PENGISI DAYA BATERAI SEALED LEAD ACID (SLA) SERI BERBASIS PENYEIMBANG TEGANGAN AKTIF

Yohannes C.H. Yuwono[1], Mohd Ilyas Hadikusuma [2], Rianda[3]

[123,] Program Studi Teknologi Rekayasa Sistem Elektronika, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Pontianak,

Jln. Jenderal Ahmad Yani, Kota Pontianak, Kalimantan Barat
[1] yohannes.chy1@gmail.com,[2]mohd.ilyas.hadikusuma@gmail.com, [3]riandafarhan@gmail.com

Abstract

Sealed Lead Acid (SLA) energy storage systems are more popular because of their relatively affordable price and suitability for low-power electrical loads. However, problems begin to arise over time when SLA batteries are configured in series, caused by overcharging or undercharging if the State of Charge (SOC) between batteries is unbalanced. This applied research aims to overcome these problems through an active detection mechanism for SOC conditions and SLA battery temperature as a basis for charging treatment to achieve a balanced voltage value between batteries. The use of a microcontroller connected to a pwm amplifier circuit and a mosfet circuit is combined with a Buck and Boost converter circuit configuration that can automatically switch modes based on voltage sensors on 2 batteries connected in series. From the results obtained, the system demonstrates dynamic response capabilities with automatic transitions between buck and boost modes based on real-time voltage difference monitoring at a threshold of 0.5 Volts. The system characterization results prove the ability to reduce voltage imbalance between batteries by up to 57%, confirming the effectiveness of the active voltage balancing method using a buck-boost converter.

Keywords : *SLA Battery, Mikrokontroler, State of Charg, Voltage Balancing, Buck-Boost Converter*

Abstrak

Sistem penyimpanan energi berjenis Sealed Lead Acid (SLA) lebih populer karena harga yang relatif terjangkau dan sesuai untuk diaplikasikan pada beban listrik berdaya rendah. Namun, permasalahan mulai muncul seiring waktu saat baterai SLA terkonfigurasi secara seri yang disebabkan oleh kondisi overcharging ataupun undercharging jika State of Charge (SOC) antar-baterai tidak seimbang. Penelitian terapan ini bertujuan untuk mengatasi permasalahan tersebut melalui mekanisme pendeteksian kondisi SOC dan suhu baterai SLA secara aktif sebagai dasar perlakuan dalam pengisian daya agar dicapai nilai tegangan antar baterai yang seimbang. Penggunaan Mikrokontroler yang dihubungkan dengan rangkaian penguat pwm dan rangkaian mosfet digabungkan dengan konfigurasi rangkaian konverter Buck dan Boost yang dapat secara otomatis berganti mode berdasarkan sensor tegangan pada 2 baterai yang terhubung seri. Dari hasil yang didapatkan sistem menunjukkan kemampuan respon dinamis dengan transisi otomatis antara mode buck dan boost berdasarkan monitoring perbedaan tegangan real-time pada batas threshold 0,5 Volt. Hasil karakterisasi sistem membuktikan kemampuan reduksi ketidakseimbangan tegangan antar baterai hingga 57%, mengkonfirmasi keefektifan metode active voltage balancing menggunakan konverter buck-boost.

Kata kunci : *Baterai SLA, Mikrokontroler, State of Charge, Voltage Balancing, Buck-Boost Converter*

1. PENDAHULUAN

Sistem penyimpanan energi listrik ke dalam baterai selalu menjadi isu teknologi yang menarik untuk dibahas. Berbagai pilihan baterai dengan spesifikasi yang beragam tersedia di pasar sehingga memungkinkan pengguna untuk memilih sesuai dengan kebutuhan daya dan jenis beban listriknya. Baterai Sealed Lead Acid (SLA) merupakan salah satu jenis baterai tersebut dan

lebih diminati oleh pengguna karena pertimbangan harga. Baterai tersebut kerap dimanfaatkan sebagai sumber energi pendukung untuk beban listrik berdaya rendah, seperti pada moda transportasi ringan, peralatan rumah tangga dan kantor serta pada sistem pembangkitan energi baru terbarukan. Oleh karenanya, diperlukan penanganan dan perawatan yang tepat agar mampu mempertahankan performa dan menambah usia pemakaiannya.

Pada beberapa aplikasi seperti perangkat Uninterrupted Power Supply (UPS) dan sistem pembangkitan energi baru terbarukan sederhana, baterai SLA dapat ditemukan dalam konfigurasi seri, paralel ataupun kombinasi dari keduanya. Akan tetapi terdapat kasus dimana konfigurasi baterai SLA secara seri memiliki keterbatasan, khususnya jika kondisi State of Charge (SOC) masing-masing baterai tidak seimbang. Sebuah riset yang dilakukan oleh Yongqi Wang [1], menemukan bahwa perbedaan kapasitas antar cell yang tersusun seri dalam baterai kemasan berpotensi mengurangi pemanfaatan energi dan kapasitas, sementara perbedaan resistansi ohmik dan polarisasinya akan cendrung mempengaruhi pada kinerja daya. Temuan ini menegaskan kembali hasil riset yang dilakukan beberapa tahun sebelumnya. Räber, M., et. al. berpendapat bahwa ketidakseimbangan cell baterai mampu memicu terjadinya resiko overcharging ataupun undercharging sehingga berdampak pada penurunan usia pakai baterai SLA. Untuk mengantisipasi hal tersebut, mekanisme yang efektif dalam mendeteksi status SOC baterai SLA terkonfigurasi seri perlu diterapkan. Keberhasilan mekanisme deteksi tersebut kemudian juga perlu diikuti dengan mekanisme perlakuan yang menjamin distribusi energi listrik ke tiap baterai SLA secara proporsional dan aman sesuai dengan karakteristik pengisian yang ditetapkan oleh produsen baterai [2].

Penelitian yang membahas metode penyeimbang tegangan pada baterai sudah dilakukan dalam dua dekade terakhir. Akan tetapi, objek baterai yang dilibatkan pada sejumlah penelitian tersebut lebih banyak melibatkan penggunaan baterai jenis Lithium Ion (Li-ion). Sejumlah penelitian terdahulu yang menjadi rujukan dalam penelitian terapan ini dijelaskan sebagai berikut.

Terdapat setidaknya dua publikasi penelitian terdahulu yang berisi kajian terkait metode penyeimbangan dan performa baterai jenis SLA. Alfredo alvarez, melakukan studi mengenai berbagai topologi rangkaian dan metode penyeimbangan tegangan baterai, khususnya jenis Li-Ion, pada beberapa jenis kendaraan listrik. Metode analisis pada penelitian tersebut dilakukan secara kuantitatif melalui simulasi. Selain itu, dalam penelitian tersebut dilakukan perbandingan terkait kecepatan penyeimbangan, jumlah komponen dan kompleksitas pengendalian [3]. Tiga tahun setelahnya, Kavaliauskas melakukan studi terkait Life Cycles pada empat jenis baterai SLA yang terhubung secara seri untuk keperluan PLTS yaitu tipe Non-deep Cycle, tipe Deep-cycle, tipe GEL dan tipe AGM. Tim peneliti melibatkan modul sistem penguji baterai berbasis ATMega328 dan sebuah modul monitoring dan DC-DC converter untuk masing-masing baterai dan menerapkan metode Charge-Discharge. Melalui metode tersebut, dilakukan analisis kuantitatif terhadap beberapa parameter baterai seperti pengukuran arus dan tegangan, life cycle dan kapasitas baterai [4].

Adapun terkait metode dan algoritma penyeimbangan baterai, telah dirujuk tiga penelitian terdahulu sebagai berikut. Sebuah studi berbasis simulasi telah dilakukan oleh Faqih, M.R., yang membandingkan algoritma Fuzzy Logic Controller (FLC) tipe Mamdani dan Sugeno dalam menyeimbangkan tegangan baterai Li-Ion terkonfigurasi seri dan paralel. Dengan topologi pasif, yaitu resistor, peneliti menyimpulkan bahwa algoritma FLC tipe Mamdani yang dibangun lebih optimal jika diterapkan pada saat pengisian baterai karena delta tegangan yang dihasilkan lebih kecil dan kapasitas baterai yang terisi lebih besar [5]. Adapun penggunaan *fuzzy logic* sering digunakan dalam mengambil Keputusan dari hasil yang didapatkan seperti pada penelitian oleh Rahma Nur Amalia dan Rival Biasror [6], [7] sehingga metode ini menjadi metode yang umum digunakan.

Brown, S melakukan penelitian eksperimental dan menyatakan berhasil membangun sistem BMS yang dapat mengestimasi nilai SOC dan mampu menyeimbangkan tegangan baterai. Tim peneliti menerapkan sistem penyeimbang tegangan SLA dengan teknik lossless switching mechanism sehingga memungkinkan pertukaran baterai untuk menyuplai energi listrik ke beban secara bergantian. Ketika salah satu baterai terdeteksi kurang energi, mekanisme elektronik dengan otomatis akan memisahkannya untuk diisi ulang, sementara baterai lainnya tetap menyuplai energi ke beban listrik. Peneliti menyatakan bahwa saat dilakukan pengisian (charging), penyeimbangan tegangan tercapai setelah 80 detik dan dicapai perbedaan SOC antar baterai sebesar 1,4%.

Sebaliknya, saat proses pengosongan (discharging), sistem telah mengestimasi nilai maksimum Depth of Discharge (DOD) kedua baterai sebesar 10.8 Volt [8] . Selanjutnya, Aula, F.T. mempublikasikan penelitiannya terkait sistem penyeimbang tegangan baterai SLA terkonfigurasi seri dengan menerapkan metode kapasitor dinamis yang terdiri dari komponen induktor, kapasitor dan dua saklar elektronik terkendali. Dengan mengendalikan nilai sinyal PWM, saklar akan mengatur kecepatan penyeimbang tegangan pada baterai SLA. Peneliti berpendapat bahwa sistem yang dibangunnya memiliki peluang yang menjanjikan karena mampu menyeimbangkan tegangan baterai dalam waktu yang singkat. Sayangnya, pengujian yang dilakukan masih sebatas simulasi berbasis MatLab dan belum diuji secara eksperimental sehingga perlu dibuktikan [9].

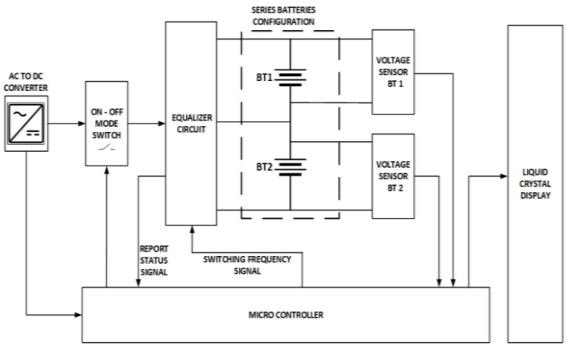
Selain sudut pandang dari sisi kajian baterai SLA dan metode penyeimbangan, terdapat sebuah publikasi penelitian terdahulu oleh Aktas, yang meneliti pengaruh lingkungan eksternal, yaitu suhu, pada proses pengisian baterai SLA yang terangkai seri pada kendaraan militer dan menerapkan algoritma kendali PI pada rangkaian pengisi dayanya. Dalam penelitian tersebut, peneliti membandingkan metode pengisian baterai SLA secara konvensional (CC dan CV) dengan metode yang dibuatnya dan melibatkan nilai Charging Rate yang berbeda-beda. Aktas, A, mengklaim bahwa dengan rancangan yang dibangun olehnya terjadi penurunan suhu baterai SLA sebesar 15° Celcius [10].

Berangkat dari beberapa uraian tersebut, pada penelitian ini akan dibangun sistem pengisi daya untuk baterai jenis SLA terkonfigurasi seri dengan memadukan metode penyeimbangan tegangan aktif dan pengendalian suhu pada baterai. Algoritma pemrograman khusus akan dibuat terutama dalam memberi prioritas pengisi secara selektif bagi baterai yang terindikasi mengalami potensi degradasi lebih rendah berdasarkan pertimbangan selisih tegangan OCV antar baterai dan dinamika suhu yang terjadi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat mencegah ketidakseimbangan tegangan antar baterai sekaligus mengoptimasi daya pakai baterai SLA.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1. Blok diagram system

Dalam penelitian ini diawali dengan mendesain dari blok diagram penyeimbang tegangan aktif. Adapun blok diagram dapat dilihat pada gambar berikut :

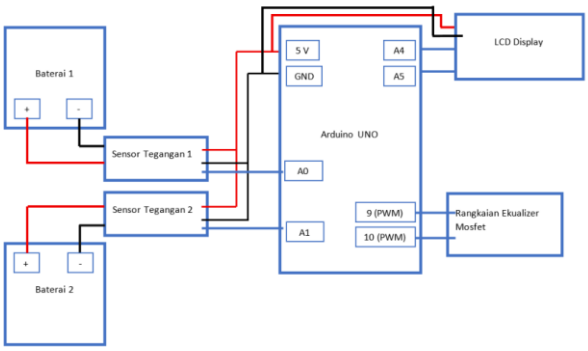


Gambar 1. Blok Diagram Sistem Penyeimbang Tegangan Aktif

2.2. Rancangan Perangkat

Perangkat mikrokontroller difungsikan untuk pendeteksian tegangan baterai, menghasilkan nilai PWM yang sesuai, serta menampilkan data tegangan di baterai. PWM ini digunakan agar baterai terisi sesuai dengan kondisi yang diinginkan agar dapat menjaga saat pengisian baterai [11], [12]. Dalam mendeteksi nilai tegangan baterai, digunakan modul sensor tegangan DC yang menerapkan sistem pembagi tegangan. Sensor tegangan ini akan merespon perubahan tegangan masing-masing baterai SLA untuk diteruskan ke pin A0 dan pin A1 dari mikrokontroller Arduino Uno. Adapun untuk menampilkan data tegangan yang didateksi, dilibatkan modul LCD display yang dihubungkan ke pin A4 dan A5 pada mikrokontroller.

Modul tersebut menggunakan sumber tegangan tambahan (auxliarry) dari mikrokontroller sebesar 5 Volt. Sedangkan untuk menghasilkan nilai PWM dalam mengakomodir kebutuhan fungsi penyeimbangan baterai, digunakan dua pasang pin PWM dari mikrokontroller, yaitu pin 9 dan pin 10. Setiap pasangan difungsikan untuk memberikan pulsa ke pasangan transistor Mosfet agar dapat bekerja dalam mode buck dan mode boost di saat skenario yang direncanakan terjadi pada kedua baterai. Gambar 2 mendeskripsikan sejumlah pin yang digunakan pada sistem yang dibuat dalam penelitian ini.



Gambar 2. Pin Mikrokontroller Arduino Uno Yang Digunakan Pada Sistem Balancing

2.3. Mode Kerja Konverter Daya

Dalam penelitian ini, BT1 dan BT 2 dirangkai seri sehingga tegangan total yang diasumsikan saat dalam kondisi penuh adalah 2 x 13,8 Volt atau sebesar 27,6 Volt. Oleh karenanya, nilai tegangan sumber input dibuat melebihi tegangan tersebut sebesar 30 Volt. Adapun target tegangan optimum baterai saat pengecasan dipertahankan pada rentang 14,2 - 14,4 Volt atau baterai dalam mode floating (sesuai datasheet baterai SLA).

Skenario awal eksperimen pada penelitian ini dikondisikan bahwa BT 1 memiliki kelebihan tegangan dibandingkan BT 2. Nilai threshold keduanya sengaja ditentukan sebesar maksimal 0,5 Volt dan melebihi nilai yang disarankan, yaitu 0,1 Volt. [13] Hal ini bertujuan mengantasipasi kondisi serius seperti ketidaklayakan sistem dari sisi instalasi maupun kerusakan internal baterai. Saat tegangan BT 1 lebih besar dari BT 2, skenario yang terjadi adalah mode Buck. Pada mode tersebut, tegangan input langsung diambil dari sumber utama, yaitu 30 Volt dan diubah ke tegangan 14,3 Volt dengan nilai arus pengecasan optimum tidak melebihi 1 Ampere guna menjaga kesehatan sel di dalam baterai SLA Nilai duty cycle (D) yang digunakan untuk operasi mode Buck tersebut sebesar 47,67 %. Adapun saat BT 1 dalam keadaan lebih rendah dari BT 2, skenario pengendalian berubah menjadi mode Boost. Dalam mode tersebut, tegangan nominal, sebesar 13,8 Volt pada BT 2, dijadikan input untuk menghasilkan tegangan pengecasan BT 1 sebesar 14,3 Volt. Nilai duty cycle yang digunakan untuk operasi mode Boost sebesar 4,17 %. Perlu diperhatikan bahwa topologi konverter daya yang digunakan pada penelitian ini berbasis Continous Current Mode (CCM) guna menjaga arus tetap di atas 0 Ampere.

Parameter nilai duty cycle dan nilai induktor serta kapasitor dari kedua mode konverter yang diimplementasikan dari sistem didefinisikan melalui persamaan (1) sampai dengan (6). [14]

Mode buck converter :

$$D = \frac{V_{Out}}{V_{In}} \quad (1)$$

$$L_{min} = \frac{(1-D)R_{Load}}{2\,x\,f} \quad (2)$$

$$C = \frac{1-D}{8L(\frac{\Delta V_{Out}}{V_{Out}})f^2} \quad (3)$$

Mode boost converter :

$$D = 1 - \frac{V_{In}}{V_{Out}} \quad (4)$$

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R_{Load}}{2\,x\,f} \quad (5)$$

$$C = \frac{D}{R_{Load}(\frac{\Delta V_{Out}}{V_{Out}})f} \quad (6)$$

dimana $(\frac{\Delta V_{Out}}{V_{Out}})$ merupakan faktor ripple dan memiliki pengaruh pada kestabilan tegangan output. Dengan faktor ripple yang kecil, maka dapat diperoleh nilai tegangan output converter yang stabil.

2.4. Pengumpulan Data

Pada penelitian ini akan mengumpulkan data berupa hasil ukur pada baterai SLA. Data – data yang diambil berupa nilai tegangan SOC pada baterai, nilai tegangan pada baterai saat kapasitas minimum dan maksimum. Pengambilan data-data nilai tegangan dan arus dengan menggunakan sensor yang dipasang pada perangkat alat yang dibuat. Sensor-sensor yang dipasang sebelum digunakan akan dilakukan kalibrasi terlebih dahulu. Penkalibrasian ini dilakukan agar nilai keluaran dari sensor sesuai dengan nilai aktual yang diukur dengan alat standar yang biasa digunakan. Proses kalibrasi yang paling sederhana adalah dengan membandingkan nilai output sensor dengan nilai dari alat ukur yang digunakan, contoh jika menggunakan sensor tegangan maka dapat menggunakan multimeter.

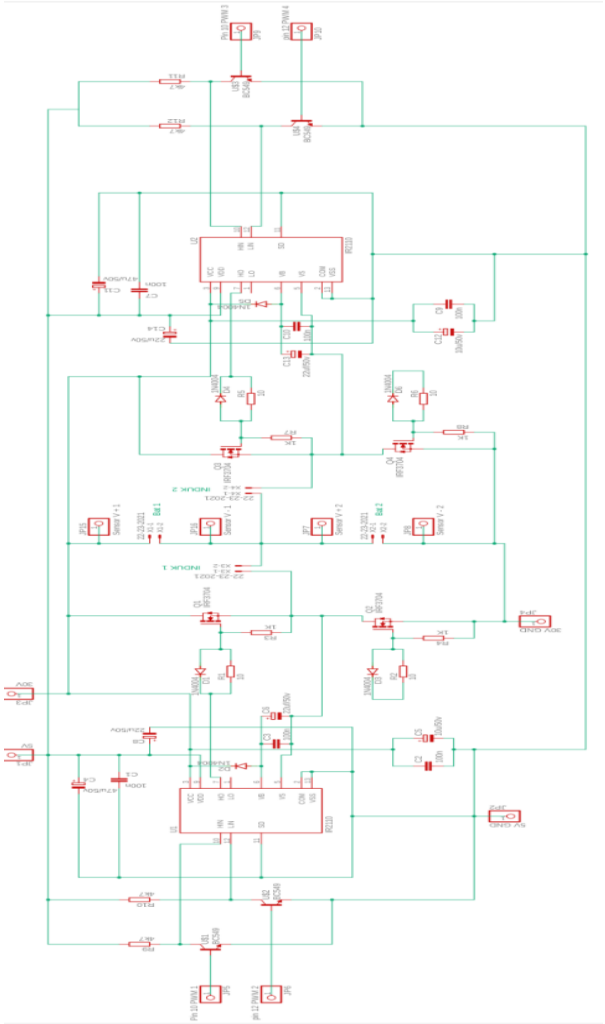
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Rangkaian penyeimbang dari sistem yang dibuat diperlihatkan pada gambar 3. Rangkaian tersebut pada dasarnya tersusun atas sepasang bagian penguat tegangan dari pin PWM dan driver Mosfet, serta dua buah konfigurasi rangkaian converter yaitu buck dan boost. Prinsip kerja dari rangkaian sistem penyeimbang adalah menggunakan dua buah IC IR2110 yang setiapnya memerlukan tegangan kerja minimal 5 Volt agar dapat bekerja secara optimal dan mampu merespon kedua input PWM untuk mengeluarkan

output. Sinyal PWM yang diinputkan pada pin 10 (high) dan pin 12 (low) harus dalam kondisi yang saling bertolak belakang untuk mencegah hubungan pendek (short) pada sistem.

Melalui data perbedaaan tegangan yang disampaikan oleh kedua sensor tegangan ke mikrokontroller, Sinyal PWM untuk masing-masing IC IR2110 dapat dikondisikan agar dapat membentuk konfigurasi rangkaian buck ataupun boost saat pengisian salah satu baterai. Sinyal PWM yang berasal dari mikrokontroller akan dihentikan saat kedua baterai mencapai kesetimbangan sesuai nilai perbedaan tegangan yang dinginkan, yaitu ≤ 0,5 Volt. Nilai optimum yang disarankan dalam menjaga nilai threshold batarai berada di bawah angka 0,1 Volt. Namun, pemilihan nilai maksimal sebesar 0,5 volt sengaja ditentukan untuk mengantisipasi lebih dini jika terjadi kondisi serius

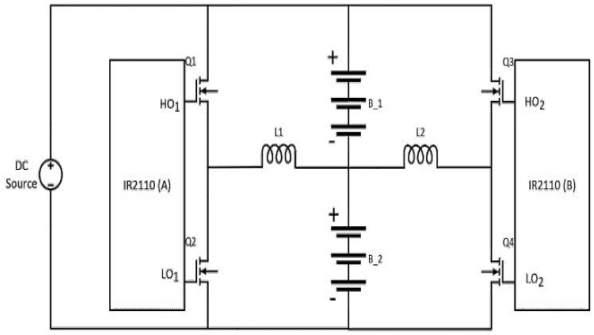
Adapun perancangan ketiga bagian dari rangkaian penyeimbang tegangan dijelaskan sebagai berikut



Gambar 3. Rangkaian Pengisian Daya

3.1 Rangkaian Buck Boost

Topologi Buck dan Boost yang digunakan pada rangkaian sistem memiliki fungsi yang independen. Konverter buck digunakan untuk menurunkan tegangan input, sebaliknya konverter Boost difungsikan untuk menaikkan tegangan [15], [16]. Karena fungsi yang berbeda tersebut, maka rancangan kedua topologi tersebut juga berbeda. Gambar 4 memperlihatkan proses kerja kedua topologi. Mode Buck bekerja saat tegangan Baterai B_1 lebih tinggi daripada Baterai B_2. Nilai tegangan dari sumber DC akan diturun untuk mengisi Baterai B_2 melalui transistor Q1 dan L1.



Gambar 4. Topologi Konverter Buck Dan Boss Untuk Penyeimbang Tegagan Baterai SLA

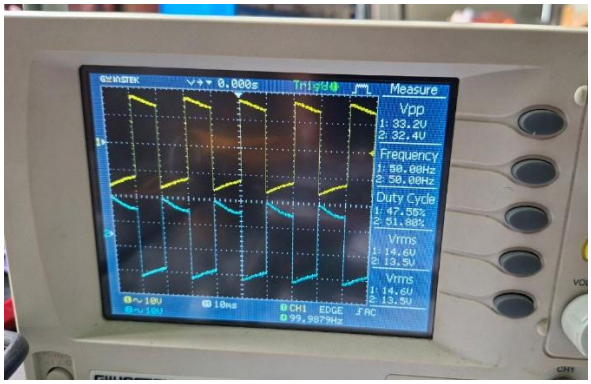
Susunan seri baterai SLA secara ideal memiliki tegangan optimum sebesar 2 x 13,8 Volt atau 27,6 Volt. Oleh karenanya untuk dapat mementransfer energi, tegangan sumber DC perlu diatur di atas tegangan tersebut menjadi 30 Volt. Agar dapat bekerja dalam mode buck, tegangan tersebut perlu diturunkan menjadi tegangan pengecasan sebesar maksimal 14,4 Volt. Seusai dengan formulasi untuk topologi Buck, maka Duty cylcle yang diperlukan pada mode tersebut ditentukan sebesar 49,7% atau sekitar 50%. Arus pengecasan baterai SLA diatur maksimal sebesar 1 ampere dengan asumsi resistansi baterai melebihi 30 m□ agar tidak menimbulkan dampak pada sel baterai saat diisi (charging). Dengan demikian, berdasarkan formulasi teoritis dibutuhkan nilai induktor dan kapasitor secara berturut-berturut minimal 68 µH dan 3,9 µF /35 Volt dengan frekuensi switching sebesar 50 kHz. Adapun untuk topologi Boost, tegangan di Baterai B_2 diasaumsikan sebesar 13,8 Volt. Oleh karenanya, agar dihasilkan tegangan 14,4 Volt untuk pengisian baterai di B_1, maka diperlukan nilai Duty Cycle sebesar 4,2 % atau sekitar 5 %. Arus pengecasan diatur tidak melebihi 1 Ampere. Untuk keperluan parameter tersebut, secara teoritis diperlukan nilai induktor dan kapasitor

secara berturut-berturut minimal 38 µH dan 6,8 µF/35 Volt dengan frekuensi switching sebesar 50 kHz.

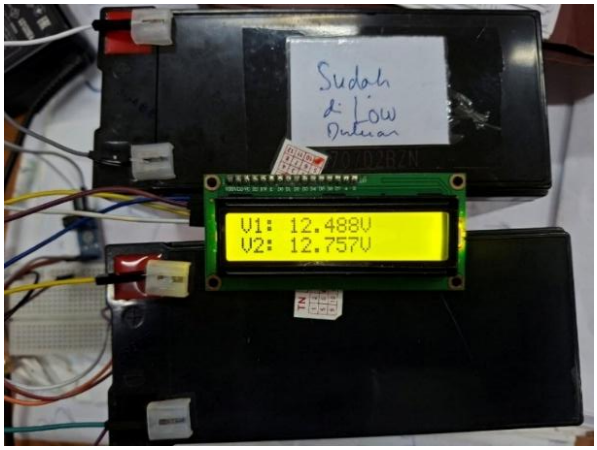
3.2 Pengujian Sistem

Proses selanjutnya adalah melakukan pengujian dengan cara memasukan PWM ke rangkaian sistem yang telah dibuat. Pengujian dilakukan untuk mengetahui atau melihat perubahan terjadinya switch tegangan saat baterai yang nilai tegangan paling kecil dari kedua baterai yang terbaca oleh sensor.

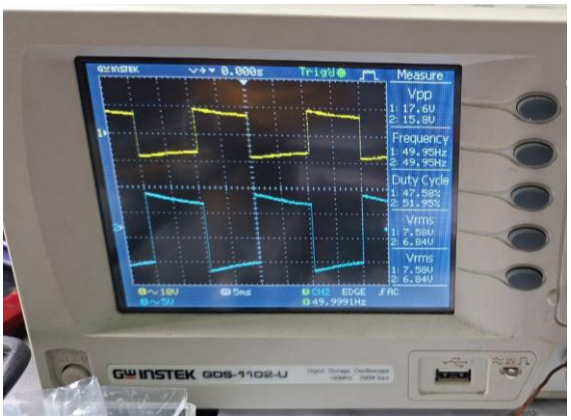
Dari hasil percobaan dapat dilihat pada gambar – gambar dibawah ini. Pada percobaan pertama dengan tertampil pada Osiloskop merupakan data sinyal PWM yang bergantian dan nilai tegangan yang dikeluarkan dari mosfet untuk mengisi pada baterai. Pada percobaan pertama didapatkan nilai tegangan keluaran dari mosfet pada tegangan 14,55 v dan 13,5 v dengan duty cycle 47.55 % dan 51.80 %, pada nilai tegangan baterai dari sensor tegangan DC yaitu 12.48 v dan 12.75 v.



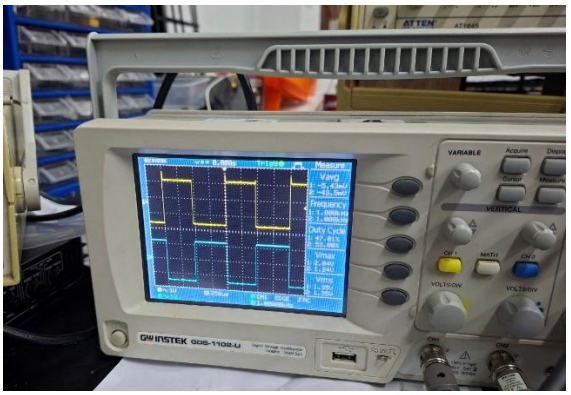
Gambar 5. Percobaan Pertama



Gambar 6. Nilai Tegangan Baterai Pada Sensor Tegangan Pada Menit 90



Gambar 7. Percobaan Kedua



Gambar 8. Percobaan Ketiga

Pada percobaan kedua didapatkan tegangan 7.5 v dan 6.8 v dengan duty cycle 47.59% dan 51.95%. Pada percobaan ketiga didapatkan tegangan 2.04 v dan 1.24 v dengan duty cycle 47.01% dan 53.08%. Dari hasil percobaan didapatkan rangkaian sistem dapat melakukan switch oleh IC IR2110 dan mosfet berdasarkan input PWM. Saat kondisi Input PWM 1 pada kondisi High maka Input PWM 2 maka harus pada kondisi Low sehingga mosfet akan bergantian mengisi baterai.

Adapun data pengujian sistem dalam menyeimbangkan baterai SLA diperlihatkan pada tabel I. Pengujian dilakukan selama 5 jam dengan interval pengukuran lebih kurang setiap 30 menit.

TABEL I. HASIL PENGUJIAN PENYEIMBANGAN TEGANGAN BATERAI SLA

Waktu (Menit)	Tegangan B1 (V)	Tegangan B2 (V)	Arus B1 (A)	Arus B2 (A)	Selisih Tegangan (V)
0	11,8	12,1	0	0,75	0,3
30	11,95	12,45	0	0,74	0,5
60	12,15	12,75	0	0,73	0,6
90	12,88	12,49	0,7	0	0,39

120	12,92	12,75	0,68	0	0,17
150	12,96	12,95	0,65	0	0,01
180	13,05	13,2	0	0,7	0,15
210	13,18	13,45	0	0,68	0,27
240	13,52	13,35	0,6	0	0,17
270	13,42	13,55	0	0	0,13
300	13,45	13,58	0	0	0,13

Berdasarkan hasil pengujian tersebut, diperlihatkan bahwa sistem berhasil mengurangi ketidakseimbangan tegangan secara signifikan meskipun dengan efisiensi yang terbatas. Pada fase awal (0-60 menit), sistem mengisi Baterai 2 melalui topologi buck dengan arus relatif konstan, yaitu 0,73-0,75A. Fase ini memperlihatkan perbedaan selisih tegangan yang cukup besar dari 0,3V menjadi 0,6V. Namun, selisih yang lebih besar dari 0,5 Volt tersebut justru membuat sistem secara responsif beralih ke mode boost pada menit 90-150 untuk mentransfer energi dari Baterai 2 ke Baterai 1 dengan arus 0,65-0,70A dan seterusnya berhasil menekan selisih tegangan hingga 0,01 Volt. Pada fase-fase terakhir (270-300 menit), pola penyeimbangan ini dipertahankan yang menunjukkan peralihan mode buck ataupun boost yang dinamis. Pola penyeimbangan ini dapat dikatakan berhasil karena mampu memperbaiki ketidakseimbangan sebesar 57 % yang dihitung berdasarkan rasio selisih tegangan awal dan akhir terhadap kondisi ketidakseimbangan mula-mula.

Meskipun demikian, sistem yang dibuat belum cukup mampu mencapai efisiensi yang optimal. Hal ini ditunjukkan oleh konsumsi arus pengisian kedua baterai yang baru mencapai kisaran 0,60 – 0,75 Ampere yang mengindikasikan rugi daya sistem. Kerugian ini dimungkinkan pemilihan komponen semikonduktor dan proses switching yang belum tepat sehingga perlu dipertimbangkan untuk ke depannya.

4. Kesimpulan dan Saran

Adapun kesimpulan adalah sistem penyeimbang tegangan aktif berbasis Arduino uno untuk 2 baterai Sealed Lead Acid yang terkonfigurasi seri berhasil diimplementasikan. Sistem yang dibuat mampu melakukan transisi buck boost secara otomatis berdasarkan perbedan tegangan secara *real-time* dengan batas threshold 0,5 volt. Hasil yang didapatkan sistem dapat mereduksi ketidakseimbangan tegangan antar baterai hingga 57 %, sehingga menunjukan keefektifan *voltage balancing* dengan menggunakan buck-boost konverter.

Daftar Pustaka:

[1] Y. Wang *et al.*, "Impact of Individual Cell Parameter Difference on the Performance of Series-Parallel Battery Packs," *ACS Omega*, vol. 8, no. 11, pp. 10512–10524, 2023, doi: 10.1021/acsomega.3c00266.

[2] M. Raber, D. O. Abdeslam, A. Heinzelmann, and A. Ramirez, "Performance estimation of a cell-to-cell-type active balancing circuit for lithium-ion battery systems," *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, pp. 1005–1010, Aug. 2017, doi: 10.1109/ISIE.2017.8001383.

[3] A. Alvarez-Diazcomas, A. A. Estévez-Bén, J. Rodríguez-Reséndiz, M. A. Martínez-Prado, R. V. Carrillo-Serrano, and S. Thenozhi, "A Review of Battery Equalizer Circuits for Electric Vehicle Applications," *Energies 2020, Vol. 13, Page 5688*, vol. 13, no. 21, p. 5688, Oct. 2020, doi: 10.3390/en13215688.

[4] Ž. Kavaliauskas, I. Šajev, G. Blažiūnas, and G. Gecevičius, "Electronic Life Cycle Monitoring System for Various Types of Lead Acid Batteries," *Appl. Sci. 2023, Vol. 13, Page 4746*, vol. 13, no. 8, p. 4746, Apr. 2023, doi: 10.3390/app13084746.

[5] M. R. Faqih, N. A. Windarko, and E. Wahjono, "Sistem Baterai Cell Balancing Pasif Menggunakan Kontrol Logika Fuzzy Tipe Mamdani untuk Baterai Pack Lithium," *J-Innovation*, vol. 10, no. 2, pp. 34–43, 2021, doi: 10.55600/jipa.v10i2.111.

[6] A. Noor, O. Rahmanto, P. Studi, T. Informasi, P. Negeri, and T. Laut, "Sistem Monitoring Penggunaan Energi Listrik Rumah," *JIRE (Jurnal Inform. Rekayasa Elektron.*, vol. 8, no. 2, pp. 296–307, 2025.

[7] R. Biasrori, I. Wayan Agus Arimbawa, and I. W. Wirarama Wedashwara, "Fuzzy Rule Mining," *J. Inform. Rekayasa Elektron.*, vol. 2, no. 1, pp. 60–69, 2019, [Online]. Available: http://e-journal.stmiklombok.ac.id/index.php/jire

[8] S. Brown, T. Pierre, F. M. Danielle, E. Tanyi, and M. L. Katche, "Application of Power Electronics and Control for Dual Battery Packs Management with Voltage Balancing and State of Charge Estimation," *Energy Power Eng.*, vol. 14, no. 12, pp. 762–780, 2022, doi: 10.4236/epe.2022.1412042.

[9] F. T. Aula, "Controlling the Unbalanced

Voltages of a Series-Connected Lead-Acid Batteries in a PV Power Storage System using Dynamic Capacitor Technique," *J. Eng.*, vol. 29, no. 10, pp. 165–181, Oct. 2023, doi: 10.31026/j.eng.2023.10.10.

[10] A. Aktas, "Design and implementation of adaptive battery charging method considering the battery temperature," *IET Circuits, Devices Syst.*, vol. 14, no. 1, pp. 72–79, Jan. 2020, doi: 10.1049/iet-cds.2019.0270.

[11] I. Boumedra, A. Diani, K. El Khadiri, A. Tahiri, M. O. Jamil, and H. Qjidaa, "High efficiency multi power source control constant current/constant voltage charger lithium-ion battery based on the buck converter," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 13, no. 1, pp. 207–217, Feb. 2023, doi: 10.11591/ijece.v13i1.pp207-217.

[12] C. M. Aung, E. Mon, T. T. Htike, and H. M. Tun, "Comparative Analysis of Arduino-microcontroller based on PWM and MPPT Solar Charge Controller for Stand-alone Solar PV System in Charging Stations of Electric Vehicles," *Eng. Sci. Lett.*, vol. 4, no. 02, pp. 32–38, May 2025, doi: 10.56741/iistr.esl.001006.

[13] C. H. Wu, L. R. Chen, W. -R. Yang, B. -R. Xu, and G. -J. Chen, "Enhancing Battery Performance with Active Balancing and Fault Tolerance in Lead-Acid Energy Storage Systems," *2025 IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meet.*, 2025, doi: 10.1109/IAS62731.2025.11061541.

[14] W. Hart Danial, *Commonly used Power and Converter Equations*. 2010.

[15] S. Diusti Dwi Putri and Aswardi, "Rancang Bangun Buck-Boost Converter menggunakan Kendali PID," *J. Tek. Elektro dan Vokasional*, vol. 6, no. 02, pp. 1–15, 2020, [Online]. Available: http://ejournal.unp.ac.id/index.php/jtev/index

[16] F. Azis, U. Muhammad, A. H. I. As, and M. A. Salim, "Rancang Bangun Implementasi Buck Boost Converter Pada Kontrol Motor Mesin Pemotong Rumput Menggunakan Panel Surya," *Joule (Journal Electr. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 166–173, 2022, doi: 10.61141/joule.v3i2.321.