



**STUDI PENGARUH VARIASI METODE PENGISIAN CCCV TERHADAP  
*Li PLATING* DAN *LOSS LITHIUM INVENTORY (LLI)* PADA PROSES  
KERUSAKAN BATERAI *LITHIUM ION***

*diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar Sarjana pada  
program studi Fisika*

**SKRIPSI**

Oleh

**Nuril Rohmawati  
201810201024**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN  
TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS JEMBER  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
PROGRAM STUDI FISIKA  
JEMBER  
2024**

### PERSEMBAHAN

Pertama penulis memanjatkan Puja dan Puji syukur kepada Allah SWT, karena dengan rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Skripsi ini saya persembahkan untuk :

1. Kedua orang tua saya, Bapak Moh. Shodiq dan almh. Ibu Binti Mukaromah, yang selalu mendoakan, memberikan semangat, motivasi, dan dukungan yang tidak pernah terputus kepada saya selama ini.
2. Saudara kandung saya Moh. Sholeh Habibi, Moh. Zainul Fajar dan Moh. Agus Wahyudin yang selalu memberikan semangat dan motivasi agar pendidikan S-1 Fisika saya dapat terselesaikan.
3. Para guru yang telah memberikan ilmu dan restunya sehingga saya memiliki motivasi untuk terus belajar dan keberkahan untuk ilmu yang diberikan.
4. Almamater program studi Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam.

**MOTTO**

“Jangan menjelaskan dirimu kepada siapapun, karena yang menyukaimu tidak membutuhkan itu, dan yang membencimu tidak percaya itu”

*“Start now. Start where you are. Start with fear. Start with pain. Start with doubt. Start with hand shaking. Start with voice trembling; but start. Start and don’t stop. Start where you are, with what you have. Just start”*



**PERNYATAAN ORISINALITAS**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Nuril Rohmawati

NIM : 201810201024

Menyatakan bahwa karya ilmiah yang berjudul: *Studi Pengaruh Variasi Metode Pengisian CCCV terhadap Li Plating dan Loss Lithium Inventory (LLI) pada Proses Kerusakan Baterai Lithium Ion* adalah benar hasil karya saya sendiri kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya dan karya ilmiah ini belum pernah diajukan ke instansi mana pun. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya dengan sikap ilmiah yang dijunjung tinggi. Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian bersama dosen dan mahasiswa. Penelitian ini hanya dapat dipublikasikan dengan mencantumkan nama dosen pembimbing.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada paksaan dan tekanan dari pihak manapun. Saya bersedia mendapatkan sanksi akademik apabila ternyata dikemudian hari pernyataan ini tidak benar

Jember, 5 Maret 2024  
Yang Menyatakan,

Nuril Rohmawati  
NIM. 201810201024

**HALAMAN PERSETUJUAN**

Skripsi berjudul *Studi Pengaruh Variasi Metode Pengisian CCCV terhadap Li Plating dan Loss Lithium Inventory (LLI) pada Proses Kerusakan Baterai Lithium Ion* telah diuji dan disetujui oleh Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Jember pada:

Hari :

Tanggal :

Tempat : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember

Tim Penguji :

Ketua

Anggota I

Dr. Lutfi Rohman, S.Si., M.Si  
NIP. 1972082001998021001

Drs. Imam Rofi'i, M.Sc.  
NIP. 19680581992011001

Anggota II

Anggota III

Dr. Artoto Arkundato, S.Si., M.Si  
NIP. 196912251999031001

Dr. Ratna Dewi Syarifah, S.Pd., M.Si  
NIP. 198803202019032011

**ABSTRACT**

*Lithium-ion batteries are one of the most essential resources in various applications, from proactive electronics to electric vehicles. However, to ensure optimal battery performance and reliability, it is crucial to understand and test the degradation that occurs during battery use. The established standard cycle protocol is vital in battery testing and characterization. The study uses 100 recharge cycles and various recharging speeds that risk the loss of capacity and lithium layer. Optimum usage is achieved with different charging rates depending on the type of battery. The simulation results obtained from the study are graphs of the relationship between the residual capacity of the lithium-ion battery and the outputs produced. Further results focused on the lithium-ion battery capacity reduction factors, i.e., lithium plating and the losses of lithium inventory associated with variations in battery recharging speed. The minimum loss of capacity due to lithium coating is lost when the battery is recharged at a charging rate of 0.4C, so a balance point is found in the charging speed to minimize capacity loss due to lithium coating. An increase in the amount of lithium that is missing from the system during this charging cycle is reduced and can improve the efficiency of the charging process. The results of this research are expected to provide a deeper insight into the performance and degradation of lithium-ion batteries in the context of realistic use. Research information can be used to develop more accurate degradation models and more effective battery management strategies.*

**Keywords:** battery LGM50T, lithium plating, loss lithium inventory

## RINGKASAN

**Studi Pengaruh Variasi Metode Pengisian CCCV terhadap *Li Plating* dan *Loss Lithium Inventory (LLI)* pada Proses Kerusakan Baterai *Lithium Ion***; Nuril Rohmawati, 201810201024; 2024; 59 halaman; Program Studi Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam.

Indonesia mengimplementasikan kebijakan *net zero emission* melalui langkah pembangunan rendah karbon dengan mengembangkan sektor transportasi listrik yang menjadi aplikasi langsung dari perkembangan teknologi baterai. Baterai *lithium-ion* dapat dijadikan penyimpan energi listrik yang kapasitasnya besar dan dapat diisi ulang (baterai sekunder). Baterai ini memiliki stabilitas penyimpanan energi yang sangat baik dengan daya tahan mencapai 10 tahun atau lebih. Selain itu, baterai ini memiliki energi densitas tinggi, tidak mengalami efek memori, dan memiliki berat yang relatif lebih ringan jika dibandingkan dengan baterai lainnya. Salah satu jenis baterai *lithium ion* yaitu tipe LGM50. Setiap baterai yang digunakan terus menerus, seiring dengan waktu akan mengalami penurunan kualitas dalam penyimpanan kapasitas energinya. Degradasi baterai *lithium ion* LGM50 dapat diidentifikasi dari adanya penurunan kapasitas penyimpanan energi. Faktor ini bisa timbul akibat perubahan struktur kristal katoda dan anoda selama siklus pengisian dan pengosongan ulang baterai, yang akhirnya mengurangi kemampuan baterai dalam menyimpan ion lithium. Salah satu fenomena yang signifikan dalam degradasi baterai Li-ion adalah *lithium plating* dan *loss lithium inventory (LLI)* selama proses pengisian. Oleh karena itu, penelitian yang akurat dan valid diperlukan untuk memprediksi perilaku baterai selama diisi ulang dengan berbagai variasi kelajuan pengisian. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan titik kelajuan pengisian yang optimal untuk pengisian ulang baterai yang mengurangi resiko degradasi baterai *lithium ion*.

Penelitian dimulai dengan mengumpulkan data simulasi baterai *lithium ion* pada berbagai variasi pengisian pengosongan (0,3C; 0,5C; 0,7C; 1C; 2C). Model pengisian ulang *Constant Current Constant Voltage (CCCV)* diaplikasikan untuk protokol siklus pengisian ulang baterai. Protokol standar siklus baterai umumnya terdiri dari serangkaian langkah pengisian dan pengosongan yang dirancang untuk menguji kinerja baterai. Simulasi degradasi baterai *lithium ion* dalam PyBaMM dijalankan dengan pengaturan parameter yang telah disesuaikan pada eksperimen baterai *lithium ion*. Keluaran dari degradasi baterai dianalisis kesesuaiannya, meliputi *capacity loss*, *mode degradation*, dan *negative electrode porosity*.

Hasil simulasi yang didapatkan dari penelitian berupa grafik hubungan kapasitas sisa baterai *lithium ion* dengan keluaran-keluaran yang dihasilkan. Hasil selanjutnya difokuskan pada faktor pengurang kapasitas baterai *lithium ion*, yakni *lithium plating* dan *loss lithium inventory* berhubungan dengan variasi kelajuan pengisian ulang baterai. Kehilangan kapasitas akibat pelapisan lithium paling minimum hilang pada saat baterai diisi ulang dengan kelajuan pengisian 0,4C sehingga pada titik ini ditemukan keseimbangan dalam kecepatan pengisian untuk meminimalkan kehilangan kapasitas akibat pelapisan lithium. *Loss lithium inventory* paling rendah didapatkan saat baterai diisi ulang dengan kelajuan

pengisian 0,7C sehingga jumlah lithium yang hilang dari sistem selama siklus pengisian ini berkurang dan dapat meningkatkan efisiensi proses pengisian.



## PRAKATA

Puja Puji syukur atas kehadiran Allah SWT, karena berkat rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Studi Pengaruh Variasi Metode Pengisian CCCV terhadap *Li Plating* dan *Loss Lithium Inventory (LII)* pada Proses Kerusakan Baterai *Lithium Ion*”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S-1) pada Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu penulis menyampaikan terimakasih:

- a. Kepada Dr. Lutfi Rohman, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Utama dan Drs. Imam Rofi’i, M.Sc., selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah membimbing dan memberikan ilmu untuk mengarahkan penulis dalam melaksanakan penelitian dan penyusunan skripsi;
- b. Kepada Dr. Artoto Arkundato, S.Si., M.Si., selaku Dosen Penguji Utama dan Dr. Ratna Dewi Syarifah, S.Pd., M.Si., selaku Dosen Penguji Anggota yang telah meluangkan waktu dan memberikan masukan demi kesempurnaan skripsi ini;
- c. Kepada Drs. Imam Rofi’i, M.Sc., selaku Dosen Perwalian Akademik yang telah meluangkan waktu dan memberikan masukan serta motivasi selama proses perkuliahan berlangsung;
- d. Kepada Bapak Moh. Shodiq selaku ayah penulis yang selalu memberikan kasih sayang, nasihat, motivasi, semangat dan doa yang tiada henti sehingga penulis bisa menyelesaikan laporan tugas akhir ini, terimakasih banyak, *I love u so much dad*;
- e. Kepada almh. Ibu Binti Mukaromah selaku ibu penulis yang telah memberikan kasih sayang, nasihat, motivasi, semangat dan doa yang tiada henti sehingga penulis bisa menyelesaikan laporan tugas akhir. Semoga beliau selalu bangga dengan penulis, terimakasih banyak, *I love u forever and I miss u mom*;

- f. Kepada Moh. Sholeh Habibi, Moh. Zainul Fajar dan Moh. Agus Wahyudin selaku kakak dan adik penulis yang selalu memberikan semangat, kasih sayang dan motivasi, terimakasih banyak;
- g. Kepada Putri Nuril Fadhila dan Cindy Kurnia Putri selaku rekan tim tugas akhir penulis, terimakasih selalu memberikan semangat, ilmu, motivasi dan kerjasama kepada penulis;
- h. Kepada Sherly Ardy Pramesty Yuda, Willda Dian Alfiela, Arista Ananda Putri, Putri Nuril Fadhila, Dinda Fitri Khoirunnisa dan Jaya Hartono selaku sahabat bertumbuh penulis terimakasih selalu memberikan semangat, dukungan, motivasi, doa dan selalu mendengarkan keluh kesah;
- i. Kepada keluarga besar Fisika 20 (Quantum), terimakasih telah berkembang bersama-sama sampai sejauh ini;
- j. Kepada seluruh teman-teman penulis di Universitas Jember yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih untuk semua dukungan dan motivasi serta sudah berteman baik dengan penulis;
- k. Kepada semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang secara langsung maupun tidak langsung telah membantu penulisan laporan tugas akhir ini;
- l. *Last but not least*, kepada diri saya sendiri terimakasih banyak telah berjuang sejauh ini dan memilih untuk tidak menyerah dalam kondisi apapun, saya bangga pada diri saya sendiri bisa menyelesaikan laporan tugas akhir ini dengan penuh lika-liku kehidupan yang dijalani.

Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

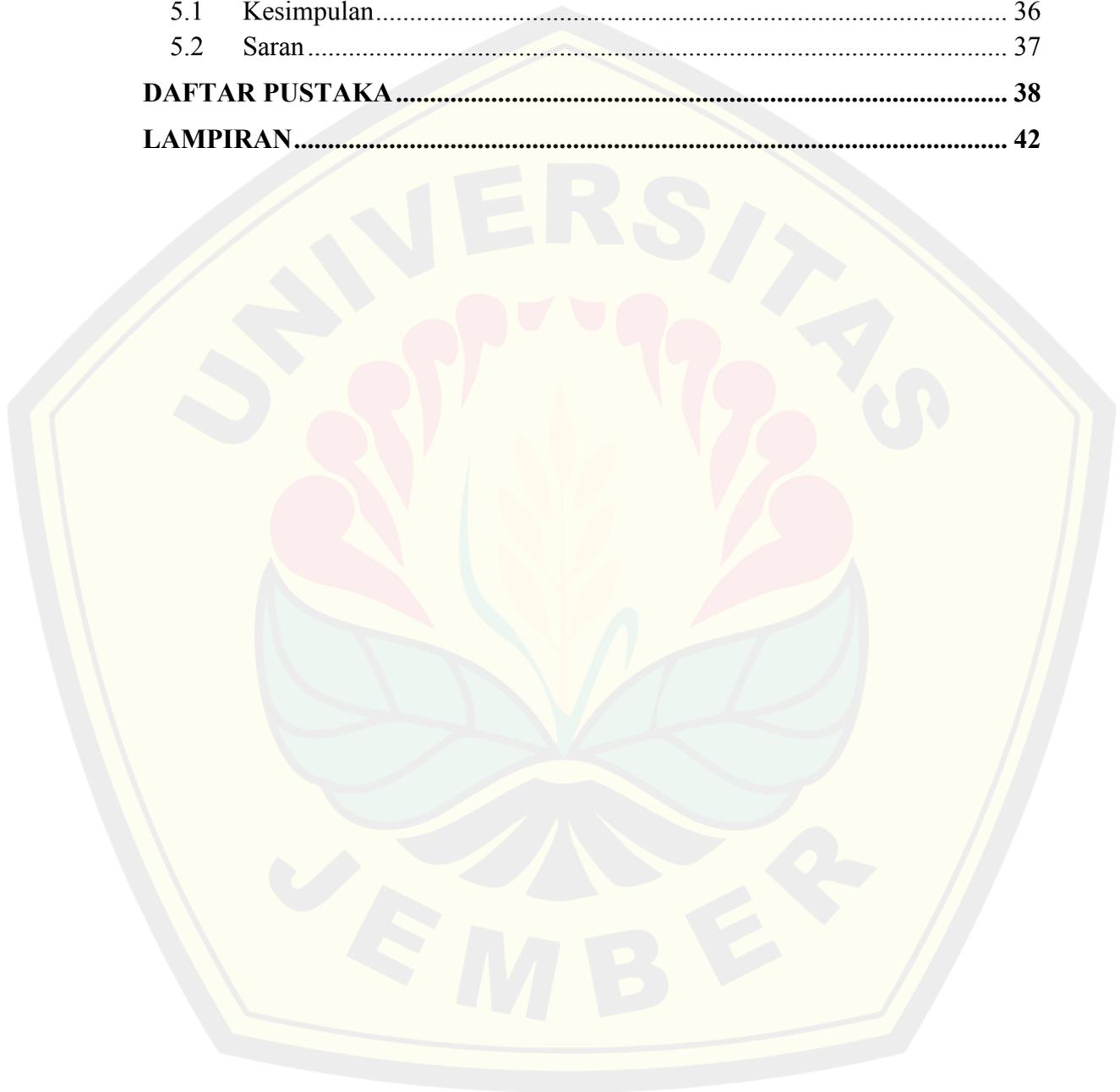
Jember, 5 Maret 2024

Penulis,

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	<b>i</b>
<b>PERSEMBAHAN</b> .....	<b>ii</b>
<b>MOTTO</b> .....	<b>iii</b>
<b>PERNYATAAN ORISINALITAS</b> .....	<b>iv</b>
<b>HALAMAN PERSETUJUAN</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vi</b>
<b>RINGKASAN</b> .....	<b>vii</b>
<b>PRAKATA</b> .....	<b>ix</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xv</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	<b>xvi</b>
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	4
1.3 Batasan Penelitian .....	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
<b>BAB 2. TINJAUAN TEORI</b> .....	<b>5</b>
2.1 Baterai Lithium Ion .....	5
2.2 PyBaMM .....	7
2.3 Pemodelan Baterai Lithium Ion .....	8
2.4 <i>Constant Current Constant Voltage (CCCV)</i> .....	9
2.5 <i>Lithium Plating</i> (Pelapisan Lithium).....	10
2.6 Pengaruh Kecepatan Pengisian dan Pengosongan Terhadap Kinerja Baterai .....	11
2.7 Degradasi Baterai Lithium Ion .....	11
<b>BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	<b>13</b>
3.1 Populasi dan Sampel/Subyek Penelitian .....	13
3.2 Desain Penelitian .....	13
3.3 Prosedur Penelitian.....	14
3.4 Pengumpulan Data Penelitian .....	15

3.5	Metode Analisis.....	16
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>		<b>17</b>
4.1	Hasil.....	17
4.2	Pembahasan.....	24
<b>BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>		<b>36</b>
5.1	Kesimpulan.....	36
5.2	Saran.....	37
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>		<b>38</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>		<b>42</b>



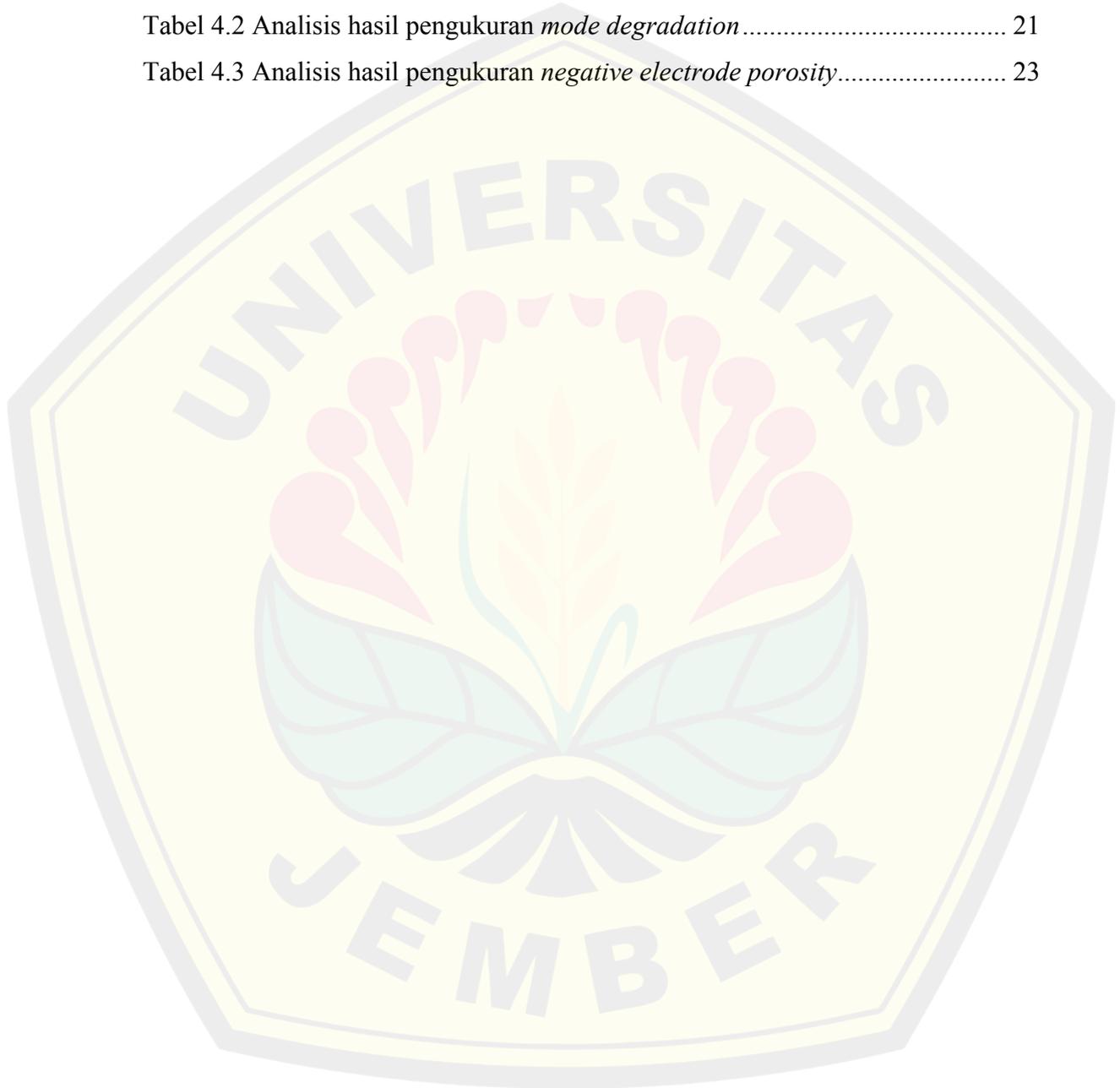
## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Grafik Kontrol CCCV pada pengisian baterai lithium.....	9
Gambar 2.2 Skema mekanisme degradasi dalam baterai lithium ion. ....	12
Gambar 3.1 Desain Penelitian.....	14
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian .....	15
Gambar 3.3 Grafik analisis kerusakan baterai .....	16
Gambar 4.1 Kurva hubungan <i>capacity loss</i> [A.h] dan <i>throughput capacity</i> [A.h] kelajuan pengisian 0,3C .....	17
Gambar 4.2 Kurva hubungan <i>capacity loss</i> [A.h] dan <i>throughput capacity</i> [A.h] kelajuan pengisian 0,5C .....	17
Gambar 4.3 Kurva hubungan <i>capacity loss</i> [A.h] dan <i>throughput capacity</i> [A.h] kelajuan pengisian 0,7C .....	18
Gambar 4.4 Kurva hubungan <i>capacity loss</i> [A.h] dan <i>throughput capacity</i> [A.h] kelajuan pengisian 1C .....	18
Gambar 4.5 Kurva hubungan <i>capacity loss</i> [A.h] dan <i>throughput capacity</i> [A.h] kelajuan pengisian 2C .....	18
Gambar 4.6 Kurva hubungan <i>Capacity loss</i> [A.h] dan <i>C-Rate</i> [C] .....	19
Gambar 4.7 Kurva hubungan <i>Loss of capacity to lithium plating</i> [A.h] dan <i>C-Rate</i> [C] .....	19
Gambar 4.8 Kurva hubungan <i>degradation mode</i> [%] dan <i>throughput capacity</i> [A.h] kelajuan pengisian 0,3C .....	20
Gambar 4.9 Kurva hubungan <i>degradation mode</i> [%] dan <i>throughput capacity</i> [A.h] kelajuan pengisian 0,5C .....	20
Gambar 4.10 Kurva hubungan <i>degradation mode</i> [%] dan <i>throughput capacity</i> [A.h] kelajuan pengisian 0,7C.....	20
Gambar 4.11 Kurva hubungan <i>degradation mode</i> [%] dan <i>throughput capacity</i> [A.h] kelajuan pengisian 1C.....	20
Gambar 4.12 Kurva hubungan <i>degradation mode</i> [%] dan <i>throughput capacity</i> [A.h] kelajuan pengisian 2C.....	20
Gambar 4.13 Kurva hubungan <i>Degradation mode</i> [%] dan <i>C-Rate</i> [C].....	21

Gambar 4.14 Kurva hubungan <i>Loss of lithium inventory</i> [%] dan C-Rate [C].....	21
Gambar 4.15 Optimalisasi pengisian baterai .....	22
Gambar 4.16 Kurva hubungan <i>negative electrode porosity</i> dan <i>throughput capacity</i> [A.h] kelajuan pengisian 0,3C.....	22
Gambar 4.17 Kurva hubungan <i>negative electrode porosity</i> dan <i>throughput capacity</i> [A.h] kelajuan pengisian 0,5C.....	22
Gambar 4.18 Kurva hubungan <i>negative electrode porosity</i> dan <i>throughput capacity</i> [A.h] kelajuan pengisian 0,7C.....	23
Gambar 4.19 Kurva hubungan <i>negative electrode porosity</i> dan <i>throughput capacity</i> [A.h] kelajuan pengisian 1C.....	23
Gambar 4.20 Kurva hubungan <i>negative electrode porosity</i> dan <i>throughput capacity</i> [A.h] kelajuan pengisian 2C.....	23
Gambar 4.21 Kurva hubungan <i>Negative electrode porosity</i> dan C-Rate [C] .....	24

**DAFTAR TABEL**

Tabel 3.1 Spesifikasi struktur sel baterai LGM50 .....	16
Tabel 3.2 Parameter input .....	16
Tabel 4.1 Analisis hasil pengukuran <i>capacity loss</i> .....	18
Tabel 4.2 Analisis hasil pengukuran <i>mode degradation</i> .....	21
Tabel 4.3 Analisis hasil pengukuran <i>negative electrode porosity</i> .....	23



**DAFTAR LAMPIRAN**

Lampiran 1. 1 Kode Simulasi .....	42
Lampiran 1. 2 Data Simulasi Kelajuan Pengisian Pengosongan 0,3C.....	42
Lampiran 1. 3 Data Simulasi Kelajuan Pengisian Pengosongan 0,5C.....	42
Lampiran 1. 4 Data Simulasi Kelajuan Pengisian Pengosongan 0,7C.....	42
Lampiran 1. 5 Data Simulasi Kelajuan Pengisian Pengosongan 1C.....	42
Lampiran 1. 6 Data Simulasi Kelajuan Pengisian Pengosongan 2C.....	42
Lampiran 1. 7 Analisis Data <i>Capacity Loss</i> .....	42
Lampiran 1. 8 Analisis Data <i>Mode Degradation</i> .....	42
Lampiran 1. 9 Analisis Data <i>Negative Electrode Porosity</i> .....	42
Lampiran 1. 10 Ploting Hasil Simulasi.....	42
Lampiran 1. 11 Validasi Data.....	42

## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Indonesia mengimplementasikan kebijakan *Net Zero Emission* atau emisi nol bersih gas karbon melalui langkah pembangunan rendah karbon dengan transisi menuju ekonomi hijau. Berdasarkan Undang-Undang No. 71 Tahun 2021 dan Peraturan Presiden No. 98 Tahun 2021 menetapkan target penurunan emisi gas karbon mencapai 41% di tahun 2030 dengan dukungan pihak internasional sebagai bentuk komitmen Indonesia. Salah satu solusi efektif dalam mengurangi emisi gas karbon dari sektor transportasi dapat beralih menggunakan transportasi listrik. Hal ini dinilai tidak menghasilkan emisi langsung karena beroperasi sepenuhnya dengan listrik, dan menjadi aplikasi langsung dari perkembangan teknologi baterai. Baterai adalah perangkat yang menghasilkan listrik melalui reaksi kimia, digunakan sebagai sumber energi pada perangkat elektronik portabel seperti ponsel dan laptop (Fahrudin & Agus, 2022). Baterai juga digunakan sebagai penyimpan energi listrik pada sistem tenaga *hybrid* yang bersumber dari cahaya dan hembusan angin, serta pada sistem pembangkit listrik *circle* yang menggunakan tenaga baterai (Sepdian, 2020).

Baterai berfungsi sebagai perangkat yang dapat menyimpan energi listrik dan mengeluarkannya kembali ketika diperlukan. Sistem ini melibatkan siklus pengisian dan pengosongan baterai sekunder. Ketika baterai dikosongkan (*discharge*) terjadi reaksi kimia didalamnya yang mengakibatkan terjadi pergerakan elektron dari anoda ke katoda melalui kawat luar. Ketika baterai diisi ulang (*charge*) arus listrik dialirkan yang mengakibatkan terjadinya reaksi kimia yang berlawanan, sehingga elektron bergerak dari katoda ke anoda. Proses ini dapat terjadi berulang kali selama baterai masih memiliki kapasitas penyimpanan energi listrik yang cukup. Kapasitas setiap baterai bervariasi tergantung jenis baterai yang digunakan (Putra *et al.*, 2019).

Penyimpanan energi listrik menggunakan baterai telah diterapkan dalam berbagai sektor kehidupan. Jenis baterai yang umum digunakan yakni baterai *Alkaline*, baterai *Lithium ion* (Li-ion), baterai *Nickel Metal Hydride* (NiMH) dan

baterai *Valve Regulated Lead Acid* (VRLA). Jenis baterai yang menjadi pilihan utama dimanfaatkan dalam kehidupan adalah baterai *lithium ion* karena memiliki kapasitas penyimpanan energi yang besar dan dapat diisi ulang. Baterai ini memiliki stabilitas penyimpanan energi yang sangat baik dengan daya tahan mencapai 10 tahun atau lebih. Selain itu, baterai ini memiliki energi densitas tinggi, tidak mengalami efek memori, dan memiliki berat yang relatif lebih ringan jika dibandingkan dengan baterai lainnya (Perdana, 2021). Namun memiliki kelemahan yaitu rentan terhadap *overcharging* dan *over discharging*. Semakin sering baterai diisi ulang, nilai resistansi transfer muatannya akan meningkat karena adanya sisa zat yang menutupi pori-pori elektroda, yang kemudian menghalangi pergerakan ion-ion lithium dari elektroda baterai (Munadi *et al.*, 2022).

Salah satu jenis baterai lithium ion yaitu tipe LGM50. Baterai LGM50 merupakan baterai komersial berbentuk sel silinder 21700 dengan spesifik energi tinggi yang relevan dengan sistem penyimpanan energi portabel maupun industri kendaraan listrik. Sel baterai ini menggunakan elektroda negatif (anoda) berbahan grafit dan elektroda positif (katoda) berbahan  $\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,1}\text{Mn}_{0,1}\text{O}_2$  (NMC 811) serta memiliki kapasitas 5Ah dengan tinggi dan diameter baterai masing-masing adalah 70 mm dan 21 mm. Tegangan *cut-off* bawah dan atas masing-masing sebesar 2,5 V dan 4,2 V (Kirkaldy *et al.*, 2022). Setiap baterai mengalami proses degradasi yang mempengaruhi masa pakai dan kapasitasnya. Degradasi baterai *lithium ion* LGM50 berlangsung karena penurunan kapasitas penyimpanan energi. Faktor ini bisa timbul akibat perubahan struktur kristal katoda dan anoda selama siklus pengisian dan pengosongan ulang baterai, yang akhirnya mengurangi kemampuan baterai untuk menyimpan ion lithium (Mahendra & Supardi, 2021). Setiap siklus terdiri dari satu tahap pengosongan dan pengisian. Kecepatan pengisian dan pengosongan yang berlebihan menyebabkan peningkatan tekanan termal pada baterai, mengurangi jumlah siklus baterai yang dapat dicapai sebelum kapasitasnya mulai menurun secara signifikan. Jika faktor tersebut tidak dikendalikan, maka akan terjadi kerusakan baterai atau *failure system* yang mengakibatkan baterai memiliki waktu hidup pendek dan tidak dapat berfungsi sama sekali (Fei *et al.*, 2021). Selama pengisian dan pengosongan baterai, elektrolit dalam baterai lithium

ion dapat menyebabkan korosi dan reaksi kimia pada katoda. Hal ini dapat mengurangi kinerja dan umur pakai baterai (Satriady *et al.*, 2016).

Penelitian yang pernah terkait dengan degradasi *lithium ion* yaitu baterai komersial diisi berlebihan (*overcharging*) ketegangan berbeda (4,2V; 4,5V; 4,6V; 4,7V) siklus pengisian dan pengosongan 1000 kali dengan DOD 30% terjadi penurunan kapasitas sebagai bentuk hilangnya lithium aktif baterai (Zhang *et al.*, 2016). Sedangkan penelitian untuk bahan aktif katoda NCM diteliti oleh Zheng *et al.*, (2012) dengan mengontrol porositas katoda dari 50% menjadi 0% dengan tetap mempertahankan tingkat pembebanan elektroda, yang berarti ketebalannya semakin tipis dengan penurunan porositas, dan menemukan beberapa hubungan antara porositas dan kinerja elektrokimia. Chen *et al.*, (2010) dan Yu *et al.*, (2012) mencoba mengkorelasikan data eksperimental elektrokimia dengan hasil simulasi masing-masing dalam kondisi porositas dan ketebalan berbeda. Penelitian-penelitian tersebut disimpulkan bahwa pengembangan terhadap karakterisasi baterai lithium ion yang dispesifikkan karakternya masih perlu dilakukan pengembangan. Penelitian tentang simulasi degradasi dilakukan oleh O’Kane *et al.*, (2022) dengan mencari degradasi baterai menggunakan model DFN (*Doyle Fuller Newman*) menunjukkan adanya efek dari berbagai parameter degradasi yang berbeda pada hilangnya persediaan lithium pada baterai LGM50. Penurunan baterai ini dipengaruhi oleh pertumbuhan SEI (Luo *et al.*, 2023).

Penelitian ini dilakukan simulasi untuk mengevaluasi keefektifan penggunaan baterai lithium ion LGM50 menggunakan PyBaMM. Penelitian ini mengembangkan dari penelitian Guan *et al.*, (2018) yang mendaur ulang baterai pada laju (0,6C; 1,2C; 1,8C; 3C) dan terjadi pengendapan lithium pada anoda. Metode pengisian baterai yang digunakan adalah CCCV (*Constant Current-Constant Voltage*) memberikan arus konstan pada baterai sampai dicapai batas tegangan baterai dengan model pendekatan elektrokimia DFN. Penelitian ini mengeksplorasi degradasi baterai lithium ion dan strategi operasional yang dapat memperpanjang umur pakai baterai dalam aplikasi praktis. Hasilnya diharapkan berkontribusi pada pengembangan teknologi baterai yang lebih handal dan efisien, mendukung perkembangan teknologi masa depan yang lebih berkelanjutan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh variasi kelajuan pengisian CCCV terhadap fenomena *lithium plating* dan *loss lithium inventory* pada proses kerusakan baterai *lithium-ion*.

## 1.3 Batasan Penelitian

Batasan penelitian dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Model baterai yang digunakan adalah DFN.
2. Baterai lithium ion LGM50 dengan parameter set dari O’Kane 2020.
3. Metode siklus pengisian dan pengosongan baterai yakni CCCV dengan laju sebesar (0,3C; 0,5C; 0,7C; 1C; 2C).
4. Model pelapisan lithium yang digunakan adalah *reversible*.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi kelajuan pengisian CCCV terhadap fenomena *lithium plating* dan *loss lithium inventory* pada proses kerusakan baterai *lithium-ion*.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat diterapkan baik secara ilmiah maupun secara praktis. Adapun manfaat penelitian ini adalah membantu dalam mengembangkan strategi yang lebih efektif untuk mencegah atau mengurangi terjadinya *lithium plating* yang dapat menyebabkan degradasi dan kerusakan pada baterai. Faktor-faktor penyebab kerusakan baterai dianalisis sehingga dapat menjadi solusi peningkatan kinerja baterai dan pengembangan strategi pengisian yang lebih aman.

## BAB 2. TINJAUAN TEORI

### 2.1 Baterai Lithium Ion

Baterai adalah sebuah sel listrik yang mengalami proses elektrokimia yang dapat berbalik dengan efisiensi yang tinggi. Proses elektrokimia yang dapat berbalik ini terjadi ketika baterai mengubah energi kimia menjadi energi listrik (proses pengosongan) dan sebaliknya, ketika baterai mengubah energi listrik menjadi energi kimia (proses pengisian) dengan cara regenerasi dari elektroda-elektroda yang dipakai dengan melewati arus listrik dalam arah yang berlawanan di dalam sel (*storage battery*). Terdapat dua jenis baterai yaitu baterai primer dan sekunder. Baterai primer adalah baterai sekali pakai yang tidak bisa diisi ulang karena reaksi kimianya bersifat *irreversible* (tidak dapat dibalikkan), yang termasuk baterai primer yakni baterai *zinc-carbon* dan baterai alkalin. Sementara itu baterai sekunder adalah baterai isi ulang yang dapat digunakan berulang kali pada keadaan sumber listrik arus bolak-balik (AC), bagian dari baterai sekunder yakni baterai *Nickel Cadmium*, baterai *Nickel Metal Hydride*, baterai lithium ion (Nurchayo *et al.*, 2023). Baterai *Nickel Cadmium* (NiCd) dan *Nickel Metal Hydride* (NiMH) adalah beberapa perangkat penyimpanan energi paling awal yang diterapkan pada peralatan dan perangkat elektronik portabel (telepon, digital kamera dll). Baterai NiCd menunjukkan kapasitas yang besar saat terkena arus tinggi, namun menunjukkan efek memori yang menyebabkan penurunan masa pakai baterai secara signifikan karena baterai hanya dapat mengisi ulang hingga kapasitas sebelumnya dan juga mengkhawatirkan masalah toksisitas akibat komponennya. Baterai NiMH menunjukkan masa hidup yang lebih panjang dan ramah lingkungan karena tidak mengandung timbal, namun baterai ini menghadapi tantangan kebocoran karena dapat mengalami korosi pada elektroda negatif selama penyimpanan jangka panjang. Oleh karena itu, baterai *lithium ion* (LIB) dilakukan inovasi dengan prospek yang tinggi (Nzereogu *et al.*, 2022).

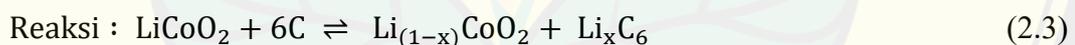
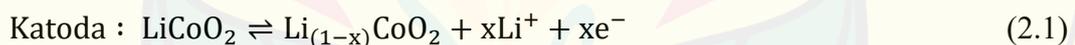
Baterai *lithium ion* merupakan baterai isi ulang yang menyimpan dan melepaskan energi melalui pergerakan ion lithium antara katoda dan anoda dengan polaritas pergerakan elektroda berlawanan. Pergerakan ini merujuk selama proses pengisian dan pengosongan baterai (Nurchahyo *et al.*, 2023). Baterai ini memiliki spesifikasi energinya tinggi, dapat menyimpan lebih banyak energi per unit berat dibandingkan dengan jenis baterai lain. Waktu hidup relatif baterai lithium ion mengacu pada siklus pengisian dan pengosongan baterai sebelum kapasitas baterai menurun menjadi 80% dari kapasitas awalnya, dan umumnya lebih lama dibandingkan dengan jenis baterai lainnya. Berat baterai *lithium ion* memiliki berat yang ringan sehingga jenis baterai ini menjadi banyak dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi kehidupan mulai dari perangkat elektronik hingga kendaraan listrik yang lebih ramah lingkungan (Antika & Hidayat, 2019).

Baterai *lithium ion* telah dikembangkan dalam beberapa jenis, salah satunya yakni baterai lithium ion LGM50 baterai komersial tipe 21700 (INR 21700-M50T, LG) dengan kapasitas nominal sebesar 5Ah dan tegangan nominal 3,63 V. Tegangan pemutus (*cut-off*) masing-masing sebesar 2,5 V dan 4,2 V. Suhu pengoperasian standar sebesar 0 – 50 °C dengan kelajuan arus pelepasan maksimum saat proses *cycle* yakni 1,5 C. Massa baterai 68,3 g memiliki tinggi dan diameter baterai masing-masing adalah 70 mm dan 21 mm. Komponen sel bahan baterai menggunakan elektroda negatif (anoda) grafit dan SiOy, sedangkan elektroda positif (katoda)  $\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,1}\text{MnO}_{0,1}$  (NMC) (Luo *et al.*, 2023). Sel bahan baterai LGM50 juga dikembangkan oleh (C.-H. Chen *et al.*, 2020) menyatakan bahwa katoda baterai  $\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,1}\text{Mn}_{0,1}\text{O}_2$  (NMC 811) dan anoda grafit  $\text{C}_6$ .

Komponen utama dalam sel baterai *lithium ion* terdiri dari elektroda. Elektroda positif (katoda) menerima ion lithium dari anoda saat baterai diisi dan melepaskannya saat baterai digunakan. Katoda bertanggung jawab untuk melepaskan ion lithium saat proses pengisian (*charge*) dan menerima saat proses pengosongan (*discharge*) (Marquis *et al.*, 2019). Katoda berperan penting untuk mendapatkan baterai dengan spesifikasi performa yang baik (Rachmanto *et al.*, 2020). Elektroda negatif (anoda) bertanggung jawab untuk menerima dan melepaskan ion lithium selama siklus pengisian dan pengosongan baterai. Anoda

pada baterai lithium ion terbuat dari grafit ( $C_6$ ) yang mampu menahan ion lithium dalam struktur kristalnya saat baterai diisi dan melepaskannya saat baterai digunakan. Material grafit anoda tidak mampu bekerja dalam kondisi daya tinggi dan dapat menghambat aliran difusi ion lithium (Trisakti *et al.*, 2022).

Baterai dapat menghasilkan energi listrik dengan mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik. Proses pengisian dan pengosongan pada baterai melibatkan elektron dan ion lithium antara elektroda positif dan elektroda negatif. Saat baterai diisi ulang (*charge*), ion lithium bergerak dari katoda ke anoda melalui elektrolit, sementara elektron bergerak melalui sirkuit eksternal. Saat baterai digunakan (*discharge*), ion lithium bergerak dari anoda ke katoda melalui elektrolit, sementara elektron bergerak melalui sirkuit eksternal untuk memberikan daya. Proses pengisian pada baterai isi ulang dapat dilakukan dengan mengalirkan arus secara terus menerus hingga pada baterai bertambah sampai nilai tertentu tanpa berlebihan karena pengisian yang berlebihan dapat merusak baterai. Oleh karena itu, dibutuhkan sistem pengisian baterai agar tidak berlebihan saat dilakukan pengisian (Otong & Khudari, 2021). Menurut Chen *et al.*, (2021) reaksi reduksi dan oksidasi yang terjadi di permukaan anoda dan katoda saat proses pengisian dan pengosongan untuk baterai LGM50 adalah sebagai berikut:



## 2.2 PyBaMM

PyBaMM (*Python Battery Mathematical Modelling*) merupakan alat simulasi model baterai yang mempercepat pemodelan baterai dengan menyediakan kerangka sumber terbuka atau paket untuk kolaborasi multi-institusi sehingga dapat dikembangkan dalam penelitian (Sulzer *et al.*, 2021). Perangkat lunak PyBaMM memberikan kemudahan pengguna dalam pemodelan baterai yang sangat fleksibel dan menggunakan bahasa pemrograman Python. Antarmuka PyBaMM menyediakan metode diskritisasi dan pemecahan numerik yang umum, sehingga pengguna dapat memilih metode yang paling sesuai untuk memodelkan baterai. Hal

ini memungkinkan dicapai optimasi desain baterai dan meningkatkan efisiensi dan daya tahan baterai. Pengguna dapat memperkirakan kapasitas baterai, resistansi internal, umur pakai baterai, dan memprediksi degradasi baterai selama penggunaan (Marquis *et al.*, 2019).

Setiap perangkat lunak memiliki kelebihan dan keterbatasan yang terus dilakukan pengembangan sehingga diperoleh pembaruan versi dan solusi peningkatan performa perangkat lunak tersebut. Kelebihan dan keterbatasan perangkat lunak PyBaMM menjadi salah satu bahan pertimbangan untuk digunakan simulasi dalam penelitian baterai. Berliner *et al.*, (2021) telah melakukan penelitian dengan membandingkan perangkat lunak *open source* untuk simulasi baterai lithium berbasis teori elektroda berpori skala milisekon. PyBaMM menjadi salah satu perangkat lunak yang digunakan, didapatkan beberapa karakteristik keunggulan PyBaMM yang menawarkan opsi untuk penelitian baterai diantaranya beberapa geometri, PET dan model partikel tunggal (SPM), diskritisasi FVM dan FEM, dan beberapa pemecah ODE dan DAE. PyBaMM menggunakan kode bahasa *Python* yang digolongkan dalam model berkinerja tinggi sehingga seringkali mengharuskan fungsi tersebut dikonversi ke bahasa tingkat rendah yang lebih cepat seperti C++, hal ini menghambat modifikasi kode dan proses debug.

Pengembangan perangkat lunak PyBaMM masih belum tergolong sepenuhnya matang, sehingga masih terdapat beberapa *bug* dan masalah yang perlu diperbaiki. PyBaMM memerlukan pengetahuan yang cukup tentang pemodelan baterai dan bahasa pemrograman *Python*, sehingga tidak cocok untuk penggunaan yang tidak memiliki latar belakang atau pemahaman dasar teknis yang kuat. Hasil simulasi PyBaMM perlu dilakukan validasi dengan data eksperimental agar sepenuhnya terintegrasi dengan perangkat keras baterai.

### 2.3 Pemodelan Baterai Lithium Ion

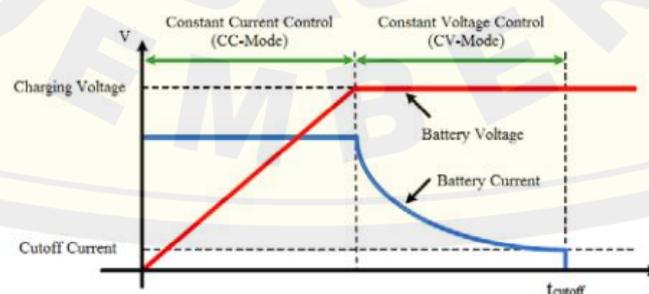
PyBaMM menggunakan model matematika untuk memodelkan baterai *lithium ion*. PyBaMM menyediakan beberapa jenis model elektrokimia baterai, namun yang umum digunakan yaitu model DFN (*Doyle Fuller Newman*) dan model SPM (*Single Particle Model*). Model SPM menggambarkan baterai sebagai sistem satu

partikel, yaitu partikel elektroda yang terdiri dari partikel aktif dan partikel pengikat. Sistem satu partikel ini mengasumsikan semua partikel elektrokimia pada elektrolit berperilaku sama dalam sel baterai. Model SPM memperhitungkan pergerakan ion lithium dan elektron dalam partikel elektroda, serta reaksi kimia yang terjadi diantara partikel aktif dan elektrolit. Model SPM mengabaikan fenomena internal yang kompleks di dalam baterai (Marquis *et al.*, 2019).

Model DFN (*Doyle Fuller Newman*) memiliki kelebihan dalam memodelkan baterai dengan detail yang tinggi dibandingkan dengan SPM, sehingga dapat memberikan hasil simulasi yang akurat. DFN memperhitungkan efek difusi dan konveksi pada pergerakan ion lithium dan elektron di dalam baterai. Kompleksitas model elektrokimia DFN dalam simulasi membutuhkan data yang sangat detail dan struktur dimensi model yang tidak sederhana (Marquis *et al.*, 2019).

#### 2.4 Constant Current Constant Voltage (CCCV)

Pengisian daya konvensional *Constant Current-Constant Voltage* (CC-CV) adalah salah satu metode pengisian baterai yang paling populer karena kesederhanaan dan efektivitasnya. Metode ini terdiri dari dua jenis operasi yang berbeda. Selama pengisian mode CC, arus konstan dialirkan ke baterai secara terus menerus hingga tegangan terminal baterai mencapai tegangan pemutusan maksimum tertentu biasanya 4,2V untuk baterai Li-Ion. Selama pengisian mode CV, tegangan pemutusan dipertahankan pada baterai dan arus mulai berkurang seiring dengan berkurangnya perbedaan tegangan antara tegangan terminal. Ketika arus mencapai nilai tertentu (biasanya 0,02C), pengisian daya dihentikan dan baterai dianggap terisi penuh (Khan & Choi, 2018).



Gambar 2.1 Grafik Kontrol CCCV pada pengisian baterai lithium (Sumber: Jadav, 2015)

## 2.5 *Lithium Plating* (Pelapisan Lithium)

Proses pelapisan lithium pada elektroda negatif grafit pada baterai LGM50 adalah salah satu reaksi samping yang dapat terjadi dalam baterai *lithium ion*. Reaksi ini terjadi ketika ion lithium ( $\text{Li}^+$ ) dari elektrolit bereaksi dengan permukaan grafit dan membentuk lapisan logam lithium (Li) pada permukaan tersebut, bukan karena disisipkan ke dalam struktur grafit yang lebih dalam. Penyumbatan pori-pori dapat mengurangi akses ion litium ke permukaan grafit, sehingga lapisan litium lebih cenderung terbentuk pada permukaan daripada disisipkan ke dalam struktur grafit. Reaksi pelapisan litium berdampak negatif pada kinerja baterai. Pelapisan litium yang berlebihan dapat menyebabkan penurunan kapasitas baterai, peningkatan resistansi internal, dan bahkan dapat menyebabkan dendrit litium yang berpotensi menyebabkan korsleting dan bahaya keamanan (O’Kane *et al.*, 2022).

Kapasitas baterai lithium ion dapat mengalami pemudaran seiring dengan penggunaan yang berulang. Pemudaran kapasitas ini dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk suhu operasi baterai. Suhu operasi yang terlalu rendah dapat mempercepat pengendapan Li dan mempercepat pemudaran kapasitas, sementara suhu operasi yang terlalu tinggi dapat mempercepat laju reaksi dan mempercepat pemudaran kapasitas. Pengembangan baterai lithium-ion, penelitian terus dilakukan untuk meningkatkan umur pakai baterai dan mengurangi pemudaran kapasitas. Salah satu cara yang dilakukan adalah dengan mengembangkan pelapisan Li yang dapat mengurangi pengendapan Li dan memperpanjang umur pakai baterai. Selain itu, penggunaan material elektroda yang lebih stabil pada suhu yang lebih tinggi juga dapat membantu mengurangi pemudaran kapasitas baterai (Waldmann *et al.*, 2018).

Pelapisan *lithium* menjadi salah satu faktor penyebab pembengkakan anoda, pembentukan lapisan *lithium* yang tidak diinginkan pada permukaan anoda terbentuk ketika elektrolit *lithium ion* terdekomposisi selama pengisian baterai dan *lithium* metal terendap di permukaan anoda. Pembengkakan anoda ini berdampak negatif pada kinerja dan umur pakai baterai. Pembengkakan anoda yang dapat diatasi kembali (*reversible*) secara konsisten dipengaruhi oleh porositas anoda yang tidak berubah selama pengisian ulang baterai. Pembengkakan yang tidak dapat

diatasi kembali (*irreversible*) dapat menyebabkan kerusakan struktural pada anoda dan mengurangi kapasitas baterai secara permanen (Sauerteig *et al.*, 2017).

## 2.6 Pengaruh Kecepatan Pengisian dan Pengosongan Terhadap Kinerja Baterai

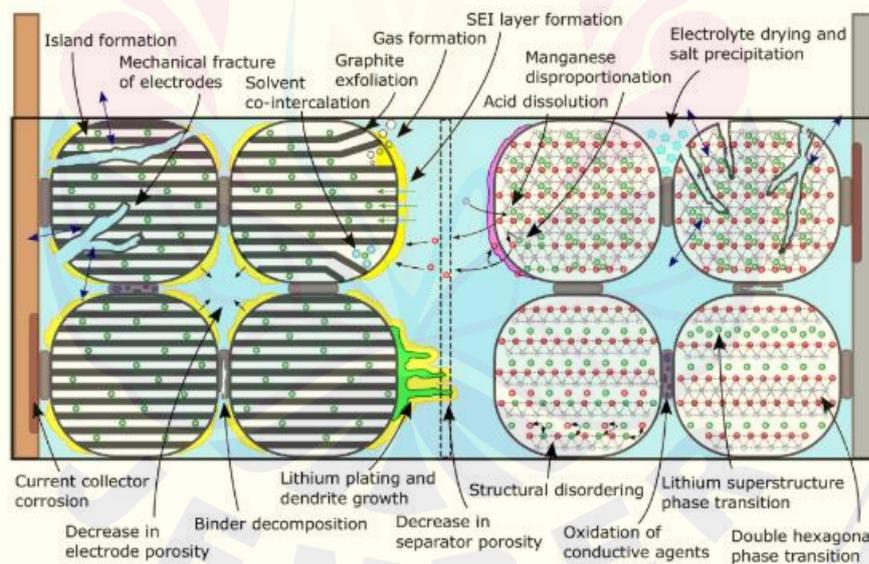
Pelapisan Li dipengaruhi oleh sifat fisikokimia bahan anoda aktif yang dapat mempengaruhi laju pengisian dan potensial anoda pada saat pengisian baterai. Pada laju pengisian konstan, perubahan potensial anoda terhadap suhu bergantung pada bahan anoda aktif. Polarisasi anodik sebagai fungsi suhu lebih curam untuk grafit dibandingkan karbon amorf. Grafit dan karbon amorf adalah dua jenis bahan aktif anoda yang biasa digunakan pada baterai *lithium-ion*. Grafit mempunyai struktur kristal teratur, terdiri dari lapisan-lapisan karbon yang dipisahkan oleh jarak yang relatif jauh. Sebaliknya, karbon amorf tidak memiliki struktur kristal biasa dan terdiri dari karbon yang lebih tersebar. Karena perbedaan struktural ini, grafit dan karbon amorf memiliki sifat fisikokimia yang berbeda, yang mempengaruhi laju pengisian dan potensi anoda saat mengisi daya baterai. Polarisasi anodik adalah fenomena dimana potensial anoda menjadi lebih positif selama pengisian baterai. Hal ini disebabkan oleh hambatan internal baterai, yang menyebabkan hilangnya energi selama pengisian. Polarisasi anodik dapat diukur dengan mengamati perbedaan potensial antara elektroda dan elektrolit saat mengisi baterai. Grafit memiliki polarisasi anodik yang lebih kuat dibandingkan karbon amorf. Hal ini karena struktur kristal grafit yang lebih teratur mempersulit elektron ion litium melewati lapisan karbon. Sebaliknya, karbon amorf memiliki struktur yang lebih tidak teratur, sehingga memudahkan elektron ion litium menemukan ruang (Waldmann *et al.*, 2018).

## 2.7 Degradasi Baterai Lithium Ion

Dampak degradasi yang dapat dirasakan secara instan yakni terjadi penurunan kapasitas dan penurunan daya. Mekanisme degradasi baterai lithium ion sangat dipengaruhi oleh *State of Charge* (SoC) atau status pengisian baterai, suhu baterai, dan *load profile* (pola penggambaran tentang penggunaan baterai yang mencakup

informasi waktu puncak, durasi, dan konsumsi listrik) (Edge *et al.*, 2021). Tingkat degradasi tergantung pada berbagai kondisi penyimpanan dan pengoperasian baterai seperti tegangan dan tekanan (Merla *et al.*, 2016).

SoC adalah persentase kapasitas baterai yang tersisa pada suatu waktu tertentu. Pengoperasian SoC yang lebih tinggi pada baterai dapat mempercepat degradasi baterai karena adanya hubungan antara potensial elektroda dan laju reaksi samping parasit yang terjadi pada baterai. Semakin tinggi SoC semakin tinggi potensial elektroda yang dapat mempercepat degradasi baterai (Waldmann *et al.*, 2014). Pengaruh SoC yang tinggi dapat memperburuk mekanisme degradasi baterai lithium ion dalam hal pelapisan lithium dan pertumbuhan SEI (*Solid Electrolyte Interphase*). Pelapisan lithium terjadi saat lithium terendapkan pada permukaan elektroda, menyebabkan terjadi pengurangan kapasitas baterai dan memperpendek umur baterai. Pertumbuhan SEI terjadi ketika lapisan SEI yang terbentuk pada permukaan elektroda semakin tebal dapat mengurangi konduktivitas ionik dan memperpendek umur baterai (Edge *et al.*, 2021).



Gambar 2.2 Skema mekanisme degradasi dalam baterai lithium ion. Elektroda karbon negatif grafit di sebelah kiri. Struktur oksida logam litium di sebelah kanan (struktur spinel atas; struktur berlapis bawah). Lapisan jaring pemisah di tengah. Warna hijau untuk litium. Warna merah untuk logam. Warna biru untuk elektrolit (Sumber: Merla *et al.*, 2016)

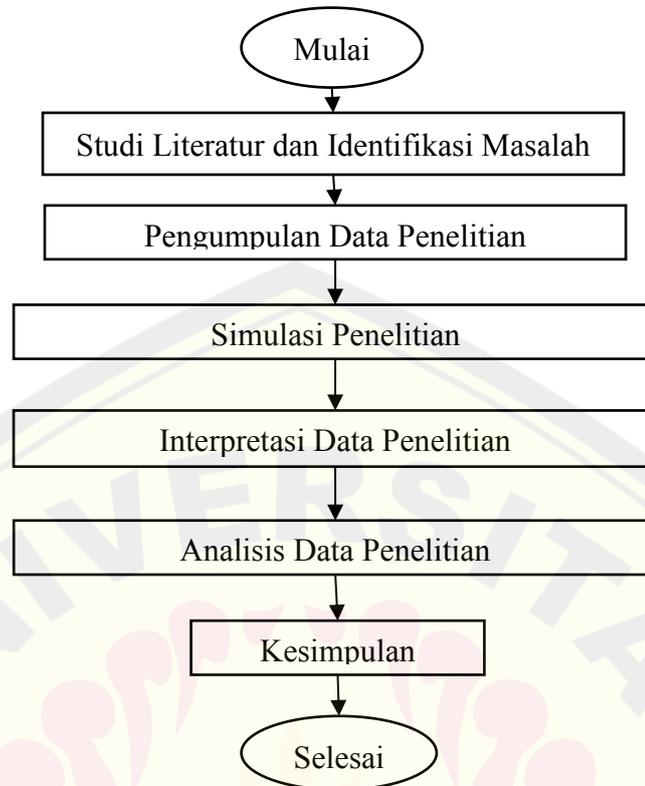
### BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Populasi dan Sampel/Subyek Penelitian

Populasi penelitian yang relevan untuk digunakan adalah baterai *lithium-ion* LGM50. Sampel yang digunakan penelitian tergantung pada data yang dipilih untuk disimulasikan menggunakan PyBaMM. Penggunaan PyBaMM akan mengoptimalkan umur pakai baterai dengan memodelkan degradasi dan menganalisis performa baterai. Pengujian umur pakai baterai didasarkan pada data pengujian laju pengisian dan pengosongan baterai yang dinyatakan dalam bentuk *Crate* relatif terhadap kapasitas nominal baterai. Variasi tingkat kelajuan tersebut mencakup 0,3C; 0,5C; 0,7C; 1C; 2C. Kelajuan pengisian dan pengosongan baterai adalah parameter yang menentukan seberapa cepat baterai dapat diisi dan dikosongkan. Data juga didapatkan dari pengujian pelapisan lithium dengan pemodelan *reversible*. Analisis dilakukan pada pendugaan degradasi baterai yang dipengaruhi oleh kelajuan pengisian dan pengosongan baterai, dan ketebalan sel katoda baterai.

#### 3.2 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode penelitian komputasi dengan bentuk yang sistematis bertujuan untuk mencari pengaruh variabel satu dengan variabel yang lain dengan memberikan perlakuan khusus dan pengendalian yang ketat dalam suatu kondisi. Desain penelitian menjadi rancangan dalam pelaksanaan penelitian sehingga poin-poin yang dirancang mendapatkan hasil sesuai dengan topik penelitian. Desain penelitian yang mengkaji metode pengisian CCCV terhadap *lithium plating* dan *loss lithium inventory* dalam proses kerusakan baterai *lithium ion* adalah sebagai berikut:

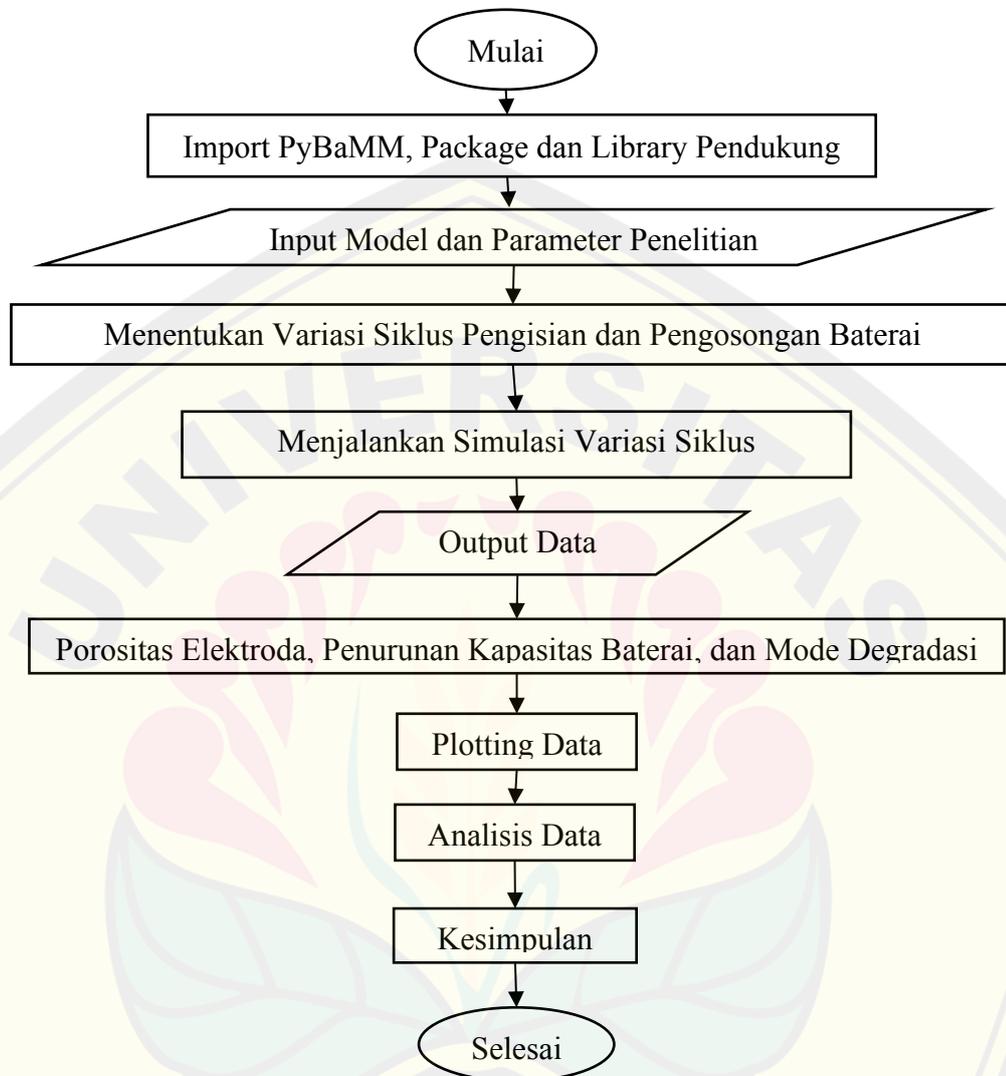


Gambar 3.1 Desain Penelitian

### 3.3 Prosedur Penelitian

Penelitian dijalankan menggunakan aplikasi *Jupyter Notebook*. Bahasa pemrograman yang diterapkan yakni *Python* dengan *Library* pendukung *Numpy*, *Matplotlib* dan *Pandas*. Model elektrokimia yang diterapkan adalah DFN. Parameter set OKane 2020 diinputkan sebagai nilai parameter *default*. Parameter relevan ini telah memuat data-data lengkap terkait baterai lithium ion LGM50 selanjutnya diinputkan jenis *lithium plating* dan variasi siklus pengisian dan pengosongan baterai dengan tahap/protokol pengosongan baterai, stabilisasi baterai, dan pengisian baterai yang dilakukan sebanyak 100 siklus dengan menerapkan variasi siklus pengisian dan pengosongan baterai dengan laju 0,3C; 0,5C; 0,7C; 1C; 2C. Selanjutnya penurunan kapasitas baterai diplot dengan berbagai metrik. Berdasarkan hasil analisis data ditarik kesimpulan mengenai performa dan pengoptimalan umur pakai sel baterai lithium ion LGM50. Prosedur

penelitian secara sistematis disajikan dalam diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

#### 3.4 Pengumpulan Data Penelitian

Data sekunder penelitian ini didapatkan dari hasil uji eksperimen (C.-H. Chen et al., 2020) yang memuat informasi terkait data baterai lithium ion LGM50. Spesifikasi struktur sel baterai disajikan pada Tabel 3.1. Parameter input yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.1 Spesifikasi struktur sel baterai LGM50

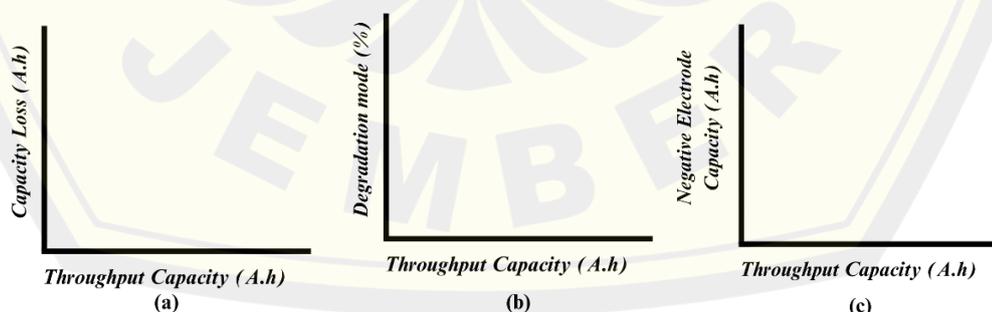
Parameter sel baterai	Anoda	Katoda	Separator
Material	Graphite	LiNi <sub>0,8</sub> Mn <sub>0,1</sub> Co <sub>0,1</sub> O <sub>2</sub>	Ceramic coated polypropylene
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1657	2341	397
Thickness (μm)	85,2	75,6	12
Porosity (%)	25	33	47
Collector thickness (μm)	12	16	0.4
Collector density (kg/m <sup>3</sup> )	8960	2760	
Particle size (radius) (μm)	5,86	5.22	
Height (mm)		70	
Diameter (mm)		21	

Tabel 3.2 Parameter input

Parameter	Nilai
Model	DFN
Parameter set	OKane2020
Lithium plating	Reversible
Charge (C)	0,3; 0,5; 0,7; 1; 2
Discharge (C)	0,3; 0,5; 0,7; 1; 2

### 3.5 Metode Analisis

Teknik analisis data penelitian ini dengan pendekatan analisis kuantitatif deskriptif pada degradasi baterai *lithium ion* LGM50. Berdasarkan penelitian akan diperoleh hasil berupa grafik hubungan kerugian kapasitas dan kapasitas total baterai, grafik hubungan mode degradasi dengan kapasitas total baterai, dan grafik hubungan porositas elektroda negatif dengan kapasitas total baterai seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3. Kapasitas difokuskan dalam analisis degradasi yang ditunjukkan dengan kapasitas mengalami penurunan seiring dengan perubahan kelajuan pengisian dan pengosongan. Berikut grafik yang ditampilkan hasil simulasi.



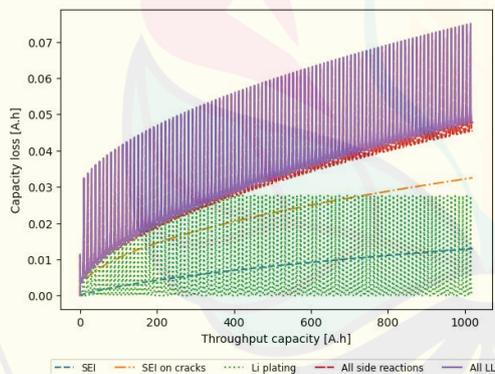
Gambar 3.3 Grafik analisis kerusakan baterai. (a) Grafik hubungan kerugian kapasitas dan kapasitas total baterai. (b) Grafik hubungan mode degradasi dengan kapasitas total baterai. (c) Grafik hubungan porositas elektroda negatif dengan kapasitas total baterai

## BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

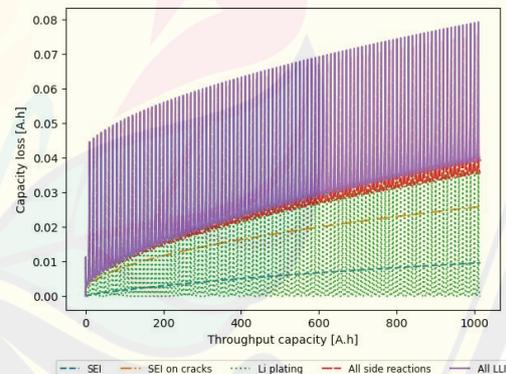
Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis degradasi baterai *lithium ion* dan pengaruh variasi metode pengisian CCCV terhadap fenomena *lithium plating* dan *loss lithium inventory* pada proses kerusakan baterai *lithium-ion*. Data yang digunakan merupakan data komputasi baterai lithium ion hasil penelitian O’Kane *et al.*, (2020) dengan jenis baterai LGM50. Data hasil simulasi dilakukan analisis hingga didapatkan keluaran berupa grafik hubungan variasi kelajuan pengisian [C] dengan *capacity loss* [A.h], *mode degradasi* [%], dan *negative electrode capacity*.

### 4.1 Hasil

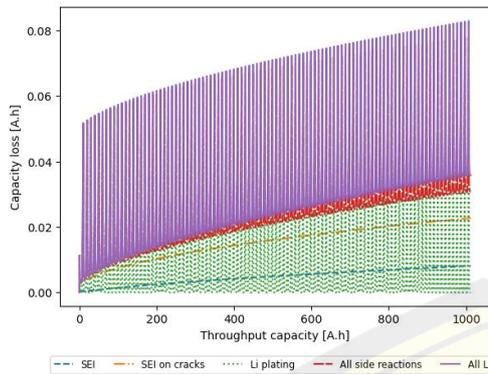
Hasil dari penelitian ini merupakan grafik hasil simulasi yang memuat hubungan degradasi baterai *lithium ion* dengan kelajuan pengisian [C]. Gambar 4.1, Gambar 4.2, Gambar 4.3, Gambar 4.4, dan Gambar 4.5 menunjukkan grafik hubungan *capacity loss* [A.h] dengan *throughput capacity* [A.h] dengan variasi kelajuan pengisian baterai *lithium ion*.



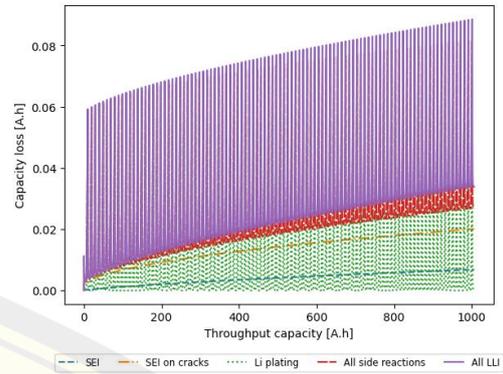
Gambar 4.1 Kurva hubungan *capacity loss* [A.h] dan *throughput capacity* [A.h] kelajuan pengisian 0,3C



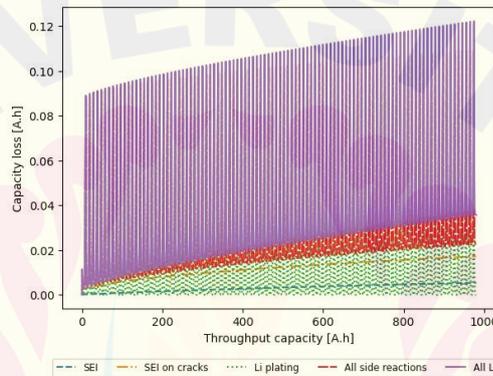
Gambar 4.2 Kurva hubungan *capacity loss* [A.h] dan *throughput capacity* [A.h] kelajuan pengisian 0,5C



Gambar 4.3 Kurva hubungan *capacity loss* [A.h] dan *throughput capacity* [A.h] kelajuan pengisian 0,7C



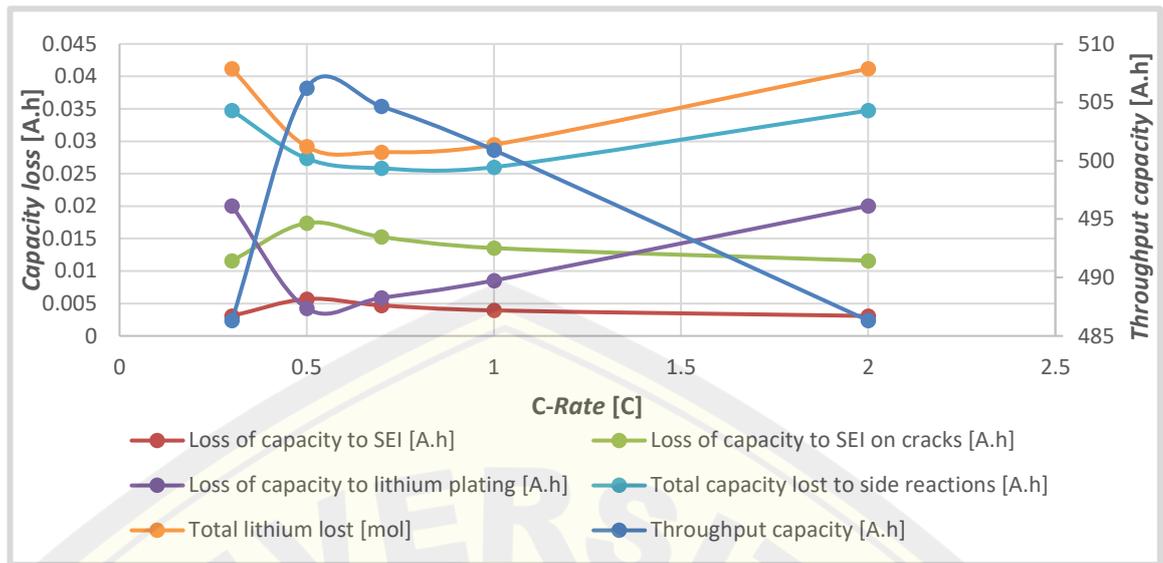
Gambar 4.4 Kurva hubungan *capacity loss* [A.h] dan *throughput capacity* [A.h] kelajuan pengisian 1C



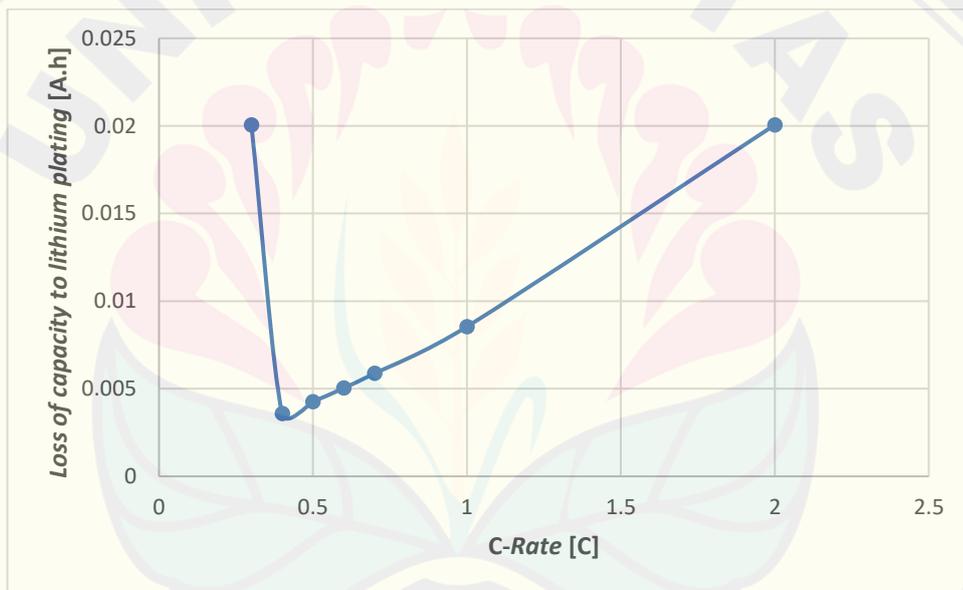
Gambar 4.5 Kurva hubungan *capacity loss* [A.h] dan *throughput capacity* [A.h] kelajuan pengisian 2C

Tabel 4.1 Analisis hasil pengukuran *capacity loss*

<i>C-Rate</i>	<i>Average</i>					
	<i>Throughput capacity [A.h]</i>	<i>Loss of capacity to SEI [A.h]</i>	<i>Loss of capacity to SEI on cracks [A.h]</i>	<i>Loss of capacity to lithium plating [A.h]</i>	<i>Total capacity lost to side reactions [A.h]</i>	<i>Total lithium lost [mol]</i>
<b>0.3</b>	486.3160974	0.003080666	0.011592452	0.020059884	0.034733002	0.04118182
<b>0.5</b>	506.2294053	0.005688375	0.017398469	0.004262542	0.027349386	0.029180043
<b>0.7</b>	504.6492713	0.004701762	0.015259488	0.005871704	0.025832954	0.028330145
<b>1</b>	500.9178898	0.0039305	0.013541441	0.008542607	0.026014548	0.029464874
<b>2</b>	486.3161069	0.003080666	0.011592452	0.020059883	0.034733001	0.041181819

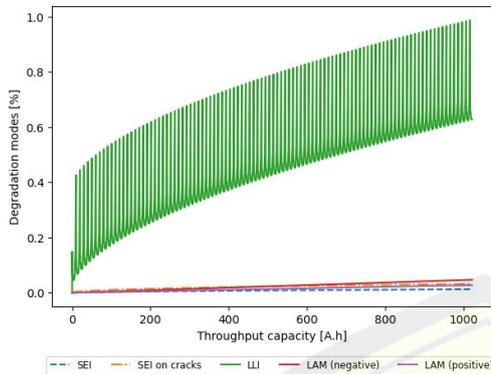


Gambar 4.6 Kurva hubungan *Capacity loss* [A.h] dan *C-Rate* [C]

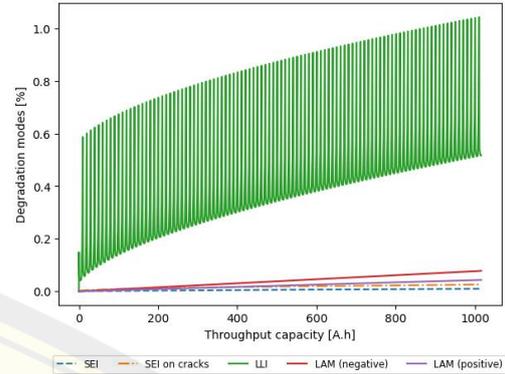


Gambar 4.7 Kurva hubungan *Loss of capacity to lithium plating* [A.h] dan *C-Rate* [C]

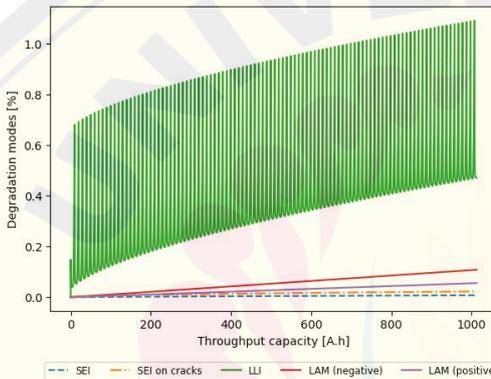
Gambar 4.8, Gambar 4.9, Gambar 4.10, Gambar 4.11, dan Gambar 4.11 menunjukkan grafik hubungan *degradation mode* [%] dengan *throughput capacity* [A.h] dengan variasi kelajuan pengisian baterai lithium ion.



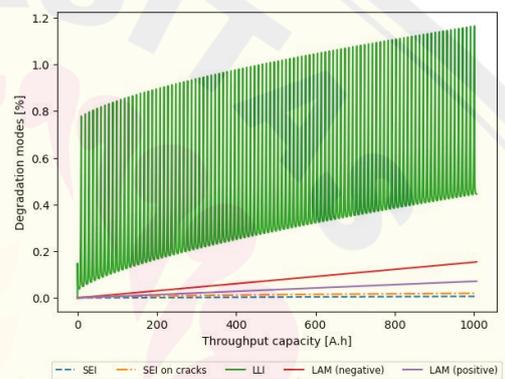
Gambar 4.8 Kurva hubungan *degradation mode* [%] dan *throughput capacity* [A.h] kelajuan pengisian 0,3C



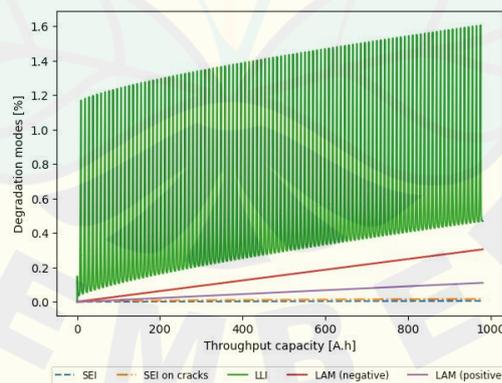
Gambar 4.9 Kurva hubungan *degradation mode* [%] dan *throughput capacity* [A.h] kelajuan pengisian 0,5C



Gambar 4.10 Kurva hubungan *degradation mode* [%] dan *throughput capacity* [A.h] kelajuan pengisian 0,7C



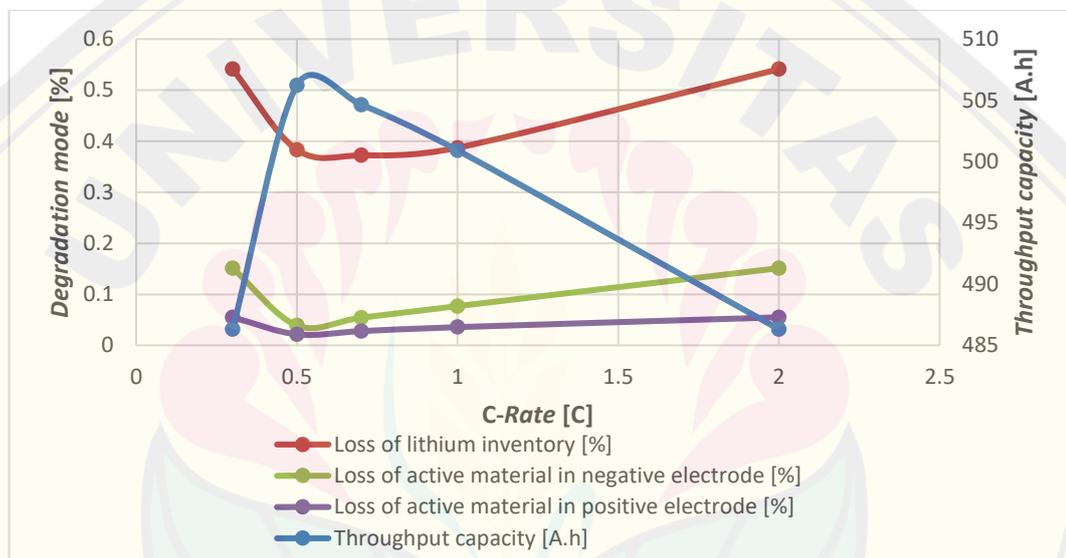
Gambar 4.11 Kurva hubungan *degradation mode* [%] dan *throughput capacity* [A.h] kelajuan pengisian 1C



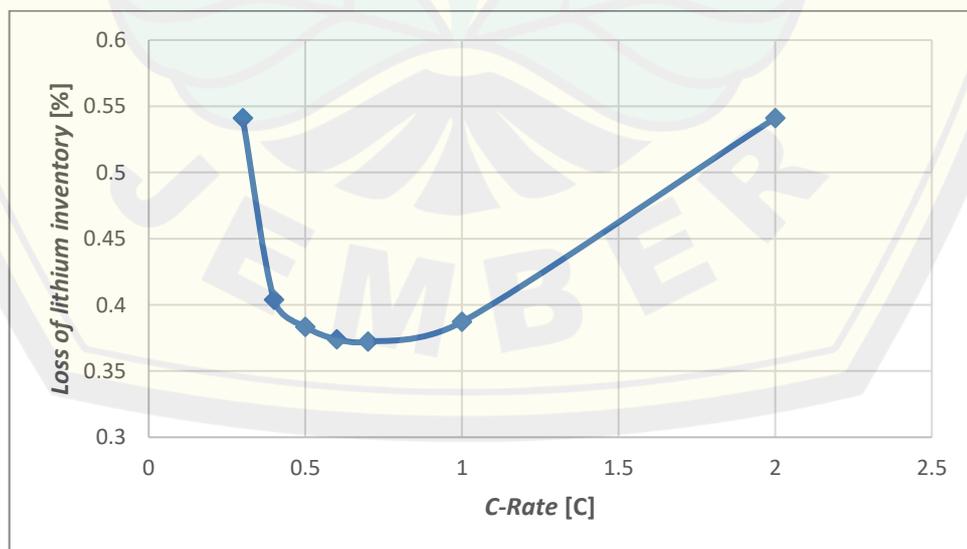
Gambar 4.12 Kurva hubungan *degradation mode* [%] dan *throughput capacity* [A.h] kelajuan pengisian 2C

Tabel 4.2 Analisis hasil pengukuran *mode degradation*

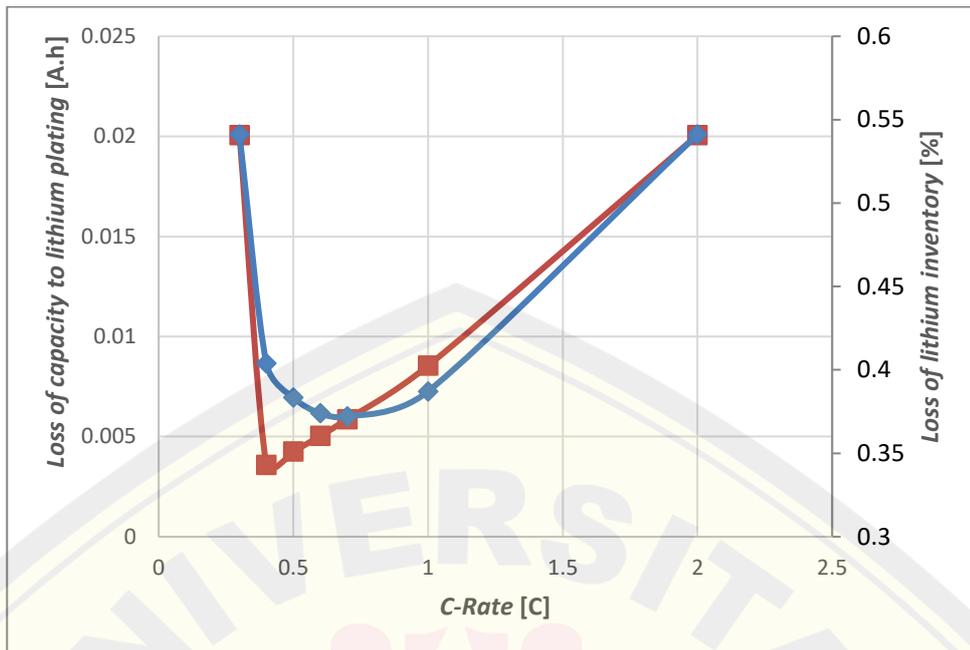
<i>C-Rate</i>	<i>Average</i>			
	<i>Throughput capacity [A.h]</i>	<i>Loss of lithium inventory [%]</i>	<i>Loss of active material in negative electrode [%]</i>	<i>Loss of active material in positive electrode [%]</i>
<b>0.3</b>	486.3160974	0.541103564	0.151167654	0.054860432
<b>0.5</b>	506.2294053	0.38340766	0.038826415	0.02157284
<b>0.7</b>	504.6492713	0.372240533	0.054115251	0.027792515
<b>1</b>	500.9178898	0.387150167	0.076791526	0.035633939
<b>2</b>	486.3160974	0.541103564	0.151167654	0.054860432



Gambar 4.13 Kurva hubungan *Degradation mode [%]* dan *C-Rate [C]*

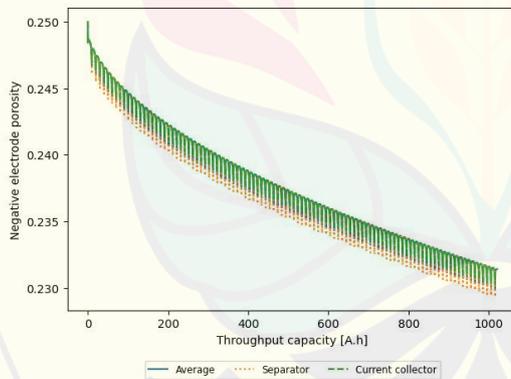


Gambar 4.14 Kurva hubungan *Loss of lithium inventory [%]* dan *C-Rate [C]*

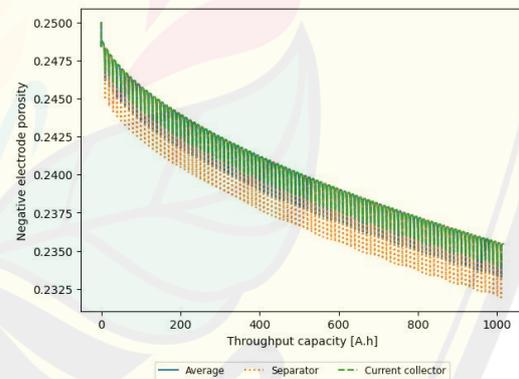


Gambar 4.15 Optimalisasi pengisian baterai

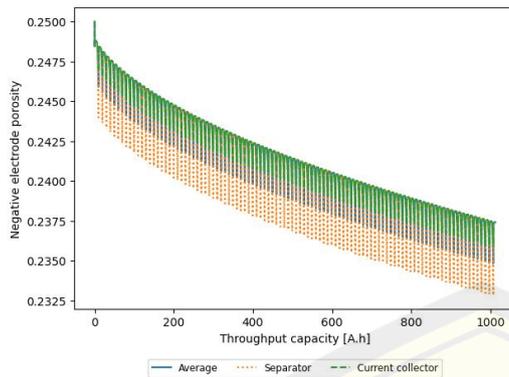
Gambar 4.16, Gambar 4.17, Gambar 4.18, Gambar 4.19, dan Gambar 4.20 menunjukkan grafik hubungan *negative electrode porosity* dengan *throughput capacity* [A.h] dengan variasi kelajuan pengisian baterai *lithium ion*.



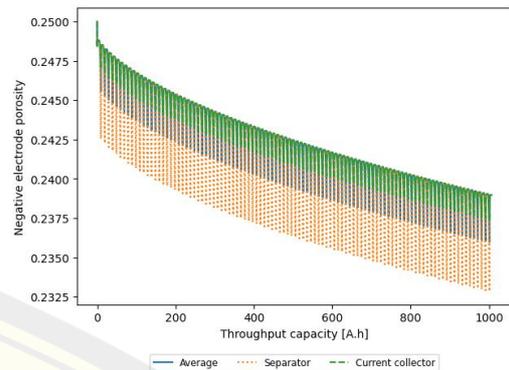
Gambar 4.16 Kurva hubungan *negative electrode porosity* dan *throughput capacity* [A.h] kelajuan pengisian 0,3C



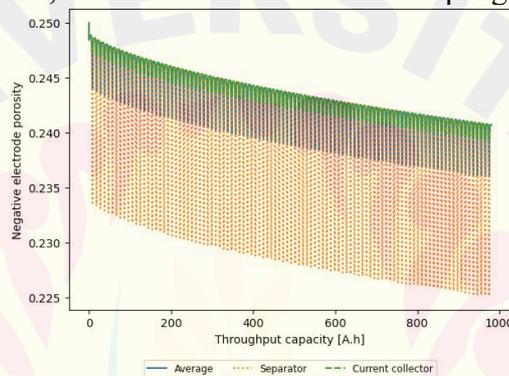
Gambar 4.17 Kurva hubungan *negative electrode porosity* dan *throughput capacity* [A.h] kelajuan pengisian 0,5C



Gambar 4.18 Kurva hubungan *negative electrode porosity* dan *throughput capacity* [A.h] kelajuan pengisian 0,7C



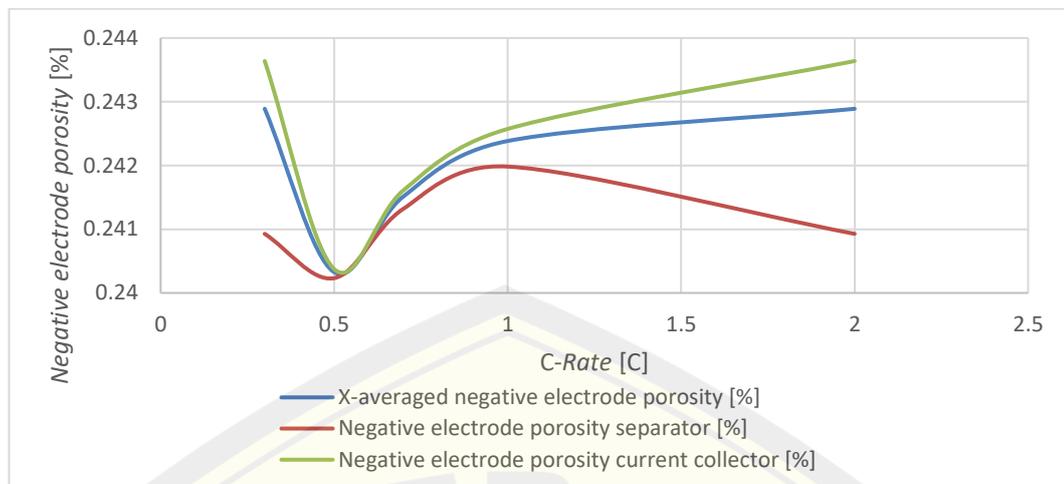
Gambar 4.19 Kurva hubungan *negative electrode porosity* dan *throughput capacity* [A.h] kelajuan pengisian 1C



Gambar 4.20 Kurva hubungan *negative electrode porosity* dan *throughput capacity* [A.h] kelajuan pengisian 2C

Tabel 4.3 Analisis hasil pengukuran *negative electrode porosity*

<i>C-Rate</i>	<i>Average</i>		
	<i>X-averaged negative electrode porosity</i> [%]	<i>Negative electrode porosity separator</i> [%]	<i>Negative electrode porosity current collector</i> [%]
0.3	0.24288949	0.240927354	0.243638976
0.5	0.240326694	0.240232036	0.240375559
0.7	0.241514769	0.241322274	0.241611223
1	0.242383901	0.24198338	0.242573302
2	0.24288949	0.240927354	0.243638976



Gambar 4.21 Kurva hubungan *Negative electrode porosity* dan *C-Rate* [C]

## 4.2 Pembahasan

Penelitian dilakukan simulasi baterai *lithium ion* LGM50 menggunakan PyBaMM. Pengisian dan pengosongan baterai menggunakan metode CCCV (*Constant Current Constant Voltage*) selama 100 siklus. Laju pengisian divariasikan berturut-turut pada 1,5 C/2; 2,5 C/s; 3,5 C/s; 5 C/s; 10 C/s atau dalam *C-rate* 0,3C; 0,5C; 0,7C; 1C; 2C. *C-rate* diperoleh dari perbandingan antara arus pengisian dan pengosongan baterai dengan kapasitas nominal baterai. *C-rate* menggambarkan laju pengisian dan pengosongan baterai sebagai pecahan kapasitas nominal baterai. Kapasitas nominal dari baterai *lithium ion* LGM50T sebesar 5 A.h (Luo *et al.*, 2023). Pada setiap *C-rate* baterai mengalami dua tahap, yaitu fase pengosongan dengan arus konstan dan fase pengisian dengan arus konstan hingga mencapai tegangan tertentu. Setelah mencapai tegangan tersebut, tegangan akan dipertahankan konstan sementara arus perlahan dikurangi hingga baterai terisi penuh, biasanya hingga arus mendekati 0 A. Selama tahap pengosongan, tegangan baterai akan menurun karena penggunaan energi, sedangkan selama tahap pengisian, tegangan akan meningkat karena baterai menerima energi. Pengisian dan pengosongan baterai menggunakan metode CCCV dapat memberikan informasi degradasi yang terjadi pada baterai *lithium ion*.

Hasil simulasi penelitian didapatkan keluaran data-data yang memuat faktor-faktor dalam degradasi baterai *lithium ion*. Data keluaran tersebut dianalisis

sehingga diperoleh data yang disajikan pada Tabel 4.1, Tabel 4.2, dan Tabel 4.3. Tabel tersebut selanjutnya disajikan dalam kurva yang memuat *capacity loss*, *mode degradation* dan *negative electrode porosity* berhubungan dengan kelajuan pengisian yang bervariasi. Pengaruh variasi kelajuan pengisian dianalisis sehingga dapat ditarik garis besar faktor kerusakan baterai lithium ion yang disebabkan oleh *lost lithium inventory* dan *lithium plating*. *Capacity loss* dan *mode degradasi* memiliki beberapa faktor yang memengaruhi, diantaranya *loss of capacity to SEI*, *loss of capacity to lithium plating*, *lithium loss*, *loss of capacity to SEI on cracks*, *loss of lithium inventory*, *loss of active material in positive electrode*, *loss of active material in negative electrode*.

Kapasitas baterai lithium ion yang dapat digunakan ditentukan oleh jumlah ion lithium yang dapat ditransfer secara *reversible* antara katoda dan anoda (kandungan lithium aktif) (Holtstiege *et al.*, 2017). *Capacity loss* atau kehilangan kapasitas merujuk pada penurunan kapasitas penyimpanan energi yang dapat diakomodasi oleh baterai dari kapasitas aslinya. Ukuran dari banyaknya energi yang dapat disimpan oleh baterai diukur dalam satuan *ampere hour* (A.h). Baterai *lithium ion* akan mengalami penurunan kapasitas seiring waktu penggunaan dan faktor-faktor lingkungan. *Capacity loss* dapat diukur dalam persentase penurunan kapasitas dari kapasitas awal baterai. Siklus pengisian dan pengosongan dapat memengaruhi seberapa cepat atau lambat *capacity loss* terjadi pada baterai. Kelajuan pengisian dan pengosongan baterai dapat memiliki pengaruh signifikan terhadap penurunan kapasitas baterai, terutama pada teknologi baterai *lithium ion*. Kelajuan pengisian dan pengosongan berpengaruh pada degradasi kapasitas baterai, panas yang dihasilkan baterai dan ketidakseimbangan sel.

Semakin besar laju pengisian dan pengosongan yang diaplikasikan (pada penelitian menggunakan kisaran kelajuan pengisian 0,3C sampai 2C) mengakibatkan semakin besar kapasitas yang hilang. Kapasitas disini meliputi kapasitas SEI pada baterai dan SEI yang terletak dalam *cracks* (jika terjadi keretakan dalam baterai), kapasitas lithiumnya juga berkurang yang diindikasikan dengan terjadinya pelapisan lithium (*lithium plating*) yang bertambah nilainya dan reaksi kehilangan persediaan lithium (*loss lithium inventory*) yang meningkat. Hal

ini berisiko pada kerusakan baterai *lithium ion*. Siklus pengisian dan pengosongan dilakukan sebanyak 100 siklus dapat diindikasikan adanya kerusakan secara perlahan pada baterai, jika siklus berlangsung sampai 1000 siklus maka kerusakan baterai dapat diindikasikan dengan lebih jelas dan detail. Hal ini divalidasi dengan penelitian O’Kane dalam Lampiran 1.11.

Gambar 4.1 menunjukkan kurva hubungan *capacity loss* dengan *throughput capacity* dengan variasi kelajuan pengisian 0,3C yang memperlihatkan plot secara perlahan adanya penurunan kapasitas sampai 0,07 A.h. Jika dilihat pada Tabel 4.1 pada variasi 0,3C memiliki *throughput capacity* sebanyak 486,3160974 A.h, *loss of capacity to SEI* 0,003080666 A.h, *loss of capacity to SEI on cracks* 0,011592452 A.h, *loss of capacity to lithium plating* 0,020059884 A.h, *total lithium lost* 0,04118182 mol. Pada variasi kelajuan 0,5C terjadi penurunan *throughput capacity* sebanyak 506,2294053 A.h, penurunan nilai *loss of capacity to SEI* 0,005688375 A.h, penurunan nilai *loss of capacity to SEI on cracks* 0,017398469 A.h, kenaikan nilai *loss of capacity to lithium plating* 0,004262542 A.h, kenaikan nilai *total lithium lost* 0,029180043 mol. Pada variasi kelajuan 0,7C terjadi penurunan *throughput capacity* sebanyak 504,6492713 A.h, penurunan nilai *loss of capacity to SEI* 0,004701762 A.h, penurunan nilai *loss of capacity to SEI on cracks* 0,015259488 A.h, kenaikan nilai *loss of capacity to lithium plating* 0,005871704 A.h, kenaikan nilai *total lithium lost* 0,028330145 mol. Pada variasi kelajuan 1C penurunan *throughput capacity* sebanyak 500,9178898 A.h, penurunan nilai *loss of capacity to SEI* 0,0039305 A.h, penurunan nilai *loss of capacity to SEI on cracks* 0,013541441 A.h, kenaikan nilai *loss of capacity to lithium plating* 0,008542607 A.h, kenaikan nilai *total lithium lost* 0,029464874 mol. Pada variasi kelajuan 2C penurunan *throughput capacity* sebanyak 486,3161069 A.h, penurunan nilai *loss of capacity to SEI* 0,003080666 A.h, penurunan nilai *loss of capacity to SEI on cracks* 0,011592452 A.h, kenaikan nilai *loss of capacity to lithium plating* 0,020059883 A.h, kenaikan nilai *total lithium lost* 0,041181819 mol. Nilai *throughput capacity* ini seimbang dengan beberapa faktor yang memengaruhi hilangnya kapasitas, dimana nilainya mengalami penurunan hilangnya kapasitas SEI dan SEI di retakan, kenaikan hilangnya kapasitas pelapisan lithium dan LLI.

*Throughput capacity* baterai mengacu pada seberapa banyak energi dapat dilewati melalui baterai selama umur pakainya yang dapat diukur dalam ampere-jam (A.h). *Throughput capacity* baterai cenderung mengalami penurunan saat kelajuan pengisian dan pengosongan baterai semakin cepat. Kondisi ini mengakibatkan pertumbuhan SEI yang meningkat dan ketika pertumbuhan SEI tidak terkendali atau tidak merata dapat menghalangi pergerakan ion lithium antara elektroda dan elektrolit yang mengurangi kapasitas baterai secara keseluruhan. Hal ini sesuai dengan penelitian O’Kane *et al.*, (2022) bahwa penyebab penurunan kandungan ion lithium dalam sel baterai dipengaruhi oleh pertumbuhan SEI yang menyumbat pori-pori sehingga terjadi pelapisan lithium dalam sel baterai. Penelitiannya fokus mengamati pada keretakan sel baterai (*SEI on cracks*) dan pelapisan lithium dalam sel baterai, jika retakan ini terus berlanjut mengakibatkan sedikit grafit melayang dan tidak terpakai. Secara harfiah pelapisan lithium dapat terjadi dan logam lithium yang dilapisi dapat pecah membentuk lithium mati yang mengapung di dalam larutan elektrolit. *Throughput capacity* yang dihasilkan pada penelitiannya memiliki nilai yang besar karena siklus yang digunakan sebanyak 1000 siklus, hal ini sejalan dengan penelitian ini yang memiliki nilai *throughput capacity* yang lebih besar dibandingkan dengan nilai kapasitas yang lain meskipun menggunakan 100 siklus. *Throughput capacity* baterai yang dihasilkan meningkat secara signifikan ketika jumlah siklus penggunaan baterai diperpanjang dari 100 siklus menjadi 1000 siklus. Hal ini menunjukkan bahwa baterai memiliki kemampuan untuk mempertahankan atau bahkan meningkatkan kapasitas seiring dengan penggunaan yang lebih lama.

Gambar 4.6 menunjukkan kurva hubungan *capacity loss* dan kelajuan pengisian yang nilainya berbanding terbalik, disaat adanya reaksi kehilangan kapasitas dalam baterai maka terjadi pengurangan *throughput capacity* dan reaksi ini dipengaruhi oleh kelajuan pengisian yang semakin laju maka semakin mengalami penurunan *throughput capacity* dan peningkatan kehilangan kapasitas. Gambar 4.6 mengindikasikan bahwa semakin tinggi kelajuan pengisian semakin besar kapasitas yang hilang dari baterai. *Capacity loss* merujuk pada penurunan kapasitas penyimpanan energi yang dapat diakomodasi oleh baterai dari kapasitas

awalnya. Kelajuan pengisian yang tinggi sering menyebabkan reaksi elektrokimia yang lebih cepat dalam baterai. Ketika baterai diisi ulang dengan kelajuan pengisian semakin tinggi dapat meningkatkan pertumbuhan SEI (*Solid Electrolyte Interphase*) yang tidak diinginkan, pembentukan *lithium plating* dan berbagai proses degradasi lainnya dalam baterai. Pertumbuhan SEI yang tidak terkontrol atau pembentukan *lithium plating* dapat mengurangi kapasitas baterai secara signifikan karena SEI yang tebal atau plating lithium dapat menghalangi pergerakan ion lithium dan elektron antara elektroda. Akibatnya kapasitas baterai mengalami penurunan karena sebagian energi yang disimpan di dalam baterai tidak dapat diakses atau digunakan secara efektif selama siklus penggunaan berikutnya. Hal ini menyebabkan penurunan *throughput capacity* baterai yang mengukur kapasitas baterai yang dapat digunakan secara efektif dalam penggunaan praktis.

Kapasitas yang hilang akibat pelapisan lithium yang dipengaruhi oleh variasi kelajuan pengisian pada baterai dapat dilihat pada Gambar 4.7 yang memperlihatkan adanya titik balik bawah atau peak bawah ditandai dengan terdapat perubahan arah tren dalam data. Perubahan tren ini menunjukkan titik dimana nilai tersebut mencapai level terendahnya sebelum mulai meningkat kembali yakni pada saat kelajuan pengisian 0,4C dengan nilai kapasitas 0,003581025 A.h. Hasil peak bawah ini didapatkan dengan menambahkan variasi kelajuan pengisian dalam penelitian yakni 0,4C dan 0,6C sehingga dapat diketahui bahwa hilangnya kapasitas akibat pelapisan lithium memiliki kurva parabola terbalik yakni memiliki bentuk yang cenderung menurun sebelum mencapai titik terendahnya dan meningkat kembali. Pada awalnya LLI terjadi penurunan tajam saat kelajuan pengisian 0,3C hingga 0,4C. Namun saat kecepatan pengisian ditingkatkan menjadi 0,5C hingga 2C kehilangan kapasitas akibat pelapisan lithium meningkat. Kecepatan pengisian yang lebih tinggi membuat ion lithium bergerak lebih cepat ke anoda. Gerakan cepat ini dapat menyebabkan penumpukan ion di permukaan anoda yang dapat meningkatkan pelapisan lithium. Kesamaan nilai kehilangan kapasitas terjadi pada kelajuan pengisian 0,3C dan 2C. Pada kelajuan pengisian rendah (0,3C) ion lithium memiliki cukup waktu untuk berdifusi ke dalam anoda, sehingga mengurangi penumpukan ion di permukaan dan mengurangi pelapisan lithium. Namun karena

pengisian yang lebih lambat juga berarti lebih banyak waktu untuk terjadi reaksi samping yang tidak diinginkan. Sedangkan pada kelajuan pengisian tinggi (2C) ion lithium bergerak ke anoda dengan sangat cepat yang bisa menyebabkan penumpukan ion di permukaan dan meningkatkan pelapisan lithium. Namun karena pengisian berlangsung lebih cepat maka ada waktu yang lebih sedikit untuk reaksi samping yang tidak diinginkan. Nilai reaksi samping (*side reaction*) dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan grafiknya pada Gambar 4.6.

*Degradation mode* menjelaskan kondisi suatu benda atau sistem mengalami penurunan atau perubahan bertahap dalam kualitas, kinerja atau integritasnya. Degradasi baterai merujuk pada penurunan kinerja baterai seiring berjalannya waktu dan penggunaan. Proses ini dapat mengakibatkan penurunan kapasitas penyimpanan energi, peningkatan resistansi internal dan berisiko baterai tidak dapat menyimpan atau menyediakan daya sebanyak kondisi awal baterai.

Baterai yang digunakan atau tidak digunakan tetap mengalami perubahan kimia yang terjadi dalam sel baterai. Perubahan dalam struktur elektroda dan elektrolit yang dapat mengurangi kemampuan baterai untuk menyimpan energi dengan efisien seiring waktu. Siklus pengisian dan pengosongan baterai yang tidak stabil atau standar dapat menyebabkan degradasi baterai. Pada penelitian ini diperoleh hasil kelajuan pengisian dengan metode CCCV yang diberi perlakuan penambahan nilai kelajuan dari 0,3C hingga 2C mengakibatkan adanya peningkatan persentase degradasi baterai yang berimbas pada kerusakan baterai *lithium ion*. Mekanisme degradasi baterai *lithium ion* dalam hal pelapisan lithium dan pertumbuhan SEI (*Solid Electrolyte Interphase*) terjadi saat lithium terendapkan pada permukaan elektroda, menyebabkan terjadi pengurangan kapasitas baterai dan memperpendek umur baterai. Pertumbuhan SEI terjadi ketika lapisan SEI yang terbentuk pada permukaan elektroda semakin tebal dapat mengurangi konduktivitas ionik dan memperpendek umur baterai (Edge *et al.*, 2021).

Gambar 4.8 menunjukkan kurva hubungan *degradation mode* dan *throughput capacity* dengan kelajuan pengisian 0,3C jika dibandingkan dengan gambar 4.11 menggunakan variasi kelajuan pengisian 2C dapat terlihat pada *degradation modes-*

nya yang nilainya lebih tinggi pada 2C yang berkisar dari 1% menjadi 1,6% berarti adanya selisih 0,6% dapat berpengaruh pada kerusakan baterai.

Menurut Yang *et al.*, (2017) dalam penelitiannya telah mengimplementasikan protokol tegangan konstan arus konstan (CCCV) dengan CC 1C hingga 4,2V, diikuti oleh CV 4,2V melepaskan kapasitas hingga 2C selama siklus. Hasil menunjukkan bahwa kapasitas pelepasan 2C menurun secara linier dengan jumlah siklus pada tahap awal siklus. Pada siklus ke-2700 secara perlahan baterai kehilangan 0,93 mAh per siklus. Setelah itu terjadi penuaan sel yang meningkat secara drastis setelah siklus ke-3300. Kapasitas 2C dinilai sudah turun dibawah 80% dari kapasitas awal sebelum terjadi peluruhan dan berdampak besar pada penggunaan kembali baterai.

Tabel 4.2 menunjukkan nilai analisis hasil pengukuran mode degradation dari baterai lithium ion yang disajikan dalam variasi C yang memiliki nilai *throughput capacity* sama seperti Tabel 4.1. Pada kelajuan pengisian 0,3C nilai *throughput capacity* 486,3160974 A.h, nilai *loss of lithium inventory* sebesar 0,541103564%, nilai *loss of active material in negative electrode* sebesar 0,151167654% dan nilai *loss of active material in positive electrode* sebesar 0,054860432%. Pada kelajuan pengisian 0,5C menghasilkan nilai *throughput capacity* yang menurun yakni 506,2294053 A.h, nilai *loss of lithium inventory* mengalami penurunan menjadi 0,38340766%, nilai *loss of active material in negative electrode* mengalami kenaikan nilai 0,038340766% dan nilai *loss of active material in positive electrode* juga mengalami kenaikan nilai 0,02157284%. Pada kelajuan pengisian 0,7C menghasilkan nilai *throughput capacity* yang menurun yakni 504,6492713 A.h, nilai *loss of lithium inventory* mengalami kenaikan kembali menjadi 0,372240533%, nilai *loss of active material in negative electrode* mengalami kenaikan nilai 0,04115251% dan nilai *loss of active material in positive electrode* juga mengalami kenaikan nilai 0,027792515%. Pada kelajuan pengisian 1C menghasilkan nilai *throughput capacity* yang menurun yakni 500,9178898 A.h, nilai *loss of lithium inventory* mengalami kenaikan yakni 0,387150167%, nilai *loss of active material in negative electrode* mengalami kenaikan nilai 0,076791526% dan nilai *loss of active material in positive electrode* juga mengalami kenaikan nilai

0,035633939%. Pada kelajuan pengisian 2C menghasilkan nilai *throughput capacity* yang menurun yakni 486,3160974 A.h, nilai *loss of lithium inventory* mengalami kenaikan nilai 0,541103564%, nilai *loss of active material in negative electrode* mengalami kenaikan nilai 0,151167654% dan nilai *loss of active material in positive electrode* juga mengalami kenaikan nilai 0,054860432%.

Hasil Tabel 4.2 dianalisis dan didapatkan bahwa baterai menghasilkan nilai *throughput capacity* yang konstan mengalami penurunan, artinya total kapasitas yang dapat diakumulasi selama siklus pengisian dan pengosongan baterai dari penggunaan mengalami penurunan kapasitas secara keseluruhan seiring berjalannya waktu. Faktor yang memengaruhi penurunan *throughput capacity* menunjukkan bahwa persentase kehilangan material aktif anoda dan katodanya mengalami kenaikan. Tingkat kehilangan yang meningkat ini dipengaruhi oleh adanya reaksi yang terjadi dalam baterai saat proses pengisian dan pengosongan karena adanya proses elektrolisis. Nilainya berkemungkinan terus bertambah jika nilai siklusnya bertambah pula. Berbeda dengan persentase *loss of lithium inventory* pada variasi kelajuan pengisian 0,3C; 0,5C; 1C; 2C mengalami kenaikan persentase, sedangkan pada variasi kelajuan pengisian 0,7C mengalami penurunan persentase dari variasi kelajuan pengisian 0,5C. Selisih nilainya yakni sebesar 0.011167127%. Fenomena tersebut menunjukkan adanya kejanggalan karena terjadi penurunan persentase *loss of lithium inventory*, sehingga dilakukan penambahan variasi pengisian yang sama seperti percobaan sebelumnya untuk menganalisis plot berpola atau tak berpola. Hasil didapatkan kurva peak bawah atau kurva parabola terbalik dengan kelajuan pengisian 0,7C sebagai titik terendahnya. Hilangnya persediaan lithium menurun secara signifikan dari 0,3C hingga 0,4C penurunan berangsur hingga 0,7C. Pada kelajuan pengisian 1C mengalami peningkatan kehilangan persediaan lithium hingga 2C. Grafik hubungan kelajuan pengisian dengan *loss of lithium inventory* ditunjukkan pada Gambar 4.14.

Pada umumnya peningkatan laju pengisian meningkatkan persentase *loss of lithium inventory* juga, pengisian yang cepat cenderung menyebabkan reaksi yang lebih intensif dalam sel baterai, yang menyebabkan lebih banyak lithium yang terlepas dari elektroda dan masuk ke SEI atau terperangkap di permukaan elektroda.

Fenomena yang terjadi pada kelajuan 0,7C bahwa terjadi pengurangan jumlah lithium yang hilang dari sistem selama siklus pengisian yang dapat meningkatkan efisiensi proses pengisian. Hal tersebut menunjukkan bahwa beberapa kasus mungkin tidak ada pola yang konsisten dalam hubungan antara laju pengisian dan persentase *loss of lithium inventory*. Seperti dalam penelitian O’Kane *et al.*, (2022) yang menjelaskan bahwa hilangnya persediaan lithium disebabkan oleh SEI yang terjadi dalam *cracks* juga mengalami kenaikan seiring dengan tingkat keretakan rendah dan tinggi. Semakin besar tingkatan keretakan maka persediaan lithium yang hilang juga meningkat.

Persediaan bahan aktif elektroda tidak serta merta hilang secara drastis, nilainya diindikasikan hilang secara perlahan yang hanya pada rentang  $< 1\%$ . Saat kelajuan 0,3C; 0,4C; 0,5C; 0,6C; 0,7C; 1C; 2C menunjukkan kehilangan material anoda sebesar 0,151%; 0,031%; 0,038%; 0,046%; 0,054%; 0,076%; 0,151% dan hilangnya material NMC sebanyak 0,054%; 0,017%; 0,021%; 0,024%; 0,027%; 0,035%; 0,054%. Persentase kehilangan material elektroda negatif lebih banyak dibandingkan dengan persentase kehilangan material elektroda positif.

Gambar 4.13 memperlihatkan kurva hubungan *degradation mode* dengan kelajuan pengisian, kurva ini menunjukkan adanya kenaikan nilai kehilangan material aktif elektroda negatif dan elektroda positif yang berimbas pada penurunan *throughput capacity* dan seiring dengan peningkatan kelajuan pengisian berimbas pada degradasi baterai lithium yang meningkat.

Berdasarkan fenomena *lithium plating* dan *loss lithium inventory* didapatkan titik optimalisasi kelajuan pengisian yang sesuai untuk mengurangi degradasi baterai *lithium ion* yakni 0,7C. Pada tingkat pengisian ini baterai menunjukkan pelapisan lithium daerah titik rendah, yang berarti kehilangan kapasitas akibat pelapisan lithium menjadi minimal. Jumlah total lithium yang hilang ketika terjadi pelapisan lithium atau mekanisme lain kerugiannya diminimalkan. Ketika kedua jenis kerugian ini diminimalkan pada kelajuan pengisian 0,7C berarti lebih banyak lithium tersedia untuk reaksi selanjutnya dan lebih banyak energi dapat disimpan dalam sel. Hal ini menjadikan 0,7C sebagai titik optimal untuk pengisian baterai.

Porositas elektroda pada baterai *lithium ion* adalah ukuran seberapa banyak ruang pori-pori yang ada dalam struktur elektroda. Pori-pori ini memberikan akses bagi ion lithium dan elektrolit untuk bergerak di dalam elektroda selama proses pengisian dan pengosongan baterai. Porositas elektroda memerankan aspek kinerja baterai dalam penyimpanan ion lithium yang lebih banyak sehingga dapat meningkatkan kapasitas baterai, pori-pori memberikan jalur untuk pergerakan ion lithium dan elektron sehingga proses elektrokimia berlangsung dengan efisien.

*Negative electrode porosity* merujuk pada jumlah dan ukuran pori-pori yang ada dalam struktur elektroda negatif. Porositas elektroda yang ditunjukkan ini berada pada titik porositas separator dan arus kolektor yang berada disisi elektroda. Porositas elektroda negatif ini sama dengan porositas elektroda positif. Semakin besar kelajuan pengisian yang diaplikasikan dalam baterai *lithium ion* selama siklus CCCV mengakibatkan adanya porositas yang terjadi pada separator dan kolektor arus baterai. Porositas ini terjadi peningkatan seiring dengan kelajuan pengisiannya, porositas yang baik pada elektroda baterai *lithium ion* tidak secara langsung menyebabkan degradasi atau kerusakan baterai, sebaliknya porositas yang optimal dirancang untuk meningkatkan kinerja baterai *lithium ion*. Degradasi baterai dapat terjadi ketika porositas elektroda yang tidak terkontrol atau terlalu tinggi dapat berdampak pada pembengkakan elektroda selama siklus pengisian dan pengosongan.

Gambar 4.15 menunjukkan kurva hubungan *negative electrode porosity* dan throughput capacity kelajuan 0,3C dimana jika ditinjau data pada tabel 4.3 analisis hasil pengukuran *negative electrode porosity* memiliki nilai rata-rata 0,24288949%, pada separator 0,240927354%, dan pada kolektor arus 0,243638976%. Hal ini menunjukkan bahwa porositas yang terjadi berkisar pada nilai yang sama, namun pada variasi kelajuan pengisian yang ditingkatkan menjadi 0,5C menghasilkan rata-rata 0,240326694%, nilai pada separator 0,240232036%, dan pada kolektor arus 0,240375559%. Pada variasi kelajuan pengisian 0,7C menghasilkan nilai rata-rata *negative electrode porosity* sebesar 0,241514769%, pada separator 0,241322274%, dan pada kolektor arus 0,241611223%. Pada variasi kelajuan pengisian 1C menghasilkan nilai rata-rata *negative electrode porosity* sebesar 0,242383901%,

pada separator 0,24198338% dan pada kolektor arus 0,242573302%. Pada variasi kelajuan pengisian 2C menghasilkan nilai rata-rata *negative electrode porosity* sebesar 0,24288949%, pada separator 0,240927354% dan pada kolektor arus 0,243638976%. Secara keseluruhan perubahan nilai porositas pada separator dan kolektor arus tidaklah perubahan nilai yang signifikan dan terjadi sangat perlahan (sedikit sekali terjadi porositas dalam elektroda negatif).

Gambar 4.20 menunjukkan kurva hubungan *negative elektroda porosity* dan kelajuan pengisian yang meningkat nilainya. Porositas yang baik pada elektroda negatif dapat mendukung pergerakan ion lithium lebih cepat dan efisien selama siklus pengisian dan pengosongan yang dapat meningkatkan kinerja baterai pada tingkat pengisian yang tinggi. Pada porositas kolektor arus dan separator mengalami peningkatan namun dititik kelajuan pengisian 0,5C mengalami penurunan nilai. Porositas pada kolektor arus meningkat dengan kelajuan pengisian yang lebih tinggi karena porositas yang baik pada kolektor arus dapat meningkatkan konduktivitas elektron dan memastikan distribusi arus yang baik selama proses pengisian dan pengosongan. Secara keseluruhan persentase porositas berada dalam kisaran 0,24% yang menunjukkan dalam sel baterai memungkinkan adanya akses bagi elektrolit untuk berinteraksi dengan elektroda. Jika persentase porositas mencapai nol maka tidak ada ruang pori dalam struktur elektroda.

Pada kelajuan pengisian 2C terjadi penurunan nilai porositas dibandingkan dengan kelajuan pengisian 1C karena adanya endapan atau ion yang menempel menyebabkan indikasi adanya penutupan pori-pori oleh ion lithium saat siklus. Hal ini dapat memengaruhi proses dalam sel baterai, termasuk pertumbuhan SEI yang lebih cepat, adanya endapan pada separator dan ion menempel pada permukaan elektroda. Endapan atau ion yang menempel pada pori-pori separator dapat menyebabkan penutupan sebagian pori-pori dan menghambat pergerakan ion lithium melalui separator karena ruang gerak ion terbatas. Hal tersebut diperkuat dengan penelitian Khanif & Supardi (2019) yang menghasilkan separator tidak dapat sepenuhnya melewatkan ion dari anoda ke katoda saat *loop* histerisis jaraknya lebih besar dibandingkan dengan separator standar. Endapan tersebut memiliki loop histerisis yang lebih besar dibandingkan dengan separator standar. Semakin besar

jarak loop maka akan semakin mempersulit ion melewati separator. Hal ini menghambat proses interkalasi terganggu dan menjadikannya kurang optimal sehingga separator tidak bisa memiliki siklus hidup panjang.



## BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang dilakukan pada penelitian ini, dapat ditarik kesimpulan terkait pengaruh variasi metode pengisian CCCV terhadap fenomena *lithium plating* dan *loss lithium inventory* pada proses kerusakan baterai *lithium ion*. Berikut kesimpulan yang dapat diambil adalah sebagai berikut:

- a. Kapasitas baterai mengalami penurunan seiring dengan peningkatan kelajuan pengisian. Peningkatan kelajuan pengisian dari 0,3C hingga 2C mengakibatkan penurunan *throughput capacity* yang menunjukkan berkurangnya kapasitas baterai seiring dengan penggunaan.
- b. Kehilangan material pada elektroda negatif dan elektroda positif terjadi dengan persentase yang meningkat seiring dengan peningkatan kelajuan pengisian. Persentase kehilangan material elektroda negatif cenderung lebih tinggi dibanding dengan elektroda positif dengan perbandingan kisaran 0,5%.
- c. Peningkatan kelajuan pengisian ulang baterai dapat meningkatkan persentase *lithium plating* dan *loss lithium inventory*. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan pengisian yang tinggi dapat meningkatkan risiko terjadinya fenomena yang dapat merusak kinerja baterai. Namun dalam beberapa kasus dapat terjadi pola yang tidak konsisten sehingga menyebabkan pola non linier dan pola parabolik.
- d. Kehilangan kapasitas akibat pelapisan lithium paling minimum hilang pada saat baterai diisi ulang dengan kelajuan pengisian 0,4C sehingga pada titik ini ditemukan keseimbangan dalam kecepatan pengisian untuk meminimalkan kehilangan kapasitas akibat pelapisan lithium.
- e. *Loss lithium inventory* paling rendah didapatkan saat baterai diisi ulang dengan kelajuan pengisian 0,7C sehingga jumlah lithium yang hilang dari sistem selama siklus pengisian ini berkurang dan dapat meningkatkan efisiensi proses pengisian.

- f. Porositas pada elektroda negatif menunjukkan peningkatan seiring dengan tingkat kelajuan pengisian ulang baterai yang lebih tinggi. Pada separator dan kolektor arus terjadi perubahan nilai porositas secara perlahan dan tidak drastis, meskipun demikian porositas yang baik pada elektroda negatif dapat mendukung pergerakan ion lithium lebih cepat dan efisien.

## 5.2 Saran

Berdasarkan penelitian ini ada beberapa saran untuk penelitian selanjutnya yang dapat memperdalam pemahaman terkait baterai *lithium ion* yakni dapat dilakukan penelitian lebih mendalam terkait *lithium plating* meliputi faktor-faktor yang memengaruhi terjadinya *lithium plating* seperti suhu operasi, desain elektroda dan komposisi elektrolitnya. Penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut untuk mengoptimalkan porositas elektroda pada baterai *lithium ion*. Pertimbangkan pengaruh porositas yang berbeda terhadap kinerja baterai dan identifikasi titik optimal porositas yang dapat meningkatkan efisiensi ion lithium.

## DAFTAR PUSTAKA

- Antika, I. D. A. F., & Hidayat, S. (2019). Karakteristik anoda baterai lithium-ion yang menyatukan material aktif penyusun elektroda . Binder berperan dalam menjaga. *Jurnal Ilmu Dan Inovasi Fisika*, 03(02), 114–121.
- Berliner, M. D., Cogswell, D. A., Bazant, M. Z., & Braatz, R. D. (2021). Methods—PETLION: Open-Source Software for Millisecond-Scale Porous Electrode Theory-Based Lithium-Ion Battery Simulations. *Journal of The Electrochemical Society*, 168(9), 090504. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac201c>
- Chen, C.-H., Brosa Planella, F., O'Regan, K., Gastol, D., Widanage, W. D., & Kendrick, E. (2020). Development of Experimental Techniques for Parameterization of Multi-scale Lithium-ion Battery Models. *Journal of The Electrochemical Society*, 167(8), 080534. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab9050>
- Chen, Y. H., Wang, C. W., Zhang, X., & Sastry, A. M. (2010). Porous cathode optimization for lithium cells: Ionic and electronic conductivity, capacity, and selection of materials. *Journal of Power Sources*, 195(9), 2851–2862. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.11.044>
- Chen, Y., Kang, Y., Zhao, Y., Wang, L., Liu, J., Li, Y., Liang, Z., He, X., Li, X., Tavajohi, N., & Li, B. (2021). A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards. *Journal of Energy Chemistry*, 59, 83–99. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.10.017>
- Edge, J. S., O'Kane, S., Prosser, R., Kirkaldy, N. D., Patel, A. N., Hales, A., Ghosh, A., Ai, W., Chen, J., Yang, J., Li, S., Pang, M. C., Bravo Diaz, L., Tomaszewska, A., Marzook, M. W., Radhakrishnan, K. N., Wang, H., Patel, Y., Wu, B., & Offer, G. J. (2021). Lithium ion battery degradation: what you need to know. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 23(14), 8200–8221. <https://doi.org/10.1039/d1cp00359c>
- Fahrudin, H., & Agus, H. (2022). Perbandingan Performansi Panel Surya Tipe Amorphous dan. *Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Malang*, 7(November), 1091–1103.
- Fei, Z., Yang, F., Tsui, K. L., Li, L., & Zhang, Z. (2021). Early prediction of battery lifetime via a machine learning based framework. *Energy*, 225, 120205. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120205>
- Guan, T., Sun, S., Yu, F., Gao, Y., Fan, P., Zuo, P., Du, C., & Yin, G. (2018). The degradation of LiCoO<sub>2</sub>/graphite batteries at different rates. *Electrochimica Acta*, 279, 204–212. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.04.197>
- Hasyir Ahmad Munadi, Aripin, & Nurul Hiron. (2022). Studi Analisis Rugi-rugi Baterai Tipe Alumunium Udara pada Beban Listrik Statis. *E-JOINT (Electronica and Electrical Journal Of Innovation Technology)*, 2(2), 63–70. <https://doi.org/10.35970/e-joint.v2i2.1022>
- Holtstiege, F., Wilken, A., Winter, M., & Placke, T. (2017). Running out of lithium? A route to differentiate between capacity losses and active lithium losses in lithium-ion batteries. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 19(38), 25905–

25918. <https://doi.org/10.1039/c7cp05405j>
- Jadav, K. A. (2015). Design a Residential PV Power System with Battery Energy Storage. *International Journal on Advances in Engineering Technology and Science*, 1, 2455–3131. <http://ijaets.in>
- Khan, A. B., & Choi, W. (2018). Optimal Charge Pattern for the High-Performance Multistage Constant Current Charge Method for the Li-Ion Batteries. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 33(3), 1132–1140. <https://doi.org/10.1109/TEC.2018.2801381>
- Khanif, R. I. N., & Supardi, Z. A. I. (2019). PENGARUH PENAMBAHAN MASSA  $Al(OH)_3$  PADA KARAKTERISASI KOMPOSIT PVDF-CA/ $Al(OH)_3$  SEBAGAI SEPARATOR BATERAI LITHIUM ION. 8, 2–4.
- Kirkaldy, N., Samieian, M. A., Offer, G. J., Marinescu, M., & Patel, Y. (2022). Lithium-Ion Battery Degradation: Measuring Rapid Loss of Active Silicon in Silicon-Graphite Composite Electrodes. *ACS Applied Energy Materials*, 5(11), 13367–13376. <https://doi.org/10.1021/acsaem.2c02047>
- Luo, G., Zhang, Y., & Tang, A. (2023). Capacity Degradation and Aging Mechanisms Evolution of Lithium-Ion Batteries under Different Operation Conditions. *Energies*, 16(10). <https://doi.org/10.3390/en16104232>
- Mahendra, A., & Supardi, Z. A. I. (2021). Sebuah Review: Spektroskopi Impedansi Elektrokimia Dan Aplikasinya Dalam Baterai Lithium-Ion. *Inovasi Fisika Indonesia*, 10(2), 59–67. <https://doi.org/10.26740/ifi.v10n2.p59-67>
- Marquis, S. G., Sulzer, V., Timms, R., Please, C. P., & Chapman, S. J. (2019). An Asymptotic Derivation of a Single Particle Model with Electrolyte. *Journal of The Electrochemical Society*, 166(15), A3693–A3706. <https://doi.org/10.1149/2.0341915jes>
- Merla, Y., Wu, B., Yufit, V., Brandon, N. P., Martinez-Botas, R. F., & Offer, G. J. (2016). Novel application of differential thermal voltammetry as an in-depth state-of-health diagnosis method for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 307, 308–319. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.12.122>
- Nurcahyo, R., Setyoko, A. T., & Habiburrahman, M. (2023). *Pengelolaan Limbah Bekas Sebagai Limbah B3* (Issue April).
- Nzereogu, P. U., Omah, A. D., Ezema, F. I., Iwuoha, E. I., & Nwanya, A. C. (2022). Anode materials for lithium-ion batteries: A review. *Applied Surface Science Advances*, 9(March), 100233. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2022.100233>
- O’Kane, S. E. J., Ai, W., Madabattula, G., Alonso-Alvarez, D., Timms, R., Sulzer, V., Edge, J. S., Wu, B., Offer, G. J., & Marinescu, M. (2022). Lithium-ion battery degradation: how to model it. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 24(13), 7909–7922. <https://doi.org/10.1039/d2cp00417h>
- O’Kane, S. E. J., Campbell, I. D., Marzook, M. W. J., Offer, G. J., & Marinescu, M. (2020). Physical Origin of the Differential Voltage Minimum Associated with Lithium Plating in Li-Ion Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 167(9), 090540. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab90ac>
- Otong, M., & Khudari, M. (2021). Perancangan Sistem Charging Baterai Lithium-ion Mmenggunakan DC-DC Buck Converter Dengan Metode Constant Current-Constant Voltage. *Jurnal Ilmiah Setrum Article In Press*, 10(1), 144–154. <https://doi.org/10.36055/setrum.v10i1.11916>

- Perdana, F. A. (2021). Baterai Lithium. *INKUIRI: Jurnal Pendidikan IPA*, 9(2), 113. <https://doi.org/10.20961/inkuiri.v9i2.50082>
- Putra, R. I., Sunardi, S., & Puriyanto, R. D. (2019). Monitoring Tegangan Baterai Lithium Polymer pada Robot Line Follower Secara Nirkabel. *Buletin Ilmiah Sarjana Teknik Elektro*, 1(2), 73. <https://doi.org/10.12928/biste.v1i2.907>
- Rachmanto, M. K. A., Wibowo, L. T., & Paramitha, T. (2020). Review : Metode Sintesis Katoda LiFePO<sub>4</sub> Baterai Lithium-Ion. *Equilibrium Journal of Chemical Engineering*, 3(2), 75. <https://doi.org/10.20961/equilibrium.v3i2.42833>
- Satriady, A., Alamsyah, W., Saad, H. I., & Hidayat, S. (2016). PENGARUH LUAS ELEKTRODA TERHADAP KARAKTERISTIK BATERAI LiFePO<sub>4</sub>. *Jurnal Material Dan Energi Indonesia*, 06(02), 43–48.
- Sauerteig, D., Ivanov, S., Reinshagen, H., & Bund, A. (2017). Reversible and irreversible dilation of lithium-ion battery electrodes investigated by in-situ dilatometry. *Journal of Power Sources*, 342, 939–946. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.12.121>
- Sepdian, S. (2020). Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Berbasis Energi Surya dan Energi Angin. *Jurnal Elektronika Listrik Dan Teknologi Informasi Terapan*, 1(1), 23. <https://doi.org/10.37338/e.v1i1.95>
- Sulzer, V., Marquis, S. G., Timms, R., Robinson, M., & Chapman, S. J. (2021). Python Battery Mathematical Modelling (PyBaMM). *Journal of Open Research Software*, 9, 1–8. <https://doi.org/10.5334/JORS.309>
- Trisakti, Y., Miratsi, L., & Kurniawan, W. B. (2022). Jurnal Riset Fisika Indonesia. *Jurnal Riset Fisika Indonesia*, 2(2), 26–30.
- Waldmann, T., Hogg, B. I., & Wohlfahrt-Mehrens, M. (2018). Li plating as unwanted side reaction in commercial Li-ion cells – A review. *Journal of Power Sources*, 384(November 2017), 107–124. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.02.063>
- Waldmann, T., Wilka, M., Kasper, M., Fleischhammer, M., & Wohlfahrt-Mehrens, M. (2014). Temperature dependent ageing mechanisms in Lithium-ion batteries - A Post-Mortem study. *Journal of Power Sources*, 262, 129–135. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.03.112>
- Yang, X. G., Leng, Y., Zhang, G., Ge, S., & Wang, C. Y. (2017). Modeling of lithium plating induced aging of lithium-ion batteries: Transition from linear to nonlinear aging. *Journal of Power Sources*, 360, 28–40. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.05.110>
- Yu, S., Chung, Y., Song, M. S., Nam, J. H., & Cho, W. Il. (2012). Investigation of design parameter effects on high current performance of lithium-ion cells with LiFePO<sub>4</sub>/graphite electrodes. *Journal of Applied Electrochemistry*, 42(6), 443–453. <https://doi.org/10.1007/s10800-012-0418-0>
- Zhang, L., Ma, Y., Cheng, X., Yin, G., Guan, T., Cui, Y., Nordlund, D., Gao, Y., Du, C., & Lin, F. (2016). Degradation mechanism during long-term cycling of over-charged LiCoO<sub>2</sub>/mesocarbon microbeads battery. *Journal of Power Sources*.
- Zheng, H., Li, J., Song, X., Liu, G., & Battaglia, V. S. (2012). A comprehensive understanding of electrode thickness effects on the electrochemical

performances of Li-ion battery cathodes. *Electrochimica Acta*, 71, 258–265.  
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.03.161>



LAMPIRAN

- Lampiran 1. 1 [Kode Simulasi](#)
- Lampiran 1. 2 [Data Simulasi Kelajuan Pengisian Pengosongan 0,3C](#)
- Lampiran 1. 3 [Data Simulasi Kelajuan Pengisian Pengosongan 0,5C](#)
- Lampiran 1. 4 [Data Simulasi Kelajuan Pengisian Pengosongan 0,7C](#)
- Lampiran 1. 5 [Data Simulasi Kelajuan Pengisian Pengosongan 1C](#)
- Lampiran 1. 6 [Data Simulasi Kelajuan Pengisian Pengosongan 2C](#)
- Lampiran 1. 7 [Analisis Data \*Capacity Loss\*](#)
- Lampiran 1. 8 [Analisis Data \*Mode Degradation\*](#)
- Lampiran 1. 9 [Analisis Data \*Negative Electrode Porosity\*](#)
- Lampiran 1. 10 [Ploting Hasil Simulasi](#)
- Lampiran 1. 11 [Validasi Data](#)



