

Sistem Manajemen Baterai Aktif pada Baterai Lithium-Ion Menggunakan *Flying Capacitor*

Nuryanti[#], Suharyadi Pancono, Novalisar Rizky P

Jurusan Teknik Otomasi Manufaktur dan Mekatronika, Politeknik Manufaktur Bandung

Jalan Kanayakan No. 21, Dago, Coblong, Bandung, 40135, Indonesia

[#]nuryanti@polman-bandung.ac.id

Abstrak

Baterai pak yang terdiri dari susunan seri paralel sel baterai membutuhkan *battery management system* (BMS) untuk mengatur saat pengisian dan pengosongan muatan. Dalam penelitian ini dikembangkan modul penyeimbang aktif *flying capacitor* dari sel ke sel yang diimplementasikan pada baterai Lithium Ion 18650 3,6 V 2500 mAh. Pada *flying capacitor* muatan bergerak dari sel baterai yang memiliki tegangan tinggi menuju sel baterai tegangan rendah. Proses kontrol perpindahan muatan dilakukan dengan sakelar elektronik yang dihubungkan dengan kapasitor dan diprogram agar menyalurkan muatan dari satu sel ke sel lainnya. Tegangan pada baterai dihubungkan dengan sensor tegangan kemudian data dikirimkan ke ESP32 sebagai mikrokontroler yang berperan sebagai pengambil keputusan untuk menyalakan atau mematikan penyeimbang (*balancer*). *Balancer* akan menyeimbangkan setiap sel baterai yang tidak seimbang. *Flying capacitor* yang ada di pasaran memiliki spesifikasi untuk 4 sel seri. Oleh karena itu, dilakukan modifikasi untuk menyeimbangkan baterai hingga 8 seri. Dengan melakukan uji coba terhadap baterai pak 8 seri 4 paralel dilihat waktu yang diperlukan sampai seimbang. Dari proses *charging* dan *discharging* konfigurasi yang dikembangkan menghasilkan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai keseimbangan 600 menit pada rentang tegangan 0,32 V. Setelah dilakukan penyeimbangan maka penggunaan baterai dengan pembebanan yang sama meningkat dari semula hanya 480 menit menjadi 720 menit atau meningkat 50%.

Kata kunci: Lithium-Ion, *flying capacitor*, sel baterai, seri, paralel

Abstract

A battery pack consisting of a parallel series arrangement of battery cells requires a battery management system (BMS) to regulate charging and discharging times. In this research, a cell-to-cell flying capacitor active balancing module was developed which was implemented on a 18650 3.6 V 2500 mAh Lithium Ion battery. In a flying capacitor the charge moves from the high voltage battery cell to the low voltage battery cell. The charge transfer control process is carried out with an electronic switch connected to a capacitor and programmed to transfer charge from one cell to another. The voltage on the battery is connected to a voltage sensor then the data is sent to the ESP32 as a microcontroller which acts as a decision maker to turn the balancer on or off. The balancer will balance any unbalanced battery cells. Flying capacitors on the market have specifications for 4 series cells. Therefore, modifications were made to balance the batteries up to 8 series. By conducting tests on 8 series 4 parallel battery packs, we can see how long it takes to balance. From the charging and discharging process, the configuration developed resulted in the time needed to reach balance of 600 minutes at a voltage range of 0.32 V. After balancing, battery usage with the same load increased from previously only 480 minutes to 720 minutes or an increase of 50%.

Keywords: Lithium-Ion, *flying capacitor*, battery cell, series, parallel

I. PENDAHULUAN

Baterai Lithium-Ion dengan kepadatan energi yang tinggi menjadi baterai yang sering digunakan pada peralatan elektronik hingga kendaraan listrik [1]. Untuk mendapatkan tegangan dan kapasitas

arus yang diinginkan maka baterai Lithium-Ion disusun menjadi rangkaian seri paralel. Dalam hal pengisian dan pengosongan baterai diperlukan pengaturan agar semua baterai dapat dialiri muatan listrik secara merata, begitu pula saat pengosongannya. Oleh karena itu, baterai Lithium-

Ion dalam bentuk pak memerlukan *battery management system* (BMS) baik dalam hal monitoring kondisi sel maupun dalam hal pengaturan saat pengisian dan pengosongan. BMS sendiri terdiri dari BMS pasif dan BMS aktif. Pada BMS pasif kesetimbangan baterai dilakukan dengan membuang kapasitas yang berlebih berupa panas ke dalam rangkaian resistor. Cara ini merupakan cara yang paling sederhana namun dalam implementasinya pada penggunaan baterai pak Lithium-Ion yang terdiri dari banyak sel baterai meski telah dipasang BMS pasif masih sering ditemukan masalah pada ketidakseimbangan sel baterai [2], [3]. Ketidakseimbangan ini dapat diatasi oleh sebuah modul atau sistem penyeimbang sel baterai dengan menggunakan BMS Aktif yang terdiri dari rangkaian kapasitor. Studi kasus pada produk penyeimbang sel baterai yang terdapat di pasaran, sering kali memiliki konfigurasi yang tidak sesuai dengan konfigurasi baterai pak yang digunakan. Produk yang ada di pasaran memiliki konfigurasi yang tetap sehingga sulit untuk disesuaikan dengan kebutuhan. Hal ini sendiri menjadi kendala untuk bisa terus memaksimalkan produk yang sudah ada agar tetap bisa menyeimbangkan baterai pak.

Penelitian terkait yang pernah dilakukan menjelaskan mengenai topologi *cell to cell* dengan metode *three resonant state switched capacitor converter* [4]. Penelitian ini menggunakan baterai Lithium-Ion dengan susunan seri tanpa paralel. Dalam penelitian ini, *switching* menggunakan MOSFET STP220N6F7 sebagai *switch* karena memiliki keunggulan frekuensi peralihan yang tinggi sehingga mengurangi kemungkinan *energy losses*. Hasilnya, skema penyeimbang sel yang dilakukan menghasilkan *measured peak conversion efficiency* sebesar 89,1% [4]. Sedangkan untuk penyeimbang yang digunakan dapat seperti metode penyeimbang aktif dan penyeimbang pasif [5], [6]. Salah satu metode yang sering digunakan pada industri otomotif dan terdapat banyak di pasaran adalah metode *Flying Capacitor* yang menggunakan topologi *cell to cell* [7]-[10]. Topologi ini memiliki keunggulan yaitu dapat memaksimalkan kapasitas setiap sel yang tersedia untuk menyeimbangkan sel [11]. Pada penelitian sebelumnya, *cell to cell* hanya berfokus pada rangkaian baterai seri [12], [13]. Pada penelitian ini fokus pada pembuatan prototipe sel baterai yang seimbang dengan topologi sel menggunakan produk yang sudah ada di pasaran dan melakukan modifikasi pada produk *flying capacitor* di pasaran untuk topologi baterai pak

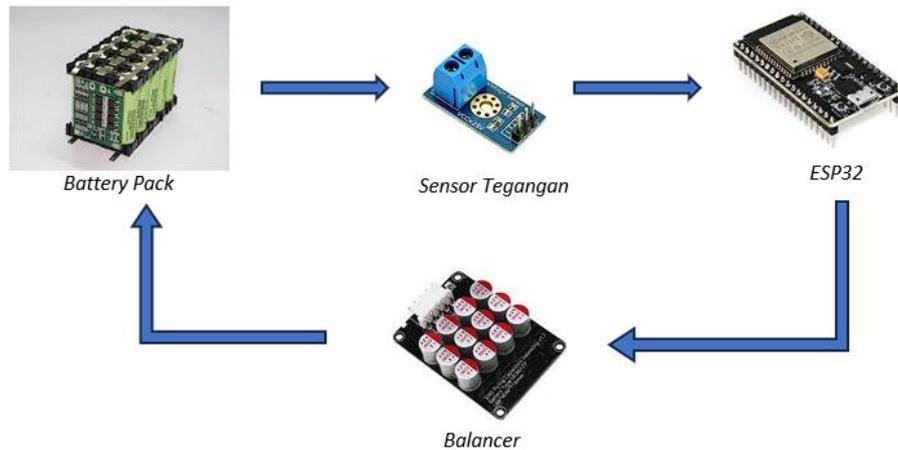
yang berbeda. Topologi dari sistem penyeimbang aktif ini menggunakan topologi penyeimbang dari sel ke sel. Topologi ini menjelaskan teknis penyeimbangan sel hanya dapat dilakukan antar sel yang berdekatan. Hal ini menjadi sebuah permasalahan khusus dalam menyeimbangkan sel baterai yang terpisah jauh. Maka dari itu, penelitian ini menggunakan teknik kombinasi dari dua buah penyeimbang aktif dalam menghadapi banyak sel baterai hanya dengan model penyeimbang aktif sel baterai yang memiliki kapasistas terbatas yaitu hanya 4 seri.

Sebuah teknik yang dilakukan dalam penelitian ini mengkombinasikan dari 3 buah penyeimbang sel baterai aktif dengan pengaturan saklar penyalan modul penyeimbang dikontrol oleh ESP32 sebagai pusat data dan kontrol penyeimbang. Sehingga dapat diperoleh suatu algoritma pengaturan *active balancing* untuk baterai pak 8 seri 4 Paralel (8S4P) dari modul *flying capacitor* 4S yang disusun serial namun tetap membutuhkan 1 modul tambahan yang menyeimbangkan kedua modul *flying capacitor*. Menggunakan ESP32 sebagai pengontrol utama maupun akuisisi data sehingga parameter-parameter tegangan setiap sel dapat dimonitor dengan menggunakan IoT. Kemudian akan dibandingkan sistem yang menggunakan sistem *active balancing* dan sistem yang tidak menggunakan *active balancing*.

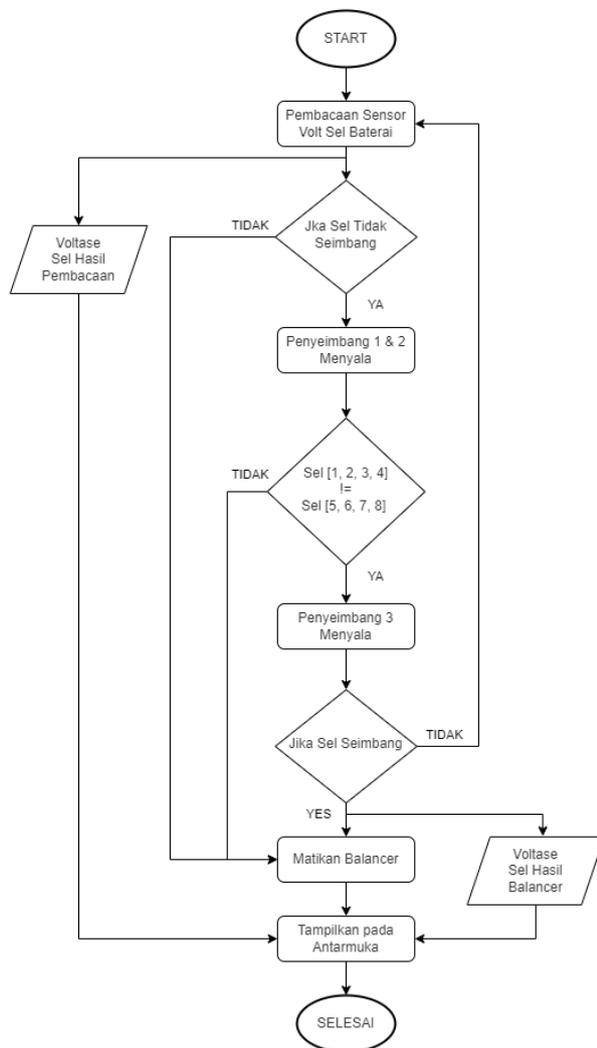
II. METODE PENELITIAN

A. Perancangan Sistem

Pada tahap ini perancangan sistem pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1. Berdasarkan Gambar 1 terdapat sensor tegangan sebagai komponen pengukur tegangan yang akan mengambil data tegangan dari baterai pak secara langsung. Data parameter yang dikumpulkan akan diteruskan menuju ESP32 sebagai mikrokontroler untuk akuisisi data. ESP32 akan berperan sebagai pengambil keputusan untuk menyalakan atau mematikan penyeimbang (*balancer*). *Balancer* akan menyeimbangkan setiap sel baterai yang tidak seimbang. Diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 2 menjelaskan sistem yang digunakan akan secara sekuensial menyalakan *balancer* secara bergantian. Metode ini membagi pak baterai menjadi beberapa bagian tertentu sehingga *balancer* menyeimbangkan pak baterai dari satu bagian ke bagian lain hingga mencapai keseimbangan.



Gambar 1. Arsitektur umum sistem



Gambar 2. Flowchart metode penyeimbang sel

B. Battery Pack

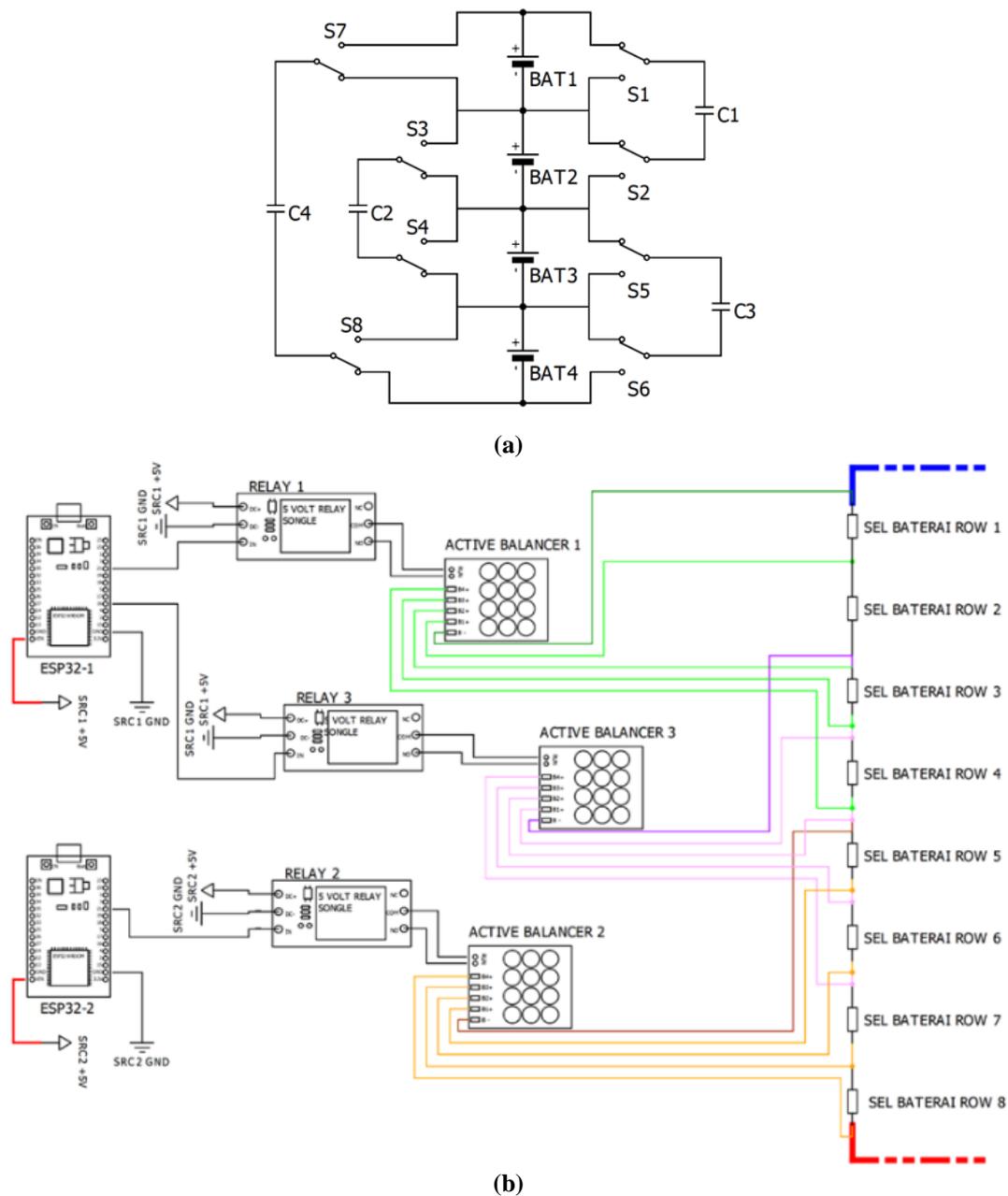
Baterai yang digunakan pada penelitian ini adalah baterai Lithium-Ion 18650 sebagai sel baterai. Baterai 18650 digunakan karena memiliki

kapasitas yang besar dengan ukuran yang relatif kecil. Baterai yang memiliki diameter 18 milimeter serta tinggi 65 milimeter ini memiliki tegangan kerja penuh 3,2-4,2 V dengan kapasitas 2500 mAh.

Baterai pak yang akan dibuat telah dilakukan dengan uji resistansi internal pada masing-masing sel baterai. Uji resistansi internal berperan sebagai parameter dalam penyusunan urutan dalam penentuan posisi baterai pak. Baterai tersebut akan dilengkapi dengan BMS sebagai sistem keamanan baterai. BMS yang digunakan bersifat konvensional sehingga tidak memiliki sistem penyeimbang ataupun sistem tambahan lainnya. BMS hanya beroperasi sebagai pengaman ketika baterai pak digunakan saat pengisian atau pengosongan, hanya akan beroperasi pada tegangan pengoperasian yang aman dan tidak melebihi volume pengoperasian tegangan kerja.

C. Rangkaian Penyeimbang

Berdasarkan Gambar 3(a) rangkaian baterai pak dengan system penyeimbang berupa kapasitor dan sakelar. Sakelar disini menggunakan MOSFET. Semakin banyak baterai maka akan semakin banyak kapasitor yang digunakan sebagai elemen penyimpan energi serta perantara antara satu sel baterai dengan sel baterai lainnya. Kapasitor ini disebut *flying capacitor* karena muatan bergerak atau terbang antara sel baterai yang memiliki tegangan tinggi menuju sel baterai tegangan rendah. Teknik ini memindahkan muatan antar sel baterai yang berdekatan. Prinsip kerja *flying capacitor* melibatkan penggunaan kapasitor yang dihubungkan dengan sakelar elektronik yang dikontrol secara bergantian agar menyalurkan muatan dari satu sel ke sel lainnya.



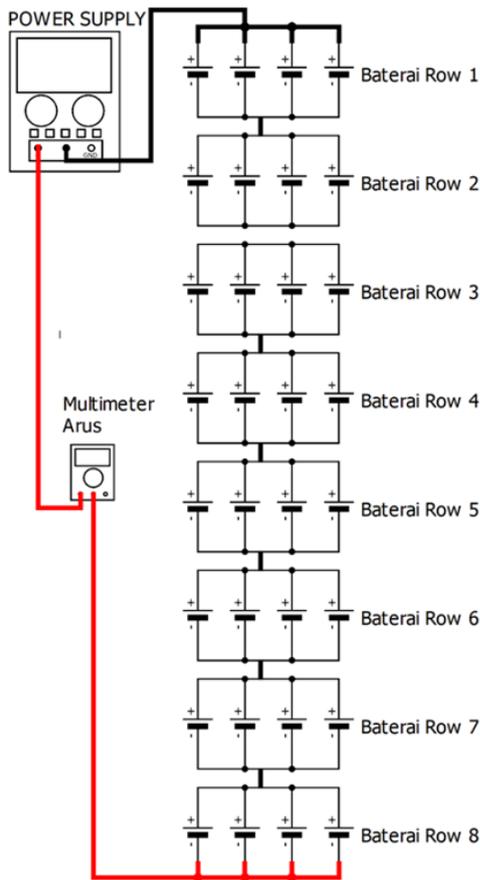
Gambar 3. Rangkaian penyeimbang: (a) rangkaian ekuivalensi kapasitor, baterai, dan sakelar, (b) rangkaian aktual penyeimbang aktif baterai dengan menggunakan modul *active balancer*

Sedangkan pada Gambar 3(b) bekerja dengan ESP32 sebagai pengontrol utama. Data hasil pengukuran yang didapatkan sebelumnya diolah dan diteruskan menuju program untuk mengaktifkan penyeimbang. Penyeimbang diaktifkan menggunakan sebuah relay sebagai saklar. Setelah relay mengaktifkan penyeimbang, maka penyeimbang langsung bekerja untuk menyeimbangkan baterai yang tidak seimbang. Penyeimbang yang digunakan adalah penyeimbang dengan kapasitas maksimal 4 seri baterai sehingga digunakan 3 buah penyeimbang. Dua buah penyeimbang berfungsi menyeimbangkan baterai

dengan tegangan referensi diambil dari masing masing seri baterai. Ketika dua rangkaian 4 seri baterai telah seimbang dengan tegangan referensi masing-masing seri berbeda, maka penyeimbang 1 dan penyeimbang 2 akan mati. Kemudian penyeimbang 3 akan aktif dan menyeimbangkan rangkaian 4 seri di antara dua rangkaian 4 seri sebelumnya. Proses ini akan terus berulang hingga semua tegangan pada setiap baterai telah bernilai sama, sehingga ESP32 akan mematikan semua penyeimbang.

D. Rangkaian Pengisian dan Pengosongan

Pengujian karakteristik terbagi menjadi pengujian *charging* dan pengujian *discharging*. Pengujian *charging* dilakukan dengan pemberian arus (I) konstan dan tegangan sesuai dengan baterai. Sedangkan pengujian *discharging* dilakukan dengan pemberian pembebanan terhadap baterai dengan arus (I) konstan. Pengujian *charging* dan *discharging* dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama dilakukan sebelum baterai menggunakan penyeimbang (*balancer*) dan tahap kedua dilakukan sesudah baterai menggunakan penyeimbang. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan nilai perbandingan antara penggunaan penyeimbang baterai dan penggunaan baterai saja. Pengujian yang dilakukan menggunakan parameter tegangan (V) dengan korelasi terhadap satuan waktu (t) dalam satuan menit. Pengujian ini dilakukan untuk menemukan nilai perbandingan secara kuantitatif besaran yang dibandingkan terhadap waktu. Rangkaian pengujian pembebanan yang dibuat sebagai berikut.

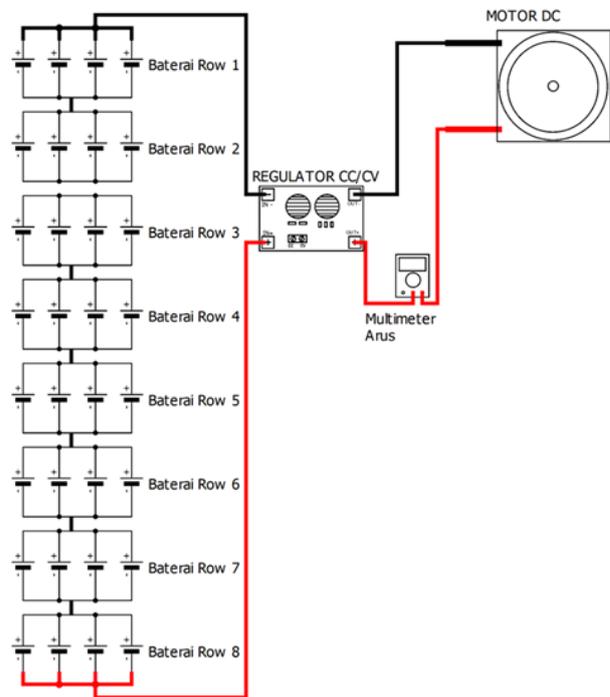


Gambar 4. Rangkaian pengisian baterai (*charging*)

Pada Gambar 4 adalah rangkaian yang digunakan untuk pengujian pengisian tegangan baterai. Rangkaian menggunakan *Power Supply* sebagai sumber tegangan untuk pengisian baterai. Selain itu, menggunakan multimeter sebagai validasi nilai arus yang bekerja pada rangkaian tersebut. Hal ini dikarenakan uji pengosongan (*discharging*) serta uji pengisian (*charging*) harus memiliki nilai arus yang sama. Pada Gambar 5. Rangkaian pengosongan dengan regulator arus tetap dan tegangan tetap menggunakan Motor DC menunjukkan bahwa baterai akan melewati *regulator* pengontrol CC/CV (*Constant Current / Constant Volt*) sebelum menuju beban motor DC. Hal ini dilakukan untuk mengatur arus keluaran dari baterai dapat stabil sehingga data yang didapatkan akan menurunkan tegangan sesuai dengan daya yang dikonsumsi oleh motor DC.

E. Perangkat Antar Muka

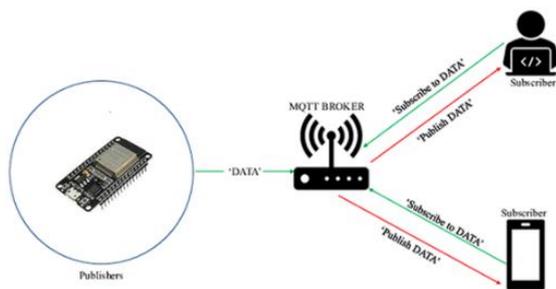
Perangkat antar muka digunakan sebagai perangkat pemantauan hasil pengukuran dan hasil penyeimbang baterai. Perangkat antar muka yang dirancang menggunakan alat Node-Red. Desain antar muka yang dirancang seperti pada Gambar 6.



Gambar 5. Rangkaian pengosongan dengan regulator arus tetap dan tegangan tetap menggunakan Motor DC



Gambar 6. Antarmuka untuk pemantauan tegangan baterai



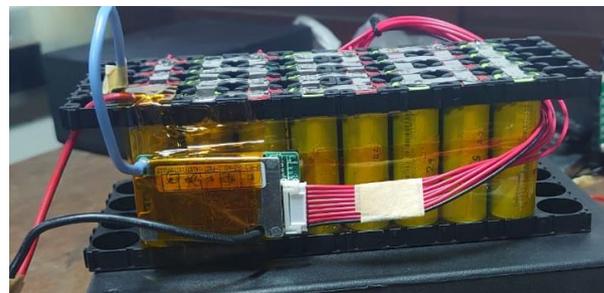
Gambar 7. Komunikasi nirkabel antarmuka dengan ESP32

Untuk komunikasi nirkabel seperti ditunjukkan pada Gambar 7 dimana data hasil pengukuran, akan ditampung terlebih dahulu di dalam ESP32. Selanjutnya akan di kirim menuju Node-Red dengan protokol MQTT sebagai transmisi. Protokol MQTT pusat akan ditanam pada *device* yang terinstal Node-Red. Kemudian ESP32 akan bertindak sebagai MQTT *client* yang bertugas untuk *publish* atau mengirimkan data menuju MQTT pusat. Sedangkan pada tampilan Node-Red akan bertindak sebagai MQTT *client* yang bertugas untuk *subscribe* atau menerima data dari MQTT pusat.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Implementasi Sistem

Baterai pak yang dibuat telah melalui uji resistansi internal terlebih dahulu. Uji resistansi internal digunakan untuk mengetahui seberapa besar resistansi yang terdapat pada setiap baterai sel yang digunakan. Baterai yang telah diuji disusun berdasarkan nilai resistansi internal yang terkecil hingga terbesar. Hal ini bertujuan untuk membuat nilai voltase yang disusun secara paralel dan seri akan mendekati sama setiap susunan paralelnya.



Gambar 8. Battery pack 8 seri 4 paralel



Gambar 9. Perbandingan nilai pengukuran sensor dengan multimeter

Implementasi sistem yang dirancang ditunjukkan pada Gambar 8 dimana baterai pak yang telah dibuat dan telah ditambahkan BMS sebagai sistem pengaman baterai. Baterai pak dilapisi dengan *kapton tape* sebagai pelindung baterai pak karena sifat dari *kapton tape* yang tahan terhadap panas.

B. Pengukuran Pada Antarmuka

Uji pengukuran tegangan dilakukan dengan dua cara. Metode pertama menggunakan sensor dipadukan dengan pengukuran menggunakan metode manual menggunakan alat ukur. Nilai hasil sensor dibandingkan dengan nilai hasil uji manual harus menghasilkan nilai yang mendekati sama dengan nilai *error* mendekati nol. Namun toleransi

kesalahan pembacaan akan disebabkan oleh pembacaan ADC dari ESP32 sehingga nilai kesalahan pembacaan menjadi $\pm 5\%$. Nilai yang muncul pada pengukuran baterai menggunakan sensor dan menggunakan multimeter seperti terlihat pada Gambar 9.

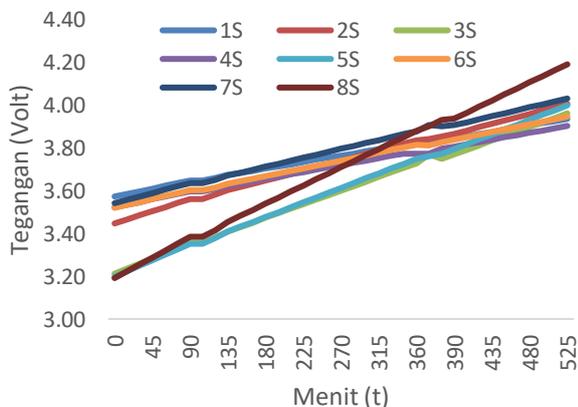
C. Uji Karakteristik

Uji karakteristik dilakukan untuk mengetahui karakteristik baterai dalam uji *charging* dan *discharging*. Hal ini dilakukan untuk mengetahui kapasitas energi pada baterai yang digunakan. Nilai ambang batas baterai ditetapkan pada 4,2 V sebagai batas atas dan pada 3,2 V sebagai batas bawah. Hal ini setelah dilakukan pengujian *grading* baterai, pada nilai tegangan 3,2 V menunjukkan nilai arus menurun secara signifikan sehingga ini diasumsikan sebagai batas tegangan kerja yang aman. Karakteristik sel baterai Lithium-Ion 18650 yang digunakan memiliki spesifikasi seperti pada Tabel 1.

Uji *charging* dan *discharging* dilakukan dengan pemberian serta pengurangan sebesar 1,2 A secara konstan (*constant current*). Baterai pak diuji *charging* dengan pemberian arus konstan 1,2 A secara terus menerus hingga mencapai batas atas tegangan kerja. Sedangkan pada uji *discharging*, baterai pak diberi beban konstan sehingga pengurangan arus bernilai konstan sebesar 1,2 A. Setiap pengujian menggunakan BMS sebagai sistem pengamanan agar tegangan masukkan serta tegangan keluaran pada baterai tetap aman.

Tabel 1. Karakteristik sel baterai Lithium-Ion 18650

Spesifikasi	Nilai
Kapasitas	2500 mAh
Diameter	18 mm
Tinggi	65 mm
Tegangan kerja	3,6 – 3,8 V DC



Gambar 10. Uji charging sebelum seimbang

Berdasarkan Gambar 10, lama waktu *charging* pada baterai pak dengan arus konstan sebesar 1,2 A sebesar 525 menit. Meskipun ada banyak sel yang belum mencapai batas atas tegangan kerja baterai (keadaan penuh), namun BMS telah membaca keadaan tersebut penuh karena ada satu sel yang telah mencapai batas tersebut. Hal ini merupakan kelemahan yang terjadi jika baterai tidak seimbang dikarenakan modul BMS yang konvensional tidak dapat menyeimbangkan baterai pak.

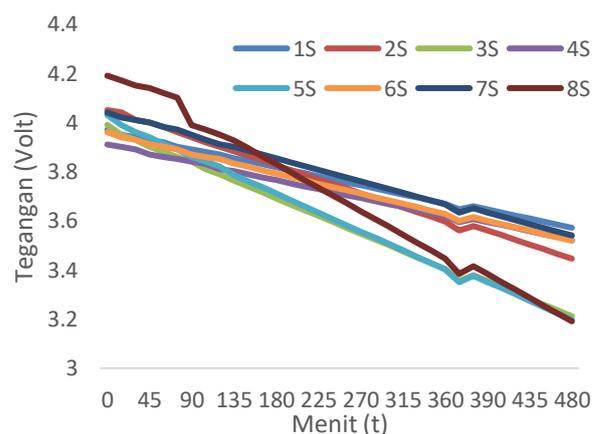
Berdasarkan Gambar 11, lama waktu *discharging* dengan pembebanan arus konstan sebesar 1,2 A selama 480 menit. Sama seperti uji *charging*, banyak sel baterai yang belum mencapai batas bawah tegangan kerja (keadaan kosong) tetapi BMS telah memutuskan tegangan keluaran sehingga sel tidak terpakai secara maksimal.

D. Uji Penyeimbang Sel

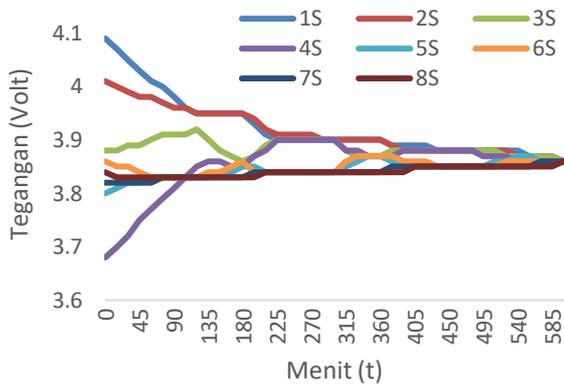
Baterai yang telah dibuat selanjutnya dilakukan uji *balancing* dengan menggunakan modul penyeimbang *flying capacitor*. *Flying capacitor* akan menyeimbangkan dengan teknik *cell to cell* yang membuat setiap sel dapat digunakan secara maksimal. Modul penyeimbang baterai Lithium-Ion yang digunakan adalah produk *flying capacitor* yang didapat di pasaran dengan spesifikasi seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi modul penyeimbang

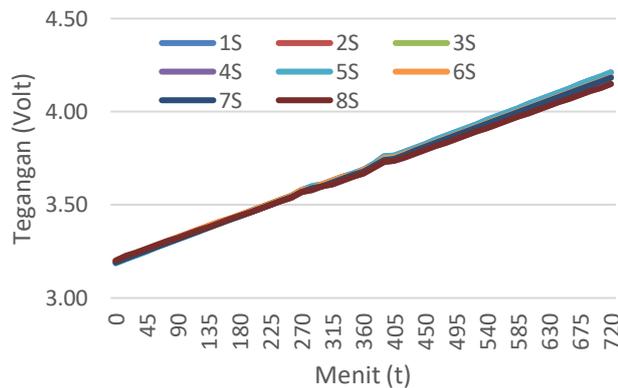
Spesifikasi	Nilai
Tegangan kerja	2,0V-4,5 V
Model	4S
Arus kerja	0,5-5 A



Gambar 11. Uji discharging sebelum seimbang



Gambar 12. Uji balancing

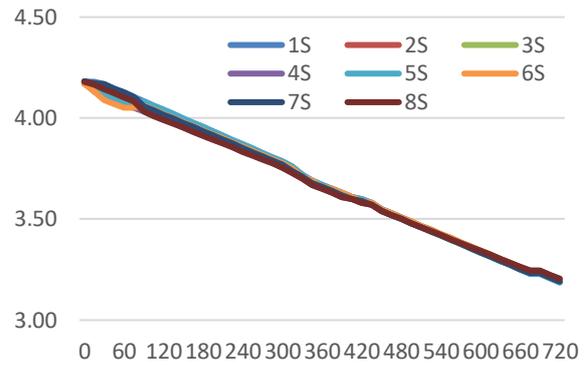


Gambar 13. Uji charging setelah baterai seimbang

Berdasarkan Gambar 12, didapatkan hasil uji balancing dari baterai 8S4P dengan nilai keseimbangan tegangan pada 3,86 Volt. Nilai yang didapat menunjukkan nilai yang akurat pada setiap baris serinya. Keseimbangan didapatkan pada waktu 600 menit dengan selisih tegangan tertinggi dan terendah sebesar 0,32 Volt. Kecepatan penyeimbangan akan tergantung seberapa besar selisih tegangan yang terjadi serta banyaknya jumlah sel baterai yang diseimbangkan.

Dari Gambar 13, baterai dapat memaksimalkan kapasitas sesungguhnya ketika sudah seimbang. Lama waktu charging sebelum seimbang lebih cepat dibandingkan setelah seimbang. Hal ini mengindikasikan kapasitas baterai terisi maksimal.

Dari Gambar 14, kapasitas baterai menjadi lebih besar setelah seimbang. Lama waktu baterai dapat menjadi lama dibandingkan sebelum seimbang. Lama waktu baterai dengan pengujian pembebanan dengan arus konstan pada 1,2 Ampere sebelum baterai seimbang hanya bertahan hingga 480 menit. Sedangkan pada pengujian pembebanan setelah baterai seimbang dapat bertahan hingga 720 menit. Hal ini terjadi peningkatan kapasitas energi pada baterai pak.



Gambar 14. Uji discharging setelah baterai seimbang

IV. KESIMPULAN

Telah dikembangkan metode penyeimbang aktif baterai Lithium Ion dengan menggunakan *flying capacitor* 4 seri untuk baterai pak 8 seri 4 paralel. Rangkaian kombinasi dari 3 *flying capacitor* dapat menyeimbangkan baterai 8S4P dengan selisih tegangan tertinggi dan terendah sebesar 0,32 Volt selama 600 menit. Kapasitas baterai tanpa penyeimbang baterai aktif pada pembebanan 1,2 A dapat bertahan selama 480 menit sedangkan dengan menggunakan penyeimbang aktif baterai dapat bertahan selama 720 menit atau meningkat hingga 50%.

REFERENSI

- [1] M. T. Afif and I. A. P. Pratiwi, "Analisis perbandingan baterai lithium-ion, lithium-polymer, lead acid dan nickel-metal hydride pada penggunaan mobil listrik-review," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 6, no. 2, pp. 95–99, 2015.
- [2] F. A. Perdana, "Baterai Lithium," Apr. 2021, doi: 10.20961/inkuiri.v9i2.50082.
- [3] M. Syarifuddin and F. Muji, "Analisis Karakteristik Baterai Lithium-Ion dan Baterai Lithium Iron Phosphate pada Sepeda Motor Listrik," *Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya*, 2021.
- [4] Y. Shang, Q. Zhang, N. Cui, and C. Zhang, "A cell-to-cell equalizer based on three-resonant-state switched-capacitor converters for series-connected battery strings," *Energies*, vol. 10, no. 2, pp. 206, 2017.
- [5] S. Hemavathi, "Overview of cell balancing methods for Li-ion battery technology," *Energy Storage*, vol. 3, no. 2, pp. e203, 2021.
- [6] M. Uzair, G. Abbas, and S. Hosain, "Characteristics of battery management systems of electric vehicles with consideration of the active and passive cell balancing process," *World Electr. Veh. J.*, vol. 12, no. 3, pp. 120, 2021.
- [7] H.-C. Chen, C.-Y. Lu, W.-H. Lien, and T.-H. Chen, "Active capacitor voltage balancing control for

- three-level flying capacitor boost converter based on average-behavior circuit model,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 55, no. 2, pp. 1628–1638, 2018.
- [8] A. K. M. Ahasan Habib, S. M. A. Motakabber, M. I. Ibrahimy, and M. K. Hasan, “Active voltage balancing circuit using single switched-capacitor and series LC resonant energy carrier,” *Electron. Lett.*, vol. 56, no. 20, pp. 1036–1039, 2020.
- [9] Z. Song, X.-G. Yang, N. Yang, F. P. Delgado, H. Hofmann, and J. Sun, “A study of cell-to-cell variation of capacity in parallel-connected lithium-ion battery cells,” *ETransportation*, vol. 7, p. 100091, 2021.
- [10] V.-L. Pham, V.-T. Duong, and W. Choi, “A low cost and fast cell-to-cell balancing circuit for lithium-Ion battery strings,” *Electronics*, vol. 9, no. 2, p. 248, 2020.
- [11] K. P. Nivya and K. Deepa, “Active cell balancing for a 2s Lithium ion battery pack using flyback converter and push-pull converter,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2021, p. 012097.
- [12] M. Daowd, M. Antoine, N. Omar, P. Van den Bossche, and J. Van Mierlo, “Single switched capacitor battery balancing system enhancements,” *Energies*, vol. 6, no. 4, pp. 2149–2174, 2013.
- [13] E. Leksono, I. N. Haq, E. Juliastuti, L. G. Z. Fahrhan, and F. M. Nabhan, “Development of Active Cell to Cell Battery Balancing System for Electric Vehicle Applications,” in *2019 6th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT)*, IEEE, 2019, pp. 4–10.

