga dapat menjadi acuan untuk peringatan penggunaan baterai. Rata-rata error relatif dari hasil validasi metode *Ocv* didapatkan $\pm 0.14\%$ hasil ini menunjukkan bahwa metode yang digunakan dalam penelitian ini cukup bagus dan dapat digunakan untuk pengembangan analisis *State of Health* dari baterai.

Kata kunci: Battery Management System, State of Charge, Open circuit voltage, rest period.

Abstract

*The battery is one of the essential tools for energy conversion and storage that works based on electrochemical principle. Problems that often occur in the battery is overcharging or overdischarging experience which can affects the performance of the battery itself. Research on measuring instrument designed this state of charge surveillance system to be able to know the status of the charging of the battery so that it can keep the performance of the battery. The system was created in the form of prototypes using the sensor voltage divider and a microcontroller as the data processor. Testing dilakukan with battery 12 volt lead acid with a capacity of 12 Ah uses LED light 10 Watts as the load for testing. The design of the Open method of menggunakan system voltage circuit voltage sampling data by performing a battery of up to reach the rest period to get the derivative constant algorithm (K_v). From testing can note that the battery voltage can be used as parameters of the State of charge because it has a linear relationship. From the results of sampling data to get the value of K_v obtained battery will reach a rest period after 3-4 hours after the load is removed from the terminal voltage changes, and the fastest in the first 30 minutes. The results of the prediction method using SoC *Open circuit voltage* when battery is overburdened to cut-off voltage indicates the status of 30% so that it can be a reference to a warning the use of batteries. The average relative error of method validation results obtained by *Ocv* $\pm 0.14\%$ these results indicate that the methods used in this study are quite nice and can be used for the development of the analysis of the State of Health of the battery.*

Keywords: Battery Management System, State of Charge, Open circuit voltage, rest period.

1 Pendahuluan

Perkembangan teknologi ramah lingkungan mengakibatkan penggunaan dan teknologi baterai berkembang pesat mulai dari perangkat elektronik portable, hingga pembangkit listrik dari energi terbarukan seperti panel surya dan turbin angin. Dalam kasus pembangkit listrik hybrid, hal yang paling kritical adalah penyimpanan energi listrik karena hal ini dapat mempengaruhi performansi dari pembangkit tersebut. Salah satu jenis

penyimpanan energi yang sering digunakan adalah baterai.

Salah satu tipe baterai yang banyak digunakan untuk sistem pembangkit listrik tenaga hybrid seperti turbin angin adalah baterai tipe lead acid. Permasalahan yang sering terjadi pada baterai tipe lead acid adalah mengalami overcharging atau overdischarging saat penggunaan karena kurangnya pengawasan terhadap kapasitas baterai sehingga dapat mengakibatkan penurunan kinerja baterai dan kerusakan pada cell baterai lead acid [1].

Kerusakan yang timbul pada baterai lead acid akibat proses overcharging adalah timbulnya gas hidrogen (H) dari asam sulfat (H_2SO_4) sehingga gas asam sulfat berkurang. Sedangkan overdischarging pada baterai lead acid berakibat pada meningkatnya temperatur baterai, selain itu juga mengakibatkan plat timah sebagai sel baterai timbul korosi yang dapat mempengaruhi kinerja baterai dalam penyimpanan energi. Untuk menjaga performa baterai pada sistem pembangkit hybrid, diperlukan sistem pengawasan baterai untuk melakukan estimasi parameter kapasitas baterai dengan akurasi yang baik sehingga dapat mencegah baterai mengalami overcharging maupun overdischarging [2].

Battery Monitoring System (BMS) merupakan sebuah perangkat dengan sensor yang digunakan untuk mengawasi baterai bekerja secara optimal dan aman dengan memberikan informasi kapasitas baterai [3]. SoC sebagai parameter penting yang mencerminkan kinerja dari baterai sehingga estimasi SoC yang akurat tidak hanya melindungi baterai dari kondisi bahaya namun juga mencegah terjadinya overdischarging, meningkatkan masa pakai suatu baterai, tetapi juga sebagai acuan untuk membangun sistem pengontrolan untuk menghemat penggunaan energi melalui sistem manajemen baterai [4].

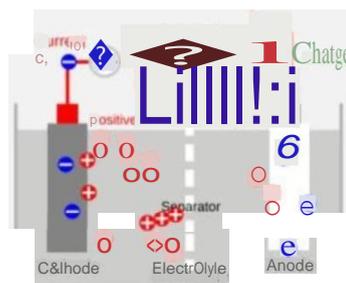
Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan merancang sistem monitoring baterai untuk melakukan estimasi State of Charge baterai tipe lead acid menggunakan metode open circuit voltage. Metode OCV dilakukan dengan cara mengukur perbedaan potensial listrik antara dua terminal baterai pada kondisi tanpa beban yang berbanding lurus dengan kapasitas baterai [5]. Sistem monitoring baterai yang akan dirancang dapat menampilkan pengukuran State of Charge melalui LCD dan dapat melakukan pencatatan data. Produk dari penelitian ini dapat memberikan informasi hasil pemantauan kapasitas baterai yang efektif dan akurat.

2 Dasar Teori

2.1 Baterai

Baterai merupakan sel listrik yang didalamnya berlangsung proses elektrokimia reversible atau dapat berkebalikan dengan efisiensi dan tinggi. Pada sistem pembangkit listrik tenaga hybrid, Baterai digunakan sebagai penyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh turbin angin maupun panel surya sebelum digunakan pada peralatan elektronik. Setiap sel baterai terdiri dari elektroda positif dan elektroda negatif. Setiap sel baterai terdiri dari dua macam elektroda yang berlainan, yaitu elektroda positif dan elektroda negatif.

Didalam baterai terdapat elektrolit yang berfungsi sebagai penghantar ion dan pergerakan elektron dalam elektrolit diantara elektroda membantu reaksi elektrokimia dalam baterai. Sedangkan separator merupakan pemisah elektroda bersifat isolator tanpa konduktivitas listrik yang terbasahi oleh elektrolit menjadi katalis dalam pergerakan ion dari katoda ke anoda maupun sebaliknya (10).



Gambar 2.1 Cara kerja baterai

2.1.1 Parameter Kinerja Baterai

Beberapa parameter penting mengenai kinerja baterai yaitu

1. Kerapatan Energi
Kerapatan energi menunjukkan jumlah energi yang dapat disediakan baterai berbanding massa atau volume baterai tersebut. Kerapatan energi memiliki satuan watt-hours per pound atau watt-hours per cubic inch (11)
2. Duty cycle
Siklus hidup atau duty cycle menunjukkan jumlah pengisian dan pengosongan yang dapat diterima oleh sebuah baterai sebelum baterai berada pada kondisi tidak efektif lagi dalam menampung muatan listrik. Pada tipe baterai tertentu, overcharging dapat mengurangi duty cycle normal baterai tersebut (11)

3. State of Charge

State of Charge merupakan gambaran sisa kapasitas di dalam sel baterai dengan total kapasitas baterai dalam bentuk persentase. State of Charge merupakan parameter penting yang menggambarkan performa baterai (7)

4. Self Discharge

Baterai akan tetap membuang arus listrik meskipun tanpa beban atau tidak digunakan. Hal ini terjadi disebabkan adanya reaksi kimia internal pada baterai. Besarnya self discharge dipengaruhi oleh suhu penyimpanan, usia baterai dan material penyusun baterai (12)

2.1.2 Lead Acid Battery

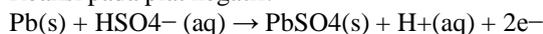
Baterai lead acid mulai ditemukan pada tahun 1859 oleh Gaston Plante. Baterai lead acid memiliki kemampuan untuk memasok arus yang tinggi dan harga yang relatif murah dibanding baterai dengan teknologi terbaru, sehingga baterai lead acid pada awalnya banyak digunakan untuk kendaraan bermotor yang memerlukan arus tinggi. Pada saat ini teknologi untuk baterai tipe lead acid berkembang dengan berbagai jenis salah satunya Absorbed glass mat (AGM) dan Valve regulated lead acid (VRLA).

Kebanyakan baterai VRLA adalah mempunyai kapasitas yang besar dan mempunyai efisiensi yang tinggi dan harga relatif rendah serta lebih aman untuk lingkungan dibanding teknologi baterai terbaru seperti Li-Ion, sehingga VRLA banyak digunakan untuk sistem baterai pada pembangkit listrik hybrid. Sedangkan kekurangan dari baterai VRLA adalah tidak dapat disimpan dalam kondisi discharge dan terdapat Thermal runaway akibat dari overcharging dan overdischarging (13).

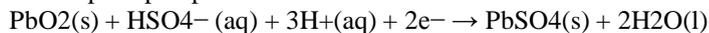
Struktur utama penyusun baterai Lead Acid sama dengan baterai pada umumnya yang terdiri dari katoda sebagai elektroda positif dan anoda sebagai elektroda negatif dan elektrolit yang berfungsi sebagai penghantar muatan. Plat yang digunakan pada baterai lead acid adalah Sponge lead (Pb) sebagai plat negatif dan lead oxide (PbO₂) sebagai plat positif. Proses charging dan discharging pada baterai lead acid terjadi melalui adanya perpindahan elektron diantara elektroda positif dan negatif melalui elektrolit (H₂SO₄) (14)

Dalam keadaan digunakan (discharging) kedua plat positif dan negatif menjadi timbal (II) sulfat (CuSO₄), dan elektrolit kehilangan asam sulfat (sulfuric acid) yang terlarut menjadi air murni. Proses discharging didorong oleh konduksi elektron dari pelat negatif ke sel di plat positif dalam sirkuit eksternal.

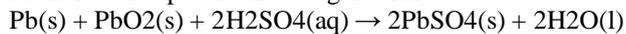
•Reaksi pada plat negatif:



•Reaksi pada plat positif:

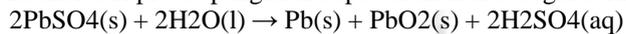


•Reaksi total dapat ditulis sebagai berikut



Proses charging berlangsung reaksi kebalikan dari proses discharging yang ditunjukkan oleh gambar berikut

•Reaksi dari proses pengisian dapat dituliskan sebagai berikut



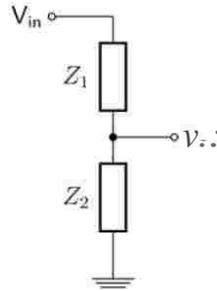
Pengisian berlebih (overcharging) dengan tegangan tinggi menghasilkan oksigen dan gas hidrogen karena terjadi elektrolisis dari air yang hilang ke sel.

2.2 Battery Monitoring System

Battery monitoring system merupakan sebuah sistem yang dirancang untuk melakukan fungsi pengawasan pada kinerja suatu baterai agar terhindar dari kemungkinan baterai beroperasi diluar standar seperti mengalami overcharging maupun overdischarging. Parameter yang diperhatikan pada sistem pengawasan baterai adalah tegangan baterai dan status pengisian (State of Charge). Pelaksanaan pada fungsi pengawasan dan pengendalian bertujuan memastikan penggunaan baterai secara optimal dan mencegah resiko kerusakan yang ditimbulkan pada baterai akibat mengalami overcharging maupun overdischarging (4). Pengukuran observer variable dan parameter yang diawasi untuk menentukan state of charge dari baterai dapat dikomunikasikan antara bagian-bagian dari BMS melalui saluran komunikasi.

2.2.1 Cell Board BMS

Cell board BMS merupakan perangkat yang berfungsi sebagai sensor untuk membaca tegangan dari baterai sebagai observer variable untuk dilakukan pengolahan data menggunakan sistem minimum sehingga didapat nilai State of Charge baterai yang sedang dilakukan pengawasan. Cell board dari sistem pengawasan baterai ini menggunakan rangkaian pembagi tegangan (voltage divider circuit) sebagai sensor untuk dibaca oleh sistem minimum.



Gambar2.2 Voltage Dievider Circuit

Rangkaian pembagi tegangan adalah sirkuit linear pasif yang menghasilkan tegangan output (Vout) yang merupakan sebagian kecil dari tegangan input (Vin). Pembagian tegangan adalah hasil dari penyebaran tegangan input antara komponen pembagi. Rangkaian pembagi tegangan ditunjukkan pada gambar berikut. Sebuah pembagi tegangan direferensikan menuju ground dengan menghubungkan dua impedansi listrik secara seri, tegangan input diterapkan di impedansi seri Z1 dan Z2 dan output tegangan Z2. Z1 dan Z2 dapat terdiri dari kombinasi dari resistor, induktor dan kapasitor. Hubungan antara tegangan input, Vin, dan tegangan output, Vout, adalah:

$$V_{out} = \frac{Z_2}{(Z_1 + Z_2)} \times V_{in} \tag{2.1}$$

2.2.2 State of Charge

State of Charge diartikan sebagai sisa kapasitas di dalam sel baterai terhadap total kapasitas baterai dalam bentuk persentase. State of Charge merupakan parameter yang sangat penting pada performasi baterai karena pada bagian dalam baterai tidak dapat diakses sehingga SoC tidak dapat diukur secara langsung. Salah satu cara yang dapat dilakukan dengan mengestimasi pengukuran variasi pada baterai, seperti tegangan dan arus. Informasi SoC yang akurat sangat diperlukan sebagai gambaran dari performa baterai dan acuan untuk sistem manajemen baterai (15)

$$\tag{2.2}$$

2.3 Open Circuit Voltage

Open Circuit Voltage (OCV) merupakan metode yang digunakan untuk melakukan estimasi SoC dari hubungan linier tegangan terhadap SoC dari baterai. Metode OCV merupakan metode yang akurat dan sederhana, hanya saja pengukuran SoC dapat dilakukan setelah proses difusi dalam baterai selesai (rest periode) [5].

Metode OCV Mengacu pada datasheet dimana tegangan maksimal baterai mernggambarkan SoC 100% dan tegangan cut-off menggambarkan SoC 0% [12]. digambarkan dengan hubungan persamaan 2.3.

$$\tag{2.3}$$

Dimana:

- = Tegangan terminal saat SoC 0%
- = Diperoleh dari nilai dan saat SoC 100%

Berdasarkan prinsip linieritas tegangan dan SoC serta adanya rest periode pada tipe baterai VRLA maka proses pengisian dan pengosongan dapat dituliskan dalam persamaan 2.4 dan 2.5 [13].

$$\tag{2.4}$$

$$\tag{2.5}$$

Dimana:

- V_{bd} dan V_{bc} = Tegangan sel saat pengisian dan pengosongan
- E_o = Tegangan konstan baterai
- R = Internal resistance
- Q = Kapasitas baterai
- i_b^* = filtered current
- i_{bt} = actual battery charge
- A dan B = exponential zone amplitude and time constant inverse

Sehingga persamaan V_{oc} dari baterai saat mencapai rest period disederhanakan dengan persamaan 2.6

[5]:

(2.6)

Dimana:

V_{oc} = equilibrated OCV

V_{tr} = Tegangan saat pengukuran

K_v = Konstanta dari persamaan $V_{oc} - V_{tr}$

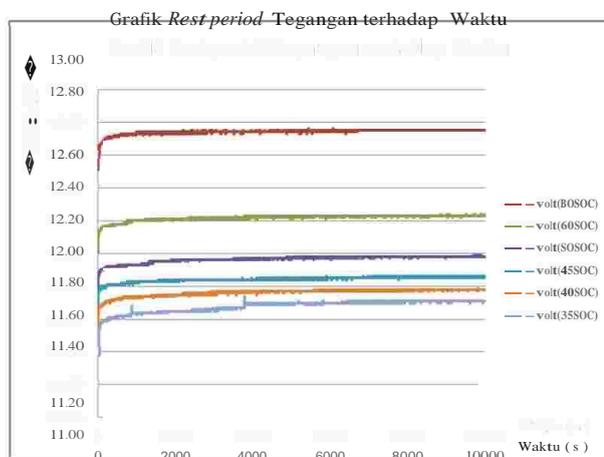
3 Pembahasan

3.1 Sampling Data OCV

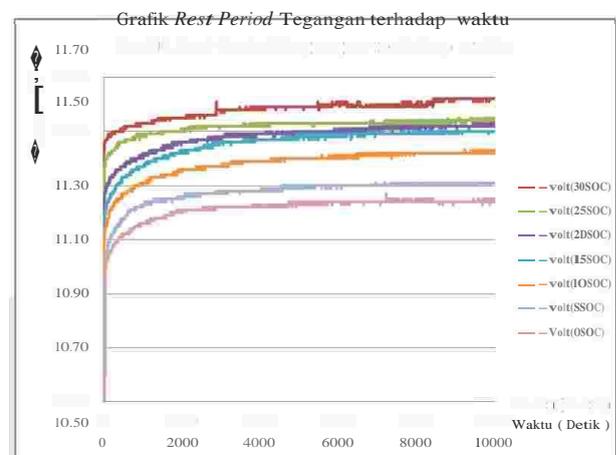
Sampling data ini bertujuan untuk mendapatkan nilai Konstanta derifatif (K_v) dimana K_v merupakan konstanta dari selisih tegangan baterai yang terukur saat terhubung dengan beban (close circuit) dengan tegangan baterai saat tidak terhubung dengan beban (open circuit). Nilai K_v yang didapatkan akan digunakan untuk memprediksi nilai V_{oc} pada saat pengukuran tegangan baterai dalam keadaan terbebani (close circuit) dengan persamaan 2.6.

Sampling pengukuran dilakukan dengan cara mengisi baterai hingga kondisi fullycharged (13.0 v) kemudian melakukan discharge hingga tahap pengosongan yang ditentukan menggunakan acuan tegangan, setelah baterai mencapai tingkat pengosongan yang telah ditentukan maka dilakukan pencuplikan data setiap 5 detik hingga baterai mencapai rest period atau sekitar 3-4 jam setelah baterai tanpa beban (open circuit) ditandai dengan tegangan baterai yang sudah stabil. Pencuplikan data dilakukan berulang sesuai jumlah tingkat pengosongan yang telah ditentukan dari maksimum pengisian hingga maksimum pengosongan.

Dari hasil pengambilan data atau sampling tegangan baterai terukur sesaat setelah beban dilepas hingga mencapai rest period yang ditandai dengan tidak ada kenaikan tegangan pada baterai setelah beban di lepas diperoleh nilai K_v yang beragam untuk setiap tingkat pengosongan dengan beban 10 Watt. Nilai K_v dipengaruhi oleh besar arus pengosongan yang keluar dari baterai dan juga state discharge. Dimana saat baterai dilakukan pengosongan mendekati tegangan cut-off maka nilai K_v akan semakin besar, hal ini terjadi karena penutupan pori-pori elektroda dari pergerakan elektron akibat reaksi elektroda dan elektrolit, grafik Ocv hingga mencapai rest period ditunjukkan pada gambar 3.1 dan 3.2 dan tabel 3.1.



Gambar3.1 Rest period 80- 35



Gambar3.2 Rest period 30- 0

Time (min)	Discharge 0.8 Amp (10 watt LOAD)												
	80%	60%	50%	45%	40%	35%	30%	25%	20%	15%	10%	5%	0%
0	12.51	12	11.75	11.64	11.51	11.39	11.25	11.14	11.00	10.88	10.75	10.62	10.50
30	12.74	12.21	11.95	11.84	11.75	11.65	11.55	11.50	11.45	11.42	11.34	11.25	11.20
60	12.74	12.22	11.96	11.84	11.77	11.67	11.58	11.52	11.49	11.46	11.39	11.28	11.22
90	12.74	12.23	11.98	11.85	11.77	11.70	11.59	11.53	11.50	11.48	11.40	11.30	11.24
120	12.75	12.23	11.98	11.86	11.78	11.71	11.59	11.53	11.51	11.49	11.42	11.30	11.24
150	12.75	12.23	11.98	11.86	11.78	11.71	11.62	11.54	11.52	11.50	11.42	11.31	11.24
160	12.75	12.23	11.98	11.86	11.78	11.71	11.62	11.54	11.52	11.50	11.43	11.31	11.24
Kv	0.24	0.23	0.23	0.22	0.27	0.32	0.37	0.40	0.52	0.62	0.68	0.69	0.74

Tabel 3.1 Rest period pengosongan baterai

Dari table data nilai Kv hasil sampling tegangan hingga mencapai rest period, maka dapat ditentukan penggunaan nilai Kv berdasarkan tingkat pengosongan yang terukur untuk melakukan prediksi nilai Open circuit voltage (OCV) dari baterai sehingga dapat dilakukan penghitungan SoC. Penggunaan Kv untuk memprediksi nilai Ocv ditunjukkan oleh table 3.2

Tingkat pengosongan	Konstanta derivatif (Kv)
State \geq 80	0.24
80 < State \geq 60	0.23
60 < State \geq 50	0.23
50 < State \geq 45	0.22
45 < State \geq 40	0.27
40 < State \geq 35	0.32
35 < State \geq 30	0.37
30 < State \geq 25	0.4
25 < State \geq 20	0.52
20 < State \geq 15	0.62
15 < State \geq 10	0.68
10 < State \geq 5	0.69
5 < State	0.74

Tabel 3.2 Penggunaan Kv berdasarkan tingkat pengosongan

Besar nilai Kv pada saat baterai dilakukan discharge hingga 50% relatif sama yaitu sekitar 0.22-0.24 volt. Sedangkan saat baterai memasuki discharge 50% hingga 0% saat tegangan baterai mendekati cut-off nilai Kv mulai memiliki perubahan yang signifikan sehingga penggunaan Kv untuk prediksi SoC discharge dari 50% menuju 0% dibuat dengan rentang 5% discharge.

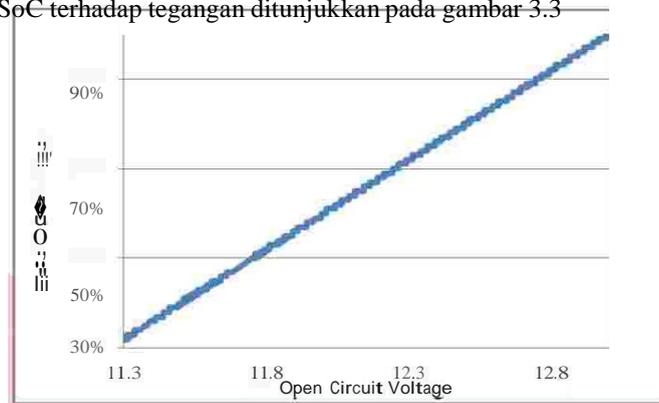
3.2 Prediksi Nilai OCV

Setelah mendapatkan nilai Kv dari hasil sampling tegangan OCV baterai hingga mencapai rest period maka dapat dilakukan validasi hubungan OCV dan SoC serta prediksi nilai OCV dalam kondisi baterai terbebani (discharge). Dimana nilai OCV hasil prediksi akan digunakan untuk menghitung SoC baterai dengan $V_{control}$ dan $V_{cut-off}$ yang tercantum pada datasheet sehingga SoC dapat diperoleh dari persamaan 2.7

$$(2.7)$$

Nilai Kv hasil sampling digunakan untuk memprediksi nilai OCV saat baterai sedang digunakan. Pengujian hubungan Open circuit voltage dilakukan dengan cara discharge baterai dari 13.0 volt hingga 10.5 volt sesuai datasheet dengan beban 10 Watt dan dilakukan sampling data setiap 5 detik. Validasi hubungan tegangan (OCV) terhadap SoC dilakukan untuk mengetahui dan memastikan bahwa tegangan yang terukur dengan

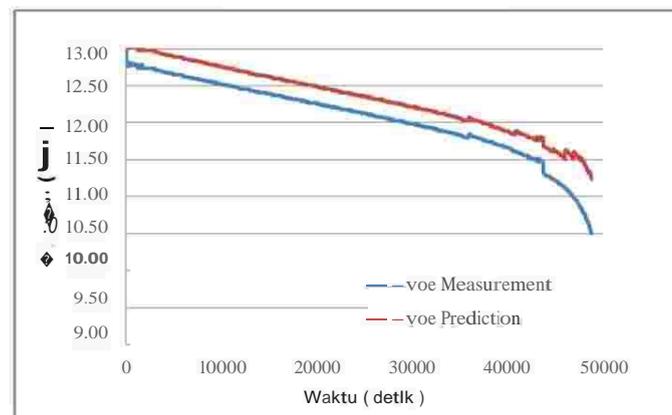
sebanding dengan State of Charge dari baterai. Pengujian dilakukan juga untuk validasi algoritma penggunaan K_v apakah sudah sesuai dengan data yang telah didapatkan pada sampling data OCV hingga mencapai rest period. Grafik hubungan SoC terhadap tegangan ditunjukkan pada gambar 3.3



Gambar3.3 Hubungan Soc terhadap tegangan OCV

Hasil pengujian pengosongan dari tegangan baterai terukur 13.0 volt hingga 10.5 volt menggunakan beban 10 watt didapatkan grafik linier antara hubungan SoC terhadap OCV dari baterai, hal ini menyatakan bahwa State of Charge dari baterai sebanding dengan tegangan baterai saat tanpa beban (OCV) sehingga algoritma dapat dilakukan implementasi pada sistem.

Pengujian dilanjutkan dengan membandingkan SoC baterai yang terukur dengan SoC baterai hasil penyetimbangan dengan menambahkan nilai K_v , hal ini bertujuan melihat nilai SoC dengan parameter OCV pada saat dilakukan pengosongan dengan menggunakan beban 10 watt. Grafik perbedaan Soc terukur dengan hasil prediksi ditunjukkan pada gambar 3.4



Gambar3.4 Perbandingan SoC terukur dan SoC prediksi

Grafik hasil pengujian discharge dari tegangan terukur 13.0 volt hingga mencapai 10.5 volt terlihat algoritma sudah sesuai dengan grafik discharge baterai dimana relatif tidak terjadi lompatan tegangan dari penambahan nilai K_v yang berubah pada rentang 5% setelah baterai mencapai SoC 50% dan dari kurva dapat dilihat saat baterai dilakukan pengosongan hingga terukur 10.5 volt hasil prediksi OCV menunjukkan Voc dari baterai berada di 11.24v hal ini menunjukkan bahwa sebenarnya baterai masih dapat digunakan tetapi sudah mendekati maksimum discharge

Selain melakukan pengujian untuk melihat kinerja dari algoritma nilai K_v yang didapat dari sampling untuk memprediksi nilai OCV dari baterai sehingga dapat dilakukan penghitungan State of Charge dari baterai menggunakan metode OCV, pengujian lain juga dilakukan yaitu validasi dari keakratan hasil prediksi tegangan OCV dengan tegangan OCV yang sesungguhnya setelah melewati rest period atau sekitar empat jam.

Pengujian dilakukan dengan prosedur yang sama, dimana melakukan implementasi sistem pada baterai dalam kondisi fully charged dengan tegangan 13.0 volt kemudian dilakukan pengosongan menggunakan beban 10 watt hingga titik SoC tertentu yang dijadikan sebagai acuan validasi. Setelah tegangan discharge mencapai titik SoC acuan maka beban dilepas dan dilakukan sampling data setiap 2 detik hingga mencapai rest period atau sekitar 4 jam dengan ditandai tegangan baterai sudah relatif stabil.

Validasi Error dari prediksi OCV didapatkan dari perbandingan nilai prediksi tegangan OCV baterai sesaat sebelum beban dilepas dengan nilai hasil pengukuran langsung baterai setelah mencapai rest period atau sekitar

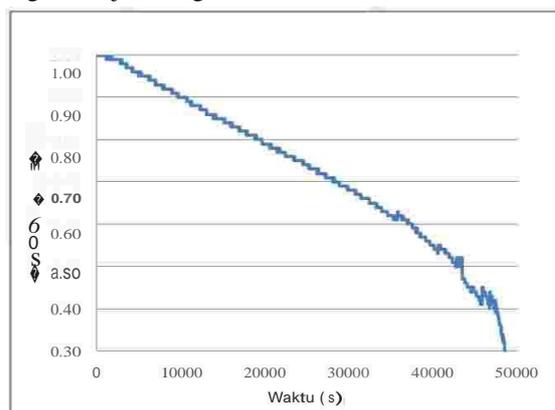
240 menit setelah beban dilepas. Hasil validasi prediksi tegangan OCV dan tegangan OCV sebenarnya dari baterai ditunjukkan pada tabel 3.4.

No	SOC Discharge	V calc	V real (Open circuit)			Error (v)	error relative(%)
			30 min	180 min	240 min		
1	80%	12.75	12.74	12.77	12.78	0.03	0.235
2	70%	12.47	12.48	12.48	12.48	0.01	0.080
3	60%	12.23	12.22	12.23	12.24	0.01	0.082
4	50%	11.98	11.96	11.97	11.98	0	0.000
5	45%	11.86	11.83	11.86	11.87	0.01	0.084
6	40%	11.77	11.74	11.75	11.76	0.01	0.085
7	35%	11.69	11.59	11.63	11.64	0.05	0.430
8	30%	11.62	11.55	11.58	11.59	0.03	0.259
9	25%	11.52	11.47	11.5	11.51	0.01	0.087
10	20%	11.5	11.45	11.48	11.48	0.02	0.174
11	15%	11.49	11.44	11.46	11.47	0.02	0.174
12	10%	11.44	11.39	11.43	11.43	0.01	0.087
13	5%	11.31	11.25	11.3	11.3	0.01	0.088
14	0%	11.24	11.2	11.25	11.25	0.01	0.089

Tabel 3.4 Validasi error tegangan OCV prediksi dengan OCV

Dari tabel hasil validasi error dari tegangan (OCV) hasil prediksi (Vcalc) dengan tegangan OCV sebenarnya dari pengukuran langsung (Vreal) menunjukkan bahwa error dari prediksi OCV terbesar adalah $\pm 0.4\%$ dimana untuk hasil prediksi tegangan OCV di rentang SoC 100% hingga 40% relatif kecil di rentang 0.00% hingga 0.008% dengan selisih tegangan baterai hasil prediksi dengan hasil pengukuran menggunakan multimeter adalah 0.01 volt sedangkan error terbesar adalah $\pm 0.2\%$ pada saat SoC terukur 80% dimana hal ini bisa disebabkan dari tegangan yang tidak stabil dari sisi baterai akibat pembebanan.

Sedangkan untuk SoC dibawah 40% error lebih bervariasi dan tersebar dari 0.1% hingga 0.4%, hal ini disebabkan bahwa nilai Kv akan semakin besar saat mendekati batas maksimum pengosongan atau cut off voltage ditunjukkan oleh gradient dari grafik akan semakin curam saat SoC sudah memasuki 30%. Hal ini dapat diatasi dengan penambahan algoritma penggunaan nilai Kv untuk pengosongan dibawah 30%. Hasil pembacaan SoC pada saat discharge ditunjukkan gambar 3.5.



Gambar 3.5 Pengukuran SoC pada saat discharge

4 Kesimpulan

Dari hasil eksperimen diperoleh kesimpulan:

1. Rangkaian pembagi tegangan sebagai sensor untuk mengukur tegangan baterai yang akan digunakan sebagai acuan penghitungan SoC memiliki akurasi baik dengan koefisien determinasi (R^2) = 1. Dimana keakuratan pembacaan tegangan berpengaruh terhadap performa sistem dalam pengukuran SoC. Efek pembebanan yang dihasilkan dari rangkaian pembagi tegangan dapat diabaikan karena relatif kecil.

2. Nilai Kv dari hasil sampling beragam, dimana saat baterai berada di keadaan discharge 13.0 volt hingga 11.75 volt nilai Kv relatif sama, Setelah kondisi baterai mendekati tegangan cut-off (10.5 volt) maka nilai Kv akan semakin besar. Sampling nilai Kv setelah tegangan memasuki 11.75 dilakukan setiap 5% SoC untuk mendapatkan algoritma yang lebih akurat dalam memprediksi nilai tegangan OCV.
3. OCV dari baterai sebanding dengan State of Charge dari baterai, oleh karena itu SoC real dari baterai didapatkan dari hasil prediksi OCV baterai pada saat baterai digunakan. Error relatif dari sistem dari hasil prediksi OCV terbesar adalah $\pm 0.4\%$ dimana untuk SoC 100% hingga 40% diperoleh error di rentang $\pm 0.00\%$ hingga $\pm 0.008\%$ dan SoC dibawah 40% diperoleh error $\pm 0.1\%$ hingga $\pm 0.4\%$, hal ini disebabkan faktor Kv yang cenderung besar jika memasuki tegangan cut-off. Dari keseluruhan pengujian validasi error didapatkan error rata-rata adalah $\pm 0.14\%$

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Richard Perez. (1993) Battery University. [Online]. http://www.arttec.net/Solar_Mower/4_Electrical/battery%20charging.pdf
- [2] Cuma M. Ugras and Koroglu Tahsin, "A comprehensive review on estimation strategies used in hybrid and battery electric vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 519, 2014.
- [3] M.S. Timothy Cleary, M.S. Harshad Kunte, and Jim Kreibick, "Electrical and Thermal Modeling of a Large-Format Lithium Titanate Oxide Battery System," in *San José State University*, San José, 2015, pp. 12-13.
- [4] Wen-Yeau Chang, "The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review," Taiwan, 2013.
- [5] Alessandro Mariani, Thomas Stockley, Kary Thanapalan, Jonathan Williams, and Peter Stevenson, "Simple and Effective OCV Prediction Mechanism for VRLA Battery Systems," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Mechanical Engineering and Mechatronics*, Prague, Czech Republic, 2014, p. No. 140.
- [6] R.F. Post and T.K. Fowler, "A high-efficiency electromechanical battery," in *Proceedings of the IEEE*, 1993, pp. 462-474.
- [7] A. Widitya, "Pengaruh Variasi Elektrolit Jembatan Garam Terhadap Impedansi Sel Galvanik Cu/Zn," *Jenis-Jenis Baterai*, pp. 5-6, 2007.
- [8] A.H. Zimmerman, "Self-discharge losses in lithium-ion cells," *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE (Volume:19, Issue: 2)*, pp. 19-24, 2004.
- [9] wiki. (2016, Januari) Wikipedia. [Online]. https://en.wikipedia.org/wiki/VRLA_battery
- [10] Tumpal Simbolon. (2015, Maret) Scribd. [Online]. <https://id.scribd.com/doc/258926749/Reaksi-Kimia-Proses-Pengosongan-Dan-Pengisian-Baterai>
- [11] Liviu Toma Septimiu Mischie, "Behavior of the Lead Acid Battery after the Rest Period," *POWER SYSTEMS*, vol. 3, no. 3, pp. 1-7, 2008.
- [12] John Chiasson and Baskar Vairamohan, "Estimating the State of Charge of a Battery," vol. 13, no. III.
- [13] A. Mariani, K. Thanapalan, P. Stevenson, T. Stockley, and J. Williams, "Techniques for monitoring and predicting the OCV for VRLA battery systems," in *Automation and Computing (ICAC), 2015 21st International Conference on Automation & Computing University of Strathclyde*, Glasgow, 2015, pp. 1-6.
- [14] Yuan Zou, Hu Xiaosong, Hongmin Ma, and Eben Li Shengbo, "Combined State of Charge and State of Health estimation over lithium-ion battery cell cycle lifespan for electric vehicles.," *Journal of Power Sources*, pp. 793-803, 2014.