

TUGAS AKHIR - TM184835

**STUDI PENGARUH JENIS SEPARATOR TERHADAP
PERFORMA ELEKTROKIMIA BATERAI BERBASIS
KOMPOSIT HIBRIDA**

BAGUS ALIFAH HASYIM

NRP 02111840000107

Dosen Pembimbing

Putu Suwarta S.T., M.Sc., Ph.D

NIP. 198203032009121007

Program Studi Sarjana

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



TUGAS AKHIR - TM 184835

**STUDI PENGARUH JENIS SEPARATOR TERHADAP
PERFORMA ELEKTROKIMIA BATERAI BERBASIS
KOMPOSIT HIBRIDA**

**BAGUS ALIFAH HASYIM
NRP 02111840000107**

Dosen Pembimbing

Putu Suwarta S.T., M.Sc., Ph.D
NIP. 198203032009121007

Program Studi Sarjana

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



FINAL PROJECT - TM184835

**STUDY OF THE EFFECT OF VARIATION OF SEPARATOR
ON ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF HYBRID
COMPOSITES BATTERY**

**BAGUS ALIFAH HASYIM
NRP 02111840000107**

Advisor

Putu Suwarta S.T., M.Sc., Ph.D
NIP. 198203032009121007

Undergraduate Study Program

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI PENGARUH JENIS SEPARATOR TERHADAP PERFORMA ELEKTROKIMIA BATERAI BERBASIS KOMPOSIT HIBRIDA

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana pada
Program Studi S-1
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **BAGUS ALIFAH HASYIM**

NRP. 02111840000107

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Putu Suwarta, S.T. M.Sc. Ph.D
NIP. 198203032009121007
2. Ika Dewi Wijayanti, S.T. M.Sc, Ph.D
NIP. 198512022014042002
3. H.C. Kis Agustin, Ir. DEA. Dr
NIP. 196308151989032001
4. Fahmi Mubarok, S.T. M.Sc. Ph.D
NIP. 197801152003121002



SURABAYA

Juli, 2022

Halaman ini sengaja dikosongkan

APPROVAL SHEET

STUDY OF THE EFFECT OF VARIATION OF SEPARATOR ON ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF HYBRID COMPOSITES BATTERY

FINAL PROJECT

Submitted to fulfil one of the requirements
for obtaining a Bachelor degree at
Undergraduate Study Program
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By : **BAGUS ALIFAH HASYIM**

NRP. 02111840000107

Approved by Final Project Examiner Team :

1. Putu Suwarta, S.T. M.Sc. Ph.D
NIP. 198203032009121007
2. Ika Dewi Wijayanti, S.T. M.Sc. Ph.D
NIP. 198512022014042002
3. H.C. Kis Agustin, Ir. DEA. Dr
NIP. 196308151989032001
4. Fahmi Mubarak, S.T. M.Sc. Ph.D
NIP. 197801152003121002



SURABAYA

July, 2022

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Bagus Alifah Hasyim / 02111840000107

Departemen : Teknik Mesin

Dosen Pembimbing / NIP : Putu Suwarta, S.T. M.Sc. Ph.D / 198203032009121007

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Studi Pengaruh Jenis Separator terhadap Performa Elektrokimia Baterai Berbasis Komposit Hibrida” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 5 Juli 2022

Mengetahui

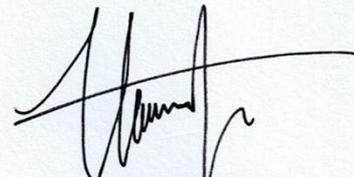
Dosen Pembimbing



(Putu Suwarta, S.T. M.Sc. Ph.D)

NIP. 198203032009121007

Mahasiswa



(Bagus Alifah Hasyim)

NRP. 02111840000107

Halaman ini sengaja dikosongkan

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Bagus Alifah Hasyim / 02111840000107
Department : Mechanical Engineering
Advisor / NIP : Putu Suwarta, S.T. M.Sc. Ph.D / 198203032009121007

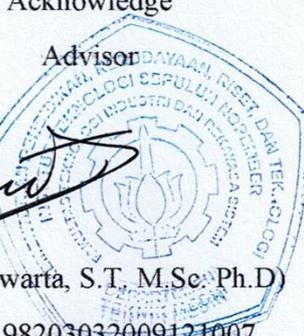
hereby declare that the Final Project with the title of “Study of the Effect of Variation of Separator on Electrochemical Performance of Hybrid Composites Battery” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 5 July 2022

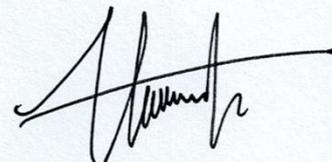
Acknowledge

Advisor



(Putu Suwarta, S.T. M.Sc. Ph.D)
NIP. 198203032009121007

Student



(Bagus Alifah Hasyim)
NRP. 02111840000107

Halaman ini sengaja dikosongkan

STUDI PENGARUH JENIS SEPARATOR TERHADAP PERFORMA ELEKTROKIMIA BATERAI BERBASIS KOMPOSIT HIBRIDA

Nama Mahasiswa : Bagus Alifah Hasyim
NRP : 02111840000107
Departemen : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing : Putu Suwarta, ST. MSc. Ph.D

Abstrak

Penggunaan baterai litium konvensional dengan elektrolit cair memiliki risiko pada aspek keamanan dikarenakan dapat menimbulkan kebocoran. Selain itu, kegagalan lain dapat timbul seperti pertumbuhan dendrite yang berasal dari anoda menuju katoda sehingga apabila dendrite mengalami kontak dengan katoda, maka dapat menyebabkan arus pendek listrik pada baterai. Untuk memecahkan permasalahan tersebut, pada penelitian ini melakukan studi mengenai baterai komposit hibrida, yaitu baterai litium berbasis elektrolit padat yang menggunakan modifikasi material separator dengan jenis yang berbeda. Hal ini dikarenakan separator berfungsi untuk menghambat pertumbuhan dendrite, sehingga dapat memperpanjang umur baterai.

Adapun parameter yang diteliti pada material separator yakni ketebalan dan porositas, dimana kedua parameter tersebut berpengaruh pada proses transfer ion litium sehingga akan berimbas pada kapasitas penyimpanan baterai, impedansi yang dibentuk, dan kemampuan repetisi baterai dalam melakukan pengisian dan penyaluran energi. Adapun metode yang digunakan pada penelitian ini adalah eksperimen dengan membuat spesimen baterai komposit hibrida dalam bentuk pouch cell. Komponen yang digunakan terdiri dari *solid polymer electrolyte* (SPE) sebagai sistem elektrolit yang terdiri dari campuran elektrolit cair konvensional, epoksi resin, dan *hardener*. Material katoda menggunakan NMC 532, anoda menggunakan graphite konvensional, dan separator menggunakan beberapa variasi material pembanding yaitu GF WR 200, GF WR 50, dan separator konvensional Whatmann. Untuk mempelajari performa elektrokimia pada masing-masing baterai komposit hibrida, dilakukan pengujian *charge-discharge* (CD), *electrochemical impedance spectroscopy* (EIS), dan *cyclic voltammetry* (CV).

Hasil menunjukkan bahwa baterai litium dengan separator GF WR 200 menghasilkan impedansi paling kecil dikarenakan separator memiliki porositas tertinggi. Sementara, baterai litium dengan separator GF WR 50 paling unggul pada uji CD dan CV, dengan kapasitas discharging 0,147 mAh dan charging sebesar 0,364 mAh dikarenakan separator memiliki ketebalan paling tipis. Dari hasil tersebut, baterai komposit hibrida dengan separator GF WR 50 memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut dengan melakukan modifikasi pada separator sehingga dapat mengurangi nilai impedansi. Dengan demikian, hal ini dapat mencapai kondisi baterai yang ideal dengan kemampuan repetisi dan kapasitas penyimpanan dan penyaluran energi tinggi serta impedansi yang rendah.

Kata Kunci : Baterai Komposit Hibrida, Separator, *Charge-discharge*, *Cyclic Voltammetry*, *Electrochemical Impedance Spectroscopy*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

STUDY OF THE EFFECT OF VARIATION OF SEPARATOR ON ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF HYBRID COMPOSITES BATTERY

Student Name / NRP : **Bagus Alifah Hasyim / 0211184000107**
Department : **Mechanical Engineering INDSYS - ITS**
Advisor : **Putu Suwarta, S.T. M.Sc. Ph.D**

Abstract

Lithium ion battery (LIB), which use a conventional liquid electrolyte, usage has its own risk in safety aspect in leakage formation. Another failure of LIB caused by dendrite growth from anode component to cathode, which can lead to internal short circuit of the battery because the dendrite contacts the anode and cathode component. To solve the problems, this research proposed study in hybrid composite battery, which is a LIB that use solid basis electrolyte with modification in using variety of separator material. This modification is done because separator can inhibit the dendrite growth which can extend the battery life cycle.

This research focuses in evaluating the influence of thickness and porosity of the separator to the charge-discharge capacity and cycle, and the developed impedance. This is because both parameters can affect the lithium ionic transfer process in the battery. Experiment method will be use by manufacturing the battery using pouch cell method. The component consists of solid polymer electrolyte (SPE) with mixture of ionic liquid electrolyte, epoxy resin, and hardener. The cathode material uses NMC 532, anode use conventional graphite ply, and separator using material variation of glass fiber (GF) WR 50, glass fiber (GF) WR 200, and Whatmann separator as the conventional material. To evaluate the electrochemical performance, the battery will carry out some test such as charge-discharge (CD), cyclic voltammetry (CV), and electrochemical impedance spectroscopy (EIS).

Results shown that using GF WR 200 will have the lowest impedance in the battery because the separator has the highest porosity. While GF WR 50 are superior in charge-discharge and cyclic voltammetry tests, with its discharge capacity of 0,147 mAh and charge capacity of 0,364 mAh because of the separator has the smallest thickness. From these results, the hybrid composites battery using GF WR 50 has potential to be improved for further research by modify the separator material which can decrease the developed impedance. This will may develop ideal battery which has high charge-discharge capacity and cycle with low impedance.

Key Words : **Hybrid Composites Battery, Separator, Charge-discharge, Cyclic Voltammetry, Electrochemical Impedance Spectroscopy.**

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT yang telah memberi rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul “Studi Pengaruh Jenis Separator terhadap Performa Elektrokimia Baterai Berbasis Komposit Hibrida”. Laporan Tugas Akhir ini disusun sebagai syarat kelulusan program S-1 Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan dan penyusunan Laporan Tugas Akhir. Ucapan terima kasih Penulis sampaikan kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya kepada penulis.
2. Ayah, Bunda, Aisha, Kak Bela, Kak Chea, dan Kak Dwi yang selalu memberikan doa dan dukungan dalam berbagai bentuk kepada penulis.
3. Bapak Putu Suwarta, S.T., M.Sc, Ph.D., Bapak Achmad Subhan, S.T., M.T., dan Ibu Yatim Lailun Ni'mah, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing, yang telah memberikan ilmu, motivasi, kritik, dan saran kepada Penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
4. Ibu Ika Dewi Wijayanti, S.T., M.Sc, Ph.D., Ibu Dr. Ir. H.C. Kis Agustin, DEA. Bapak Fahmi Mubarak, S.T., M.Sc, Ph.D., dan Bapak Suwarno, S.T., M.Sc, Ph.D selaku Dosen Penguji Seminar Proposal dan Sidang Akhir, yang telah memberikan kritik serta saran untuk kemajuan Tugas Akhir.
5. Tim Riset Baterai Struktural Komposit, Daffa Satryo dan Habib Saifuddin Fathoni yang telah membantu dan berjuang dalam mengerjakan riset bersama ini.
6. Teman-teman Bayucaraka ITS yang sudah memberikan bantuan baik dukungan materi maupun moral pada penelitian ini.
7. Pihak-pihak lainnya yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu yang telah membantu pelaksanaan Tugas Akhir.

Semoga segala kebaikan dan pertolongan dari pihak di atas mendapat berkah dari Allah SWT. Penulis menyadari bahwa penyusunan Laporan Tugas Akhir ini belum sempurna dan masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu Penulis mengharapkan kritik dan saran dari semua pihak yang ingin memberikan kritik dan saran sebagai sebuah pengingat dan media pembelajaran bagi Penulis. Demikian Laporan Tugas Akhir ini Penulis susun, semoga bermanfaat bagi semua pihak. Akhir kata, Penulis ucapkan terima kasih.

Surabaya, 5 Juli 2022
Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	vii
APPROVAL SHEET.....	ix
PERNYATAAN ORISINALITAS	xi
STATEMENT OF ORIGINALITY	xiii
ABSTRAK	xv
ABSTRACT	xvii
KATA PENGANTAR.....	xix
DAFTAR ISI	xxi
.....	xxiv
DAFTAR GAMBAR.....	xxv
DAFTAR TABEL	xxxii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
BAB II DASAR TEORI.....	7
2.1 Penelitian Terdahulu.....	7
2.2 Mekanisme Kerja Baterai Litium	13
2.3 Sintesis <i>Solid Polymer Electrolytes</i> (SPE)	14
2.4 Baterai Komposit Hibrida.....	14
2.4.1 Konsep Material Penyimpan Energi berdasarkan Struktur Multifungsi	15
2.4.2 Konsep Material Penyimpan Energi berdasarkan Material Multifungsi.....	15
2.5 Separator.....	16
2.5.1 <i>Microporous Film</i>	17
2.5.2 <i>Nonwoven Separator</i>	17
2.5.3 <i>Ion Exchange Membranes</i>	17
2.5.4 <i>Supported Liquid Membranes</i>	17
2.5.5 <i>Solid Polymer Electrolyte</i>	17
2.5.6 <i>Solid Ion Conductors</i>	18
2.6 Fenomena pada Baterai Litium.....	18
2.7 Metode Pengujian	19
2.7.1 Cyclic Voltammetry (CV)	19
2.7.2.1 Reversible	20
2.7.2.2 Quasi Reversible.....	21
2.7.2.3 Irreversible.....	21
2.7.2 Chrono Potensiomerty Test	21
2.7.3 Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)	22
2.7 Teori Statistik pengujian <i>one sample-T</i>	26
2.9 Kontribusi penelitian	27

BAB III METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1 Flowchart Penelitian	29
3.2 Alat.....	31
3.3 Bahan	34
3.4 Langkah Penelitian.....	35
3.3.1 Studi Literatur	35
3.3.2 Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian	35
3.3.3 Pengukuran Ketebalan Separator	35
3.3.4 Pembuatan <i>Solid Polymer Electrolyte</i> (SPE)	37
3.3.5 Manufaktur <i>Pouch Battery</i> dan Variasi Lapisan <i>Separator</i>	38
3.3.6 Pengujian <i>Cyclic Voltammetry</i>	40
3.3.7 Pengujian <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS)	40
3.3.8 Pengujian <i>charge-discharge</i> (CD)	41
3.3.9 Pengamatan menggunakan <i>Optical Microscope</i>	42
3.4 Alokasi Waktu Pengerjaan Penelitian.....	42
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	43
4.1 Hasil Pengukuran Parameter Material Separator	43
4.1.1 Uji <i>one sample-T</i> GF WR 200	43
4.1.2 Uji <i>one sample-T</i> GF WR 50	49
4.1.3 Uji <i>one sample-T</i> Separator Whatmann	56
4.2 Hasil Pengujian <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS)	60
4.2.1 Hasil Pengujian EIS untuk spesimen GF WR 200.....	61
4.2.2 Hasil Pengujian EIS untuk spesimen GF WR 50	64
4.2.3 Hasil Pengujian EIS untuk spesimen Whatmann Separator	68
4.2.4 Perbandingan Pengujian EIS Pada Setiap Variasi dengan Suhu Sama.....	72
4.2.5 Analisis Pengujian EIS berdasarkan variasi penggunaan separator berbeda.....	72
4.3 Hasil Pengujian <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV)	80
4.3.1 Hasil Pengujian CV pada spesimen GF WR 50.....	80
4.3.2 Hasil Pengujian CV pada spesimen GF WR 200.....	81
4.3.3 Hasil Pengujian CV pada spesimen Whatmann.....	82
4.3.4 Perbandingan Hasil Pengujian CV dengan Variasi Jenis Separator	83
4.4 Hasil Pengujian <i>Charge-Discharge</i> (CD).....	85
4.4.1 Hasil Pengujian CD pada spesimen GF WR 50.....	85
4.4.2 Hasil Pengujian CD pada Spesimen GF WR 200	86
4.4.3 Hasil Pengujian CD pada spesimen Whatmann.....	88
4.4.4 Analisa Hasil pengujian CD dan CV dengan pengaruh penggunaan jenis separator 90	
4.5 Hasil Pengamatan <i>Optical Microscopy</i>	92
BAB V.....	95
KESIMPULAN DAN SARAN.....	95
5.1 Kesimpulan	95
5.2 Saran.....	95
DAFTAR PUSTAKA	96
LAMPIRAN.....	98

BIODATA 101

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Statistik dari kecelakaan pada berbagai jenis merek kendaraan listrik produksi Tiongkok yang dilaporkan ke media Tiongkok pada rentang tahun 2020-2022 (carnewschina.com, 2022).....	2
Gambar 2.1 Hasil pengamatan melalui <i>scanning electron microscopy</i> (SEM) pada (a) separator jenis PP <i>membrane</i> pada skala 1 μm dan (b) separator PP Fiber pada skala 50 μm (Klein, et al., 2022).....	7
Gambar 2.2 Performa elektrokimia yang dilihat menggunakan siklus penggunaan baterai menggunakan katoda NCM523 dengan variasi <i>separator PP membrane</i> dan PP <i>fiber</i> tegangan operasi berbeda pada PP <i>membrane</i> (f) tegangan operasi sama pada jenis <i>separator</i> berbeda (Klein, et al., 2022).....	8
Gambar 2.3 Hasil analisis SEM pada (a) <i>separator</i> jenis PP <i>membrane</i> dan (j) <i>separator</i> jenis PP <i>fiber</i> yang diobservasi pada anoda masing-masing baterai (Klein, et al., 2022)	9
Gambar 2.4 Pengujian analisis LA-ICP-MS pada anoda masing-masing baterai setelah 100 siklus pengecasan (Klein, et al., 2022)	9
Gambar 2.5 Produk baterai komposit hibrida yang dibuat menggunakan <i>pouch cell</i> (Asp, et al., 2021).....	10
Gambar 2.6 Pengamatan SEM pada baterai komposit hibrida dengan <i>separator</i> (a) <i>Whatman GF/A</i> dan (b) <i>GF plain weave</i> . Hasil pengamatan menunjukkan bahwa penggunaan <i>separator glass fiber plain weave</i> dapat menghasilkan jarak antara katoda dan anoda yang lebih tipis (Asp, et al., 2021)	11
Gambar 2.7 Hasil pengujian elektrokimia pada kedua penggunaan variasi <i>separator</i> (Asp, et al., 2021).....	11
Gambar 2.8 Kapasitas yang dihasilkan dari pengujian <i>charge-discharge</i> (Kannan , Terala, Moss, & Weatherspoon, 2018).....	12
Gambar 2.9 Hasil pengujian <i>electrochemical impedance spectroscopy</i> (EIS) (Kannan , Terala, Moss, & Weatherspoon, 2018).....	12
Gambar 2.10 Skema dari mekanisme kerja baterai lithium ion (Scrosati & Garche, 2009)	13
Gambar 2.11 Konsep material penyimpan energi pada level struktur (Pereira, Guo, Nieh, Arias, & Hanh, 2009).....	15
Gambar 2.12 Susunan baterai komposit dengan menggunakan material <i>carbon fiber</i> , <i>glass fiber</i> , dan <i>structural electrolyte</i> (Carlson, 2013).....	16
Gambar 2.13 Proses pembentukan lapisan SEI (Pinson & Bazant)	19
Gambar 2.14 Perbedaan grafik tegangan vs waktu antara <i>linier swept</i> dan <i>cyclic voltammetry</i> (kiri) dan hasil <i>plotting cyclic voltammetry</i> reaksi puncak katodik dan anodik (kanan) (Kim, et al., 2020).....	20
Gambar 2.15 <i>Cyclic Voltammogram</i> proses reversible (Linden & Reddy, 1995).....	20
Gambar 2.16 <i>Cyclic Voltammogram</i> proses quasi reversible (Linden & Reddy, 1995).....	21
Gambar 2.17 <i>Cyclic Voltammogram</i> proses irreversible (Linden & Reddy, 1995).....	21
Gambar 2.18 Contoh Kurva <i>Charge-Discharge</i> pada baterai LiMn_2O_4 (Pyun , Shin, Lee, & Go, 2004).....	22
Gambar 2.19 Ilustrasi dari persamaan tegangan dan arus yang dibentuk saat diberikan tegangan AC dengan frekuensi angular sebesar ω (Choi W. , Shin, Kim, Choi, & Yoon, 2020)	23
Gambar 2.20 Hasil plot nilai impedansi imajiner dan real pada kurva Nyquist (Wardhani, Ni'mah , & Harmami, 2017).....	24

Gambar 2.21 Sirkuit ekuivalen (a) dan plot Nyquist (b) pada analisis impedansi menggunakan rangkaian Randles Cell (Choi W. , Shin, Kim, Choi, & Yoon, 2020).....	25
Gambar 2.22 Interpretasi rangkaian sirkuit baterai pada konstruksi baterai litium (Westerhoff, Kurbach, Lienesch, & Kurrat, 2016).....	25
Gambar 2.23 Tabel distribusi t (Blank, 1982)	27
Gambar 3.1 Flowchart penelitian bagian 1	29
Gambar 3.2 Flowchart penelitian bagian 2. Pengujian elektrokimia dilakukan dengan menggunakan satu rangkaian material baterai yang sama secara berurutan sesuai dengan <i>flowchart</i>	30
Gambar 3.3 Metode pengamatan ketebalan pada separator menggunakan <i>optical microscopy</i>	36
Gambar 3.4 Metode pengamatan porositas pada spesimen <i>glass fiber</i> dengan menghitung luas daerah kosong. Adapun perhitungan daerah kosong dapat mengukur dimensi panjang dan lebar daerah kosong.	36
Gambar 3.5 Skema pembuatan solid polymer electrolyte (SPE).....	38
Gambar 3.6 <i>Stacking sequence</i> pada baterai komposit hibrida beserta dengan dimensi. Adapun dimensi separator menggunakan dimensi 100 x 35 mm. Sementara untuk katoda menggunakan dimensi 90 x 25 mm.....	39
Gambar 3.7 Proses pembuatan <i>stack</i> baterai komposit hibrida dengan melakukan proses <i>stacking</i> di dalam <i>aluminium pouch</i> [1] dilanjutkan dengan menambahkan SPE yang telah di sintesis di dalam <i>glovebox</i> [2] dan yang terakhir yakni melakukan proses penyegelan pada <i>pouch</i> menggunakan klip kertas dengan tambahan struktur penguat berupa akrilik untuk meratakan SPE di seluruh bagian baterai [3]	40
Gambar 3.8 Metode pengukuran R_e dan R_{ct} dari hasil plot Nyquist Non-Regresi. R_e merupakan hambatan dari komponen elektrolit yang diukur menggunakan jarak dari sumbu y dan titik pertama pada frekuensi tertinggi Nyquist. Sementara R_{ct} merupakan hambatan dari proses transfer ion litium antar katoda-anoda. Hambatan ini diukur dengan mengetahui diameter dari setengah lingkaran yang tidak sempurna.	41
Gambar 4.1 Plot nilai data individual dari hasil nilai pengukuran luas pori sebanyak 10 kali pengukuran (a) dan ketebalan sebanyak 10 kali pengukuran (b) pada pengujian statistik pertama separator GF WR 200. Pada data pengukuran luas pori terdapat 5 data yang berada diluar batas CI (a) dan terdapat 5 data yang berada diluar batas CI pada pengukuran ketebalan separator (b).	44
Gambar 4.2 Plot nilai data individual dari hasil eliminasi data pengujian statistik pertama pada pengukuran data luas pori sebanyak 5 data (a) dan pengukuran data ketebalan sebanyak 5 data (b) pada pengujian statistik kedua separator GF WR 200. Pada data pengukuran luas pori, terdapat satu data yang berada diluar batas CI (a) dan pada data pengukuran ketebalan terdapat satu data yang berada diluar batas CI (b).	46
Gambar 4.3 Plot nilai data individual dari hasil eliminasi data pengujian statistik kedua pengukuran luas pori sebanyak 4 data (a) dan pengukuran ketebalan sebanyak 4 data (b) pada pengujian statistik ketiga separator GF WR 200. Seluruh data pengukuran sudah berada di dalam batas CI pada kedua parameter pengukuran.....	47
Gambar 4.4 Proses pengukuran ketebalan separator glass fiber WR200 dengan mikroskop mikroskop skala gambar 100 μm . Dimana pada area kuning menunjukkan <i>glass fiber</i> dengan struktur yang terlihat seperti “ <i>uni-directional</i> ” dari pengamatan mikroskop. Sementara pada	

daerah dengan label “Resin” menunjukkan daerah resin epoksi yang digunakan untuk mencetak spesimen GF WR 200 sehingga dapat dilihat ketebalan pada luasan penampang spesimen. ..48

Gambar 4.5 Hasil pengamatan mikroskop pada separator GF WR 200 dengan skala gambar 100 μm untuk mencari luasan pori yang dihitung dengan mengukur dimensi panjang dan lebar dari daerah yang kosong dengan serat gelas. Adapun morfologi yang terlihat pada gambar dimana GF WR 200 memiliki struktur anyaman *woven*.49

Gambar 4.6 Plot nilai data individual dari hasil pengukuran luas pori sebanyak 10 kali pengambilan data (a) dan ketebalan sebanyak 10 kali pengambilan data (b) pada pengujian statistik pertama separator GF WR50. Terdapat 4 data pengukuran yang berada diluar batas CI pada pengukuran area pori (a) dan terdapat 3 data pengukuran yang berada diluar batas CI pada pengukuran ketebalan separator (b).....50

Gambar 4.7 Plot nilai data individual dari hasil eliminasi data pengukuran luas pori dengan 6 data pengukuran (a) dan hasil eliminasi data ketebalan sebanyak 7 data pengukuran (b) pada pengujian statistik kedua separator GF WR 50. Terdapat satu data pengukuran luas pori yang masih berada diluar batas CI (a) dan 3 data pengukuran ketebalan yang berada diluar batas CI (b).51

Gambar 4.8 Plot nilai data individual dari hasil eliminasi pengukuran luas pori dengan data akhir sebanyak 5 data pengukuran (a) dan eliminasi data ketebalan dengan data akhir sebanyak 3 data pengukuran (b) pada pengujian statistik ketiga separator GF WR 50. Pada data pengukuran pori, terdapat satu data pengukuran yang berada diluar batas CI (a), sementara pada pengukuran ketebalan seluruh data ukur sudah berada di dalam rentang CI (b).....53

Gambar 4.9 Hasil pengambilan gambar pada separator GF WR 50 menggunakan mikroskop dengan skala 100 μm untuk mengambil data pengukuran ketebalan. Di dalam area persegi warna kuning merupakan separator GF WR 50 dengan bentuk morfologi yang dilihat dari sisi penampang nampak memiliki arah serat “*uni-directional*”. Sementara diluar daerah persegi kuning merupakan resin yang digunakan sebagai material cetakan agar dimensi dari serat tidak berubah saat dilakukan pengukuran.54

Gambar 4.10 Plot nilai data individual dari hasil pengukuran luas pori pada pengujian statistik keempat separator GF WR 50. Adapun seluruh data pengukuran sudah berada di dalam rentang CI.55

Gambar 4.11 Hasil pengamatan morfologi dari separator GF WR 50 dengan skala pengukuran 50 μm yang ditunjukkan pada garis skala di bawah kanan gambar. Adapun luasan pori yang dihitung dengan mengukur dimensi panjang dan lebar dari daerah yang tidak terisi serat (daerah di dalam persegi kuning). Terlihat bahwa bentuk dari GF WR 50 memiliki morfologi serat *woven*.56

Gambar 4.12 Plot nilai data individual dari hasil pengukuran ketebalan separator jenis Whatmann pada pengujian statistik pertama sebanyak 10 kali pengambilan data pengukuran. Terdapat 6 data pengukuran yang berada diluar batas CI.57

Gambar 4.13 Plot nilai data individual pengukuran ketebalan separator jenis Whatmann pada pengujian statistik kedua. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh data pengukuran sudah berada di dalam rentang CI.....58

Gambar 4.14 Hasil pengamatan dan pengukuran separator whatmann menggunakan mikroskop dengan skala gambar 100 μm yang terletak di bawah kanan masing-masing gambar. Adapun identifikasi dari material separator Whatmann dapat dilakukan dengan melihat perubahan struktur morfologi dari hasil pengamatan. Dimana separator whatmann dapat dibedakan dengan melihat morfologinya yang lebih halus dibandingkan dengan daerah resin yang digunakan sebagai material pencetak (daerah separator Whatmann ditunjukkan di dalam persegi kuning). Struktur morfologi yang dimiliki oleh separator whatmann memiliki struktur dengan

discontinuous fiber. Dimana apabila dilihat menggunakan SEM, maka terlihat bahwa susunan serat memiliki ketidakteraturan pada seluruh sisi.	59
Gambar 4.15 Hasil pengamatan SEM pada separator Whatmann dengan variasi perbesaran gambar (a) 2000 kali, (b) 500 kali, (c) 5000 kali, dan (d) 10000 kali. Dimana pengamatan menunjukkan morfologi yang dimiliki oleh separator Whatmann yakni <i>discontinuous fiber</i> dengan ukuran dan susunan yang acak pada tiap bagian	59
Gambar 4.16 Hasil Pengujian EIS spesimen separator GF WR 200 dengan variasi suhu 25, 30, 50, dan 70 °C. Plot Nyquist menunjukkan diameter kurva yang semakin kecil dengan meningkatnya suhu pengujian. Kurva Nyquist yang dihasilkan pada hambatan warburg (yang ditunjukkan dengan tanda panah) menunjukkan hambatan difusi litium ion yang masih tinggi.	61
Gambar 4.17 Hasil pengujian spesimen separator GF 200 dengan suhu 50 °C dan 70 °C sebagai perbesaran untuk melihat daerah setengah lingkaran secara detail.....	61
Gambar 4.18 Hasil <i>fitting</i> regresi dengan data plot Nyquist spesimen GF WR 200 pada variasi (a) suhu 25 °C, (b) suhu 30 °C, (c) suhu 50 °C, dan (d) suhu 70 °C. Hasil regresi pada suhu pengujian 70 °C memiliki hasil regresi paling tidak sesuai dibandingkan dengan suhu pengujian lainnya dengan menggunakan konfigurasi sirkuit ekuivalen yang sama.	62
Gambar 4.19 Hasil Pengujian EIS spesimen separator GF WR 50 dengan variasi suhu pengujian 25, 30, 50, dan 70 °C. Diameter setengah lingkaran dari plot Nyquist yang semakin mengecil dengan meningkatnya suhu pengujian.	64
Gambar 4.20 Hasil pengujian spesimen separator GF 50 dengan suhu 50 °C dan 70 °C sebagai perbesaran kurva dari Gambar 4.19.	65
Gambar 4.21 Hasil <i>fitting</i> regresi dengan data plot Nyquist spesimen GF WR 50 dengan variasi pengujian pada (a) suhu 25 °C, (b) suhu 30 °C, (c) suhu 50 °C, dan (d) suhu 70 °C. Terlihat bahwa seluruh <i>fitting</i> regresi sudah mendekati hasil Nyquist sebenarnya secara visual, namun masih terdapat ketidaksesuaian pada regresi di frekuensi rendah pada suhu pengujian 25 dan 50 °C.....	66
Gambar 4.22 Hasil Pengujian EIS spesimen separator Whatmann dengan variasi suhu pengujian 25, 30, 50, dan 70 °C. Hasil menunjukkan diameter setengah lingkaran dari masing-masing pengujian yang semakin mengecil dengan meningkatnya suhu pengujian.....	68
Gambar 4.23 Hasil pengujian spesimen separator Whatmann dengan suhu 50 °C dan 70 °C sebagai perbesaran dari Gambar 4.23.	68
Gambar 4.24 Hasil <i>fitting</i> regresi dengan data plot Nyquist spesimen Whatmann pada variasi (a) suhu 25 °C, (b) suhu 30 °C, (c) suhu 50 °C, dan (d) suhu 70 °C. Terlihat bahwa hasil regresi pada suhu pengujian 25, 30, dan 50 °C cukup mengikuti hasil plot Nyquist sebenarnya walaupun terdapat <i>offset</i> di daerah frekuensi rendah pada suhu pengujian 25 dan 30 °C. Adapun hasil regresi suhu pengujian 70 °C yang menunjukkan model yang kurang pas khususnya pada frekuensi tinggi, dengan model regresi yang tidak membentuk setengah lingkaran pada frekuensi tinggi.	69
Gambar 4.25 Perbandingan masing-masing penggunaan separator pada setiap variasi (a) suhu 25 °C, (b) suhu 30 °C, (c) suhu 50 °C, dan (d) suhu 70 °C. Dimana terlihat bahwa baterai dengan separator GF WR 200 memiliki diameter lingkaran terkecil pada suhu pengujian 25 °C dan 30 °C.....	72
Gambar 4.26 Grafik perbandingan hambatan <i>charge transfer</i> antara separator GF WR 50, GF WR 200, dan separator Whatmann dengan variasi suhu berdasarkan hasil data regresi	73
Gambar 4.27 Grafik perbandingan hambatan <i>charge transfer</i> antara penggunaan separator GF WR 50, GF WR 200, dan separator whatmann dengan variasi suhu pengujian berdasarkan hasil visualisasi plot Nyquist	75

Gambar 4.28 Grafik perbandingan nilai dari koefisien difusi ion litium (Warburg) pada masing-masing separator dengan variasi suhu pengujian. Terlihat bahwa tren koefisien difusi yang meningkat dengan peningkatan suhu pengujian, walaupun mengalami fluktuasi yang disebabkan oleh nilai <i>error</i> yang tinggi dari hasil regresi.	77
Gambar 4. 29 Hasil perbesaran nilai dari koefisien difusi ion litium pada separator Whatmann sebagai perbesaran dari Gambar 4.28. Terdapat penurunan nilai koefisien difusi pada suhu pengujian 70 °C dikarenakan hasil <i>error</i> regresi pada <i>equivalent circuit</i> suhu pengujian 70 °C yang masih tinggi.	78
Gambar 4.30 Hasil pengujian EIS padabaterai berbasis LiFePO ₄ /Grafit dengan elektrolit cair yang diuji sebelum dan sesudah pemberian siklus pengisian dan penyaluran dengan <i>c-rates</i> 1C pada tegangan operasi 2.5 V. Setelah dilakukan aktivasi, maka hambatan warburg yang ditandai dengan tinggi garis pada frekuensi rendah yang menurun dibanding spesimen baterai yang tidak diberikan aktivasi energi terlebih dahulu (Abe, Hori, & Kumagai, 2019)	79
Gambar 4.31 Hasil Pengujian <i>cyclic voltammetry</i> (CV) pada spesimen separator GF WR 50 dengan 5 siklus. Terdapat penurunan dari arus saat proses oksidasi pada siklus 1-2 dengan siklus 3-4. Adapun arus reduksi dari siklus 3-4 dan 5 memiliki nilai yang mirip. Adapun pada siklus 1-2 terdapat data yang terputus menunjukkan adanya arus pendek listrik (ditunjukkan pada dua persegi) secara temporer.	80
Gambar 4.32 Hasil Pengujian <i>cyclic voltammetry</i> (CV) Pada Spesimen Separator GF WR 200 dengan 5 siklus. Terdapat penurunan nilai arus oksidasi pada siklus 1-2 dan siklus 3-4. Adapun arus reduksi pada siklus 3-4 dan 5 memiliki nilai yang dekat.	81
Gambar 4.33 Hasil Pengujian <i>cyclic voltammetry</i> (CV) Pada Spesimen Separator Whatmann dengan 5 siklus pengujian	82
Gambar 4.34 Hasil pengujian <i>cyclic voltammetry</i> (CV) pada spesimen separator Whatmann (perbesaran dari Gambar 4.31)	82
Gambar 4.35 Komparasi Pengujian <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV) Pada Masing-Masing Variasi Separator dengan pengujian sebanyak 5 siklus.	83
Gambar 4.36 Grafik <i>cyclic voltammetry</i> (CV) pada baterai litium berbasis LiFePO ₄ /Grafit dengan menggunakan <i>C-rates</i> 1C dengan <i>scan rate</i> CV sebesar 0.1 mV.s ⁻¹ . Grafik menunjukkan bahwa semakin besar pemberian siklus pengisian dan penyaluran daya pada baterai, maka akan menghasilkan arus yang lebih tinggi pada masing-masing proses oksidasi maupun reduksi. Adapun CV dilakukan dengan rentang voltase pada 4.2-2.5 V (Abe, Hori, & Kumagai, 2019)	84
Gambar 4.37 Hasil pengujian <i>charge-discharge</i> (CD) pada spesimen separator GF WR 50 dengan 8 siklus pengisian dan penyaluran daya baterai.	85
Gambar 4.38 Hasil <i>plotting</i> nilai dari kapasitas <i>charging</i> dan <i>discharging</i> pada spesimen baterai menggunakan separator GF WR 50. Adapun tren yang dibentuk bahwa kapasitas <i>charging</i> maupun <i>discharging</i> selalu mengalami penurunan seiring bertambahnya siklus pengisian dan penyaluran energi baterai.....	86
Gambar 4. 39 Hasil pengujian <i>charge-discharge</i> (CD) pada spesimen separator GF WR 200 dengan 8 siklus pengisian dan penyaluran daya baterai. Dari hasil grafik menunjukkan bahwa baterai dengan separator GF WR 200 tidak <i>reversible</i>	86
Gambar 4.40 Hasil plot nilai dari kapasitas <i>charging</i> dan <i>discharging</i> (CD) pada spesimen baterai menggunakan separator GF WR 200. Adapun tren yang dibentuk bahwa kapasitas <i>charging</i> maupun <i>discharging</i> selalu mengalami penurunan seiring bertambahnya siklus pengisian.....	87
Gambar 4.41 Hasil pengujian <i>charge-discharge</i> (CD) pada Spesimen Separator Whatmann menggunakan 8 siklus pengujian.....	88

Gambar 4.42 Hasil pengujian <i>charge-discharge</i> (CD) pada spesimen separator Whatmann yang diperbesar dari gambar pengujian CD pada Gambar 4.39	88
Gambar 4.43 Hasil plotting nilai dari kapasitas <i>charging</i> dan <i>discharging</i> pada spesimen baterai menggunakan separator Whatmann. Adapun tren yang dibentuk bahwa kapasitas <i>charging</i> selalu mengalami penurunan seiring bertambahnya siklus. Adapun nilai dari kapasitas <i>discharging</i> yang stabil pada ordo -8 Ahr.....	89
Gambar 4.44 Hasil plot kapasitas <i>charging</i> dan <i>discharging</i> (CD) pada masing-masing spesimen separator. Hasil menunjukkan bahwa seluruh spesimen mengalami penurunan kapasitas <i>charging</i> dan <i>discharging</i> dengan bertambahnya siklus baterai.	90
Gambar 4.45 Penampang spesimen GF WR 50 (a) sebelum dan (b) sesudah diuji elektrokimia. Terlihat tidak ada perbedaan yang signifikan dari kedua spesimen. Perlu jadi catatan bahwa pengamatan dilakukan menggunakan spesimen yang berbeda.	92
Gambar 4.46 Penampang spesimen GF WR 200 (a) sebelum dan (b) sesudah diuji elektrokimia. Terlihat bahwa tidak ada perbedaan yang cukup signifikan di antara kedua spesimen uji.	92
Gambar 4.47 Penampang spesimen Whatmann (a) sebelum dan (b) sesudah diuji elektrokimia. Terlihat bahwa tidak ada perbedaan yang cukup signifikan di antara kedua spesimen uji.	93

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Daftar peralatan yang digunakan di Pusat Riset Fisika, Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN) Puspiptek, Serpong.....	31
Tabel 3.2 Alokasi waktu penelitian	42
Tabel 4.1 Hasil pengujian statistik pertama pengukuran GF WR 200 pada <i>void area</i> dan <i>thickness</i> dengan ukuran sampel pengukuran 10 kali.....	43
Tabel 4.2 Hasil pengujian statistik kedua dengan mengeliminasi 5 data <i>void area</i> dan 5 data <i>thickness</i> pada separator GF WR 200.....	45
Tabel 4.3 Hasil pengujian statistik ketiga dengan mengeliminasi 1 data <i>void area</i> dan 1 data <i>thickness</i> pada separator GF WR 200.....	47
Tabel 4.4 Hasil pengujian statistik pertama pengukuran GF WR 50 pada <i>void area</i> dan <i>thickness</i> dengan ukuran sampel pengukuran 10 kali.....	49
Tabel 4.5 Hasil pengujian statistik kedua dengan mengeliminasi 4 data <i>void area</i> dan 3 data <i>thickness</i> pada separator GF WR 50.....	51
Tabel 4.6 Hasil pengujian statistik ketiga dengan mengeliminasi 1 data <i>void area</i> dan 4 data <i>thickness</i> pada separator GF WR 50.....	52
Tabel 4.7 Hasil pengujian statistik keempat dengan mengeliminasi 1 data <i>void area</i> pada separator GF WR 50.....	54
Tabel 4.8 Hasil pengujian statistik pertama pengukuran separator Whatmann pada <i>thickness</i> dengan ukuran sampel pengukuran 10 kali	56
Tabel 4.9 Hasil pengujian statistik kedua dengan mengeliminasi 6 data <i>thickness</i> pada separator Whatmann	57
Tabel 4.10 Rekapitulasi parameter ketebalan dan porositas dari setiap variasi material separator.....	60
Tabel 4.11 Tabulasi data parameter regresi dari plot Nyquist spesimen GF WR 200	63
Tabel 4.12 Tabulasi data parameter regresi dari plot Nyquist spesimen GF WR 50	67
Tabel 4.13 Tabulasi data parameter regresi dari plot Nyquist spesimen Whatmann	70
Tabel 4.14 Tabulasi hasil R_e dan R_{ct} pada setiap separator dengan variasi suhu berdasarkan regresi	73
Tabel 4.15 Hasil impedansi bulk dan charge transfer berdasarkan visualisasi dari plot Nyquist	74
Tabel 4.16 Hasil Pengujian CV pada Seluruh Variasi Separator	84
Tabel 4.17 Hasil Rekapitulasi Kapasitas <i>Charging</i> dan <i>Discharging</i> pada Siklus Pertama	91

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I PENDAHULUAN

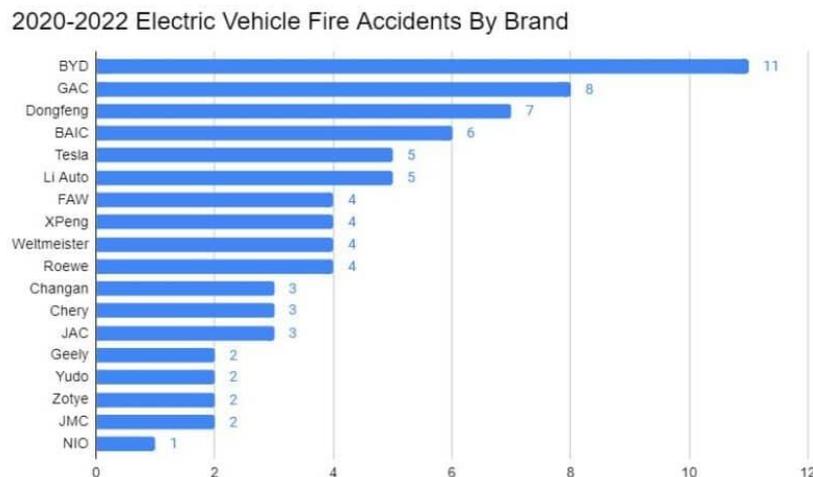
1.1 Latar Belakang

Baterai litium merupakan salah satu media penyimpan energi yang saat ini banyak digunakan dalam berbagai macam sektor teknologi, seperti halnya pada sektor transportasi. Dibandingkan dengan baterai aki konvensional, baterai litium memiliki keunggulan pada kapasitas penyimpanan energi yang tinggi dan umur penggunaan yang lebih lama. Pada baterai litium dengan basis Nikel-Mangan-Kobalt, memiliki kapasitas energi spesifik sebesar 150 Wh/Kg, dengan perbandingan kapasitas penyimpanan baterai aki hanya sebesar 30 Wh/Kg. Sementara untuk siklus penggunaan baterai litium dapat mencapai 1900 kali penggunaan dengan kapasitas energi yang dapat disalurkan yakni 80% dari total energi yang dimiliki, dengan perbandingan baterai aki memiliki siklus umur sebesar 1200 kali penggunaan dengan hanya 50% energi yang dapat tersalurkan (Mobbs, 2015).

Pada umumnya, baterai litium terdiri dari 4 komponen utama. Diantara-Nya yaitu katoda, anoda, separator, dan elektrolit. Pada saat proses pengisian baterai, unsur litium berbentuk ion yang awalnya berikatan dengan material katoda akan berpindah ke anoda dengan proses difusi melalui material elektrolit. Ion litium yang berdifusi kemudian akan terinsersi pada struktur material anoda. Proses ini memiliki istilah yakni *charging* atau dalam bahasa kimia yaitu proses oksidasi. Selanjutnya saat daya pada baterai disalurkan, ion litium akan berdifusi kembali ke katoda melalui elektrolit sembari melepaskan elektron yang menempel pada anoda dan akan tersalurkan kembali ke katoda. Aliran elektron ini akan menghasilkan arus listrik yang dapat digunakan untuk menghidupkan perangkat elektronik seperti halnya motor pada kendaraan listrik. Adapun istilah proses ini yaitu *discharging* atau istilah dalam bahasa kimia yakni proses reduksi. Pada proses transfer ion, katoda dan anoda harus berada pada jarak tertentu agar kedua material tersebut tidak mengalami kontak secara fisik yang dapat menyebabkan kerusakan baterai berupa arus pendek listrik (Scrosati & Garche, 2009). Maka dari itu, material separator memiliki peran untuk memberikan batas kontak antar katoda dan anoda. Perlu menjadi catatan bahwa material separator yang digunakan selain mencegah terjadinya kontak antar katoda-anoda, material ini harus mampu memfasilitasi aktivitas transfer ion litium yakni dengan menggunakan material yang memiliki porositas tertentu (Arora & Zhang, 2004). Dengan demikian, separator menjadi salah satu komponen penting dalam baterai yang mengurangi risiko dalam halnya terjadi *short circuit* sehingga baterai tidak terbakar.

Dari mekanisme kerja yang telah dijelaskan, penggunaan baterai litium ini berpotensi menimbulkan permasalahan pada faktor keamanan. Baterai litium memiliki risiko untuk terbakar apabila komponen yang di dalamnya terpapar dengan udara bebas. Hal ini dikarenakan unsur litium yang bersifat reaktif khususnya dengan paparan oksigen dan air, sehingga dapat terbakar apabila terpapar. Salah satu faktor yang meningkatkan risiko baterai litium dapat terbakar yakni penggunaan elektrolit cair. Walaupun penggunaan elektrolit cair ini mampu meningkatkan kapasitas penyimpanan dan penyaluran energi baterai dengan sifat konduktivitas material yang tinggi, penggunaan elektrolit cair memiliki risiko dalam halnya kebocoran, stabilitas kimia yang rendah, dan sifatnya yang mudah terbakar (Aktas, Berkhof, Collins, Kersjes, & Uitzetter, 2017). Berdasarkan **Gambar 1.1**, menunjukkan data kecelakaan yang diakibatkan oleh baterai litium pada kendaraan listrik merek Tiongkok pada tahun 2020-2022. Dimana pada seluruh kecelakaan yang terjadi, 6 kecelakaan diakibatkan oleh tabrakan yang berakibat pada kebocoran elektrolit cair sehingga memicu kebakaran. Kemudian 38.5% dari seluruh insiden kebakaran terjadi pada proses pengisian baterai. Hal ini diakibatkan oleh pertumbuhan *dendrite* pada anoda ke arah katoda yang dapat menyebabkan kontak antara material katoda-anoda sehingga terjadi arus pendek listrik pada baterai. Fenomena

pertumbuhan ini tidak dapat dihindari pada baterai litium dikarenakan unsur litium yang mengalami reaksi dekomposisi oleh *polyether* pada elektrolit sehingga tumbuh *dendrite* yang berbentuk karbida litium. Dengan demikian, semakin tinggi penggunaan baterai maka *dendrite* yang terbentuk akan semakin besar sehingga apabila tidak diminimalisir, maka dapat mengurangi umur penggunaan dari baterai (Demers, et al., 2020).



Gambar 1.1 Statistik dari kecelakaan pada berbagai jenis merek kendaraan listrik produksi Tiongkok yang dilaporkan ke media Tiongkok pada rentang tahun 2020-2022 (carnewschina.com, 2022)

Dari peristiwa tersebut, muncul dua permasalahan utama. Diantara-Nya yaitu potensi kebocoran yang terjadi pada baterai litium akibat dari penggunaan elektrolit cair dan pertumbuhan *dendrite* yang dapat memicu terjadinya arus pendek listrik pada baterai. Untuk memecahkan masalah pertama, maka elektrolit cair dapat dilakukan substitusi menggunakan elektrolit padat. Baterai dengan elektrolit padat memiliki istilah yakni *solid-state battery* (SSB). Dengan menggantikan elektrolit cair pada baterai, maka SSB ini dapat mengurangi terjadinya kebocoran pada baterai sehingga lebih aman untuk digunakan dibandingkan dengan baterai dengan elektrolit cair. Namun sesuai dengan bentukannya yang padat, menjadikan elektrolit padat memiliki konduktivitas yang lebih rendah dibandingkan dengan elektrolit cair sehingga akan menghasilkan kapasitas baterai yang lebih rendah dibandingkan dengan baterai elektrolit cair. Dengan menggunakan material aktif yang sama, maka penggunaan baterai elektrolit padat baru mampu menggunakan kapasitas penyimpanan dan penyaluran energi sekitar 10-15% dari kapasitas teoritis (Aktas, Berkhof, Collins, Kersjes, & Uitzetter, 2017).

Untuk permasalahan kedua, mengurangi potensi pertumbuhan *dendrite*, dapat melakukan modifikasi pada area di antara anoda-katoda, yakni dengan menambahkan material separator yang dapat menghalangi pertumbuhan *dendrite* yang menuju katoda sehingga dapat mengurangi peluang untuk terjadinya arus pendek listrik. Perlu menjadi catatan bahwa material separator yang digunakan harus memiliki karakteristik yakni isolator listrik yang baik dan mampu membantu menghantarkan ion-ion yaitu dengan kemampuannya yang dapat ter-basahi dengan elektrolit secara menyeluruh sehingga ion-ion tetap mampu melewati material separator. Maka dari itu, perlu untuk mengetahui jenis material yang tepat untuk mencegah terjadinya pertumbuhan *dendrite* sehingga dapat menambah siklus umur baterai (Arora & Zhang, 2004).

Untuk membuat solusi tersebut menjadi satu-kesatuan prototipe, maka dari itu pada penelitian ini akan melakukan studi lebih lanjut mengenai baterai komposit hibrida dari performa elektrokimia. Dimana baterai komposit hibrida merupakan jenis baterai litium yang tersusun dari material elektrolit padat dan material katoda-anoda-separator. Adapun istilah

“komposit hibrida” yang memiliki makna yaitu material penyusun baterai merupakan material yang memiliki fungsi selain digunakan dalam proses transfer ion untuk penyimpanan dan penyaluran daya pada baterai, fungsi sekunder yakni dapat menerima pembebanan mekanik layaknya material komposit pada umumnya yang merupakan material terdiri dari matriks dan *reinforcement*.

Adapun penelitian terdahulu yang memiliki konsep yang sama yakni dilakukan oleh professor Leif E. Asp. Dimana, penelitian tersebut melakukan sintesis pada *structural battery composites* yang terdiri dari penggunaan elektrolit padat berbasis *solid polymer electrolyte* (SPE) dengan material katoda LFP dan anoda *carbon fiber*. Adapun variasi yang digunakan pada penelitian yakni pada penggunaan dua jenis separator yang berbeda, yakni *glass fiber plain weave* dan separator konvensional jenis Whatmann. Kedua jenis separator tersebut memiliki perbedaan pada ketebalan serta morfologi, dimana *glass fiber* memiliki struktur dengan rajutan serat gelas yang halus, sedangkan separator Whatmann memiliki struktur serat dengan arah dan ukuran yang acak. Hasil menunjukkan bahwa penggunaan separator jenis *glass fiber plain weave* menghasilkan kapasitas energi sebesar 8.55 Ah kg^{-1} lebih besar dibandingkan dengan baterai menggunakan variasi separator jenis Whatmann, yakni sebesar 4.13 Ah kg^{-1} . Penelitian yang dilakukan tidak menjelaskan lebih lanjut mengenai performa elektrokimia lain dengan variasi jenis *separator* pada siklus pengisian sampai dengan baterai komposit hibrida mengalami penurunan performa. Penelitian ini hanya berfokus untuk mengevaluasi energi densitas yang dimiliki oleh masing-masing penggunaan jenis *separator* yang berbeda. Pengujian siklus pengisian baterai sangatlah penting untuk memprediksi batas umur dari pemakaian baterai (Asp, et al., 2021).

Kemudian, penelitian kedua yang dilakukan oleh Sven Klein membahas mengenai peran *separator* pada baterai sel grafit – litium ion terhadap performa elektrokimia yang dilihat melalui pengujian siklus pengisian. Dimana penelitian ini membandingkan penggunaan *separator* jenis *polypropylene* (PP) *membrane* dan *fiber*. Hasil pengujian menunjukkan penggunaan jenis *separator* PP *fiber* memiliki siklus penggunaan yang lebih tinggi sampai dengan 100 siklus. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan ketebalan separator, dimana jenis separator *fiber* lebih tebal dengan arsitektur yang berbeda dibandingkan dengan PP jenis *membrane*. Dengan demikian, penggunaan separator yang lebih tebal mampu menghambat pertumbuhan *dendrite*, sehingga arus pendek internal dapat ditunda (Klein, et al., 2022). Penelitian yang membahas penggunaan separator dengan variasi ketebalan dan porositas dibahas secara komprehensif pada penelitian Kannan, et al. Hasil menunjukkan bahwa porositas rendah akan menghasilkan kapasitas baterai yang lebih tinggi dengan impedansi yang lebih rendah (Kannan, Terala, Moss, & Weatherspoon, 2018).

Ketiga penelitian tersebut memiliki kesamaan yakni penelitian dilakukan dengan variasi material separator yang berbeda. Namun, ketiga penelitian tersebut memiliki kekosongan masing-masing, yakni pada jenis parameter yang diteliti pada separator yang digunakan. Seperti halnya pada Leif asp yang berfokus pada ketebalan dan morfologi, Sven Klein berfokus pada jenis material, morfologi, dan ketebalan, sementara Kannan et al berfokus pada porositas dan ketebalan separator. Maka dari itu, perlu dilakukan kajian lebih lanjut mengenai pengaruh dari jenis *separator* terhadap performa elektrokimia pada baterai komposit hibrida yang dilihat berdasarkan dari porositas dan ketebalan. Hal ini penting untuk mengisi kekosongan tersebut dengan menambahkan pengujian elektrokimia secara lengkap. Ketebalan dan porositas menjadi penting dikarenakan akan mempengaruhi volume dan massa baik dari elektrolit yang di serap maupun massa dari baterai komposit hibrida secara keseluruhan. Terlebih lagi, akan mempengaruhi performa mekanik walaupun pada penelitian ini tidak akan mengkaji lebih lanjut.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh dari penggunaan berbagai jenis material separator terhadap performa elektrokimia yang diukur menggunakan pengujian *electrochemical impedance spectroscopy* (EIS), *cyclic voltammetry* (CV), dan *charge-discharge* (CD)?
2. Bagaimana dengan *cycle time* dan kapasitas *charge-discharge* dari baterai yang disintesis berdasarkan pengujian CD?
3. Bagaimana dengan perilaku reaksi reduksi-oksidasi dari baterai berdasarkan pengujian CV?
4. Bagaimana fenomena impedansi yang terjadi pada baterai berdasarkan pengujian EIS?

1.3 Batasan Masalah

Sebelum melakukan penelitian, pembatasan pada beberapa aspek perlu dilakukan agar fokus pada penelitian ini dapat mengerucut pada tujuan yang telah dinyatakan. Adapun batasan yang dibuat mengacu pada kondisi sarana maupun prasarana yang ada pada tempat penulis melakukan penelitian, baik dalam bentuk keterbatasan bahan penelitian dan kemampuan pengujian maupun kondisi lingkungan saat dilakukan eksperimen. Adapun batasan masalah sebagai berikut.

1. Penggunaan *separator* pada baterai komposit hibrida menggunakan berbagai jenis material separator yakni *glass fiber* WR200, WR50, dan *whatmann* separator sebagai variabel kontrol.
2. Penggunaan komponen baterai komposit hibrida penunjang seperti cairan elektrolit dengan garam LiPF_6 1 M dengan pelarut EC : DMC 1:1, lapisan NMC532 sebagai katoda, lembaran *graphite* MTI sebagai anoda, dan *current collector* berupa tembaga dan aluminium menggunakan bahan yang tersedia pada pasaran sehingga performa elektrokimia pada komponen tersebut dianggap sudah teruji dan dapat diterima untuk membuat baterai komposit hibrida.
3. Campuran *solid polymer electrolyte* (SPE) antara sistem polimer dan sistem elektrolit cair dianggap homogen.
4. Pembuatan *pouch cell* dan SPE dilakukan di dalam *glovebox* yang dialirkan dengan gas argon dengan suhu 25°C , tekanan udara dibawah 0.27 mbar, kadar oksigen <1 ppm, dan kadar air <1 ppm.

1.4 Tujuan

Adapun tujuan dilaksanakan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mempelajari pengaruh dari berbagai jenis material separator terhadap performa elektrokimia yang diukur menggunakan uji *electrochemical impedance spectroscopy* (EIS), *cyclic voltammetry* (CV), dan *charge-discharge* (CD)
2. Mengetahui *cycle time battery* serta kapasitas *charge* dan *discharge* berdasarkan pengujian CD
3. Mengetahui dan mempelajari perilaku reaksi reduksi-oksidasi baterai yang dilihat berdasarkan hasil pengujian CV
4. Mengetahui dan mempelajari impedansi dan fenomena yang ditimbulkan berdasarkan pengujian EIS

1.5 Manfaat Penelitian

Pada bagian ini, akan menjelaskan lebih lanjut mengenai manfaat yang dapat diperoleh pada penelitian ini. Selain mendapatkan parameter-parameter yang diinginkan untuk mencapai tujuan utama pada penelitian ini, penulis ingin menjelaskan bagaimana dampak terhadap perkembangan teknologi yang dikembangkan pada penelitian ini. Adapun manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini.

1. Mengisi kekosongan dari penelitian terdahulu yang di khususkan pada komponen separator baik pada baterai komposit hibrida yang menggunakan elektrolit padat, yakni melihat pengaruh menggunakan jenis separator yang berbeda.
2. Memberikan referensi untuk para pembaca dalam keputusan untuk menggunakan jenis separator pada baterai komposit hibrida menggunakan elektrolit padat yang dilihat dari sisi elektrokimia.

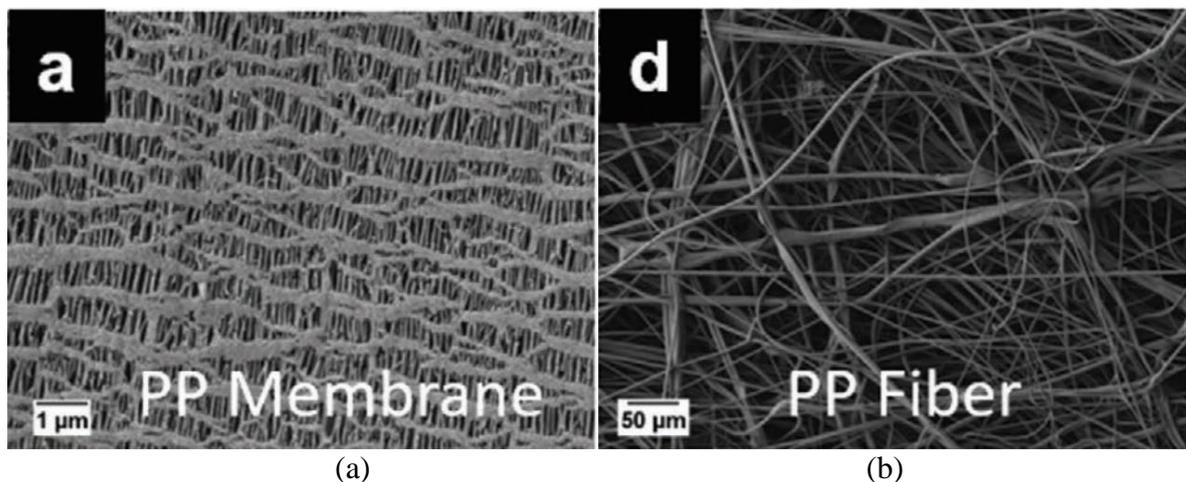
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II DASAR TEORI

2.1 Penelitian Terdahulu

Klein, et al. (2022) meneliti mengenai penggunaan beberapa jenis *separator* yang ada di pasaran pada baterai *graphite lithium ion cells* terhadap reaktivitasnya dengan garam LiPF_6 dengan melihat mekanisme kegagalannya pada baterai dengan menggunakan katoda NCM523. Untuk baterai yang digunakan beroperasi pada tegangan 4.5 V. Tipe kegagalan yang dimaksud yaitu kegagalan *rollover*, dimana kegagalan ini disebabkan oleh adanya dekomposisi material logam transisi pada katoda (seperti nikel, kobalt, dan mangan) yang menyebabkan terbentuknya *solid electrolyte interface* (SEI) pada permukaan anoda. Kemudian pembentukan SEI akan memicu untuk terbentuknya *Li metal dendrite*, yang kemudian pertumbuhan tersebut akan melakukan penetrasi pada lapisan *separator* sehingga apabila *Li metal dendrite* menyentuh katoda akan terjadi arus pendek listrik dalam skala mikro. Fenomena tersebut akan membuat seluruh proses pada baterai tidak dapat berlanjut sehingga baterai tidak dapat digunakan kembali.

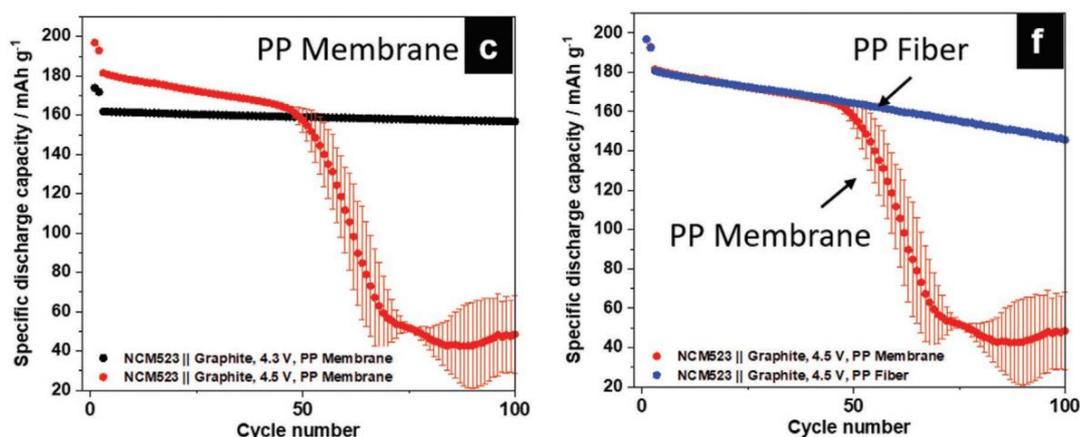
Dalam penelitian ini mengatakan bahwa *separator* merupakan komponen yang dapat mengurangi kontak akibat penetrasi pertumbuhan *Li metal dendrit* dari anoda ke katoda, sehingga dapat menjaga tegangan operasi yang tinggi pada penggunaan baterai Litium. Tegangan operasi tinggi memiliki konsekuensi pada derajat proses litiasi yang meningkat. Dengan meningkatnya derajat proses tersebut, maka beberapa logam transisi yang ada dalam baterai akan mengalami degradasi lebih cepat. Proses ini akan memicu pertumbuhan dendrit litium yang lebih cepat. Penelitian yang dilakukan oleh Klein, et al. membandingkan penggunaan dua jenis *separator* dengan ukuran ketebalan dan arsitektur yang berbeda, yakni *separator* PP *membrane* dan PP *fibers*. Dari segi arsitektur, PP *membrane* memiliki kerapatan yang lebih besar dibandingkan dengan PP *fibers* apabila dilihat dari gambar SEM yang didokumentasikan. Sementara dari segi dimensi, PP *fibers* memiliki ketebalan sebesar $680 \mu\text{m}$ dan pada PP *membranes* memiliki ketebalan $25 \mu\text{m}$. Pengujian yang dilakukan berupa pengujian pengecasan dan penggunaan baterai serta melihat fenomena menggunakan SEM.



Gambar 2.1 Hasil pengamatan melalui *scanning electron microscopy* (SEM) pada (a) separator jenis PP *membrane* pada skala $1 \mu\text{m}$ dan (b) separator PP *Fiber* pada skala $50 \mu\text{m}$ (Klein, et al., 2022)

Berdasarkan hasil eksperimen yang dilakukan, penggunaan PP *membrane* dan PP *fiber* memiliki kesamaan pada kapasitas *discharge* arus pada siklus aal, yakni 180mAh g^{-1} dengan

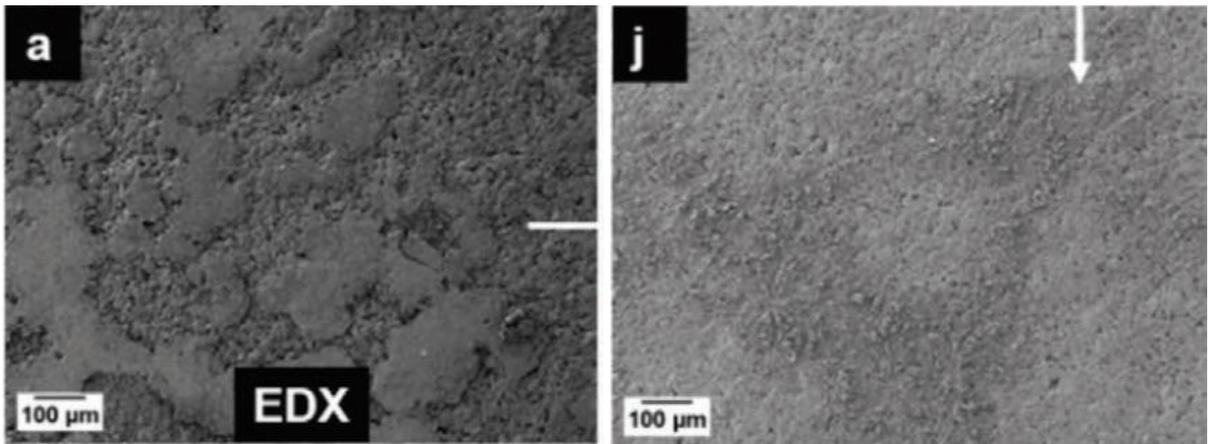
tegangan operasi 4.5 V. Pada penggunaan tegangan yang berbeda, PP *membrane* terlihat memiliki perbedaan pada penurunan kapasitas *discharge* arus dengan menggunakan tegangan operasi yang berbeda. Dilihat pada **Gambar 2.2** bagian (c), pada tegangan operasi 4.3 V PP *membrane* masih mampu menghasilkan kapasitas *discharge* arus yang stabil berkisar 150-160 mAh g⁻¹. Namun apabila tegangan operasi ditingkatkan, maka terdapat penurunan yang cukup signifikan pada siklus ke-50. Penurunan ini merupakan tanda dari kegagalan *rollover* yang terjadi pada baterai dengan *separator* jenis PP *membrane*. Apabila dibandingkan dengan *separator* PP *fiber*, penurunan kapasitas *discharge* arus yang terjadi lebih bertahap dibandingkan dengan PP *membrane*. Siklus yang dicapai tanpa adanya penurunan yang signifikan dapat mencapai diatas 100 siklus pengecasan.



Gambar 2.2 Performa elektrokimia yang dilihat menggunakan siklus penggunaan baterai menggunakan katoda NCM523 dengan variasi *separator* PP *membrane* dan PP *fiber* tegangan operasi berbeda pada PP *membrane* (f) tegangan operasi sama pada jenis *separator* berbeda (Klein, et al., 2022)

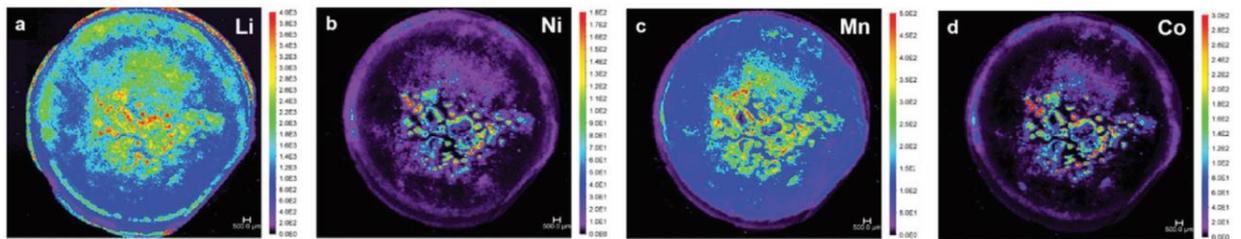
Pada analisis menggunakan SEM yang diamati pada anoda masing-masing jenis *separator*, terdapat perbedaan yang di observasi dari kedua jenis *separator*. Pada baterai dengan menggunakan PP *membrane* terlihat adanya beberapa titik yang cukup besar yang merupakan dendrit litium yang apabila dilihat menggunakan pemetaan *energy dispersive X-Ray* (EDX) merupakan akumulasi dari logam transisi yang terdiri dari nikel, mangan, dan kobalt. Namun pada *separator* PP *fiber* terlihat terdapat bentuk titik yang lebih kecil dibandingkan dengan PP *membrane*. Hal ini menunjukkan bahwa pada PP *fiber* terdapat degradasi yang lebih kecil dibandingkan dengan PP *membrane*. Perbandingan hasil observasi pada baterai menggunakan *separator* jenis PP *membrane* dan PP *fiber* dapat dilihat pada **Gambar 2.3**.

Namun apabila dideteksi menggunakan EDX, pada PP *fiber* memiliki akumulasi logam transisi yang tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan jenis *separator* berbeda tidak dapat mencegah fenomena degradasi dari logam transisi. Walaupun proses degradasi masih terjadi, berdasarkan observasi bahwa pertumbuhan yang terdistribusi merata dari litium dendrit pada grafit menggunakan jenis *separator* PP *fiber*. Dengan menggunakan pengujian *laser ablation-inductively couple plasma-mass spectrometry* (LA-ICP-MS), dapat melihat distribusi dari logam transisi yang ada pada anoda. Hasil menunjukkan bahwa pada PP *fiber* memiliki distribusi baik dari dendrit litium maupun logam transisi yang merata dibandingkan dengan PP *membrane* yang dilihat pada **Gambar 2.4**. Metode ini dapat menunjukkan distribusi dari masing-masing komponen yang ditunjukkan menggunakan intensitas warna. Dengan bukti ini, maka dengan adanya distribusi merata pada pertumbuhan dendrit litium maka dapat mencegah untuk terjadinya kegagalan *rollover* pada siklus pengecasan awal.

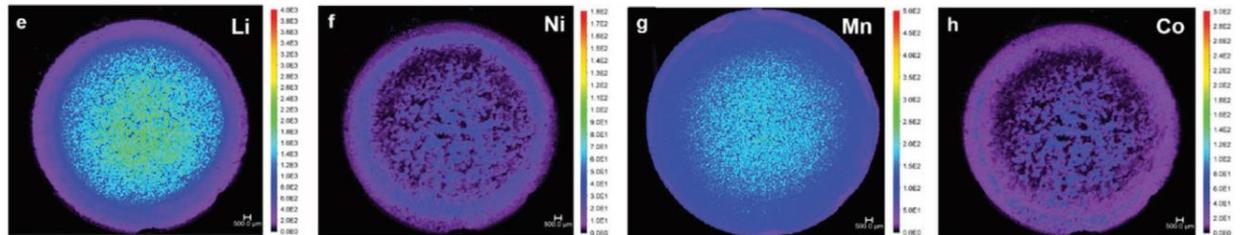


Gambar 2.3 Hasil analisis SEM pada (a) *separator* jenis PP *membrane* dan (j) *separator* jenis PP *fiber* yang diobservasi pada anoda masing-masing baterai (Klein, et al., 2022)

Aged anode from NCM523 || graphite cell with PP membrane as separator



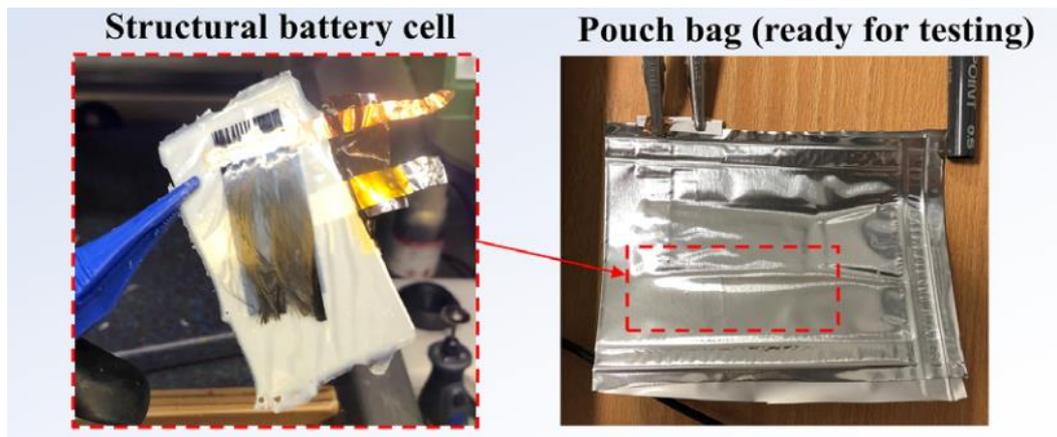
Aged anode from NCM523 || graphite cell with PP fiber as separator



Gambar 2.4 Pengujian analisis LA-ICP-MS pada anoda masing-masing baterai setelah 100 siklus pengecasan (Klein, et al., 2022)

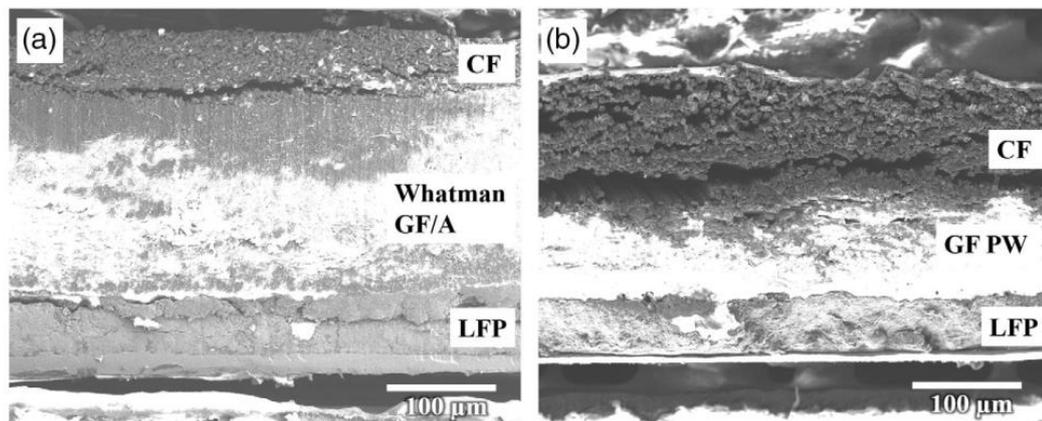
Asp, et al., (2021) melakukan penelitian mengenai baterai komposit hibrida yang dievaluasi dari dua aspek, yakni mekanik dan elektrokimia. Penelitian ini juga berfokus pada pembahasan perkembangan teknologi baterai komposit yang sudah dilakukan oleh beberapa penelitian terdahulu. Profesor Leif Asp pada melakukan sintesa baterai komposit hibrida menggunakan konsep multifungsi dari segi material konstituen. Baterai komposit hibrida yang dibuat terdiri dari fiber karbon yang bertindak sekaligus sebagai anoda dan aluminium yang dilapisi oleh LFP dengan adanya *separator* yang terbuat dari *glass fiber* yang seluruh komponen tersebut dibasahi oleh *structural battery electrolyte* (SBE). Fiber karbon disini bertindak sebagai tempat bersinggahnya litium, material yang menghantarkan elektron, dan sebagai penguat struktur. Begitu juga dengan katoda yang menyediakan fungsi mekanik dan elektrokimia. Untuk SBE berfungsi sebagai wadah untuk melakukan transpot ion dan melakukan transfer beban mekanik antar serat. Serta bagian *separator* berfungsi untuk mencegah adanya arus pendek listrik antar anoda dan katoda. Fokus penelitian ini ada pada bagian *separator* baterai komposit hibrida yang di sintesis menggunakan teknik manufaktur

baterai *pouch cell*. Dimana penelitian ini bertujuan untuk melihat performa mekanik dan elektrokimia dari penggunaan dua jenis material *separator* yang berbeda, yakni *glass fiber plain weave separator* dan *Whatman GF/A Separator* yang kemudian di modelkan menggunakan metode eksperimen dan akan dilihat pengaruh dari arsitektur dan ketebalan *separator* yang digunakan terhadap performa elektrokimia yang diukur menggunakan *galvanostatic charge-discharge cycles* dan performa mekanik menggunakan uji tarik.



Gambar 2.5 Produk baterai komposit hibrida yang dibuat menggunakan *pouch cell* (Asp, et al., 2021)

Berdasarkan hasil pengujian elektrokimia yang dilakukan, terdapat perbedaan *energy density* pada kedua variasi penggunaan *separator*. Dimana pada *charge* sebesar 0.05C selama 20 jam menghasilkan *energy density* pada *whatman GF/A* dan *GF plain weave* sebesar 11.6 dan 23.6 Wh Kg⁻¹ secara berturut-turut. Angka ini didapatkan melalui massa total dari spesimen yang dibuat dengan menghitung masing-masing komponen yang meliputi elektroda, *separator*, SBE, dan *current collector*. Walaupun kedua tipe spesimen memiliki *energy density* maksimum yang sama, dimana hal tersebut didapatkan dengan menghitung *energy density* dari material aktif yakni *carbon fiber* dan LFP pada kedua spesimen yang memiliki *energy density* 90.1 dan 106 Wh Kg⁻¹ pada *whatman GF/A* dan *GF plain weave*, perbedaan *energy density* disebabkan oleh adanya perbedaan ketebalan *separator*. Dimana apabila dilihat menggunakan SEM, *separator GF Plain weave* memiliki ketebalan sebesar 70 μm dan *whatman GF/A* memiliki ketebalan sebesar 185 μm . Ketebalan yang lebih pada *whatman GF/A* menyebabkan terjadinya resistansi internal yang meningkat sehingga berkurangnya kemampuan untuk menggunakan kapasitas maksimum dari *energy density* material aktif yang ada. Pada penelitian ini tidak berfokus pada adanya kapasitas yang hilang akibat pemberian siklus pengecasan secara kontinyu.



Gambar 2.6 Pengamatan SEM pada baterai komposit hibrida dengan *separator* (a) *Whatman GF/A* dan (b) *GF plain weave*. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa penggunaan separator *glass fiber plain weave* dapat menghasilkan jarak antara katoda dan anoda yang lebih tipis (Asp, et al., 2021)

Separator	Whatman GF/A		GF plain weave	
	Battery cell	Active mat.	Battery cell	Active mat.
Specific capacity [Ah kg^{-1}]	4.13	32.2	8.55	38.4
Energy density [Wh kg^{-1}]	11.6	90.1	23.6	106
Calculated maximum energy density [Wh kg^{-1}]	37.7	220	60.6	220
Specific power [W kg^{-1}]	5.94	34.7	9.56	34.7
Total mass of cell [g cm^{-2}]	0.074		0.046	
Cell thickness [mm]	0.40		0.27	

Gambar 2.7 Hasil pengujian elektrokimia pada kedua penggunaan variasi *separator* (Asp, et al., 2021)

Kannan, Terala, Moss, & Weatherspoon melakukan penelitian mengenai pengaruh penggunaan jenis separator yang berbeda terhadap performa elektrokimia baterai litium dengan basis fosfat. Adapun parameter yang menjadi perhatian utama pada penelitiannya yaitu ketebalan dan porositas dari separator yang digunakan. Terdapat dua jenis material separator yang digunakan pada penelitian ini, antara lain yakni PP2400 *monolayer* dengan ketebalan 50 μm dan porositas 41%, PP2075 *monolayer* dengan ketebalan 40 μm dan porositas 48%, H2013 *trilayer* dengan ketebalan 40 μm dan porositas 45%, dan H2512 *trilayer* dengan ketebalan 50 μm dan porositas 50%. Perbandingan dilakukan antar jumlah penggunaan lapisan yang sama. Metode pengujian yang dilakukan pada baterai menggunakan metode *half-cell*, dimana pembuatan material katoda dilakukan dengan menggunakan bubuk LiFePO_4 (LFP) yang dibuat ke dalam bentuk *slurry*, kemudian di lapiskan ke dalam lembaran aluminium; larutan elektrolit menggunakan basis elektrolit cair LiPF_6 dengan pelarut EC : EMC 1 : 2; dan lembaran logam

litium dijadikan sebagai anoda. Separator diletakkan di antara kedua lapisan katoda dan lembaran logam litium.

Berdasarkan hasil pengujian *electrochemical impedance spectroscopy* (EIS) variasi material PP2400 dan H2512 memiliki resistansi yang lebih besar dibandingkan dengan PP2075 dan H2013 apabila dilihat dari *charge transfer* yang dihasilkan. Hal ini dapat dilihat pada hambatan yang terbentuk pada frekuensi rendah sebelum transisi menuju hambatan warburg pada frekuensi yang lebih rendah. Terlihat dari sini bahwa material dengan porositas rendah akan menghasilkan hambatan yang lebih tinggi apabila pada lapisan *monolayer*, sedangkan pada *trilayer* porositas rendah akan menghasilkan hambatan yang lebih rendah apabila dilihat dari kedua kelompok pembandingan tersebut. Porositas berpengaruh pada jumlah elektrolit yang dapat membasahi material separator yang digunakan. Dari hasil parameter ketebalan, maka ketebalan yang lebih besar akan menghasilkan hambatan *charge transfer* yang lebih besar. Sementara berdasarkan hasil pengujian *charge-discharge*, hasil performa paling optimal terlihat pada separator *monolayer* dengan ketebalan 50 μm dan porositas 41%. Sementara berdasarkan hasil *cyclic voltammetry*, terlihat bahwa hasil pengujian separator H2013 dan PP2400 memiliki besaran kapasitas *charge* dan *discharge* dibandingkan dengan PP2075 dan H2512. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa separator dengan porositas rendah akan menghasilkan kapasitas yang lebih tinggi dan hambatan yang lebih rendah (Kannan , Terala, Moss, & Weatherspoon, 2018).

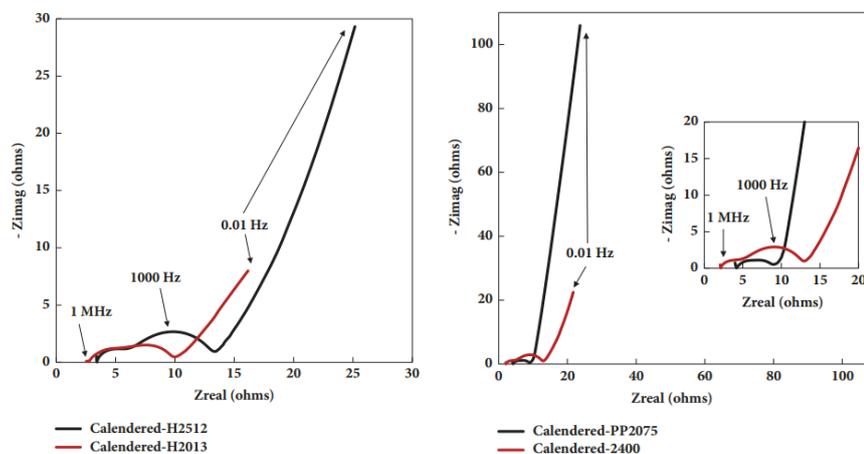
(a) Monolayer separator properties and discharge results comparison

Separator	Thickness	Porosity	Specific Capacity Uncalendered Electrode (mAh/g)	Specific Capacity Calendered Electrode (mAh/g)
2400 (PP) [Monolayer]	50 μm	41%	125.4	156.3
PP2075 (PP) [Monolayer]	40 μm	48%	119.1	133.5

(b) Trilayer Separator properties and discharge results comparison

Separator	Thickness	Porosity	Specific Capacity Uncalendered Electrode (mAh/g)	Specific Capacity Calendered Electrode (mAh/g)
H2013 (PP/PE/PP) [Trilayer]	40 μm	45%	141.9	156.1
H2512 (PP/PE/PP) [Trilayer]	50 μm	50%	140.2	144.3

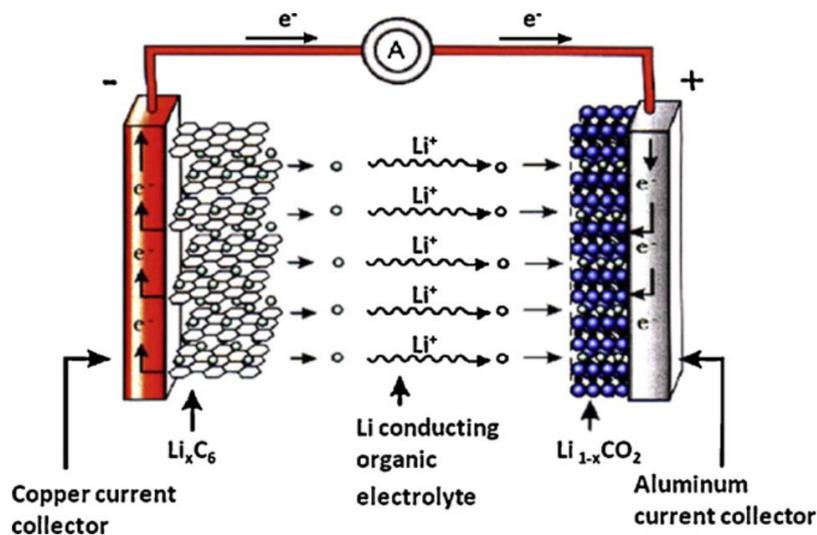
Gambar 2.8 Kapasitas yang dihasilkan dari pengujian *charge-discharge* (Kannan , Terala, Moss, & Weatherspoon, 2018)



Gambar 2.9 Hasil pengujian *electrochemical impedance spectroscopy* (EIS) (Kannan , Terala, Moss, & Weatherspoon, 2018)

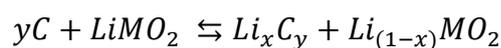
2.2 Mekanisme Kerja Baterai Litium

Baterai litium dikategorikan sebagai penyimpan energi dengan densitas energi yang cukup tinggi, efisiensi tinggi, dan memiliki umur yang panjang. Penyimpan energi ini biasanya memiliki tegangan sebesar 4 V dengan densitas energi di antara 100 Wh kg^{-1} dan 150 Wh kg^{-1} . Secara konvensional, baterai litium terdiri dari anoda yang terbuat dari grafit, katoda yang terbuat dari logam lithium oksida, dan elektrolit yang terdiri dari larutan garam litium. Yang dimana pada baterai tersebut, dipasang *separator* tertana antara katoda dan anoda untuk mencegah terjadinya tegangan arus pendek listrik pada internal baterai.



Gambar 2.10 Skema dari mekanisme kerja baterai lithium ion (Scrosati & Garche, 2009)

Dalam kasus umum, baterai litium menggunakan LiPF_6 yang beroperasi dalam proses kimia sebagai berikut.



dimana y merupakan jumlah dari karbon pada anoda, C merupakan elemen karbon pada anoda, LiMO_2 merupakan ion litium yang berikatan dengan logam MO_2 pada katoda. Saat proses *charging*, maka ion litium akan memisahkan diri dari logam pengikat yang kemudian akan berikatan dengan struktur karbon pada anoda. Dengan demikian, terdapat pengurangan jumlah litium yang di definisikan sebagai $1 - x$. Dimana dalam hal ini, x merupakan jumlah litium yang berikatan pada struktur karbon. Proses ini dapat disebut sebagai reaksi oksidasi, dikarenakan terdapat kenaikan bilangan oksidasi pada litium sebanyak x diikuti dengan pelepasan elektron sebanyak xe^- . Sementara saat proses *discharging*, ion litium akan kembali ke katoda dengan adanya penurunan bilangan oksidasi akibat litium yang sudah berikatan kembali dengan logam katoda, diikuti dengan pengikatan elektron pada litium kembali. Nama lain dari proses ini yakni reduksi.

Reaksi ini berlaku pada proses *reversible*, baik proses ekstraksi maupun insersi dari ion litium antara katoda maupun anoda. Proses insersi atau ekstraksi ion merupakan tahapan yang juga dapat dikatakan sebagai proses “pengisian” dan “penggunaan” baterai litium. Secara keseluruhan, bagian anoda dan katoda yang digunakan akan mengalami proses dekomposisi sehingga akan mengonsumsi massa total dan elektrolit. Hal ini akan membuat kapasitas baterai

yang berkurang dan aspek keamanan yang turut mengalami penurunan. Dengan demikian, perlu ada perhatian khusus dalam memastikan kualitas dan performa dari baterai agar proses ini dapat dikendalikan.

2.3 Sintesis *Solid Polymer Electrolytes* (SPE)

Solid-state polymer electrolytes (SPE) merupakan salah satu jenis senyawa elektrolit dari *solid-state electrolyte* (SSE) dengan performa tinggi yang digunakan di baterai lithium yang dapat dilakukan pengisian ulang dengan keuntungan keamanan yang tinggi, secara sifat mekanik yang mudah dibentuk, dan mudah dalam pembentukan formasi film (Ding, et al., 2021). Salah satu parameter keberhasilan suatu elektrolit dalam suatu baterai adalah konduktivitas ion. Besaran konduktivitas ion tinggi memiliki makna bahwa elektrolit baterai yang digunakan mampu menghantarkan ion-ion dari sumber nya, yakni katoda dan anoda, dengan baik sehingga proses ini dapat berjalan dengan efektif. Salah satu masalah yang ada pada SSE yakni konduktivitas ion yang rendah pada suhu ruangan, dimana konduktivitas yang dimiliki belum menyaingi performa dari elektrolit cair konvensional. Hal ini juga disebabkan oleh adanya perbedaan mekanisme transportasi ion, khususnya pada SPE tersendiri.

Teknologi SPE ini dapat diterapkan ke dalam *structural battery* (SB) sehingga dapat tercipta material struktur ringan yang memiliki kemampuan multifungsi dengan kemampuannya yang dapat menyimpan energi dan menahan pembebanan mekanik. Salah satu SPE yang dikembangkan dalam baterai komposit hibrida dilakukan oleh Schneider, et al. Dimana dalam penelitiannya, material SPE yang digunakan terdiri dari menggabungkan material elektrolit konvensional berbentuk cair dengan sistem polimer berantai, seperti material epoksi dan *vinyl ester*. Kedua sistem tersebut nantinya akan membentuk material komposit yang terdiri dari fasa modulus tinggi dan fasa konduktivitas ion. Dimana, elektrolit cair digunakan untuk meningkatkan konduktivitas ion dan sistem polimer berantai digunakan untuk meningkatkan performa mekanik dari SPE (Schneider, Ihrner, Zenkert, & Johansson, 2019).

Pembuatan SPE dilakukan menggunakan teknik *polymerization induced phase separation* (PIPS), dimana teknik ini memiliki tujuan untuk menciptakan elektrolit yang bersifat heterogen secara fasa dengan proses *curing* pada fasa sistem polimer dengan suhu tertentu. Dengan demikian, dengan teknik ini dapat tercipta elektrolit dengan bentuk padat yang memiliki kemampuan dalam proses manufaktur yang dapat ditingkatkan kemampuan produksinya menggunakan teknik produksi material komposit. Pada penelitian ini, material SPE yang digunakan diantaranya adalah komponen cairan elektrolit yang terdiri dari garam *lithium trifluoromethanesulfonate* (LITFS) dengan pelarut *dimethyl methylphosphonate* (DMMP) dan *ethylene carbonate* (EC) menggunakan perbandingan 1:1 dan garam litium dilarutkan sampai dengan 1 M. Komponen cairan elektrolit ini kemudian di campurkan dengan sistem polimer yang terdiri dari *bisphenol A ethoxylate dimethacrylate* dan katalisator yakni 2,2'-azobis(2-methylpropionitrile) (AIBN) dengan perbandingan massa 99:1, dengan perbandingan massa sistem polimer dan elektrolit yang digunakan yakni 61:39 secara berurutan. Proses dilanjutkan dengan melakukan pemanasan pada SPE yang digunakan agar sistem polimer dapat ter-*cured* sehingga akan menciptakan SPE yang sebelumnya cair menjadi mengeras. Adapun variasi suhu *curing* yang digunakan pada penelitian *scheiner et al* yakni 70, 80, dan 90 °C selama 105, 75, dan 45 menit secara berurutan (Schneider, Ihrner, Zenkert, & Johansson, 2019).

2.4 Baterai Komposit Hibrida

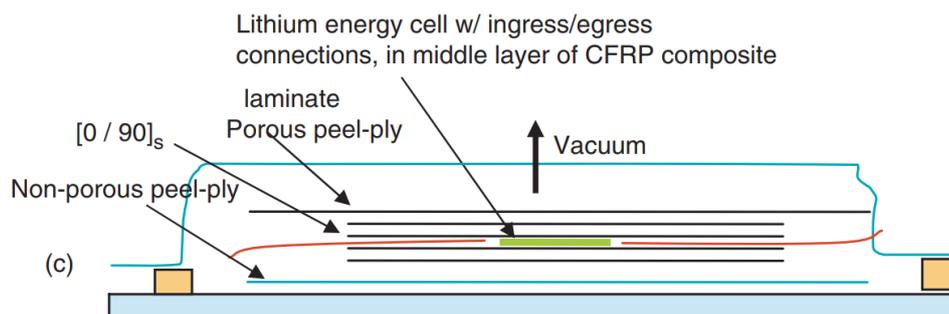
Komponen material penyimpan energi yang ringan diperlukan untuk ditemukan dengan perkembangan teknologi elektrifikasi dalam aspek transportasi maupun produk konsumen.

Baterai pada umumnya menambah berat pada sistem tanpa berkontribusi pada performa struktur pada sistem. Dalam hal ini, baterai struktur komposit hadir dengan menggabungkan fungsi dari baterai yang menunjang rangka struktur pada suatu sistem. Teknologi ini juga sudah menawarkan penghematan massa pada transportasi kendaraan darat, udara, maupun barang konsumen lainnya. Dengan kata lain, baterai komposit ini juga dapat disebut sebagai “sistem penyimpanan energi tak bermassa” dan memiliki potensi untuk memulai revolusi dalam rancangan kendaraan listrik maupun alat lainnya (Asp, et al., 2021).

Konsep *structural power composites* mengedepankan multifungsionalitas. Dimana dalam konsep perancangan, pengurangan berat maupun volume dari suatu komponen merupakan bagian kritis dari tahap perancangan, khususnya pada proses optimasi untuk meningkatkan parameter-parameter seperti halnya menambah ketahanan, menghasilkan harga yang rendah, dan meningkatkan performa dari berbagai aspek. Pada pengembangan material penyimpan energi, terdapat dua konsep yang dapat digunakan untuk melakukan pendekatan saat melakukan proses sintesa material tersebut.

2.4.1 Konsep Material Penyimpan Energi berdasarkan Struktur Multifungsi

Pada konsep ini, sintesa dari baterai komposit hibrida menggunakan pendekatan multifungsi pada level struktur. Dimana pendekatan ini memiliki strategi untuk mengoptimalkan sistem pengemasan baterai untuk mencapai multifungsi. Seperti halnya yakni menambahkan lapisan baterai yang tipis pada suatu struktur material komposit yang membentuk *sandwich structure*. Dengan demikian, kedua komponen berbeda yakni material komposit dan baterai bekerja secara individual namun dimampatkan menjadi satu kesatuan sehingga dapat mengurangi penggunaan volume yang berlebih. Dari hasil penelitian yang dilakukan, penggunaan pendekatan ini tergolong kurang dikarenakan pendekatan ini memiliki kemampuan untuk efisiensi volume maupun massa yang rendah dan terdapat permasalahan pada performa mekanik. Dimana, menggabungkan kedua komponen menjadi satu kesatuan *sandwich structure* berpotensi untuk memicu delaminasi pada permukaan material (Pereira, Guo, Nieh, Arias, & Hanh, 2009).



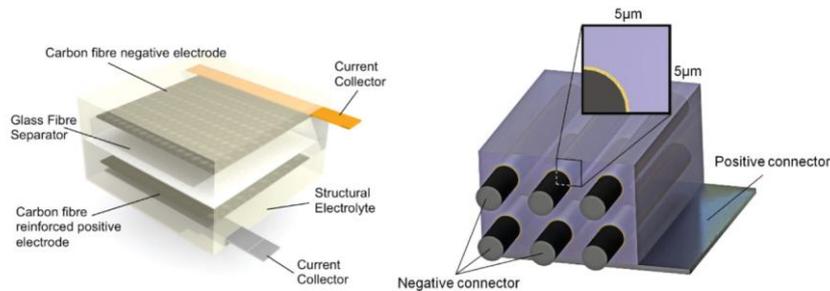
Gambar 2.11 Konsep material penyimpan energi pada level struktur (Pereira, Guo, Nieh, Arias, & Hanh, 2009)

2.4.2 Konsep Material Penyimpan Energi berdasarkan Material Multifungsi

Pada konsep ini memiliki strategi untuk mengembangkan material penyimpan energi dengan menggunakan material yang sama namun dapat memiliki kedua fungsi, baik untuk menerima pembebanan maupun dapat berfungsi sebagai baterai. Dalam hal ini, material seperti komposit – polimer dapat melakukan tugas tersebut. Material yang digunakan terdiri dari material pembentuk komposit, yakni *reinforcement* dan matriks, kemudian kedua komponen tersebut juga menyediakan kemampuan untuk menyimpan

energi. Hal ini menjadi tantangan tersendiri dikarenakan kedua fungsi tersebut memiliki konflik, yang dimana peningkatan salah satu fungsi akan mengurangi kemampuan fungsi lain. Dengan demikian, perlu dilakukan penelitian mengenai pemilihan material yang tepat untuk menyeimbangkan kedua fungsi tersebut.

Pada umumnya, baterai struktur komposit dengan pendekatan ini terdiri dari empat komponen utama, diantaranya yaitu anoda, katoda, separator, dan polimer elektrolit. Selain sebagai komponen baterai, komponen tersebut juga berperan sebagai material yang menahan pembebanan sebagai struktur konvensional. Anoda, katoda, dan *separator* memiliki peran layaknya penguat pada komposit, sementara polimer elektrolit memiliki fungsi menghantarkan elektron sekaligus sebagai matriks, yang mendistribusikan pembebanan dari luar permukaan ke penguat komposit. Tantangannya disini yaitu dengan adanya kekurangan pada konduktivitas ion dan kekakuan pada sistem polimer elektrolit yang ada dapat mengurangi performa dari struktur baterai komposit (Asp, Johansson, Lindbergh, Xu, & Zenkert, 2019).



Gambar 2.12 Susunan baterai komposit dengan menggunakan material *carbon fiber*, *glass fiber*, dan *structural electrolyte* (Carlson, 2013)

2.5 Separator

Separator merupakan material yang memiliki arsitektur berongga yang biasanya terletak di antara elektroda yang memiliki polaritas berbeda pada suatu baterai, yang berfungsi untuk mawadahi proses transport ion antar elektroda namun mencegah agar dua elektroda tidak bersentuhan sehingga dapat menyebabkan arus pendek listrik. Material ini harus mampu memiliki insulasi terhadap listrik yang baik serta dapat menghantarkan ion antar elektroda yang dimana *separator* dibasahi dengan elektrolit. Terdapat beberapa hal yang perlu dipertimbangkan saat melakukan pemilihan *separator*. Selain insulasi listrik dan penghantar ion yang baik, *separator* harus memiliki kestabilan secara mekanik dan dimensi, ketahanan terhadap bahan kimia yang baik agar tidak terdegradasi dengan mudah, kemudahan elektrolit untuk membasahi *separator*, dan memiliki sifat mekanik maupun kimia yang homogen pada seluruh bagian material. Dengan mempertimbangkan aspek tersebut, maka dapat menciptakan baterai dengan optimal, baik dari aspek performa elektrokimia, keamanan, dan harga (Arora & Zhang, 2004).

Dalam industri baterai, terdapat beberapa jenis *separator* yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan yang spesifik. Tiap jenis *separator* memiliki arsitektur dan performa kimiawi yang berbeda. Berdasarkan literatur yang dikutip, terdapat enam jenis *separator* yang digunakan dalam pembuatan baterai litium. Diantara-Nya yaitu *microporous film*, *non-woven*, *ion exchange membranes*, *supported liquid membranes*, *solid polymer electrolyte*, dan *solid ion conductors* (Arora & Zhang, 2004).

2.5.1 *Microporous Film*

Separator jenis ini dapat terdiri dari material anorganik maupun organik. Dari segi arsitektur, jenis *separator* ini memiliki pori-pori sebesar 50-100 Å dalam diameter. Jenis material yang dapat dikategorikan sebagai *microporous film* diantaranya yaitu *polyethylene* (PE), *polypropylene* (PP), *poly(tetrafluoroethylene)* (PTFE), *poly(vinyl chloride)* (PVC), dan material natural seperti halnya karet, asbestos, dan kayu (Arora & Zhang, 2004).

2.5.2 *Nonwoven Separator*

Separator jenis *nonwoven* merupakan produk tekstil yang dibuat menggunakan serat dengan metode manufaktur tipe pembuatan lembaran, jaring, maupun serat tak beraturan yang di satukan menggunakan gaya kohesi maupun tambahan material adhesi. Selain itu, teknik menyatukan kumpulan serat-serat dapat menggunakan teknik rajutan, *tufted*, ataupun dengan teknik penggulangan. Kemudian proses penggabungan selanjutnya dapat menggunakan proses kimia maupun termal. Ukuran pori yang ada pada jenis *nonwoven separator* ini berkisar antara 1 sampai 100 µm.

Penggunaan *separator* jenis ini digunakan pada beberapa jenis baterai. Keuntungan dari penggunaan *separator* ini yaitu pada konsistensi dari beberapa karakteristik pada material ini seperti halnya berat, ketebalan, porositas, dan kemampuan untuk mengurangi degradasi yang disebabkan oleh elektrolit. Material yang biasa digunakan pada *nonwoven* yakni *polyethylene* (PE), *polypropylene* (PP), *polyamide* (PA), *poly(tetrafluoroethylene)* (PTFE), dan *poly(vinyl chloride)* (PVC). Namun secara ukuran pori, *separator nonwoven* masih belum menyaingi *microporous film*. Dimana terdapat kesulitan dalam pembuatan pori dengan ukuran di bawah 25 µm dengan performa mekanik yang dapat diterima (Arora & Zhang, 2004).

2.5.3 *Ion Exchange Membranes*

Jenis *separator* ini terbuat dari material polimer yang memiliki pori dengan diameter 20 Å. Karakteristik dari kemampuan transpor ion dari jenis *separator* ini memiliki interaksi yang kuat antara spesimen yang menyebar (contoh: ion litium) dan struktur molekuler dari polimer. Interaksi ini disebabkan oleh adanya kelompok dari ion yang dapat bertukar di dalam membran, yang memperbolehkan untuk membedakan antara ion yang menyebar maupun berpindah. Material yang biasa digunakan terbuat dari PP, PE, ataupun teflon. (Arora & Zhang, 2004).

2.5.4 *Supported Liquid Membranes*

Tipe *separator* ini terdiri dari matriks padat dan fasa cair, yang dimana dijaga pada struktur mikro-poros dengan menggunakan gaya kapilaritas. Cairan yang ada pada *separator* ini harus tidak dapat dilarutkan di dalam elektrolit, secara kimia stabil, dan memiliki konduktivitas ion yang bagus. Penggunaan dari beberapa tipe polimer seperti halnya *polypropylene*, *polysulfone*, *poly(tetrafluoroethylene)*, dan *cellulose asetat* digunakan sebagai substrat untuk membran cair (Arora & Zhang, 2004).

2.5.5 *Solid Polymer Electrolyte*

Solid polymer electrolyte dapat dikategorikan sebagai *separator* dikarenakan struktur yang cukup kaku. Namun, penggunaan dari SPE ini sebagai *separator* masih kurang diminati dikarenakan konduktivitas ion yang rendah pada suhu kamar. Material

yang biasanya digunakan yakni *polyethylene oxide* (PEO) dan *poly(propylene oxide)*. (Arora & Zhang, 2004).

2.5.6 *Solid Ion Conductors*

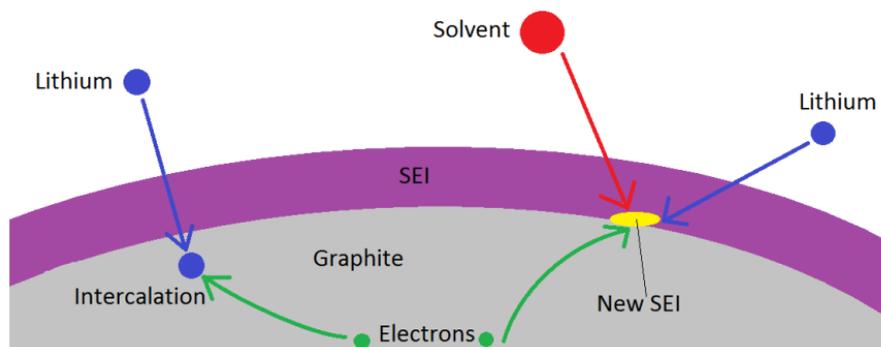
Penggunaan jenis *separator* ini dapat dikategorikan sebagai material multifungsi, dimana material ini digunakan sebagai *separator* sekaligus elektrolit. Material yang biasa digunakan terbuat dari material anorganik. Jenis *separator* ini memperbolehkan beberapa jenis ion untuk melakukan migrasi antar elektroda melalui kisi apabila terdapat perbedaan potensial maupun kimia (Arora & Zhang, 2004).

2.6 Fenomena pada Baterai Litium

Saat berlangsung pengoperasian baterai komposit hibrida dari aspek elektrokimia, terdapat beberapa fenomena yang terjadi baik saat proses penggunaan maupun pengisian daya baterai. Fenomena ini tentunya dapat mempengaruhi siklus penggunaan baterai maupun performa elektrokimia lainnya seperti halnya kapasitas energi yang dimiliki oleh baterai. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh **Klein, et al. (2022)**, terdapat dua fenomena yang menjadi objek observasi pada proses elektrokimia baterai litium. Salah satunya yaitu pertumbuhan *solid electrolyte interphase* (SEI).

Solid electrolyte interphase (SEI) merupakan lapisan yang terbentuk dari hasil proses dekomposisi pada bagian lapisan terluar anoda. Pembentukan lapisan SEI berfungsi untuk memperbolehkan ion Li^+ untuk melakukan proses perpindahan dan menghalangi elektron untuk lewat sehingga dapat menghindari untuk terjadinya proses dekomposisi kembali sehingga dapat proses elektrokimia secara kontinyu. Lapisan SEI ini terdiri dari material anorganik seperti Li_2CO_3 , LiF , dan Li_2O dan material organik seperti dilithium ethylene glycol dicarbonate (Li_2EDC). Dalam pandangan yang lebih komprehensif, lapisan SEI merupakan banyak lapisan, dimana lapisan ini terdiri dari banyak jenis material (*mosaic structure*) serta komposisi, struktur, dan karakteristik pada lapisan ini dapat berubah seiring berjalannya waktu (Wang, Kadam, Li, Shi, & Qi, 2018).

Pembentukan lapisan SEI akan mengurangi kapasitas penyimpanan energi pada baterai. Hal ini dikarenakan terdapat beberapa unsur seperti halnya logam transisi dan elektrolit yang mengalami dekomposisi menjadi lapisan tersebut. Saat lapisan SEI terbentuk, maka molekul dari elektrolit tidak bisa melewati lapisan ini menuju material aktif yang dapat memicu pertumbuhan lapisan SEI kembali. Dengan demikian, baterai litium tidak akan mengalami pertumbuhan lapisan SEI kembali walaupun baterai tersebut telah melewati beberapa siklus pengecasan yang cukup banyak (Pinson & Bazant). Adapun pembentukan lapisan SEI dapat dijelaskan pada gambar berikut.



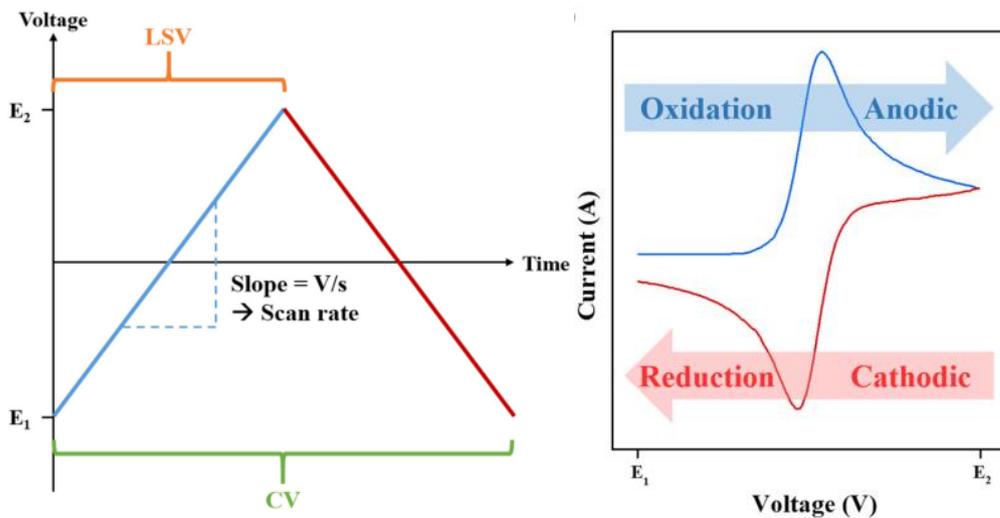
Gambar 2.13 Proses pembentukan lapisan SEI (Pinson & Bazant)

2.7 Metode Pengujian

2.7.1 Cyclic Voltammetry (CV)

Cyclic voltammetry (CV) merupakan teknik pengujian elektrokimia yang berfungsi untuk mengetahui adanya reaksi oksidasi dan reduksi pada pembacaan tegangan pada suatu baterai, mengetahui adanya suatu zat kotoran yang ada pada baterai, dan mengetahui apakah suatu reaksi sudah berjalan dengan benar atau tidak. Terdapat beberapa keunggulan dari pengujian *cyclic voltammetry* ini, diantaranya yakni untuk mengetahui apakah suatu reaksi berjalan secara *reversible* atau *irreversible*, tegangan saat proses reaksi oksidasi dan reduksi, analisis kuantitatif pada suatu zat dengan konsentrasi yang tidak diketahui, dan mengukur suatu reaksi dengan mengubah parameter pengujian seperti halnya laju pemindaian tegangan, suhu, dan konsentrasi reaktan yang digunakan (Kim, et al., 2020).

Dasar dari penggunaan CV berasal dari *linier swept voltammetry* (LSV). Dimana, dalam LSV menunjukkan beberapa parameter dari proses pemindaian tegangan dengan laju yang konstan dalam fungsi waktu. Dalam gambar berikut. Kemiringan dari garis pemindaian tegangan menunjukkan laju pemindaian yang memiliki satuan $\frac{volt}{second}$. Hasil dari LSV sendiri bergantung pada beberapa parameter, diantaranya yakni laju dari proses perpindahan elektron, proses reaktivitas secara elektrokimia dari suatu material, dan laju pemindaian tegangan yang digunakan. Hasil dari LSV ditunjukkan pada gambar berikut pada bagian puncak dari reaksi katodik dan anodik pada material. Perbedaan dengan CV hanya ada pada CV menggunakan beberapa kali pengulangan dari program kenaikan maupun penurunan tegangan. Dengan mengulang proses tersebut, akan mendapatkan informasi tambahan yakni tegangan, reversibilitas, dan kemampuan untuk mengulang proses redoks.

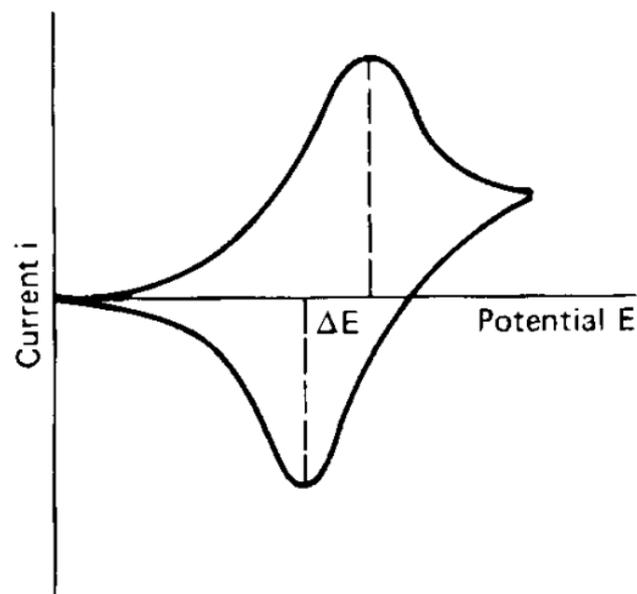


Gambar 2.14 Perbedaan grafik tegangan vs waktu antara *linier swept* dan *cyclic voltammetry* (kiri) dan hasil *plotting cyclic voltammetry* reaksi puncak katodik dan anodik (kanan) (Kim, et al., 2020)

Untuk mengetahui reversibilitas dari baterai yang digunakan, maka dapat dilihat bentuk kurva arus yang dihasilkan berdasarkan tegangan pemindaian yang dihasilkan dengan menyocokkannya dengan pola tertentu. Adapun jenis-jenis pola kurva yang digunakan untuk mengetahui reversibilitas reaksi pada baterai yakni sebagai berikut.

2.7.2.1 Reversible

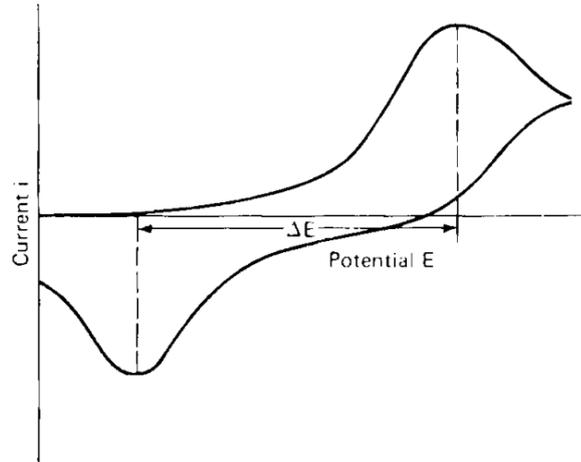
Reaksi reversible merupakan reaksi difusi yang terkontrol, ditunjukkan dengan sepasang puncak arus yang hampir simetris. Nilai dari ΔE tidak tergantung pada laju tegangan. Hasil dari ΔE yang dihasilkan mendekati 0 apabila dalam kasus ideal.



Gambar 2.15 *Cyclic Voltammogram* proses reversible (Linden & Reddy, 1995)

2.7.2.2 Quasi Reversible

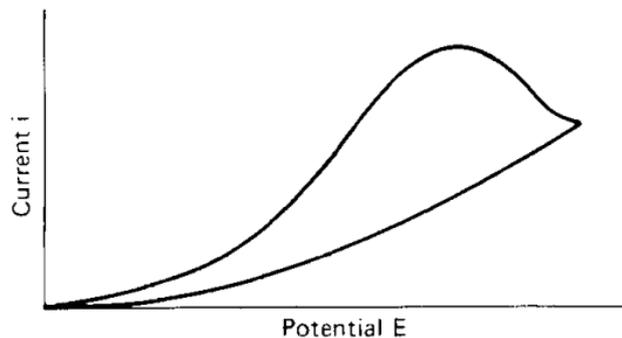
Quasi reversible merupakan proses dimana letak puncak lebih terpisah dan bentuk puncak yang kurang tajam, cenderung memiliki bentuk yang bulat. Tegangan puncak arus bergantung pada laju tegangan dan nilai pemisahan tegangan jauh lebih besar.



Gambar 2.16 Cyclic Voltammogram proses quasi reversible (Linden & Reddy, 1995)

2.7.2.3 Irreversible

Proses elektroda irreversible menghasilkan puncak tunggal. Reaksi yang berbalik dapat diabaikan apabila terjadi pada elektroda irreversible. Pada gambar tersebut, terlihat bahwa hanya terdapat reaksi katodik. Dimana dalam pengaplikasiannya pada baterai, hasil CV menunjukkan baterai hanya dapat dilakukan proses *charging* tanpa terdeteksinya proses *discharging*.

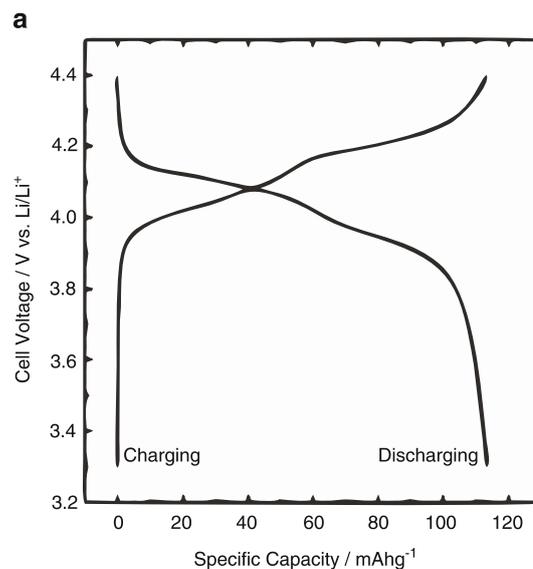


Gambar 2.17 Cyclic Voltammogram proses irreversible (Linden & Reddy, 1995)

2.7.2 Chrono Potensiometry Test

Chornopotensiometry atau *charge-discharge* test merupakan pengujian dengan variasi potensi elektroda yang bekerja dengan waktu penerapan arus yang terkontrol. Pada dasarnya, metode ini melibatkan stepping periodik potensi antara dua keadaan potensiostatik. Setiap setengah siklus dapat dianggap sebagai siklus percobaan langkah potensial yang terpisah. (Crompton, 2000).

Pada pengujian *chronopotensimetry*, arus di aplikasikan ke dalam elektroda kerja atau baterai kemudian tegangan diukur pada elektroda acuan dalam fungsi waktu. Pada pengujian arus konstan, arus konstan pada katoda dan anoda diberikan ke dalam elektroda yang menyebabkan spesimen untuk mengalami reaksi oksidasi maupun reduksi pada laju yang konstan. Untuk mengestimasi kapasitas spesifik dan siklus hidup baterai, dapat menggunakan arus yang di balik nilai + dan – serta pada pemberian siklus tertentu. Kapasitas *charging* dan *discharging* di dapatkan melalui diagram yang ditunjukkan pada **Gambar 2.19**. Dimana, proses *charging* dan *discharging* di dapatkan dengan mengambil nilai kapasitas spesifik tertinggi dari kurva yang dihasilkan (Pyun , Shin, Lee, & Go, 2004).



Gambar 2.18 Contoh Kurva *Charge-Discharge* pada baterai LiMn_2O_4 (Pyun , Shin, Lee, & Go, 2004)

2.7.3 Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)

Electrochemical impedance spectroscopy merupakan teknik pengujian yang mengukur resistansi, kapasitansi, dan induktansi dengan melakukan monitor pada reaksi yang dihasilkan saat memberikan tegangan arus bolak-balik pada baterai. Saat tegangan *alternating current* (AC) diberikan pada baterai, hambatan terbentuk dengan dapat di ekspresikan sebagai $Z(\omega)$. Dimana dalam persamaan tersebut, $\omega = 2\pi f$ merupakan frekuensi angular dari tegangan AC yang diberikan. Hambatan yang terukur yakni berdasarkan tegangan dan arus yang terukur pada mesin, dimana dapat di ekspresikan pada persamaan hukum ohm pada rangkaian AC sebagai berikut.

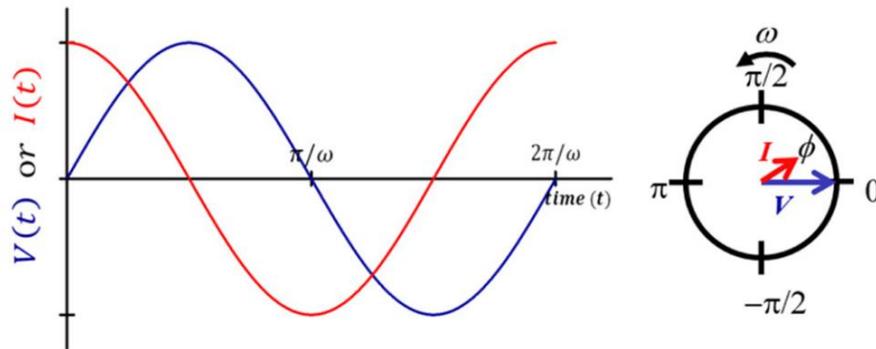
$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} \quad (2.1)$$

Dimana $V(\omega)$ didefinisikan sebagai tegangan AC dan $I(\omega)$ didefinisikan sebagai arus AC. Dengan demikian, impedansi dapat didefinisikan sebagai hambatan yang mengganggu aliran arus listrik saat tegangan AC diberikan pada rangkaian sirkuit.

Jenis-jenis gangguan tersebut di representasikan dalam bentuk komponen sirkuit ekuivalen, yakni resistor, induktor, dan kapasitor. Komponen tersebut dapat membentuk hambatan pada keseluruhan sistem dengan berbagai macam kombinasi. Saat tegangan V diberikan pada baterai dengan frekuensi ω , maka arus akan muncul dengan perbedaan fasa antara tegangan dan arus didefinisikan sebagai ϕ . Dengan demikian, persamaan tegangan dan arus dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$V = V_m \sin(\omega t) \quad (2.2)$$

$$I = I_m \sin(\omega t - \phi) \quad (2.3)$$



Gambar 2.19 Ilustrasi dari persamaan tegangan dan arus yang dibentuk saat diberikan tegangan AC dengan frekuensi angular sebesar ω (Choi W. , Shin, Kim, Choi, & Yoon, 2020)

Kemudian, persamaan V dan I dapat dimodifikasi dalam bentuk persamaan kompleks menggunakan persamaan $j = \sqrt{-1} = \exp\left(\frac{j\pi}{2}\right)$.

$$V = V_m \exp(j\omega t) \quad (2.4)$$

$$I = I_m \exp(j(\omega t - \phi)) \quad (2.5)$$

Dimana dalam hukum ohm, dapat dituliskan kembali persamaan untuk memperoleh impedansi dalam persamaan berikut.

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} = \frac{V_m \exp(j\omega t)}{I_m \exp(j(\omega t - \phi))} = \frac{V_m}{I_m} \exp(j\phi) \quad (2.6)$$

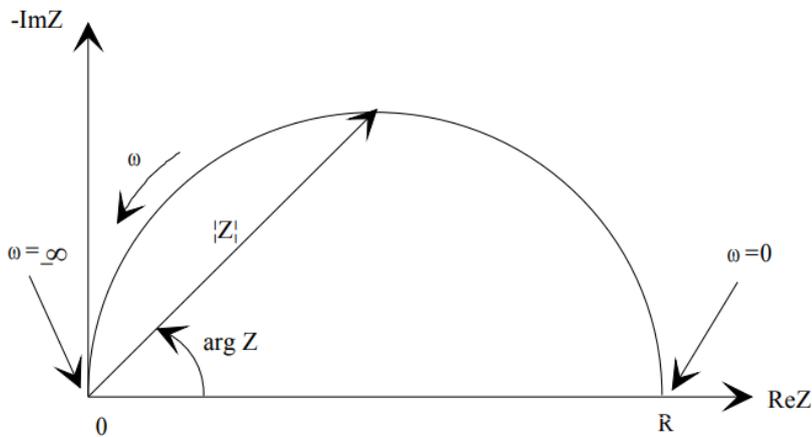
Persamaan diatas dapat dituliskan dalam bentuk persamaan euler. Dengan demikian, persamaan dapat dimodifikasi sebagai berikut.

$$Z(\omega) = \frac{V_m}{I_m} \exp(j\phi) = \frac{V_m}{I_m} (\cos(\phi) + j\sin(\phi)) = Z_o (\cos(\phi) + j\sin(\phi)) \quad (2.7)$$

Dengan membagi persamaan tersebut menjadi dua bagian, didapatkan bagian imajiner dan *real* pada persamaan akhir tersebut.

$$Z(\omega) = Z_o \cos(\phi) + Z_o \sin(\phi) j \quad (2.8)$$

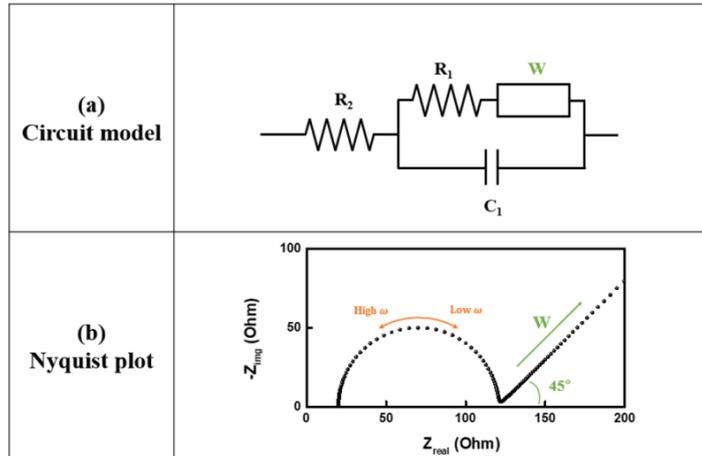
Berdasarkan persamaan diatas, yang merupakan persamaan dari literatur Choi W et, al., spektrum impedansi didefinisikan sebagai hasil pemetaan impedansi imajener dan *real* menggunakan sistem koordinat kartesian. Pemetaan tersebut dapat didefinisikan sebagai *Nyquist Plot*. Dimana pemetaan ini sangat berguna untuk mengetahui fenomena yang terjadi dari respons pada suatu rangkaian listrik dengan menjelaskan fenomena tersebut menggunakan rangkaian sirkuit ekuivalen (Choi, Shin, Kim, Choi, & Yoon, 2020).



Gambar 2.20 Hasil plot nilai impedansi imajener dan real pada kurva Nyquist (Wardhani, Ni'mah , & Harmami, 2017)

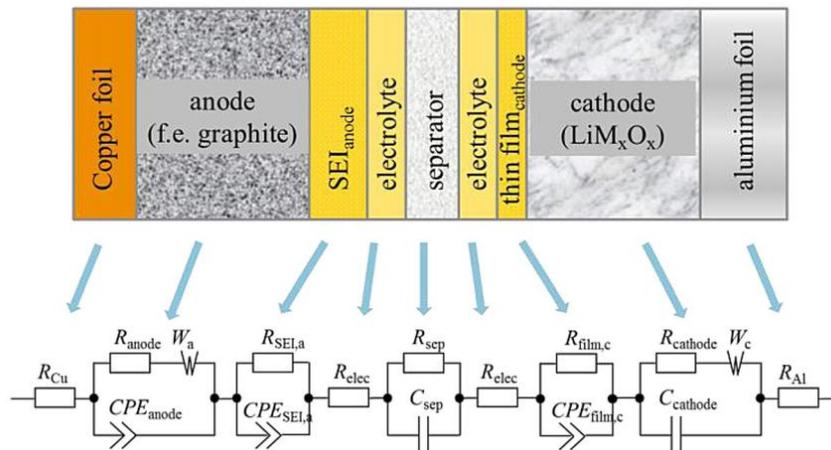
Dalam baterai litium, hasil dari pengukuran impedansi dapat dimodelkan menggunakan rangkaian sirkuit ekuivalen. Seperti yang dilihat pada **Gambar 2.22**, rangkaian sirkuit pada setiap komponen konstituen baterai litium berbeda-beda. Rangkaian sirkuit pada analisis impedansi umumnya menggunakan rangkaian resistor (R), kapasitor (C), dan induktor (L). Untuk merangkai rangkaian sirkuit yang akurat dan sesuai dengan model, pemilihan komponen elektronika yang tepat harus dilakukan agar hasil Analisa dapat merepresentasikan model yang dibuat dengan sistem yang dibuat. Saat proses analisis dilakukan, pemilihan rangkaian sirkuit dilakukan menggunakan jumlah yang seminimal mungkin supaya konstruksi model dapat menggunakan variabel yang sedikit. Dalam baterai litium, terdapat beberapa komponen elektronik tambahan yang biasanya digunakan dalam analisis. Diantara-Nya yakni *constant phase element* (CPE) dan *warburg impedance* (W). Penggunaan CPE, yang biasanya menggantikan rangkaian sirkuit kapasitor, merepresentasikan kondisi non-ideal yang biasanya terjadi pada permukaan antar elektrolit dan elektroda. Dimana terdapat dua lapisan yang mempunyai karakteristik kapasitif. Tentunya dua lapisan tersebut tidak memiliki karakteristik seperti layaknya kapasitor ideal. Terdapat beberapa faktor yang membuat dua lapisan tersebut tidak se-ideal kapasitor, diantaranya yaitu tekstur permukaan kasar,

kebocoran kapasitans, dan distribusi material yang tidak merata antar permukaan dua lapis tersebut. Sementara, hambatan Warburg merepresentasikan hambatan yang dihasilkan dari proses difusi ion litium. Plot yang dihasilkan oleh impedansi Warburg ini menunjukkan garis 45° ke atas pada daerah frekuensi rendah (Choi, Shin, Kim, Choi, & Yoon, 2020).



Gambar 2.21 Sirkit ekuivalen (a) dan plot Nyquist (b) pada analisis impedansi menggunakan rangkaian Randles Cell (Choi W. , Shin, Kim, Choi, & Yoon, 2020)

Analisis EIS ini menunjukkan bahwa spektrum kurva Nyquist muncul dari kontribusi elektroda aktif dari kondisi setengah sel. Dalam hal ini, resistansi yang diukur yang pertama yakni *bulk resistance*. Dimana, *bulk resistance* (R_b) terdiri dari resistansi dari material *current collector*, elektrolit, dan separator. Pada rangkaian circuit ini, efek kapasitif separator dapat diabaikan berhubung nilainya yang sangat kecil dibandingkan dengan komponen lain. Setelah merancang model sirkit ekuivalen dari plot *Nyquist* yang diukur, proses selanjutnya yakni mengetahui tingkat ke akurasion model dengan ploy *Nyquist* yang diukur. Nilai error dari hasil fitting kurva rangkaian sirkit ekuivalen dengan plot *Nyquist* harus diketahui untuk melihat tingkat ke akurasion model dengan hasil pengukuran sebenarnya.



Gambar 2.22 Interpretasi rangkaian sirkit baterai pada konstruksi baterai litium (Westerhoff, Kurbach, Lienesch, & Kurrat, 2016)

2.7 Teori Statistik pengujian *one sample-T*

Pengujian statistik *one-sample T* digunakan untuk mengestimasi rata-rata dari suatu data dengan asumsi bahwa data yang ada terdistribusi secara normal. Pada umumnya, pengujian statistik ini dilakukan pada jumlah sampel 30 atau kurang. Untuk pengujian ini, maka dapat dicari nilai rata-rata beserta dengan standar deviasi untuk distribusi normal adalah sebagai berikut.

$$\bar{X} = n^{-1} \sum_1^n X_i, \quad S^2 = (n - 1)^{-1} \sum_1^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (2.9)$$

Dimana, \bar{X} merupakan rata-rata sampel, n merupakan jumlah sampel, X_i merupakan data sampel ke- i , dan S merupakan standar deviasi untuk distribusi normal. Setelah diketahui nilai dari rata-rata sampel dan deviasi standar untuk distribusi normal, maka dapat dilakukan pengujian *null hypotheses*, dengan menguji apakah nilai data dari sampel berada pada *confidence of interval* yang telah ditetapkan. Untuk pengujian *two-tailed test*, yakni nilai batas atas dan bawah diketahui, maka hipotesis yang dibentuk adalah sebagai berikut.

$$H_0 : \mu = \mu_0, H_1 : \mu \neq \mu_0, |\bar{X} - \mu_0| \geq \frac{S}{\sqrt{n}} t_{n-1, \alpha/2} \quad (2.10)$$

Dengan demikian, apabila nilai dari data yang dihasilkan semuanya ada di dalam rentang *confidence interval*, maka hipotesis H_0 gagal ditolak sehingga μ_0 menjadi rata-rata sampel yang digunakan. Perlu jadi catatan bahwa nilai dari $t_{n-1, \alpha/2}$ dapat menggunakan tabel distribusi t untuk *two-tailed* yang ditunjukkan pada **Gambar 2.23**. Sementara apabila terdapat data yang berada diluar jangkauan *confidence interval*, maka hipotesis H_0 ditolak sehingga μ_0 bukan rata-rata sampel yang digunakan. Persamaan diambil berdasarkan referensi (Rohatgi & Saleh, 2001).

p	One-tail α					
	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005	0.001
	Two-tail α					
	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.002
1	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	318.300
2	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327
3	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.214
4	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173
5	1.476	2.015	2.571	3.305	4.032	5.893
6	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208
7	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785
8	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501
9	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297
10	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144
11	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025
12	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930
13	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852
14	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787
15	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733
16	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686
17	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646
18	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.611
19	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579
20	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552
21	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527
22	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505
23	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.485
24	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467
25	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450

Gambar 2.23 Tabel distribusi t (Blank, 1982)

2.9 Kontribusi penelitian

Pada penelitian ini, akan berfokus pada melihat pengaruh dari penggunaan jenis separator, yakni separator WR200, WR50, dan separator whatmann sebagai variabel kontrol, terhadap performa elektrokimia yang dilihat berdasarkan performa siklus *charge-discharge*, perilaku reaksi reduksi dan oksidasi, impedansi internal, dan fenomena yang di observasi dengan skala mikro pada lapisan baterai komposit hibrida. Hal ini dilakukan untuk mengisi kekosongan pada kedua penelitian yang dijadikan sebagai referensi. Dimana, penelitian Leif. Asp dan Klein berfokus pada membandingkan *separator* dengan jenis yang berbeda, baik dari ukuran maupun arsitektur lapisan *separator*. Penelitian Klein menyebutkan bahwa penambahan ketebalan *separator* akan menambah siklus *charge-discharge* pada baterai. Hal ini dikarenakan *separator* yang tebal akan menghambat pertumbuhan dendrit litium. Selain itu, penelitian ini menyebutkan penggunaan *separator* jenis *fiber* akan membuat pertumbuhan dendrit litium terdistribusi secara merata. Sementara pada penelitian Leif. Asp menyebutkan bahwa penggunaan *separator* yang tebal akan mengurangi *specific discharge capacity* yang dimiliki oleh baterai berdasarkan penelitian yang telah dilakukan.

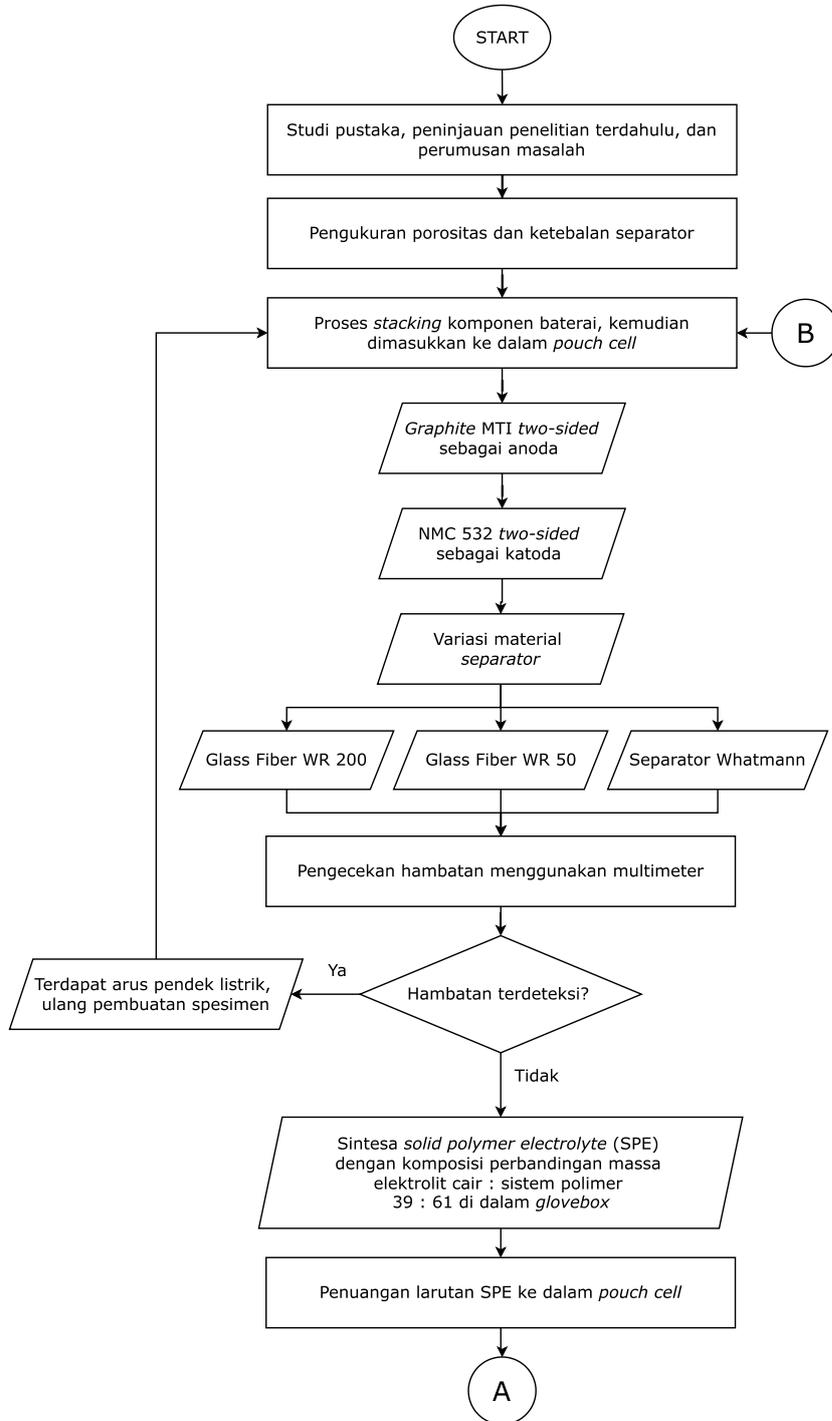
Dari kedua pertanyaan tersebut, penelitian ini akan mengisi kekosongan pada kedua penelitian tersebut, dimana akan berfokus pada variasi penggunaan jenis separator dengan melihat parameter ketebalan, porositas, dan morfologi dari material separator yang digunakan. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat membantu perkembangan dalam teknologi baterai komposit hibrida yang saat ini dikembangkan oleh beberapa instansi maupun pihak.

Halaman ini sengaja dikosongkan

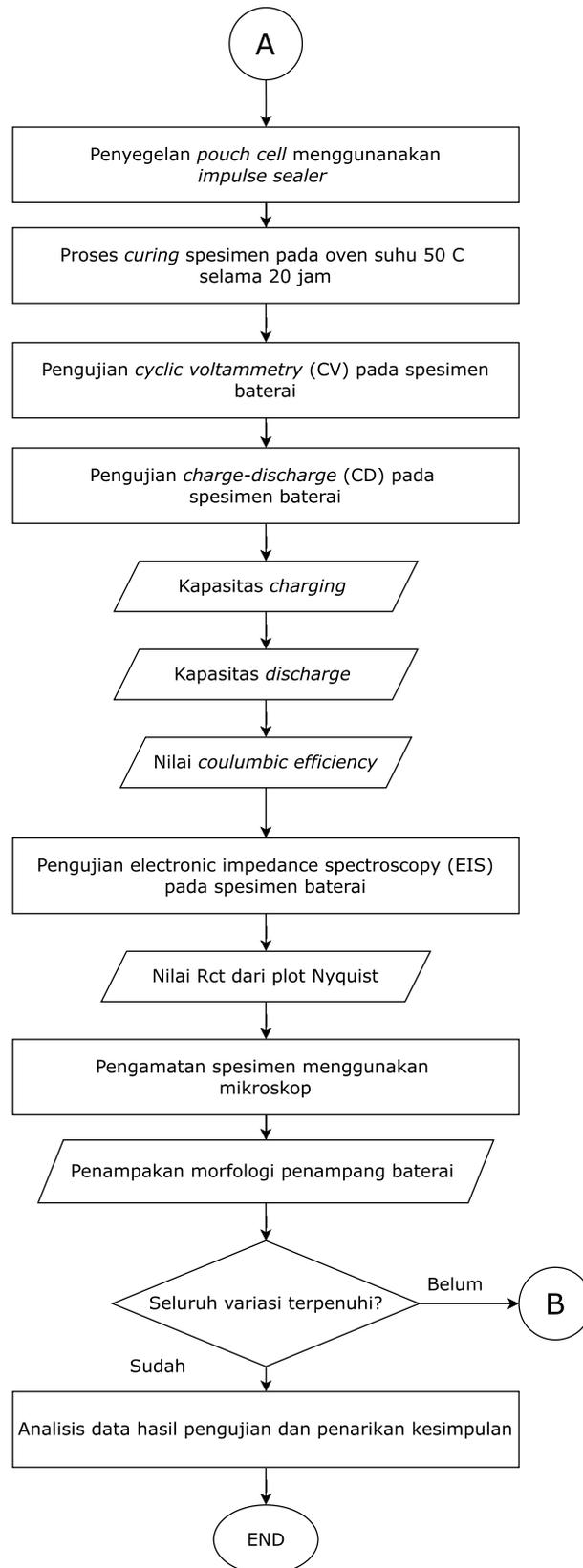
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Flowchart Penelitian

Untuk memudahkan analisis data dan membuat penelitian dilaksanakan secara sistematis dan terarah, maka dibuat flowchart penelitian baterai komposit hibrida sebagai berikut.



Gambar 3.1 Flowchart penelitian bagian 1



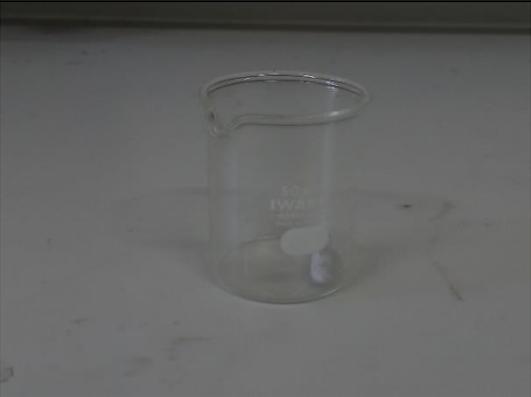
Gambar 3.2 Flowchart penelitian bagian 2. Pengujian elektrokimia dilakukan dengan menggunakan satu rangkaian material baterai yang sama secara berurutan sesuai dengan *flowchart*.

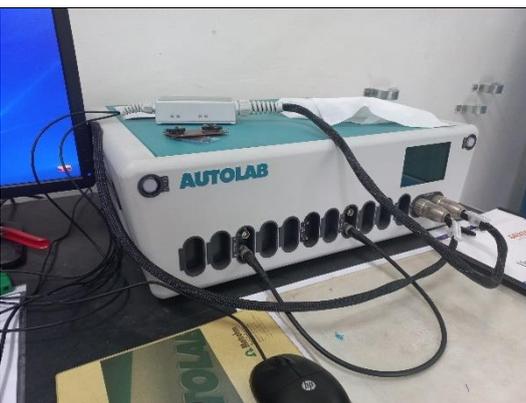
3.2 Alat

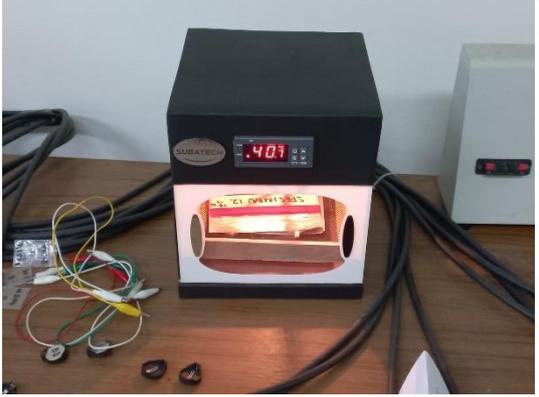
Pada penelitian ini, alat-alat yang digunakan merupakan milih dari laboratorium fisika, badan riset inovasi nasional (BRIN) Puspiptek, Serpong. Adapun daftar dan fungsi alat yang ditabulasi sebagai berikut.

Tabel 3.1 Daftar peralatan yang digunakan di Pusat Riset Fisika, Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN) Puspiptek, Serpong

No	Alat	Fungsi
1	 <p data-bbox="325 891 826 958">Glove box Vigor PR Fisika Puspiptek, Serpong</p>	<p data-bbox="868 674 1431 819">Sebagai tempat sintesa SPE dan pembuatan baterai komposit hibrida. Kondisi dijaga pada kadar air < 1 ppm dan oksigen < 1 ppm.</p>
2	 <p data-bbox="475 1361 676 1395">Impulse Sealer</p>	<p data-bbox="868 1055 1431 1312">Digunakan sebagai pemanas untuk menyegel aluminium pouch setelah komponen baterai beserta SPE sudah di dalam pouch. Adapun model alat yang digunakan yakni <i>Impulse Sealer</i> model FS-200 tegangan AC220V 50/60 Hz dengan kapasitas pemanasan 300 W.</p>
3	 <p data-bbox="469 1794 683 1827">Neraca Analitik</p>	<p data-bbox="868 1525 1431 1738">Neraca analitik digunakan untuk menimbang komponen SPE seperti halnya epoksi resin, hardener, dan cairan elektrolit LiPF_6. Adapun ketelitian yang dicapai oleh neraca yakni 0.01 dengan beban maksimum 500 g.</p>

4		<p>Digunakan dalam proses pengadukan <i>solid polymer electrolyte</i> dengan parameter suhu dan kecepatan pengadukan yang konstan.</p>
5		<p>Sebagai media pencampur pembuatan larutan SPE di dalam glovebox</p>
6		<p>Digunakan sebagai media pemindah bahan kimia resin epoksi dan hardener dari luar ke dalam glovebox.</p>
7		<p>Proses <i>curing</i> pada baterai dengan suhu 50 °C</p>

<p>8</p>	 <p><i>Electrochemical Impedance Spectroscopy Autolab</i></p>	<p>Digunakan untuk mengukur hambatan dalam yang akan di tampilkan menggunakan kurva <i>Nyquist</i> sebagai interpretasi data.</p>
<p>9</p>	 <p><i>Cyclic Voltammetry WBCS 3000 automatic battery cyclers</i></p>	<p>Digunakan untuk pengujian <i>cyclic voltammetry</i> dan <i>charge-discharge</i> pada baterai.</p>
<p>10</p>	 <p><i>Sanwood Temperature and Humidity Oven</i></p>	<p>Digunakan untuk mengontrol suhu pada pengujian EIS.</p>

11	 <p data-bbox="368 629 628 658"><i>Egg Hatching Oven</i></p>	Digunakan untuk mengontrol suhu pada pengujian CV dan CD.
----	---	---

3.3 Bahan

Penelitian ini menggunakan beberapa bahan kimia aktif pada sintesa baterai komposit hibrida. Bahan-bahan tersebut akan melalui rangkaian proses dalam pembuatan baterai. Adapun bahan-bahan yang digunakan dengan spesifikasi dan fungsi pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

- A. **Larutan Elektrolit LiPF₆** – Elektrolit cair yang digunakan memiliki garam *lithium hexafluorophosphate* (LiPF₆) sebesar 1 M yang dilarutkan pada pelarut *ethylene carbonate* (EC) dan *dimethyl carbonate* (DMC) dengan perbandingan pelarut 1:1 yang diperoleh dari perusahaan Dongguan Shansan Battery Material Co., Ltd. Massa jenis yang dimiliki yakni 1.308 *gr/ml*, dengan konduktivitas ion sebesar 11.42 *mS/cm* berdasarkan *technical data sheet* (TDS) yang diperoleh. Bahan ini digunakan dalam campuran *solid polymer electrolyte* (SPE).
- B. **Resin Epoksi Bisphenol A Epichlorohydrin** – Polimer yang digunakan yakni resin epoksi jenis Bisphenol A Epichlorohydrin, memiliki viskositas sebesar 13,000 *mPa.s* dan massa jenis 1.17 *g/cm³* pada suhu 25°C. Resin epoksi yang digunakan memiliki suhu kristalisasi dengan rentang 60 – 70 °C.
- C. **Resin Hardener Cycloaliphatic Amine** – Sebagai bahan *curing agent* pada sistem polimer, resin hardener dengan jenis *cycloaliphatic amine* ini memiliki viskositas 0.5 – 1 *poise* dan massa jenis sebesar 1.010 *gr/cm³* pada suhu 25°C.
- D. **Nikel-Mangan-Cobalt (NMC) 532 (two-sided)** – Bahan ini merupakan bahan konvensional yang digunakan sebagai komponen katoda pada pembuatan baterai. Katoda NMC 532 yang digunakan memiliki dimensi 220 × 220 × 0.136 *mm* dalam satu lembar. Tiap lembar memiliki massa material aktif sebesar 16.3 *gr*, dengan jenis kapasitas material 150*g/mAh*.
- E. **Lembar Tembaga dan Aluminium** – Penggunaan lembaran tembaga dan aluminium ditujukan sebagai penghantar listrik baterai pada masing-masing katoda dan anoda yang nantinya dapat dihubungkan ke sumber listrik. Adapun lembar tembaga yang digunakan memiliki ketebalan sebesar 0.15 *mm*, sementara ketebalan aluminium sebesar 0.2 *mm*.
- F. **Tembaga dengan Lapisan Graphite MTI (two-sided)** – Anoda *graphite* dengan material *current collector* tembaga dari perusahaan MTI, digunakan sebagai material penangkap ion litium. Satu lembar *graphite* memiliki dimensi

241 mm × 200 mm × 90 μm dengan massa material aktif pada satu lembarnya sebesar 5.0176 gr. Adapun kapasitas spesifik yang 330 mAh/g, yang diukur dengan standar IEC dengan arus 0.2C pada voltase 4.2 – 2.5 V, kondisi pengujian *half-cell*.

- G. **Glass Fiber** – Penelitian ini menggunakan *glass fiber* tipe *woven* sebagai material pemisah (*separator*) antar katoda dan anoda sehingga tidak terjadi arus pendek listrik. Pemilihan *Glass fiber* memiliki dasar karena ketersediaannya yang cukup melimpah di pasaran serta material ini telah dibuktikan dapat digunakan sebagai *separator* baterai berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Leif. Asp dan Klein. Adapun *glass fiber* yang digunakan yakni jenis WR200 dan WR50, dimana tiap *glass fiber* akan dilihat spesifikasi berupa dimensi tebal, ukuran pori, dan tebal serat menggunakan mikroskop. Dimana WR merupakan istilah yakni *woven roving*. Adapun angka terakhir menunjukkan berat serat dalam gram persatuan luas m².
- H. **Separator Whatmann** – Sebagai variabel kontrol, kertas Whatmann digunakan sebagai separator baterai dikarenakan material ini merupakan salah satu separator baterai litium konvensional.
- I. **Aluminium Pouch** – Material ini digunakan sebagai pembungkus baterai komposit hibrida yang nantinya akan di *seal* menggunakan *heat sealer* sehingga meminimalisir baterai kontak dengan udara bebas.

3.4 Langkah Penelitian

Adapun penjelasan rinci mengenai langkah penelitian yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

3.3.1 Studi Literatur

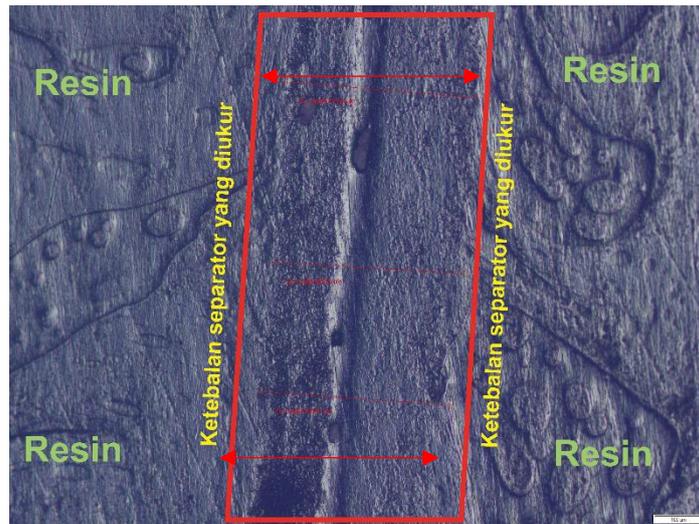
Sebelum penelitian dilakukan, penulis melakukan studi literatur guna mencari referensi penelitian terdahulu yang dijadikan sebagai acuan sehingga penulis memiliki dasar yang kuat dalam memodifikasi variasi yang digunakan dalam penelitian ini.

3.3.2 Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian

Perumusan masalah ini disertai dengan penentuan batasan masalah untuk memperjelas lingkup penelitian yang akan dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan observasi dari suatu fenomena berupa mempelajari dampak penggunaan jenis separator yang berbeda pada performa baterai komposit hibrida.

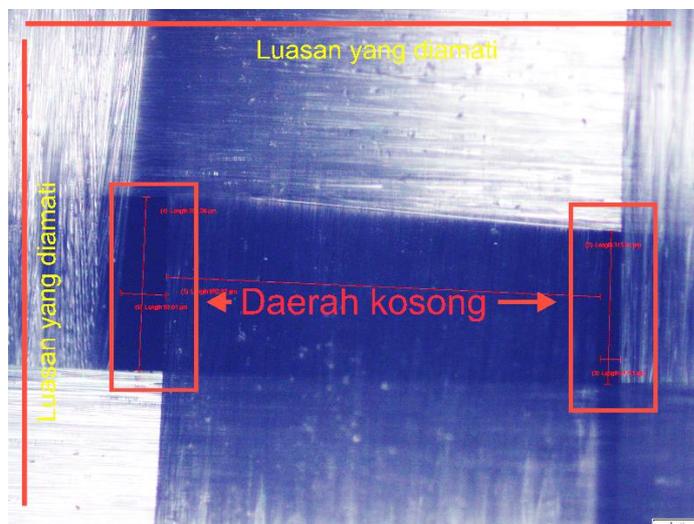
3.3.3 Pengukuran Ketebalan Separator

Proses pengukuran ketebalan dilakukan menggunakan mikroskop. Pengukuran separator dilakukan dengan melakukan proses *casting* menggunakan resin epoksi dan komponen hardener beserta dengan separator yang digunakan. Kemudian setelah sistem resin mengeras, spesimen dipotong kemudian dilakukan proses *grinding* sehingga area penampang dari spesimen lebih terlihat. Hasil pengamatan di mikroskop kemudian diukur dengan menggunakan *image processing* di dalam komputer yang kemudian di dapatkan hasil ketebalan pada material separator. Pengukuran dilakukan sebanyak 10 kali. Adapun contoh produk yang telah di cetak dan contoh ketebalan yang diukur dapat ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 3.3 Metode pengamatan ketebalan pada separator menggunakan *optical microscopy*

Untuk pengukuran porositas, dilakukan dengan melihat morfologi 2-dimensi dari separator menggunakan mikroskop. Kemudian luasan dari pori diukur dengan melihat dimensi dari pori pada separator. Pengukuran porositas kemudian dilakukan dengan membandingkan rasio antara luasan total *void* dengan total luasan yang diamati. Adapun skema contoh pengukuran porositas separator ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 3.4 Metode pengamatan porositas pada spesimen *glass fiber* dengan menghitung luas daerah kosong. Adapun perhitungan daerah kosong dapat mengukur dimensi panjang dan lebar daerah kosong.

Pengukuran porositas dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$\phi = \frac{V_V}{V_T} \times 100\% \quad (3.1)$$

Dimana, ϕ merupakan prosentase porositas yang dimiliki oleh separator, V_V merupakan volume daerah kosong (*void volume*), dan V_T merupakan volume total. Pada pengukuran porositas spesimen *glass fiber*, dimensi ketebalan dianggap memiliki nilai yang sama pada daerah volume kosong dan volume total. Dengan demikian, perhitungan porositas dapat dilakukan dengan menghitung rasio antara luasan daerah kosong dengan luasan total. Sehingga persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$\phi = \frac{(A_V) \times n}{A_T} \times 100\% \quad (3.2)$$

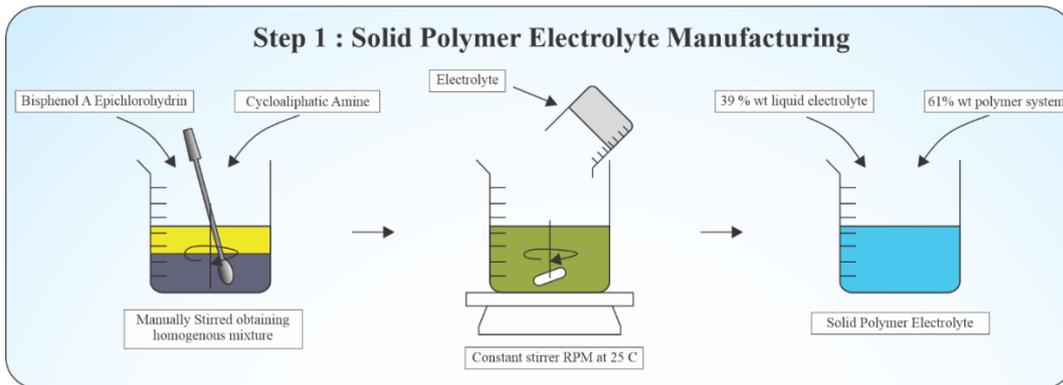
Dimana A_V merupakan luasan area kosong yang diukur (*void area*), n merupakan jumlah luasan *void* yang terlihat pada area yang dicakup, dan A_T merupakan luasan area yang dicakup berdasarkan pengamatan.

Kemudian setelah melakukan pengukuran, dilakukan pengujian statistik dengan nilai *confidence interval* sebesar 95 % pada pengukuran 10 sampel dengan metode *one-sample T*. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan rata-rata sampel pengukuran dengan nilai seluruh sampel sudah berada di dalam *confidence interval* yang telah ditetapkan. Dengan demikian, hasil data pengukuran dapat menggunakan data dengan standar deviasi sekecil mungkin.

3.3.4 Pembuatan *Solid Polymer Electrolyte* (SPE)

Proses pembuatan *solid polymer electrolyte* (SPE) menggunakan teknik *polymerization induced phase separation* (PIPS), sesuai dengan referensi ihrner et, al. Dimana, teknik ini memiliki tujuan untuk menciptakan elektrolit yang bersifat heterogen secara fasa dengan proses curing pada fasa sistem polimer pada suhu tertentu. Adapun bahan kimia yang digunakan yaitu dengan mencampur *ionic liquid* (IL) *electrolyte*, yakni LiPF_6 1 M dengan pelarut *ethylene carbonate* (EC) dan *dimethyl carbonate* (DMC) 1 : 1 dan sistem polimer, yaitu campuran resin epoksi Bisphenol A Epichlorohydrin dan hardener *cycloaliphatic amine* dengan perbandingan 1 : 1 persen massa. Pencampuran larutan elektrolit dan sistem polimer menggunakan perbandingan massa 39:61 secara berurutan, berdasarkan referensi (Ihrner, Johannison, Sieland, Zenkert, & Johansson, 2017).

Tahap pertama dilakukan pencampuran resin epoksi dengan hardener sebanyak 9.15-gram pada masing-masing komponen. Proses pengadukan dilakukan secara manual menggunakan spatula sampai dengan larutan berubah warna menjadi kuning pucat. Kemudian dilanjutkan dengan pencampuran sistem polimer dan elektrolit. Larutan elektrolit, dengan kondisi sudah disiapkan di dalam gelas ukur beserta sudah dilakukan proses pengadukan dengan *magnetic stirrer* sebanyak 11.7-gram, dicampurkan dengan sistem polimer dengan penuangan secara perlahan sehingga tidak terjadi proses penggumpalan yang dapat menyebabkan *stirrer* berhenti berputar. Di dapatkan satu baterai menggunakan SPE sebanyak 30 gr. Dengan kecepatan pengadukan 400 rpm dan suhu pengadukan 27°C , proses ini dilakukan sekitar 30 menit sampai dengan larutan secara visual homogen.



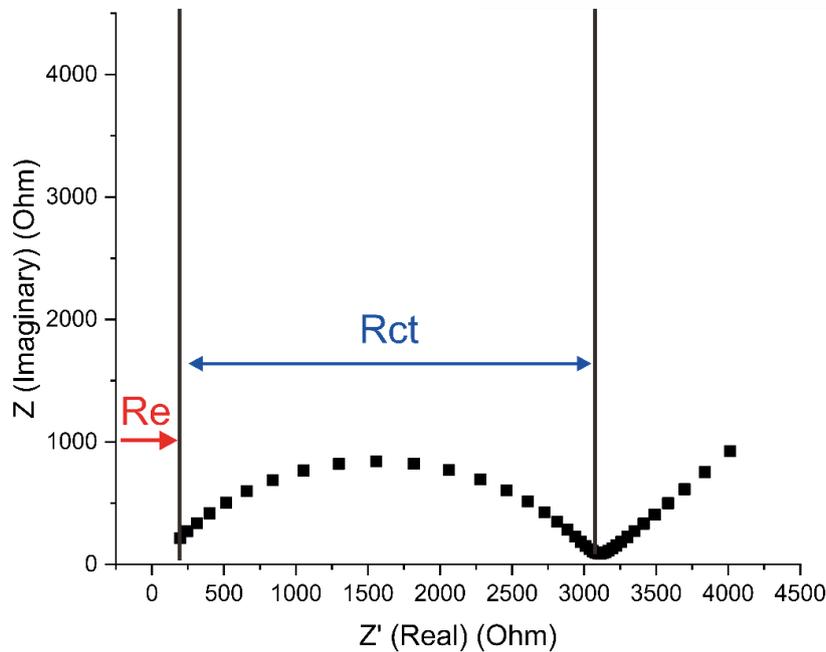
Gambar 3.5 Skema pembuatan solid polymer electrolyte (SPE)

3.3.5 Manufaktur *Pouch Battery* dan Variasi Lapisan *Separator*

Pembuatan baterai pouch cell dilakukan di dalam *glove box* untuk menghindari kontak unsur litium dengan udara bebas, terutama oksigen dan air. Baterai dibuat menggunakan metode *stacking* pada komponen katoda (NMC 532), anoda (*graphite*), dan separator (*glass fiber*). Sebelum *stacking*, katoda dan anoda terlebih dahulu dibalut dengan masing-masing elektroda, yaitu sebagai kolektor arus. Material elektroda yang digunakan yakni aluminium pada katoda dan tembaga pada anoda. Proses pembalutan dilakukan dengan melipat elektroda berbentuk strip persegi panjang pada lapisan non-material aktif katoda maupun anoda agar kedua permukaan material dapat kontak dengan baik. Adapun jumlah *stacking* pada baterai yang digunakan yakni 2 *stack*. Hal ini dikarenakan katoda yang digunakan memiliki 2 sisi material aktif, sehingga dapat digunakan untuk membuat 2 *stack* baterai. Setelah pembalutan elektroda, dilanjutkan dengan proses *stacking* lapisan katoda, anoda, dan separator sesuai dengan skema berikut.

analisis menggunakan *equivalent circuit* untuk mengetahui besaran parameter hambatan dan kapasitans berdasarkan rangkaian sirkuit yang dibuat sehingga dapat melakukan analisis kuantitatif besaran hambatan yang dihasilkan dari masing-masing variasi baterai dengan separator yang berbeda.

Adapun hasil keluaran yang di dapatkan dari pengujian EIS berupa R_e dan R_{ct} . Dimana, R_e (*bulk resistance*) merupakan resistansi dari komponen elektrolit dan separator. Sementara, R_{ct} (*charge transfer*) merupakan resistansi dari hasil proses difusi ion litium antara material elektrolit dengan material aktif. Nilai tersebut diperoleh melalui hasil regresi berdasarkan sirkuit ekuivalen yang dibuat dan *plot* secara visual dari grafik dengan mengetahui nilai resistansi pada sumbu *real* di frekuensi tertinggi untuk nilai R_e dan mengetahui diameter dari setengah lingkaran yang dihasilkan untuk nilai R_{ct} .



Gambar 3.8 Metode pengukuran R_e dan R_{ct} dari hasil plot Nyquist Non-Regresi. R_e merupakan hambatan dari komponen elektrolit yang diukur menggunakan jarak dari sumbu y dan titik pertama pada frekuensi tertinggi Nyquist. Sementara R_{ct} merupakan hambatan dari proses transfer ion litium antar katoda-anoda. Hambatan ini diukur dengan mengetahui diameter dari setengah lingkaran yang tidak sempurna.

3.3.8 Pengujian *charge-discharge* (CD)

Pengujian *charge-discharge* (CD) pada baterai ditujukan untuk mengetahui batas *cycle* yang dimiliki oleh baterai dengan memberikan arus konstan. Adapun parameter pengujian yang digunakan yakni tiap spesimen diuji CD dengan menggunakan arus konstan sebesar $20 \mu A$ pada suhu pengujian $45^\circ C$. Alat yang digunakan yaitu mesin WBCS 3000 automatic battery cycler yang ada di laboratorium P2 Fisika Puspiptek, Serpong.

3.3.9 Pengamatan menggunakan *Optical Microscope*

Spesimen diamati menggunakan *optical microscope* dengan kondisi sebelum dan sesudah diberikan perlakuan elektrokimia untuk melihat perbedaan morfologi pada baterai. Selain itu, hal ini dilakukan untuk melihat apakah teknik manufaktur yang digunakan dapat meratakan SPE ke seluruh sisi dari separator. Adapun pengamatan menggunakan *microscope* dilakukan dengan spesimen yang berbeda. Pengamatan tidak bisa dilakukan dengan spesimen baterai yang sama dikarenakan baterai yang akan diuji elektrokimia tidak dapat di ambil sampel dari potongan dengan alasan sudah berada dalam kondisi tertutup dan tidak boleh dibuka sebelum pengujian elektrokimia.

3.4 Alokasi Waktu Pengerjaan Penelitian

Waktu yang digunakan untuk menyelesaikan penelitian ini diestimasi sekitar 9 bulan. Adapun alokasi dan pembagian waktu pengerjaan seperti yang ditunjukkan padtelah ditampilkan pada **Tabel 3.1** berikut.

Tabel 3.2 Alokasi waktu penelitian

No.	Kegiatan	Bulan																																			
		November				Desember				Januari				Februari				Maret				April				May				Juni				Juli			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Observasi dan perumusan masalah	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2	Studi literatur	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
3	Seminar proposal tugas akhir									■	■	■	■																								
4	Pembuatan SPE					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
5	Pembuatan Battery Pouch Cell													■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
6	Proses pengujian Pouch Cell													■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
7	Analisa data																	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
8	Sidang tugas akhir																																	■	■	■	■

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengukuran Parameter Material Separator

Pengukuran material separator dilakukan untuk melakukan karakterisasi dari material yang digunakan untuk mengetahui perbedaan besaran parameter yang telah ditetapkan. Adapun parameter yang diukur dari material separator yaitu ketebalan dan porositas material. Ketebalan yang dimaksud yakni ketebalan dari material separator, sementara porositas diukur dengan mengetahui rasio dari total area yang tidak tertutupi dengan material separator dan area keseluruhan.

Hasil pengukuran dari masing-masing material separator yang diukur menggunakan mikroskop adalah sebagai berikut.

(Terlampir)

Untuk mengetahui validitas dari hasil pengukuran, dilakukan pengujian statistik untuk mendapatkan rata-rata dari parameter ketebalan dan porositas dengan hasil pengukuran data yang berada di dalam *confidence interval* (CI) sebesar 95% sehingga dapat mengurangi standar deviasi data pengukuran. Adapun nilai dari batas atas dan bawah dari masing-masing pengukuran dihitung pada aplikasi *minitab* atau dapat menggunakan persamaan 2.10. Adapun metode pengujian statistik yang dilakukan yakni menggunakan *one sample-T*. Dengan demikian, akan diketahui nilai rata-rata dari masing-masing parameter pengukuran ketebalan dan porositas dengan hasil data pengukuran yang sudah berada di antara batas atas dan bawah CI yang telah dihitung.

4.1.1 Uji *one sample-T* GF WR 200

DATA 1

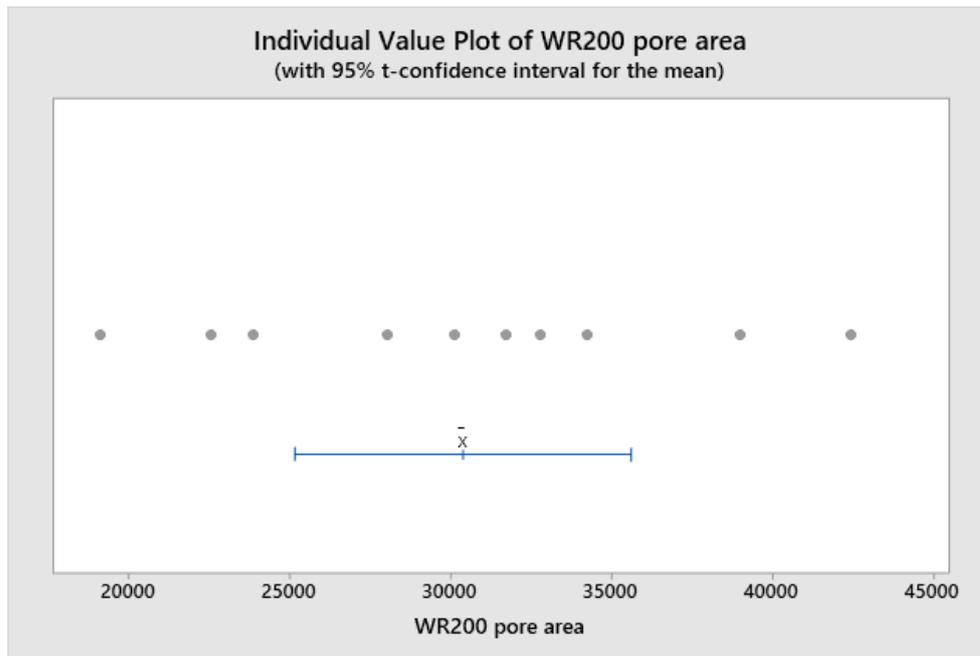
One-Sample T: WR200 void area; WR200 Thickness

Descriptive Statistics

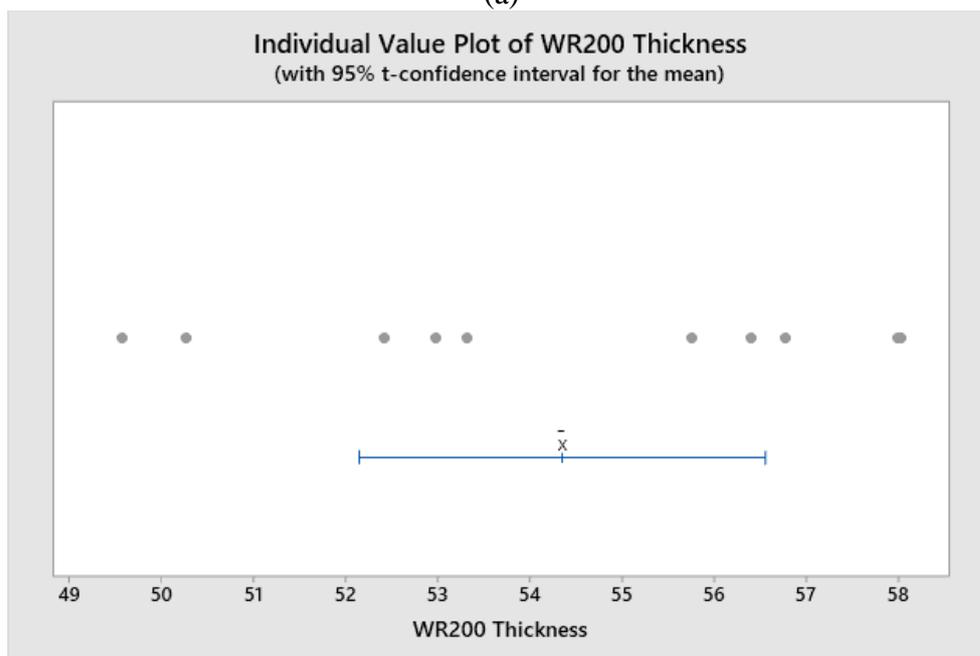
Tabel 4.1 Hasil pengujian statistik pertama pengukuran GF WR 200 pada *void area* dan *thickness* dengan ukuran sampel pengukuran 10 kali

Sample	N (Pengukuran)	Mean (X)	StDev (S)	95% CI for μ
WR200 void area	10	30379 μm^2	7303 μm^2	(25154 μm^2 ; 35603 μm^2)
WR200 Thickness	10	54,353 μm	3,085 μm	(52,146 μm ; 56,560 μm)

μ : mean of WR200 void area; WR200 Thickness



(a)



(b)

Gambar 4.1 Plot nilai data individual dari hasil nilai pengukuran luas pori sebanyak 10 kali pengukuran (a) dan ketebalan sebanyak 10 kali pengukuran (b) pada pengujian statistik pertama separator GF WR 200. Pada data pengukuran luas pori terdapat 5 data yang berada diluar batas CI (a) dan terdapat 5 data yang berada diluar batas CI pada pengukuran ketebalan separator (b).

Berdasarkan hasil pengujian statistik *one-sample t* pertama pada spesimen separator *glass fiber* WR200 dengan ukuran sampel pengukuran sebesar 10, nilai rata-rata yang didapatkan pada parameter besarnya pori-pori sebesar $30379 \mu m^2$ dengan besaran batas atas $35603 \mu m^2$ dan besaran batas bawah $25154 \mu m^2$ dengan menggunakan *confidence interval* sebesar 95%. Dari hasil pengukuran menunjukkan bahwa masih terdapat 5 sampel pengukuran

yang berada diluar batas dari nilai *confidence interval* yang telah ditetapkan. Dengan demikian, hipotesis H_0 untuk pengukuran luasan pori-pori pada pengujian statistik pertama ditolak. Pada pengujian statistik selanjutnya dapat dilakukan eliminasi sampel pengukuran yang berada diluar jangkauan *confidence interval*.

Untuk pengujian statistik pertama pada sampel pengukuran parameter ketebalan separator *glass fiber* WR200 dengan ukuran sampel 10, nilai rata-rata yang didapatkan yakni $54,353 \mu\text{m}$ dengan nilai batas atas sebesar $56,560 \mu\text{m}$ dan nilai batas bawah sebesar $52,146 \mu\text{m}$ dengan menggunakan *confidence interval* 95%. Dari hasil pengukuran yang dilakukan menunjukkan bahwa terdapat 5 sampel pengukuran yang berada diluar batas dari nilai *confidence interval* yang telah ditetapkan. Dengan demikian, hipotesis H_0 untuk pengukuran ketebalan pada pengujian statistik pertama ditolak. Perlu dilakukan pengujian statistik selanjutnya dengan mengeliminasi 5 sampel pengukuran yang berada diluar jangkauan *confidence interval*.

ELIMINATED DATA 1

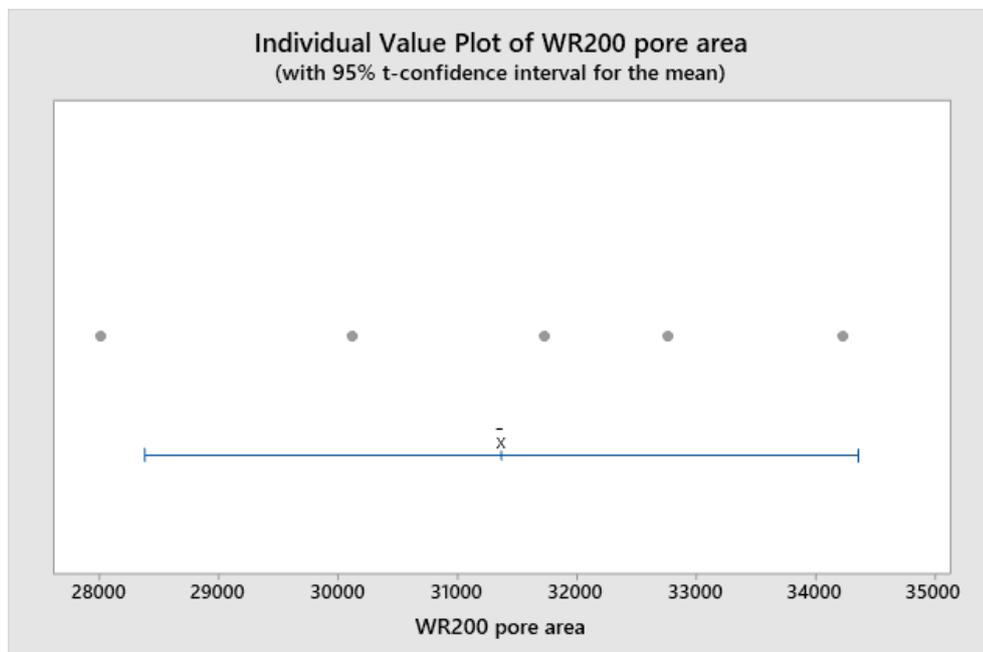
[FIRST DATA ELIMINATION] One-Sample T: WR200 void area; WR200 Thickness

Descriptive Statistics

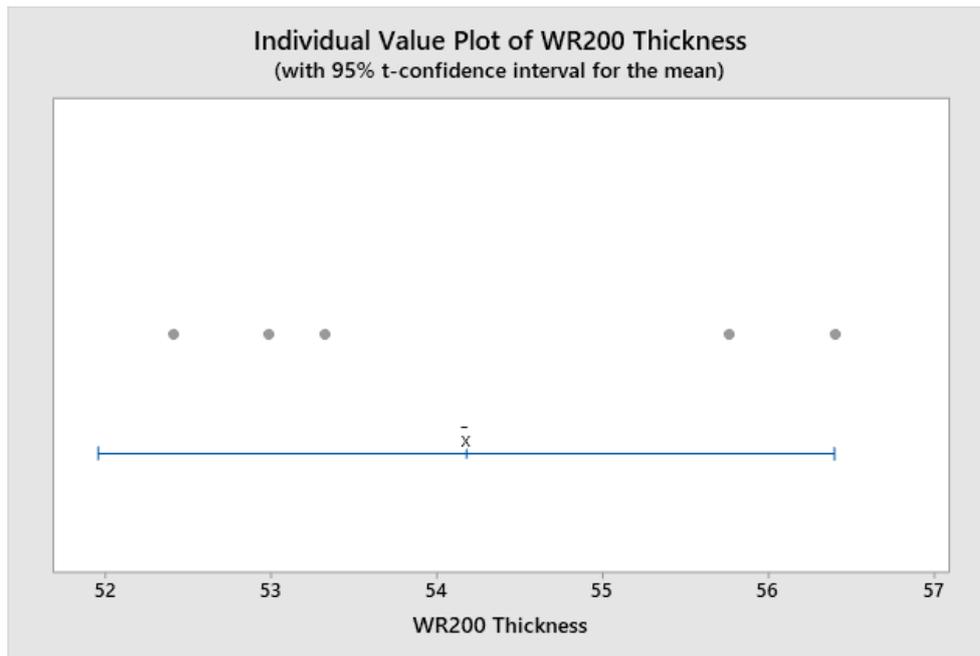
Tabel 4.2 Hasil pengujian statistik kedua dengan mengeliminasi 5 data *void area* dan 5 data *thickness* pada separator GF WR 200

Sample	N (Pengukuran)	Mean (X)	StDev (S)	95% CI for μ
WR200 void area	5	$31368 \mu\text{m}^2$	$2409 \mu\text{m}^2$	$(28377 \mu\text{m}^2; 34360 \mu\text{m}^2)$
WR200 Thickness	5	$54,178 \mu\text{m}$	$1,790 \mu\text{m}$	$(51,956 \mu\text{m}; 56,400 \mu\text{m})$

μ : mean of WR200 void area; WR200 Thickness



(a)



(b)

Gambar 4.2 Plot nilai data individual dari hasil eliminasi data pengujian statistik pertama pada pengukuran data luas pori sebanyak 5 data (a) dan pengukuran data ketebalan sebanyak 5 data (b) pada pengujian statistik kedua separator GF WR 200. Pada data pengukuran luas pori, terdapat satu data yang berada diluar batas CI (a) dan pada data pengukuran ketebalan terdapat satu data yang berada diluar batas CI (b).

Berdasarkan hasil pengujian statistik *one-sample t* kedua pada spesimen separator *glass fiber* WR200 dengan ukuran sampel pengukuran sebesar 5, nilai rata-rata yang didapatkan pada parameter besarnya pori-pori sebesar $31368 \mu\text{m}^2$ dengan besaran batas atas $34360 \mu\text{m}^2$ dan besaran batas bawah $28377 \mu\text{m}^2$ dengan menggunakan *confidence interval* sebesar 95%. Dari hasil pengukuran menunjukkan bahwa masih terdapat 1 sampel pengukuran yang berada diluar batas dari nilai *confidence interval* yang telah ditetapkan, yakni sampel pengukuran $28001,2 \mu\text{m}^2$. Dengan demikian, hipotesis H_0 untuk pengukuran luasan pori-pori pada pengujian statistik kedua ditolak. Pada pengujian statistik selanjutnya dapat dilakukan eliminasi 1 sampel pengukuran yang berada diluar jangkauan *confidence interval*.

Untuk pengujian statistik kedua pada sampel pengukuran parameter ketebalan separator *glass fiber* WR200 dengan ukuran sampel 5, nilai rata-rata yang didapatkan yakni $54,178 \mu\text{m}$ dengan nilai batas atas sebesar $56,400 \mu\text{m}$ dan nilai batas bawah sebesar $51,965 \mu\text{m}$ dengan menggunakan *confidence interval* 95%. Dari hasil pengukuran yang dilakukan menunjukkan bahwa terdapat 1 sampel pengukuran yang berada diluar batas dari nilai *confidence interval* yang telah ditetapkan, yakni sampel pengukuran dengan hasil ketebalan $56,41 \mu\text{m}^2$. Dengan demikian, hipotesis H_0 untuk pengukuran ketebalan pada pengujian statistik pertama ditolak. Perlu dilakukan pengujian statistik selanjutnya dengan mengeliminasi 1 sampel pengukuran yang berada diluar jangkauan *confidence interval*.

ELIMINATED DATA 2

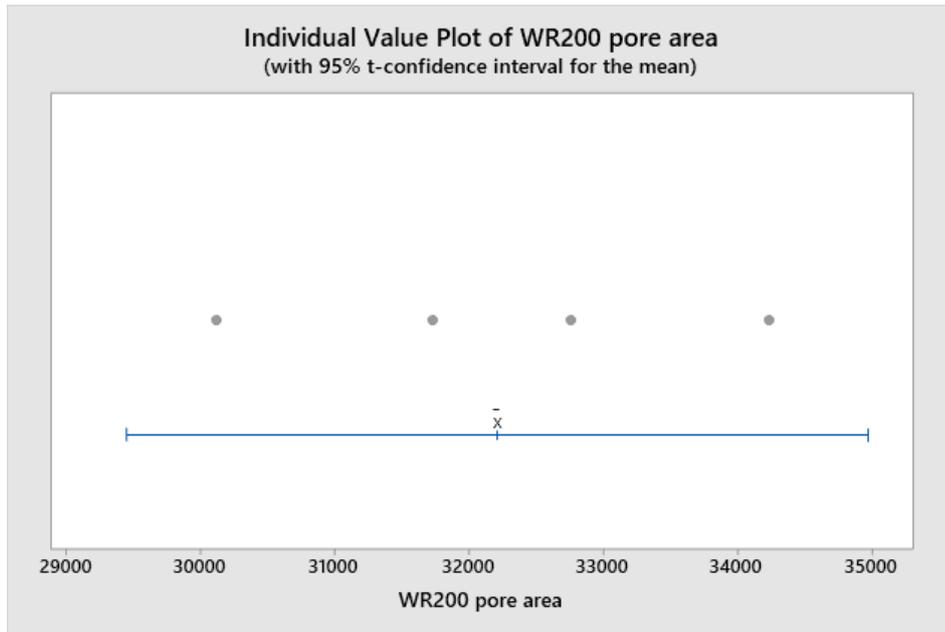
[SECOND DATA ELIMINATION]One-Sample T: WR200 void area; WR200 Thickness

Descriptive Statistics

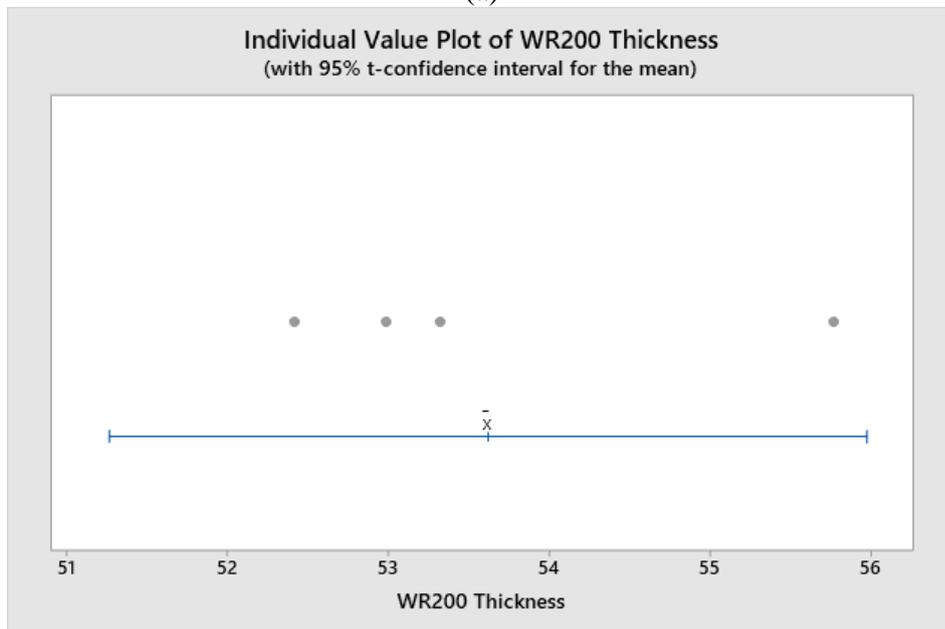
Tabel 4.3 Hasil pengujian statistik ketiga dengan mengeliminasi 1 data *void area* dan 1 data *thickness* pada separator GF WR 200

Sample	N (Pengukuran)	Mean (X)	StDev (S)	95% CI for μ
WR200 void area	4	32210 μm^2	1737 μm^2	(29447 μm^2 ; 34974 μm^2)
WR200 Thickness	4	53,620 μm	1,482 μm	(51,262 μm ; 55,978 μm)

μ : mean of WR200 void area; WR200 Thickness



(a)



(b)

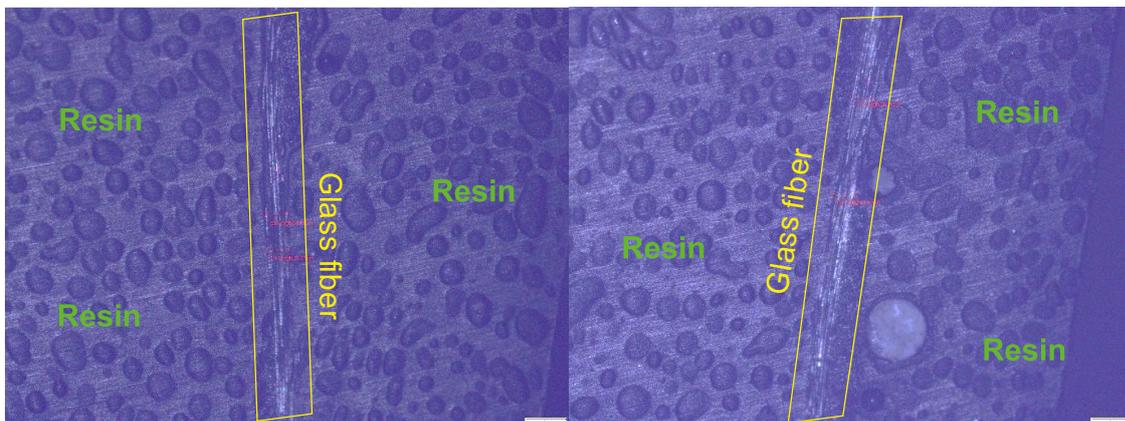
Gambar 4.3 Plot nilai data individual dari hasil eliminasi data pengujian statistik kedua pengukuran luas pori sebanyak 4 data (a) dan pengukuran ketebalan sebanyak 4 data (b) pada pengujian statistik ketiga separator GF WR 200. Seluruh data pengukuran sudah berada di dalam batas CI pada kedua parameter pengukuran.

Berdasarkan hasil pengujian statistik *one-sample t* ketiga pada spesimen separator *glass fiber* WR200 dengan ukuran sampel pengukuran sebesar 4, nilai rata-rata yang didapatkan pada parameter besarnya pori-pori sebesar $32210 \mu\text{m}^2$ dengan besaran batas atas $34974 \mu\text{m}^2$ dan besaran batas bawah $29447 \mu\text{m}^2$ dengan menggunakan *confidence interval* sebesar 95%. Dari hasil pengukuran menunjukkan bahwa seluruh ukuran sampel berada pada jangkauan *confidence interval* yang telah ditetapkan. Dengan demikian, hipotesis H_0 untuk pengukuran luasan pori pada separator *glass fiber* WR200 gagal ditolak, sehingga dapat menggunakan luasan area pori yang didapatkan. Dengan menggunakan persamaan (3.2) didapatkan porositas pada separator *glass fiber* WR 200 sebagai berikut.

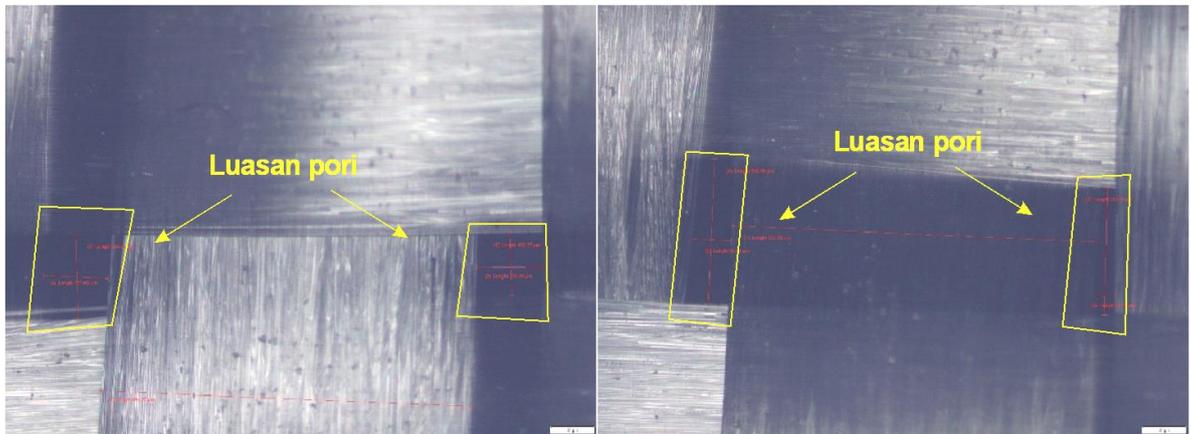
$$\phi = \frac{(0,05326 \text{ mm}^2) \times 9}{28,51 \text{ mm}^2} \times 100\%$$

$$\phi = 1,68 \%$$

Untuk pengujian statistik ketiga pada sampel pengukuran parameter ketebalan separator *glass fiber* WR 200 dengan ukuran sampel 4, nilai rata-rata yang didapatkan yakni $53,260 \mu\text{m}$ dengan nilai batas atas sebesar $55,978 \mu\text{m}$ dan nilai batas bawah sebesar $51,262 \mu\text{m}$ dengan menggunakan *confidence interval* 95%. Dari hasil pengukuran menunjukkan bahwa seluruh ukuran sampel berada pada jangkauan *confidence interval* yang telah ditetapkan. Dengan demikian, hipotesis H_0 untuk pengukuran ketebalan pada separator *glass fiber* WR200 gagal ditolak, sehingga dapat menggunakan luasan area pori yang didapatkan. Jika dilakukan pengamatan menggunakan mikroskop, maka morfologi pada GF WR 200 adalah *woven*. Adapun proses pengukuran ketebalan dan dimensi pori yang dilakukan pada separator *glass fiber* WR200 menggunakan mikroskop dengan skala $100 \mu\text{m}$ dapat dilihat pada **Gambar 4.5**.



Gambar 4.4 Proses pengukuran ketebalan separator *glass fiber* WR200 dengan mikroskop mikroskop skala gambar $100 \mu\text{m}$. Dimana pada area kuning menunjukkan *glass fiber* dengan struktur yang terlihat seperti “*uni-directional*” dari pengamatan mikroskop. Sementara pada daerah dengan label “Resin” menunjukkan daerah resin epoksi yang digunakan untuk mencetak spesimen GF WR 200 sehingga dapat dilihat ketebalan pada luasan penampang spesimen.



Gambar 4.5 Hasil pengamatan mikroskop pada separator GF WR 200 dengan skala gambar 100 μm untuk mencari luasan pori yang dihitung dengan mengukur dimensi panjang dan lebar dari daerah yang kosong dengan serat gelas. Adapun morfologi yang terlihat pada gambar dimana GF WR 200 memiliki struktur anyaman *woven*.

4.1.2 Uji *one sample-T* GF WR 50

DATA 1

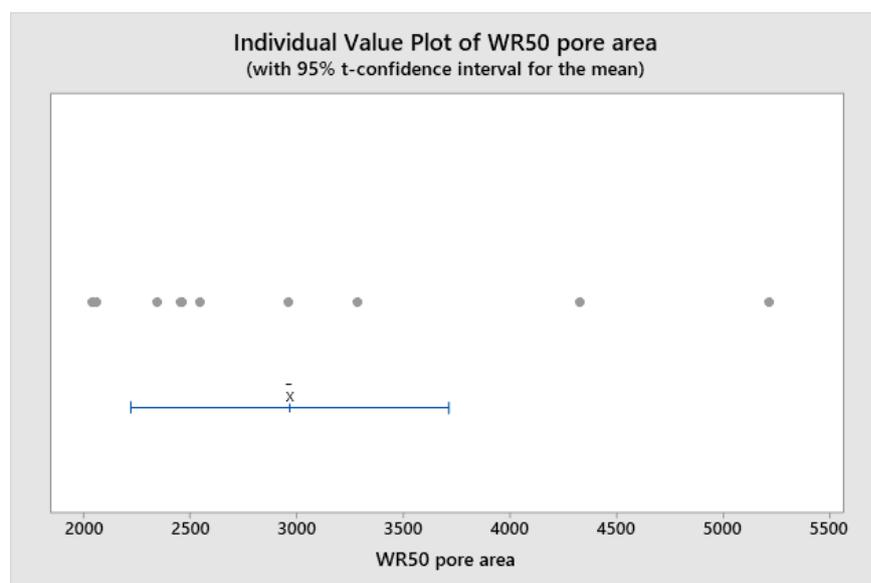
One-Sample T: WR50 void area; WR50 Thickness

Descriptive Statistics

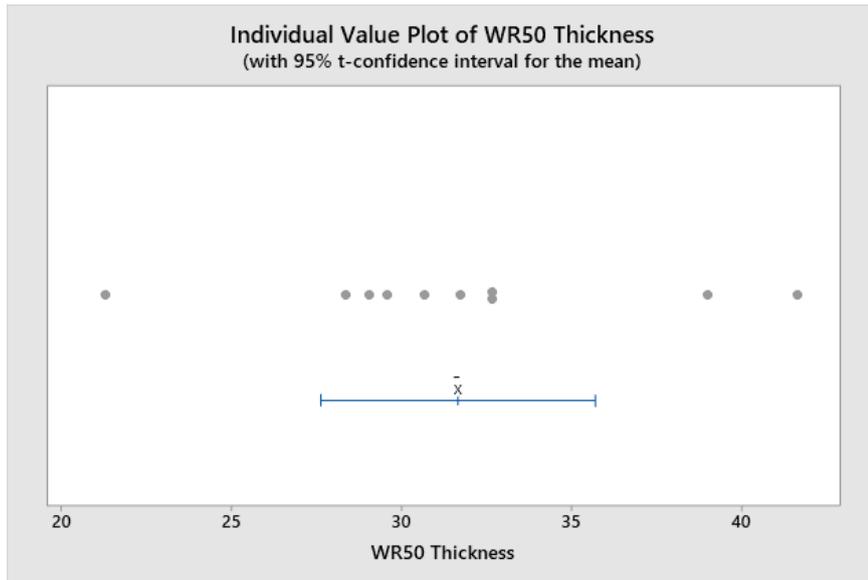
Tabel 4.4 Hasil pengujian statistik pertama pengukuran GF WR 50 pada *void area* dan *thickness* dengan ukuran sampel pengukuran 10 kali

Sample	N (Pengukuran)	Mean (X)	StDev (S)	95% CI for μ
WR50 void area	10	2967 μm^2	1044 μm^2	(2220 μm^2 ; 3714 μm^2)
WR50 Thickness	10	31,66 μm	5,65 μm	(27,62 μm ; 35,70 μm)

μ : mean of WR50 void area; WR50 Thickness



(a)



(b)

Gambar 4.6 Plot nilai data individual dari hasil pengukuran luas pori sebanyak 10 kali pengambilan data (a) dan ketebalan sebanyak 10 kali pengambilan data (b) pada pengujian statistik pertama separator GF WR50. Terdapat 4 data pengukuran yang berada diluar batas CI pada pengukuran area pori (a) dan terdapat 3 data pengukuran yang berada diluar batas CI pada pengukuran ketebalan separator (b).

Berdasarkan hasil pengujian statistik *one-sample t* pertama pada spesimen separator *glass fiber* WR50 dengan ukuran sampel pengukuran sebesar 10, nilai rata-rata yang didapatkan pada parameter besarnya pori-pori sebesar $2967 \mu m^2$ dengan besaran batas atas $3714 \mu m^2$ dan besaran batas bawah $2220 \mu m^2$ dengan menggunakan *confidence interval* sebesar 95%. Dari hasil pengukuran menunjukkan bahwa masih terdapat 4 sampel pengukuran yang berada diluar batas dari nilai *confidence interval* yang telah ditetapkan. Dengan demikian, hipotesis H_0 untuk pengukuran luasan pori-pori pada pengujian statistik pertama ditolak. Pada pengujian statistik selanjutnya dapat dilakukan eliminasi sampel pengukuran yang berada diluar jangkauan *confidence interval*.

Untuk pengujian statistik pertama pada sampel pengukuran parameter ketebalan separator *glass fiber* WR50 dengan ukuran sampel 10, nilai rata-rata yang didapatkan yakni $31,66 \mu m$ dengan nilai batas atas sebesar $35,70 \mu m$ dan nilai batas bawah sebesar $27,62 \mu m$ dengan menggunakan *confidence interval* 95%. Dari hasil pengukuran yang dilakukan menunjukkan bahwa terdapat 3 sampel pengukuran yang berada diluar batas dari nilai *confidence interval* yang telah ditetapkan. Dengan demikian, hipotesis H_0 untuk pengukuran ketebalan pada pengujian statistik pertama ditolak. Perlu dilakukan pengujian statistik selanjutnya dengan mengeliminasi 3 sampel pengukuran yang berada diluar jangkauan *confidence interval*.

ELIMINATED DATA 1

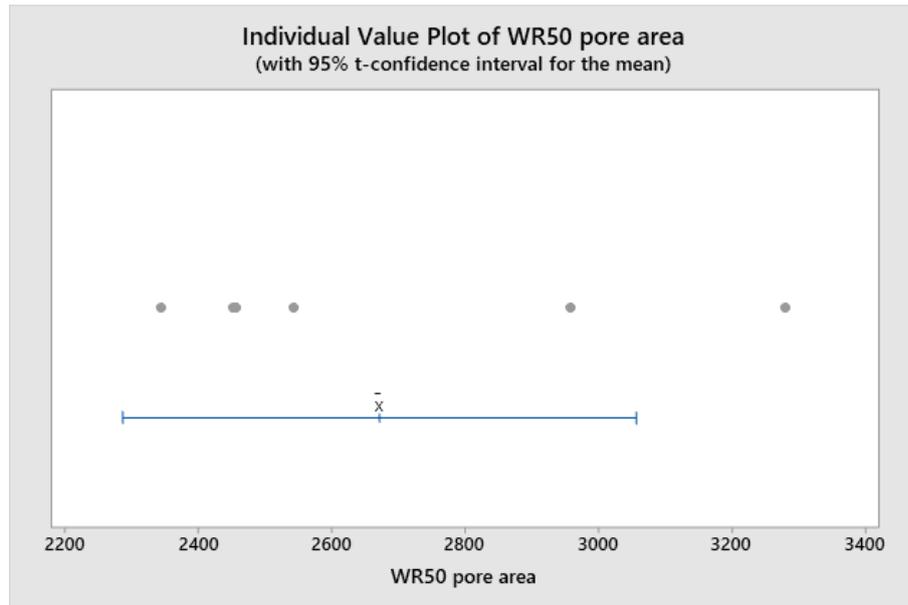
[FIRST DATA ELIMINATION]One-Sample T: WR50 void area; WR50 Thickness

Descriptive Statistics

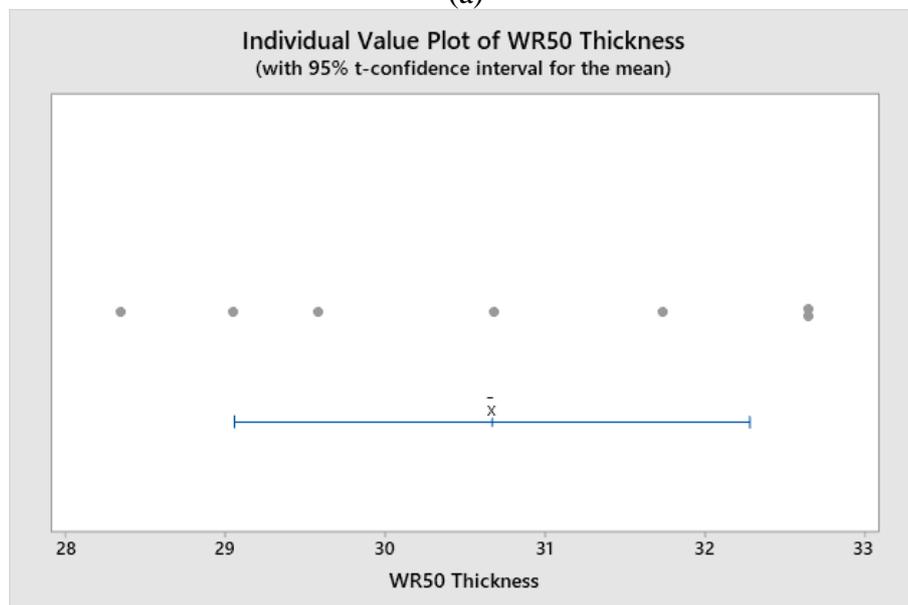
Tabel 4.5 Hasil pengujian statistik kedua dengan mengeliminasi 4 data *void area* dan 3 data *thickness* pada separator GF WR 50

Sample	N (Pengukuran)	Mean (X)	StDev (S)	95% CI for μ
WR50 void area	6	2671 μm^2	367 μm^2	(2286 μm^2 ; 3057 μm^2)
WR50 Thickness	7	30,669 μm	1,745 μm	(29,055 μm ; 32,282 μm)

μ : mean of WR50 void area; WR50 Thickness



(a)



(b)

Gambar 4.7 Plot nilai data individual dari hasil eliminasi data pengukuran luas pori dengan 6 data pengukuran (a) dan hasil eliminasi data ketebalan sebanyak 7 data pengukuran (b) pada pengujian statistik kedua separator GF WR 50. Terdapat satu data pengukuran luas pori yang masih berada diluar batas CI (a) dan 3 data pengukuran ketebalan yang berada diluar batas CI (b).

Berdasarkan hasil pengujian statistik *one-sample t* kedua pada spesimen separator *glass fiber* WR50 dengan ukuran sampel pengukuran sebesar 6, nilai rata-rata yang didapatkan pada parameter besarnya pori-pori sebesar $2671 \mu\text{m}^2$ dengan besaran batas atas $3057 \mu\text{m}^2$ dan besaran batas bawah $2268 \mu\text{m}^2$ dengan menggunakan *confidence interval* sebesar 95%. Dari hasil pengukuran menunjukkan bahwa masih terdapat 1 sampel pengukuran yang berada diluar batas dari nilai *confidence interval* yang telah ditetapkan, yakni sampel pengukuran $3281,50 \mu\text{m}^2$. Dengan demikian, hipotesis H_0 untuk pengukuran luasan pori-pori pada pengujian statistik kedua ditolak. Pada pengujian statistik selanjutnya dapat dilakukan eliminasi 1 sampel pengukuran yang berada diluar jangkauan *confidence interval*.

Untuk pengujian statistik kedua pada sampel pengukuran parameter ketebalan separator *glass fiber* WR50 dengan ukuran sampel 7, nilai rata-rata yang didapatkan yakni $30,669 \mu\text{m}$ dengan nilai batas atas sebesar $32,282 \mu\text{m}$ dan nilai batas bawah sebesar $29,055 \mu\text{m}$ dengan menggunakan *confidence interval* 95%. Dari hasil pengukuran yang dilakukan menunjukkan bahwa terdapat 4 sampel pengukuran yang berada diluar batas dari nilai *confidence interval* yang telah ditetapkan. Dengan demikian, hipotesis H_0 untuk pengukuran ketebalan pada pengujian statistik kedua ditolak. Perlu dilakukan pengujian statistik selanjutnya dengan mengeliminasi 4 sampel pengukuran yang berada diluar jangkauan *confidence interval*.

ELIMINATED DATA 2

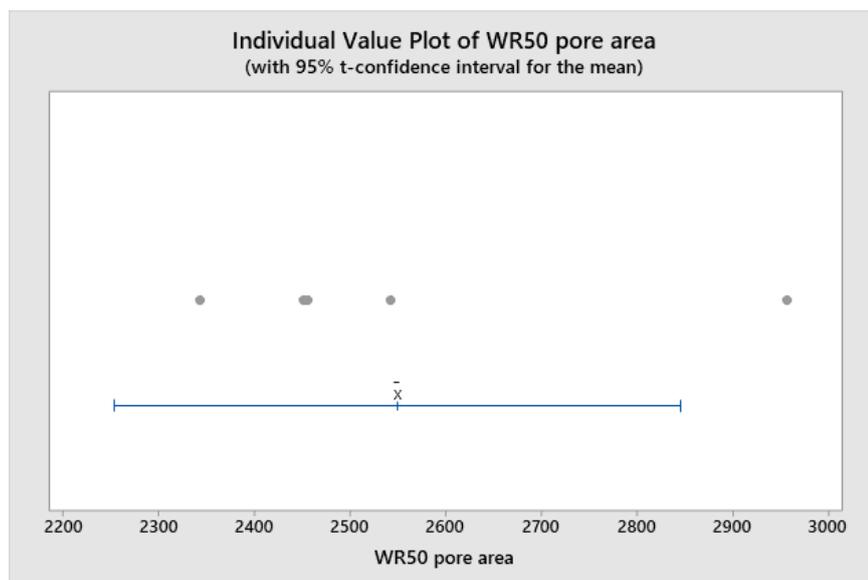
[SECOND DATA ELIMINATION] One-Sample T: WR50 void area; WR50 Thickness

Descriptive Statistics

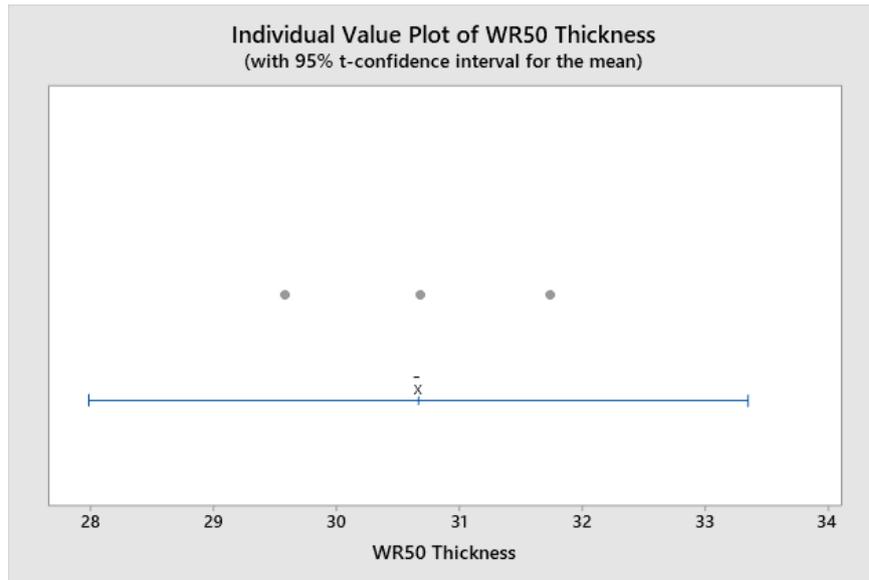
Tabel 4.6 Hasil pengujian statistik ketiga dengan mengeliminasi 1 data *void area* dan 4 data *thickness* pada separator GF WR 50

Sample	N (Pengukuran)	Mean (X)	StDev (S)	95% CI for μ
WR50 void area	5	$2549 \mu\text{m}^2$	$239 \mu\text{m}^2$	($2253 \mu\text{m}^2$; $2846 \mu\text{m}^2$)
WR50 Thickness	3	$30,667 \mu\text{m}$	$1,080 \mu\text{m}$	($27,984 \mu\text{m}$; $33,350 \mu\text{m}$)

μ : mean of WR50 void area; WR50 Thickness



(a)

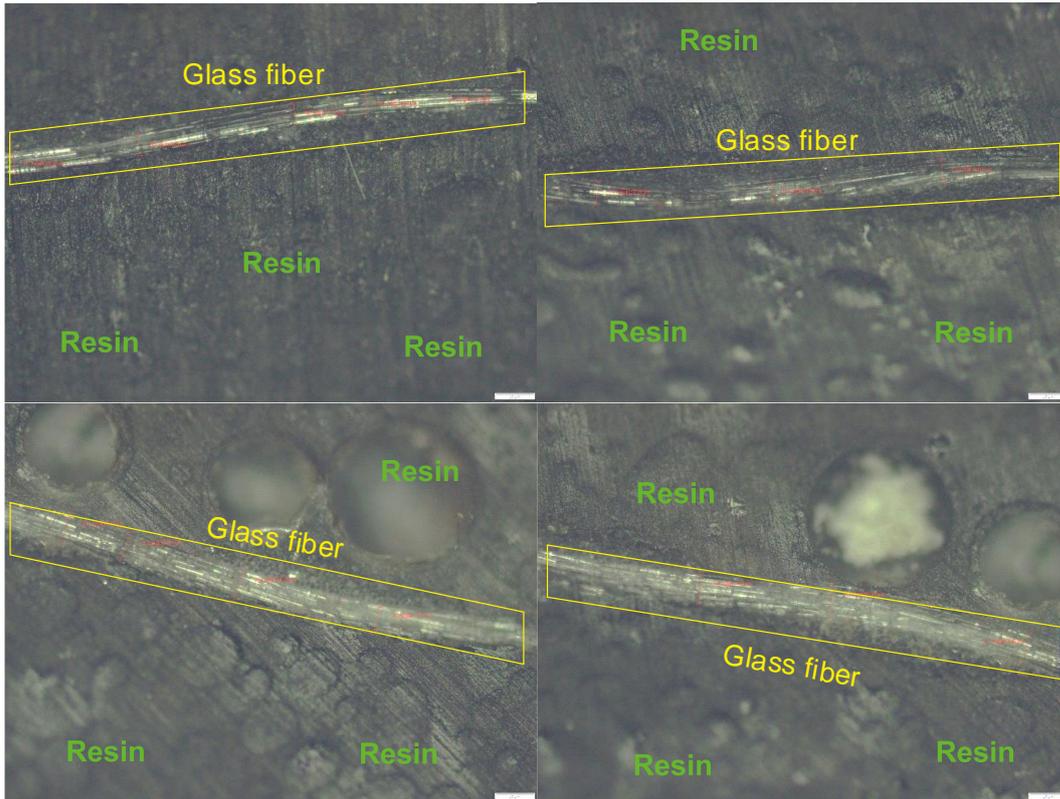


(b)

Gambar 4.8 Plot nilai data individual dari hasil eliminasi pengukuran luas pori dengan data akhir sebanyak 5 data pengukuran (a) dan eliminasi data ketebalan dengan data akhir sebanyak 3 data pengukuran (b) pada pengujian statistik ketiga separator GF WR 50. Pada data pengukuran pori, terdapat satu data pengukuran yang berada diluar batas CI (a), sementara pada pengukuran ketebalan seluruh data ukur sudah berada di dalam rentang CI (b).

Berdasarkan hasil pengujian statistik *one-sample t* ketiga pada spesimen separator *glass fiber* WR50 dengan ukuran sampel pengukuran sebesar 5, nilai rata-rata yang didapatkan pada parameter besarnya pori-pori sebesar $2549 \mu\text{m}^2$ dengan besaran batas atas $2846 \mu\text{m}^2$ dan besaran batas bawah $2253 \mu\text{m}^2$ dengan menggunakan *confidence interval* sebesar 95%. Dari hasil pengukuran menunjukkan bahwa seluruh ukuran sampel berada pada jangkauan *confidence interval* yang telah ditetapkan. Dengan demikian, hipotesis H_0 untuk pengukuran luasan pori pada separator *glass fiber* WR50 ditolak dikarenakan masih terdapat 1 sampel yang berada diluar ambang batas *confidence interval*, yakni sampel pengukuran $2957,18 \mu\text{m}^2$. Dengan demikian, perlu dilakukan pengujian statistik untuk luas pori-pori dengan mengeliminasi satu sampel yang berada diluar jangkauan *confidence interval*.

Untuk pengujian statistik ketiga pada sampel pengukuran parameter ketebalan separator *glass fiber* WR50 dengan ukuran sampel 3, nilai rata-rata yang didapatkan yakni $30,667 \mu\text{m}$ dengan nilai batas atas sebesar $33,350 \mu\text{m}$ dan nilai batas bawah sebesar $27,984 \mu\text{m}$ dengan menggunakan *confidence interval* 95%. Dari hasil pengukuran menunjukkan bahwa seluruh ukuran sampel berada pada jangkauan *confidence interval* yang telah ditetapkan. Dengan demikian, hipotesis H_0 untuk pengukuran ketebalan pada separator *glass fiber* WR50 gagal ditolak, sehingga dapat menggunakan rata-rata ketebalan yang didapatkan pada pengujian statistik ketiga. Adapun proses pengukuran ketebalan yang dilakukan pada separator *glass fiber* WR50 menggunakan mikroskop dengan skala $100 \mu\text{m}$ dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4.9 Hasil pengambilan gambar pada separator GF WR 50 menggunakan mikroskop dengan skala 100 μm untuk mengambil data pengukuran ketebalan. Di dalam area persegi warna kuning merupakan separator GF WR 50 dengan bentuk morfologi yang dilihat dari sisi penampang nampak memiliki arah serat “*uni-directional*”. Sementara diluar daerah persegi kuning merupakan resin yang digunakan sebagai material cetakan agar dimensi dari serat tidak berubah saat dilakukan pengukuran.

ELIMINATED DATA 3

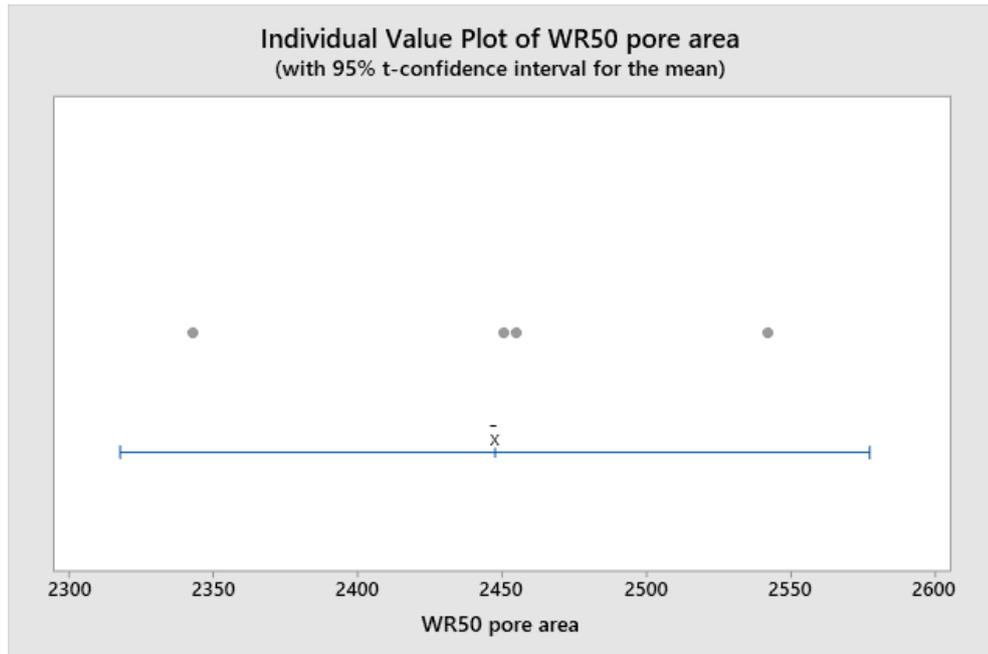
**[THIRD DATA ELIMINATION]One-Sample T: WR50 void area;
WR50 Thickness**

Descriptive Statistics

Tabel 4.7 Hasil pengujian statistik keempat dengan mengeliminasi 1 data *void area* pada separator GF WR 50

Sample	N (Pengukuran)	Mean (X)	StDev (S)	95% CI for μ
WR50 void area	4	2447,5 μm^2	81,7 μm^2	(2317,6 μm^2 ; 2577,5 μm^2)

μ : mean of WR50 void area;



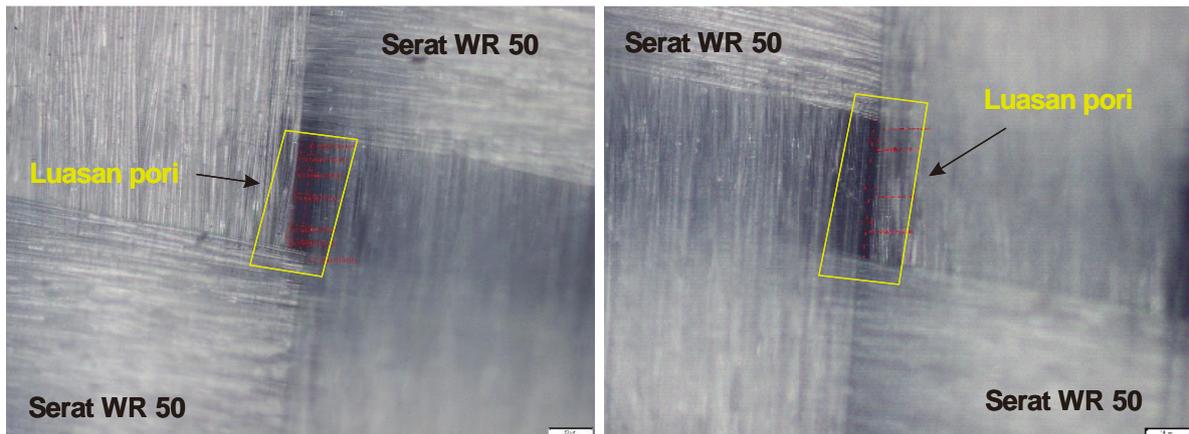
Gambar 4.10 Plot nilai data individual dari hasil pengukuran luas pori pada pengujian statistik keempat separator GF WR 50. Adapun seluruh data pengukuran sudah berada di dalam rentang CI.

Berdasarkan hasil pengujian statistik *one-sample t* keempat pada spesimen separator *glass fiber* WR50 dengan ukuran sampel pengukuran sebesar 4, nilai rata-rata yang didapatkan pada parameter besarnya pori-pori sebesar $2447,5 \mu\text{m}^2$ dengan besaran batas atas $2577,5 \mu\text{m}^2$ dan besaran batas bawah $2317,6 \mu\text{m}^2$ dengan menggunakan *confidence interval* sebesar 95%. Dari hasil pengukuran menunjukkan bahwa seluruh ukuran sampel berada pada jangkauan *confidence interval* yang telah ditetapkan. Dengan demikian, hipotesis H_0 untuk pengukuran luasan pori pada separator *glass fiber* WR50 gagal ditolak, sehingga dapat menggunakan luasan area pori yang didapatkan. Adapun pengukuran porositas dapat dilakukan dengan menggunakan perhitungan sebagai berikut:

$$\phi = \frac{(0,0024475\text{mm}^2) \times 9}{7,11 \text{mm}^2} \times 100\%$$

$$\phi = 0,42 \%$$

Luasan pori-pori yang didapatkan berdasarkan hasil pengukuran pada dimensi dari pori-pori yang ada pada spesimen GF WR 50. Dari hasil pengamatan menggunakan mikroskop dengan perbesaran $50 \mu\text{m}$, menunjukkan bahwa terdapat pori-pori diantara anyaman antar kumpulan dari serat. Morfologi yang dimiliki oleh spesimen GF WR 50 ini adalah *woven*. Adapun gambar dari hasil pengamatan mikroskop dapat ditunjukkan sebagai berikut.



Gambar 4.11 Hasil pengamatan morfologi dari separator GF WR 50 dengan skala pengukuran 50 μm yang ditunjukkan pada garis skala di bawah kanan gambar. Adapun luasan pori yang dihitung dengan mengukur dimensi panjang dan lebar dari daerah yang tidak terisi serat (daerah di dalam persegi kuning). Terlihat bahwa bentuk dari GF WR 50 memiliki morfologi serat *woven*.

4.1.3 Uji *one sample-T* Separator Whatmann

DATA 1

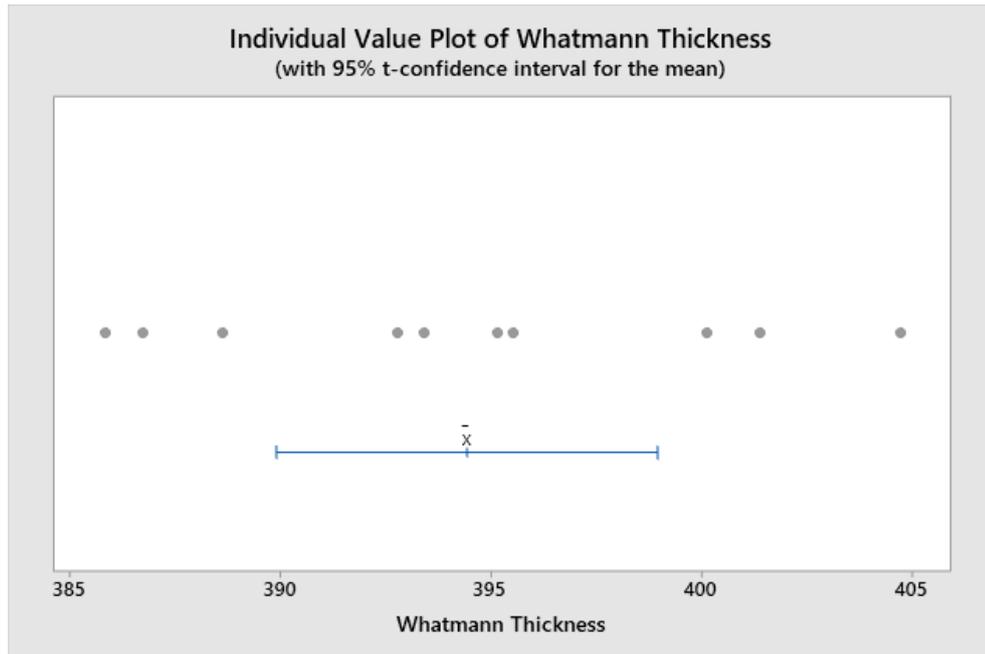
One-Sample T: Whatmann Thickness

Descriptive Statistics

Tabel 4.8 Hasil pengujian statistik pertama pengukuran separator Whatmann pada *thickness* dengan ukuran sampel pengukuran 10 kali

N (pengukuran)	Mean (X)	StDev (S)	95% CI for μ
10	394,43 μm	6,34 μm	(389,90 μm ; 398,96 μm)

μ : mean of Whatmann Thickness



Gambar 4.12 Plot nilai data individual dari hasil pengukuran ketebalan separator jenis Whatmann pada pengujian statistik pertama sebanyak 10 kali pengambilan data pengukuran. Terdapat 6 data pengukuran yang berada diluar batas CI.

Berdasarkan pengujian statistik pertama pada sampel pengukuran parameter ketebalan separator whatmann dengan ukuran sampel pengukuran 10, nilai rata-rata yang didapatkan yakni $394,43 \mu\text{m}$ dengan nilai batas atas sebesar $398,96 \mu\text{m}$ dan nilai batas bawah sebesar $389,90 \mu\text{m}$ dengan menggunakan *confidence interval* 95%. Dari hasil pengukuran yang dilakukan menunjukkan bahwa terdapat 6 sampel pengukuran yang berada diluar batas dari nilai *confidence interval* yang telah ditetapkan. Dengan demikian, hipotesis H_0 untuk pengukuran ketebalan pada pengujian statistik pertama ditolak. Perlu dilakukan pengujian statistik selanjutnya dengan eliminasi 6 sampel pengukuran yang berada diluar jangkauan *confidence interval*.

ELIMINATED DATA 1

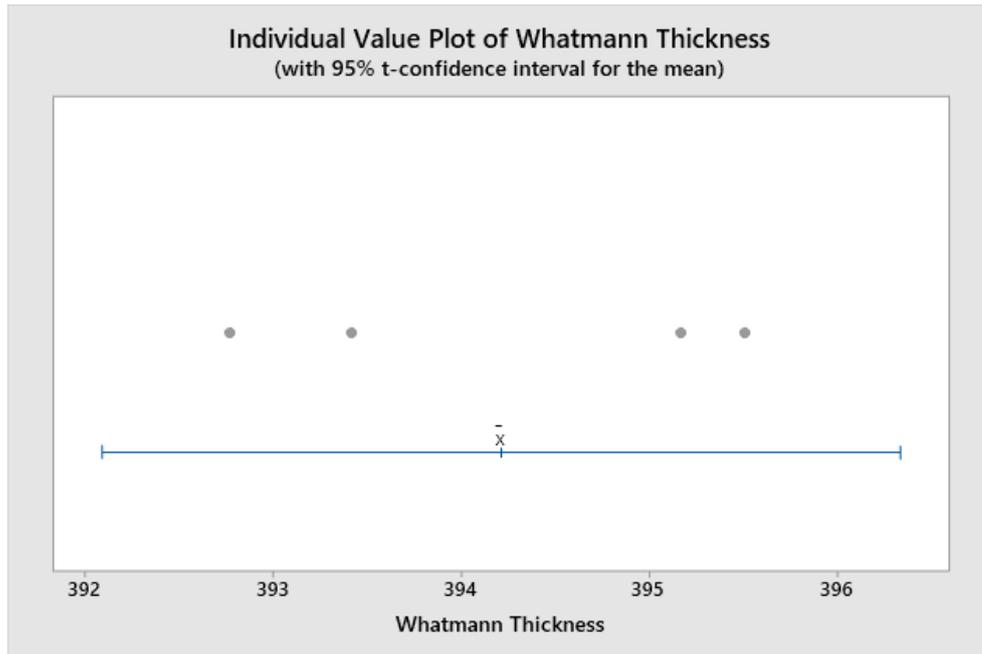
[SECOND DATA ELIMINATION]One-Sample T: Whatmann Thickness

Descriptive Statistics

Tabel 4.9 Hasil pengujian statistik kedua dengan eliminasi 6 data *thickness* pada separator Whatmann

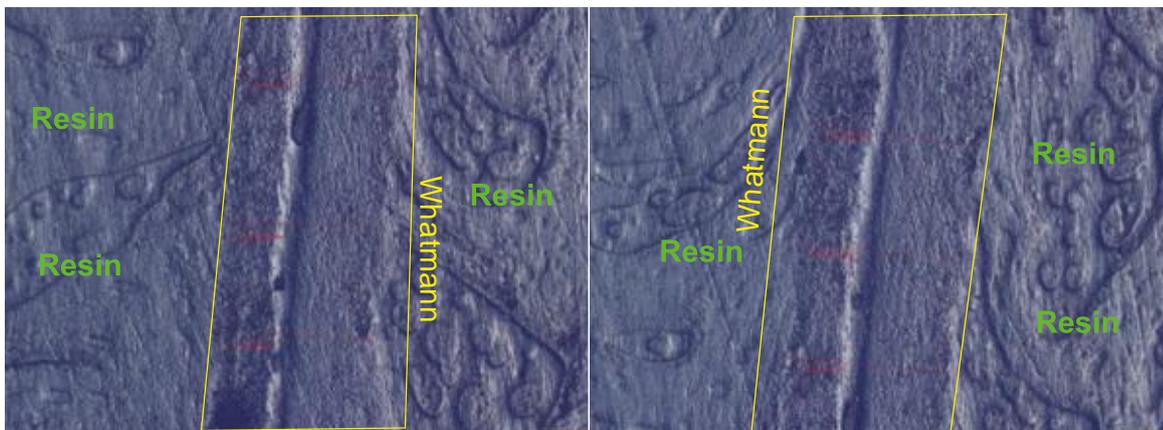
N (Pengukuran)	Mean (X)	StDev (S)	95% CI for μ
4	394,213 μm	1,336 μm	(392,087 μm ; 396,338 μm)

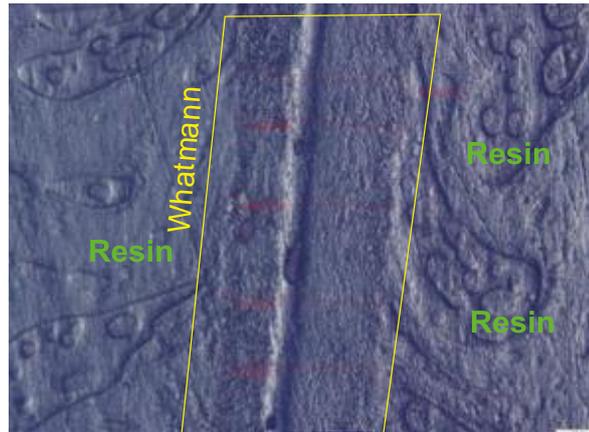
μ : mean of Whatmann Thickness



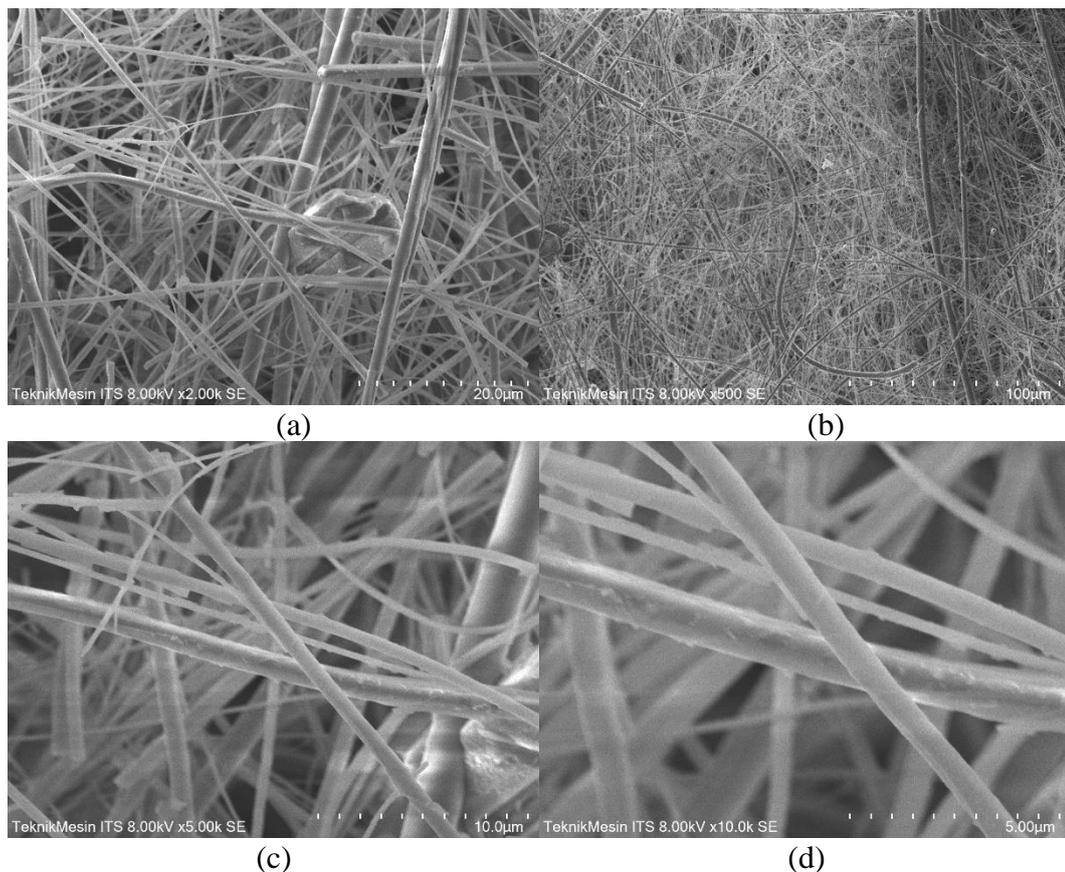
Gambar 4.13 Plot nilai data individual pengukuran ketebalan separator jenis Whatmann pada pengujian statistik kedua. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh data pengukuran sudah berada di dalam rentang CI.

Berdasarkan hasil pengujian statistik kedua pada sampel pengukuran parameter ketebalan separator whatmann dengan ukuran sampel 4, nilai rata-rata yang didapatkan yakni $394,213 \mu\text{m}$ dengan nilai batas atas sebesar $396,338 \mu\text{m}$ dan nilai batas bawah sebesar $392,087 \mu\text{m}$ dengan menggunakan *confidence interval* 95%. Dari hasil pengukuran menunjukkan bahwa seluruh ukuran sampel berada pada jangkauan *confidence interval* yang telah ditetapkan. Dengan demikian, hipotesis H_0 untuk pengukuran ketebalan pada separator whatmann gagal ditolak, sehingga dapat menggunakan rata-rata ketebalan yang didapatkan pada pengujian statistik ketiga. Adapun proses pengukuran ketebalan yang dilakukan pada separator whatmann menggunakan mikroskop dengan skala $100 \mu\text{m}$ dapat dilihat pada gambar berikut.





Gambar 4.14 Hasil pengamatan dan pengukuran separator whatmann menggunakan mikroskop dengan skala gambar 100 μm yang terletak di bawah kanan masing-masing gambar. Adapun identifikasi dari material separator Whatmann dapat dilakukan dengan melihat perubahan struktur morfologi dari hasil pengamatan. Dimana separator whatmann dapat dibedakan dengan melihat morfologinya yang lebih halus dibandingkan dengan daerah resin yang digunakan sebagai material pencetak (daerah separator Whatmann ditunjukkan di dalam persegi kuning). Struktur morfologi yang dimiliki oleh separator whatmann memiliki struktur dengan discontinuous fiber. Dimana apabila dilihat menggunakan SEM, maka terlihat bahwa susunan serat memiliki ketidakteraturan pada seluruh sisi.



Gambar 4.15 Hasil pengamatan SEM pada separator Whatmann dengan variasi perbesaran gambar (a) 2000 kali, (b) 500 kali, (c) 5000 kali, dan (d) 10000 kali. Dimana pengamatan menunjukkan morfologi yang dimiliki oleh separator Whatmann yakni *discontinuous fiber* dengan ukuran dan susunan yang acak pada tiap bagian

Berdasarkan hasil pengujian statistik yang telah dilakukan, adapun rangkuman dari parameter yang diukur dari masing-masing jenis separator yang ditabulasikan sebagai berikut. Terlihat bahwa separator GF WR 200 memiliki porositas sebesar 1.68 % dengan ketebalan sebesar 53.620 μm dan morfologi yang dimiliki yakni jenis *woven*. Kemudian untuk separator GF WR 50 memiliki porositas sebesar 0.42 % dengan ketebalan sebesar 30.667 μm dan morfologi sama dengan GF WR 200, yakni jenis *woven*. Sementara pada separator whatmann, ketebalan yang dimiliki yakni 394.213 μm dengan morfologi material berbentuk *discontinuous*. Adapun porositas tidak dapat diukur menggunakan metode yang sama seperti GF WR 50 maupun GF WR 200 dikarenakan struktur serat yang kecil serta tidak ada pola tertentu sehingga tidak dapat mengambil luasan pori yang memang tidak tertutupi sama sekali dengan material separator.

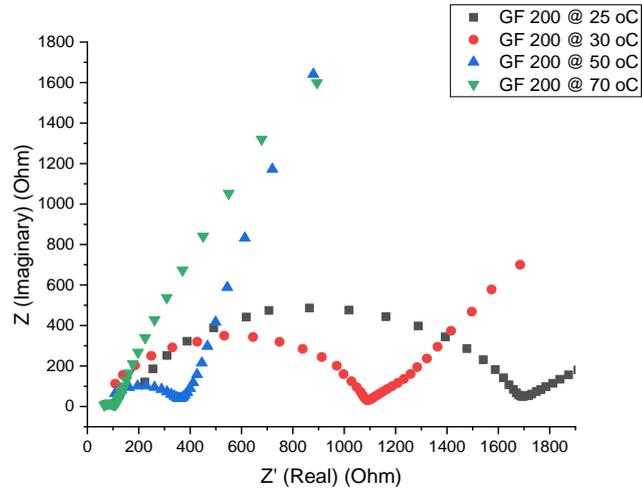
Tabel 4.10 Rekapitulasi parameter ketebalan dan porositas dari setiap variasi material separator

Jenis GF	Luas Void (μm^2)	Banyak Void	Luas Sampel (μm^2)	% Porosity	Ketebalan (μm)
WR50	0.0024	12	7.11	0.42	30.67
WR200	0.0532	9	28.51	1.68	53.62
Whatmann	-	-	-	-	394.21

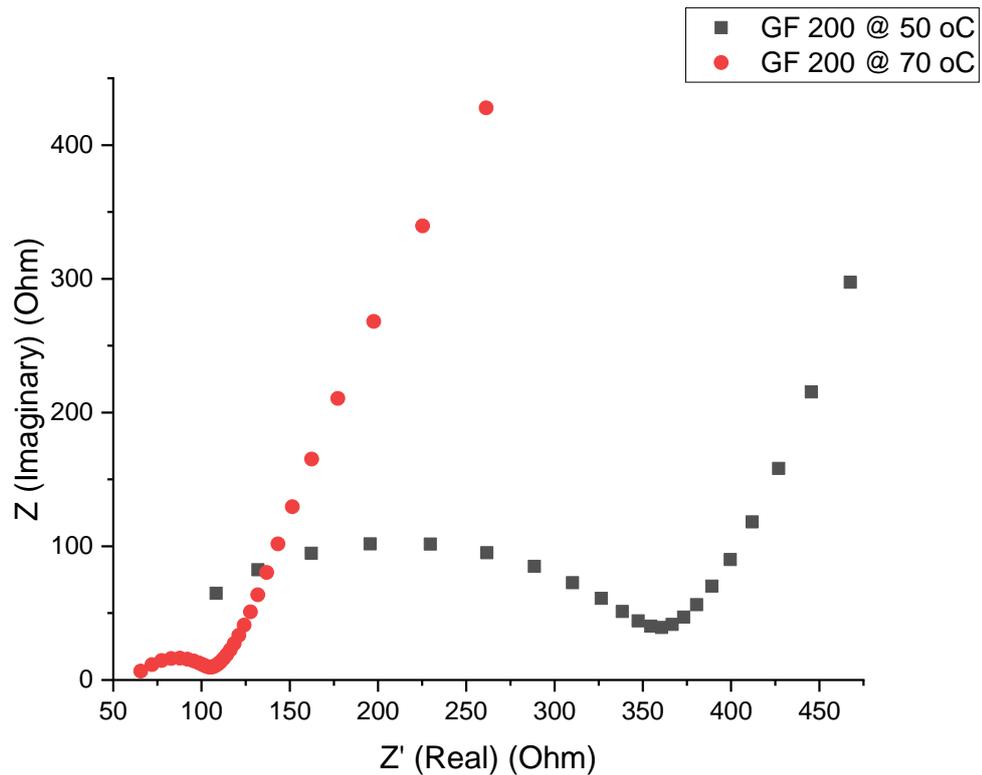
4.2 Hasil Pengujian *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS)

Pengujian *electrochemical impedance spectroscopy* dilakukan setelah pengujian *cyclic voltammetry* dan *charge-discharge* dengan tujuan untuk melihat impedansi yang dibentuk setelah diberikan perlakuan. Pada pengujian EIS, kurva nyquist menunjukkan beberapa informasi yang dapat digunakan sebagai analisis kualitatif. Kurva yang dihasilkan berbentuk setengah lingkaran (*semicircle*) dengan garis lurus (*straightline*) dengan sudut tertentu. Pada bentuk setengah lingkaran, titik awal perpotongan dengan garis sumbu *real* (Z') pada daerah frekuensi tinggi menunjukkan resistansi R_b , yakni resistansi pada komponen elektrolit, separator, dan elektroda (*bulk resistance*); titik perpotongan akhir pada sumbu *real* (Z') pada daerah frekuensi rendah menunjukkan nilai resistansi transfer muatan antar permukaan material aktif dan elektrolit (R_{ct}); dan kemiringan dari garis lurus pada daerah frekuensi terendah merupakan presentasi dari impedansi warburg, yakni memiliki makna fisik mengenai proses difusi ion Li^+ dalam partikel material aktif katoda. Pemberian perlakuan suhu dilakukan untuk mempelajari performa elektrokimia pada baterai yang menggunakan variasi jenis separator yang berbeda. Adapun hasil pengujian EIS yang dilakukan pada masing-masing variasi jenis separator beserta dengan perlakuan suhu yang diberikan sebagai berikut.

4.2.1 Hasil Pengujian EIS untuk spesimen GF WR 200



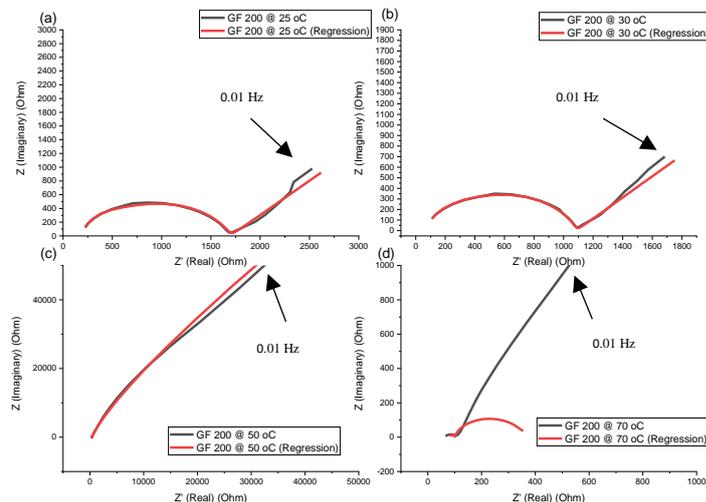
Gambar 4.16 Hasil Pengujian EIS spesimen separator GF WR 200 dengan variasi suhu 25, 30, 50, dan 70 °C. Plot Nyquist menunjukkan diameter kurva yang semakin kecil dengan meningkatnya suhu pengujian. Kurva Nyquist yang dihasilkan pada hambatan warburg (yang ditunjukkan dengan tanda panah) menunjukkan hambatan difusi litium ion yang masih tinggi.



Gambar 4.17 Hasil pengujian spesimen separator GF 200 dengan suhu 50 °C dan 70 °C sebagai perbesaran untuk melihat daerah setengah lingkaran secara detail.

Berdasarkan hasil pengujian *electrochemical impedance spectroscopy* untuk spesimen *glass fiber* WR 200 dengan variasi suhu 25, 30, 50, dan 70 °C, terdapat perbedaan yang cukup signifikan dari hasil plot Nyquist yang dihasilkan pada pengujian dengan suhu yang berbeda.

Dimana, diameter lingkaran dari plot terbesar dimiliki oleh spesimen GF WR 200 dengan suhu pengujian 25 °C, kemudian dilanjutkan dengan suhu 30 °C, 50 °C, dan diameter Nyquist terkecil dimiliki oleh suhu pengujian 70 °C. Hal ini menandakan bahwa semakin tinggi suhu pengujian, maka nilai dari hambatan *charge transfer* atau R_{ct} akan semakin mengecil. Apabila dilihat pada plot pertama Nyquist dari seluruh pengujian, yang merupakan resistansi *bulk* (elektrolit dan separator), maka seluruh pengujian memiliki nilai yang mendekati, walaupun ada beberapa nilai yang tidak mirip pada plot pertama seperti pada pengujian suhu 70 °C yang memiliki impedansi pada sumbu real sebesar sekitar 100 Ω , suhu 25 °C memiliki impedansi pada sumbu real sekitar 200 Ω , dan suhu pengujian 30 °C dan 50 °C memiliki impedansi pada sumbu real sekitar 50 Ω . Nilai yang mirip ini menandakan bahwa resistansi yang ditimbulkan oleh komponen *bulk* seperti elektrolit dan separator memiliki nilai yang dekat dikarenakan penggunaan material yang sama pada pengujian suhu yang berbeda. Untuk mendapatkan nilai seperti hambatan *bulk* (R_e) dan hambatan *charge transfer* (R_{ct}), maka dapat dilakukan analisis regresi dengan melakukan *fitting* menggunakan sirkuit ekuivalen yang digunakan untuk menggambarkan fenomena impedansi yang terjadi pada baterai. Berikut merupakan hasil *plotting* dari analisis Nyquist berdasarkan sirkuit ekuivalen yang dibuat.



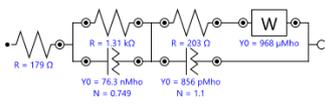
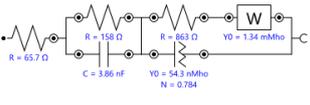
Gambar 4.18 Hasil *fitting* regresi dengan data plot Nyquist spesimen GF WR 200 pada variasi (a) suhu 25 °C, (b) suhu 30 °C, (c) suhu 50 °C, dan (d) suhu 70 °C. Hasil regresi pada suhu pengujian 70 °C memiliki hasil regresi paling tidak sesuai dibandingkan dengan suhu pengujian lainnya dengan menggunakan konfigurasi sirkuit ekuivalen yang sama.

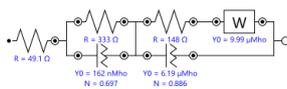
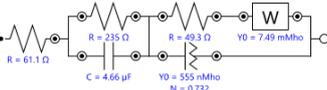
Berdasarkan hasil *fitting*, terlihat bahwa hasil regresi yang mendekati secara visual dimiliki oleh spesimen dengan pengujian 25, 30, dan 50 °C. Sementara, hasil *fitting* pada spesimen pengujian 70 °C memiliki kedekatan yang kurang dibandingkan dengan hasil *fitting* pengujian 25, 30, dan 50 °C. Dimana jika dilihat *chi-squared* yang dihasilkan, spesimen pengujian 25 °C memiliki nilai sebesar 0.014767, spesimen pengujian 30 °C memiliki nilai 0.0089641, dan spesimen pengujian suhu 50 °C memiliki nilai sebesar 0.028321. Sementara nilai *chi-squared* dari pengujian 70 °C memiliki nilai sebesar 6.6527. Nilai *chi-squared* yang besar melambangkan bahwa model regresi yang kurang sesuai dengan model yang ingin disesuaikan. Semakin kecil nilai *chi-squared*, maka model regresi akan mendekati dengan model sebenarnya. Apabila dilihat dari nilai resistansi *bulk* (R_e) berdasarkan nilai regresi yang dibuat, pada spesimen pengujian 25 °C memiliki hambatan *bulk* sebesar 179.38 Ω , spesimen

pengujian 30 °C memiliki hambatan *bulk* sebesar 65.708 Ω, spesimen pengujian 50 °C memiliki hambatan *bulk* sebesar 49.095 Ω, dan spesimen pengujian 70 °C memiliki hambatan *bulk* sebesar 61.075 Ω. Apabila dilihat dari hambatan *charge transfer* yang dimiliki, spesimen pengujian 25 °C memiliki nilai hambatan *charge transfer* terbesar dengan nilai sebesar 1314 Ω, kemudian dilanjutkan dengan hambatan spesimen pengujian 30 °C dengan nilai 158.14 Ω, lalu dilanjutkan dengan spesimen pengujian 50 °C dengan nilai hambatan *charge transfer* sebesar 332.67 Ω, dan nilai hambatan *charge transfer* terkecil dengan nilai hambatan *charge transfer* sebesar 235.21 Ω pada suhu pengujian 70 °C.

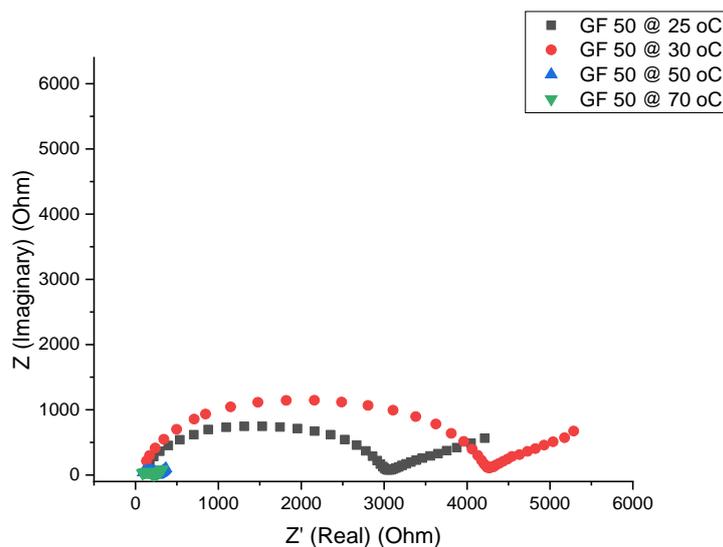
Proses *fitting* kurva dengan plot Nyquist menggunakan tiga rangkaian sirkuit utama yang di serikan secara bersamaan. Pada rangkaian pertama, terdiri dari resistor (R_e) tunggal yang merepresentasikan resistansi dari *solid polymer electrolyte* (SPE). Pada rangkaian kedua, merupakan komponen resistansi *charge transfer* (R_{ct}) yang di paralelkan dengan *constant phase element* (Q_1) yang merepresentasikan material separator. Adapun pada rangkaian ketiga merupakan resistansi dari material katoda (R_3) yang diserikan dengan komponen Warburg yang merupakan koefisien difusi ion litium pada material aktif katoda. Adapun kedua komponen tersebut diparalelkan dengan *constant phase element* (Q_2). Terdapat variasi penggunaan komponen kapasitor sempurna pada model sirkuit pengujian suhu 30°C dan 70 °C dikarenakan model regresi lebih mendekati dengan model sebenarnya. Adapun hasil dari nilai dari masing-masing parameter yang ditabulasikan dalam tabel sebagai berikut.

Tabel 4.11 Tabulasi data parameter regresi dari plot Nyquist spesimen GF WR 200

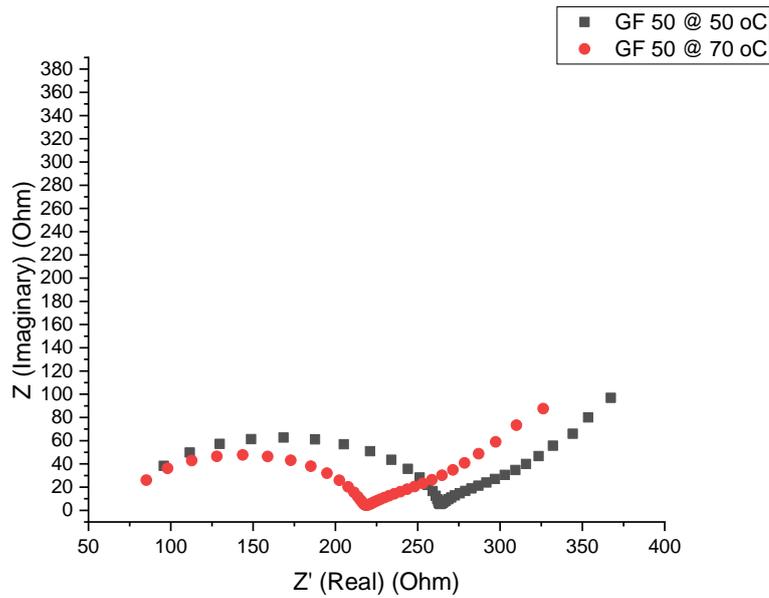
Spesimen	Sirkuit ekuivalen GF WR 200	Element	Parameter	Value	Estimated Error (%)
Spesimen pengujian 25 °C		Hambatan	R_e	179.38 Ω	8.199
		Hambatan	R_{ct}	1314 Ω	15.577
		Hambatan	R_3	202.82 Ω	92.896
		Kapasitans	Q_1	7.6336E-08 nMho	20.766
		Rasio Kapasitans	N_1	0.74893	5.031
		Kapasitans	Q_2	8.5563E-10 Mho	214.987
		Rasio Kapasitans	N_2	1.1	18.243
		Hambatan Warburg	W	0.00096767 Mho	2.596
		<i>Chi-squared</i>		0.014767	
		Spesimen pengujian 30 °C		Hambatan	R_e
Hambatan	R_{ct}			158.14 Ω	24.997
Hambatan	R_3			862.74 Ω	5.292
Kapasitans	Q_1			3.8601E-09 nF	25.005
Rasio Kapasitans	N_1			1	-
Kapasitans	Q_2			5.4313E-08 Mho	18.240
Rasio Kapasitans	N_2			0.78355	2.484
Hambatan Warburg	W			0.0013414 Mho	1.798
<i>Chi-squared</i>				0.0089641	
		Hambatan	R_e	49.095 Ω	18.592

Spesimen pengujian 50 °C 	Hambatan	R_{ct}	332.67 Ω	5.580
	Hambatan	R_3	147.54 Ω	31041.868
	Kapasitans	Q_1	1.6193E-07 Mho	42.279
	Rasio Kapasitans	N_1	0.6969	4.701
	Kapasitans	Q_2	6.1934E-06 Mho	60.041
	Rasio Kapasitans	N_2	0.88594	15.744
	Hambatan Warburg	W	9.9898E-06 Mho	11.752
	<i>Chi-squared</i>			0.028321
Spesimen pengujian 70 °C 	Hambatan	R_e	61.075 Ω	86.477
	Hambatan	R_{ct}	235.21 Ω	42.168
	Hambatan	R_3	49.319 Ω	129.499
	Kapasitans	Q_1	4.6575E-06 F	46.675
	Rasio Kapasitans	N_1	1	-
	Kapasitans	Q_2	5.5548E-07 Mho	1100.406
	Rasio Kapasitans	N_2	0.73191	123.493
	Hambatan Warburg	W	0.0074919 Mho	698.302
	<i>Chi-squared</i>			6.6527

4.2.2 Hasil Pengujian EIS untuk spesimen GF WR 50

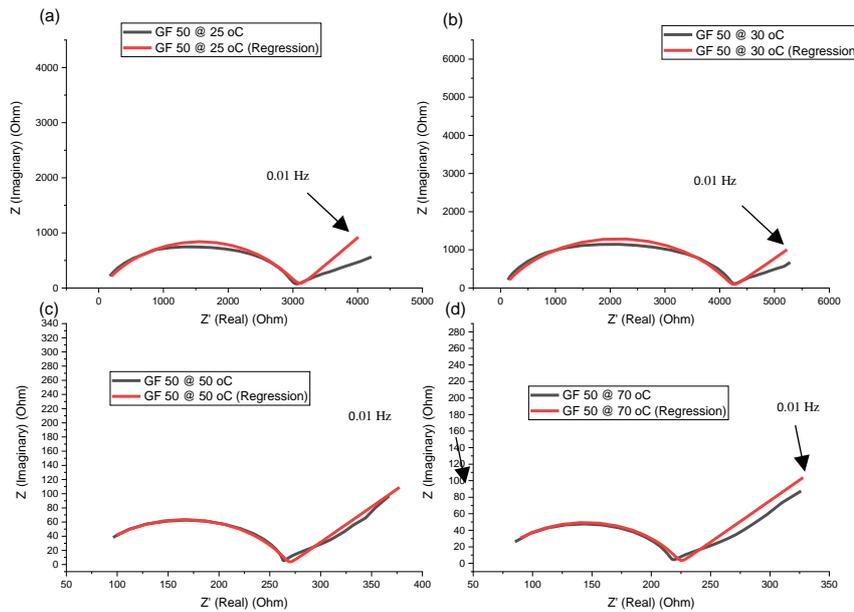


Gambar 4.19 Hasil Pengujian EIS spesimen separator GF WR 50 dengan variasi suhu pengujian 25, 30, 50, dan 70 °C. Diameter setengah lingkaran dari plot Nyquist yang semakin mengecil dengan meningkatnya suhu pengujian.



Gambar 4.20 Hasil pengujian spesimen separator GF 50 dengan suhu 50 °C dan 70 °C sebagai perbesaran kurva dari **Gambar 4.19**.

Berdasarkan hasil pengujian *electrochemical impedance spectroscopy* pada spesimen glass fiber WR 50 dengan variasi suhu 25, 30, 50, dan 70 °C, terdapat perbedaan yang cukup signifikan dari hasil plot Nyquist yang dihasilkan pada pengujian dengan suhu yang berbeda. Dimana, diameter lingkaran dari plot terbesar dimiliki oleh spesimen GF WR 50 berada pada suhu pengujian 25 °C, kemudian dilanjutkan dengan suhu 30 °C, 50 °C, dan diameter Nyquist terkecil dimiliki oleh suhu pengujian 70 °C. Perbedaan paling terlihat pada pengujian suhu 70 °C dan 50 °C dengan suhu pengujian 50 °C dan 30 °C dikarenakan diameternya yang jauh lebih kecil. Hal ini menandakan bahwa semakin tinggi suhu pengujian, maka nilai dari hambatan *charge transfer* atau R_{ct} akan semakin mengecil. Apabila dilihat pada plot pertama Nyquist dari seluruh pengujian, yang merupakan resistansi bulk (elektrolit dan separator), maka seluruh pengujian memiliki nilai yang mendekati yakni sekitar 200 Ω pada sumbu real. Nilai yang mendekati ini menandakan bahwa resistansi yang ditimbulkan oleh komponen bulk seperti elektrolit dan separator memiliki nilai yang dekat dikarenakan penggunaan material yang sama pada pengujian dengan suhu yang berbeda. Untuk mendapatkan nilai seperti hambatan bulk (R_e) dan hambatan *charge transfer* (R_{ct}), maka dapat dilakukan analisis regresi dengan melakukan fitting menggunakan sirkuit ekuivalen yang digunakan untuk menggambarkan fenomena impedansi yang terjadi pada baterai. Berikut merupakan hasil plotting dari analisis Nyquist berdasarkan sirkuit ekuivalen yang dibuat.



Gambar 4.21 Hasil fitting regresi dengan data plot Nyquist spesimen GF WR 50 dengan variasi pengujian pada (a) suhu 25 °C, (b) suhu 30 °C, (c) suhu 50 °C, dan (d) suhu 70 °C. Terlihat bahwa seluruh fitting regresi sudah mendekati hasil Nyquist sebenarnya secara visual, namun masih terdapat ketidaksesuaian pada regresi di frekuensi rendah pada suhu pengujian 25 dan 50 °C.

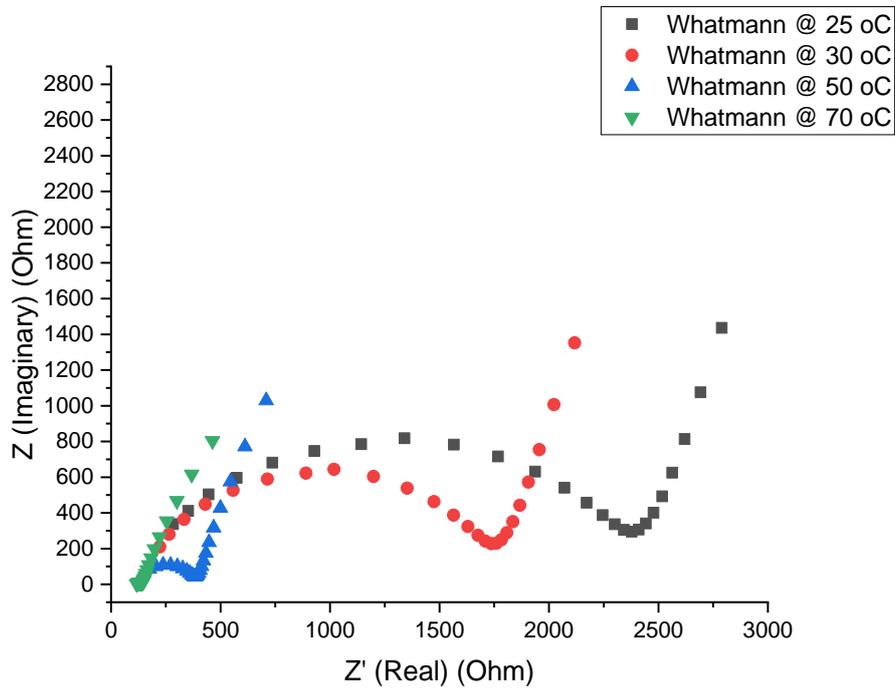
Berdasarkan hasil *fitting*, terlihat bahwa hasil regresi yang mendekati secara visual pada seluruh variasi pengujian suhu. Dimana jika dilihat *chi-squared* yang dihasilkan, spesimen pengujian 25 °C memiliki nilai sebesar 0.082339, spesimen pengujian 30 °C memiliki nilai 0.14119, kemudian pengujian 50 °C memiliki nilai 0.018879, dan spesimen pengujian 70 °C memiliki nilai sebesar 0.032545. Jika dilihat dari nilai resistansi bulk berdasarkan nilai regresi yang dibuat, pada spesimen pengujian 25 °C memiliki hambatan *bulk* sebesar 36.208 Ω , spesimen pengujian 30 °C memiliki hambatan *bulk* sebesar 43.948 Ω , spesimen pengujian 50 °C memiliki hambatan bulk sebesar 63.96 Ω , dan spesimen pengujian 70 °C memiliki hambatan bulk sebesar 64.378 Ω . Apabila dilihat dari hambatan *charge transfer* yang dimiliki oleh masing-masing pengujian, terlihat bahwa antar pengujian nilai yang dihasilkan memiliki selisih yang cukup besar dibandingkan dengan selisih pada nilai R_e pada masing-masing pengujian. Dimana spesimen pengujian 25 °C memiliki nilai hambatan *charge transfer* terbesar dengan nilai sebesar 3052 Ω , kemudian dilanjutkan dengan hambatan spesimen pengujian 30 °C dengan nilai 1043.4 Ω , lalu dilanjutkan dengan spesimen pengujian 50 °C dengan nilai hambatan *charge transfer* sebesar 204.6 Ω , dan nilai hambatan *charge transfer* terkecil yaitu pada spesimen pengujian 70 °C dengan nilai hambatan *charge transfer* sebesar 159.94 Ω .

Adapun proses *fitting* kurva dengan plot Nyquist menggunakan rangkaian sirkuit resistor (R_e) yang diserikan dengan komponen paralel antara *constant phase element* (CPE) dan resistor (R_{ct}) yang diserikan dengan hambatan warburg. Namun, terdapat perbedaan pada *fitting* spesimen pengujian 70 °C, dimana hambatan warburg yang tidak termasuk dalam rangkaian paralel. Hal ini dikarenakan hasil *fitting* dengan rangkaian tersebut lebih menghasilkan kurva regresi yang lebih mendekati dengan plot Nyquist. Adapun hasil dari nilai berdasarkan masing-masing parameter ditabulasikan dalam tabel sebagai berikut.

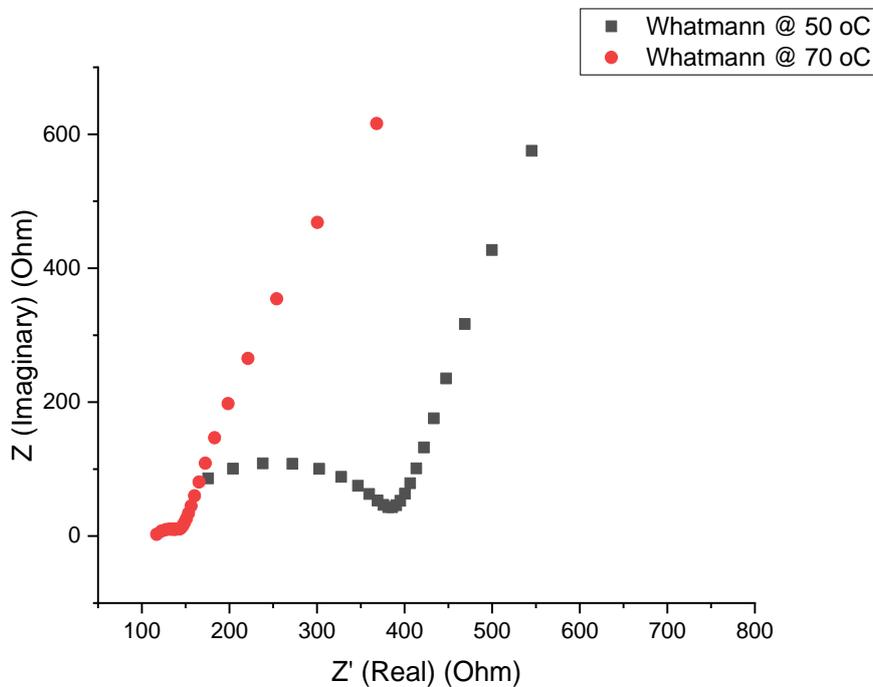
Tabel 4.12 Tabulasi data parameter regresi dari plot Nyquist spesimen GF WR 50

	Sirkuit ekuivalen GF WR 50	Element	Parameter	Value	Estimated Error (%)
Spesimen pengujian 25 °C		R_e	R	36.208 Ω	
		R_{ct}	R	3052 Ω	1.176
		Kapasitans	Q	1.5797E-07 Mho	12.895
		Rasio Kapasitans	N	0.64032	1.436
		Hambatan Warburg	W	0.00096442 Mho	9.376
		<i>Chi-squared</i>		0.082339	
Spesimen pengujian 30 °C		R_e	R	41 Ω	
		R_{ct}	R	4185,3 Ω	1,487
		Kapasitans	Q	6,4884E-08 Mho	15,400
		Rasio Kapasitans	N	0,70328	1,579
		Hambatan Warburg	W	0,00088817 Mho	14,560
		<i>Chi-squared</i>		0.14119	
Spesimen pengujian 50 °C		R_e	R	63.96 Ω	6.789
		R_{ct}	R	204.6 Ω	2.400
		Kapasitans	Q	2.453E-07 Mho	24.775
		Rasio Kapasitans	N	0.70716	2.864
		Hambatan Warburg	W	0.0081928 Mho	3.408
		<i>Chi-squared</i>		0.018879	
Spesimen pengujian 70 °C		R_e	R	64.378 Ω	7.214
		R_{ct}	R	159.94 Ω	3.311
		Kapasitans	Q	3.5395E-07 Mho	34.533
		Rasio Kapasitans	N	0.70359	4.023
		Hambatan Warburg	W	0.0086015 Mho	4.096
		<i>Chi-squared</i>		0.032545	

4.2.3 Hasil Pengujian EIS untuk spesimen Whatmann Separator

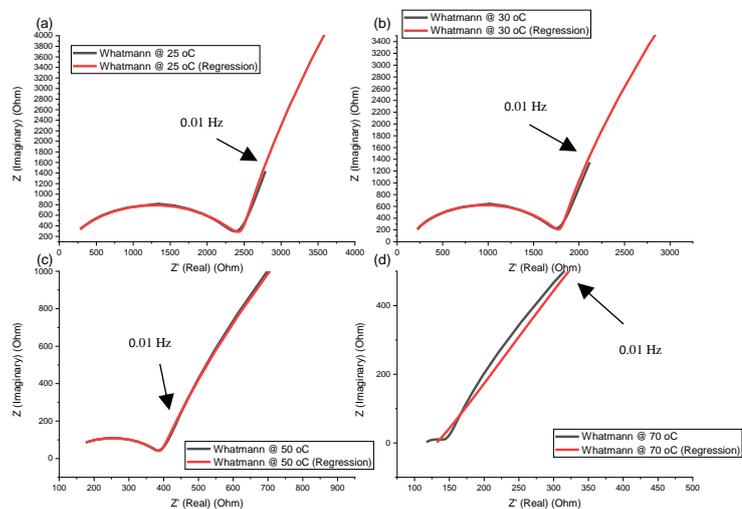


Gambar 4.22 Hasil Pengujian EIS spesimen separator Whatmann dengan variasi suhu pengujian 25, 30, 50, dan 70 °C. Hasil menunjukkan diameter setengah lingkaran dari masing-masing pengujian yang semakin mengecil dengan meningkatnya suhu pengujian.



Gambar 4.23 Hasil pengujian spesimen separator Whatmann dengan suhu 50 °C dan 70 °C sebagai perbesaran dari **Gambar 4.23**.

Berdasarkan hasil pengujian *electrochemical impedance spectroscopy* pada spesimen Whatmann dengan variasi suhu 25, 30, 50, dan 70 °C, terdapat perbedaan yang cukup signifikan dari hasil plot Nyquist yang dihasilkan dengan melihat diameter lingkaran yang dibentuk pada pengujian dengan suhu yang berbeda. Dimana, diameter lingkaran dari plot terbesar dimiliki oleh spesimen Whatmann berada pada suhu pengujian 25 °C, kemudian dilanjutkan dengan suhu 30 °C, 50 °C, dan diameter Nyquist terkecil dimiliki oleh suhu pengujian 70 °C. Perbedaan paling terlihat pada pengujian suhu 70 °C dan 50 °C dengan suhu pengujian 50 °C dan 30 °C dikarenakan diameternya yang jauh lebih kecil. Hal ini menandakan bahwa semakin tinggi suhu pengujian, maka nilai dari hambatan *charge transfer* atau R_{ct} akan semakin mengecil. Apabila dilihat pada plot pertama Nyquist dari seluruh pengujian, yang merupakan resistansi bulk (elektrolit dan separator), maka seluruh pengujian memiliki nilai yang mendekati pada sumbu real. Dimana pada spesimen pengujian suhu 25 °C memiliki impedansi pada sumbu real sekitar 260 Ω , kemudian pengujian suhu 30 °C memiliki impedansi pada sumbu real sebesar 200 Ω , spesimen pengujian suhu 50 °C memiliki impedansi pada sumbu real sebesar 160 Ω , dan spesimen pengujian dengan suhu 70 °C memiliki impedansi pada sumbu real sebesar 110 Ω . Nilai yang mendekati ini, jika dibandingkan dengan selisih R_{ct} yang lebih besar dibandingkan dengan R_e , menandakan bahwa resistansi yang ditimbulkan oleh komponen bulk seperti elektrolit dan separator memiliki nilai yang dekat dikarenakan penggunaan material yang sama pada pengujian dengan suhu yang berbeda. Untuk mendapatkan nilai hambatan bulk (R_e) dan *charge transfer* (R_{ct}), maka dapat dilakukan analisis regresi dengan melakukan fitting menggunakan sirkuit ekuivalen untuk menggambarkan fenomena impedansi yang terjadi pada baterai. Berikut merupakan hasil plotting dari analisis Nyquist berdasarkan sirkuit ekuivalen yang dibuat.



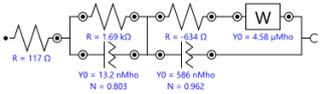
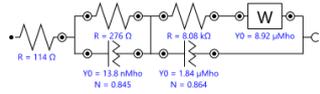
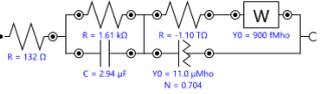
Gambar 4.24 Hasil fitting regresi dengan data plot Nyquist spesimen Whatmann pada variasi (a) suhu 25 °C, (b) suhu 30 °C, (c) suhu 50 °C, dan (d) suhu 70 °C. Terlihat bahwa hasil regresi pada suhu pengujian 25, 30, dan 50 °C cukup mengikuti hasil plot Nyquist sebenarnya walaupun terdapat *offset* di daerah frekuensi rendah pada suhu pengujian 25 dan 30 °C. Adapun hasil regresi suhu pengujian 70 °C yang menunjukkan model yang kurang pas khususnya pada frekuensi tinggi, dengan model regresi yang tidak membentuk setengah lingkaran pada frekuensi tinggi.

Berdasarkan hasil *fitting*, terlihat bahwa hasil regresi yang dibuat pada suhu pengujian 70 °C secara visual lebih tidak mendekati jika dibandingkan dengan hasil regresi pada suhu pengujian lainnya dengan variasi spesimen Whatmann. Dimana jika dilihat dari nilai *chi-squared* yang dihasilkan, spesimen pengujian 25 °C memiliki nilai sebesar 0.0042349, spesimen pengujian 30 °C memiliki nilai 0.013088, kemudian pengujian 50 °C memiliki nilai 0.0094993, dan spesimen pengujian 70 °C memiliki nilai sebesar 0.1075. Hal ini menunjukkan bahwa spesimen pengujian pada suhu 70 °C memiliki nilai *chi-squared* terbesar, sehingga interpretasi ini sesuai dengan model regresi yang paling tidak sesuai dibandingkan dengan suhu pengujian lainnya. Jika dilihat dari nilai resistansi bulk berdasarkan nilai regresi yang dibuat, pada spesimen pengujian 25 °C memiliki hambatan *bulk* sebesar 61.809 Ω, spesimen pengujian 30 °C memiliki hambatan *bulk* sebesar 117.03 Ω, spesimen pengujian 50 °C memiliki hambatan bulk sebesar 113.73 Ω, dan spesimen pengujian 70 °C memiliki hambatan bulk sebesar 131.71 Ω. Apabila dilihat dari hambatan *charge transfer* yang dimiliki oleh masing-masing pengujian, terlihat bahwa antar pengujian nilai yang dihasilkan memiliki selisih yang cukup besar dibandingkan dengan selisih pada nilai R_e pada masing-masing pengujian. Dimana spesimen pengujian 25 °C memiliki nilai hambatan *charge transfer* dengan nilai sebesar 2433.5 Ω, kemudian dilanjutkan dengan hambatan spesimen pengujian 30 °C dengan nilai 1690 Ω, lalu dilanjutkan dengan spesimen pengujian 50 °C dengan nilai hambatan *charge transfer* sebesar 275.68 Ω, dan nilai hambatan *charge transfer* pada spesimen pengujian 70 °C yakni sebesar 1610.5 Ω.

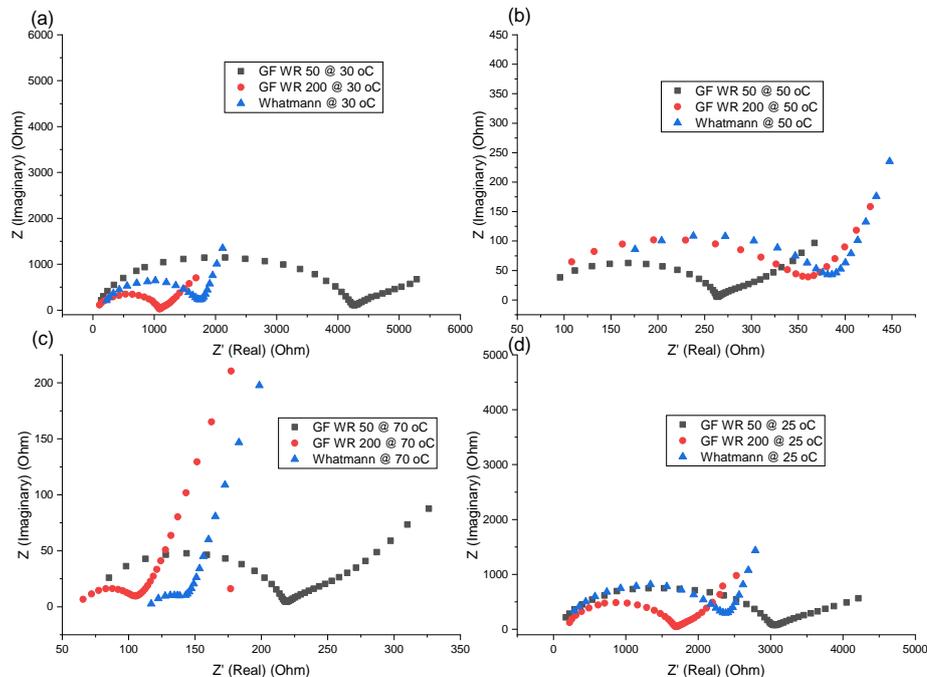
Proses *fitting* kurva dengan plot Nyquist menggunakan tiga rangkaian utama yang diserikan. Pada rangkaian pertama merupakan resistor tunggal (R_e) yang merepresentasikan hambatan dari elektrolit. Kemudian pada rangkaian kedua terdiri dari resistor *charge transfer* (R_{ct}) serta *constant phase element* (Q_1) yang merepresentasikan dari material separator serta hambatan dari *charge transfer* ion litium melewati separator. Adapun pada rangkaian ketiga yang terdiri dari rangkaian seri resistor (R_3) dan Warburg yang menggambarkan hambatan serta koefisien difusi pada material katoda secara berurutan yang di paralelkan dengan *constant phase element* (Q_2) pada material katoda. Terdapat variasi penggunaan komponen kapasitor sempurna pada model sirkuit pengujian suhu 70 °C dikarenakan model regresi lebih mendekati dengan model sebenarnya. Adapun hasil dari nilai dari masing-masing parameter yang ditabulasikan dalam tabel sebagai berikut.

Tabel 4.13 Tabulasi data parameter regresi dari plot Nyquist spesimen Whatmann

Spesimen	Sirkuit ekuivalen Whatmann	Element	Parameter	Value	Estimated Error (%)
Spesimen pengujian 25 °C		Hambatan	R_e	61.809 Ω	14.057
		Hambatan	R_{ct}	2433.5 Ω	2.289
		Hambatan	R_3	36.237 Ω	1380952.148
		Kapasitans	Q_1	2.4611E-08 Mho	10.297
		Rasio Kapasitans	N_1	0.73113	1.113
		Kapasitans	Q_2	8.5563E-10 Mho	1286.005
		Rasio Kapasitans	N_2	0.96591	53.845
		Hambatan Warburg	W	3.9034E-06 Mho	4.792

		<i>Chi-squared</i>		0.0042349	
Spesimen pengujian 30 °C		Hambatan	R_e	117.03 Ω	6.883
		Hambatan	R_{ct}	1690 Ω	1.255
		Hambatan	R_3	-633.89 Ω	-376.241
		Kapasitans	Q_1	1.3172E-08 Mho	13.116
		Rasio Kapasitans	N_1	0.80344	1.220
		Kapasitans	Q_2	5.8633E-07 Mho	8.704
		Rasio Kapasitans	N_2	0.96209	1.409
		Hambatan Warburg	W	4.5761E-06 Mho	2.401
		<i>Chi-squared</i>			0.013088
Spesimen pengujian 50 °C		Hambatan	R_e	113.73 Ω	6.405
		Hambatan	R_{ct}	275.68 Ω	3.259
		Hambatan	R_3	8082.2 Ω	16.089
		Kapasitans	Q_1	1.3786E-08 Mho	29.900
		Rasio Kapasitans	N_1	0.84462	2.769
		Kapasitans	Q_2	1.8434E-06 Mho	8.220
		Rasio Kapasitans	N_2	0.86354	1.177
		Hambatan Warburg	W	8.9211E-06 Mho	1.749
		<i>Chi-squared</i>			0.0094993
Spesimen pengujian 70 °C		Hambatan	R_e	131.71 Ω	1.646
		Hambatan	R_{ct}	1610.5 Ω	12.806
		Hambatan	R_3	-1.1E+12 Ω	- 26739021 1.609
		Kapasitans	Q_1	2.9443E-06 F	9.955
		Rasio Kapasitans	N_1	1	-
		Kapasitans	Q_2	1.1048E-05 Mho	6.883
		Rasio Kapasitans	N_2	0.70441	1.382
		Hambatan Warburg	W	9E-13 Mho	80821998 6.752
		<i>Chi-squared</i>			0.1075

4.2.4 Perbandingan Pengujian EIS Pada Setiap Variasi dengan Suhu Sama



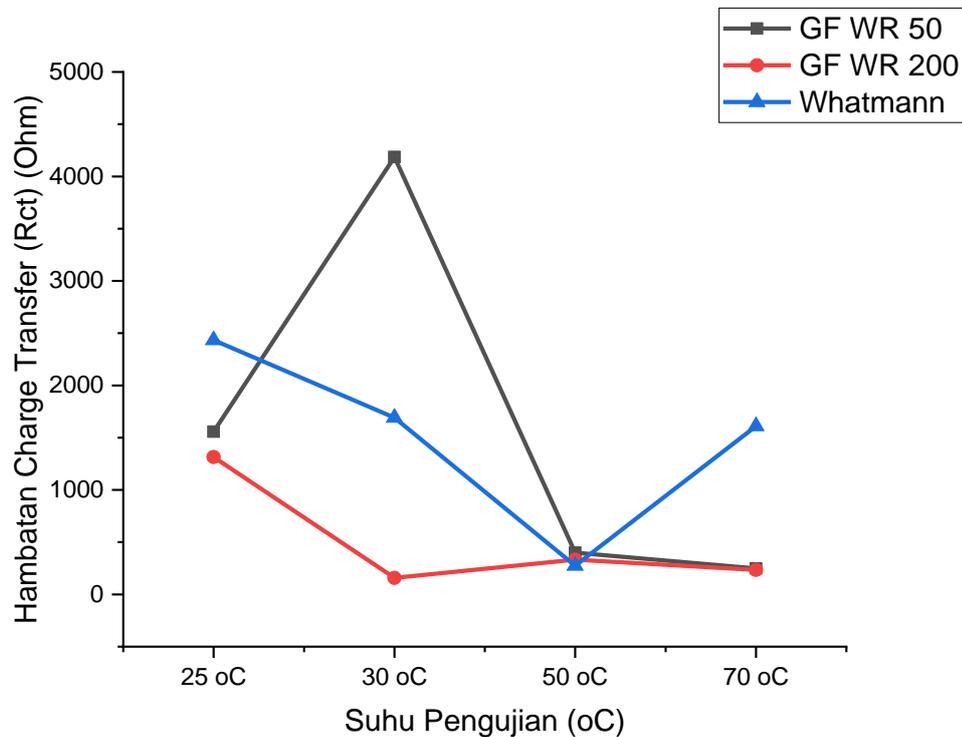
Gambar 4.25 Perbandingan masing-masing penggunaan separator pada setiap variasi (a) suhu 25 °C, (b) suhu 30 °C, (c) suhu 50 °C, dan (d) suhu 70 °C. Dimana terlihat bahwa baterai dengan separator GF WR 200 memiliki diameter lingkaran terkecil pada suhu pengujian 25 °C dan 30 °C.

Berdasarkan hasil penjabaran plot Nyquist pada masing-masing penggunaan variasi separator yang dibandingkan pada tiap suhu pengujian, terdapat dua tren yang berbeda. Dimana pada suhu pengujian 25 °C, 30 °C dan 70 °C, memiliki tren yang sama. Dimana diameter dari plot Nyquist yang dihasilkan memiliki nilai terkecil pada penggunaan separator GF WR 200, kemudian diikuti dengan separator Whatmann, dan diameter terbesar pada plot Nyquist dimiliki oleh GF WR 50. Tren kedua terdapat pada suhu pengujian 50 °C, dimana diameter terkecil pada plot Nyquist dimiliki oleh variasi separator GF WR 50, kemudian dilanjutkan dengan GF WR 200, dan diameter terbesar pada plot Nyquist dimiliki oleh variasi separator Whatmann. Dapat disimpulkan bahwa terdapat tren yang tidak konsisten pada variasi pengujian suhu 50 °C jika dibandingkan dengan suhu pengujian lainnya.

4.2.5 Analisis Pengujian EIS berdasarkan variasi penggunaan separator berbeda

Tabel 4.14 Tabulasi hasil R_e dan R_{ct} pada setiap separator dengan variasi suhu berdasarkan regresi

Suhu Pengujian/Spesimen	GF WR 50 (Regresi)		GF WR 200 (Regresi)		Whatmann (Regresi)	
	R_e (Ω)	R_{ct} (Ω)	R_e (Ω)	R_{ct} (Ω)	R_e (Ω)	R_{ct} (Ω)
25 °C	138,53	1557,3	179.38	1314	61.809	2433.5
30 °C	41	4185,3	65.708	158.14	117.03	1691.7
50 °C	219,09	400	49.095	332.67	113.73	275.68
70 °C	94,863	248,57	61.075	235.21	131.71	1610.5



Gambar 4.26 Grafik perbandingan hambatan *charge transfer* antara separator GF WR 50, GF WR 200, dan separator Whatmann dengan variasi suhu berdasarkan hasil data regresi

Berdasarkan hasil **Gambar 4.26** yakni grafik perbandingan hambatan *charge transfer* antara masing-masing jenis separator dengan pengujian suhu yang berbeda, setiap spesimen separator memiliki tren masing-masing. Dimana pada GF WR 50 terdapat fluktuasi yakni kenaikan nilai hambatan *charge transfer* pada suhu pengujian 30 °C. Kemudian setelah pengujian suhu 30 °C, terdapat penurunan nilai hambatan sampai dengan suhu pengujian 70 °C. Pada spesimen pengujian GF WR 200, tren dari nilai hambatan *charge transfer* yang dihasilkan terus mengalami penurunan dengan kenaikan suhu pengujian. Namun pada suhu pengujian 70

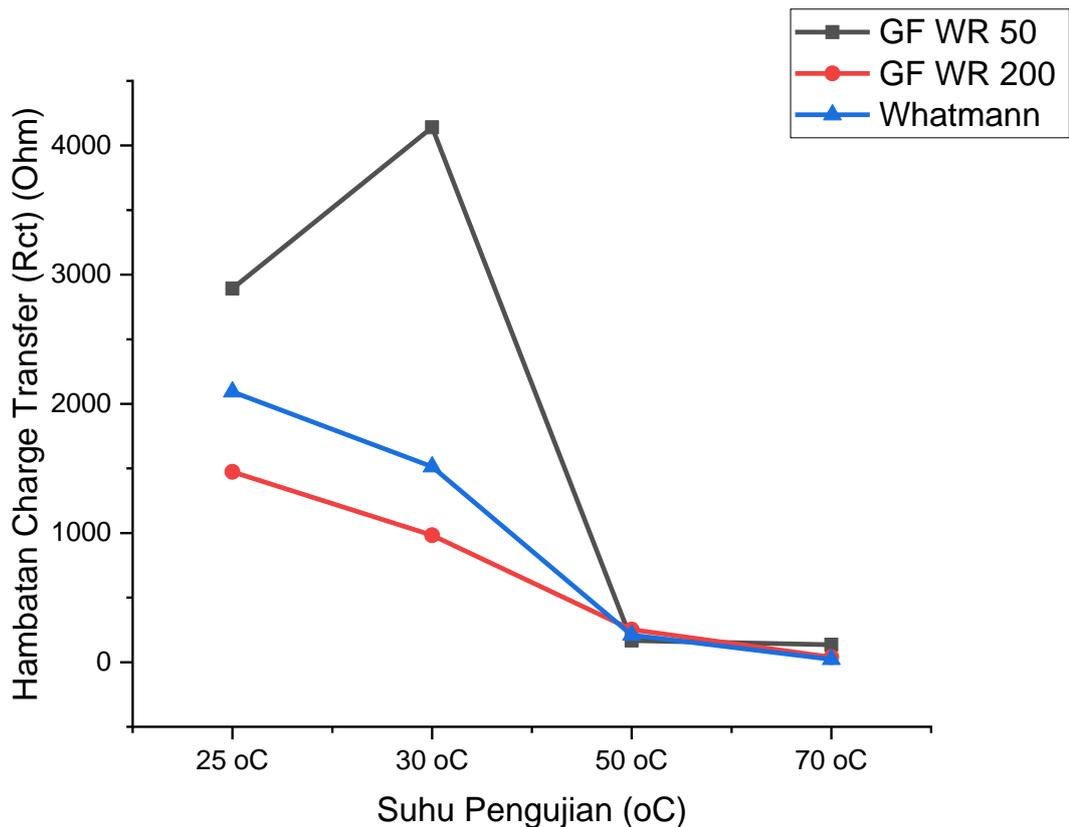
°C, nilai dari hambatan *charge transfer* meningkat dan lebih besar dari hambatan pada pengujian suhu 50 °C. Sementara pada penggunaan separator Whatmann, terdapat fluktuasi dari nilai hambatan *charge transfer* yang dihasilkan. Dimana dari suhu pengujian 25 sampai dengan 30 °C, nilai hambatan terus menurun. Namun saat suhu pengujian 50 °C, nilai yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan dengan suhu pengujian 30 °C. Kemudian pada suhu pengujian yang lebih tinggi, yakni 70 °C, nilai dari hambatan lebih kecil dari suhu pengujian 50 °C.

Fluktuasi dari nilai hambatan *charge transfer* yang terjadi pada masing-masing spesimen secara teori seharusnya memiliki tren yang sama. Yaitu semakin tinggi suhu pengujian, maka nilai dari hambatan *charge transfer* akan semakin rendah. Hal ini dapat dijelaskan secara kuantitatif menggunakan persamaan 4.1, dimana nilai dari hambatan *charge transfer* berbanding terbalik dengan suhu pengujian. Semakin tinggi suhu pengujian, maka aktifitas pergerakan ion di dalam baterai akan semakin meningkat sehingga hambatan yang dihasilkan akan lebih rendah. Fluktuasi ini dapat disebabkan oleh penggunaan model *equivalent circuit* yang masih kurang tepat dan merepresentasikan model baterai komposit hibrida yang dibuat sehingga perlu dilakukan pengkajian lebih lanjut untuk mencari model sirkuit yang sesuai dengan plot Nyquist dari baterai.

Selanjutnya dilakukan analisis menggunakan R_e dan R_{ct} yang di dapatkan melalui diameter lingkaran dari plot Nyquist sebagai analisis alternatif. Adapun nilai dari R_e di dapatkan menggunakan nilai pertama dari nilai impedansi pada sumbu *real*. Sementara, nilai R_{ct} didapatkan dengan mengukur diameter dari setengah lingkaran yang dibentuk. Adapun hasil R_e dan R_{ct} yang di dapatkan berdasarkan visualisasi dari grafik ditabulasi sebagai berikut.

Tabel 4.15 Hasil impedansi bulk dan charge transfer berdasarkan visualisasi dari plot Nyquist

Suhu Pengujian/Spesimen	GF WR 50 (Nyquist)		GF WR 200 (Nyquist)		Whatmann (Nyquist)	
	Re (Ω)	Rct (Ω)	Re (Ω)	Rct (Ω)	Re (Ω)	Rct (Ω)
25 °C	171,852	2892,058	223,546	1473,564	283,967	2093,953
30 °C	134,215	4140,795	108,667	982,783	222,765	1513,975
50 °C	95,8037	167,9483	108,257	252,345	175,842	210,115
70 °C	83,1354	135,3166	65,6193	39,0567	117,019	21,553



Gambar 4.27 Grafik perbandingan hambatan *charge transfer* antara penggunaan separator GF WR 50, GF WR 200, dan separator whatmann dengan variasi suhu pengujian berdasarkan hasil visualisasi plot Nyquist

Berdasarkan hasil plot R_{ct} dari visualisasi Nyquist secara langsung, terdapat dua tren yang dibentuk. Dimana tren pertama yaitu pada spesimen GF WR 50, terdapat fluktuasi yang terjadi pada kenaikan suhu pengujian 30 °C. Dimana saat pengujian suhu 30 °C, terdapat kenaikan pada impedansi *charge transfer*. Tren yang kedua yaitu pada spesimen GF WR 50, dimana kenaikan suhu pengujian akan menurunkan nilai dari impedansi *charge transfer*. Kemudian apabila dilihat dari nilai impedansi *charge transfer* dari masing-masing suhu pengujian, maka nilai impedansi *charge transfer* pada spesimen GF WR 200 memiliki nilai yang terkecil pada tiga suhu pengujian, yakni pada suhu 25 °C, 30 °C, dan 70 °C. Jumlah nilai yang kecil pada spesimen GF WR 200 ini juga sama dengan berdasarkan hasil nilai impedansi *charge transfer* pada **Gambar 4.26**. Dimana, hambatan *charge transfer* dari GF WR 200 selalu lebih rendah pada suhu pengujian 25 dan 30 °C.

Pada analisis ini akan menghubungkan pengaruh jenis penggunaan separator terhadap impedansi yang dihasilkan dari pengujian EIS. Jika dilihat dari **Gambar 4.26** dan **Gambar 4.27**, maka kecenderungan yang ditimbulkan yakni impedansi terkecil yang timbul terjadi pada spesimen GF WR 200. Impedansi yang dimaksud yakni pada resistansi *charge transfer* yang dihasilkan, dimana R_{ct} secara definisi merupakan hambatan yang timbul akibat proses difusi ion litium dari elektrolit ke material aktif. Terlihat bahwa penggunaan jenis separator akan berpengaruh pada proses difusi ion litium. Dimana pada separator GF WR 200 menghasilkan impedansi *charge transfer* terendah, sehingga proses difusi ion dapat dilakukan paling mudah dengan menggunakan separator GF WR 200. Seperti yang diketahui bahwa kemudahan ion untuk melakukan difusi berbanding terbalik dengan hambatan yang dihasilkan, semakin besar

hambatan yang dihasilkan maka proses difusi ion litium akan lebih susah. Jika dilihat dari hasil pengamatan menggunakan mikroskop, GF WR 200 memiliki porositas yang lebih besar dibandingkan dengan GF WR 50, yaitu 1,68 % dan ketebalan yang lebih besar dibandingkan dengan GF WR 50, yakni 53,620 μm . Kemudian apabila dibandingkan dengan morfologi dengan separator Whatmann, separator GF WR 200 memiliki konstruksi *glass fiber woven*, dengan susunan rajutan yang dibentuk. Sementara, separator Whatmann memiliki morfologi dengan *discontinuous fiber* yang terlihat berdasarkan pengamatan mikroskop.

Penurunan nilai impedansi pada setiap kenaikan suhu pengujian disebabkan oleh adanya peningkatan aktivitas perpindahan ion pada internal baterai. Fenomena ini dapat dijelaskan secara kuantitatif dengan menggunakan persamaan Arrhenius sebagai berikut.

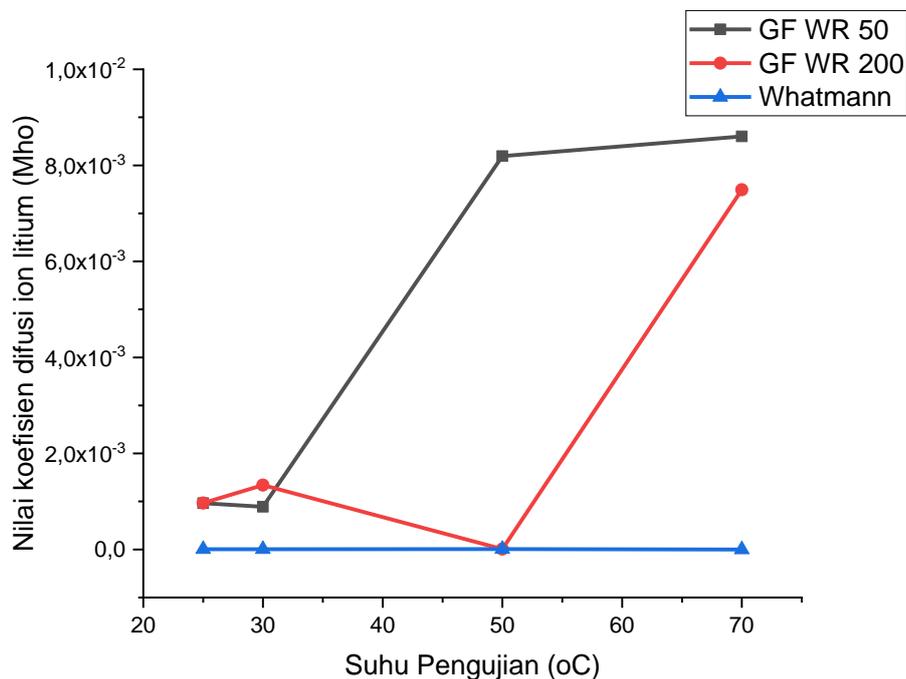
$$\frac{1}{R_{ct}} = A \exp\left(-\frac{eV_{ct}}{k_B T}\right) \quad (4.1)$$

Dimana V_{ct} merupakan energi aktivasi dari proses *charge transfer* pada tiap ion litium partikel yang didefinisikan dalam bentuk elektron volt, T merupakan suhu operasi baterai, A merupakan faktor *pre-exponential*, e merupakan muatan dari elektron, dan k_B merupakan konstanta boltzman. Persamaan 4.1 di dapatkan melalui referensi Inui et, al. (Inui , Hirayama, & Tanaka, 2021). Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi suhu operasi baterai, maka impedansi *charge transfer* yang dihasilkan akan semakin kecil seiring dengan meningkatnya aktivitas perpindahan litium ion dalam baterai. Sehingga hasil eksperimen menunjukkan hubungan yang sesuai secara mayoritas, walaupun terdapat ketidaksesuaian yang terjadi pada proses kenaikan suhu dari 25 °C ke 30 °C pada spesimen GF WR 50 pada **Gambar 4.27** dan spesimen Whatmann pada suhu kenaikan 25 °C ke 30 °C dan 30 °C ke 50 °C pada **Gambar 4.26**.

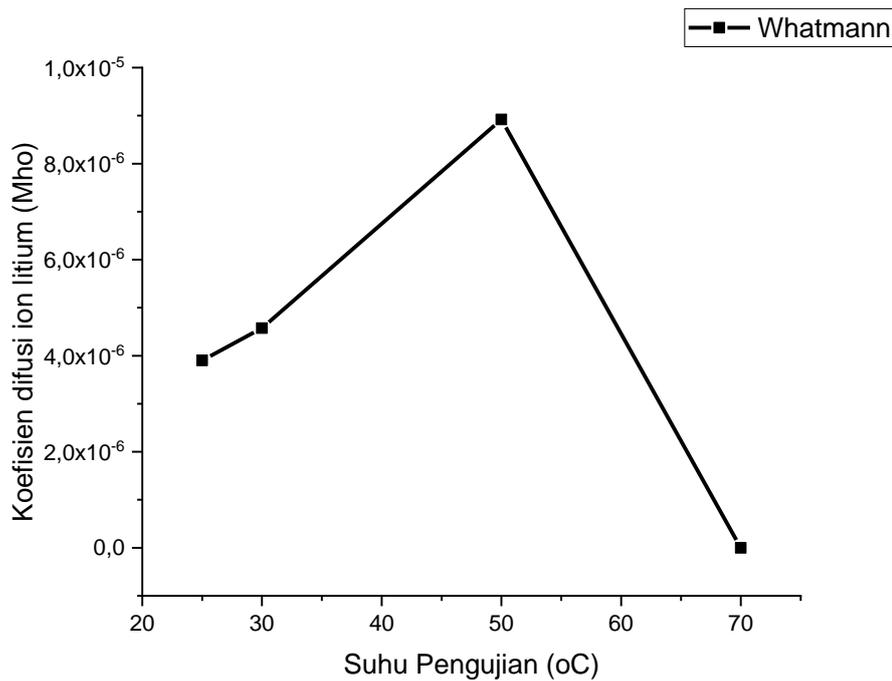
Apabila dibandingkan dengan penelitian Kannan, Terala, Moss, & Weatherspoon, 2018, maka hubungan apabila dilihat dari segi porositas sudah sesuai dengan hasil EIS yang telah diuji. Dimana pada penelitian Kannan et, al., porositas tinggi akan menghasilkan hambatan yang lebih rendah. Hal ini dikarenakan porositas tinggi pada separator akan menimbulkan volume elektrolit yang lebih besar membasahi seluruh volume separator. Dengan demikian dengan adanya jarak kosong antara material separator yang lebih besar, maka proses transfer ion akan lebih mudah (ditunjukkan dengan kurva Nyquist pada **Gambar 2.9** berdasarkan nilai dari R_{ct}). Sementara berdasarkan parameter ketebalan, maka apabila GF WR 200 dibandingkan dengan GF WR 50 dengan ketebalan GF WR 200 yang lebih tebal dibandingkan dengan GF WR 50, maka hambatan yang dihasilkan berdasarkan pengujian EIS yang dilakukan lebih rendah dibandingkan dengan GF WR 50. Hal ini menjadi hasil yang kontradiktif apabila merujuk pada penelitian Kannan et, al., dimana ketebalan yang tipis akan menghasilkan hambatan yang lebih rendah. Namun apabila GF WR 200 dibandingkan dengan separator Whatmann, maka hasil yang didapatkan sesuai dengan penelitian Kannan et, al. Secara teori, jarak separator yang tipis dibutuhkan agar proses transfer ion antara katoda dan anoda dapat berjalan lebih cepat dengan jarak tempuh ion yang lebih pendek. Dengan demikian dapat di ambil kesimpulan bahwa penggunaan GF WR 200 akan menghasilkan hambatan yang lebih rendah dengan kombinasi antara porositas dan ketebalan yang dimiliki dibandingkan dengan separator GF WR 50 dan Whatmann. Selain dari faktor ketebalan, porositas yang dimiliki oleh separator Whatmann masih belum dapat menunjang transfer ion dengan baik sehingga hambatan yang dihasilkan akan lebih besar. Adapun pada separator GF WR 200 menghasilkan hambatan paling rendah, walaupun GF WR 200 memiliki ketebalan yang lebih besar

dibandingkan dengan GF WR 50. Hambatan besar ini kemungkinan juga dapat disebabkan oleh SPE yang disintesis.

Pada **Gambar 4.28** dan **Gambar 4.29** merupakan hasil perbandingan nilai koefisien difusi ion litium pada masing-masing jenis separator menggunakan variasi suhu pengujian yang berbeda. Apabila dibandingkan nilainya berdasarkan kenaikan suhu pengujian, maka semakin tinggi suhu pengujian maka seluruh spesimen memiliki kecenderungan untuk memiliki tren nilai koefisien difusi ion litium yang meningkat, walaupun terdapat penurunan seperti halnya pada spesimen GF WR 50 yang mengalami penurunan pada suhu pengujian 25 ke 30 °C, kemudian pada spesimen GF WR 200 pada suhu pengujian 30 ke 50 °C, dan spesimen Whatmann pada suhu pengujian 50 ke 70 °C. Hal ini dapat disebabkan dari model regresi yang masih belum menyamai dengan model sebenarnya, dimana fluktuasi tersebut terjadi akibat dari nilai *error* dari Warburg yang masih tinggi berdasarkan masing-masing tabulasi parameter yang didapatkan melalui regresi *equivalent circuit* yang dibuat. Kenaikan nilai dari difusi ion litium ini sudah sesuai dengan persamaan *Arrhenius*, dimana semakin tinggi suhu pengujian maka aktivitas ion-ion yang ada akan meningkat sehingga akan meningkatkan aktivitas difusi ion litium dari elektrolit ke material aktif. Apabila dilihat dari berdasarkan penggunaan jenis separator, maka GF WR 50 dapat memfasilitasi proses difusi ion litium dengan baik dibandingkan dengan separator. Masih belum terdapat penelitian yang membahas terkait efek penggunaan separator terhadap difusifitas ion litium. Namun dari hasil eksperimen ini, dapat dilihat bahwa kemungkinan GF WR 50 dapat memfasilitasi difusi ion litium dengan mudah dikarenakan dari segi ketebalannya yang tipis, sehingga ion litium dapat berpindah dengan mudah pada jarak yang lebih kecil.

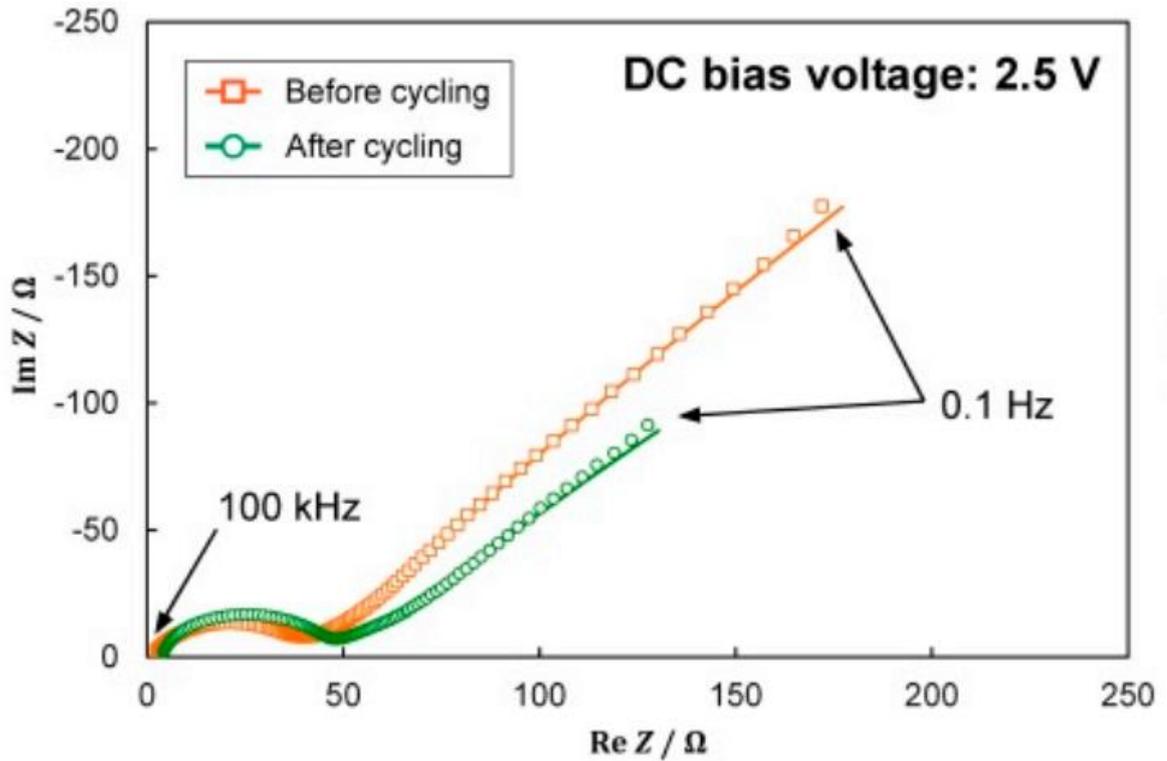


Gambar 4.28 Grafik perbandingan nilai dari koefisien difusi ion litium (Warburg) pada masing-masing separator dengan variasi suhu pengujian. Terlihat bahwa tren koefisien difusi yang meningkat dengan peningkatan suhu pengujian, walaupun mengalami fluktuasi yang disebabkan oleh nilai *error* yang tinggi dari hasil regresi.



Gambar 4. 29 Hasil perbesaran nilai dari koefisien difusi ion litium pada separator Whatmann sebagai perbesaran dari **Gambar 4.28**. Terdapat penurunan nilai koefisien difusi pada suhu pengujian 70 °C dikarenakan hasil *error* regresi pada *equivalent circuit* suhu pengujian 70 °C yang masih tinggi.

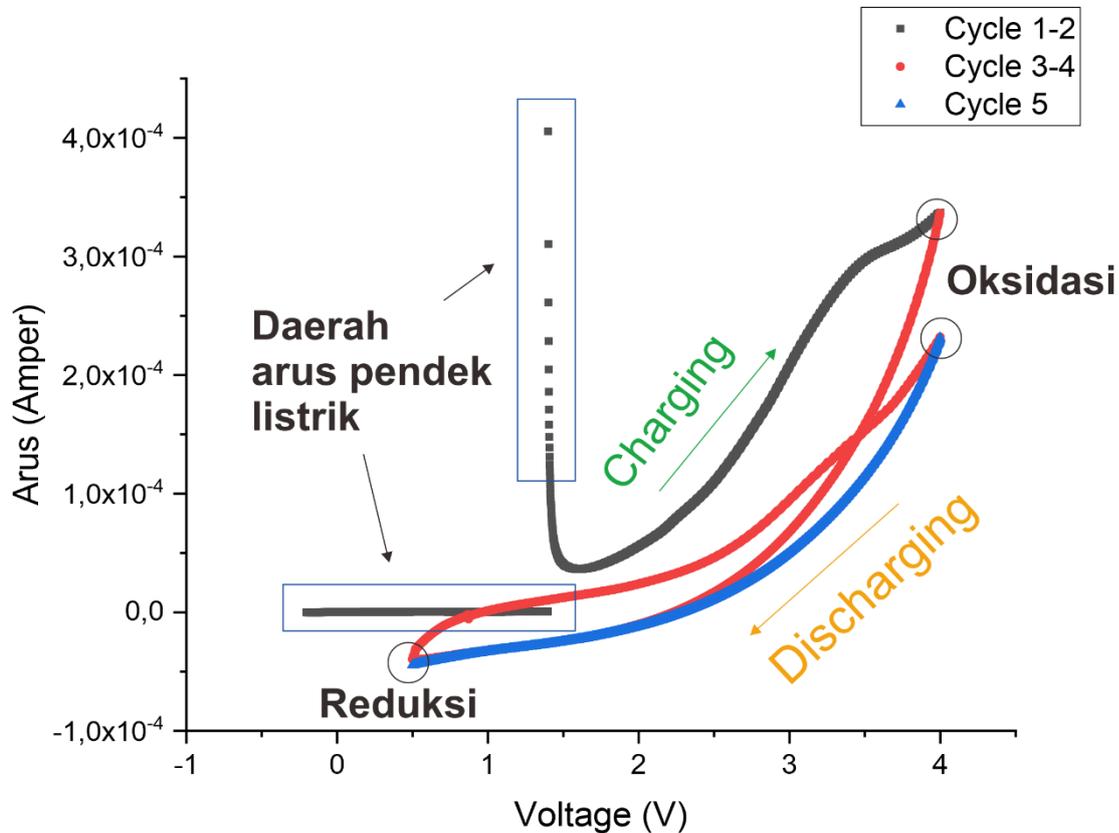
Pada baterai yang di manufaktur, khususnya pada variasi separator GF WR 200 dan Whatmann, memiliki hambatan warburg yang lebih tinggi dibandingkan dengan spesimen baterai yang menggunakan GF WR 50. Hambatan warburg dapat dilihat pada daerah frekuensi rendah dari plot Nyquist dengan garis yang membentuk sudut tertentu. Semakin tinggi garis yang dibentuk, maka nilai hambatan warburg yang semakin meningkat. Hal ini menandakan bahwa aktivitas difusi litium ion antara material aktif dan elektrolit yang masih terhambat. Hambatan warburg yang tinggi dapat disebabkan oleh penggunaan elektrolit padatan. Dimana *solid polymer electrolyte* (SPE) yang digunakan masih belum dapat memfasilitasi media agar ion litium dapat berdifusi dengan material aktif secara optimal. Dengan demikian, perlu dilakukan perbaikan pada sintesis SPE dengan membuat material elektrolit padat yang mampu menghantarkan ion dengan baik sampai dengan hambatan Warburg dapat turun, baik itu mengganti material dari sistem polimer dan sistem elektrolit, maupun meningkatkan kualitas produksi dari SPE. Selain perbaikan pada manufaktur SPE, dapat dilakukan pemberian energi aktivasi pada baterai terlebih dahulu sebelum dilakukan pengujian. Penelitian yang dilakukan oleh Abe et, al., menunjukkan bahwa dengan memberikan satu siklus pengisian pada baterai dengan *c-rate* sebesar 1 C mampu menurunkan hambatan warburg dari plot Nyquist (Abe, Hori, & Kumagai, 2019).



Gambar 4.30 Hasil pengujian EIS padabaterai berbasis LiFePO_4 /Grafit dengan elektrolit cair yang diuji sebelum dan sesudah pemberian siklus pengisian dan penyaluran dengan *c-rates* 1C pada tegangan operasi 2.5 V. Setelah dilakukan aktivasi, maka hambatan warburg yang ditandai dengan tinggi garis pada frekuensi rendah yang menurun dibanding spesimen baterai yang tidak diberikan aktivasi energi terlebih dahulu (Abe, Hori, & Kumagai, 2019)

4.3 Hasil Pengujian *Cyclic Voltammetry* (CV)

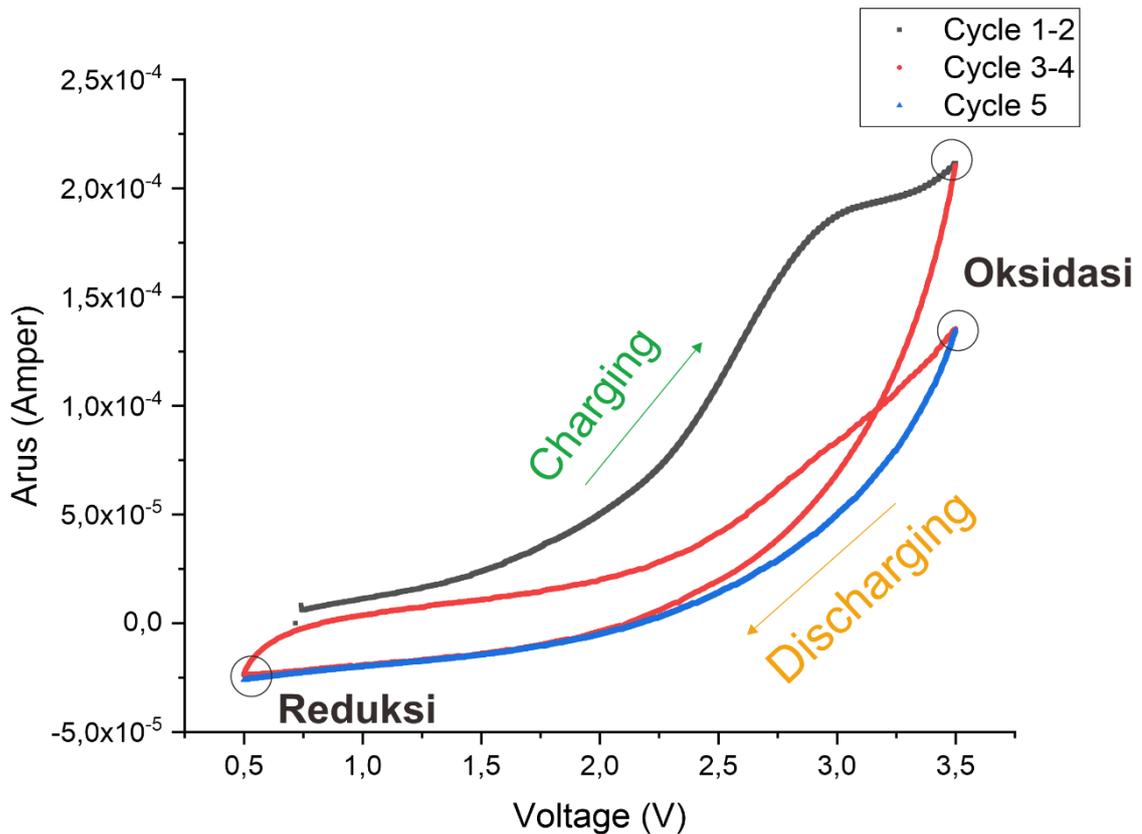
4.3.1 Hasil Pengujian CV pada spesimen GF WR 50



Gambar 4.31 Hasil Pengujian *cyclic voltammetry* (CV) pada spesimen separator GF WR 50 dengan 5 siklus. Terdapat penurunan dari arus saat proses oksidasi pada siklus 1-2 dengan siklus 3-4. Adapun arus reduksi dari siklus 3-4 dan 5 memiliki nilai yang mirip. Adapun pada siklus 1-2 terdapat data yang terputus menunjukkan adanya arus pendek listrik (ditunjukkan pada dua persegi) secara temporer.

Berdasarkan hasil pengujian CV pada spesimen menggunakan separator GF WR 50 dengan siklus sebanyak 5 kali pengujian, menunjukkan pola *quasi-reversible* namun cenderung *irreversible* dikarenakan daerah pada reduksi yang tidak sama dengan oksidasi, dimana terdapat puncak oksidasi dan reduksi pada voltase tinggi dan rendah secara berurutan. Pada voltase 1.5 V, terdapat kenaikan arus yang cukup tinggi. Hal ini diduga akibat adanya arus pendek listrik yang terjadi saat pengujian CV. Dengan demikian, terdapat arus tinggi secara mendadak pada jangkauan voltase yang sempit. Sementara, kurva datar pada grafik menunjukkan bahwa baterai sempat tidak mengalami adanya aktivitas perpindahan ion litium dengan ditandai arus yang bernilai 0 pada jangkauan tegangan tertentu. Diduga arus pendek listrik ini terjadi akibat kontak antara katoda dan anoda yang tidak stabil pada baterai, sehingga dapat mengganggu aktivitas transfer ion di dalam baterai. Kemudian apabila diukur jarak antara reaksi oksidasi dan reduksi, maka menghasilkan voltase sebesar 3,48 V dengan puncak oksidasi atau saat proses *charging* memiliki arus sebesar 0,336 mA dan arus pada puncak reduksi atau saat proses *discharging* memiliki arus sebesar 0,04 mA. Apabila dihitung nilai efisiensi perbandingan proses oksidasi dan reduksi pada siklus 1-2 dan siklus 3-4, maka didapatkan nilai sebesar 11,9 %.

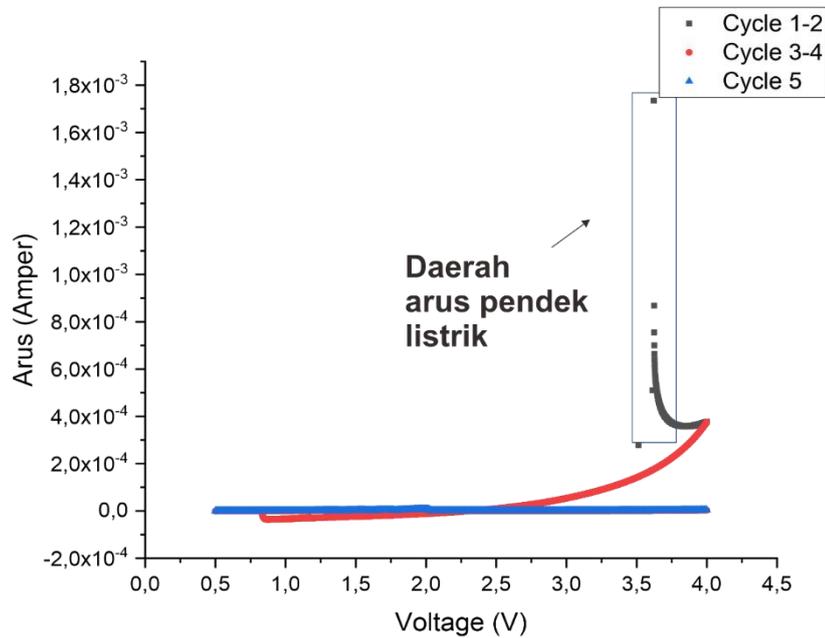
4.3.2 Hasil Pengujian CV pada spesimen GF WR 200



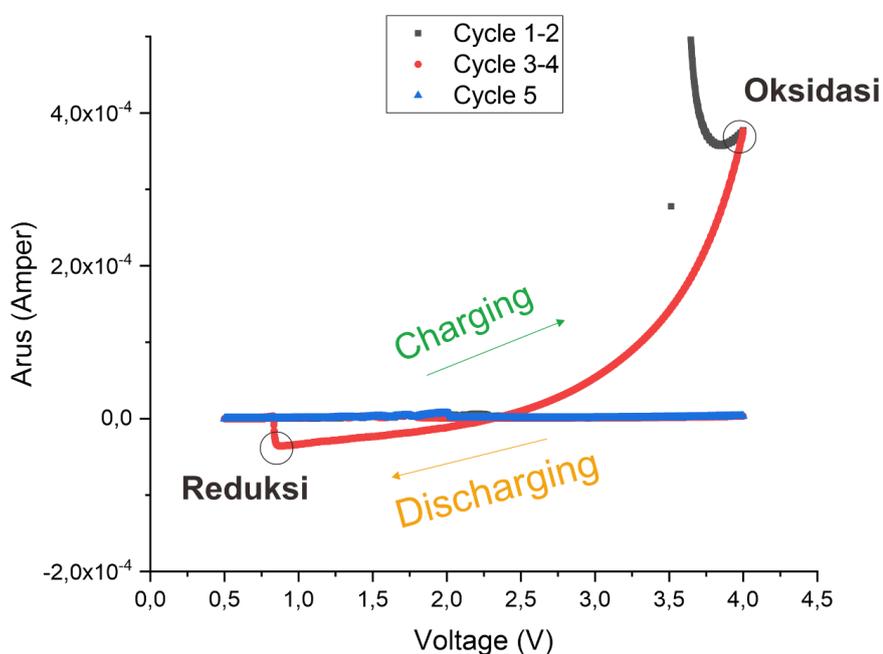
Gambar 4.32 Hasil Pengujian *cyclic voltammetry* (CV) pada Spesimen Separator GF WR 200 dengan 5 siklus. Terdapat penurunan nilai arus oksidasi pada siklus 1-2 dan siklus 3-4. Adapun arus reduksi pada siklus 3-4 dan 5 memiliki nilai yang dekat.

Berdasarkan hasil pengujian CV pada spesimen menggunakan separator GF WR 50 dengan *cycle* sebanyak 5, menunjukkan pola *quasi-reversible*, dengan kecenderungan *irreversible* dikarenakan arus reduksi yang lebih kecil dibandingkan dengan arus oksidasi, dimana terdapat puncak oksidasi dan reduksi pada voltase tinggi dan rendah secara berurutan. Apabila diukur jarak antara reaksi oksidasi dan reduksi, maka menghasilkan voltase sebesar 2,95 V dengan puncak oksidasi atau saat proses *charging* memiliki arus sebesar 0,211 mA dan arus pada puncak reduksi atau saat proses *discharging* memiliki arus sebesar 0,024 mA. Apabila dihitung nilai efisiensi perbandingan proses oksidasi dan reduksi, maka didapatkan nilai sebesar 11,3 %.

4.3.3 Hasil Pengujian CV pada spesimen Whatmann



Gambar 4.33 Hasil Pengujian *cyclic voltammetry* (CV) Pada Spesimen Separator Whatmann dengan 5 siklus pengujian

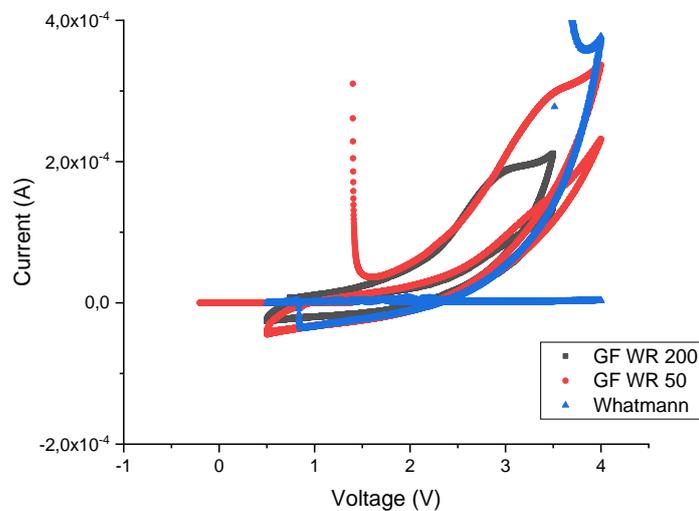


Gambar 4.34 Hasil pengujian *cyclic voltammetry* (CV) pada spesimen separator Whatmann (perbesaran dari **Gambar 4.31**)

Berdasarkan hasil pengujian CV pada spesimen menggunakan separator GF WR 50 dengan *cycle* sebanyak 5, menunjukkan pola *quasi-reversible*, dimana terdapat puncak oksidasi

dan reduksi pada voltase tinggi dan rendah secara berurutan. Pada **Gambar 4.30**, menunjukkan adanya kenaikan arus yang cukup tinggi pada tegangan 3.6 V. Hal ini diduga merupakan arus pendek listrik sementara yang terjadi pada baterai dengan jangkauan voltase yang rendah. Kemudian apabila diukur jarak antara reaksi oksidasi dan reduksi, maka menghasilkan voltase sebesar 2,75 V dengan puncak oksidasi atau saat proses *charging* memiliki arus sebesar 0,868 mA dan arus pada puncak reduksi atau saat proses *discharging* memiliki arus sebesar 0,035 mA. Apabila dihitung nilai efisiensi perbandingan proses oksidasi dan reduksi, maka didapatkan nilai sebesar 4,03 %.

4.3.4 Perbandingan Hasil Pengujian CV dengan Variasi Jenis Separator



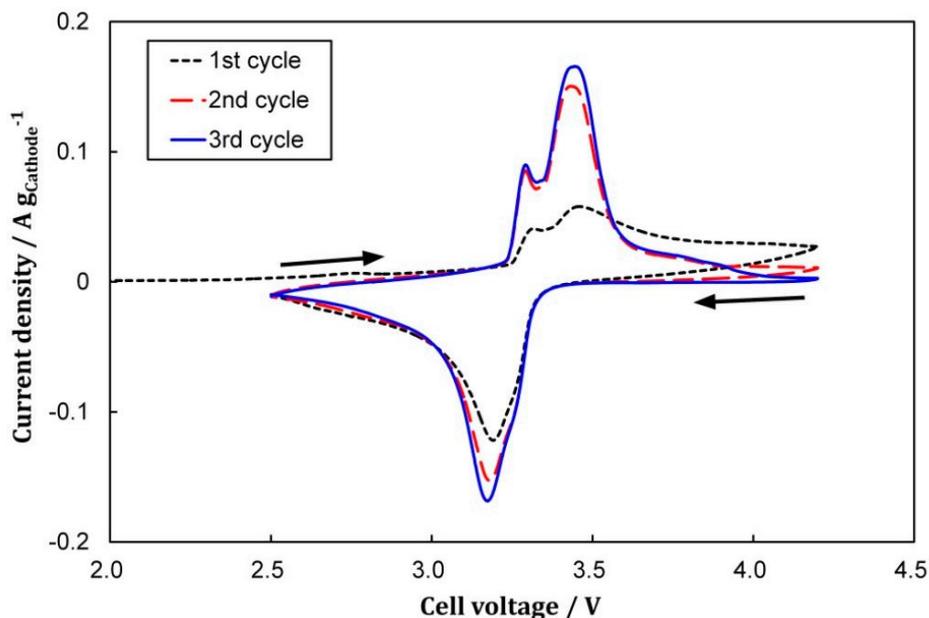
Gambar 4.35 Komparasi Pengujian *Cyclic Voltammetry* (CV) Pada Masing-Masing Variasi Separator dengan pengujian sebanyak 5 siklus.

Berdasarkan komparasi hasil pengujian CV, maka terdapat perbedaan secara visual dari kurva CV yang dihasilkan. Dimana pada kurva yang dibentuk oleh Whatmann memiliki puncak oksidasi tertinggi di antara ketiga variasi separator yang digunakan. Sementara pada puncak reduksi tertinggi dimiliki oleh spesimen GF WR 50. Dari bentuk kurva CV yang dibentuk, bentuk kurva GF WR 200 dapat dikatakan paling sempurna dikarenakan tidak adanya cacat seperti halnya arus pendek listrik sementara dan kurva datar yang melambangkan tidak ada aktivitas baterai seperti halnya spesimen GF WR 50 dan Whatmann. Dari kurva yang dibentuk Whatmann terlihat bahwa tidak membentuk luasan daerah saat kurva sedang menuju ke proses oksidasi, sehingga luasan yang dimiliki oleh spesimen Whatmann memiliki daerah yang terbuka. Jika dibandingkan pada efisiensi yang dimiliki oleh masing-masing separator, maka spesimen dengan separator GF WR 50 memiliki efisiensi tertinggi diantara dua spesimen lainnya jika dibandingkan arus saat proses *charging* dan *discharging* walaupun memiliki tegangan kerja yang cukup tinggi dibandingkan dengan spesimen lain. Nilai efisiensi yang rendah dari seluruh spesimen dengan variasi separator dapat disebabkan oleh penggunaan *solid polymer electrolyte* (SPE) pada spesimen baterai. Dimana, elektrolit yang digunakan masih belum dapat menghantarkan ion-ion dengan baik layaknya elektrolit cair. Adapun hasil pengujian CV yang ditabulasikan pada bagian berikut.

Tabel 4.16 Hasil Pengujian CV pada Seluruh Variasi Separator

Spesimen	Puncak Oksidasi		Puncak Reduksi		ΔV (V)	Coulombic Efficiency
	Tegangan (V)	Arus (mA)	Tegangan (V)	Arus (mA)		
GF WR 50	3,99	0,336	0,51	0,040	3,48	11.9 %
GF WR 200	3,5	0,211	0,55	0,024	2,95	11.3 %
Whatmann	3,62	0,868	0,87	0,035	2,75	4.03 %

Proses pengujian *cyclic voltammetry* CV dilakukan pertama kali setelah proses manufaktur baterai komposit hibrida. Kemudian, pengujian lainnya sepertinya *charge-discharge* (CD) dan *electrochemical impedance spectroscopy* dilakukan secara berurutan. Selain dikarenakan penggunaan SPE yang masih belum efektif menyediakan fasilitas untuk terjadinya proses transfer ion, kurva CV yang cenderung memiliki bentuk reaksi *irreversible* dapat disebabkan oleh tidak adanya pemberian energi aktivasi sebelum melakukan pengujian CV. Penelitian yang dilakukan oleh Abe et, al. pada pengujian baterai dengan basis LiFePO_4 dan Grafit serta elektrolit cair menunjukkan bahwa pemberian energi aktivasi awal berupa siklus pengisian dan penyaluran energi baterai dapat meningkatkan arus reaksi oksidasi dan reduksi pada grafik CV. (Abe, Hori, & Kumagai, 2019) Hal ini dapat membantu mengaktifkan fungsi baterai sehingga aktifitas reaksi oksidasi dan reduksi dapat meningkat, dengan arus yang lebih tinggi. Adapun pengujian CV yang dilakukan oleh Abe et, al. dengan menggunakan variasi siklus pengisian dan penyaluran daya dapat dilihat pada gambar berikut (Abe, Hori, & Kumagai, 2019).

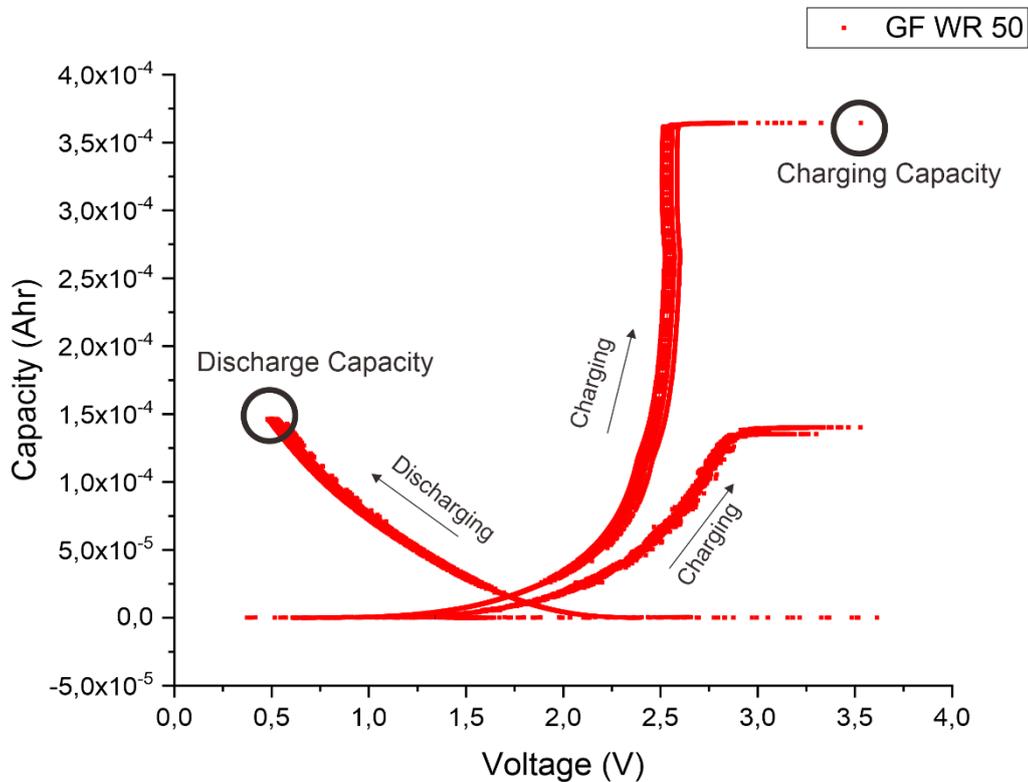


Gambar 4.36 Grafik *cyclic voltammetry* (CV) pada baterai litium berbasis LiFePO_4 /Grafit dengan menggunakan *C-rates* 1C dengan *scan rate* CV sebesar 0.1 mV.s^{-1} . Grafik menunjukkan bahwa semakin besar pemberian siklus pengisian dan penyaluran daya pada baterai, maka akan menghasilkan arus yang lebih tinggi pada masing-masing proses oksidasi

maupun reduksi. Adapun CV dilakukan dengan rentang voltase pada 4.2-2.5 V (Abe, Hori, & Kumagai, 2019)

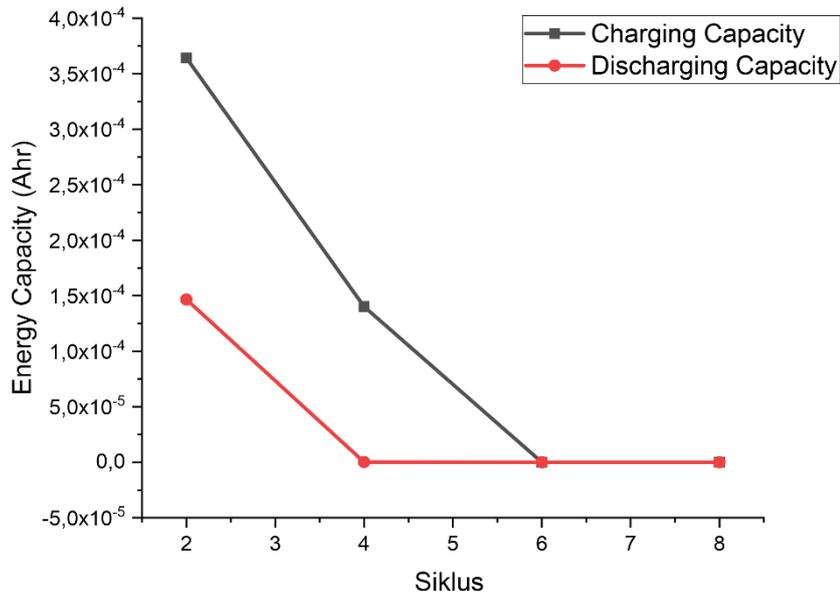
4.4 Hasil Pengujian *Charge-Discharge* (CD)

4.4.1 Hasil Pengujian CD pada spesimen GF WR 50



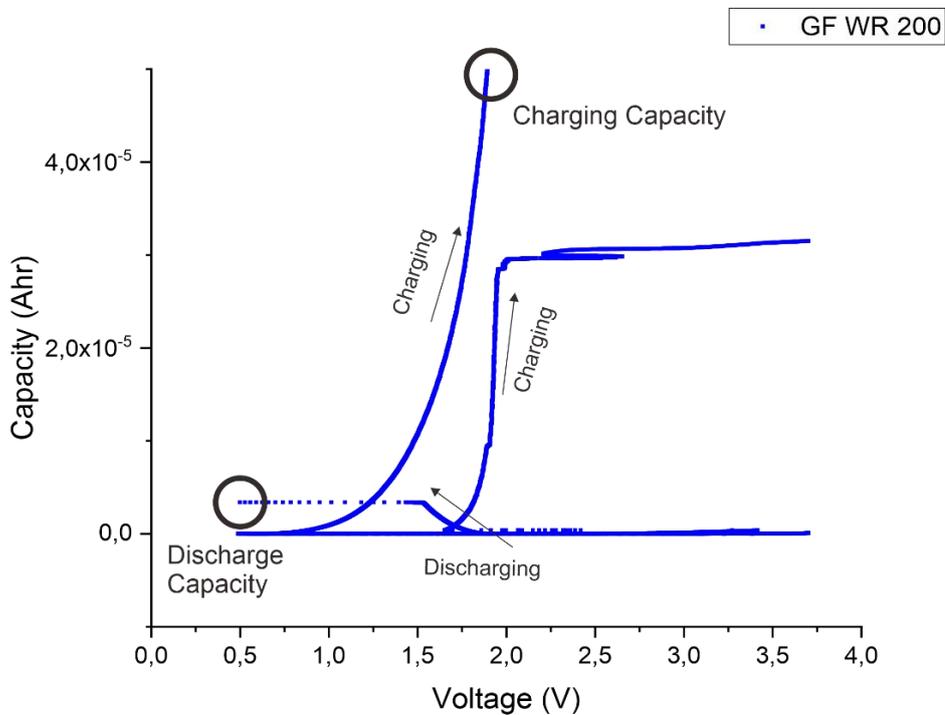
Gambar 4.37 Hasil pengujian *charge-discharge* (CD) pada spesimen separator GF WR 50 dengan 8 siklus pengisian dan penyaluran daya baterai.

Berdasarkan hasil pengujian *charge-discharge* pada spesimen GF WR 50 dengan *cycle* sebanyak 8 kali CD, didapatkan kapasitas *charging* sebesar 0,364 *mAhr* pada voltase sebesar 3,53 V pada siklus pertama. Adapun kapasitas *discharge* yang dimiliki oleh spesimen GF WR 50 yakni 0,147 *mAhr* pada voltase sebesar 0,49 V. Kemudian pada siklus selanjutnya, kapasitas *charging* baterai menjadi turun dengan nilai 0,140 *mAhr* pada voltase 3,53 V. Sementara, kapasitas *discharging* yang dimiliki menjadi turun secara drastis sampai dengan 0,175 μ *Ahr* pada voltase 0,41 V. Dengan demikian, pada siklus pertama di dapatkan *coulumbic efficiency* sebesar 40,38 %. Untuk memudahkan analisis, maka kapasitas *charging* dan *discharging* dapat dipetakan berdasarkan siklus pada tiap pengisian maupun penyaluran energi baterai. Adapun hasil *plotting* dari kapasitas *charge* dan *dicharge* ditunjukkan pada gambar berikut.



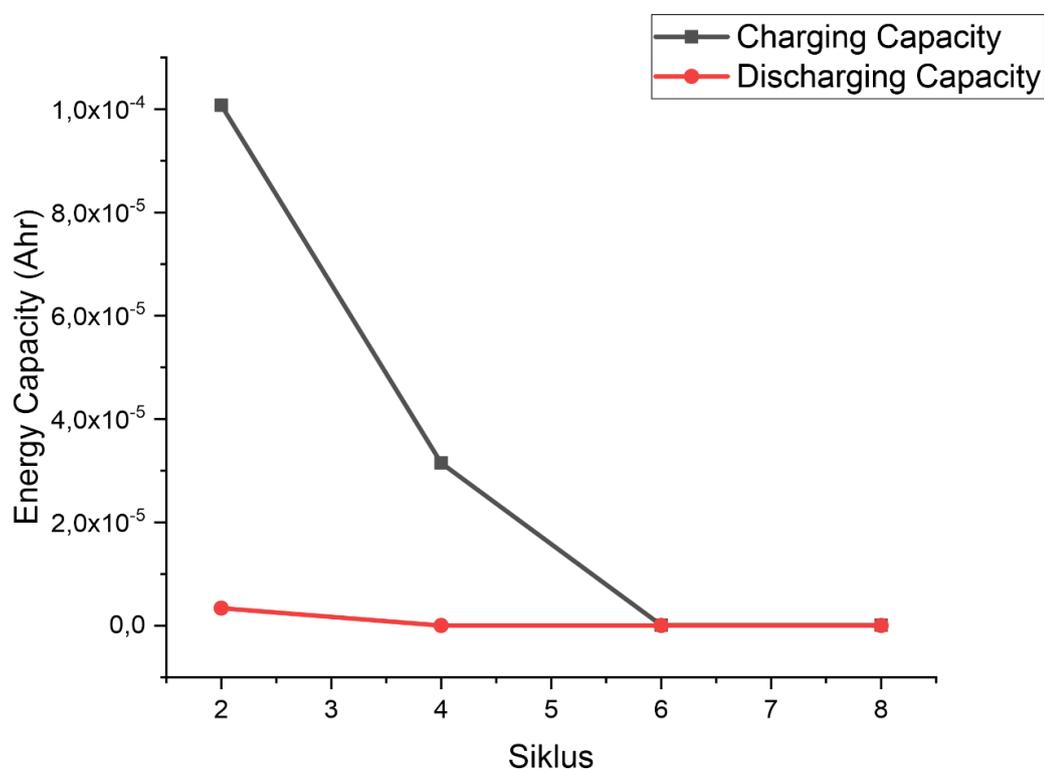
Gambar 4.38 Hasil *plotting* nilai dari kapasitas *charging* dan *discharging* pada spesimen baterai menggunakan separator GF WR 50. Adapun tren yang dibentuk bahwa kapasitas *charging* maupun *discharging* selalu mengalami penurunan seiring bertambahnya siklus pengisian dan penyaluran energi baterai.

4.4.2 Hasil Pengujian CD pada Spesimen GF WR 200



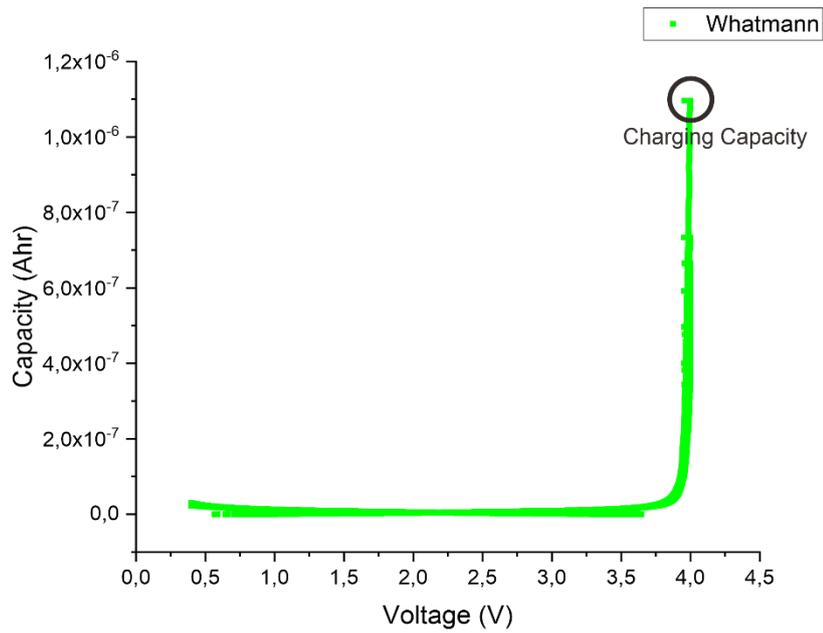
Gambar 4. 39 Hasil pengujian *charge-discharge* (CD) pada spesimen separator GF WR 200 dengan 8 siklus pengisian dan penyaluran daya baterai. Dari hasil grafik menunjukkan bahwa baterai dengan separator GF WR 200 tidak *reversible*.

Berdasarkan hasil pengujian *charge-discharge* pada spesimen GF WR 200 dengan 8 kali siklus *charging* dan *discharging*, didapatkan kapasitas *charging* pada siklus pertama sebanyak 0,101 *mAhr* pada voltase 1,93 V. Kemudian saat dilakukan proses *discharging*, di dapatkan kapasitas yang dimiliki sebanyak 3,38 μ *Ahr* pada voltase 0,49 V. Kemudian saat dilakukan proses *charging* kembali, di dapatkan kapasitas sebanyak 0,032 *mAhr* pada voltase 3.7 V dengan kapasitas *discharging* yang sangat turun drastis menjadi 0,01 μ *Ahr* pada voltase 0.49 V. Dengan demikian pada siklus pertama di dapatkan *coulumbic efficiency* sebesar 3,34 %. Adapun nilai dari kapasitas *charging* dan *discharging* pada tiap siklusnya ditunjukkan pada gambar berikut. Pada siklus ke-6, kapasitas *charging* turun dan nilainya sudah menyamakan nilai dari kapasitas *discharging*. Adapun grafik *charge-discharge* menunjukkan baterai tidak *reversible*. Hal ini terjadi akibat tidak adanya litium yang berinterkalasi kembali ke material katoda, setelah ion litium dilepaskan dari katoda. Adapun deinterkalasi pada katoda yang dimaksud yakni proses *charging* dan interkalasi pada katoda yaitu *discharging*. Dengan demikian, terdapat perbedaan nilai kapasitas *charging* dan *discharging* yang cukup besar dan cenderung tidak adanya kapasitas *discharging*. Ion litium kemungkinan tidak kembali ke katoda disebabkan oleh terikatnya ke material SPE ataupun material katoda dan anoda pun yang rusak. Maka dari itu, diperlukan investigasi lanjut mengenai ion litium yang apakah memang terikat dengan SPE sehingga tidak dapat kembali ke katoda atau terdapat faktor lain yang menyebabkan tidak bisa terjadinya interkalasi litium pada katoda kembali saat proses *discharging*.

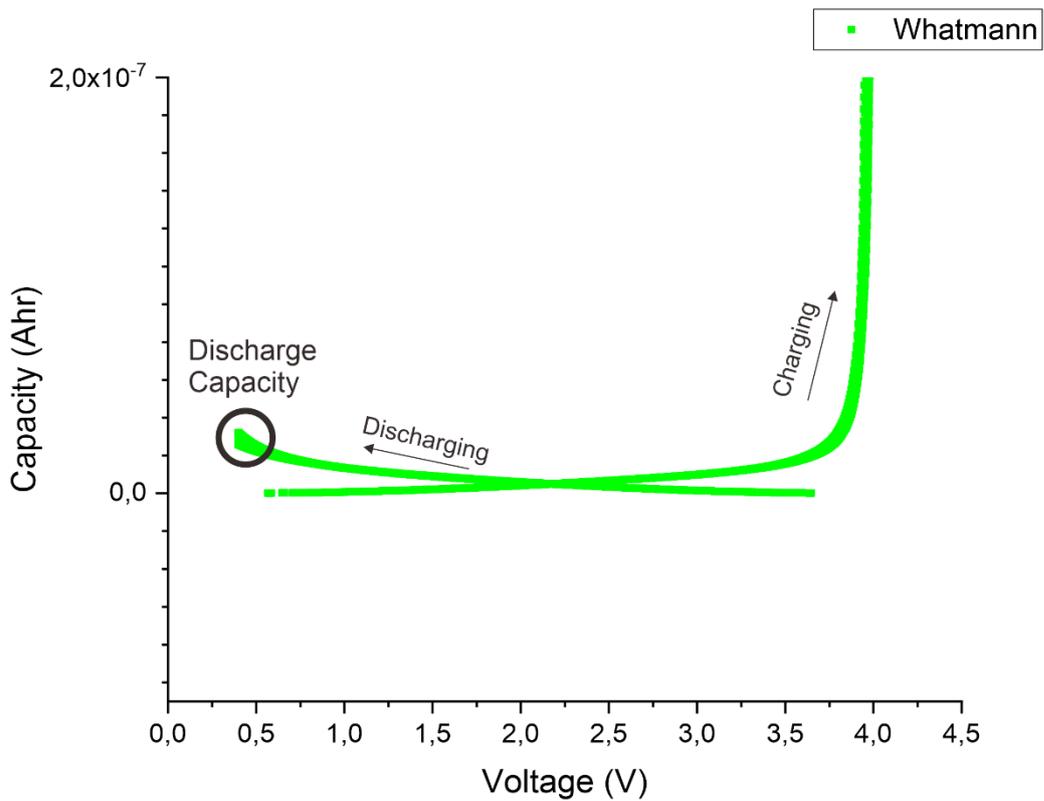


Gambar 4.40 Hasil plot nilai dari kapasitas *charging* dan *discharging* (CD) pada spesimen baterai menggunakan separator GF WR 200. Adapun tren yang dibentuk bahwa kapasitas *charging* maupun *discharging* selalu mengalami penurunan seiring bertambahnya siklus pengisian.

4.4.3 Hasil Pengujian CD pada spesimen Whatmann

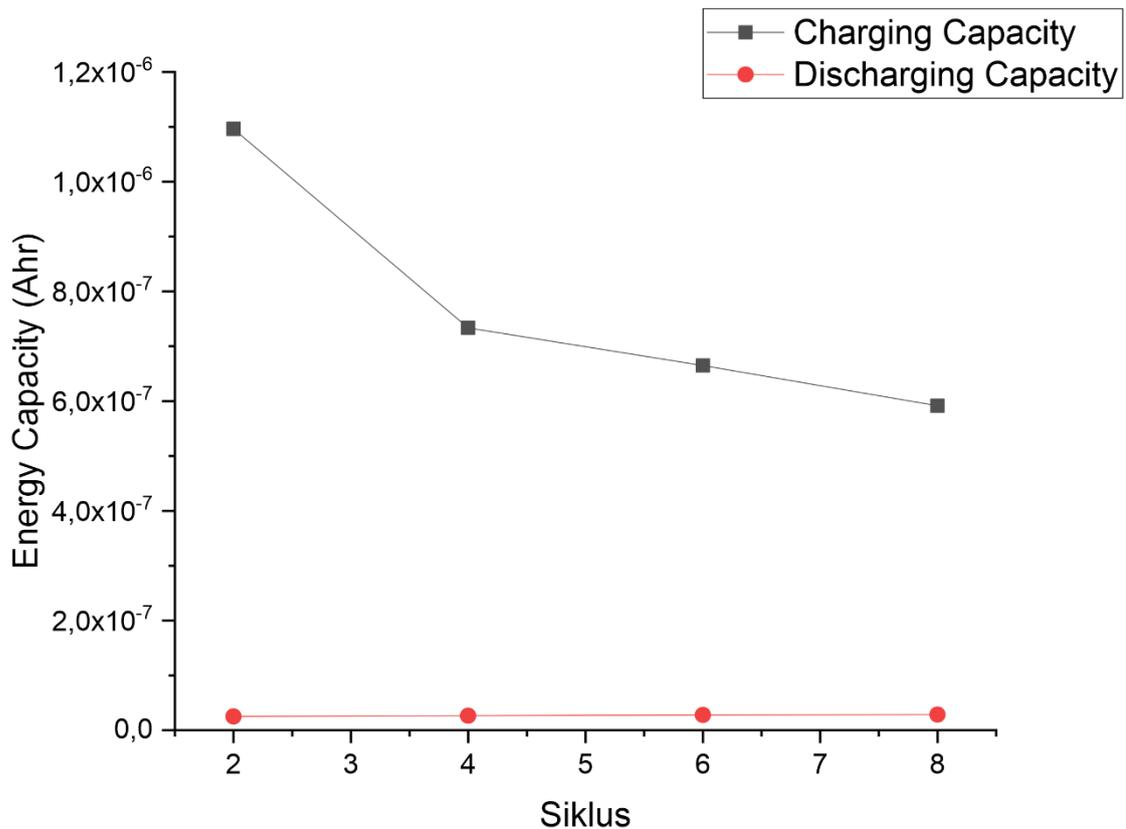


Gambar 4.41 Hasil pengujian *charge-discharge* (CD) pada Spesimen Separator Whatmann menggunakan 8 siklus pengujian



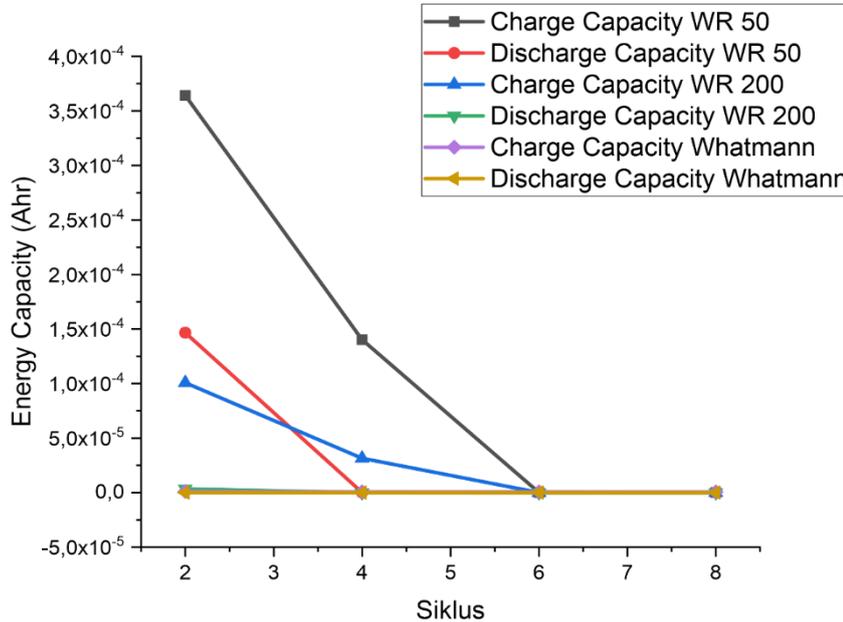
Gambar 4.42 Hasil pengujian *charge-discharge* (CD) pada spesimen separator Whatmann yang diperbesar dari gambar pengujian CD pada **Gambar 4.39**

Berdasarkan hasil pengujian *charge-discharge* pada spesimen Whatmann dengan *cycle* sebanyak 8 kali CD, didapatkan kapasitas *charging* sebesar $1,096 \mu\text{Ahr}$ pada voltase sebesar 3,95 V pada siklus pertama. Adapun kapasitas *discharge* yang dimiliki oleh spesimen GF WR 50 yakni $0,025 \mu\text{Ahr}$ pada voltase sebesar 0,39 V. Kemudian pada siklus selanjutnya, kapasitas *charging* baterai menjadi turun dengan nilai $0,733 \mu\text{Ahr}$ pada voltase 4 V. Sementara, kapasitas *discharging* yang dimiliki hampir mirip dengan siklus sebelumnya, yakni $0,026 \mu\text{Ahr}$ pada voltase 0,39 V. Dengan demikian pada siklus pertama, didapatkan *coulumbic efficiency* sebesar 2,28 %. Adapun untuk kapasitas *charging* dan *discharging* pada separator Whatmann yang disajikan dalam data sebagai berikut.



Gambar 4.43 Hasil plotting nilai dari kapasitas *charging* dan *discharging* pada spesimen baterai menggunakan separator Whatmann. Adapun tren yang dibentuk bahwa kapasitas *charging* selalu mengalami penurunan seiring bertambahnya siklus. Adapun nilai dari kapasitas *discharging* yang stabil pada ordo -8 Ahr .

4.4.4 Analisa Hasil pengujian CD dan CV dengan pengaruh penggunaan jenis separator



Gambar 4.44 Hasil plot kapasitas *charging* dan *discharging* (CD) pada masing-masing spesimen separator. Hasil menunjukkan bahwa seluruh spesimen mengalami penurunan kapasitas *charging* dan *discharging* dengan bertambahnya siklus baterai.

Berdasarkan perbandingan hasil pengujian *charge-discharge* pada masing-masing separator, dapat dibandingkan bahwa spesimen dengan separator GF WR 50 memiliki kapasitas *discharging* paling besar, yakni 0,147 mAh pada voltase 0,49 V. Dimana, kapasitas *discharge* yang dimiliki oleh separator lain berada pada ordo yang lebih rendah. Seperti halnya GF WR 200 berada 2 ordo dibawah GF WR 50 dan Whatmann berada pada 4 ordo dibawah GF WR 50. Perbedaan nilai dari kapasitas *discharge* ini diduga akibat dari dimensi yang dimiliki oleh separator GF WR 50. Dimana, separator ini memiliki ketebalan paling tipis diantara separator lainnya, yakni sebesar 30,67 μm . Apabila dikaitkan dengan teori kapasitor umum, muatan berbanding lurus dengan nilai kapasitansi dan tegangan yang dimiliki. Sementara, kapasitansi sendiri memiliki parameter berupa jarak antara dua plat. Semakin kecil jarak tersebut, maka kapasitansi yang dimiliki akan semakin besar sehingga muatan yang dimiliki akan semakin besar juga. Adapun persamaan yang dimaksud yakni sebagai berikut.

$$q = \frac{\epsilon A}{d} V \quad (4.2)$$

Dimana, q merupakan jumlah muatan, ϵ merupakan permivitas dielektrik, A merupakan luasan penampang yang saling berhadapan, V merupakan tegangan antar dua plat kapasitor, dan d merupakan jarak antar plat kapasitor (Walker, Halliday, & Resnick, 2011). Selain GF WR 50 yang memiliki kapasitas *discharging* terbesar dikarenakan ketebalan yang

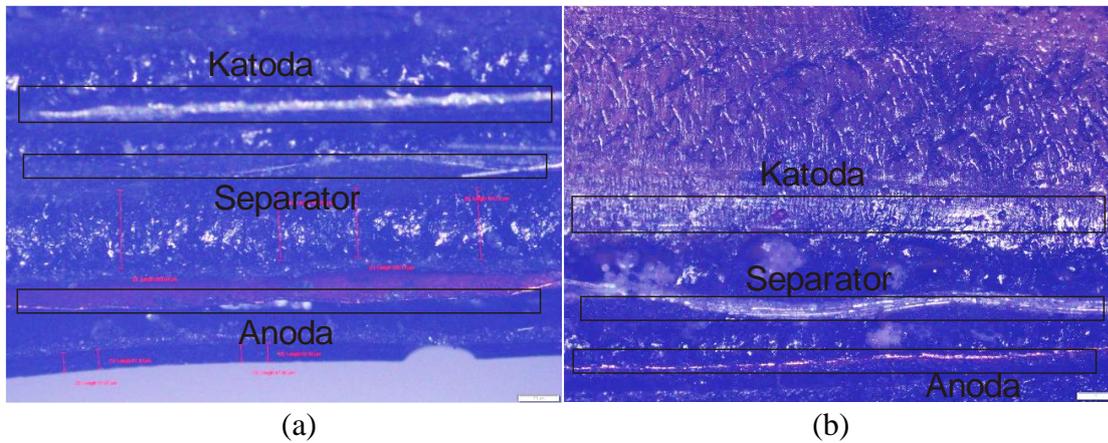
dimiliki merupakan yang paling tipis, separator lain juga memiliki tren yang sama. Dimana, GF WR 200 dengan ketebalan kedua paling tipis, yakni 53,62 μm memiliki kapasitas *discharge* lebih besar dibandingkan dengan spesimen Whatmann yang memiliki ketebalan yang lebih besar. Pernyataan ini juga sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Leif Asp, 2021. Dimana, hasil penelitian tersebut menyatakan bahwa penggunaan separator dengan tipe *woven* dengan ketebalan yang lebih tipis akan menghasilkan kapasitas yang lebih besar dibandingkan dengan menggunakan separator Whatmann dengan ketebalan yang lebih besar. Adapun seluruh spesimen mengalami penurunan kapasitas yang cukup drastis pada siklus kedua, menandakan bahwa sistem baterai yang dibuat, meliputi konfigurasi elektrolit padat dan separator tertentu, masih belum memiliki reversibilitas yang baik. Dikatakan suatu baterai memiliki reversibilitas yang baik apabila kapasitas *charging* dan *discharging* memiliki nilai yang sama.

Adapun nilai dari *coulumbic efficiency* yang dihasilkan masih belum menyentuh angka 100% bisa diakibatkan oleh penggunaan sistem elektrolit padat. Sama halnya seperti analisis pada *cyclic voltammetry*, elektrolit yang di sintesis diduga masih belum dapat menghantarkan ion litium dengan baik, sehingga jumlah dari ion litium yang dilepaskan dan diterima kembali di katoda jumlahnya tidak sama. Adapun nilai *coulumbic efficiency* pada GF WR 50 yang lebih diduga diakibatkan oleh pemberian perlakuan pada baterai yang berbeda dengan spesimen baterai lainnya. Pada GF WR 50, terdapat pemberian “penekanan tambahan” menggunakan penjempit kertas. Hal ini dikarenakan saat tidak diberikan penekanan tambahan, voltase baterai tidak terdeteksi di awal sehingga tidak dapat melakukan pengujian *cyclic voltammetry* maupun *charge-discharge*. Pembacaan voltase yang tidak terdeteksi diduga akibat kontak antar material yang masih belum bagus, sehingga bisa memungkinkan terjadinya arus pendek listrik pada sistem baterai dikarenakan masih ada bagian katoda dan anoda yang saling menempel. Dengan demikian pada penelitian selanjutnya, perlu diinvestigasi ion litium pada SPE maupun separator. Investigasi ini dapat menyimpulkan apakah memang ion litium berikatan dengan SPE ataupun separator sehingga proses transfer ion dapat terhambat.

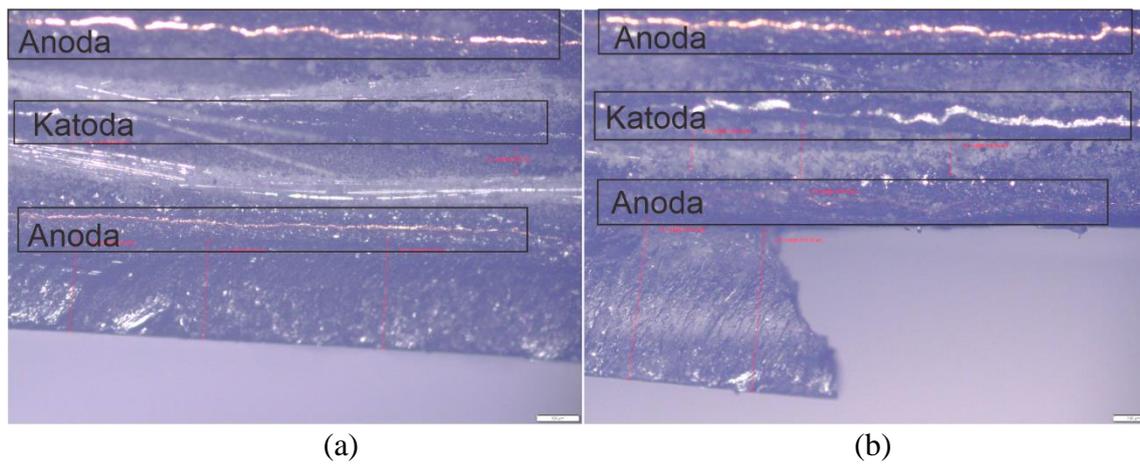
Tabel 4.17 Hasil Rekapitulasi Kapasitas *Charging* dan *Discharging* pada Siklus Pertama

Spesimen	Kapasitas				Coulumbic Efficiency
	Charging (mAh)	Voltase (V)	Discharging (mAh)	Voltase (V)	
GF WR 50	0,364	3,53	0,147	0,49	40,38 %
GF WR 200	0,101	1,93	$3,38 \times 10^{-3}$	0,49	3,34 %
Whatmann	$1,096 \times 10^{-3}$	3,95	$0,025 \times 10^{-3}$	0,39	2,28 %

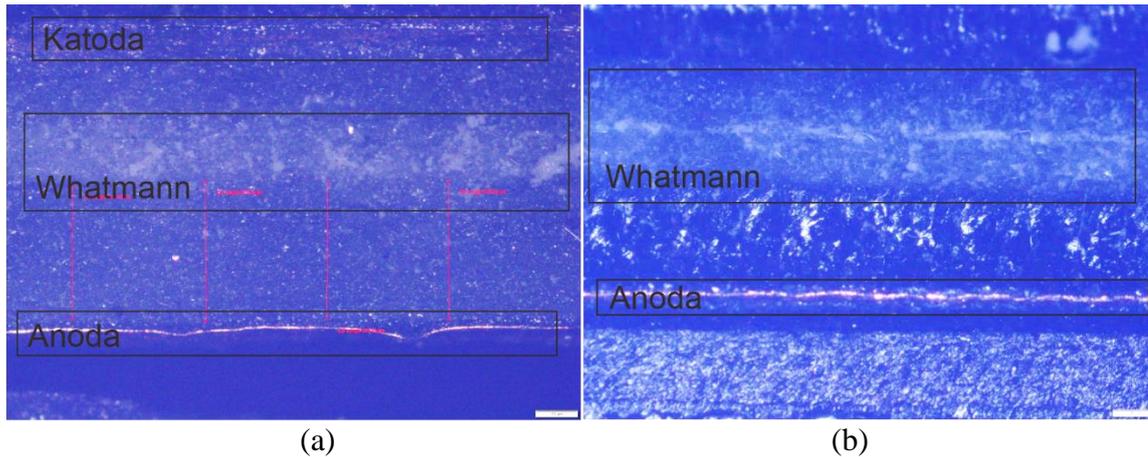
4.5 Hasil Pengamatan *Optical Microscopy*



Gambar 4.45 Penampang spesimen GF WR 50 (a) sebelum dan (b) sesudah diuji elektrokimia. Terlihat tidak ada perbedaan yang signifikan dari kedua spesimen. Perlu jadi catatan bahwa pengamatan dilakukan menggunakan spesimen yang berbeda.



Gambar 4.46 Penampang spesimen GF WR 200 (a) sebelum dan (b) sesudah diuji elektrokimia. Terlihat bahwa tidak ada perbedaan yang cukup signifikan di antara kedua spesimen uji.



Gambar 4.47 Penampang spesimen Whatmann (a) sebelum dan (b) sesudah diuji elektrokimia. Terlihat bahwa tidak ada perbedaan yang cukup signifikan di antara kedua spesimen uji.

Berdasarkan hasil pengamatan dengan skala gambar 100 μm , didapatkan spesimen sesudah pengujian memiliki bercak putih yang lebih banyak dibandingkan dengan spesimen sebelum dilakukan uji elektrokimia. Namun, makna bercak putih masih belum bisa dipastikan apakah jumlah massa elektrolit yang berkurang dikarenakan tidak dilakukan uji yang berfungsi untuk mengecek unsur sebelum dan sesudah spesimen dilakukan uji elektrokimia. Terlihat bahwa pada **Gambar 4.43**, terdapat separator yang masih belum terbasahi dengan SPE, khususnya pada gambar (b). Hal ini juga dapat dilihat pada **Gambar 4.44**, dimana spesimen GF WR 200 masih ada daerah yang belum terbasahi dengan SPE, ditandai dengan warna awal separator sebelum terbasahi dengan SPE masih terlihat, yakni warna putih. Terlihat juga bahwa pada **Gambar 4.45** (a), anoda masih belum tersusun secara lurus. Hal ini tentunya akan mempengaruhi performa elektrokimia, berhubungan dengan permukaan bergelombang akan berpengaruh pada jarak tempuh ion-ion antara katoda dan anoda sehingga dapat mempengaruhi kapasitas baterai yang dihasilkan.

Pengaruh hasil *charge-discharge* dapat dipengaruhi dengan hasil manufaktur akhir. Dimana jarak antara katoda dan anoda masih belum dapat dikendalikan dengan metode manufaktur yang digunakan pada penelitian ini. Hal ini juga akan mempengaruhi nilai dari kapasitas *charging* dan *discharging* apabila dikaitkan dengan persamaan 4.2. Awal rencana dari penelitian ini bahwa jarak antara katoda dan anoda akan ditentukan oleh tebal dari separator. Namun setelah dilihat menggunakan *optical microscopy*, masih ada jarak antara separator dengan masing-masing katoda maupun anoda. Jarak tersebut disebabkan oleh adanya SPE diantara masing-masing komponen tersebut. Dengan demikian, nilai dari kapasitas *charging* dan *discharging*, analisis *cyclic voltammetry*, dan impedansi juga dapat dipengaruhi oleh jarak yang terbentuk antara separator dengan katoda maupun anoda. Tentunya hal ini tidak diinginkan dikarenakan tidak dapat menggunakan ketebalan separator yang ada sebagai jarak antara katoda dan anoda. Dengan demikian, perlu melakukan peningkatan kualitas produksi baterai sehingga ketebalan dari SPE dapat diatur dan sesuai dengan perencanaan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang di dapatkan yang sesuai dengan seluruh prosedur dan analisis hasil serta studi literatur yang dilakukan selama penelitian berlangsung adalah sebagai berikut.

1. GF WR 200 memiliki performa berupa impedansi yang paling kecil dibandingkan dengan separator GF WR 50 dan Whatmann, yakni 1474 Ω dan 983 Ω pada suhu pengujian 25 °C dan 30 °C secara berurutan. Hal ini dikarenakan oleh porositas yang dimiliki oleh GF WR 200 yang lebih besar dibandingkan dengan GF WR 50, sehingga volume SPE yang membasahi separator lebih banyak. Volume SPE yang lebih banyak akan meningkatkan aktivitas transfer ion, sehingga akan mengurangi hambatan baterai.
2. GF WR 50 memiliki performa *cyclic voltammetry* terbaik diantara separator lainnya, dengan puncak oksidasi memiliki arus sebesar 0,336 mA dan puncak reduksi sebesar 0,040 mA dengan tegangan operasi sebesar 3,48 V. Adapun hasil dari *cyclic voltammetry* menunjukkan profil yang cenderung *irreversible*, namun masih terdapat fenomena reduksi walaupun arusnya tidak sebesar fenomena oksidasi.
3. GF WR 50 memiliki performa berdasarkan *charge-discharge* terbaik, dengan kapasitas *charging* sebesar 0,364 mAh dan kapasitas *discharging* sebesar 0,147 mAh dikarenakan memiliki ketebalan yang paling tipis diantara spesimen separator lainnya. Sementara, waktu siklus dengan total pengujian 8 siklus *charge-discharge*, seluruh spesimen selalu mengalami penurunan kapasitas yang cukup besar pada siklus kedua. Kapasitas *charging* maupun *discharging* yang besar dikarenakan dengan ketebalan separator yang lebih tipis sehingga proses transfer ion dapat dilakukan dengan mudah pada jarak yang lebih dekat.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil evaluasi dari penelitian yang telah dilakukan, adapun saran yang diberikan untuk penelitian kedepannya diantara-Nya sebagai berikut.

1. Penggunaan metode manufaktur yang lebih efektif sehingga ketebalan dan persebaran SPE dapat di kontrol dengan demikian dapat meminimalisir kesalahan pada manufaktur dan dapat menyamakan kondisi antara spesimen pengujian.
2. Melakukan pengujian untuk menginvestigasi ion-ion yang tidak berikatan kembali dengan katoda sehingga terjadi kehilangan kapasitas setiap melakukan siklus *charge-discharge*.
3. Penggunaan jenis campuran elektrolit konvensional dapat diganti dengan jenis elektrolit konvensional yang lebih baik guna meningkatkan performa elektrokimia baterai.
4. Peningkatan kualitas segel baterai dan mengganti material *pouch* baterai dengan *pouch* konvensional.
5. Agar parameter yang dibandingkan lebih jelas, maka penelitian selanjutnya dapat melakukan investigasi performa elektrokimia pada baterai komposit hibrida menggunakan jenis material separator yang sama namun ketebalan yang berbeda.
6. Perbaiki urutan pengujian dengan menambahkan energi aktivasi sebelum pengujian CV dan EIS sehingga dapat meningkatkan performa elektrokimia.

DAFTAR PUSTAKA

- Abe, Y., Hori, N., & Kumagai, S. (2019). Electrochemical Impedance Spectroscopy on the Performance Degradation of LiFePO₄/Graphite Lithium-Ion Battery Due to Charge-Discharge Cycling under Different C-Rates. *energies MDPI*. doi:10.3390/en12234507
- Aktas, S., Berkhof, L., Collins, F., Kersjes, R., & Uitzetter, A. (2017). *Advance Technology Fundamentals of Materials Solid State Battery*. University of Twente. doi:10.13140/RG.2.2.22140.36486
- Arora, P., & Zhang, Z. (2004). Battery Separator. *American Chemical Society*. doi:10.1021/cr020738
- Asp, L. E., Johansson, M., Lindbergh, G., Xu, J., & Zenkert, D. (21. November 2019). Structural Battery Composites: A Review. Von <https://doi.org/10.1088/2631-6331/ab5571> abgerufen
- Asp, L., Bouton, K., Carlstedt, D., Duan, S., Harnden, R., Johannisson, W., . . . Zenkert, D. (2021). A Structural Battery and its Multifunctional Performance. *Advanced Energy & Sustainability Research*. doi:10.1002/aesr.202000093
- Carlson, T. (2013). Multifunctional Composite Material: Design, Manufacture, and Experimental Characterisation. *Lulea University of Technology*. *carnewschina.com*. (18. April 2022). Von [carnewschina.com: https://carnewschina.com/2022/04/18/chinese-electric-vehicles-are-on-fire/](https://carnewschina.com/2022/04/18/chinese-electric-vehicles-are-on-fire/) abgerufen
- Choi, W., Shin, H. C., Kim, J. M., Choi, J. Y., & Yoon, W. S. (2020). Modeling and Applications of Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) for Lithium-ion Batteries. *Journal of Electrochemical, Science, and Technology*, 1-13. Von <https://doi.org/10.33961/jecst.2019.00528> abgerufen
- Crompton, T. (2000). Battery Reference Book.
- Demers, H., Paoletta, A., Darwiche, A., Dontigny, M., Clement, D., Guerfi, A., . . . Zaghib, K. (6. February 2020). Behavior of Solid Electrolyte in Li-Polymer Battery with NMC Cathode via in-situ Scanning Electron Microscopy. *Nano Letters*. doi:10.1021/acs.nanolett.9b04452
- Ding, W. Q., Lv, F., Xu, N., Wu, M. T., Liu, J., & Gao, X. P. (2021). Polyethylene Oxide-Based Solid-State Composite Polymer Electrolytes for Rechargeable Lithium Batteries. *ACS Appl. Energy Mater*, 4(5), 4581-4601. doi:10.1021/acsaem.1c00216
- Ihrner, N., Johannisson, W., Sieland, F., Zenkert, D., & Johansson, M. (2017). Structural lithium ion battery electrolytes via reaction induced phase-separation. *Journals of Materials Chemistry*. doi:10.1039/c7ta04684g
- Inui, Y., Hirayama, S., & Tanaka, T. (2021). Temperature dependence of impedance spectrum of charge-transfer processes in lithium-ion batteries with nickel-manganese-cobalt cathode and graphite anode. *Journal of Energy Storage*. Von <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103390> abgerufen
- Kannan, D. R., Terala, P. K., Moss, P. L., & Weatherspoon, M. H. (2018). Analysis of the Separator Thickness and Porosity on the Performance of Lithium-Ion Batteries. *Hindawi International Journal of Electrochemistry*. Von <https://doi.org/10.1155/2018/1925708> abgerufen
- Kim, T., Choi, W., Shin, H. C., Choi, J. Y., Kim, J. M., Park, M. S., & Yoon, W. S. (2020). Applications of Voltammetry in Lithium Ion Battery Research. *Journal of Electrochemical, Science, and Technology*.
- Klein, S., Wrogemann, J. M., Wickeren, S. v., Harte, P., Barmann, P., Heidrich, B., . . . Placke, T. (2022). Understanding the Role of Commercial Separators and Their Reactivity

- toward LiPF₆ on the Failure Mechanism of High-Voltage NCM523 || Graphite Lithium Ion Cells. *Advance Energy Materials*. doi:10.1002/aenm.202102599
- Mobbs, M. (2015). *Lead acid vs. lithium-ion battery comparison*. Michaels Mobbs Sustainable Projects. Von https://static1.squarespace.com/static/55d039b5e4b061baebe46d36/t/56284a92e4b0629aedbb0874/1445481106401/Fact+sheet_Lead+acid+vs+lithium+ion.pdf abgerufen
- Pereira, T., Guo, Z., Nieh, S., Arias, J., & Hanh, T. (2009). Energy Storage Structural Composites: A Review. *Journal of Composites Material*. doi:10.1177/0021998308097682
- Pinson, M., & Bazant, M. (kein Datum). Theory of SEI Formation in Rechargeable Batteries: Capacity Fade, Accelerated Aging and Lifetime Prediction. *Massachusetts Institute of Technology*.
- Pyun, S.-I., Shin, H. C., Lee, J. W., & Go, J. Y. (2004). *Electrochemistry of Insertion Materials for Hydrogen and Lithium*. beck-shop.de.
- Rohatgi, V., & Saleh, A. E. (2001). *An Introduction to Probability and Statistics*. Danvers: John Wiley & Sons, Inc.
- Schneider, L. M., Ihrner, N., Zenkert, D., & Johansson, M. (2019). Bicontinuous Electrolytes via Thermally Initiated Polymerization for Structural Lithium Ion Batteries. *ACS Applied Energy Matter*. doi: 10.1021/acsaem.9b00563
- Scrosati, B., & Garche, J. (2009). Lithium Batteries: Status, prospects and future. *Journal of Power Sources*, 2419 - 2430. doi:10.1016/j.jpowsour.2009.11.048
- Sholahuddin, A., & Wijayanti, I. D. (2021). TUDI PENGARUH VARIASI ARUS PEMAKAIAN TERHADAP PERFORMANCE BATERAI TIPE AA NICKEL METAL HYDRIDE. *Institut Teknologi Sepuluh Nopember*.
- Walker, J., Halliday, D., & Resnick, R. (2011). *Fundamentals of Physics*. John Willey & Sons, Inc.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

GF WR200					
Porosity			Luas Porositas (μm^2)	Tebal GF (μm)	Skala Gambar
Panjang (μm)	Lebar (μm)	Skala Gambar			
246,08	122,36	100 μm	30110,35	58,01	50 μm
284,62	149,16		42453,91	58,04	
209,78	163,2		34236,10	55,77	
155,05	204,65		31730,98	56,41	
187,73	207,79		39008,42	53,32	
235,81	80,87		19069,95	49,56	
356,08	92,01		32762,92	50,25	
206,24	135,77		28001,20	52,98	
161,82	139,35		22549,62	52,41	
228,33	104,51		23862,77	56,78	

Lampiran 1. Hasil pengukuran ketebalan dan luas area kosong pada separator GF WR 200

GF WR50					
Porosity			Luas Porositas (μm^2)	Tebal GF (μm)	Skala Gambar
Panjang (μm)	Lebar (μm)	Skala Gambar			
110,54	22,17	100 μm	2450,67	28,34	50 μm
137,91	17,8		2454,8	29,58	
149,21	13,77		2054,62	31,74	
147,27	20,08		2957,18	29,04	
133,34	24,61		3281,5	21,28	
154,28	13,21		2038,04	32,65	
168,29	13,92		2342,6	30,68	
166,8	15,24		2542,03	32,65	
133,23	32,48		4327,31	41,67	
147,11	35,47		5217,99	39,01	

Lampiran 2. Hasil pengukuran ketebalan dan luas area kosong pada separator GF WR 50

Whatmann					
Porosity			Luas Porositas (μm^2)	Tebal GF (μm)	Skala Gambar
Panjang (μm)	Lebar (μm)	Skala Gambar			
-	-	100 μm	-	388,61	50 μm
-	-		-	392,76	
-	-		-	393,41	
-	-		-	395,17	
-	-		-	401,4	
-	-		-	395,51	
-	-		-	385,82	
-	-		-	386,71	
-	-		-	400,15	
-	-		-	404,77	

Lampiran 3. Hasil pengukuran ketebalan pada separator Whatmann

BIODATA



Penulis dilahirkan di Jakarta, 1 Mei 2000, merupakan anak pertama dari 3 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di TK Duta Pendidikan Depok, SD Lazuardi GIS Depok, SMP Lazuardi GIS Depok, SMA Lazuardi GIS Depok. Setelah lulus dari SMA Lazuardi GIS Depok, penulis mengikuti SBMPTN dan diterima di Departemen Teknik Mesin FTIRS-ITS pada tahun 2018 dan terdaftar dengan NRP 02111840000107.

Di Departemen Teknik Mesin penulis sempat aktif sebagai Asisten Praktikum Metalurgi I dan II dan Grader mata kuliah Menggambar Mesin. Penulis pernah mengikuti Lomba Karya Tulis Ilmiah Mesi Brawijaya pada tahun 2020 yang diadakan oleh Departemen Teknik Mesin Universitas Brawijaya dan berhasil memperoleh juara harapan

1. Selain itu, penulis pernah menjadi *distinguished invited speaker* pada *International Conference on Battery for Renewable Energy and Electric Vehicles (ICB-REV) 2022* dengan karya tulis ilmiah yang dibawakan berjudul “*Understanding the Role of Glass Fabric Separators on the Performance of Structural Composite Battery*”.

Adapun kegiatan diluar Departemen Teknik Mesin, penulis pernah memenangkan juara 1 pada lomba Kontes Robot Terbang Indonesia (KRTI) pada divisi *Technology Development Airframe Innovation* pada tahun 2019 yang 2020 dengan Bayucaraka ITS UAV *Research Team*. Kemudian pada tahun 2021, penulis menjabat sebagai *General Manager* Bayucaraka ITS UAV *Research Team* selama satu tahun.