

**PENGARUH RASIO ELEKTRODA TERHADAP PERFORMA
BATERAI SILINDER DENGAN KATODA NMC 541**

Skripsi



Disusun Oleh:

Yohanes Juan Bagus Simorangkir

3331200042

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
CILEGON-BANTEN
2024**

**PENGARUH RASIO ELEKTRODA TERHADAP PERFORMA
BATERAI SILINDER DENGAN KATODA NMC 541**

Skripsi

**Untuk memenuhi sebagai persyaratan mencapai derajat Sarjana S1
pada Jurusan Teknik Mesin Universitas Sultan Ageng Tirtayasa**



Disusun Oleh:

Yohanes Juan Bagus Simorangkir

3331200042

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
CILEGON-BANTEN**

2024

TUGAS AKHIR


Pengaruh Rasio Elektroda Terhadap Performa Baterai Silinder Dengan Katoda NMC 541

Dipersiapkan dan disusun Oleh :

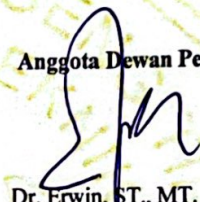
Johanes Juan Bagus Simorangkir
3331200042

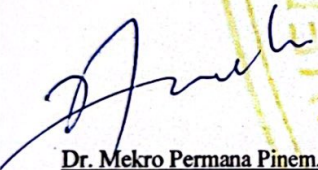
telah dipertahankan di depan Dewan Penguji
pada tanggal, 26 Januari 2024

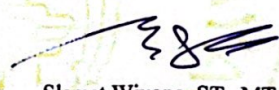
Pembimbing Utama



Dhimas Satria, S.T., M.Eng
NIP.198305102012121006

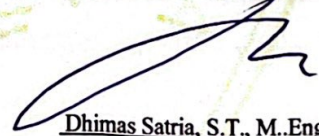
Anggota Dewan Penguji

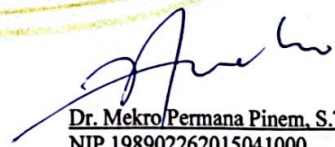

Dr. Erwin, ST., MT.
NIP.197310062009121001


Dr. Mekro Permana Pinem, S.T., M.T.
NIP.198902262015041000


Slamet Wiyono, ST., MT.
NIP.197312182005011001


Dr. Yustinus Purwamargapratala, S.T., M.Si
NIP.196604081990011001


Dhimas Satria, S.T., M.Eng
NIP.198305102012121006


Dr. Mekro Permana Pinem, S.T., M.T.
NIP.198902262015041000

**Tugas Akhir ini sudah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

Tanggal, 5 Februari 2024
Ketua Jurusan Teknik Mesin UNTIRTA




Dhimas Satria, S.T., M.Eng.
NIP.198305102012121006

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan di bawah ini,

Nama : Yohanes Juan Bagus Simorangkir

NPM : 3331200042

Judul : PENGARUH RASIO ELEKTRODA TERHADAP PERFORMA
BATERAI SILINDER DENGAN KATODA NMC 541

Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Sultan Ageng Tirtayasa,

MENYATAKAN

Bahwa skripsi ini hasil karya sendiri dan tidak ada duplikat dengan karya orang lain, kecuali untuk yang telah disebutkan sumbernya.

Cilegon, 21 Februari 2024



Yohanes Juan Bagus Simorangkir

NPM. 3331200042

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas karuniaNya penulis dapat menyelesaikan penulisan laporan tugas akhir. Penulisan laporan tugas akhir dengan judul “Pengaruh Rasio Elektroda Terhadap Performa Baterai Silinder Dengan Katoda NMC 541” ini dilakukan guna memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik di jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Penulis menyadari bahwa tanpa dukungan dan bimbingan dari berbagai pihak, mulai awal masa perkuliahan hingga penyusunan tugas akhir ini, tentu mustahil untuk dapat diselesaikan. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Sahat Simorangkir dan Ibu Norayanti, selaku orang tua dan keluarga yang selalu memberikan dukungan dalam perkuliahan hingga penyusunan laporan tugas akhir.
2. Bapak Prof. Dr. Jayanudin, ST., M.Eng., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
3. Bapak Dhimas Satria S.T., M.Eng., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, sekaligus dosen pembimbing pertama yang membantu penyusunan Tugas Akhir.
4. Dr. Mekro Permana Pinem, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing kedua dalam membantu penyusunan Tugas Akhir.
5. Dr. Yustinus Purwamargapratala, S.T., M.Si, selaku Dosen Pembimbing BRIN yang telah banyak membantu dalam penyusunan laporan dan kegiatan tugas akhir di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN).
6. Dr. Eng., Hendra, ST., MT., selaku dosen pembimbing akademik yang membantu penulis dari awal perkuliahan.
7. Ibu Miftahul Jannah, M.T., selaku Koordinator seminar Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
8. Seluruh Staf dan jajaran dosen Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Ageng Tirtayasa.

9. Teman-teman dari Jurusan Teknik Mesin Angkatan 2020 Universitas Sultan Ageng Tirtayasa yang telah membantu dan mendukung dalam perkuliahan selama ini.

Penulis menyadari banyak sekali kekurangan dalam penyusunan dan penulisan pada laporan tugas akhir ini, baik dalam penulisan kata, tata bahasa, kalimat, maupun isi. Oleh karena itu penulis menerima segala kritik dan saran yang dapat membangun agar laporan tugas akhir ini dapat memberikan banyak manfaat serta menambah wawasan seluruh pembaca.

Cilegon, Januari 2024



Penulis

ABSTRAK

Pada saat ini, penggunaan energi baru terbarukan dan ramah lingkungan semakin meningkat. Sudah banyak penelitian dan inovasi teknologi yang dilakukan untuk menghasilkan peralatan konversi energi menggunakan energi baru terbarukan. Dalam menyimpan energi tersebut digunakan baterai karena energi yang dikonversikan merupakan energi listrik. Oleh karena itu, penting juga untuk dipahami mengenai proses perakitan dan karakterisasi baterai agar proses manufaktur baterai menjadi lebih efektif dan efisien. Pada saat ini, penelitian terhadap desain baterai terhadap pengaruh performa baterai sudah banyak dilakukan. Penelitian sebelumnya meliputi pengaruh panjang, lebar, dan tebal lapisan dari lembaran anoda dan katoda. Pada penelitian saat ini berfokus kepada panjang lembaran anoda dan katoda. Penelitian diawali dengan melakukan sintesis material katoda $\text{LiNi}_{0,5}\text{Mn}_{0,4}\text{Co}_{0,1}\text{O}_2$ (NMC541). Setelah mendapatkan material aktif katoda NMC 541 dilakukan proses perakitan baterai. Proses perakitan diawali dengan proses *mixing*. Setelah itu, melalui proses *coating* hingga akhirnya baterai dirakit didalam *glove box*. Langkah berikutnya adalah melakukan pengujian elektrokimia baterai meliputi uji *charge-discharge*, *cyclic voltammetry* (CV), *impedance capacitance resistance* (LCR) meter, dan *electrochemical impedance spectroscopy* (EIS). Rasio elektroda optimal terjadi pada rasio 37,5:37,5. Sementara itu, rasio 35:40 dan 40:35 menghasilkan performa elektrokimia lebih rendah dibandingkan rasio 37,5:37,5. Rasio 35:40 menghasilkan kapasitas $42,164 \text{ mAh.g}^{-1}$, hambatan transfer elektron $0,07\Omega$, tegangan anodik 4,1971 V, tegangan katodik 3,4447 V, arus anodik 0,091364 A, dan arus katodik 0,074521 A. Rasio 40:35 menghasilkan kapasitas $152,781 \text{ mAh.g}^{-1}$, tegangan anodik 4,1989 V, tegangan katodik 3,7374 V, arus anodik 0,03969 A, dan arus katodik 0,005369 A.

Kata Kunci: Baterai Silinder, NMC 541, Katoda, Anoda, Rasio Panjang Elektroda

ABSTRACT

Currently, the use of new, renewable and environmentally friendly energy is increasing. There has been a lot of research and technological innovation carried out to produce energy conversion equipment using new, renewable energy. Batteries are used to store this energy because the energy converted is electrical energy. Therefore, it is also important to understand the battery assembly and characterization process so that the battery manufacturing process becomes more effective and efficient. Currently, much research has been carried out on battery design on the influence of battery performance. Previous research included the influence of length, width and layer thickness of the anode and cathode sheets. The current research focuses on the length of the anode and cathode sheets. The research began by synthesizing the cathode material $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.4}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$ (NMC541). After obtaining the NMC 541 active cathode material, the battery assembly process is carried out. The assembly process begins with a mixing process. After that, it goes through a coating process until finally the battery is assembled in the glove box. The next step is to carry out electrochemical testing of the battery including charge-discharge tests, cyclic voltammetry (CV), impedance capacitance resistance (LCR) meter, and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). The optimal electrode ratio occurs at a ratio of 37.5:37.5. Meanwhile, the ratios 35:40 and 40:35 produce lower electrochemical performance than the ratio 37.5:37.5. A ratio of 35:40 produces a capacity of $42.164 \text{ mAh.g}^{-1}$, electron transfer resistance of 0.07Ω , anodic voltage of 4.1971 V, cathodic voltage of 3.4447 V, anodic current of 0.091364 A, and cathodic current of 0.074521 A. Ratio 40:35 produces a capacity of $152.781 \text{ mAh.g}^{-1}$, anodic voltage 4.1989 V, cathodic voltage 3.7374 V, anodic current 0.03969 A, and cathodic current 0.005369 A.

Keywords: Cylindrical Battery, NMC 541, Cathode, Anode, Electrode Length Ratio

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN JUDUL	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
ABSTRAK.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Batasan Masalah.....	3
1.6 Metodologi Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Sejarah Baterai Lithium-Ion	5
2.2 Jenis-Jenis Baterai	7
2.3 Material Katoda	9
2.4 Proses Manufaktur Baterai	10
2.4.1 Slurry mixing	10
2.4.2 Coating, Drying, dan Solvent Recovery	12
2.4.3 Calendaring	14
2.4.4 Slitting.....	15
2.4.5 Cell Assembly	16
2.4.6 Formation	18
2.5 Bentuk Baterai Lithium-Ion	19

BAB III METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	21
3.2 Alat dan Bahan yang digunakan.....	24
3.3 Lokasi dan Waktu Penelitian	33
3.4 Prosedur Penelitian.....	33
3.4.1 Proses Pembuatan Lembaran Katoda.....	33
3.4.2 Proses Pembuatan Lembaran Anoda	34
3.4.3 Proses Perakitan Baterai Silinder	34
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN.....	36
4.1 Komposisi Bahan Anoda dan Katoda.....	36
4.2 Analisis Konduktansi dan Konduktivitas Material.....	36
4.3 Analisis Kapasitas Baterai Menggunakan <i>Charge-Discharge Battery System</i>	39
4.4 Analisis Nilai Hambatan <i>Charge Transfer</i> Menggunakan <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)</i>	41
4.5 Analisis Elektrokimia Baterai Menggunakan <i>Cyclic Voltammetry</i>	42
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	47
5.1 Kesimpulan.....	47
5.2 Saran.....	48
DAFTAR PUSTAKA.....	49
LAMPIRAN.....	52

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Baterai Whittingham.....	6
Gambar 2.2 Baterai Goodenough Pengembangan Penelitian Sebelumnya	6
Gambar 2.3 Proses pembentukan slurry melalui tahapan mixing	10
Gambar 2.4 Planetary Vacuum Mixer	11
Gambar 2.5 Bahan-bahan untuk proses mixing. a. N-Methyl Pyrrolidone (NMP), b. Polyvinylidene Fluoride (PVDF), dan c. Carbon Conductive (Super P)	11
Gambar 2.6 Tahapan coating untuk membuat lembaran elektroda	12
Gambar 2.7 Coating and drying machine	13
Gambar 2.8 Proses Calendaring Pada Manufaktur Baterai Lithium-Ion.....	14
Gambar 2.9 Proses Slitting Pada Manufaktur Baterai Lithium-Ion	15
Gambar 2.10 Penggunaan Glove Box Untuk Perakitan Baterai.....	16
Gambar 2.11 Wound Cell atau Baterai Silinder.....	17
Gambar 2.12 Stacked Cell atau Baterai Pouch.....	17
Gambar 2.13 Tahapan Pada Proses Formation	18
Gambar 2.14 Bentuk-bentuk baterai lithium-ion.....	19
Gambar 2.15 Proses Manufaktur Baterai Lithium-Ion Berbentuk Silinder dan Prismatik	20
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	23
Gambar 3.2 Schematic Diagram Of The Experimental Setup.....	23
Gambar 3.3 Vacuum Mixer.....	25
Gambar 3.4 Mesin coating dan drying	25
Gambar 3.5 Mesin calendaring.....	25
Gambar 3.6 Mesin Slitting.....	26
Gambar 3.7 Ultrasonic Welder	26
Gambar 3.8 Winding Machine.....	27
Gambar 3.9 Spot Welder.....	27
Gambar 3.10 Grooving Machine	27
Gambar 3.11 Glove Box	28
Gambar 3.12 Alat Uji Charge-Discharge.....	28

Gambar 3.13 Alat uji cyclic votammetry.....	29
Gambar 3.14 LCR meter	29
Gambar 3.15 Electrochemical Impedance Spectroscopy	30
Gambar 3.16 Polyvinylidene Fluoride.....	30
Gambar 3.17 Karbon Konduktif (carbon black).....	31
Gambar 3.18 Material NMC 541	31
Gambar 3.19 N-Methyl Pyrrolidone (NMP)	32
Gambar 3.20 Larutan elektrolit (LiPF ₆)	32
Gambar 4.1 Nilai Konduktansi Pada Lembaran Katoda. (a) Pengukuran pertama dan (b) Pengukuran kedua.....	37
Gambar 4.2 Nilai Konduktansi Pada Lembaran Anoda. (a) Pengukuran pertama dan (b) Pengukuran kedua.....	37
Gambar 4.3 Pengujian Charge-Discharge dengan sebanyak 3 cycles. (a)NMC541 35-40, (b) NMC541 37,5-37,5, dan NMC541 40-35.	39
Gambar 4.4 Hasil Pengujian Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) Dengan Variasi Rasio Elektroda Baterai. (a) NMC541 35-40, (b) NMC541 37,5-37,5, dan (c) NMC541 40-35.	41
Gambar 4.5 Grafik pada analisis Cyclic Voltammetry	43
Gambar 4.6 Grafik Hasil Pengukuran Cyclic Voltammetry Terhadap Ketiga Sampel. a) NMC541 35-40, b) NM541 37,5-37,5 c) NMC541 40-35.....	44
Gambar 4.7 Nilai Puncak Tegangan Anodik dan Tegangan Katodik dari NMC541 35-40, NMC541 37,5-37,5, dan NMC541 40-35.....	45
Gambar 4.8 Nilai Puncak Arus Anodik dan Pucak Arus katodik dari sampel NMC541 35-40, NMC541 37,5-37,5, dan NMC541 40-35.....	46
Gambar A.1 Proses membuat gulungan baterai menggunakan winding machine66	
Gambar A.2 Alat dan Bahan yang disiapkan untuk merakit baterai silinder.....	66
Gambar A.3 Baterai Silinder dengan Katoda LiNi _{0,5} Mn _{0,4} Co _{0,1} O ₂	67

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Penamaan sampel dan keterangan setiap sampel yang diuji	24
Tabel 4.1 Perbandingan bahan-bahan pada lembaran anoda dan katoda	36
Tabel 4.2 Konduktivitas Bahan Untuk Anoda dan Katoda.....	38
Tabel 4.3 Nilai kapasitas maksimum untuk sampel 35:40, 37,5:37,5, dan 40:3540	
Tabel 4.4 Nilai Zi dan Zo pada sampel NMC541 35-40 dan NMC541 37,5-37,542	
Tabel I.1 Data Nilai Konduktansi Lembaran Katoda Pengukuran Pertama.....	53
Tabel I.2 Data Nilai Konduktansi Lembaran Katoda Pengukuran Kedua	54
Tabel II.1 Data Nilai Konduktansi Lembaran Anoda Pengukuran Pertama	56
Tabel II.2 Data Nilai Konduktansi Lembaran Anoda Pengukuran Kedua	57
Tabel III.1 Data Pengujian Charge-Discharge Pada Sampel NMC541 7-8.....	59
Tabel III.2 Data Pengujian Charge-Discharge Pada Sampel NMC541 1-1	59
Tabel III.3 Data Pengujian Charge-Discharge Pada Sampel NMC541 8-7.....	60
Tabel IV.1 Data Pengujian Electrochemical Impedance Spectroscopy Pada Sampel NMC541 7-8	61
Tabel IV.2 Data Pengujian Electrochemical Impedance Spectroscopy Pada Sampel NMC541 1-1	62
Tabel IV.3 Data Pengujian Electrochemical Impedance Spectroscopy Pada Sampel NMC541 8-7	64

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada saat ini, penggunaan energi baru terbarukan dan ramah lingkungan semakin meningkat. Sudah banyak penelitian dan inovasi teknologi yang dilakukan untuk menghasilkan peralatan konversi energi menggunakan energi baru terbarukan. Dalam menyimpan energi tersebut digunakan baterai karena energi yang dikonversikan merupakan energi listrik. Oleh karena itu, penting juga untuk dipahami mengenai proses perakitan dan karakterisasi baterai agar proses manufaktur baterai menjadi lebih efektif dan efisien.

Baterai saat ini juga semakin meningkat penggunaannya dalam industri kendaraan listrik atau *electric vehicle* (EV). Penggunaan baterai juga memiliki peranan penting di bidang energi baru dan terbarukan yang ramah lingkungan. Salah satu bagian pada baterai yang sangat mempengaruhi performa baterai adalah elektroda baterai. Elektroda meliputi katoda dan anoda. Katoda merupakan lembaran elektroda yang dilapisi material aktif yang menjadi kutub bermuatan positif. Anoda adalah lembaran elektroda yang dilapisi material aktif yang menjadi kutub bermuatan negatif.

Material katoda yang digunakan adalah NMC541 dengan rumus kimia $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.4}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$. Material ini memiliki keunggulan yaitu densitas energi tinggi dan stabilitas termal yang baik dibandingkan dengan jenis material NMC lainnya. Selain itu, material anoda yang digunakan adalah grafit. Grafit memiliki keunggulan biaya yang relatif rendah, kepadatan energi yang tinggi, dan siklus hidup yang sangat panjang.

Pada saat ini, penelitian terhadap desain baterai terhadap pengaruh performa baterai sudah banyak dilakukan. Penelitian sebelumnya meliputi pengaruh panjang, lebar, dan tebal lapisan dari lembaran anoda dan katoda. Pada penelitian saat ini berfokus kepada panjang lembaran anoda dan katoda. Hal ini disebabkan untuk variasi lebar lembaran anoda dan katoda dibatasi dengan tinggi *case* baterai silinder. Sementara itu, untuk tebal lapisan pada lembaran

anoda dan katoda juga dapat mempengaruhi jumlah gulungan yang digunakan dan panjang lembaran anoda dan katoda yang akan dibentuk. Semakin tebal lapisan material aktif pada lembaran anoda dan katoda maka semakin besar diameter untuk membuat gulungan baterai silinder. Oleh karena itu, agar penelitian dapat berfokus pada desain panjang lembaran anoda dan katoda maka penelitian terhadap tebal lapisan tidak dilakukan. Penelitian terhadap tebal lapisan pada lembaran anoda dan katoda baterai silinder dapat dilakukan pada penelitian berikutnya.

Panjang anoda dan katoda yang digunakan jumlah panjang keduanya dibatasi sampai dengan 75 cm karena apabila jumlah panjang keduanya lebih dari 75 cm maka gulungan lembaran anoda dan katoda tidak dapat masuk kedalam *case* baterai silinder (J. Sturm, 2020). Pada penelitian ini menggunakan tiga variasi. Variasi pertama adalah 37,5:37,5 dimana panjang anoda 37,5 cm dan panjang katoda 37,5 cm. Variasi kedua adalah 35:40 dimana panjang anoda adalah 35 cm dan panjang katoda 40 cm. Karena jumlah panjang anoda dan katoda dibatasi 75 cm dan jarak panjang anoda dan katoda terhadap variasi 37,5:37,5 dibuat sama yaitu 2,5 cm maka digunakan variasi 35:40 (anoda lebih pendek) panjang anoda selisih 2,5 cm dari rasio 37,5:37,5 dan panjang katoda selisih 2,5 cm dari rasio 37,5:37,5. Variasi ketiga adalah 40:35 dimana panjang anoda adalah 40 cm dan panjang katoda adalah 35 cm. Karena jumlah panjang anoda dan katoda dibatasi 75 cm dan jarak panjang anoda dan katoda terhadap variasi 37,5:37,5 dibuat sama yaitu 2,5 cm maka digunakan variasi 40:35 (anoda lebih panjang) panjang anoda selisih 2,5 cm dari rasio 37,5:37,5 dan panjang katoda selisih 2,5 cm dari rasio 37,5:37,5.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, didapatkan beberapa rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana rasio elektroda dapat mempengaruhi performa elektrokimia baterai?
2. Rasio berapakah yang menjadi rasio elektroda optimal untuk baterai lithium-ion berbentuk silinder?

3. Berapakah kapasitas, tegangan anodik-katodik, konduktivitas, dan hambatan transfer elektron yang dihasilkan pada rasio elektroda optimal?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas, didapatkan tujuan dari penelitian yang dilakukan antara lain sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh rasio elektroda terhadap performa elektrokimia baterai lithium-ion.
2. Menganalisis rasio elektroda optimal untuk baterai lithium-ion berbentuk silinder dengan katoda NMC541.
3. Menganalisis nilai performa elektrokimia pada rasio elektroda optimal berupa kapasitas, tegangan anodik-katodik, konduktivitas, dan hambatan transfer elektron.

1.4 Manfaat Penelitian

Berikut adalah beberapa manfaat yang diperoleh dari kegiatan yang penelitian di bidang baterai lithium-ion:

1. Sebagai referensi untuk perancangan baterai lithium-ion berbasis katoda NMC 541.
2. Sebagai penerapan ilmu Teknik Mesin dalam proses manufaktur baterai lithium-ion.
3. Dapat digunakan sebagai referensi dalam pengembangan penelitian berikutnya di bidang baterai lithium-ion.

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah ditetapkan dalam penelitian agar penelitian ini berjalan sesuai dengan tujuannya. Berikut ini adalah batasan masalah:

1. Kebutuhan akan baterai lithium-ion yang memiliki keamanan tinggi dan performa terbaik melalui pengujian baterai NMC 541 berbentuk silinder.
2. Dalam penelitian, menggunakan material Katoda NMC 541 yang sudah dilakukan penelitian sebelumnya oleh peneliti dari Badan Riset dan Inovasi Nasional.

3. Rasio elektroda yang divariasikan dilakukan untuk melihat pengaruh desain rasio elektroda terhadap performa baterai lithium-ion.

1.6 Metodologi Penelitian

Penelitian dilakukan dengan melakukan pengujian dan analisis data berdasarkan sampel baterai yang sudah dirakit. Berikut ini merupakan data yang digunakan dalam penelitian ini:

1. Data pengujian *charge-discharge* untuk mengetahui kapasitas baterai lithium-ion.
2. Data pengujian *cyclic voltammetry* untuk mengetahui tegangan anodik dan tegangan katodik.
3. Data konduktivitas bahan untuk mengetahui nilai konduktansi dan konduktivitas dari bahan anoda dan katoda
4. Data pengujian *Electrochemical Impedance Spectroscopy* untuk mengetahui hambatan transfer electron pada baterai yang diuji.

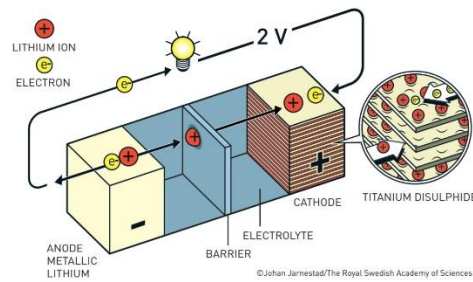
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sejarah Baterai Lithium-Ion

Baterai lithium-ion merupakan baterai sekunder (*rechargeable battery*) dan baterai ramah lingkungan karena tidak mengandung bahan yang berbahaya seperti baterai-baterai yang berkembang dahulu yaitu Ni-Cd dan Ni-MH. Lithium “lithion/lithina” ditemukan oleh Arfwedson dan Berzelius pada tahun 1817 dengan melakukan analisis petalite ore ($\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$), tetapi unsur tersebut diisolasi melalui elektrolisis lithium oksida oleh Brande dan Davy pada tahun 1821. Hanya memerlukan waktu satu abad hingga Lewis melakukan eksplorasi elektrokimia pada unsur Lithium. Unsur lithium memiliki densitas rendah ($0,534 \text{ g.cm}^{-3}$), kapasitas spesifik tinggi (3860 mAh.g^{-1}), dan potensial redoks rendah ($-3,04 \text{ V vs. SHE}$), melalui data ini unsur lithium dapat berfungsi dengan baik sebagai elektroda baterai. Sejak akhir tahun 1960-an, baterai primer lithium-ion 3V non-aqueous telah tersedia dipasaran dengan katoda termasuk lithium-sulfur dioksida Li//SO_2 pada tahun 1969 (Mogalahalli V. Reddy, 2020).

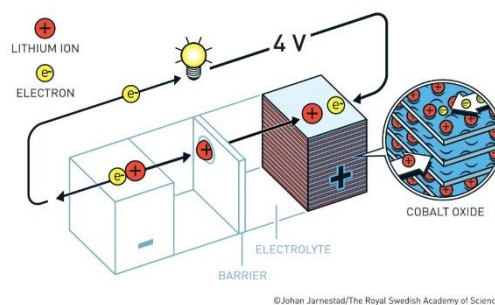
Pekerjaan mendasar pada baterai Lithium-ion dimulai pada tahun 1970-an dan perkembangan teknologi baterai yang sangat pesat telah dicapai sejak tahun 1980-an. Baterai Lithium-ion komersial pertama kali dikeluarkan pada tahun 1991 sehingga memerlukan waktu yang cukup singkat antara penelitian dilaboratorium hingga dapat diproduksi industri. Michel Armand memiliki peranan penting dalam penelitian dan pengembangan katoda, anoda, dan elektrolit baterai Lithium-ion (Mogalahalli V. Reddy, 2020).



Gambar 2.1 Baterai Whittingham

(Sumber: Liu, 2023)

Selama krisis minyak pada tahun 1970-an, Stanley Whittingham, seorang kimiawan Inggris, memulai eksplorasi ide mengenai baterai baru. Baterai dimana dapat diisi ulang dengan sendirinya dalam waktu singkat dan mungkin suatu saat akan menghasilkan energi bebas fosil. Penelitian yang dilakukan pertama kali menggunakan titanium disulfida dan logam lithium sebagai elektroda. Akan tetapi, kombinasi tersebut menimbulkan beberapa tantangan, termasuk masalah keamanan yang serius. Setelahnya baterai mengalami korsleting dan terbakar sehingga penelitian dihentikan (Liu, 2023).



Gambar 2.2 Baterai Goodenough Pengembangan Penelitian Sebelumnya

(Sumber: Liu, 2023)

Pada tahun 1980-an, John B. Goodenough, *engineering professor* di *University of Texas* di Austin, memiliki ide untuk mengatasi masalah tersebut. Eksperimennya dilakukan dengan menggunakan Lithium cobalt oxide sebagai katoda sebagai ganti titanium disulfida (Liu, 2023).

5 tahun kemudian, Akira Yoshino dari Universitas Meijo di Nagoya, Jepang, kembali melakukan penelitian. Sebagai ganti penggunaan logam lithium reaktif untuk anoda, digunakan bahan berkarbon, kokas minyak bumi, yang menghasilkan penemuan revolusioner. Baterai ini tidak hanya jauh lebih aman, tetapi juga lebih stabil sehingga menghasilkan prototipe pertama dari baterai Lithium-ion (Liu, 2023).

2.2 Jenis-Jenis Baterai

Berdasarkan bentuknya baterai dibagi menjadi 3 jenis yaitu baterai berbentuk silinder, baterai berbentuk *pouch*, dan baterai berbentuk prisma. Selain itu, berdasarkan penggunaannya baterai dibagi menjadi dua jenis yaitu baterai primer dan baterai sekunder. Baterai primer adalah baterai sekali pakai atau tidak dapat diisi ulang. Baterai sekunder merupakan baterai yang dapat digunakan kembali atau dapat diisi ulang. Baterai Sekunder sendiri dibagi menjadi beberapa jenis antara lain (Muhammad Thowil Afif, 2015):

1. Baterai Lithium-Ion (Li-Ion atau LIB)

Di dalam baterai ini, ion litium bergerak dari elektroda negatif ke elektroda positif saat dilepaskan, dan kembali saat diisi ulang. Baterai Li-ion memakai senyawa litium interkalasi sebagai bahan elektrodanya, berbeda dengan litium metalik yang dipakai di baterai litium non-isi ulang. Baterai ion litium umumnya dijumpai pada barang-barang elektronik konsumen. Baterai ini merupakan jenis baterai isi ulang yang paling populer untuk peralatan elektronik portabel, karena memiliki salah satu kepadatan energi terbaik, tanpa efek memori, dan mengalami kehilangan isi yang lambat saat tidak digunakan. Selain digunakan pada peralatan elektronik konsumen, LIB juga sering digunakan oleh industri militer, kendaraan listrik, dan dirgantara. Sejumlah penelitian berusaha memperbaiki teknologi LIB tradisional, berfokus pada kepadatan energi, daya tahan, biaya, dan keselamatan intrinsik (Muhammad Thowil Afif, 2015).

2. Baterai *Lithium Polymer* (Li-Po)

Hampir sama dengan baterai Li- Ion akan tetapi baterai Li-Po tidak menggunakan cairan sebagai elektrolit melainkan menggunakan elektrolit polimer kering yang berbentuk seperti lapisan plastik film tipis. Lapisan film ini disusun berlapis-lapis diantara anoda dan katoda yang mengakibatkan pertukaran ion. Dengan metode ini baterai LiPo dapat dibuat dalam berbagai bentuk dan ukuran. Diluar dari kelebihan arsitektur baterai LiPo, terdapat juga kekurangan yaitu lemahnya aliran pertukaran ion yang terjadi melalui elektrolit polimer kering. Hal ini menyebabkan penurunan pada charging dan discharging rate. Masalah ini sebenarnya bisa diatasi dengan memanaskan baterai sehingga menyebabkan pertukaran ion menjadi lebih cepat, namun metode ini dianggap tidak dapat untuk diaplikasikan pada keadaan sehari-hari. Seandainya para ilmuwan dapat memecahkan masalah ini maka risiko keamanan pada batera jenis lithium akan sangat berkurang (Muhammad Thowil Afif, 2015).

3. Baterai *Lead Acid* (Accu)

Baterai Lead Acid atau biasa disebut aki merupakan salah satu jenis baterai yang menggunakan asam timbal (lead acid) sebagai bahan kimianya. Secara umum terdapat dua jenis baterai leadacid, yaitu : (a). *Starting Battery*, dan (b). *Deep Cycle Battery* (Muhammad Thowil Afif, 2015).

4. Baterai *Nickel-Metal Hydride* (Ni-MH)

Baterai jenis ini dibuat dengan komponen yang lebih terjangkau dan ramah lingkungan. Baterai Ni-MH menggunakan ion hidrogen untuk menyimpan energi, tidak seperti baterai lithium ion yang menggunakan ion lithium. Baterai Ni-MH terdiri dari campuran nikel dan logam lain seperti titanium. Baterai ini biasanya mengandung pula komponen logam lain seperti mangan, aluminium, kobalt, zirconium, dan vanadium. Logamlogam tersebut pada umumnya berfungsi sebagai penangkap ion hidrogen yang dilepaskan untuk memastikan tidak mencapai fase gas (Muhammad Thowil Afif, 2015).

2.3 Material Katoda

Oksida logam berbasis Li dengan rumus LiMO_2 ($M=\text{Co, Mn, Ni}$) merupakan material katoda yang paling banyak dikomersialisasikan untuk baterai lithium-ion, senyawa induk dari kelompok ini, diperkenalkan oleh Goodenough, dikomersialisasikan oleh Sony dan masih digunakan sebagai bahan katoda paling aktif untuk baterai lithium-ion (Moumita Kotal, 2022).

Bahan katoda yang digunakan dalam baterai lithium adalah LiCoO_2 , LiMn_2O_4 , LiFePO_4 , dan $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$ (Triwibowo, 2016). Pada tahun 2008, material katoda LiCoO_2 banyak digunakan pada baterai lithium-ion komersial (Kang, 2008). Akan tetapi, material ini memiliki banyak kekurangan seperti biaya yang diperlukan mahal, tidak ramah lingkungan, dan sifat thermal yang tidak stabil (Yamada, 2001). Kemudian pada tahun 2013, material yang dapat mengatasi masalah dari LiCoO_2 adalah LiFePO_4 . LiFePO_4 memiliki kelebihan antara lain memiliki kapasitas *discharge* teoritis yang tinggi (170 mAh.g^{-1}), stabil terhadap suhu, tidak memerlukan biaya tinggi, dan ramah lingkungan. Kestabilan thermal yang dimiliki material LiFePO_4 berasal dari atom oksigen yang terdapat pada struktur LiFePO_4 terikat kuat dengan atom Fe dan atom P sehingga dapat dinyatakan bahwa senyawa LiFePO_4 lebih stabil pada temperatur tinggi dibandingkan dengan LiCoO_2 dimana LiFePO_4 stabil hingga temperatur 400°C sedangkan LiCoO_2 mulai terdekomposisi pada temperatur 250°C (Gong, 2016).

Selain itu juga terdapat material $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$, material ini paling banyak digunakan saat ini. Material ini dikenal juga sebagai NMC. Keunggulan material ini didapatkan dari perpaduan sifat nickel (Ni), manganese (Mn), dan cobalt (Co) (Günter & Wassiliadis, 2022). Ni berperan sebagai efektifitas kapasitas (meningkatkan kapasitas baterai), Co berkontribusi untuk memperpanjang *cycling life* baterai, dan Mn menyebabkan stabilitas struktural yang kokoh (Chen, et al., 2021). Terdapat beberapa variasi material NMC antara lain $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ (NMC 111), $\text{LiNi}_{0,4}\text{Co}_{0,2}\text{Mn}_{0,4}\text{O}_2$ (NMC 424), $\text{LiNi}_{0,5}\text{Co}_{0,2}\text{Mn}_{0,3}\text{O}_2$ (NMC 523), $\text{LiNi}_{0,5}\text{Co}_{0,3}\text{Mn}_{0,2}\text{O}_2$ (NMC 532), $\text{LiNi}_{0,6}\text{Co}_{0,2}\text{Mn}_{0,2}\text{O}_2$ (NMC 622), dan $\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,1}\text{Mn}_{0,1}\text{O}_2$ (NMC 811) (Xuan, Otsuki, & Chagnes, 2019). Selain itu, dalam lembaran katoda, digunakan juga

lembaran aluminium untuk dilapisi material aktif katoda. Aluminium (Al) telah banyak digunakan sebagai pengumpul arus baterai lithium-ion dalam beberapa tahun terakhir. Aluminium memberikan lebih dari 90% konduktivitas listrik dan sekitar 90% kekuatan mekanik katoda dalam sel baterai lithium-ion (Theivaprakasam, et al., 2018).

2.4 Proses Manufaktur Baterai

Proses manufaktur baterai utamanya melewati 6 tahapan diantaranya: *mixing*, *coating-drying-solvent recovery*, *calendering*, *slitting*, *cell assembly* dan *formation* (Yangtao Liu, 2021).

2.4.1 Slurry mixing



Gambar 2.3 Proses pembentukan slurry melalui tahapan mixing
(Sumber: www.jongiamixingtechnology.com)

Proses *slurry mixing* berkontribusi sebesar 7,9% biaya manufaktur. Tahapan ini memakan waktu cukup lama untuk mendapatkan *slurry* yang stabil. Industri saat ini menggunakan *planetary mixers* untuk mempersiapkan *slurry* dalam jumlah besar untuk produksi. Proses *mixing* sangat mempengaruhi kualitas elektroda. Oleh karena itu, proses ini perlu dilakukan dengan tepat dan dalam waktu yang sesuai dengan standar operasional (Yangtao Liu, 2021).

Proses *mixing* menjadi proses awal untuk membuat baterai. Proses *mixing* atau pencampuran dilakukan dengan mencampurkan bahan aktif, pelarut, dan pengikat. Proses ini dilakukan untuk membuat *slurry* pada bahan katoda ataupun anoda. Pencampuran dilakukan didalam ruang kedap udara untuk menghindari oksidasi saat melakukan pencampuran. Dalam produksi skala industri, pencampuran dilakukan didalam tong baja dengan volume 600 liter atau lebih (Patrick S Grant14, 2022).



Gambar 2.4 *Planetary Vacuum Mixer*

(Sumber: www.AOTBattery.com)

Gambar diatas merupakan vacuum mixer untuk menghasilkan bahan aktif katoda atau anoda dalam bentuk *slurry* (bubur material aktif). Alat tersebut dibuat kedap udara. Proses pencampuran dapat dilakukan dengan dua metoda yaitu pencampuran kering dahulu atau pencampuran basah dahulu. Pada metode pertama, adalah dengan mencampur bahan kering selama 24 jam untuk memastikan dispersi yang konsisten dari bahan aktif, karbon pengikat, dan konduktif. Kemudian, pencampur cair ditambahkan yaitu PVDF dan NMP dan dicampur selama satu jam. Setelah itu, hasil campuran dimasukkan kedalam *mixer* bola dan dilakukan pencampuran selama 48 jam (Patrick S Grant¹⁴, 2022).

a.



b.



c.

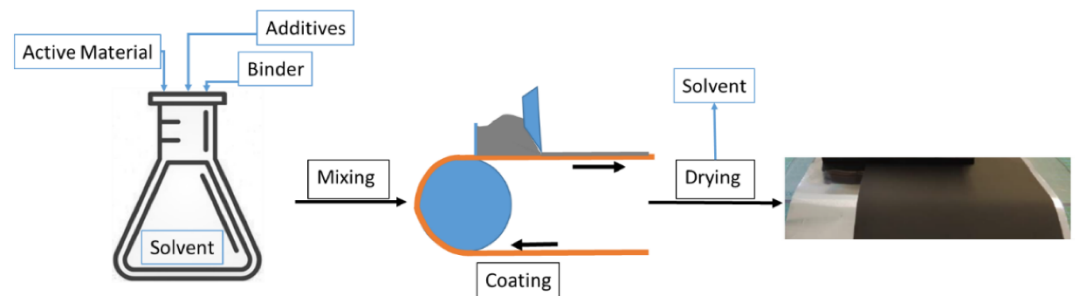


Gambar 2.5 Bahan-bahan untuk proses *mixing*. a. *N-Methyl Pyrrolidone* (NMP), b. *Polyvinylidene Fluoride* (PVDF), dan c. *Carbon Conductive* (Super P)

(Sumber: www.mseshsupplies.com)

Dalam proses pencampuran atau *mixing* hal yang perlu diperhatikan adalah jumlah bahan yang dimasukkan, urutan memasukan bahan, dan waktu pengadukan. Bahan yang digunakan untuk proses *mixing* antara lain: bahan aktif katoda atau anoda, pelarut berupa umumnya digunakan N-Methyl Pyrrolidone (NMP), satu atau lebih karbon konduktif seperti karbon hitam, dan bahan pengikat yang umumnya digunakan adalah *polyvinylidene fluoride* (PVDF). Jumlah bahan katoda dan anoda aktif dalam bubur basah adalah antara 50% hingga 70%, sedangkan bahan pengikatnya adalah antara 3% hingga 15%, karbon konduktif antara 0,5% hingga 3%, dan pelarut dapat antara 35% hingga 45%. Jika kita melihatnya tanpa pelarut cair, maka bahan aktif katoda dan anoda terdiri dari kandungan antara 89% hingga 94%, karbon konduktif antara 1% hingga 7%, dan pengikat sekitar 4% hingga 5% (Patrick S Grant¹⁴, 2022).

2.4.2 Coating, Drying, dan Solvent Recovery



Gambar 2.6 Tahapan *coating* untuk membuat lembaran elektroda

(Sumber: Christina Toigo, 2021)

Proses *coating* dan *drying* (termasuk *solvent recovery*) menggunakan sekitar 20% biaya produksi. Proses *drying* dan *coating* secara konvensional dihubungkan dengan sistem *roll to roll*. Slurry yang sudah tercampur baik pada tahap *mixing*, selanjutnya dilapisi pada permukaan aluminium foil (untuk katoda) dan tembaga foil (untuk anoda) dan diatur dengan ketebalan tertentu. Elektroda terlapisi basah diantarkan menuju *long dryer* untuk menguapkan pelarut (*solvent*). Pelarut NMP (N-Methyl Pyrrolidone) yang beracun dan mahal diperoleh kembali dengan

kondensor dan kemudian dilanjutkan dengan proses distilasi (Yangtao Liu, 2021).

Setelah melalui proses *mixing*, proses selanjutnya adalah *coating* atau pelapisan. Proses pelapisan dilakukan dengan cara melapisi foil logam dengan *slurry* cair. Proses pelapisan dilakukan dengan ketebalan yang sangat spesifik dan sangat terkontrol. Lembaran aluminium digunakan untuk katoda dan lembaran tembaga digunakan untuk anoda. Setelah dilakukan proses *mixing*, *slurry* langsung digunakan untuk proses *coating* agar *slurry* tidak menggumpal. Apabila *slurry* disimpan didalam *holding tank*, maka *slurry* perlu terus diaduk dan dijaga temperaturnya agar *slurry* tidak menggumpal. Proses pengeringan dilakukan melalui dua tahapan. Pertama adalah menguapkan pelarut dari campuran *slurry*. Saat pelarut NMP diuapkan, pelarut tersebut harus dikumpulkan dan dipindahkan ke tangki penyimpanan karena dianggap sebagai bahan berbahaya. NMP bekas kemudian dapat dijual kembali ke pemasok aslinya, dengan harga yang sangat murah, di mana NMP dapat diproses ulang untuk digunakan lagi untuk aplikasi lain (Yangtao Liu, 2021).



Gambar 2.7 *Coating and drying machine*
(Sumber: www.indonesian.batteriesmachine.com)

Terakhir, pada akhir proses pelapisan dan pengeringan terdapat sistem pendek yang biasanya disebut gulungan *take-up*. Ini hanyalah area untuk mempertahankan beberapa elektroda tambahan untuk mengganti gulungan setelah penuh. Hal ini dilakukan untuk mengatasi bahan pada bagian pelapis dan pengeringan yang terbuang saat gulungan sedang

diganti. Pada tahap ini juga terdapat sistem kontrol kualitas yang memeriksa elektroda yang dilapisi untuk memastikan tidak ada cacat pada lapisan dan jalurnya lurus. Setelah lewat sini, elektroda digulung dan siap dijalankan lagi untuk melapisi sisi kedua, atau jika kedua sisi sekarang dilapisi untuk melanjutkan ke langkah berikutnya yaitu *slitting* dan *calendaring* (Patrick S Grant¹⁴, 2022).

2.4.3 Calendaring

Calendaring merupakan proses sederhana untuk menentukan sifat fisik elektroda dan meningkatkan kekuatan ikatan antara elektroda dan *current collector*. *Calendaring defects* mudah terjadi akibat penerapan parameter yang salah.



Gambar 2.8 Proses Calendaring Pada Manufaktur Baterai Lithium-Ion
(Sumber: Till Günther, 2019)

Pressing/calendaring merupakan proses memberikan tekanan pada elektroda dengan cara dilakukan pengerolan. Proses ini dilakukan untuk mencapai dua hal yaitu: mengurangi porositas dan mengatur ketebalan elektroda jadi. Porositas merupakan celah atau area kontak pada bahan aktif. Semakin besar porositas maka semakin kecil kontak yang ada didalam bahan aktif sehingga menghasilkan jalur konduktivitas listrik yang lebih panjang. Jalur yang lebih panjang ini membuat konduktivitas material berkurang. Dengan mengompresi material, celah tersebut dapat berkurang, mengurangi porositas, dan meningkatkan konduktivitas material (Patrick S Grant¹⁴, 2022).

2.4.4 Slitting

Proses berikutnya adalah *slitting*. *Slitting* merupakan proses pemotongan lembaran elektroda menjadi bagian lebih kecil sehingga lembaran elektroda dapat dilakukan proses perakitan. Proses selanjutnya adalah *slitting* atau pemotongan elektroda menjadi gulungan yang lebih kecil. Pada beberapa perusahaan proses *slitting* dilakukan setelah proses calendaring (pengerollan). Hal tersebut tidak berdampak besar pada produk akhir yang dihasilkan. Berikut adalah contoh proses *slitting* (Yangtao Liu, 2021):



Gambar 2.9 Proses *Slitting* Pada Manufaktur Baterai Lithium-Ion

(Sumber: www.mtixtl.com)

Dapat dilihat pada gambar diatas material aktif dilakukan proses *slitting* sehingga menjadi gulungan yang lebih kecil. Teknologi *slitting* saat ini beroperasi pada kecepatan 15 atau 50 mpm. Kecepatan ini tergantung dari ukuran gulungan dan peralatan yang digunakan. Akan tetapi, di masa mendatang kecepatan bisa saja meningkat hingga lebih dari 100 mpm. Proses *slitting* ini juga dipisahkan dari proses pelapisan atau pengeringan agar kecepatan proses *slitting* dapat jauh lebih tinggi. Faktor yang menjadi pertimbangan pada proses *slitting* adalah kualitas potongan dan keselarasan jalur yang dilapisi. Keselarasan jalur menjadi key product characteristic (KPC) pada tahap ini (Yangtao Liu, 2021).

Selain menggunakan pisau mekanis, proses *slitting* dapat dilakukan dengan menggunakan laser. Terdapat beberapa manfaat dalam menggunakan laser antara lain: mengurangi cacat dan menambahkan

kecepatan. Pada penggunaan pisau mekanis umumnya terjadi cacat dimana serpihan hasil pemotongan keluar dari tepi ke elektroda sehingga dapat mengakibatkan korsleting internal. Dengan menggunakan laser potongan yang dihasilkan jauh lebih bersih. Selain itu, kecepatan potongan menggunakan laser dapat meningkat hingga 300 mpm (Yangtao Liu, 2021).

2.4.5 Cell Assembly

Proses selanjutnya adalah proses perakitan baterai. Proses ini dilakukan pada ruangan yang kering. Ruangan yang kering ini mengatur kualitas udara sehingga jumlah oksigen dapat disesuaikan dan tidak terjadi oksidasi saat melakukan perakitan. Ruangan yang mengatur udara ini disebut juga sebagai *glove box*. Ruangan steril atau *glove box* ini juga diklasifikasikan menurut standar ISO. Ruangan steril untuk merakit baterai ini diklasifikasikan menjadi level kelas 10.000 (ISO 7) dan level kelas 100 (ISO 5). Semakin rendah levelnya, menandakan bahwa semakin kecil jumlah partikel di udara dan semakin baik juga untuk melakukan perakitan baterai (Yangtao Liu, 2021).

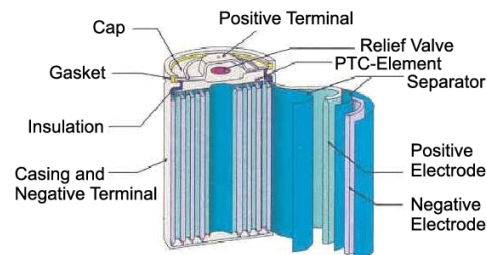


Gambar 2.10 Penggunaan *Glove Box* Untuk Perakitan Baterai

(Sumber: www.vti-glovebox.com)

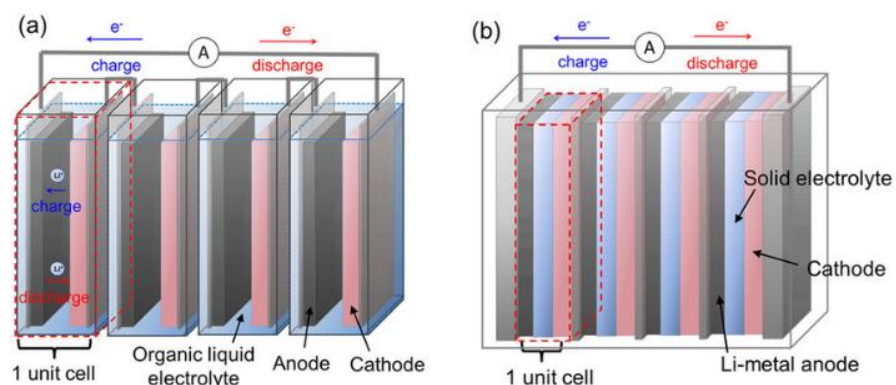
Produsen juga dapat menggunakan beberapa tingkat Kelas (tingkat ISO) di pabrik, misalnya, pelapisan dapat dilakukan di ruang bersih Kelas 10.000 (ISO 7) tetapi perakitan sel dilakukan di ruang bersih Kelas 1000 (ISO 6) atau lebih rendah. Dalam proses perakitan dibedakan menjadi baterai yang disusun dengan cara digulung dan baterai yang disusun

dengan cara ditumpuk. Pada elektroda yang ditumpuk susunan dari tumpukannya adalah separator, anoda, separator, katoda, separator, dan begitu secara berulang (Yangtao Liu, 2021).



Gambar 2.11 *Wound Cell* atau Baterai Silinder

(Sumber: Imke Krüger, 2009)



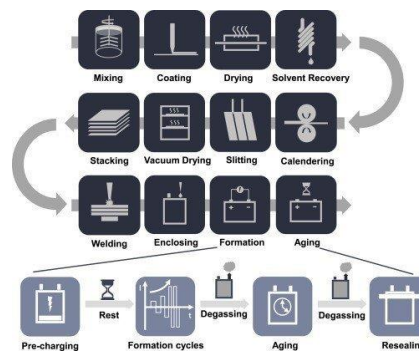
Gambar 2.12 *Stacked Cell* atau Baterai Pouch

(Sumber: Yoshiyuki Gambe, 2015)

Umumnya ada satu elektroda katoda negatif lebih banyak dalam rakitan elektroda bertumpuk daripada elektroda katoda. Pada proses pembuatan baterai dengan cara digulung langkah pertama yang dilakukan adalah dengan menyusun anoda, separator, katoda, dan separator, serta melilitkannya disekitar pin pusat. Pada proses ini digunakan dua separator yang bertujuan agar anoda dan katoda tidak saling bersentuhan. Setelah proses perakitan, baterai dilakukan uji potensial listrik tinggi. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa elektroda terisolasi satu sama lain dan memastikan tidak ada korsleting listrik pada tahap ini (Patrick S Grant14, 2022).

2.4.6 Formation

Proses pembentukan merupakan proses multistep dan dilakukan secara berbeda oleh produsen baterai yang berbeda tergantung pada bahan kimia dan desain baterainya. Proses pembentukan umumnya tidak dilakukan pada ruangan steril karena baterai pada tahap ini sudah tersegel. Proses pembentukan memiliki dua tahapan yaitu *aging* dan pembentukan baterai (Yangtao Liu, 2021).



Gambar 2.13 Tahapan Pada Proses *Formation*

(Sumber: www.etnnews.com)

Proses pembentukan memiliki beberapa tujuan. Tujuan pertama, memungkinkan elektrolit menyerap sepenuhnya ke dalam elektroda dan separator. Hal ini dilakukan pada tahap aging pertama. Tujuan kedua adalah untuk membentuk lapisan *solid electrolyte interphase* (SEI) yang sangat penting pada bahan anoda. Langkah pertama adalah melakukan proses aging dengan membiarkan selama jangka waktu tertentu. Tujuan dari proses ini adalah untuk memberi waktu pada elektrolit agar dapat membasahi elektroda dan separator sepenuhnya (Yangtao Liu, 2021).

Proses *aging* ini dapat dilakukan pada suhu kamar atau pada suhu tinggi. Pada suhu kamar, baterai dibiarkan selama dua minggu. Sementara, pada suhu tinggi, baterai dibiarkan selama dua hari. Pembentukan pertama dilakukan dengan menghubungkan baterai ke peralatan pengisian dan pengujian. Setelah terhubung ke sumber listrik, muatan listrik dialirkan ke baterai terlebih dahulu, baterai dirakit dalam keadaan kosong, diikuti dengan pelepasan. Muatan formasi ini mendorong litium dari katoda berpindah ke anoda dan sebagian

dikonsumsi karena membentuk lapisan pelindung SEI pada bahan anoda. Ketebalan lapisan SEI bergantung pada proses pembentukan ini (Yangtao Liu, 2021).

Saat baterai melalui proses pembentukan dan lapisan SEI terbentuk, gas dihasilkan karena reaksi yang terjadi selama proses ini. Gas-gas ini harus dikeluarkan dari baterai karena dapat menyebabkan masalah keamanan, mengurangi umur baterai, dan masih banyak lagi. Langkah berikutnya, baterai memasuki proses aging kedua. Proses ini jauh lebih singkat dibandingkan yang pertama. Pada tahap terakhir ini, baterai-baterai “sudah terbentuk” tetapi, baterai-baterai tersebut kembali dimasukkan ke sumber daya formasi dan sekali lagi dimasukkan kedalam siklus pengisian dan pengosongan daya yang sangat spesifik. Tujuan dari siklus ini adalah untuk mengidentifikasi kapasitas, tegangan, dan impedansi internal baterai (Patrick S Grant¹⁴, 2022).

2.5 Bentuk Baterai Lithium-Ion

Baterai lithium-ion dapat dibagi menjadi baterai primer dan baterai sekunder. Baterai primer merupakan baterai yang digunakan sekali pakai atau biasa disebut *non-rechargeable battery*. Sementara baterai sekunder merupakan baterai yang dapat digunakan kembali atau biasa disebut *rechargeable battery*. Bagian-bagian baterai secara umum meliputi positif (katoda) negatif (anoda) elektroda, separator untuk memisahkan lembaran katoda dan anoda, dan larutan elektrolit sebagai penghantar arus listrik. Dalam bentuk baterai dapat dibagi menjadi baterai berbentuk silinder dan prisma. Dimana, baterai prisma dapat dibagi lagi menjadi baterai *pouch* dan baterai *hard case* (Robert Schröder, 2017).



Gambar 2.14 Bentuk-bentuk baterai lithium-ion

(Sumber: Robert Schröder, 2016)

Perbedaan dalam proses pembuatan baterai terletak pada bentuk baterai dan struktur baterai bagian dalam. Proses manufaktur pada baterai dengan berbagai bentuk dapat dilihat pada gambar 2.15.



Gambar 2.15 Proses Manufaktur Baterai Lithium-Ion Berbentuk Silinder dan Prismatik

(Sumber: www.tmaxcn.com)

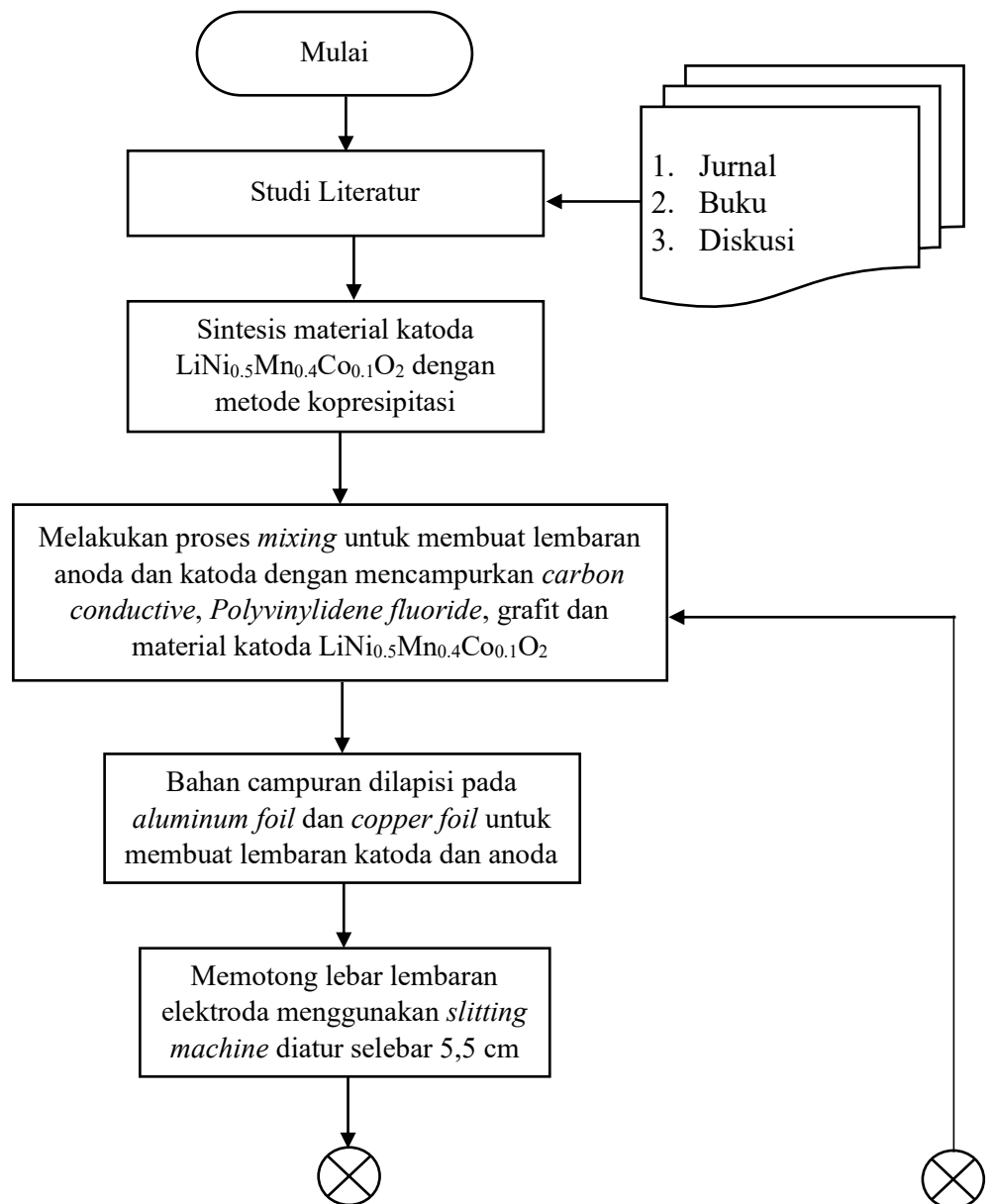
Baterai silinder dan prismatic *hard case* menggunakan lembaran elektroda yang kemudian digulung untuk dirakit. Sementara, baterai prismatic *pouch* dirakit dengan cara di lipat (*fold*) atau ditumpuk (*stacking*). Pada baterai silinder dan prismatic *hard case* memiliki ukuran yang dibatasi oleh ukuran *case* baterai karena *case* baterai berjenis *hard case*. Sementara, baterai *pouch case*-nya dapat dibuat sesuai ukuran yang diinginkan karena *case* baterai *pouch* dapat dibentuk. Setelah memasukan lembaran elektroda kedalam *case* baterai berikutnya adalah mengisi elektrolit kedalam baterai. Pengisian elektrolit dilakukan didalam ruangan terjeda dari oksigen dan uap air untuk menghindari *short circuit* pada baterai (Robert Schröder, 2017).

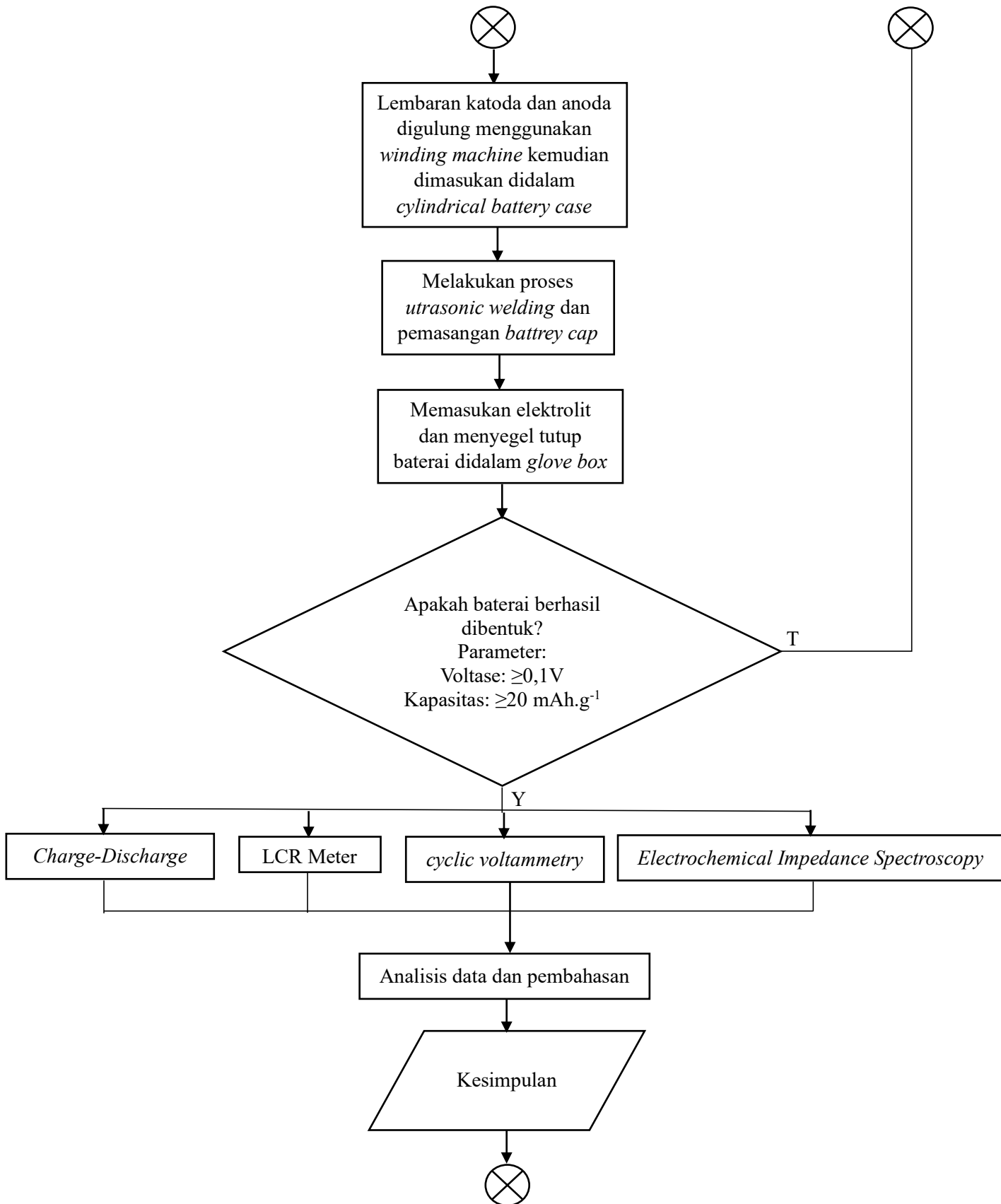
BAB III

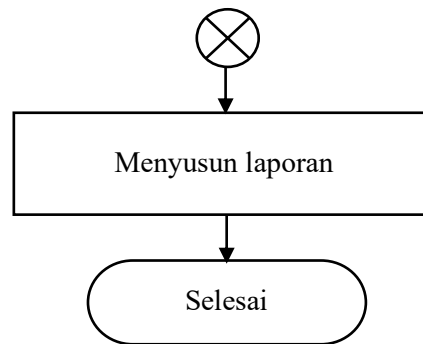
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

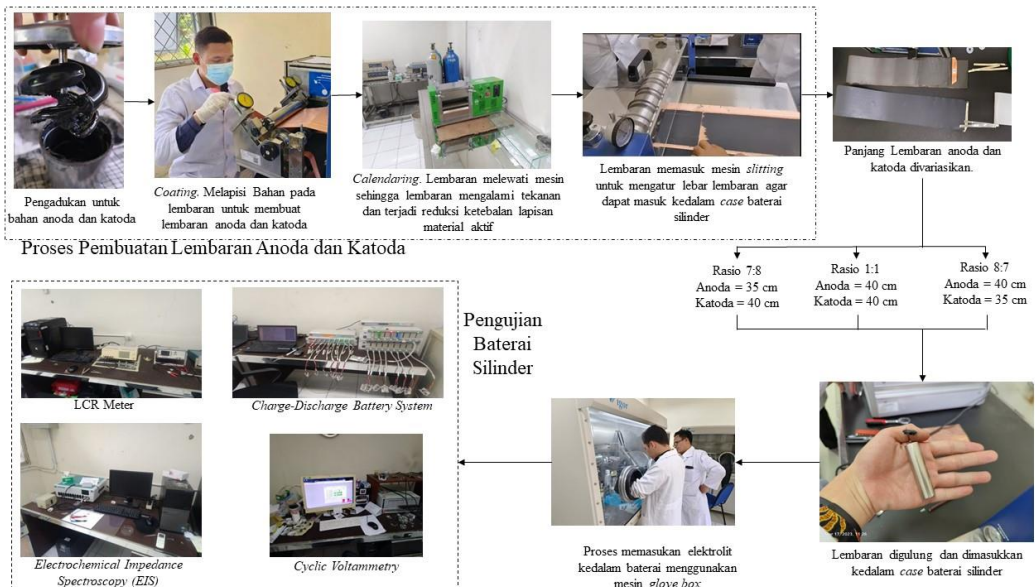
Pada saat melakukan penelitian, perlu mengikuti tahapan penelitian agar penelitian yang dilakukan terarah dan tujuan penelitian tercapai. Berikut adalah diagram alir penelitian:







Gambar 3.1 Diagram alir penelitian



Gambar 3.2 Schematic Diagram Of The Experimental Setup

Penelitian ini diawali dengan melakukan studi literatur. Studi literatur bertujuan untuk mengetahui proses manufaktur baterai, faktor-faktor yang mempengaruhi performa baterai, dan alat yang digunakan untuk pengujian baterai. Studi literatur dilakukan dengan cara membaca jurnal, membaca buku yang mendukung penelitian, dan diskusi bersama pembimbing tugas akhir.

Berikutnya adalah melakukan sintesis material katoda $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.4}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$ dengan metode kopresipitasi. Proses sintesis dilakukan melalui beberapa tahapan antara lain pembuatan material prekursor, sintering, dan kalsinasi.

Hasil sintesis didapat berupa serbuk katoda NMC 541. Material katoda tersebut digunakan untuk proses perakitan baterai.

Setelah mendapatkan material aktif katoda NMC 541 dilakukan proses perakitan baterai. Proses perakitan diawali dengan proses *mixing*. Setelah itu, melalui proses *coating* hingga akhirnya baterai dirakit didalam *glove box*. Langkah berikutnya adalah melakukan pengujian elektrokimia baterai meliputi uji *charge-discharge*, *cyclic voltammetry (CV)*, *impedance capacitance resistance (LCR)* meter, dan *electrochemical impedance spectroscopy (EIS)*.

Data pengujian yang didapatkan dianalisa dan dibahas. Pembahasan dan analisa data digunakan untuk menentukan performa baterai silinder dengan katoda NMC 541. Hasil yang didapatkan menjadi pertimbangan dalam penggunaan material katoda NMC 541 pada baterai silinder.

Jika hasil sudah sesuai dengan standar dan dikumpulkan, maka dilakukan penyusunan laporan sebagai bukti dan dokumen bahwa baterai silinder NMC 541 sudah dilakukan perakitan dan pengujian performa. Pada penelitian ini divariasikan panjang elektroda dengan perbandingan anoda:katoda adalah 35:40, 37,5:37,5, dan 40:35. Berikut adalah penamaan sampel dan keterangan dari setiap sampel yang diuji.

Tabel 3.1 Penamaan sampel dan keterangan setiap sampel yang diuji

Nama Sampel	Panjang Anoda (cm)	Panjang Katoda (cm)	Rasio
NMC541 35-40	35	40	35:40
NMC541 37,5-37,5	37,5	37,5	37,5:37,5
NMC541 40-35	40	35	40:35

3.2 Alat dan Bahan yang digunakan

Dalam melakukan penelitian perlu disiapkan alat dan bahan sesuai dengan tujuan penelitian yang hendak dicapai. Berikut adalah alat dan bahan yang digunakan untuk melakukan penelitian:

3.3.1 Alat yang digunakan

1. *Vacuum mixer*



Gambar 3.3 *Vacuum Mixer*

Alat ini digunakan untuk melakukan proses pengadukan (*mixing*). Beberapa material seperti karbon konduktif, Polivinilidena fluoride, material NMC 541, dan *N-Methyl Pyrrolidone* (NMP) dicampur dan diaduk menggunakan alat tersebut.

2. Mesin *coating* dan *drying*



Gambar 3.4 Mesin *coating* dan *drying*

Digunakan untuk proses pelapisan bahan aktif katoda ke lembaran aluminium. Alat ini sekaligus juga mencakup mesin *drying* sehingga proses pelapisan bahan aktif dapat menghasilkan lembaran katoda kering.

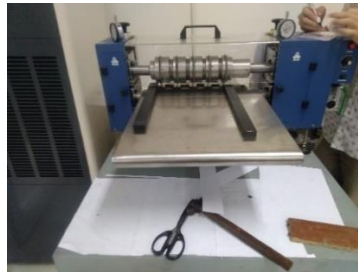
3. Mesin *calendaring*



Gambar 3.5 Mesin *calendaring*

Mesin *calendaring* bertujuan untuk meningkatkan konduktivitas material. Prinsip kerja mesin ini adalah lembaran katoda melawati dua *roll* pada mesin ini untuk dilakukan reduksi ketebalan. Reduksi ketebalan dilakukan pada ukuran yang sudah diatur dan pada temperatur tertentu.

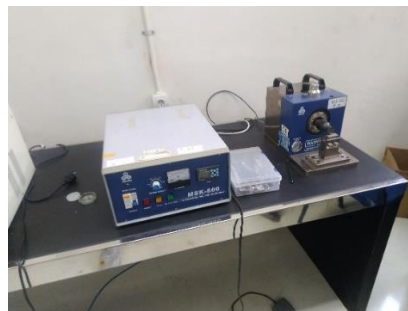
4. Mesin *slitting*



Gambar 3.6 Mesin *Slitting*

Mesin *slitting* digunakan untuk memotong lembaran elektrod dengan lebar tertentu. Proses pemotongan harus diperhatikan dan dibuat selurus mungkin agar hasil pemotongan lurus dan dapat digunakan untuk proses perakitan berikutnya.

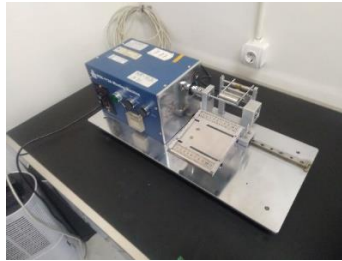
5. *Ultrasonic welder*



Gambar 3.7 *Ultrasonic Welder*

Ultrasonic welder digunakan untuk menyambungkan *aluminium strip* dengan katoda dan *nickel strip* dengan katoda. Dalam proses *welding* harus diperhatikan arus yang digunakan agar tidak terlalu besar.

6. *Winding machine*



Gambar 3.8 *Winding Machine*

Winding machine digunakan untuk menggulung lembaran elektroda agar dapat dibuat baterai silinder. Bahan yang digunakan adalah lembaran katoda, lembaran anoda, dan separator. Lembaran katoda yang sudah digulung selanjutnya dimasukkan ke dalam *case* baterai.

7. *Spot welder*



Gambar 3.9 *Spot Welder*

Alat ini digunakan untuk menghubungkan *nickel strip* bagian bawah gulungan elektroda dengan *case* baterai. Proses ini dilakukan setelah melewati tahap menggulung elektroda menggunakan *winding machine*.

8. *Grooving machine*



Gambar 3.10 *Grooving Machine*

Grooving machine digunakan untuk menjaga lembaran elektro tidak keluar dari *case* baterai. Alat ini digunakan setelah *nickel strip* tersambung dengan bagian bawah *case* baterai.

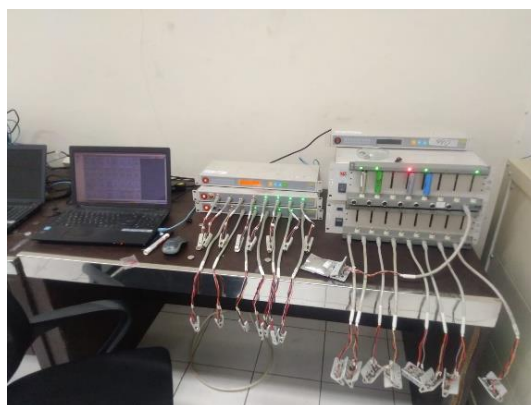
9. *Glove box*



Gambar 3.11 *Glove Box*

Alat ini digunakan untuk memberikan elektrolit pada baterai dan tempat untuk menutup bagian atas *case* baterai (*grimping*). Alat ini merupakan ruangan kedap udara yang dijaga kelembapan dan kadar oksigennya. Tujuan dibuat ruangan kedap udara adalah agar tidak terjadi oksidasi yang dapat membuat baterai menjadi *short circuit* ketika diberi larutan elektrolit.

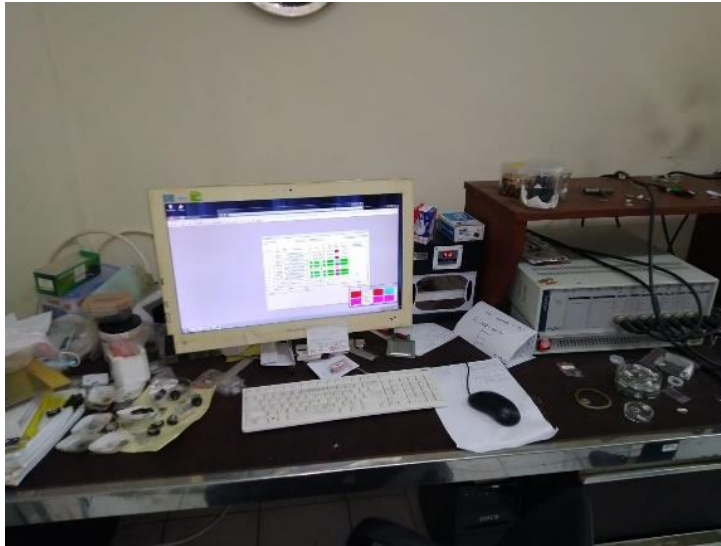
10. Alat uji *charge-discharge*



Gambar 3.12 Alat Uji *Charge-Discharge*

Alat uji *charge-discharge* digunakan untuk mengukur kapasitas maksimum baterai. Pengujian ini juga dapat dilakukan dengan memvariasikan *c-rate*, *cycle*, dan tegangan atas-bawah.

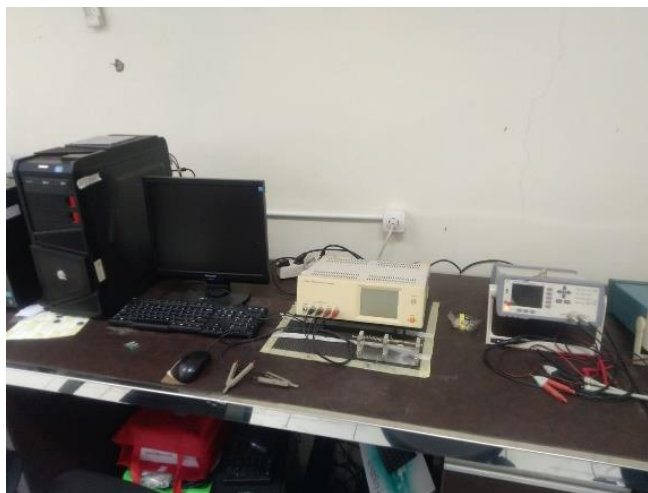
11. Alat uji *cyclic voltammetry*



Gambar 3.13 Alat uji *cyclic votammetry*

Pengujian *cyclic voltammetry* dilakukan untuk mengetahui tegangan maksimum dan tegangan minimum pada baterai. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan jumlah *cycle*.

12. LCR meter



Gambar 3.14 LCR meter

LCR meter digunakan untuk mengukur konduktivitas material. Pengujian ini dilakukan dengan rentang frekuensi 42Hz - 1 MHz.

13. *Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)*



Gambar 3.15 *Electrochemical Impedance Spectroscopy*

EIS digunakan untuk mengukur hambatan pada baterai. Data yang didapatkan berupa nilai R_p , R_s , dan C_{pe} .

3.3.2 Bahan yang digunakan

1. *Polyvinylidene Fluoride*



Gambar 3.16 *Polyvinylidene Fluoride*

PVDF merupakan bahan pengikat. Bahan dicampurkan dengan bahan lainnya pada proses *mixing* untuk menghasilkan material aktif katoda. Bahan ini berfungsi untuk mengikat material NMC 541 dan karbon konduktif.

2. Karbon konduktif



Gambar 3.17 Karbon Konduktif (*carbon black*)

Karbon konduktif (*carbon black*) merupakan bahan yang dicampurkan dengan bahan NMC 541 dan PVDF pada proses *mixing*. Karbon konduktif berfungsi untuk meningkatkan konduktivitas bahan.

3. Material NMC 541



Gambar 3.18 Material NMC 541

Material NMC 541 didapatkan melalui sintesis dengan metode kopresipitasi. Material NMC 541 merupakan bahan utama dalam perakitan baterai pada penelitian ini.

4. *N-Methyl Pyrrolidone* (NMP)



Gambar 3.19 *N-Methyl Pyrrolidone* (NMP)

N-Methyl Pyrrolidone (NMP) merupakan pelarut yang dicampurkan dengan bahan lainnya pada proses *mixing*.

5. Larutan elektrolit (LiPF_6)



Gambar 3.20 Larutan elektrolit (LiPF_6)

Larutan elektrolit berfungsi menghantarkan ion lithium dan elektron dari katoda menuju anoda dan begitu juga sebaliknya. Pemberian elektrolit dilakukan didalam *glove box*.

3.3 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Badan Riset dan Inovasi Nasional Serpong pada bulan agustus sampai oktober 2023. Pengujian dilakukan dengan beberapa alat yang disediakan seperti *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS), *Impedance, Capacitance, and Resistance* (LCR) Meter, *Cyclic Voltammetry* (CV), dan *Charge-Discharge* (CD).

3.4 Prosedur Penelitian

Dalam melakukan penelitian terdapat beberapa prosedur yang perlu diperhatikan agar tujuan penelitian dapat tercapai. Berikut adalah proses penelitian yang dilakukan:

3.4.1 Proses Pembuatan Lembaran Katoda

Bahan katoda yang digunakan adalah NMC541 dengan rumus kimia $\text{LiNi}_{0,5}\text{Mn}_{0,4}\text{Co}_{0,1}\text{O}_2$. Material ini merupakan material sintesis. Material ini dicampurkan dengan bahan lainnya untuk membuat lembaran katoda. Berikut merupakan proses pembuatan lembaran katoda:

1. Menimbang bahan NMC541, bahan pengikat (*Polyvinylidene fluoride*), dan karbon konduktif (*carbon black*). Bahan ditimbang dengan perbandingan massa 90% NMC541, 5% *Polyvinylidene fluoride*, dan 5% *carbon black*. Setelah itu, bahan-bahan dimasukkan kedalam jar untuk dilakukan proses *mixing*
2. Bahan-bahan yang berada didalam jar kemudian ditambahkan dengan pelarut NMP (*N-Methyl Pyrrolidone*). Perbandingan pelarut dengan *solid content* adalah 70% pelarut dan 30% *solid content*.
3. NMP dan *solid content* yang berada didalam jar diaduk menggunakan *vacuum mixer* selama 2 jam.
4. Bahan-bahan yang sudah tercampur tersebut disebut *slurry*. Kemudian *slurry* dituangkan keatas lembaran aluminium untuk dilakukan proses *coating* menggunakan mesin *coating and drying*.
5. Proses *coating* dilakukan pada sisi depan dan sisi belakang lembaran aluminium (*double side*). Proses *coating* dilakukan dengan ketebalan 400 μm untuk kedua sisi atau 200 μm tiap sisi.
6. Proses *coating* (pelapisan) dilakukan bersamaan dengan proses *drying* (pengeringan) karena menggunakan mesin khusus (mesin *coating and drying*).

7. Lembaran katoda yang sudah dikeringkan selanjutnya dilakukan pemotongan pada mesin *slitting*. Pemotongan dilakukan untuk mengatur lebar lembaran katoda. Lebar lembaran katoda yang digunakan adalah 5,5 cm.
8. Lembaran katoda dilakukan proses *calendaring* sehingga ketebalan menjadi 220 μ m.

3.4.2 Proses Pembuatan Lembaran Anoda

Bahan anoda yang digunakan adalah grafit. Material ini merupakan material yang memiliki konduktivitas yang baik dan sangat cocok dipasangkan dengan katoda NMC. Material ini dicampurkan dengan bahan lainnya untuk membuat lembaran anoda. Berikut merupakan proses pembuatan lembaran anoda:

1. Menimbang bahan grafit, bahan pengikat (*Polyvinylidene fluoride*), dan karbon konduktif (*carbon black*). Bahan ditimbang dengan perbandingan massa 70% NMC541, 20% *Polyvinylidene fluoride*, dan 10% *carbon black*. Setelah itu, bahan-bahan dimasukkan kedalam jar untuk dilakukan proses *mixing*
2. Bahan-bahan yang berada didalam jar kemudian ditambahkan dengan pelarut NMP (*N-Methyl Pyrrolidone*). Perbandingan pelarut dengan *solid content* adalah 70% pelarut dan 30% *solid content*.
3. NMP dan *solid content* yang berada didalam jar diaduk menggunakan *vacuum mixer* selama 2 jam.
4. Bahan-bahan yang sudah tercampur tersebut disebut *slurry*. Kemudian *slurry* dituangkan keatas lembaran tembaga untuk dilakukan proses *coating* menggunakan mesin *coating and drying*.
5. Proses *coating* dilakukan pada sisi depan dan sisi belakang lembaran aluminium (*double side*). Proses *coating* dilakukan dengan ketebalan 400 μ m untuk kedua sisi atau 200 μ m tiap sisi.
6. Proses *coating* (pelapisan) dilakukan bersamaan dengan proses *drying* (pengeringan) karena menggunakan mesin khusus (mesin *coating and drying*).
7. Lembaran anoda yang sudah dikeringkan selanjutnya dilakukan pemotongan pada mesin *slitting*. Pemotongan dilakukan untuk mengatur lebar lembaran anoda. Lebar lembaran anoda yang digunakan adalah 5,5 cm.

3.4.3 Proses Perakitan Baterai Silinder

Setelah lembaran anoda dan katoda sudah dibuat, proses berikutnya adalah melakukan perakitan baterai silinder. Berikut adalah prosedur perakitan baterai silinder:

1. Memotong panjang lembaran katoda dan anoda. Panjang lembaran katoda dan anoda dipotong dengan variasi rasio panjang lembaran anoda:katoda adalah 35:40, 37,5:37,5, dan 40:35.
2. Memotong separator dengan panjang dua kali panjang elektroda terpanjang ditambah 5cm. Separator yang digunakan memiliki lebar

- 6cm (harus lebih lebar dibandingkan lebar lembaran anoda atau katoda agar tidak terjadi *short circuit*).
3. Separator yang telah dipotong dilipat menjadi dua bagian sama panjang.
 4. Memasang aluminium *strip* pada lembaran katoda dan *nickel strip* pada lembaran anoda menggunakan *ultrasonic welder*.
 5. Melakukan proses *winding* (membuat gulungan anoda-katoda-separator) dengan susunan separator-katoda-separator-anoda.
 6. Gulungan (*jelly roll*) dimasukkan kedalam *case* baterai dengan terlebih dahulu memasang *bottom seal*.
 7. Melakukan *spot welding* sehingga *nickel strip* terhubung dengan *case* baterai.
 8. Memasang *seal* atas kemudian melakukan *grooving* pada baterai.
 9. Memasang *cap* atas menggunakan *ultrasonic welder*.
 10. Baterai dimasukan kedalam *glove box* untuk diberi elektrolit dan dilakukan proses *Grimmping*.
 11. Melakukan pengujian baterai meliputi *charge-discharge*, LCR meter, *Cyclic Voltammetry* (CV), dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS).
 12. Menyusun laporan sebagai bukti performa baterai silinder NMC541 dengan variasi rasio elektroda.

BAB IV

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Komposisi Bahan Anoda dan Katoda

Bahan anoda dan katoda menggunakan komposisi bahan yang berbeda. Material aktif anoda merupakan grafit sedangkan material aktif untuk katoda $\text{LiNi}_{0,5}\text{Mn}_{0,5}\text{Co}_{0,1}\text{O}_2$ (NMC541). Berikut adalah perbandingan untuk pembuatan lembaran anoda dan katoda:

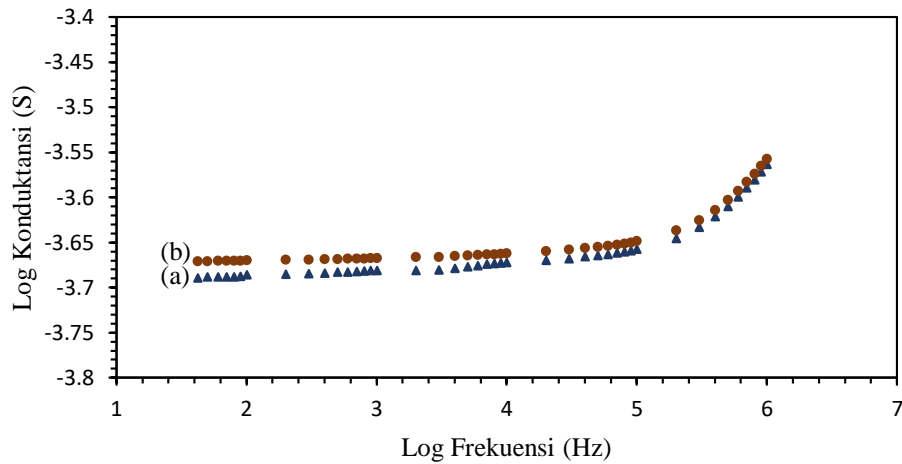
Tabel 4.1 Perbandingan bahan-bahan pada lembaran anoda dan katoda

	Katoda	Anoda
Material Aktif	90%	70%
<i>Polyvinylidene fluoride</i>	5%	20%
<i>Carbon black</i>	5%	10%

Perbedaan komposisi tersebut terjadi karena struktur mikro dan sifat senyawa pada material aktif anoda dan katoda memang berbeda. Penulis sebelumnya pernah melakukan percobaan menggunakan komposisi katoda untuk membuat lembaran anoda hasilnya setelah dikeringkan bahan aktif tidak menempel dengan lembaran tembaga sehingga lembaran anoda menjadi rusak dan tidak bisa dilakukan proses *calendering*. Dengan komposisi 7:1:2 pada bahan anoda lembaran anoda yang dihasilkan menjadi lebih baik dan bahan aktif tidak mudah terlepas dari lembaran tembaga.

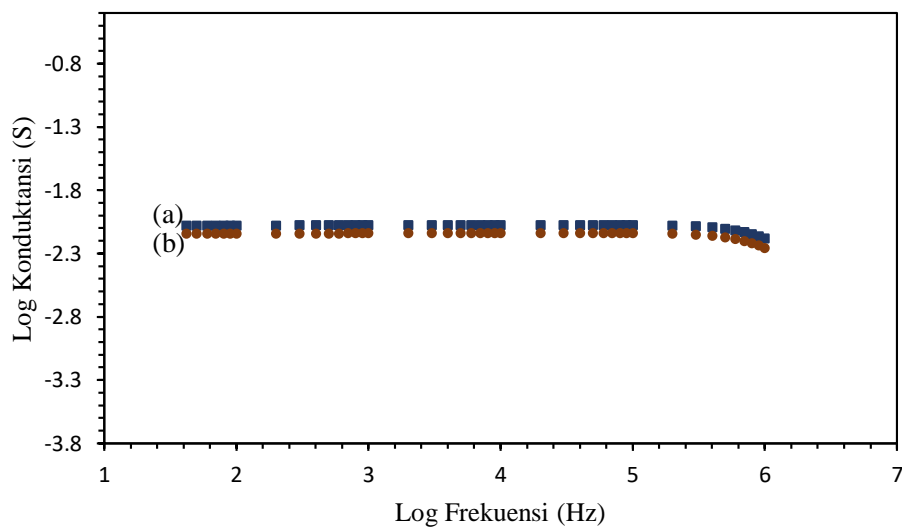
4.2 Analisis Konduktansi dan Konduktivitas Material

Pengujian konduktansi dan konduktivitas dilakukan menggunakan alat uji *Impedance, Capacitance, and Resistance* (LCR) Meter. Pengujian dilakukan dalam rentang frekuensi 42 Hz-1 MHz. Pengujian dilakukan dengan menyediakan lembaran anoda dan katoda. Sampel yang diuji baik anoda maupun katoda memiliki luasan sebesar $0,785 \text{ cm}^2$. Baik anoda maupun katoda dilakukan pengujian sebanyak dua kali. Berikut adalah data hasil pengujian:



Gambar 4.1 Nilai Konduktansi Pada Lembaran Katoda. (a) Pengukuran pertama dan (b) Pengukuran kedua

Gambar 4.1 menunjukkan hasil pengujian LCR Meter pada lembaran katoda. Pengujian dilakukan sebanyak dua kali. Hasil pengujian menunjukkan nilai log konduktansi berada diantara -3.7 hingga -3.55 S.cm^{-1} dengan rentang log frekuensi 1,6 hingga 6 Hz. Selain lembaran katoda, juga dilakukan pengujian LCR Meter pada lembaran anoda untuk mengetahui nilai konduktansi dan konduktivitas dari bahan. Berikut adalah hasil pengujian LCR untuk lembaran anoda:



Gambar 4.2 Nilai Konduktansi Pada Lembaran Anoda. (a) Pengukuran pertama dan (b) Pengukuran kedua

Gambar 4.2 menunjukkan hasil pengujian LCR Meter pada lembaran anoda. Pengujian dilakukan sebanyak dua kali. Hasil pengujian menunjukkan nilai log konduktansi berada diantara -2.3 hingga -2.0 S.cm⁻¹ dengan rentang log frekuensi 1,6 hingga 6 Hz. Perhitungan untuk nilai konduktivitas menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{G.L}{A} \dots \dots \dots (4.1)$$

Keterangan:

σ : Konduktivitas (S.cm⁻¹)

G : Konduktansi (S)

L : Tebal lembaran (cm)

A : Luas lembaran (cm²)

Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan nilai konduktivitas bahan untuk anoda dan katoda adalah sebagai berikut:

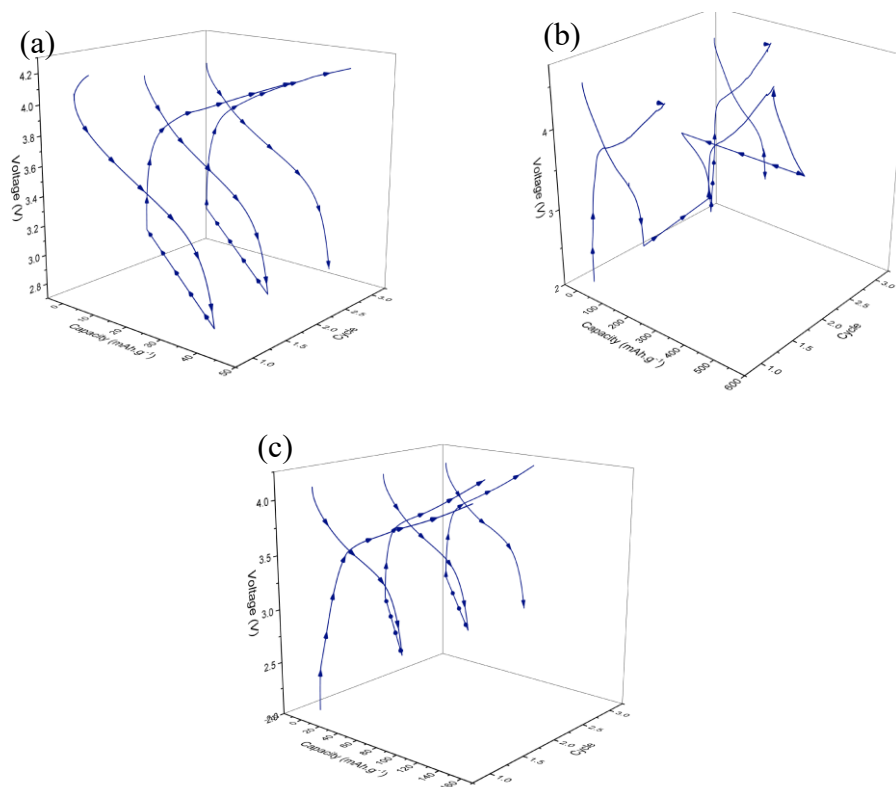
Tabel 4.2 Konduktivitas Bahan Untuk Anoda dan Katoda

	Konduktivitas Katoda (S.cm ⁻¹)	Konduktivitas Anoda (S.cm ⁻¹)
Pengukuran Pertama	2,02x10 ⁻⁴	8,17x10 ⁻³
Pengukuran Kedua	2,11x10 ⁻⁴	7,06x10 ⁻³

Nilai konduktivitas bahan katoda relatif lebih tinggi dibandingkan dengan nilai konduktivitas bahan anoda. Hal ini dapat terjadi karena material anoda yang digunakan adalah grafit dan grafit sendiri merupakan bahan yang konduktif (Wigayati, 2009). Perbandingan material untuk membuat lembaran grafit adalah 85% grafit, 5% *polyvinylidene fluoride* (PVDF), dan 5% *carbon black*. Perbandingan ini merupakan perbandingan optimal untuk lembaran anoda berbahan grafit. *Carbon black* bertujuan untuk meningkatkan konduktivitas listrik. Ruang antar partikel dari grafit atau karbon terisi oleh *carbon black* sehingga hambatan elektronnya akan berkurang dan meningkatkan konduktivitas listrik. Sedangkan, pengaruh bahan polimer yaitu *polyvinylidene fluoride* (PVDF) akan memberikan konduktivitas listrik lebih besar sehingga penggunaan grafit dengan bahan *polyvinylidene fluoride* (PVDF) akan lebih baik digunakan sebagai bahan anoda.

4.3 Analisis Kapasitas Baterai Menggunakan *Charge-Discharge Battery System*

Pengujian *charge-discharge* dapat digunakan untuk mengetahui kapasitas baterai, performa baterai pada *cycles* tinggi (50-100 *cycles*), dan pengaruh variasi C-rate terhadap performa baterai. Baterai yang diuji merupakan baterai dengan variasi rasio elektroda 35:40, 37,5:37,5, dan 40:35. Pada pengujian ini arus yang digunakan adalah 0,0947 A. Berikut adalah data hasil pengujian *charge-discharge* dengan 3 *cycles* untuk setiap sampel:



Gambar 4.3 Pengujian *Charge-Discharge* dengan sebanyak 3 *cycles*.

(a)NMC541 35-40, (b) NMC541 37,5-37,5, dan NMC541 40-35.

Kapasitas maksimal dari sampel 35:40, 37,5:37,5, dan 40:35 menghasilkan nilai yang berbeda-beda. Data yang didapat dari pengujian *charge-discharge* adalah data voltase, kapasitas, arus, dan energi. Akan tetapi, untuk penentuan kapasitas data yang digunakan adalah nilai kapasitas dengan satuan Ah. Berikut merupakan perhitungan yang dilakukan untuk mencari kapasitas spesifik hasil pengujian:

$$C = \frac{C_{act} \times 10^3}{m_{am}} \dots \dots \dots (4.2)$$

Keterangan

C : Kapasitas spesifik (mAh.g⁻¹)

C_{act} : Kapasitas hasil pengujian (Ah)

m_{am} : Massa material aktif (g)

Untuk mencari nilai kapasitas maksimum dari hasil pengujian maka nilai C_{act} disubstitusi dengan nilai kapasitas hasil pengujian terbesar. Massa material aktif untuk setiap sampel berbeda-beda. Massa material aktif untuk sampel 7:8 adalah 4,509 gram, sampel 37,5:37,5 adalah 4,221 gram, dan sampel 8:7 adalah 3,942 gram. Berdasarkan hasil perhitungan didapat nilai kapasitas maksimum setiap sampel adalah sebagai berikut:

Tabel 4.3 Nilai kapasitas maksimum untuk sampel 35:40, 37,5:37,5, dan 40:35

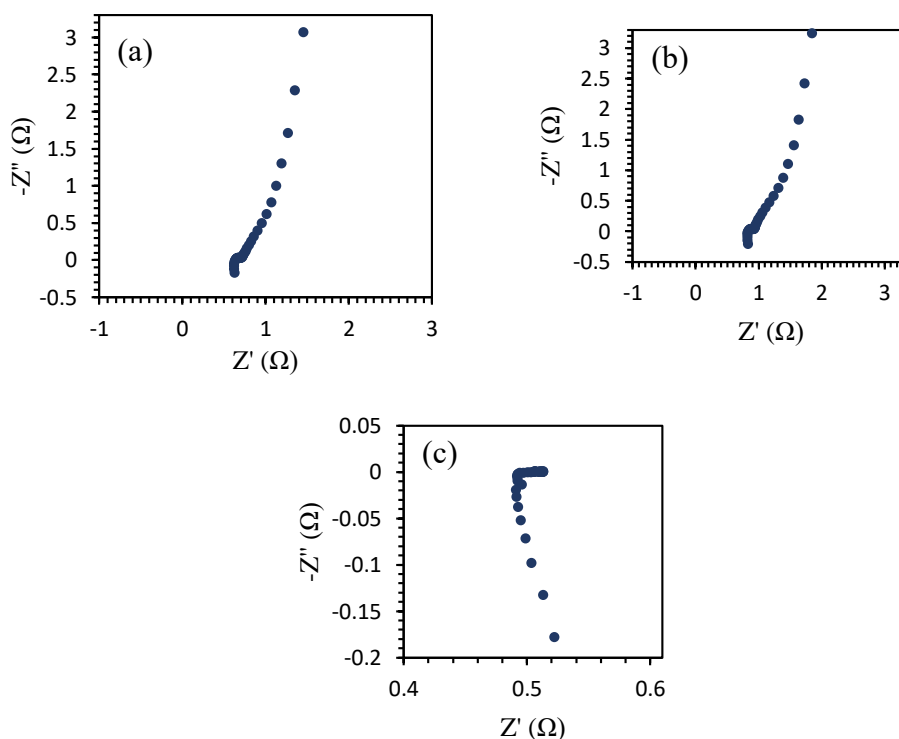
Nama Sampel	Nilai Kapasitas Maksimum (mAh.g ⁻¹)
NMC541 35-40	42,164
NMC541 37,5-37,5	291,295
NMC541 40-35	152,781

Sampel NMC541 37,5-37,5 menghasilkan nilai kapasitas maksimum paling tinggi dibandingkan dengan sampel lainnya. Hal tersebut juga dapat dilihat pada Gambar 4.3. Pada gambar tersebut sampel NMC541 37,5-37,5 menghasilkan nilai kapasitas *charge* dan *discharge* pada *range* 197,776-291,295 mAh.g⁻¹. Hal ini membuktikan bahwa rasio elektroda 37,5:37,5 mampu menghasilkan jumlah elektron lebih baik selama proses elektrokimia dibandingkan sampel lainnya. Ini tidak terlepas dari peran anoda dan katoda. Artinya, bila panjang anoda atau katoda tidak sama (lebih panjang atau pendek) maka nilai kapasitas baterai akan berkurang dari yang seharusnya. Menariknya adalah apabila anoda lebih pendek dibandingkan katoda maka nilai kapasitas yang dihasilkan sangatlah kecil (Dapat dilihat pada table 4.3 sampel NMC541 35:40). Ini membuktikan bahwa anoda memiliki peranan penting dalam

meningkatkan performa elektrokimia baterai lithium-ion. Apabila lembar anoda memiliki ukuran panjang yang lebih kecil maka jumlah material aktif pada anoda juga akan berkurang dan secara otomatis dapat mengurangi kapasitas baterai.

4.4 Analisis Nilai Hambatan *Charge Transfer* Menggunakan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS)

Pengujian *electrochemical impedance spectroscopy* (EIS) merupakan pengujian yang dilakukan untuk mengukur nilai impedansi atau hambatan elektrokimia pada baterai. Pengujian dilakukan terhadap ketiga sampel yaitu NMC541 35-40, NMC541 37,5-37,5, dan NMC541 40-35. Pengujian dilakukan dengan rentang frekuensi 0,1-50000 Hz. Berikut adalah data hasil pengujian:



Gambar 4.4 Hasil Pengujian *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) Dengan Variasi Rasio Elektroda Baterai. (a) NMC541 35-40, (b) NMC541 37,5-37,5, dan (c) NMC541 40-35.

Indikasi pengukuran EIS menghasilkan nilai hambatan yang baik dapat dilihat dari bentuk grafiknya. Bentuk grafik yang dihasilkan adalah *semi-circle*

(Slamet Priyono, 2016). Dari ketiga grafik diatas sampel NMC541 35-40 dan NMC541 37,5-37,5 menghasilkan grafik berbentuk *semi-circle*. Sementara sampel NMC541 40-35 tidak. Untuk menghitung nilai hambatan *charge transfer* (R_{ct}) digunakan persamaan sebagai berikut:

$$R_{ct} = |Z_i - Z_o| \dots \dots \dots (4.3)$$

Keterangan:

R_{ct} : Hambatan *Charge Transfer* (Ω)

Z_i : Impedansi Riil Akhir (Ω)

Z_o : Impedansi Riil Awal (Ω)

Karena grafik NMC541 40-35 termasuk acak maka nilai R_{ct} tidak dapat dihitung menggunakan rumus tersebut. Berikut adalah nilai Z_i dan Z_o sampel NMC541 35-40 dan NMC541 37,5-37,5.

Tabel 4.4 Nilai Z_i dan Z_o pada sampel NMC541 35-40 dan NMC541 37,5-37,5

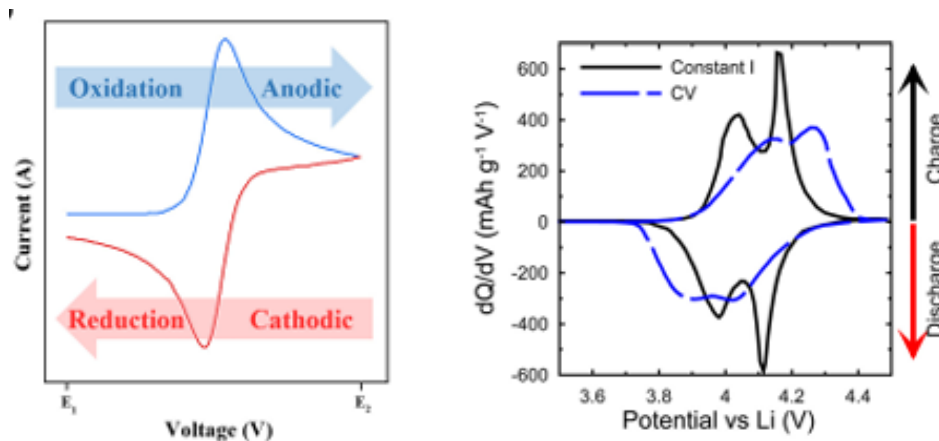
	NMC541 7-8	NMC541 1-1
Z_i (Ω)	0,7	0,9
Z_o (Ω)	0,63	0,83
R_{ct} (Ω)	0,07	0,07

Selisih nilai Z_i dan Z_o dari kedua sampel tersebut adalah sama, maka nilai R_{ct} untuk sampel NMC541 35-40 dan NMC541 37,5-37,5 adalah $0,07\Omega$.

4.5 Analisis Elektrokimia Baterai Menggunakan *Cyclic Voltammetry*

Cyclic Voltammetry merupakan alat ukur yang pada prinsipnya mengukur arus terhadap voltase terhadap fungsi waktu. Pada analisis *cyclic voltammetry* didapat sebuah grafik. Grafik tersebut menggambarkan reaksi oksidasi dan reduksi yang terjadi didalam baterai. Reaksi oksidasi atau terjadinya tegangan anodik terjadi apabila kurva melandai keatas. Sedangkan reaksi reduksi atau terjadinya tegangan katodik terjadi apabila kurva melandai kebawah. Reaksi oksidasi terjadi apabila baterai mengalami pengisian (*charge*). Reaksi reduksi

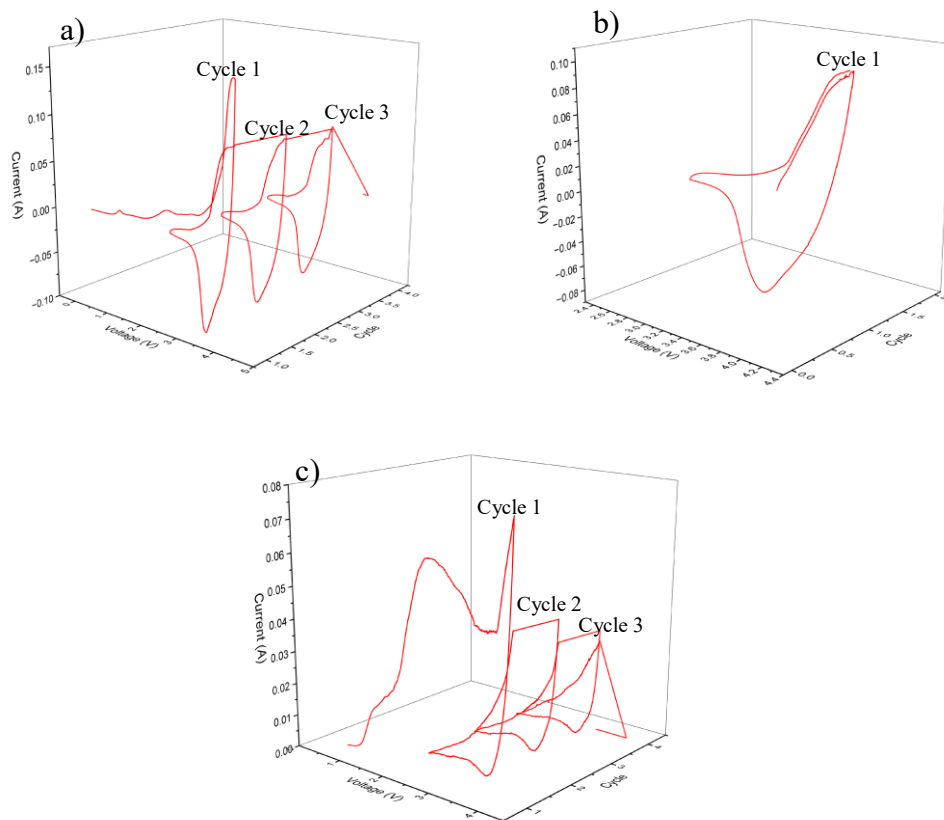
terjadi apabila baterai mengalami pemakaian (*discharge*). Berikut merupakan contoh reaksi oksidasi dan reduksi yang terjadi pada analisis *cyclic voltammetry*.



Gambar 4.5 Grafik pada analisis *Cyclic Voltammetry*

(Sumber: Taewhan Kim, 2020)

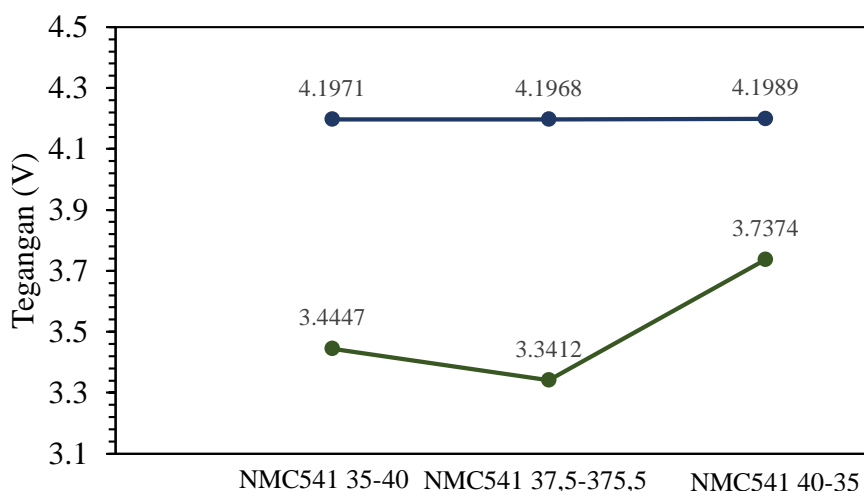
Berdasarkan gambar 4.5, reaksi oksidasi terjadi ketika baterai dilakukan pengisian (*charge*) dan reaksi reduksi terjadi ketika baterai dilakukan pemakaian (*discharge*). Analisis *cyclic voltammetry* menggunakan konvensi dengan standar IUPAC (Zohreh Hirbodvash, 2023). Konvensi ini umum digunakan dalam analisis kurva *cyclic voltammetry*. Selain standar IUPAC terdapat juga standar US. Pada penelitian ini dilakukan pengukuran menggunakan *cyclic voltammetry* terhadap ketiga sampel. Berikut merupakan grafik yang didapat dari hasil pengukuran.



Gambar 4.6 Grafik Hasil Pengukuran *Cyclic Voltammetry* Terhadap Ketiga Sampel. a) NMC541 35-40, b) NM541 37,5-37,5 c) NMC541 40-35.

Gambar 4.6 menunjukkan hasil pengujian *cyclic voltammetry* dalam bentuk kurva arus-tegangan. Dapat dilihat pada gambar tersebut bahwa baterai bersifat *reversible* karena pasangan puncak reaksi reduksi-oksidasi terlihat pada ketiga sampel. Puncak oksidasi dan reduksi yang semakin tajam menandakan bahwa laju perpindahan pada ion lithium besar, ini berarti laju perpindahan ion lithium pada penelitian ini baik karena puncak reaksi-oksidasinya terlihat. Jarak antara puncak kurva reaksi-oksidasi diartikan sebagai jarak interkalasi dan deinterkalasi, semakin kecil jarak antara kedua puncak maka ion lithium mudah untuk berpindah (Putri Nadia Suryadi, 2023). Dalam kurva tersebut terdapat puncak atas dan puncak bawah. Puncak atas disebut sebagai puncak tegangan anodik. Puncak bawah disebut sebagai puncak tegangan katodik. Apabila selisih antara puncak anodik dan puncak tegangan katodik semakin kecil maka nilai hambatan transfer elektronnya juga semakin kecil. Hal ini dapat terjadi

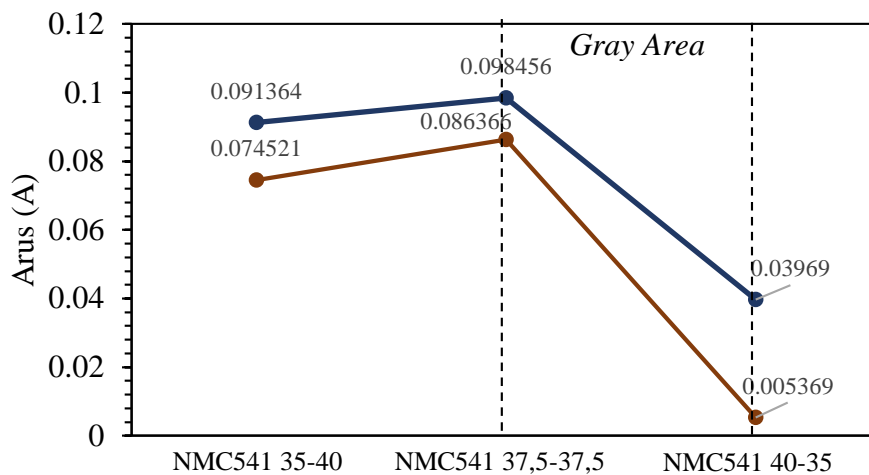
karena saat anodik baterai dalam keadaan *charge* dimana elektron berkumpul pada elektroda. Ketika tegangan dinaikkan arus meningkat secara eksponensial hingga mencapai titik maksimumnya dimana arus yang ditarik menuju elektroda sudah maksimal. Selanjutnya ketika baterai digunakan atau *discharge* maka zat elektrolit dimana memberi elektron kepada elektroda akan menerima kembali elektron tersebut sehingga arus turun hingga mencapai titik terendahnya. Titik terendah dan tertinggi inilah yang disebut puncak anodik dan puncak katodik. Apabila selisih keduanya kecil artinya efisiensi baterai semakin baik. Hal yang mempengaruhi efisiensi baterai ini adalah hambatan transfer elektron. Hambatan transfer elektron salah satunya dapat disebabkan oleh perbedaan panjang anoda dan katoda seperti yang sedang diteliti saat ini.



Gambar 4.7 Nilai Puncak Tegangan Anodik dan Tegangan Katodik dari NMC541 35-40, NMC541 37,5-37,5, dan NMC541 40-35

Berdasarkan data hasil pengujian diatas nilai selisih tegangan terkecil dimiliki oleh sampel NMC541 40-35. Akan tetapi, bila dilihat dari kurva yang dibentuk maka sampel NMC541 40-35 kerusakan baterai (*short circuit*). Hal ini dapat dilihat pada sampel NMC541 40-35 tidak menimbulkan kurva tegang puncak anodik dan puncak tegang katodik yang berbentuk eksponensial. Kurva yang didapatkan adalah cenderung acak. Ini artinya pada sampel NMC541 40-35 rasio panjang lembaran katoda dan anoda tidaklah proporsional dan tidak mampu menghasilkan kurva *cyclic voltammetry* yang signifikan.

Sementara itu, sampel NMC541 35-40 dan NMC541 37,5-37,5 menghasilkan selisi tegangan anodik dan katodik yang lebih besar tetapi kurva yang dibentuk lebih signifikan dibandingkan sampel NMC 541 40-35. Selain nilai tegangan, juga dilakukan analisis terhadap nilai arus yang dihasilkan. Berikut adalah nilai arus pada puncak katodik dan puncak anodik dari ketiga sampel.



Gambar 4.8 Nilai Puncak Arus Anodik dan Pucak Arus katodik dari sampel NMC541 35-40, NMC541 37,5-37,5, dan NMC541 40-35

Seperti analisis pada tegangan, analisis arus juga melihat pada puncak anodik dan katodik baterai. Apabila selisih semakin kecil maka efisiensi baterai dalam menghantarkan elektron semakin baik. Pada sampel NMC541 37,5-37,5 nilai arus pada puncak anodik mencapai 0,098456 A. Nilai ini adalah yang tertinggi dibandingkan dengan sampel lainnya. Artinya sampel NMC541 37,5-37,5 mampu menghantarkan elektron dengan lebih baik dan rasio panjang anoda dan katoda yang digunakan adalah proporsional sehingga menghasilkan nilai arus yang signifikan.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Setelah melakukan penelitian, didapatkan beberapa kesimpulan. Berikut kesimpulan yang didapatkan penulis:

1. Rasio panjang anoda dan katoda mempengaruhi performa elektrokimia baterai lithium-ion. Hal ini disebabkan oleh perbedaan panjang lembaran anoda dan katoda membuat jumlah material aktif pada anoda dan katoda berkurang sehingga mempengaruhi kemampuan anoda untuk menerima elektron dan katoda untuk melepas elektron. Berdasarkan kapasitas baterai yang dihasilkan baterai dengan rasio panjang 35:40 menghasilkan 42,164 mAh.g⁻¹, rasio panjang 37,5:37,5 291,295 mAh.g⁻¹, dan rasio panjang 40:35 152,781 mAh.g⁻¹. Selain itu, nilai konduktivitas untuk bahan anoda dan katoda memiliki perbedaan yang signifikan. Nilai rerata konduktivitas bahan katoda adalah $2,07 \times 10^{-4}$ S.cm⁻¹ dan nilai rerata konduktivitas bahan anoda adalah $7,62 \times 10^{-3}$ S.cm⁻¹.
2. Rasio elektroda optimal terjadi pada rasio 37,5:37,5. Sementara itu, rasio 35:40 dan 40:35 menghasilkan performa elektrokimia lebih rendah dibandingkan rasio 37,5:37,5. Rasio 35:40 menghasilkan kapasitas 42,164 mAh.g⁻¹, hambatan transfer elektron 0,07Ω, tegangan anodik 4,1971 V, tegangan katodik 3,4447 V, arus anodik 0,091364 A, dan arus katodik 0,074521 A. Rasio 40:35 menghasilkan kapasitas 152,781 mAh.g⁻¹, tegangan anodik 4,1989 V, tegangan katodik 3,7374 V, arus anodik 0,03969 A, dan arus katodik 0,005369 A. Berdasarkan performa elektrokimia yang dihasilkan dapat disimpulkan bahwa performa baterai dengan rasio 40:35 (anoda lebih panjang) lebih baik dibandingkan baterai dengan rasio 35:40 karena kapasitas yang dihasilkan lebih tinggi dan selisih tegangan anodik-katodik lebih rendah.
3. Rasio panjang anoda-katoda optimal terjadi pada rasio 37,5:37,5. Rasio ini menghasilkan kapasitas 291,295 mAh.g⁻¹, hambatan transfer elektron

0,07 Ω , tegangan anodik 4,1968 V, tegangan katodik 3,3412 V, arus anodik 0,098456 A, dan arus katodik 0,086366 A. Rasio katoda-anoda tidak mempengaruhi nilai konduktivitas karena material aktif untuk anoda dan katoda yang digunakan setiap sampel adalah sama. Komposisi bahan anoda dan katoda berbeda karena struktur mikro dan sifat senyawa material anoda dan katoda berbeda. Komposisi bahan katoda adalah 90% $\text{LiNi}_{0,5}\text{Mn}_{0,4}\text{Co}_{0,1}\text{O}_2$, 5% *polyvinylidene fluoride*, dan 5% *carbon black*. Komposisi bahan anoda adalah 70% grafit, 20% *polyvinylidene fluoride*, dan 10% *carbon black*.

5.2 Saran

Saran penulis terhadap penelitian rasio panjang elektroda baterai berbentuk silinder dengan katoda NMC541 adalah sebagai berikut:

1. Melakukan pengukuran berulang agar mendapatkan hasil pengujian yang aktual. Hasil pengujian yang aktual menghasilkan data yang akurat dan dapat dikaji untuk mempelajari fenomena yang terjadi pada baterai lithium-ion.
2. Melakukan pengujian tambahan menggunakan *vibration test* dan *nail penetration test* untuk mengetahui keamanan baterai bila digunakan dengan tekanan dan getaran tinggi.
3. Dapat melakukan penelitian lebih lanjut terhadap fenomena penurunan arus katodik-anodik pada *gray area* hasil pengujian *cyclic voltammetry*.

DAFTAR PUSTAKA

- Chen, S., Zhang, X., Xia, M., Wei, K., Zhang, L., Zhang, X., . . . Shu, J. (2021). Issues and challenges of layered lithium nickel cobalt manganese oxides for lithium-ion batteries. *J. Electroanal. Chem.*
- Christina Toigo, M. K.-H. (2021). Rheological Properties of Aqueous Sodium Alginate Slurries for LTO Battery Electrodes. *polymers*, 1-12. doi:<https://doi.org/10.3390/polym13203582>
- Gong, C. X. (2016). Advanced carbon materials/olivine LiFePO₄ composites cathode for lithium ion batteries. *Journal of Power Sources*, 93-112.
- Günter, F., & Wassiliadis, N. (2022). State of the Art of Lithium-Ion Pouch Cells in Automotive Applications: Cell Teardown and Characterization. *J. Electrochem. Soc.*
- Imke Krüger, M. S. (2009). Thermal Modeling of Automotive Lithium Ion Cells using the Finite Elements Method in Modelica. *Proceedings 7th Modelica Conference* (pp. 1-8). Como, Italy: The Modelica Association. doi:<http://dx.doi.org/10.3384/ecp09430072>
- J. Sturm, A. F. (2020). Impact of Electrode and Cell Design on Fast Charging Capabilities of Cylindrical Lithium-Ion Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*. doi:10.1149/1945-7111/abb40c
- Kang, H. C. (2008). Optimized solid-state synthesis LiFePO₄ cathode materials using ball-milling. *Journal of Power Sources*, 340-346.
- Liu, Z. (2023, August 31). *The History of the Lithium-Ion Battery*. Retrieved from Thermofisher: <https://www.thermofisher.com/blog/materials/the-history-of-the-lithium-ion-battery/>
- Mogalahalli V. Reddy, A. M. (2020). Brief History of Early Lithium-Battery Development. *materials*, 1-9.
- Moumita Kotal, S. J. (2022). Cathode materials for rechargeable lithium batteries: Recent progress and future prospects. *Journal Of Energy Storage*, 47, 1-26. doi:<https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103534>

- Muhammad Thowil Afif, I. A. (2015). ANALISIS PERBANDINGAN BATERAI LITHIUM-ION, LITHIUM-POLYMER, LEAD ACID DAN NICKEL-METAL HYDRIDE PADA PENGGUNAAN MOBIL LISTRIK - REVIEW. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 95-99.
- Patrick S Grant¹⁴, 1. D. (2022). Roadmap on Li-ion battery manufacturing research. *Journal of Physics: Energy*, 4. doi:10.1088/2515-7655/ac8e30
- Putri Nadia Suryadi, J. K. (2023). Toward high-rate capability of intercalation cathodes Li-ion batteries, potency for fast-charging application: A materials perspective. *Journal of Energy Storage*. doi:https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107634
- Robert Schröder, M. A. (2017). Comparatively assessing different shapes of lithium-ion battery cells. *Procedia Manufacturing*, 104-111.
- Robert Schröder, M. A. (2016). Design and verification of an innovative handling system for electrodes in manufacturing lithium-ion battery cells. *26th CIRP Design Conference*, 641-646. doi:10.1016/j.procir.2016.04.198
- Slamet Priyono, M. A. (2016). PEMBUATAN ANODA Li₄Ti₅O₁₂ DAN STUDI PENGARUH KETEBALAN ELEKTRODA TERHADAP PERFORMA ELEKTROKIMIA BATERAI ION LITHIUM. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 146-152.
- Taewhan Kim, W. C.-C.-Y.-S.-S. (2020). Applications of Voltammetry in Lithium Ion Battery Research. *J. Electrochem. Sci. Technol.*, 14-25. doi:https://doi.org/10.33961/jecst.2019.00619
- Theivaprakasam, S., Girard, G., Howlett, P., Forsyth, M., Mitra, S., & MacFarlane, D. (2018). Passivation behaviour of aluminium current collector in ionic liquid alkyl carbonate (hybrid) electrolytes. *Npj Mater. Degrad.*
- Till Günther, D. S. (2019). Classification of Calendering-Induced Electrode Defects and Their Influence on Subsequent Processes of Lithium-Ion Battery Production. *Energy Technology*. doi:https://doi.org/10.1002/ente.201900026
- Triwibowo, J. P. (2016). study on electrochemical performance of carbon-coated LiFePO₄ as cathode material. *AIP Conference Proceedings*, 150009.

- Wigayati, E. M. (2009). Pembuatan dan Karakterisasi Lembaran Grafit Untuk Bahan Anoda Pada baterai Padat Lithium. *Jurnal Fisika Himpunan Fisika Indonesia*, 9(1), 39-45.
- Xuan, W., Otsuki, A., & Chagnes, A. (2019). Investigation of the leaching mechanism of NMC 811 (LiNi_{0.8}Mn_{0.1}Co_{0.1}O₂) by hydrochloric acid for recycling lithium ion battery cathodes. *RSC Adv*.
- Yamada, A. C. (2001). Optimized LiFePO₄ for Lithium Battery Cathodes. *Journal of The Electrochemical Society*, A224-A229.
- Yangtao Liu, R. Z. (2021). Current and future lithium-ion battery manufacturing. *iScience*, 24(4). doi:<https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102332>
- Yoshiyuki Gambe, Y. S. (2015). Development of Bipolar All-solid-state Lithium Battery Based on Quasi-solid-state Electrolyte Containing Tetraglyme-LiTFSa Equimolar Complex. *SCIENTIFIC REPORTS*, 1-4. doi:<http://dx.doi.org/10.1038/srep08869>
- Zohreh Hirbodvash, a. P. (2023). Surface Plasmon Electrochemistry: Tutorial and Review. *chemosensors*. doi:<http://dx.doi.org/10.3390/chemosensors11030196>

LAMPIRAN

Lampiran I. Data Nilai Konduktansi Lembaran Katoda Pada Pengukuran Pertama dan Pengukuran Kedua

Tabel I.1 Data Nilai Konduktansi Lembaran Katoda Pengukuran Pertama

Frekuensi (Hz)	G (S)
42	6.87E-03
50	6.88E-03
60	6.89E-03
70	6.88E-03
80	6.88E-03
90	6.89E-03
100	6.91E-03
200	6.93E-03
300	6.93E-03
400	6.95E-03
500	6.96E-03
600	6.97E-03
700	6.98E-03
800	6.99E-03
900	6.99E-03
1000	7.00E-03
2000	7.00E-03
3000	7.01E-03
4000	7.03E-03
5000	7.06E-03
6000	7.08E-03
7000	7.11E-03
8000	7.12E-03
9000	7.13E-03
10000	7.14E-03
20000	7.18E-03
30000	7.21E-03

40000	7.24E-03
50000	7.27E-03
60000	7.29E-03
70000	7.31E-03
80000	7.33E-03
90000	7.36E-03
100000	7.38E-03
200000	7.59E-03
300000	7.81E-03
400000	8.03E-03
500000	8.24E-03
600000	8.44E-03
700000	8.64E-03
800000	8.82E-03
900000	9.00E-03
1000000	9.17E-03

Tabel I.2 Data Nilai Konduktansi Lembaran Katoda Pengukuran Kedua

Frekuensi (Hz)	G (S)
42	7.16E-03
50	7.16E-03
60	7.17E-03
70	7.17E-03
80	7.17E-03
90	7.17E-03
100	7.17E-03
200	7.19E-03
300	7.19E-03
400	7.20E-03
500	7.20E-03
600	7.20E-03

700	7.21E-03
800	7.21E-03
900	7.22E-03
1000	7.22E-03
2000	7.23E-03
3000	7.24E-03
4000	7.25E-03
5000	7.27E-03
6000	7.28E-03
7000	7.28E-03
8000	7.29E-03
9000	7.30E-03
10000	7.31E-03
20000	7.35E-03
30000	7.37E-03
40000	7.40E-03
50000	7.43E-03
60000	7.45E-03
70000	7.47E-03
80000	7.49E-03
90000	7.51E-03
100000	7.54E-03
200000	7.74E-03
300000	7.95E-03
400000	8.16E-03
500000	8.37E-03
600000	8.57E-03
700000	8.76E-03
800000	8.95E-03
900000	9.13E-03
1000000	9.30E-03

Lampiran II. Data Nilai Konduktansi Lembaran Anoda Pada Pengukuran Pertama dan Pengukuran Kedua

Tabel II.1 Data Nilai Konduktansi Lembaran Anoda Pengukuran Pertama

Frekuensi (Hz)	G (S)
42	3.60E-01
50	3.59E-01
60	3.59E-01
70	3.60E-01
80	3.60E-01
90	3.60E-01
100	3.61E-01
200	3.61E-01
300	3.61E-01
400	3.62E-01
500	3.62E-01
600	3.62E-01
700	3.62E-01
800	3.62E-01
900	3.62E-01
1000	3.62E-01
2000	3.62E-01
3000	3.62E-01
4000	3.62E-01
5000	3.62E-01
6000	3.63E-01
7000	3.63E-01
8000	3.63E-01
9000	3.63E-01
10000	3.64E-01
20000	3.63E-01
30000	3.64E-01

40000	3.64E-01
50000	3.63E-01
60000	3.63E-01
70000	3.63E-01
80000	3.63E-01
90000	3.63E-01
100000	3.59E-01
200000	3.54E-01
300000	3.47E-01
400000	3.39E-01
500000	3.29E-01
600000	3.19E-01
700000	3.07E-01
800000	2.96E-01
900000	2.83E-01
1000000	3.60E-01

Tabel II.2 Data Nilai Konduktansi Lembaran Anoda Pengukuran Kedua

Frekuensi (Hz)	G (S)
42	3.10E-01
50	3.10E-01
60	3.10E-01
70	3.10E-01
80	3.11E-01
90	3.11E-01
100	3.11E-01
200	3.11E-01
300	3.12E-01
400	3.12E-01
500	3.12E-01
600	3.12E-01

700	3.12E-01
800	3.12E-01
900	3.12E-01
1000	3.13E-01
2000	3.12E-01
3000	3.12E-01
4000	3.13E-01
5000	3.13E-01
6000	3.13E-01
7000	3.13E-01
8000	3.13E-01
9000	3.13E-01
10000	3.13E-01
20000	3.13E-01
30000	3.13E-01
40000	3.13E-01
50000	3.13E-01
60000	3.13E-01
70000	3.13E-01
80000	3.12E-01
90000	3.12E-01
100000	3.12E-01
200000	3.09E-01
300000	3.04E-01
400000	2.98E-01
500000	2.90E-01
600000	2.81E-01
700000	2.71E-01
800000	2.61E-01
900000	2.50E-01
1000000	2.38E-01

Lampiran III. Pengujian *Charge-Discharge* Sebanyak 3 Cycles Pada Sampel NMC541 35-40, NMC541 37,5-37,5, Dan NMC541 40-35

Tabel III.1 Data Pengujian *Charge-Discharge* Pada Sampel NMC541 35-40

Cycle	Status	Start Voltage (V)	End Voltage (V)	Capacity (Ah)
1	Rest	3.9741	3.9741	0.0000
1	CC_Chg	4.0246	4.2001	0.0212
1	Rest	4.1427	4.1226	0.0000
1	CC_DChg	4.0662	2.8000	0.1800
2	CC_Chg	3.0059	4.2001	0.1901
2	Rest	4.1524	4.1409	0.0000
2	CC_DChg	4.0931	2.8000	0.1657
3	CC_Chg	3.0078	4.2001	0.1893
3	Rest	4.1539	4.1415	0.0000
3	CC_DChg	4.0956	2.8000	0.1712
3	Rest	2.8934	3.1525	0.0000

Tabel III.2 Data Pengujian *Charge-Discharge* Pada Sampel NMC541 37,5-37,5

Cycle	Status	Start Voltage (V)	End Voltage (V)	Capacity (Ah)
1	Rest	0.2554	0.2557	0.0000
1	CC_Chg	0.2985	4.6000	1.2296
1	Rest	4.5724	4.5458	0.0000
1	CC_DChg	4.5194	2.8000	0.8541
2	CC_Chg	2.9637	4.6000	0.9226
2	Rest	4.5734	4.5303	0.0000
2	CC_DChg	4.5048	2.8000	0.8884
3	CC_Chg	2.9541	4.6000	0.8804
3	Rest	4.5709	4.4968	0.0000
3	CC_DChg	4.4686	2.8000	0.8348

Tabel III.3 Data Pengujian *Charge-Discharge* Pada Sampel NMC541 40-35

Cycle	Status	Start Voltage (V)	End Voltage (V)	Capacity (Ah)
1	Rest	0.0768	0.0768	0.0000
1	CC_Chg	0.1475	4.2001	0.6449
1	Rest	4.1638	4.1486	0.0000
1	CC_DChg	4.1139	2.8000	0.3748
2	CC_Chg	2.9160	4.2001	0.4321
2	Rest	4.1638	4.1493	0.0000
2	CC_DChg	4.1133	2.8000	0.3690
3	CC_Chg	2.9423	4.2001	0.3838
3	Rest	4.1610	4.1480	0.0000
3	CC_DChg	4.1096	2.8000	0.3562
3	Rest	2.8673	3.1200	0.0000

Lampiran IV. Pengujian *Electrochemical Impedance Spectroscopy* Pada Sampel NMC541 35-40, NMC541 37,5-37,5, Dan NMC541 40-35

Tabel IV.1 Data Pengujian *Electrochemical Impedance Spectroscopy* Pada Sampel NMC541 35-40

Frekuensi (Hz)	Z' (Ω)	-Z'' (Ω)
50000	0.625302	-0.1778
35714	0.621669	-0.12377
25510	0.617495	-0.08203
18222	0.61933	-0.05094
13015	0.623362	-0.02784
9296.8	0.630035	-0.01124
6640.6	0.636622	0.000567
4743.3	0.643499	0.008817
3388.1	0.650078	0.014427
2420	0.652782	0.018167
1728.6	0.658993	0.020647
1234.7	0.664763	0.022396
881.94	0.670642	0.023614
629.96	0.676655	0.024547
449.97	0.68234	0.025291
321.41	0.687955	0.025908
229.58	0.693482	0.026512
163.98	0.698793	0.027339
117.13	0.703878	0.028685
83.666	0.708182	0.031085
59.761	0.712168	0.034805
42.687	0.716417	0.040521
30.491	0.721158	0.048674
21.779	0.728556	0.059683
15.556	0.735754	0.075007
11.112	0.744699	0.095371

7.937	0.756985	0.121886
5.6693	0.773525	0.155614
4.0495	0.795429	0.197828
2.8925	0.823475	0.250151
2.0661	0.858881	0.314052
1.4758	0.902781	0.391541
1.0541	0.952976	0.489414
0.75295	1.0079	0.613351
0.53782	1.06531	0.769936
0.38416	1.12834	0.993327
0.2744	1.18681	1.29319
0.196	1.26459	1.70698
0.14	1.34933	2.27843
0.1	1.45224	3.0648

Tabel IV.2 Data Pengujian *Electrochemical Impedance Spectroscopy* Pada Sampel NMC541 37,5-37,5

Frekuensi (Hz)	Z' (Ω)	$-Z''$ (Ω)
50000	0.837682	-0.21576
35714	0.828276	-0.15164
25510	0.824564	-0.10076
18222	0.823302	-0.06175
13015	0.826998	-0.03231
9296.8	0.835174	-0.011
6640.6	0.843934	0.004197
4743.3	0.852932	0.014538
3388.1	0.861401	0.021569
2420	0.866469	0.02579
1728.6	0.874455	0.02847
1234.7	0.882421	0.02997
881.94	0.889063	0.030675

629.96	0.896165	0.030785
449.97	0.902944	0.030592
321.41	0.909278	0.030197
229.58	0.91514	0.029911
163.98	0.920475	0.030064
117.13	0.925012	0.031083
83.666	0.929002	0.0336
59.761	0.932662	0.037945
42.687	0.936656	0.044845
30.491	0.941087	0.054906
21.779	0.948299	0.068367
15.556	0.956001	0.087139
11.112	0.96595	0.112049
7.937	0.979826	0.144513
5.6693	0.999377	0.185956
4.0495	1.02662	0.237706
2.8925	1.06305	0.300623
2.0661	1.11036	0.376005
1.4758	1.17041	0.465168
1.0541	1.23851	0.573934
0.75295	1.31541	0.70248
0.53782	1.39572	0.868626
0.38416	1.46815	1.09913
0.2744	1.56051	1.4004
0.196	1.63886	1.82305
0.14	1.73316	2.41606
0.1	1.85185	3.23793

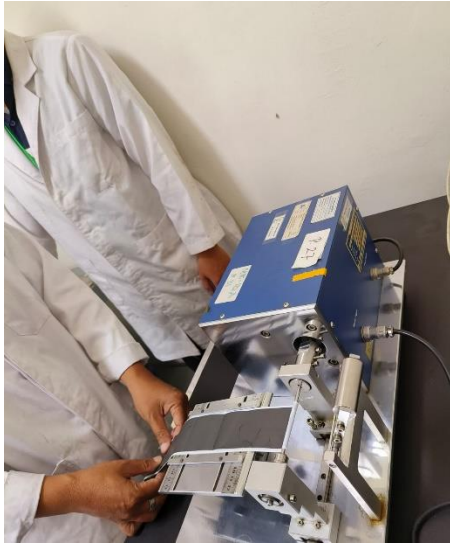
Tabel IV.3 Data Pengujian *Electrochemical Impedance Spectroscopy* Pada Sampel NMC541 40-35

Frekuensi (Hz)	Z' (Ω)	$-Z''$ (Ω)
50000	0.522292	-0.17836
35714	0.513169	-0.13321
25510	0.503699	-0.0982
18222	0.498801	-0.07213
13015	0.495206	-0.05254
9296.8	0.492763	-0.03825
6640.6	0.491805	-0.02741
4743.3	0.491438	-0.01968
3388.1	0.495887	-0.01397
2420	0.492457	-0.00994
1728.6	0.492349	-0.00703
1234.7	0.492284	-0.0049
881.94	0.492518	-0.00334
629.96	0.49284	-0.00223
449.97	0.4942	-0.00152
321.41	0.497108	-0.00109
229.58	0.500754	-0.00084
163.98	0.503297	-0.00066
117.13	0.505477	-0.00046
83.666	0.506416	-0.00022
59.761	0.50674	-8.00E-05
42.687	0.506741	8.53E-05
30.491	0.506729	0.000226
21.779	0.511673	-0.0001
15.556	0.510111	-7.23E-05
11.112	0.510133	-5.67E-05
7.937	0.510045	-3.37E-05
5.6693	0.510101	-1.82E-05

4.0495	0.510141	-1.36E-05
2.8925	0.5123	1.10E-05
2.0661	0.511977	3.09E-05
1.4758	0.511873	-1.78E-05
1.0541	0.511866	-3.56E-05
0.75295	0.511606	-1.76E-05
0.53782	0.511201	3.98E-06
0.38416	0.511886	-2.11E-05
0.2744	0.513293	-8.11E-06
0.196	0.513464	-4.35E-06
0.14	0.513428	0.000128
0.1	0.512982	1.94E-05

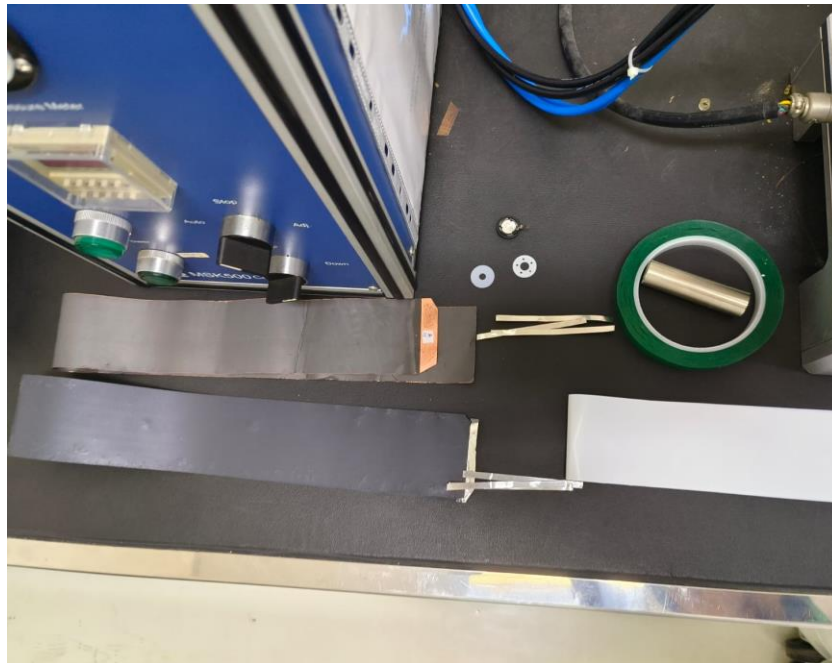
Kegiatan Pengujian

Proses membuat gulungan baterai:

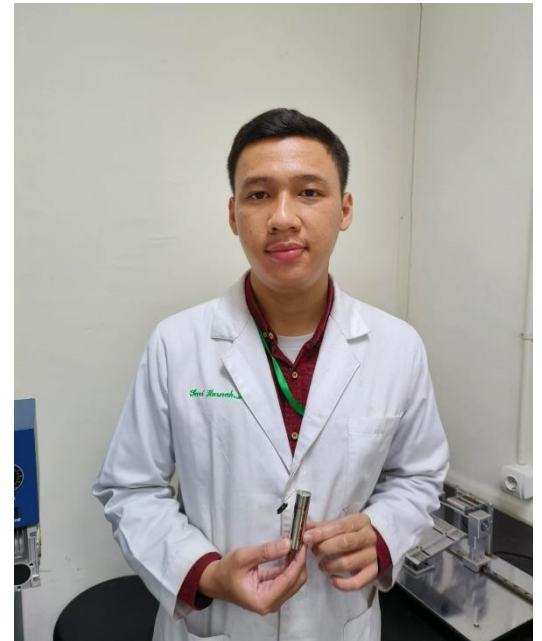


Gambar A.1 Proses membuat gulungan baterai menggunakan *winding machine*

Alat dan Bahan yang digunakan



Gambar A.2 Alat dan Bahan yang disiapkan untuk merakit baterai silinder

Baterai yang berhasil dirakit

Gambar A.3 Baterai Silinder dengan Katoda $\text{LiNi}_{0,5}\text{Mn}_{0,4}\text{Co}_{0,1}\text{O}_2$