

***MULTIPLE STORAGE DEVICE* PADA RANGKAIAN PENYEIMBANG
BATERAI UNTUK APLIKASI PLTS (PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA
SURYA) *OFF GRID***

(Skripsi)

**Oleh
Syariful Azis**



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDARLAMPUNG**

2022

***MULTIPLE STORAGE DEVICE* PADA RANGKAIAN PENYEIMBANG
BATERAI UNTUK APLIKASI PLTS (PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA
SURYA) *OFF GRID***

Oleh

SYARIFUL AZIS

Skripsi

**Sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik
Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDARLAMPUNG**

2022

ABSTRAK

MULTIPLE STORAGE DEVICE PADA RANGKAIAN PENYEIMBANG BATERAI UNTUK APLIKASI PLTS (PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA) OFF GRID

Oleh:

Syariful Azis

Lithium-ion telah banyak digunakan dalam berbagai berbagai bidang, seperti Mobil Listrik dan Penyimpanan Energi. Pada Energi Terbarukan memerlukan Penyimpanan Energi sebagai cadangan energi ketika pembangkit menghasilkan daya yang kecil atau bahkan tidak menghasilkan daya listrik sama sekali. Baterai disusun secara seri dan paralel untuk mendapatkan kapasitas yang diinginkan. Keseimbangan sel-sel yang disusun seri diperlukan untuk menghindari pengisian yang berlebih atau pengosongan yang berlebih serta meningkatkan jumlah energi yang dapat digunakan. Penyeimbang aktif mengirimkan muatan dari baterai yang memiliki energi terbesar ke baterai yang energinya lebih rendah. Penelitian ini menggunakan MATLAB Simulink untuk mensimulasikan rangkaian penyeimbang dengan baterai CGR18650AF sebagai model baterai. Pada penyeimbang aktif berbasis kapasitor tersusun delta memiliki kinerja rangkaian penyeimbang aktif yang paling cepat sedangkan penyeimbang berbasis kapasitor tersusun paralel adalah rangkaian yang paling lambat. Rangkaian penyeimbang dapat bekerja ketika pengisian maupun ketika pengosongan. Ketika arus pengosongan dan pengisian semakin besar maka waktu penyeimbangan sel baterai akan semakin cepat.

Kata Kunci: Lithium-ion, Penyeimbang Aktif, Paralel, Berjenjang Ganda, Delta

ABSTRACT

MULTIPLE STORAGE DEVICE IN BATTERY BALANCER CIRCUIT FOR OFF GRID SOLAR POWER PLANT

By:

Syariful Azis

Lithium-ion has been widely used in various field, such as Electric Vehicles and Energy Storage System. Renewable Energy requires Energy Storage System as an energy reserve when the renewable energy produces little or no electricity. Batteries are arranged in series and parallel to obtain the desired capacity. A balanced of cells arranged in series necessary to avoid overcharging or overdischarging and increase the amount of usable energy. The active balancer transmits charge from the battery with the highest energy to the battery with the lowest energy. This research use Matlab Simulink to simulate a balancing circuit with a CGR18650AF battery as the model battery. In the capacitor-based active balancer, the delta circuit has the fastest active balancing circuit performance, while the parallel circuit is the slowest circuit. The balancer circuit can work when charging or discharging. When charging-discharging currents are greater, the battery cell balancing time will be faster

Keyword: Lithium-ion, active balancing, parallel, double tired, delta

Judul Skripsi : **MULTIPLE STORAGE DEVICE PADA RANGKAIAN PENYEIMBANG BATERAI UNTUK APLIKASI PLTS (PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA) OFF-GRID**

Nama Mahasiswa : **Syariful Azis**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1815031018

Jurusan : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik



MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc
NIP. 197209232000121002

Afri Yudamson, S.T., M.Eng.
NIP. 198904302019031011

2. Mengetahui

Ketua Jurusan
Teknik Elektro

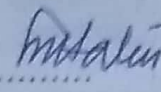
Herlinawati, S.T., M.T.
NIP. 197103141999032001


Ketua Program Studi
Teknik Elektro

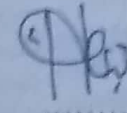
Dr. Eng. Nining Purwasih, S.T., M.T.
NIP. 197404222000122001

MENGESAHKAN


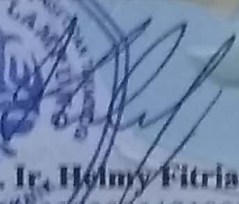
1. Tim Penguji

Ketua : Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc. 

Sekretaris : Afri Yudamson, S.T., M.Eng. 

Penguji : Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T. 

2. Dekan Fakultas Teknik


Dr. Eng. Ir. Holmy Fitriawan, S.T., M.Sc. 
NIP. 197309182001121002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 17 Oktober 2022

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain sepanjang sepengetahuan saya tidak terdapat atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang telah disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 20 November 2022



Syariful Azis
NPM. 1815031018

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Mulyaasri, 30 Juli 2000. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Bapak Wajib dan Ibu Siti Saropah.

Penulis memiliki riwayat pendidikan antara lain : SDN 5 Mulyaasri pada tahun 2006 hingga 2012, SMPN 1 Tulangbawang Tengah pada tahun 2012 hingga 2015 dan SMA N 1 Tumijajar pada tahun 2015 hingga 2018.

Penulis menjadi mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung pada tahun 2018 melalui jalur SNMPTN (Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri). Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif berorganisasi pada Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HIMATRO) Universitas Lampung sebagai Sekretaris Departemen Pendidikan dan Pengembangan Diri pada Periode 2019 dan Kepala Departemen Pendidikan dan Pengembangan Diri HIMATRO pada Periode 2020. Kemudian pada tahun 2020 – 2022, penulis berkesempatan menjadi asisten di Laboratorium Sistem Tenaga Listrik serta menjadi asisten Mata Kuliah Menggambar Teknik dan Praktikum Analisa Sistem Tenaga. Selain proses perkuliahan, penulis juga pernah melaksanakan kerja praktik pada PT. Haleyora Power Area Metro dengan membahas topik tentang “Identifikasi Gangguan Pada Penyulang Strawberry 2 PT. PLN(Persero) UP3 Metro”, magang pada PLN UP2D Lampung, dan mengikuti Studi Independent Program Merdeka Belajar Kampus Merdeka di PT. Orbit Future Academy. Selain hal tersebut, penulis juga pernah mengerjakan pekerjaan “*Re-Drawing* MEP Gedung Pasca Sarjana Unila” dan Perbaikan Jaringan PLTMH Talang Dikun.

PERSEMBAHAN



Alhamdulillah rabbil'alamin, Puji Syukur kepada Allah Subhanahu Wa Ta'ala, Tuhan Yang Maha Esa dan Maha Besar atas segala rahmat dan hidayah-Nya serta Solawat serta Salam kepada Nabi Muhammad Shallallahu Alaihi Wa Sallam yang selalu menjadi suri tauladan bagi kehidupan

KUPERSEMBAHKAN DENGAN TULUS KARYA INI TERUNTUK:

“Ibunda Siti Saropah dan Ayahanda Wajib sebagai wujud cinta, kasih sayang, dan bakti atas segala yang telah diberikan. Juga tidak lupa kepada adik tersayang Syifa Qurrotun Ainiyah atas do'a dan motivasi yang selalu diberikan”

“Dosen Pembimbing dan Penguji serta Civitas Akademik Jurusan Teknik Elektro, terimakasih telah memberikan bimbingan, arahan, saran, dan ilmu yang sangat banyak selama perkuliahan serta pengerjaan skripsi ini”

“Tak lupa kepada teman-teman ELTICS 2018, terimakasih telah menemani, membantu, dan pembelajaran kepada saya selama duduk dibangku perkuliahan.”

MOTTO

“Dan tidaklah Aku menciptakan jin dan manusia melainkan supaya mereka beribadah kepada-Ku (saja)”
(QS.Adz-Dzaariyaat: 56)

"Tiap-tiap yang berjiwa pasti akan merasakan mati."
(Q.S Ali Imran: 185)

“Barangsiapa yang menempuh suatu jalan dalam rangka menuntut ilmu,
maka Allah akan memudahkan baginya jalan menuju surga.”
(HR. Muslim no. 7028)

“Demi Allah, jika Allah memberikan petunjuk kepada satu orang saja
melalui perantaraanmu, itu lebih baik bagimu dibandingkan dengan unta
merah (yaitu unta yang paling bagus dan paling mahal).”
(HR. Bukhari no. 3009, 3701, 4210 dan Muslim no. 6376)

SANWACANA

Puji syukur penulis ucapkan Allah Subhanahu Wata'ala atas segala karunia, rahmat, dan nikmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini. Sholawat serta salam tidak lupa juga penulis haturkan kepada Nabi Muhammad SAW sebagai suri tauladan yang baik seluruh umat manusia dan senantiasa mengharapkan syafaatnya di yaumul akhir kelak.

Skripsi dengan judul “**Multiple Storage Device Pada Rangkaian Penyeimbang Baterai Untuk Aplikasi PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) Off-Grid**” ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Allah SWT sebagai Dzat yang selalu memberikan rahmat, karunia, serta berbagai nikmat-Nya yang telah diberikan sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini.
2. Kedua orangtua tercinta Bapak Wajib dan Ibu Siti Saropah, terimakasih atas segala kasih sayang, perhatian, dukungan, dan doa pada tiap jalan perjuangan selama penulis menempuh jalan untuk masa depan.
3. Adik tersayang, Syifa Qurrotun Ainiyah yang sudah memberikan semangat, dukungan, serta doa untuk penulis.
4. Bapak Dr. Sofwan Effendi, M.Ed. Selaku Plt Rektor Universitas Lampung.
5. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
6. Ibu Herlinawati, S.T., M.T Selaku Kepala Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.

7. Ibu Dr. Eng. Nining Purwasih, S.T., M.T. selaku Kepala Prodi Teknik Elektro Universitas Lampung.
8. Bapak Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M. Sc selaku pembimbing utama dan telah memberikan bimbingan rutin, motivasi, arahan dan pandangan mengenai dunia pekerjaan kepada penulis disetiap kesempatan dengan baik dan ramah.
9. Bapak Afri Yudamson, S.T., M.Eng. selaku pembimbing pendamping dan telah memberikan bimbingan, masukan, arahan, dan ilmu yang sangat bermanfaat kepada penulis dengan baik
10. Bapak Ir. Herri Gusmedi, S.T.,M.T.selaku dosen penguji yang telah memberikan masukan, kritik dan saran yang membangun kepada penulis dalam pengerjaan skripsi ini.
11. Ibu Yetti Yuniati S.T., M.T. selaku dosen pembimbing akademik (PA) yang telah memberikan nasihat, pengetahuan, arahan dan bimbingan yang membangun saat penulis menempuh perkuliahan mulai dari semester I hingga semester VIII.
12. Segenap Dosen dan staff di Jurusan Teknik Elektro yang telah memberikan ilmu, wawasan dan pengalaman yang sangat bermanfaat bagi penulis kedepannya.
13. Segenap keluarga besar Laboratorium Sistem Tenaga Listrik : Pak Herri dan Pak Rachman atas kerjasamanya dan nasihatnya selama studi. Kepada Rekan Asisten STL 2018 : Reihan, Abdul, Naftali, Nat, Iqbal, Syamil, Adrian, Ucok, dan Riski, yang telah memberikan semangat, motivasi untuk berjuang dan juga memberikan kebahagiaan setiap harinya di Lab. Dan untuk kakak-kakak asisten Lab. STL 2017 yang memberikan ilmu dan semangat. Untuk adik-adik asisten STL 2019 dan 2020: Fatur, Hadi, Aqil, Adam, Muchlas, Adrian, Riski, Saka, dan lainnya yang telah banyak membantu penulis.
14. Angkatan tercinta ELTICS 2018, terimakasih sudah menjadi rumah, saudara dan teman dalam segala kesusahan dan kebaikan yang sudah kalian berikan.
15. Segenap keluarga besar HIMATRO yang telah mengajarkan berorganisasi dan mengajarkan banyak hal dan juga menjadi rumah yang sangat nyaman selama kuliah. Sukses selalu Himpunanku HIMATRO Luar Biasa..

16. Kepada Metro *Squad* Reihan, Abdul, dan Manda yang telah membantu dan menghibur penulis dalam penyelesaian Kerja Praktik hingga Skripsi.
17. Kepada teman-teman Mardi, Bobi, Ican, Muhyi, Maul, Fikri, Budi, Reihan, Abdul, Manda, Rivan, dan Raja yang telah memberikan dukungan serta menghibur penulis selama proses perkuliahan.
18. Semua pihak yang terlibat dalam menyelesaikan laporan Skripsi yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak demi kemajuan bersama. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Bandarlampung, 20 November 2022

Syariful Azis

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	iii
<i>ABSTRACT</i>	iv
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xxi
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan	2
1.3. Manfaat Penelitian	2
1.4. Rumusan Masalah	3
1.5. Batasan Penelitian	3
1.6. Hipotesis	3
1.7. Sistematika Penulisan	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Penelitian Terkait	5
2.2. Pembangkit Listrik Tenaga Surya	7
2.3. Baterai	10
2.4. Baterai Lithium Ion	12
2.5. Penyeimbang Sel	14
2.6. Penyeimbangan Aktif Berbasis Kapasitor	16
2.7. <i>Multiple Storage Device</i>	17
III. METODOLOGI PENELITIAN	18
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	18
3.2. Alat dan Bahan	18
3.3. Metode Penelitian	19
3.4. Simulasi dan Pemodelan	19
3.5. Diagram Alir Penelitian	20

IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	24
4.1.	Baterai Lithium-Ion.....	24
4.2.	Ketidakseimbangan Tegangan Baterai Lithium-Ion	25
4.3.	Rangkaian Penyeimbang Aktif Berbasis Kapasitor	26
4.4.	Perbandingan dan Analisa	71
V.	KESIMPULAN.....	75
5.1.	Kesimpulan.....	75
5.2.	Saran.....	75
	DAFTAR PUSTAKA	76

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2. 1 PLTS Off Grid [4]	8
Gambar 2. 2 PLTS On Grid [4].....	9
Gambar 2. 3 Rangkaian Ekuivalen Baterai	13
Gambar 2. 4 Gambar kurva pengosongan terhadap tegangan [17].....	14
Gambar 2. 5 Baterai tidak seimbang.....	15
Gambar 2. 6 Baterai dalam keadaan seimbang	15
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	20
Gambar 3. 2 Diagram alir simulasi percobaan.....	21
Gambar 3. 3 Rangkaian penyeimbang aktif struktur paralel.....	22
Gambar 3. 4 Rangkaian penyeimbang aktif berjenjang ganda	23
Gambar 3. 5 Rangkaian penyeimbang aktif tersusun delta.....	23
Gambar 4. 1 Grafik Pengosongan Baterai Lithium-ion CGR18650AF.....	24
Gambar 4. 2 Grafik Hubungan Tegangan Baterai dengan SoC Baterai	25
Gambar 4. 3 Rangkaian Pengisian Kapasitor.....	26
Gambar 4. 4 Rangkaian Pengosongan Kapasitor.....	27
Gambar 4. 5 Mode Kerja Rangkaian Penyeimbang Aktif Paralel (a) Mode I (b) Mode II.....	28
Gambar 4. 6 Grafik SoC Baterai pada Penyeimbang Aktif Paralel kasus pertama	29
Gambar 4. 7 Grafik Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Paralel kasus pertama.....	29
Gambar 4. 8 Grafik SoC Baterai pada Penyeimbang Aktif Paralel kasus kedua..	30
Gambar 4. 9 Grafik Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Paralel kasus Kedua	30
Gambar 4. 10 Grafik SoC Baterai pada Penyeimbang Aktif Paralel pengosongan 0.05 A.....	32

Gambar 4. 11 Grafik Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Paralel pengosongan 0.05 A.....	32
Gambar 4. 12 Grafik SoC Baterai pada Penyeimbang Aktif Paralel pengosongan 0.1 A.....	33
Gambar 4. 13 Grafik Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Paralel pengosongan 0.1 A.....	33
Gambar 4. 14 Grafik SoC Baterai pada Penyeimbang Aktif Paralel pengosongan 0.15 A.....	34
Gambar 4. 15 Grafik Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Paralel pengosongan 0.15 A.....	34
Gambar 4. 16 Grafik Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Paralel pengosongan 0.2 A.....	35
Gambar 4. 17 Grafik Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Paralel pengosongan 0.2 A.....	36
Gambar 4. 18 Grafik SoC Baterai pada Penyeimbang Aktif Paralel Pengisian 0.05 A.....	37
Gambar 4. 19 Grafik Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Paralel Pengisian 0.05 A.....	37
Gambar 4. 20 Grafik SoC Baterai Penyeimbang Aktif Paralel Pengisian 0.1 A..	38
Gambar 4. 21 Grafik Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Paralel Pengisian 0.1 A.....	38
Gambar 4. 22 Grafik SoC Baterai pada Penyeimbang Aktif Paralel Pengisian 0.15 A.....	39
Gambar 4. 23 Grafik Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Paralel Pengisian 0.15 A.....	40
Gambar 4. 24 Grafik SoC Baterai pada Penyeimbang Aktif Paralel Pengisian 0.2 A.....	41
Gambar 4. 25 Grafik Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Paralel Pengisian 0.2 A.....	41
Gambar 4. 26 Mode Kerja Rangkaian Penyeimbang Aktif Berjenjang Ganda (a) Mode I (b) Mode II	42

Gambar 4. 27 Grafik SoC Baterai dengan Penyeimbang Aktif berjenjang ganda kasus pertama	43
Gambar 4. 28 Grafik Tegangan Baterai dengan Penyeimbang Aktif berjenjang ganda kasus pertama	43
Gambar 4. 29 Grafik SoC Baterai dengan Penyeimbang Aktif berjenjang ganda kasus kedua	44
Gambar 4. 30 Grafik Tegangan Baterai dengan Penyeimbang Aktif berjenjang ganda kasus Kedua	45
Gambar 4. 31 Grafik SoC Baterai dengan Penyeimbang Aktif berjenjang ganda pengosongan 0.05 A	46
Gambar 4. 32 Grafik Tegangan Baterai dengan Penyeimbang Aktif berjenjang ganda pengosongan 0.05 A	46
Gambar 4. 33 Grafik SoC Baterai dengan Penyeimbang Aktif berjenjang ganda pengosongan 0.1 A	47
Gambar 4. 34 Grafik Tegangan Baterai dengan Penyeimbang Aktif berjenjang ganda pengosongan 0.1 A	47
Gambar 4. 35 Grafik SoC Baterai dengan Penyeimbang Aktif berjenjang ganda pengosongan 0.15 A	48
Gambar 4. 36 Grafik Tegangan Baterai dengan Penyeimbang Aktif berjenjang ganda pengosongan 0.15 A	49
Gambar 4. 37 Grafik Tegangan Baterai dengan Penyeimbang Aktif berjenjang ganda pengosongan 0.2 A	50
Gambar 4. 38 Grafik Tegangan Baterai dengan Penyeimbang Aktif berjenjang ganda pengosongan 0.2 A	50
Gambar 4. 39 Grafik SoC Baterai dengan Penyeimbang Aktif berjenjang ganda Pengisian 0.05 A	51
Gambar 4. 40 Grafik Tegangan Baterai dengan Penyeimbang Aktif berjenjang ganda Pengisian 0.05 A	51
Gambar 4. 41 Grafik SoC Baterai dengan Penyeimbang Aktif berjenjang ganda Pengisian 0.1 A	52
Gambar 4. 42 Grafik Tegangan Baterai dengan Penyeimbang Aktif berjenjang ganda Pengisian 0.1 A	53

Gambar 4. 43 Grafik SoC Baterai dengan Penyeimbang Aktif berjenjang ganda Pengisian 0.15 A	54
Gambar 4. 44 Grafik Tegangan Baterai dengan Penyeimbang Aktif berjenjang ganda Pengisian 0.15 A.....	54
Gambar 4. 45 Grafik SoC Baterai dengan Penyeimbang Aktif berjenjang ganda Pengisian 0.2 A	55
Gambar 4. 46 Grafik Tegangan Baterai dengan Penyeimbang Aktif berjenjang ganda Pengisian 0.2 A.....	55
Gambar 4. 47 Mode Kerja Rangkaian Penyeimbang Aktif Delta (a) Mode I (b) Mode II.....	56
Gambar 4. 48 Grafik SoC Baterai dengan Penyeimbang Aktif Tersusun Delta kasus pertama.....	57
Gambar 4. 49 Grafik Tegangan Baterai dengan Penyeimbang Aktif Tersusun Delta kasus pertama	57
Gambar 4. 50 Grafik SoC Baterai dengan Penyeimbang Aktif Tersusun Delta kasus kedua	58
Gambar 4. 51 Grafik Tegangan Baterai dengan Penyeimbang Aktif Tersusun Delta kasus Kedua	59
Gambar 4. 52 Grafik SoC Baterai dengan Penyeimbang Aktif Tersusun Delta pengosongan 0.05 A.....	60
Gambar 4. 53 Grafik Tegangan Baterai dengan Penyeimbang Aktif Tersusun Delta pengosongan 0.05 A.....	60
Gambar 4. 54 Grafik SoC Baterai dengan Penyeimbang Aktif Tersusun Delta pengosongan 0.1 A.....	61
Gambar 4. 55 Grafik Tegangan Baterai dengan Penyeimbang Aktif Tersusun Delta pengosongan 0.1 A.....	61
Gambar 4. 56 Grafik SoC Baterai dengan Penyeimbang Aktif Tersusun Delta pengosongan 0.15 A.....	62
Gambar 4. 57 Grafik Tegangan Baterai dengan Penyeimbang Aktif Tersusun Delta pengosongan 0.15 A.....	63
Gambar 4. 58 Grafik Tegangan Baterai dengan Penyeimbang Aktif Tersusun Delta pengosongan 0.2 A.....	64

Gambar 4. 59 Grafik Tegangan Baterai dengan Penyeimbang Aktif Tersusun Delta pengosongan 0.2 A.....	64
Gambar 4. 60 Grafik SoC Baterai dengan Penyeimbang Aktif Tersusun Delta Pengisian 0.05 A	65
Gambar 4. 61 Grafik Tegangan Baterai dengan Penyeimbang Aktif Tersusun Delta Pengisian 0.05 A	65
Gambar 4. 62 Grafik SoC Baterai dengan Penyeimbang Aktif Tersusun Delta Pengisian 0.1 A	66
Gambar 4. 63 Grafik Tegangan Baterai dengan Penyeimbang Aktif Tersusun Delta Pengisian 0.1 A	67
Gambar 4. 64 Grafik SoC Baterai dengan Penyeimbang Aktif Tersusun Delta Pengisian 0.15 A	68
Gambar 4. 65 Grafik Tegangan Baterai dengan Penyeimbang Aktif Tersusun Delta Pengisian 0.15 A	68
Gambar 4. 66 Grafik SoC Baterai dengan Penyeimbang Aktif Tersusun Delta Pengisian 0.2 A	69
Gambar 4. 67 Grafik Tegangan Baterai dengan Penyeimbang Aktif Tersusun Delta Pengisian 0.2 A	69
Gambar 4. 68 Grafik Perbandingan Waktu Penyeimbang Aktif Berbasis Kapasitor	71
Gambar 4. 69 Grafik Perbandingan Waktu Penyeimbang Aktif Berbasis Kapasitor Ketika Kondisi Pengosongan	72
Gambar 4. 70 Grafik Perbandingan Waktu Penyeimbang Aktif Berbasis Kapasitor Ketika Kondisi Pengosongan	73

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2. 1 Tabel Perbandingan Jenis-Jenis Baterai [15].....	11
Tabel 3. 1 Waktu Penelitian.....	18
Tabel 4. 1 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Tersusun Paralel pengosongan 0.05 A.....	29
Tabel 4. 2 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Tersusun Paralel pengosongan 0.05 A.....	31
Tabel 4. 3 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Tersusun Paralel pengosongan 0.05 A.....	32
Tabel 4. 4 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Tersusun Paralel pengosongan 0.1 A.....	33
Tabel 4. 5 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Tersusun Paralel pengosongan 0.15 A.....	35
Tabel 4. 6 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Tersusun Paralel pengosongan 0.2 A.....	36
Tabel 4. 7 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Tersusun Paralel pengisian 0.05 A.....	37
Tabel 4. 8 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Tersusun Paralel Pengisian 0.1 A.....	39
Tabel 4. 9 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Tersusun Paralel Pengisian 0.15 A.....	40
Tabel 4. 10 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Tersusun Paralel Pengisian 0.2 A.....	41
Tabel 4. 11 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Berjenjang ganda pengosongan 0.05 A.....	44
Tabel 4. 12 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Berjenjang ganda pengosongan 0.05 A.....	45

Tabel 4. 13 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Berjenjang ganda pengosongan 0.05 A.....	46
Tabel 4. 14 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Berjenjang ganda pengosongan 0.1 A.....	48
Tabel 4. 15 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Berjenjang ganda pengosongan 0.15 A.....	49
Tabel 4. 16 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Berjenjang ganda pengosongan 0.2 A.....	50
Tabel 4. 17 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Berjenjang ganda pengisian 0.05 A	52
Tabel 4. 18 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Berjenjang ganda Pengisian 0.1 A	53
Tabel 4. 19 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Berjenjang ganda Pengisian 0.15 A	54
Tabel 4. 20 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Berjenjang ganda Pengisian 0.2 A	55
Tabel 4. 21 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Tersusun Delta pengosongan 0.05 A	58
Tabel 4. 22 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Tersusun Delta pengosongan 0.05 A	59
Tabel 4. 23 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Tersusun Delta pengosongan 0.05 A	60
Tabel 4. 24 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Tersusun Delta pengosongan 0.1 A	62
Tabel 4. 25 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Tersusun Delta pengosongan 0.15 A	63
Tabel 4. 26 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Tersusun Delta pengosongan 0.2 A	64
Tabel 4. 27 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Tersusun Delta pengisian 0.05 A	66
Tabel 4. 28 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Tersusun Delta Pengisian 0.1 A.....	67

Tabel 4. 29 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Tersusun Delta Pengisian 0.15 A	68
Tabel 4. 30 Tabel Kondisi SoC dan Tegangan Baterai pada Penyeimbang Aktif Tersusun Delta Pengisian 0.2 A	69

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia saat ini memiliki kebijakan Pembangunan Rendah Karbon Indonesia & *Net-Zero Emission* Menuju Ekonomi Hijau untuk mengurangi berbagai dampak perubahan iklim bagi pembangunan. Beberapa kebijakan pembangunan rendah karbon untuk mendukung *Net-Zero Emission* pada bidang energi diantaranya penurunan intensitas energi, energi terbarukan, dan transisi ke kendaraan listrik [1]. Indonesia memiliki potensi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang cukup besar, yakni mencapai 207.898 Megawatt (MW), namun sejauh ini baru dimanfaatkan sebesar 78 Mega Watt (MW) [2].

PLTS merupakan energi terbarukan yang terus berlanjut dan ramah lingkungan. Instalasi PLTS diklasifikasikan menjadi dua yaitu, sistem PLTS yang tidak terhubung dengan jaringan (*Off-Grid PV Plant*) atau yang lebih dikenal dengan sebutan PLTS berdiri sendiri (*Stand Alone*) dan sistem PLTS terhubung dengan jaringan (*On-Grid PV Plant*) atau lebih dikenal dengan sebutan PLTS *Grid-Connected*. *Off-grid* adalah sistem pembangkit listrik yang hanya mengandalkan energi matahari sebagai salah satu-satunya sumber energi utama dengan menggunakan panel surya untuk menghasilkan energi listrik sesuai dengan kebutuhan. *Off grid* bersifat mandiri yang menggunakan baterai sebagai media penyimpanan atau *Energy Storage System* [3].

Sel baterai akan dikombinasikan dengan hubungan seri dan paralel untuk mencapai kapasitas dan tegangan terminal yang diperlukan. Tantangan utama dari penggunaan baterai *lithium ion* atau *lead acid* adalah pengisian daya yang

berlebihan (*Overcharging*) akan mempersingkat masa pakai baterai dan pengisian daya pada baterai yang telah terisi berlebih dapat menjadi permasalahan yang serius dan berbahaya [4].

Melihat dari permasalahan tersebut maka diperlukan pengukuran tegangan baterai sebagai bagian dari manajemen baterai sangat penting untuk baterai karena perlunya pengawasan energi yang tersisa pada baterai, mengidentifikasi sel yang rusak, dan menyeimbangkan sel yang tersusun seri. *State of Charge* merupakan tingkat pengisian baterai listrik relatif terhadap kapasitasnya. *State of Charge* atau disebut juga SoC harus selalu dipantau dan kondisi pengisian berlebihan harus dihindari dalam kondisi apapun. Pada baterai *lithium-ion* tegangan sel secara tidak langsung menunjukkan nilai SoC sel baterai [4]. Oleh karena itu diperlukan analisis penyebab ketidakseimbangan sel pada baterai, pemantauan tegangan, dan analisa terhadap rangkaian penyeimbang tegangan sel yang terhubung dengan baterai.

1.2. Tujuan

Adapun tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut

1. Mengetahui penyebab dari ketidakseimbangan tegangan sel baterai.
2. Merancang rangkaian penyeimbang sel untuk menyeimbangkan tegangan pada baterai.
3. Menganalisa kinerja rangkaian penyeimbang sel baterai.

1.3. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah mengetahui penyebab dari ketidakseimbangan tegangan sel pada baterai, cara mengatasinya, dan mengetahui kinerja rangkaian penyeimbang.

1.4. Rumusan Masalah

Baterai yang digunakan pada penyimpanan energi dari energi terbarukan, mobil listrik maupun untuk aplikasi lainnya sel baterai disusun secara seri dan paralel untuk menghasilkan tegangan dan kapasitas yang diinginkan. Tiap sel baterai *Lithium ion* tersebut tidak sama persis dengan yang lainnya dalam hal kapasitas, resistansi internal, dan *self discharge* atau pengosongan sendiri yang terjadi saat proses pembuatan. Karakteristik ini menyebabkan waktu pengisian maupun pengosongan yang berbeda untuk tiap sel baterai yang dapat menyebabkan pengisian daya terlalu rendah, pengisian berlebih atau pengosongan berlebih pada beberapa sel baterai jika digunakan dengan tanpa perlindungan. Oleh karena itu, diperlukan rangkaian yang dapat menyeimbangkan tegangan pada sel baterai untuk menghindari kondisi tersebut.

1.5. Batasan Penelitian

Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Baterai yang digunakan adalah baterai lithium ion 18650.
2. Baterai yang digunakan pada penelitian ini adalah *Lithium ion* yang dirangkai secara seri.

1.6. Hipotesis

Adapun hipotesis pada penelitian ini adalah ketidakseimbangan pada sel baterai diakibatkan oleh tidak seimbangny nilai SoC (*State of Charge*) yang merepresentasikan nilai tegangan pada baterai. Ketidakseimbangan tersebut diharapkan mampu diatasi oleh rangkaian penyeimbang.

1.7. Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada proposal ini adalah sebagai berikut

BAB 1. PENDAHULUAN

Pada bab ini menjelaskan tentang latar belakang, tujuan, rumusan masalah, batasan masalah, manfaat, hipotesis, dan sistematika penulisan penelitian.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini memaparkan tentang landasan teori dari penelitian ini yang didapat dari sumber buku, jurnal, serta penelitian terdahulu.

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini memaparkan waktu dan tempat, alat dan bahan, metode penelitian dan pelaksanaan serta pengamatan dalam pengerjaan tugas akhir.

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini menganalisa dan menjelaskan penyebab ketidakseimbangan tegangan sel pada baterai berdasarkan hasil dari simulasi dari rangkaian penyeimbang sel.

BAB 5. PENUTUP

Pada bab ini menjelaskan kesimpulan dan saran yang didasarkan pada hasil data dan pembahasan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terkait

2.1.1. *Active Cell Balancing Algorithms in Lithium ion Battery*

Penelitian ini dilakukan oleh Bowen Jiang di Chalmers University of Technology pada tahun 2020. Penelitian ini membandingkan rangkaian penyeimbang pasif dan penyeimbang aktif. Baterai yang dimodelkan pada penelitian ini adalah baterai *lithium ion* dengan kapasitas 24 Ah dengan tegangan nominal 3.7 V. Rangkaian penyeimbang aktif yang digunakan adalah penyeimbang dengan satu kapasitor, penyeimbang multi level induktor dan penyeimbang konverter *buck boost*. Simulasi dilakukan pada program Matlab Simulink [5].

2.1.2. *Passive Cell Balancing of Lithium ion Batteries Used for Automotive Applications*

Penelitian ini oleh Neil Samaddar dan kawan-kawan pada tahun 2020. Penelitian ini membahas rangkaian penyeimbang pasif dengan menggunakan resistor. Baterai yang digunakan pada simulasi ini adalah baterai lithium-ion 1300 mAh dengan tegangan nominal 3.7 V. Penelitian ini menggunakan satu sel dan empat sel baterai sebagai percobaan. Simulasi juga dilakukan saat baterai kondisi pengisian [6].

2.1.3. *An Automatic Switched-Capacitor Cell Balancing Circuit for Series Connected Battery String*

Penelitian ini dilakukan oleh Yuanmao Ye dan Ka Wai Eric Cheng dari The Hong Kong Polytechnic University. Penelitian ini menggunakan rangkaian Kapasitor Beralih. Model baterai yang digunakan dimodelkan dengan menggunakan sebuah kapasitor dengan nilai 1 F. Nilai kapasitor yang digunakan sebagai penyeimbang bernilai 220 μ F

dengan frekuensi pensaklaran sebesar 22 kHz. Dengan menggunakan nilai tersebut baterai dengan selisih 0.2 V dengan dua sel kapasitor dapat seimbang dalam waktu kurang dari satu detik. Namun, seiring dengan penambahan sel kapasitor dan juga perbedaan tegangannya maka semakin memerlukan waktu untuk penyeimbangan [7].

2.1.4. *Design and Performance Analysis of Active and Passive Cell Balancing for Lithium-Ion Batteries*

Penelitian ini dilakukan oleh Rakshak Udupa dan kawan-kawan pada tahun 2021 dari RV College of Engineering, India. Penelitian ini membahas beberapa sistem penyeimbang seperti pasif, kapasitor beralih, dan juga penyeimbang aktif flyback. Simulasi dilakukan dengan menggunakan Matlab Simulink dengan menggunakan model kapasitor sebagai pengganti baterai pada penyeimbang pasif dan penyeimbang aktif kapasitor beralih. Sedangkan pada penyeimbang aktif flyback menggunakan RC model lithium ion sel. Pada penyeimbang pasif memerlukan waktu 16000 detik sedangkan pada penyeimbang aktif memerlukan waktu 500 detik [8].

2.1.5. *Battery Management System Implementation with Pasive Control Method*

Penelitian ini dilakukan oleh Sinan Kivrak dan kawan-kawan pada tahun 2018 di Turki. Penelitian ini membahas sistem penyeimbang baterai menggunakan penyeimbang pasif. Baterai yang digunakan dalam penelitian ini adalah baterai LiFePO₄ yang dirangkai seri sejumlah empat buah dengan kapasitas 40 Ah. Parameter yang dimonitoring ialah tegangan dan arus. Baterai seimbang setelah 9 menit dengan selisih awal tegangan terjauh sebesar 0.02 V [9].

2.1.6. *A review: Energy storage system and balancing circuits for electric vehicle application*

Penelitian ini dilakukan oleh Ahasan Habib dan kawan-kawan pada tahun 2020 di *International Islamic University Malaysia*. Penelitian ini membahas mengenai teknik penyeimbangan baterai seperti penyeimbang aktif maupun penyeimbang pasif. Rangkaian

penyeimbang lain juga didiskusikan pada penelitian ini seperti *cell to heat*, *cell to cell*, *pack to cell*, dan *pack to cell* [10].

2.1.7. *A Cell Equalization Method Based on Resonant Switched Capacitor Balancing for Lithium Ion Batteries*

Penelitian ini dilakukan oleh Ali Farzan Moghaddam dan Alex Van den Bossche pada tahun 2018 di belgia. Penelitian ini membahas mengenai penyeimbang aktif dengan rangkaian resonansi. Rangkaian tersebut berisi kapasitor dan induktor yang dirangkai secara seri. Frekuensi pensaklaran dihitung dengan menggunakan frekuensi resonansi. Baterai yang digunakan dimodelkan dengan sebuah kapasitor. Waktu penyeimbang tegangan dengan rangkaian tersebut memerlukan waktu selama 0.1 detik [11].

2.1.8. *Double-Tired Cell Balancing System With Switched Capacitor and Switched Inductor.*

Penelitian ini dilakukan oleh Yuanmao dan kawan-kawan pada tahun 2019 di Guangdong University of Technology, China. Penelitian ini menggunakan rangkaian induktor dan kapasitor sebagai rangkaian penyeimbang. Penelitian ini menggunakan simulasi pada PSIM dengan baterai dimodelkan dengan Super Kapasitor dengan kapasitas 1 F. dengan menggunakan model tersebut diperlukan waktu 0.5 detik untuk sel kapasitor seimbang [12].

2.2. **Pembangkit Listrik Tenaga Surya**

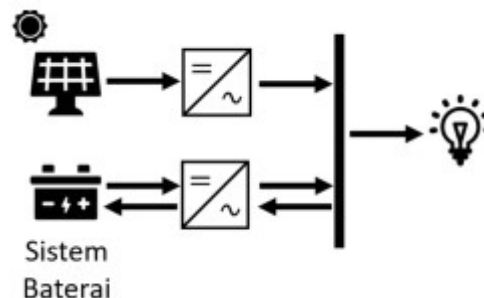
Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) adalah pembangkit listrik yang menggunakan sinar matahari untuk mengubah radiasi matahari menjadi energi listrik melalui sel surya (*photovoltaic power generation*). Semakin tinggi intensitas radiasi matahari yang mengenai sel surya maka semakin tinggi pula daya yang dihasilkan. PLTS menghasilkan arus searah yang dapat diubah menjadi arus bolak-balik dengan bantuan inverter sesuai dengan kebutuhan pada beban listrik yang digunakan. Karena prinsip operasinya

adalah mengubah radiasi matahari, PLTS akan menghasilkan energi listrik meskipun cuaca mendung tetapi tidak sebesar saat cuaca cerah.

Sistem PLTS terbagi menjadi tiga kelas berdasarkan konfigurasi dan aplikasinya antara lain sistem PLTS tidak terhubung ke jaringan (*Off-grid PV Plant*) atau lebih dikenal sebagai sistem PLTS *stand alone*, sistem PLTS terhubung dengan jaringan (*On-grid PV plant*), dan sistem PLTS yang terhubung dengan pembangkit lain (*Hybrid PV plant*). [13]

2.2.1. PLTS Off-Grid

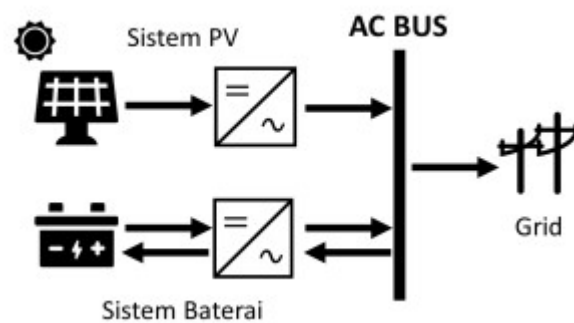
PLTS Off-grid adalah sistem PLTS yang tidak terkoneksi dengan jaringan. Sistem ini bersifat mandiri, sering disebut sebagai sistem otonom. Sistem tersebut umumnya merupakan sistem dengan skema instalasi terdistribusi dan kapasitas produksi skala kecil sampai menengah. Sistem ini biasanya dilengkapi dengan sistem penyimpanan energi listrik berupa baterai. Sistem penyimpanan baterai harus mampu menyediakan listrik untuk beban listrik dalam kondisi cuaca buruk dan pada malam hari. PLTS off-grid dibedakan menjadi dua jenis yaitu PLTS Off-grid Domestik yang digunakan untuk keperluan rumah tangga dan PLTS Off-grid Non-domestik yang digunakan untuk keperluan telekomunikasi, alat mitigasi bencana, dan repeater gelombang radio. [13]



Gambar 2. 1 PLTS Off Grid [3]

2.2.2. PLTS *On-Grid*

PLTS on-grid adalah sistem PLTS yang terhubung ke jaringan. Kelebihan dari sistem PLTS on-grid adalah dapat membagi atau mengurangi beban generator lain yang terhubung ke grid yang sama. Berdasarkan pola perilaku distribusinya, sistem ini dapat dibagi menjadi dua bagian, yaitu, sistem dengan PV yang terhubung ke jaringan dengan penyimpanan atau cadangan baterai, dan sistem dengan PV yang terhubung ke jaringan tanpa penyimpanan atau cadangan baterai. Fungsi baterai pada PLTS on-grid berfungsi sebagai suplai tenaga listrik untuk beban listrik apabila jaringan atau grid mengalami kegagalan dalam waktu tertentu dan sebagai penyimpan energi lebih hasil produksi PLTS yang akan di suplai ke grid. Berdasarkan aplikasinya sistem ini dibagi menjadi dua yaitu sistem PLTS on-grid distributed yang contoh penerapannya pada rumah tangga dan PLTS on-grid centralized. [13]



Gambar 2. 2 PLTS On Grid [3]

2.2.3. PLTS *Hybrid*

PLTS *Hybrid* merupakan jenis PLTS yang dalam pengoperasiannya digabungkan dengan jenis pembangkit listrik lain atau dengan sumber energi berbeda guna mendapatkan keandalan sistem yang lebih baik. Selain untuk mendapatkan keandalan sistem yang baik, sistem PLTS hybrid ini juga diterapkan untuk menurunkan biaya pokok produksi listrik sehingga perusahaan penyedia energi listrik akan lebih ekonomis dalam proses penyediaan energi. [13]

2.3. Baterai

Baterai merupakan perangkat yang digunakan untuk menyimpan energi listrik dalam bentuk energi kimia kemudian diubah menjadi energi listrik untuk memperoleh arus listrik yang diperlukan. Arus listrik tersebut dapat digunakan untuk menghidupkan berbagai peralatan listrik [14]. Beberapa aplikasi dan kasus penggunaan, termasuk pengaturan frekuensi, integrasi pembangkit terbarukan, mikro grid, dan sebagainya. Misalnya, integrasi untuk pembangkit listrik terdistribusi ke dalam sistem tenaga listrik karena semakin meningkatnya kompleksitas dalam menjaga keandalan sistem karena sifat dari sistem pembangkit listrik tenaga angin dan surya yang berubah-ubah dan terputus-putus, atau mengurangi biaya tagihan listrik, dan teknologi pintar lainnya. [15]

Baterai telah terbukti menjadi teknologi penyimpanan energi yang layak secara komersial. Peningkatan penggunaan baterai lithium-ion dalam elektronik konsumen dan kendaraan listrik telah menyebabkan perluasan kapasitas manufaktur global, menghasilkan penurunan biaya yang signifikan yang diperkirakan akan berlanjut selama beberapa tahun ke depan. Biaya rendah dan efisiensi tinggi baterai lithium-ion telah berperan penting dalam gelombang penerapan BESS dalam beberapa tahun terakhir baik untuk instalasi skala kecil, di belakang meteran dan skala besar, penyebaran tingkat jaringan.

Misalnya, sistem penyimpanan energi baterai dapat digunakan untuk mengatasi beberapa tantangan terkait integrasi jaringan energi terbarukan skala besar. Pertama, baterai secara teknis lebih cocok untuk pengaturan frekuensi daripada cadangan pemintalan tradisional dari pembangkit listrik. Kedua, baterai memberikan alternatif yang hemat biaya untuk perluasan jaringan untuk mengurangi pembatasan pembangkit listrik tenaga angin dan surya. Demikian pula, baterai memungkinkan penghindaran biaya puncak konsumen dengan memasok energi off-grid selama jam konsumsi puncak on-grid. Ketiga, karena pembangkit listrik terbarukan seringkali tidak sesuai

dengan permintaan listrik, kelebihan daya harus dibatasi atau diekspor. Kelebihan daya dapat disimpan dalam baterai untuk konsumsi nanti saat pembangkit listrik terbarukan rendah dan permintaan listrik meningkat.

Teknologi baterai untuk perangkat penyimpanan energi dapat dibedakan berdasarkan kepadatan energi, efisiensi pengisian dan pengosongan (*charging-discharging*), masa pakai, dan keramahan lingkungan perangkat.

Tabel 2. 1 Tabel Perbandingan Jenis-Jenis Baterai [15]

No	Jenis Baterai	Kepadatan Energi (kW/kg)	Efisiensi (%)	Masa Pakai (Tahun)	Ramah Lingkungan
1	Lithium Ion	150-250	95	10-15	Ya
2	Ni-Cd	40-60	60-80	10-15	Tidak
3	Lead-Acid	30-50	60-70	3-6	Tidak

Kepadatan energi didefinisikan sebagai jumlah energi yang dapat disimpan dalam satu sistem per satuan volume atau per satuan berat. Baterai sekunder *lithium* menyimpan 150–250 watt-jam per kilogram (kg) dan dapat menyimpan energi 1,5–2 kali lebih banyak daripada baterai Na–S, dua hingga tiga kali lebih banyak daripada baterai aliran redoks, dan sekitar lima kali lebih banyak daripada baterai penyimpanan timbal. Efisiensi pengisian dan pengosongan adalah skala kinerja yang dapat digunakan untuk menilai efisiensi baterai.

Salah satu elemen kinerja penting dari perangkat penyimpanan energi adalah masa pakainya, dan faktor ini memiliki dampak terbesar dalam meninjau efisiensi ekonomi. Pertimbangan utama lainnya adalah ramah lingkungan, atau sejauh mana perangkat tersebut tidak berbahaya bagi lingkungan dan dapat didaur ulang.

Pada baterai kimia dapat dibedakan menjadi beberapa jenis, diantaranya sebagai berikut

2.3.1. Baterai Lead-Acid (PbA)

Jenis sel sekunder ini banyak digunakan pada kendaraan dan aplikasi yang memerlukan nilai arus beban yang tinggi. Manfaat utama dari baterai ini adalah harganya yang murah, teknologi yang bagus, dan daur ulang yang efisien.

2.3.2. Baterai Nikel-Kadmium (Ni-Cd)

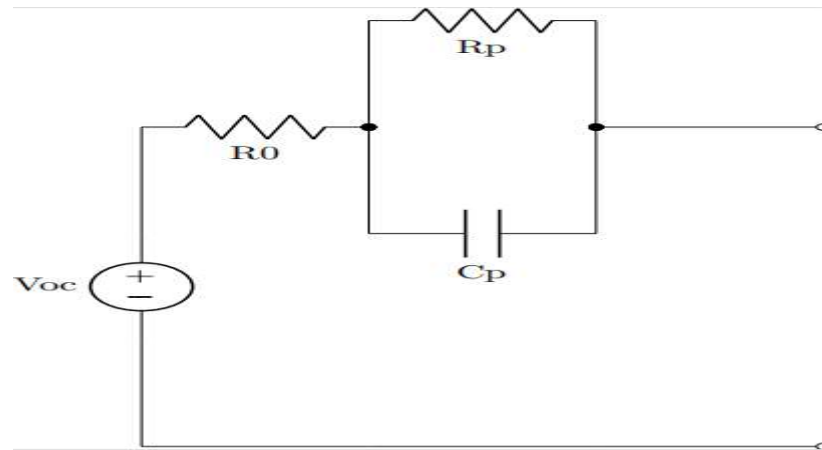
Baterai nikel-kadmium adalah baterai isi ulang yang digunakan untuk komputer portabel, bor, dan perangkat kecil lainnya yang memerlukan pelepasan daya yang merata.

2.3.3. Baterai Lithium-Ion (Li-Ion)

Baterai kimia *lithium-ion* memiliki kepadatan energi tertinggi dan dianggap aman. Tidak diperlukan siklus terjadwal untuk memperpanjang masa pakai baterai. Baterai *lithium-ion* banyak digunakan dalam perangkat elektronik seperti kamera, kalkulator, laptop, dan semakin banyak digunakan untuk mobil listrik.

2.4. Baterai Lithium Ion

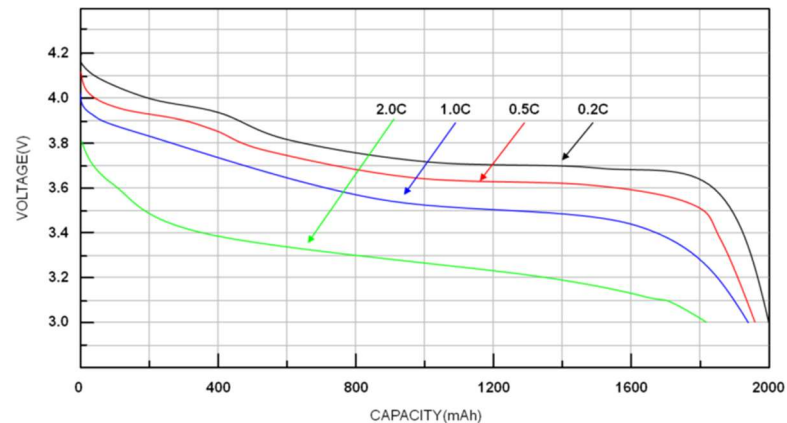
Karakteristik dari baterai *lithium-ion* dan kemungkinan kondisi kegagalan membuat *Battery Management System* (BMS) sangat penting dalam merancang paket baterai *lithium-ion*. Karena inkonsistensi manufaktur dan karakteristik kinerja yang unik dari masing-masing sel dalam baterai, sel akan mengisi dan melepaskan muatan yang berbeda selama pengoperasian baterai.



Gambar 2. 3 Rangkaian Ekuivalen Baterai

Model rangkaian ekuivalen menggunakan rangkaian listrik untuk mensimulasikan kinerja sel. Rangkaian paling sederhana adalah dengan menggunakan satu rangkaian sumber tegangan konstan yang dihubungkan dengan resistor internal, namun model ini kurang efektif untuk menganalisa kinerja dinamis sel baterai. Oleh karena itu, model rangkaian dengan RC atau 2 RC dikembangkan untuk menganalisa kinerja sel baterai. [5]

Pada gambar 2.3 menunjukkan model rangkaian ekuivalen pada baterai. V_{oc} merupakan tegangan pada saat rangkaian terbuka yang nilainya berubah sesuai dengan SOC dan suhu. Pada resistansi R_0 merupakan resistansi internal pada baterai. Sedangkan untuk R_p dan C_p merupakan rangkaian resistor dan kapasitor yang dirangkai secara paralel yang menggambarkan proses transfer muatan yang terjadi pada elektroda negatif dan positif serta proses difusi ion *lithium-ion* yang terjadi di dalam dan di luar bahan elektroda aktif. [5]



Gambar 2. 4 Gambar kurva pengosongan terhadap tegangan [16]

Gambar 2.4 menunjukkan gambar kurva pengosongan terhadap tegangan baterai. Setiap jenis baterai memiliki karakteristik pengosongan tersendiri. Terdapat baterai yang memiliki kurva karakteristik pengosongan yang datar, hal ini memudahkan dalam sebuah penggunaan baterai karena tegangan baterai cukup konstan dalam siklus pengosongan. Sedangkan pada kurva baterai miring mempermudah estimasi kapasitas yang terisisa pada baterai. Kurva diatas menunjukkan bahwa kapasitas efektif berkurang jika sel dikosongkan dengan arus yang cukup tinggi [16].

2.5. Penyeimbang Sel

Kondisi sel baterai yang tidak seimbang dapat menyebabkan kerusakan lebih dini pada sel tersebut. Ketidakseimbangan dapat menciptakan ruangan kosong dalam sel-sel baterai pak, contoh pada Gambar tiap-tiap sel memiliki SOC yang berbeda. Pada gambar 2.4 sebelum dilakukan proses penyeimbangan, banyak ruang kosong yang belum sepenuhnya terisi. Pada gambar 2.5 setelah proses penyeimbangan, setelah proses tersebut selesai tidak banyak lagi ruang kosong yang ada atau bisa dikatakan kondisi SOC *battery-pack* sudah hampir sama. [17].



Gambar 2. 5 Baterai tidak seimbang



Gambar 2. 6 Baterai dalam keadaan seimbang

Teknik balancing ada dua, penyeimbang pasif dan penyeimbang aktif. Penyeimbang pasif bekerja dengan cara mengambil muatan dari sel yang mempunyai SOC paling banyak dan ditransfer ke sel yang memiliki SOC paling sedikit. Cara ini menimbulkan efek panas pada baterai, sifat dari teknik ini energi terbuang dalam bentuk panas karena hanya sebagian sel yang terisi penuh. Penyeimbang aktif bekerja dengan cara mengambil muatan dari sel yang muatannya paling banyak dan ditransfer ke sel yang muatan energinya paling sedikit, sehingga muatan energi pada sel yang ada didalam baterai pak persis sama sifat dari teknik ini energi teralirkan antara sel, sehingga kondisi antar sel seimbang dan tidak menghasilkan panas. [17]

2.5.1. Penyeimbang Pasif

Penyeimbangan pasif membuang energi dari baterai yang memiliki nilai SOC yang tinggi dengan menghubungkan dengan resistor yang dirangkai secara paralel. Penyeimbangan pasif memiliki keunggulan biaya yang rendah, kompleksitas rendah dan kontrol yang mudah. Tetapi, karena energi sel yang tidak seimbang terbuang secara total dalam bentuk panas, efisiensi siklus sel baterai akan berkurang dan ada juga masalah thermal jika arus penyeimbangan terlalu tinggi. [5]

2.5.2. Penyeimbang Aktif

Untuk menghindari banyak kehilangan energi pada metode penyeimbangan pasif, banyak metode penyeimbangan aktif yang telah dikembangkan. Ide utama penyeimbangan aktif adalah dengan menggunakan komponen penyimpan energi, seperti kapasitor, induktor, atau transformator, untuk menyimpan muatan dari sel yang memiliki SOC yang tinggi dan mentransfernya ke sel dengan SOC yang lebih rendah. Penyeimbangan aktif memiliki keuntungan yang dapat memanfaatkan energi baterai jauh lebih besar, tetapi akan membutuhkan konfigurasi dan algoritma kontrol yang lebih kompleks [18].

2.6. Penyeimbangan Aktif Berbasis Kapasitor

Kapasitor adalah komponen elektronik pasif yang menyimpan energi dalam bentuk medan elektrostatik. Dalam bentuknya yang paling sederhana, kapasitor terdiri dari dua pelat konduktor yang dipisahkan oleh bahan isolasi yang disebut dielektrik. Kapasitansi berbanding lurus dengan luas permukaan pelat, dan berbanding terbalik dengan pemisahan antara pelat. Kapasitansi juga tergantung pada konstanta dielektrik zat yang memisahkan pelat. Reaktansi kapasitif didefinisikan sebagai

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \dots \dots \dots (2)$$

Dimana X_C adalah reaktansi kapasitif, ω adalah frekuensi angular, f adalah frekuensi dalam sudut, dan C adalah nilai kapasitansi [19]

Penyeimbangan aktif berbasis kapasitor menggunakan kapasitor sebagai komponen penyimpan energi, yang biasanya tersusun secara paralel dengan sel. Penyeimbang aktif kapasitor-*switched* merupakan yang pertama dikembangkan, yang memiliki lebih sedikit kapasitor dan algoritma kontrol yang mudah, namun memerlukan waktu balancing yang cukup lama terutama ketika lebih banyak sel yang terhubung secara seri. Untuk menambah kecepatan balancing dikembangkan beberapa rangkaian seperti Penyeimbang

kapasitor berjenjang ganda, penyeimbang kapasitor tersusun paralel, dan penyeimbang kapasitor struktur delta [5]

2.7. *Multiple Storage Device*

Storage Device atau perangkat penyimpanan merupakan penyimpanan sementara yang digunakan sebagai media penyimpanan ketika rangkaian penyeimbang bekerja. Pada penelitian ini menggunakan kapasitor sebagai perangkat penyimpanan. *Multiple* mengarah ke jumlah kapasitor yang lebih dari satu yang digunakan agar waktu penyeimbangan lebih cepat.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini dilakukan di Laboratorium Sistem Tenaga Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung dari bulan Februari – Agustus 2022 seperti ditunjukkan pada tabel dibawah ini

Tabel 3. 1 Waktu Penelitian

No	Kegiatan	Bulan							
		Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Agu	Sep
1	Studi Literatur	■	■	■	■	■	■	■	■
2	Seminar Proposal					■			
3	Pembuatan Pemodelan					■	■		
4	Uji coba dan pengumpulan data simulasi					■	■	■	
5	Penulisan laporan, dan analisis data						■	■	■
6	Seminar Hasil								■

3.2. Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Laptop HP 240 G7
2. *Software* Matlab Simulink
3. Data baterai *Lithium-ion* CGR18650 AF

3.3. Metode Penelitian

Dalam penelitian ini masalah yang dihadapi adalah ketidakseimbangan tegangan pada sel baterai *Lithium-ion*. Ketidakseimbangan sel tersebut akan disimulasikan dalam Matlab Simulink serta merancang rangkaian *Cell Balancing*. Maka, untuk menyelesaikan permasalahan tersebut diperlukan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Studi literatur.
Pada tahap ini peneliti mempelajari dan mengumpulkan literatur mengenai pemodelan baterai *Lithium ion* dan rangkaian penyeimbang sel. Literatur tersebut berasal dari beberapa sumber, seperti buku, jurnal ilmiah, dan penelitian terdahulu.
2. Perancangan rangkaian atau model sel baterai *Lithium ion*.
Pada tahap ini peneliti melakukan perancangan model baterai *pack* dengan menggunakan Matlab Simulink.
3. Perancangan rangkaian *Cell Balancing*.
Pada tahap ini peneliti melakukan perancangan dengan menggunakan simulasi pada Matlab Simulink dan juga pembuatan rangkaian penyeimbang sel.
4. Pengambilan dan pengolahan data.
Pada tahap ini pengambilan dan pengolahan data dilakukan dengan melakukan simulasi dan pembuatan alat. Parameter yang diamati pada simulasi adalah tegangan sel baterai dan SOC baterai.
5. Pembuatan laporan.
Pada tahap ini peneliti menyajikan hasil dari penelitian dalam bentuk laporan akhir. Hasil penelitian ini adalah menganalisis penyebab ketidakseimbangan sel pada baterai dan pengaruh penambahan rangkaian penyeimbang sel pada tegangan sel baterai.

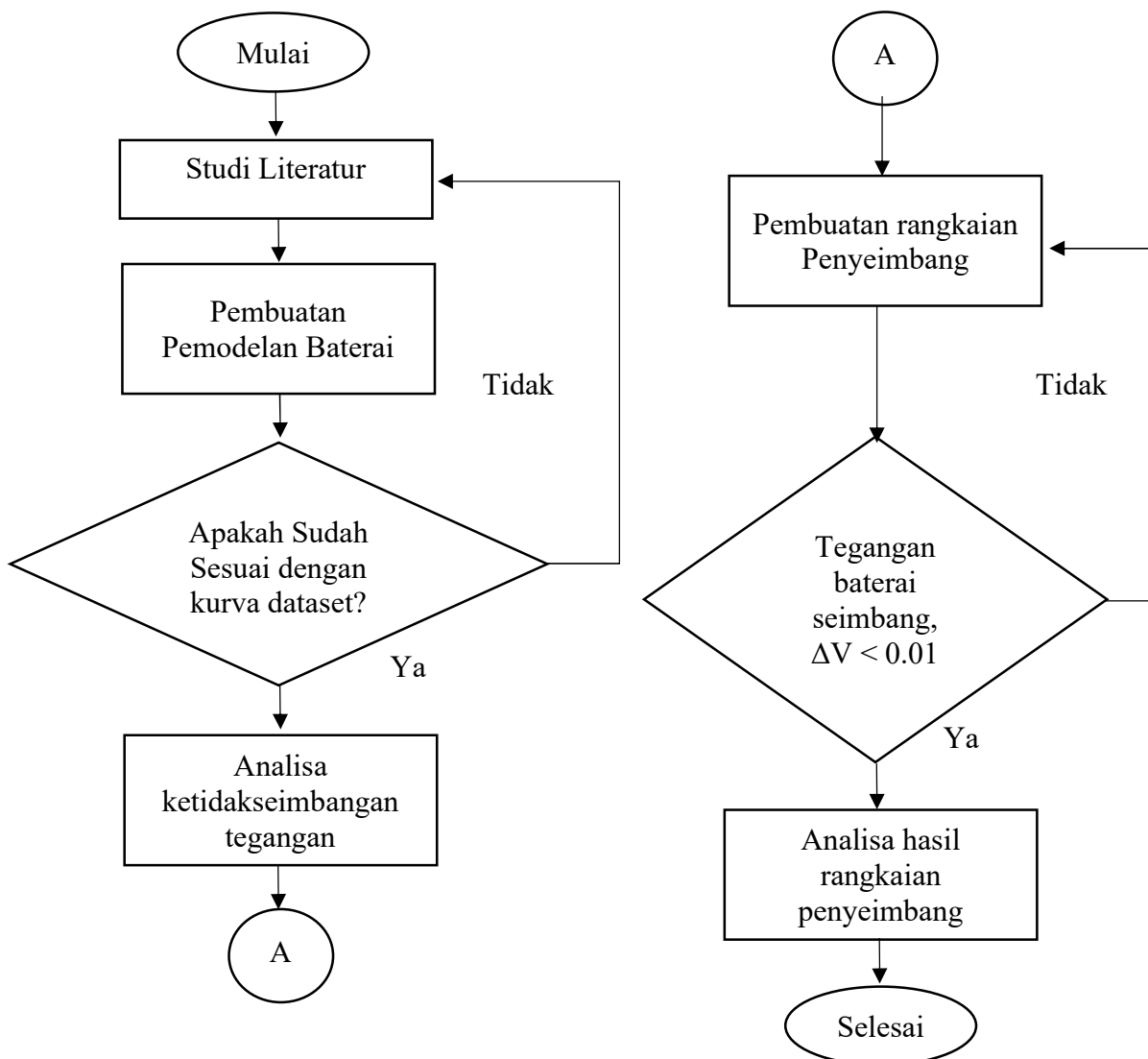
3.4. Simulasi dan Pemodelan

Pada penelitian ini akan mensimulasikan baterai untuk mengetahui penyebab dari ketidakseimbangan tegangan pada baterai. Pada baterai pak yang tidak

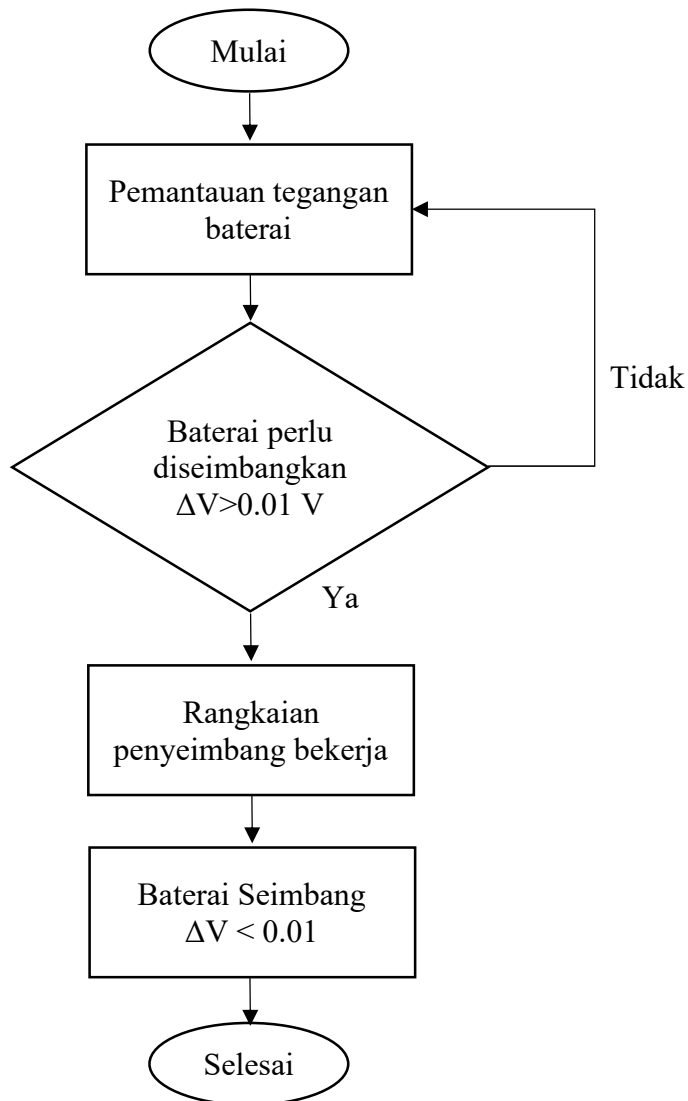
seimbang akan dilakukan penyeimbangan tegangan sel baterai dengan rangkaian penyeimbang aktif berbasis multiple kapasitor.

3.5. Diagram Alir Penelitian

Penyelesaian penelitian ini terdapat beberapa tahapan, untuk mempermudah dalam melaksanakannya diperlukan diagram alir penelitian yang ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 2 Diagram alir simulasi percobaan

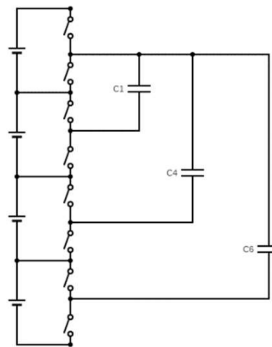
3.6. Rangkaian Penelitian

Pada penelitian ini akan menggunakan rangkaian penyeimbang aktif berbasis multi kapasitor. Rangkaian penyeimbang aktif berbasis kapasitor yang digunakan adalah rangkaian Penyeimbang kapasitor berjenjang ganda, penyeimbang kapasitor tersusun paralel, dan penyeimbang kapasitor struktur delta, karena rangkaian ini merupakan pengembangan dari rangkaian penyeimbang aktif Kapasitor *Switched* dan memiliki waktu penyeimbangan

yang lebih cepat. Rangkaian tersebut akan dirangkai dan disimulasikan pada Matlab Simulink.

3.6.1. Penyeimbang aktif struktur paralel

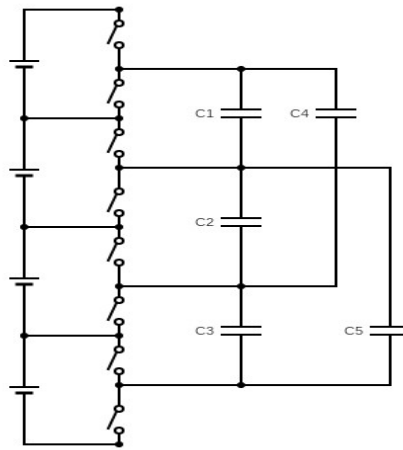
Penyeimbang aktif dengan struktur paralel memungkinkan penyeimbangan dua sel secara langsung pada posisi manapun. Pada gambar dibawah ini menunjukkan kapasitor yang terhubung antara sel 1 dan sel lainnya. Dengan menggunakan rangkaian ini, dua sel dihubungkan melalui satu atau dua kapasitor. Dengan demikian, kecepatan sel dapat ditingkatkan. Namun hanya sel 1 yang dapat diseimbangkan dengan sel lain hanya dengan satu kapasitor. Rangkaian penyeimbang aktif struktur paralel ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 3. 3 Rangkaian penyeimbang aktif struktur paralel

3.6.2. Penyeimbang aktif berjenjang ganda

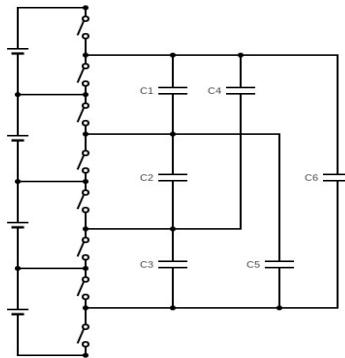
Para rangkaian ini memiliki dua lapisan kapasitor. Sinyal PWM yang sama juga diberikan kepada setiap saklar. Jika terdapat perbedaan SoC pada sel 1 dan sel 3, energi dapat dipindahkan melalui C4 tanpa melalui C1 dan C2. Dengan memanfaatkan perpindahan muatan tersebut, kecepatan penyeimbangan dapat ditingkatkan. Rangkaian penyeimbang aktif berjenjang ganda ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 3. 4 Rangkaian penyeimbang aktif berjenjang ganda

3.6.3. Penyeimbang aktif struktur delta

Penyeimbang aktif dengan struktur delta menyeimbangkan dua sel pada posisi apapun dengan menghubungkan setiap pasangan sel dengan satu kapasitor. Pada rangkaian ini diperlukan lebih banyak kapasitor. Rangkaian penyeimbang aktif struktur delta ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 3. 5 Rangkaian penyeimbang aktif tersusun delta

V. KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

Adapun kesimpulan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Ketidakseimbangan tegangan baterai disebabkan oleh perbedaan SoC pada tiap sel baterai. Pada baterai CGR18650AF dengan perbedaan SOC baterai terbesar sebesar 98 % dan 92 % memiliki perbedaan tegangan 0.164 V.
2. Berdasarkan hasil penelitian, rangkaian penyeimbang aktif berbasis kapasitor tersusun delta memiliki kinerja penyeimbang tercepat dibandingkan rangkaian penyeimbang *multiple* lainnya.
3. Pada simulasi penyeimbangan tegangan ketika pengosongan dan pengisian baterai, semakin besar arus pengosongan dan pengisian baterai yang masih berada di bawah batas arus maksimum akan semakin cepat rangkaian penyeimbang aktif dalam menyeimbangkan tegangan baterai.

5.2. Saran

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya adalah mencoba baterai lain dengan kurva tegangan baterai yang cenderung datar, seperti baterai LiFePO₄. Selain itu, memvariasikan arus pengosongan dan pengisian baterai yang berubah-ubah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementrian PPN/Bappenas, "Pembangunan Rendah Karbon Indonesia & Net Zero Emission Menuju EKonomi Hijau," 出处 *Pertumbuhan Rendah Karbon yang Berkualitas dan Peluang Indonesia untuk Mencapai Netral Karbon Sebelum 2070*, 2021.
- [2] IESR, "Potensi energi terbarukan apa saja yang dimiliki oleh Indonesia?," 出处 *Energi Terbarukan: Energi Untuk Kini dan Nanti*, Jakarta Selatan, IESR, 2017, p. 4.
- [3] Kementerian Federal Jerman untuk Kerja sama Ekonomi dan Pembangunan, *Design and Control of PV Hybrid System in Practice*, Jakarta: GIZ, 2020.
- [4] G. N, G. Yadav 和 G. CK, "Analysis and implementation of inductor based active battery cell balancing topology," *PEDES*, 2020.
- [5] B. Jiang, "Active Cell Balancing Algorithms in Lithium Ion Battery," *Chalmers University of Technology*, p. 12, 2020.
- [6] N. Samaddar, N. S. Kumar 和 R. Jayapragash, "Passive Cell Balancing of Lithium ion Batteries Used for Automotive Applications," *Journal of Physics: Conference Series*, p. 1, 2020.
- [7] Y. Ye 和 K. W. E. Cheng, "An Automatic Switched-Capacitor Cell Balancing Circuit for Series Connected Battery String," *Energies*, p. 2, 2016.
- [8] R. Udupa, S. Holla 和 K. B S, "Design and Performance Analysis of Active and Passive Cell Balancing for Lithium-Ion Batteries," *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 卷 23, 编号 6, p. 476, 2021.
- [9] S. Kivrak, T. Ozer 和 Y. Oguz, "Battery Management System Implementation with Pasive Control Method," *IEEE*, 2018.

- [10] A. K. M. A. Habib, M. K. Hasan, M. Mahmud, S. Morakabber, M. I. Ibrahimiya 和 S. Islam, "A review: Energy storage system and balancing circuits for electric vehicle application," *IET Power Electronics*, p. 1, 2020.
- [11] A. F. Moghaddam 和 A. V. d. Bossche, "A Cell Equalization Method Based on Resonant Switched Capacitor Balancing for Lithium Ion Batteries," *IEEE*, p. 337, 2018.
- [12] Y. Ye, J. Lin, Z. Li 和 X. Wang, "Double Tiered Cell Balancing SYstem With Switched Capacitor and Switched Inductor," *IEEE Acces*, 卷 7, p. 183356, 2019.
- [13] Y. Rahmawati 和 Sujito, *Pembangkit Listrik Tenaga Surya*, Malang: UNM, 2019.
- [14] M. Nasution, "Karakteristik Baterai Sebagai Penyimpanan Energi Listrik Secara Spesifik," *Journal of Electrical Technology*, 卷 6, 编号 1, p. 35, 2021.
- [15] ASIAN DEVELOPMENT BANK, *HANDBOOK ON ENERGY STORAGE SYSTEM*, PHILIPPINES: ADB, 2018.
- [16] J. Shepard, "How to read battery discharge curves," *Battery Power Tips*, 5 Juli 2021. [联机].
Available: <https://www.batterypowertips.com/how-to-read-battery-discharge-curves-faq/>. [访问日期: 1 Juni 2022].
- [17] Khaeruddin, Wijono 和 R. N. Hasanah, "Desain Penyeimbangan Sel Baterai Lithium ion dengan teknik cell to cell charging mode pada baterai management system," *Jurnal Ecotipe*, 卷 8, pp. 9-15, 2021.
- [18] J. Carter, Z. Fan 和 J. Cao, "Cell Equalisation Circuits: A Review," *Journal of Power Source*, p. 3, 2020.
- [19] X. Zumbahlen, *Linear Circuit Design Handbook*, Newnes/Elsevier, 2008.
- [20] KEMENTERIAN ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL,
"KEMENTERIAN ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL,"
KEMENTERIAN ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL, 15 Agustus

2021. [联机]. Available:

<https://ebtke.esdm.go.id/post/2021/08/16/2937/semakin.ekonomis.pengguna.plts.atap.diharapkan.terus.bertambah>. [访问日期: 28 Februari 2022].

[21] V. Suher, Pybamm Documentation, Pybamm, 2021.

[22] V. Sulzer , S. G. Marquis, R. Timms, M. Robinson 和 S. J. Chapman, "Python Battery Mathematical Modelling," *Journal Open Research Software*, pp. 1-7, 2021.