

**PENGARUH DIMENSI TERHADAP PERFORMA BATERAI
POUCH PRISMATIC DENGAN MATERIAL KATODA NMC541**

Skripsi



Disusun Oleh:

Michael Hardian

3331200071

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

**PENGARUH DIMENSI TERHADAP PERFORMA BATERAI
POUCH PRISMATIC DENGAN MATERIAL KATODA NMC541**

Skripsi

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



Disusun Oleh:

Michael Hardian

3331200071

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

2024

TUGAS AKHIR

Pengaruh Dimensi Terhadap Performa Baterai Pouch Prismatik Dengan Material Katoda Nmc541

Dipersiapkan dan disusun Oleh :

Michael Hardian
3331200071

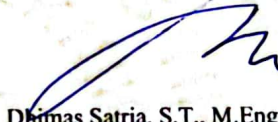
telah dipertahankan di depan Dewan Penguji
pada tanggal, 23 Januari 2024

Pembimbing Utama



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

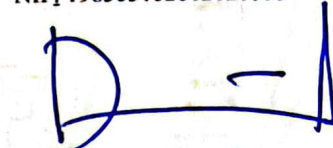
Anggota Dewan Penguji



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



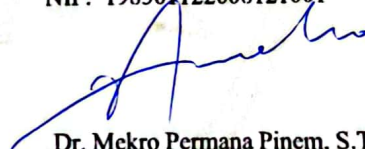
Emy Listijorini, S.T., M.T
NIP. 197011022005012001



Dr. Dwinanto, ST., MT.
NIP. 198301122008121001



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



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



Emy Listijorini, S.T., M.T
NIP. 197011022005012001

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



Tanggal, 26 Januari 2024
Kema Jurusan Teknik Mesin UNTIRTA

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

HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan dibawah ini,

Nama : Michael Hardian

NPM : 3331200071

Judul : Pengaruh Dimensi Terhadap Performa Baterai *Pouch Prismatic*
dengan material katoda NMC541

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, 26 Januari 2024


Michael Hardian
NPM. 3331200071

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur bagi Tuhan Yesus Krsitus, oleh karena anugerah-Nya yang melimpah akhirnya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir. Penulisan tugas akhir dengan judul “PENGARUH DIMENSI TERHADAP PERFORMA BATERAI *POUCH PRISMATIC* DENGAN MATERIAL KATODA NMC541” ini dilakukan guna memenuhi salah satu persyaratan dalam mencapai Gelar Sarjana Teknik di Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Penulis menyadari bahwa tanpa adanya bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan hingga saat ini, penyusunan tugas akhir ini mustahil dapat diselesaikan. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Hardy dan Ibu Sri Aryati, selaku orang tua penulis, Richard Hardian dan Elisa Hardian selaku kakak dan adik penulis, yang memberikan dukungan dalam menjalani kegiatan perkuliahan hingga penyusunan tugas akhir.
2. Bapak Dhimas Satria S.T., M.Eng., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
3. Bapak Dr. Mekro Permana Pinem, S.T., M.T, selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
4. Bapak Haryadi, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing akademik yang selalu membimbing penulis dari awal perkuliahan hingga saat ini.
5. Bapak Dr. Mekro Permana Pinem, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing tugas akhir yang membantu penyusunan Tugas Akhir.
6. Ibu Erny Listijorini, ST., MT., selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah membantu dalam penyusunan Tugas Akhir.
7. Bapak Dr. Yustinus Purwamargapratala, S.T., M.Si selaku pembimbing lapangan tugas akhir selama menyusun Tugas Akhir di BRIN.
8. Ibu Miftahul Jannah, M.T., selaku Koordinator seminar Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
9. Seluruh Staf dan jajaran dosen Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Ageng Tirtayasa.
10. Seluruh rekan-rekan, research asisten dan staff BRIN yang sudah membantu dalam pelaksanaan magang dan kerja praktik.

11. Teman-teman dari Jurusan Teknik Mesin Angkatan 2020 Universitas Sultan Ageng Tirtayasa yang telah menemani dalam perkuliahan selama ini.

Akhir kata penulis menyadari banyak sekali kekurangan dalam penyusunan dan penulisan dalam tugas akhir ini, baik dari segi 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 bagi seluruh pembaca.

Cilegon, Januari 2024

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Michael H', written in a cursive style.

Michael Hardian

ABSTRAK

Baterai lithium-ion (LiB) memainkan peran utama dalam penyimpanan energi untuk berbagai aplikasi mulai dari perangkat elektronik portabel dan kendaraan hibrida/listrik. Kinerja baterai Li-ion bergantung pada kinerja katoda. Selain katoda, dimensi baterai juga memiliki pengaruh. Secara umum, ukuran baterai berhubungan langsung dengan kapasitas penyimpanannya. Reaksi elektrokimia dan proses pertukaran ion dalam baterai Li-ion tidak hanya bergantung pada sifat material elektroda dan elektrolit, tetapi juga sangat tergantung pada struktur geometris dan ukuran elektroda. Dengan memvariasikan dimensi lipatan baterai yakni 6x5, 6x6, dan 6x7, maka jarak dari pengumpul arus positif (aluminium) dan negatif (nikel) juga bervariasi. Semakin jauh jaraknya diperkirakan akan membuat performa baterai kurang optimal, dan sebaliknya. Hasil dari pengujian memperlihatkan bahwa sampel yang dilipat lebih kecil yakni 6x5 memiliki nilai R_{ct} sebesar $1,4675 \Omega$, sedangkan sampel 6x6 dan 6x7 memiliki nilai R_{ct} $1,656 \Omega$ dan $2,1107 \Omega$ berturut-turut. NMC541-6x5 memiliki kapasitas *discharge* dan efisiensi terbesar, dengan pengujian 50 siklus rata-rata sebesar $69,188 \text{ mAh.g}^{-1}$ dengan rerata efisiensi $99,436 \%$. Sampel dengan lipatan menengah yakni NMC541-6x6 memiliki kapasitas dan efisiensi 50 siklus rata-rata sebesar $10,349 \text{ mAh.g}^{-1}$ dan $89,487\%$ berturut-turut. Untuk sampel dengan lipatan terkecil NMC541-6x7 sebesar $0,178 \text{ mAh.g}^{-1}$ dan $48,816\%$ berturut-turut.

Kata Kunci: Baterai kantung, Dimensi, Katoda, Kapasitas, NMC541.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN JUDUL.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	iv
KATA PENGANTAR.....	iv
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
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
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 <i>State of the Art</i>	4
2.2 Baterai dan Prinsip Kerjanya.....	5
2.3 Baterai Lithium-Ion Sekunder.....	6
2.4 Manufaktur Baterai.....	7
2.5 Material Katoda	9
2.5.1 LiCoO ₂ (LCO)	10
2.5.2 LiNiO ₂ (LNO).....	11
2.5.3 LiMnO ₂ (LMO).....	11
2.5.4 LiFePO ₄ (LFP)	11
2.5.5 LiFeSO ₄ F (LFSF).....	11
2.5.6 LiNi _x Co _y Mn _z O ₂ (NCM, aka NMC)	11
2.6 Performa Baterai.....	12
2.6.1 <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV)	12
2.6.2 <i>Charge-Discharge</i> (CD)	13

2.6.3 <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS).....	14
2.7 Baterai Kantung (<i>Pouch Stacking</i> dan <i>Prismatic</i>).....	15
2.7.1 Perbedaan Sel Prismatik vs sel <i>pouch stacking</i>	16
2.7.2 Penerapan sel prismatik vs sel <i>pouch stacking</i>	16
2.7.3 Kelebihan dan kekurangan sel prismatik vs sel <i>pouch stacking</i>	17
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	18
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	18
3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian	19
3.3 Alat dan Bahan	19
3.3.1 Alat yang Digunakan	19
3.3.2 Bahan yang Digunakan	23
3.4 Prosedur Penelitian.....	25
3.5 Karakterisasi dan Analisis Performa	26
3.5.1 <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV)	26
3.5.2 <i>Charge-Discharge</i> (CD)	27
3.5.3 <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS).....	27
BAB IV DATA DAN ANALISA	28
4.1 Komposisi <i>Slurry</i> Katoda dan Anoda.....	28
4.2 Analisa Data LCR	29
4.3 Analisa Data <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV).....	32
4.4 Analisa Data <i>Charge-Discharge</i> (CD)	36
4.4.1 Analisa Data <i>Charge Discharge</i> Siklus Panjang	39
4.4.2 Analisa Data <i>Charge Discharge</i> Variasi <i>C-Rate</i>	49
4.5 Analisa Data <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS).....	51
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	54
5.1 Kesimpulan.....	54
5.2 Saran.....	55
DAFTAR PUSTAKA.....	56
LAMPIRAN.....	61
Lampiran A. Foto Dokumentasi Kegiatan.....	61
Lampiran B. Data Hasil Pengukuran.....	63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Ilustrasi baterai dengan 1 pasang elektroda (kiri) dan 3 pasang elektroda (kanan).....	4
Gambar 2.2 Bentuk dan Komponen Baterai.....	5
Gambar 2.3 Prinsip kerja baterai lithium ion	6
Gambar 2.4 Mesin mixing.....	8
Gambar 2.5 Proses Kalendering	8
Gambar 2.6 Menyusun baterai pouch stacking dengan Z -Fold Separator	9
Gambar 2.7 profil pelepasan katoda-katoda interkalasi (Fisher, 2014) (Adam Sobkowiak, 2013) (Surendra K. Martha, 2011).	10
Gambar 2.8 Contoh Grafik Hasil CV	13
Gambar 2.9 Contoh hasil CD (a) Kurva CD muatan awal dalam sel penuh pada 1C; (b) siklus hidup kapasitas CD dalam sel penuh pada 25 °C; (c) kapasitas pelepasan laju dan (d) kurva pelepasan muatan (Xiaopei Zhu, 2022).	14
Gambar 2.10 Contoh Plot Nyquist (EIS).....	14
Gambar 2.11 Equivalent Circuit and Charge-Transfer Control.....	14
Gambar 2.12 Baterai pouch stacking dan prismatic	15
Gambar 2.13 Jenis-Jenis Gulungan Elektroda baterai.....	15
Gambar 3.1 Diagram Alir pembuatan lembaran anoda Grafit.....	18
Gambar 3.2 Diagram Alir perakitan dan pengujian baterai.....	19
Gambar 3.3 Timbangan Digital	20
Gambar 3.4 Vacuum Mixer.....	20
Gambar 3.5 Wadah Logam	20
Gambar 3.6 Spatula	21
Gambar 3.7 Mesin Coating.....	21
Gambar 3.8 Mesin Kalendering.....	21
Gambar 3.9 Mesin Slitting.....	21
Gambar 3.10 Glove Box	22
Gambar 3.11 Pipet	22
Gambar 3.12 HIOKI LCR	22

Gambar 3.13 Mesin Uji CV	23
Gambar 3.14 Mesin Charge-Discharge	23
Gambar 3.15 Mesin Uji EIS	23
Gambar 3.16 Bubuk NMC 541	24
Gambar 3.17 Bubuk PVDF	24
Gambar 3.18 Super P	24
Gambar 3.19 Pelarut NMP	24
Gambar 3.20 Alumunium Foil	25
Gambar 3.21 Cairan elektrolit	25
Gambar 4.1 Pengukuran LCR	30
Gambar 4.2 Hasil pengukuran LCR katoda.....	30
Gambar 4.3 Hasil pengukuran LCR anoda.....	31
Gambar 4.4 Hasil CV NMC541-6x5	32
Gambar 4.5 Waktu pengujian CV NMC541-6x5	33
Gambar 4.6 Hasil CV NMC541-6x6	33
Gambar 4.7 Waktu pengujian CV NMC541-6x6	34
Gambar 4.8 Hasil CV NMC541-6x7	34
Gambar 4.9 Waktu pengujian CV NMC541-6x7	35
Gambar 4.10 Charge discharge 3 siklus pertama NMC541-6x5.....	36
Gambar 4.11 Kapasitas spesifik dan efisiensi 3 siklus pertama NMC541-6x5... 37	
Gambar 4.12 Charge discharge 3 siklus pertama NMC541-6x6	37
Gambar 4.13 Kapasitas spesifik dan efisiensi 3 siklus pertama NMC541-6x6... 38	
Gambar 4.14 Charge discharge 3 siklus pertama NMC541-6x7	38
Gambar 4.15 Kapasitas spesifik dan efisiensi 3 siklus pertama NMC541-6x7... 39	
Gambar 4.16 Hasil CD 50 Siklus NMC541-6x5	40
Gambar 4.17 Kapasitas spesifik dan efisiensi 50 siklus NMC541-6x5	40
Gambar 4.18 Trend Kapasitas NMC541-6x5	42
Gambar 4.19 Hasil CD 50 Siklus NMC541-6x6	43
Gambar 4.20 Kapasitas spesifik dan efisiensi 50 siklus NMC541-6x7	43
Gambar 4.21 Trend Kapasitas NMC541-6x6	45
Gambar 4.22 Hasil CD 50 Siklus NMC541-6x7	45

Gambar 4.23 Kapasitas spesifik dan efisiensi 50 siklus NMC541-6x7	46
Gambar 4.24 Trend Kapasitas NMC541-6x7	48
Gambar 4.25 Pengaruh C-rate terhadap kapasitas baterai	49
Gambar 4.26 Pengaruh C-rate terhadap kapasitas spesifik dan efisiensi	49
Gambar 4.27 Hasil EIS; a) NMC541-6x5; b) NMC541-6x6; c) NMC541-6x7..	52
Gambar 4.28 Kurva gabungan Nyquist plot	53
Gambar 4.29 Grafik pengaruh dimensi terhadap resistansi.....	53
Gambar A.1 Proses Coating dan Calendaring	61
Gambar A.2 Susunan Elektroda.....	61
Gambar A.3 Variasi Dimensi Lipatan Baterai	61
Gambar A.4 Hot sealing baterai	61
Gambar A.5 Pengisian Elektrolit	62
Gambar A.6 Pengecekan Voltase awal (0 V Jika Short).....	62
Gambar A.7 Pengujian <i>Cyclic Voltammetry</i>	62
Gambar A.8 Pengujian Charge Discharge	62
Gambar A.9 Pengujian Electrochemical Impedance Spectroscopy.....	63

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Komposisi slurry anoda	28
Tabel 4.2 Perhitungan Jumlah Pelarut NMP Anoda	28
Tabel 4.3 Komposisi slurry katoda	28
Tabel 4.4 Perhitungan Jumlah Pelarut NMP Katoda	29
Tabel 4.5 Hasil Uji Cyclic Voltammetry NMC	35
Tabel 4.6 Hasil charge discharge 3 siklus pertama NMC541-6x5	36
Tabel 4.7 Hasil charge discharge 3 siklus pertama NMC541-6x6	38
Tabel 4.8 Hasil charge discharge 3 siklus pertama NMC541-6x7	39
Tabel 4.9 Hasil 50 siklus CD NMC541-6x5.....	41
Tabel 4.10 Hasil 50 siklus CD NMC541-6x6.....	43
Tabel 4.11 Hasil 50 siklus CD NMC541-6x7	46
Tabel 4.12 Tabulasi Pengujian Siklus Panjang NMC541	48
Tabel 4.13 Pengaruh C-rate terhadap kapasitas dan efisiensi baterai.....	50
Tabel 4.14 Hasil uji EIS simulasi dan fitting	52
Tabel B.1 Hasil Pengukuran Konduktansi Elektroda	63
Tabel B.2 Koordinat EIS Nyquist Plot NMC	64

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Baterai lithium-ion (LiB) memainkan peran utama dalam penyimpanan energi untuk berbagai aplikasi mulai dari perangkat elektronik portabel dan kendaraan hibrida/listrik, karena kombinasi energi yang tinggi dan kepadatan daya yang tak tertandingi (Sadik-Zada, 2023) (Chladil L, 2021) (Capkova, 2023). Teknologi baterai isi ulang memungkinkan penyebaran daya cadangan secara luas untuk kendaraan listrik (EV) dan sumber energi yang bersifat intermiten (seperti tenaga surya dan angin), dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil (Basak, 2022). Untuk memenuhi permintaan energi yang tinggi terutama untuk kendaraan listrik jarak jauh, LIB berenergi tinggi dengan stabilitas siklus panjang perlu dikembangkan. Sampai saat ini, material yang kaya akan Ni seperti lithium, nikel, mangan, kobalt oksida ($\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y}\text{O}_2$); $x \geq 0.6$ diyakini sebagai katoda generasi berikutnya (Lukman Noerochim, 2021) (Aaron Wade, 2020) (Tsai, 2018). Penerapan dari bahan-bahan ini belum sepenuhnya dikembangkan karena adanya hambatan intrinsik (Nutthaphon Phattharasupakun, 2021). Baterai lithium ion terdapat dalam berbagai dimensi. Menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia atau KBBI, pengertian dimensi adalah ukuran yang berupa panjang, lebar, tinggi, luas, volume, dll.

Kinerja baterai Li-ion bergantung pada kinerja katoda. Proses penghantaran arus listrik pada baterai berlangsung melalui mekanisme interkalasi-deinterkalasi litium di dalam struktur bahan katoda (Wang, et al., 2019). Selain katoda, dimensi baterai juga memiliki pengaruh yang signifikan. Secara umum, ukuran baterai berhubungan langsung dengan kapasitas penyimpanannya. Baterai yang lebih besar memiliki kapasitas untuk menyimpan lebih banyak energi dibandingkan baterai yang lebih kecil dengan jenis yang sama. Penting untuk diperhatikan bahwa ukuran baterai tidak berhubungan langsung dengan kepadatan energinya, yaitu jumlah energi yang disimpan dalam kaitannya dengan berat atau volume energi.

NMC menawarkan kepadatan energi spesifik yang tinggi yang disumbangkan oleh keberadaan struktur nikel dan spinel dari mangan yang mengarah ke kapasitas reversibel yang lebih tinggi (Shen, et al., 2021). Baterai NMC telah diproduksi dalam berbagai rasio molar Ni:Mn:Co, yaitu 1:1:1, 5:3:2, 6:2:2, dan 8:1:1 (Shen, et al., 2021). Proporsi kobalt yang lebih rendah membuat biaya baterai menjadi lebih. LIB jenis ini telah digunakan oleh beberapa pabrikan EV ternama, seperti BMW, Chevy, dan Nissan (Martins, Guimarães, Botelho Junior, Tenório, & Espinosa, 2021) (Miao, Hynan, Von Jouanne, & Yokochi, 2019). (Thomas Entwistle, 2022), melakukan penelitian metode kopresipitasi katoda NMC dengan perbandingan Ni, Mn, dan Co yang berbeda untuk menentukan komposisi optimal $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z)\text{O}_2$. Hasil menunjukkan bahwa kandungan Ni yang lebih tinggi menyebabkan kapasitas pelepasan lebih tinggi, namun stabilitas termal dan kapasitas retensi lebih rendah. Semakin tinggi kandungan Nikel di atas NMC 622, semakin cepat penurunan stabilitas termal. Keuntungan dari peningkatan kapasitas pengosongan ini diimbangi dengan penurunan keamanan baterai. Sel baterai muncul dalam berbagai bentuk. Bentuknya dapat dibagi menjadi silinder dan prisma, sedangkan bentuk prisma dapat dibagi lagi menurut stabilitas wadahnya menjadi sel *hard-case* prisma dan sel kantong prisma (Schröder, Aydemir, & Seliger, 2017).

Penelitian dilakukan untuk mengetahui performa baterai yang menggunakan material katoda NMC541 dan anoda grafit dengan ukuran elektroda yang tetap pada variasi dimensi baterai. Dari penelitian ini diharapkan dapat mengetahui dimensi optimal baterai berdasarkan performa elektrokimianya. Pengujian performa dilakukan dengan menggunakan uji LCR (Induktansi, Kapasitansi dan Resistansi), EIS (*electrochemical impedance spectroscopy*), CV (*cyclic voltammetry*), dan CD (*charge discharge*).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian diatas, dibawah ini adalah rumusan masalah pada penelitian ini:

1. Bagaimana perakitan baterai *pouch prismatic* dengan katoda berbahan NMC541?
2. Bagaimana performa baterai *pouch prismatic* dengan katoda berbahan NMC541?
3. Bagaimana pengaruh dimensi terhadap performa baterai *pouch prismatic* dengan katoda berbahan NMC541?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah penelitian diatas, maka tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui proses perakitan baterai *pouch prismatic* dengan katoda berbahan NMC541.
2. Menganalisis performa baterai *pouch prismatic* yang dihasilkan dengan katoda berbahan NMC541.
3. Menganalisis pengaruh dimensi terhadap performa baterai *pouch prismatic* dengan katoda berbahan NMC541.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang didapat dari dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sebagai referensi dalam merakit dan menguji baterai lithium berbentuk *pouch prismatic*.
2. Sebagai penerapan ilmu mengenai perakitan dan material baterai *pouch*.

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang ditetapkan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

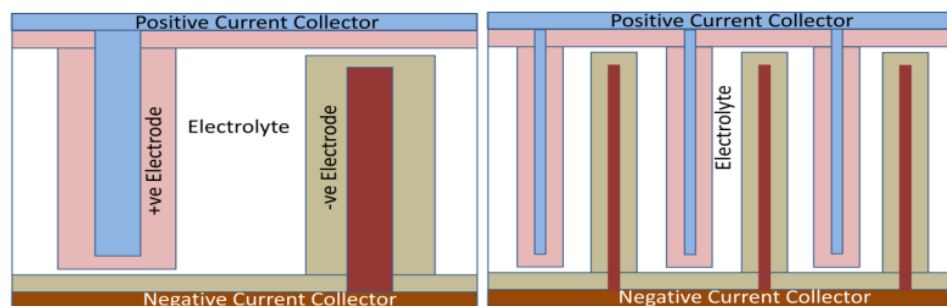
1. Material anoda yang digunakan adalah grafit.
2. Separator yang digunakan berbahan dasar *polypropylene membrane*.
3. Cairan elektrolit yang digunakan adalah LiPF_6 .
4. Ukuran anoda dan katoda berturut-turut adalah 50 dan 45 cm untuk variasi dimensi 6x5, 6x6, dan 6x7.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 State of the Art

Reaksi elektrokimia dan proses pertukaran ion dalam baterai Li-ion tidak hanya bergantung pada sifat material elektroda dan elektrolit, tetapi juga sangat tergantung pada struktur geometris dan ukuran elektroda (Salvatore, Bruce, Scrosati, Tarascon, & Schalkwijk, 2005). Hasilnya menunjukkan bahwa mengurangi ketebalan elektroda membantu meningkatkan energi kapasitas baterai dengan jumlah yang sama bahan elektroda karena peningkatan rasio permukaan/volume elektroda (ESVR). Dengan meningkatkan jumlah elektroda sambil menjaga tetap volume, luas permukaan elektroda bertambah, yang membantu meningkatkan efisiensi reaksi elektrokimia dan memfasilitasi pertukaran ion antara elektroda dan elektrolit (Salvatore, Bruce, Scrosati, Tarascon, & Schalkwijk, 2005). Salvatore juga menunjukkan bahwa dengan menambah jumlah elektroda dari 1 pasang menjadi 10 pasang, diperoleh ketebalan masing-masing elektroda berkurang dari 300 μm menjadi 30 μm , ketebalan pengumpul arus di tengah setiap elektroda juga berkurang dari 100 μm menjadi 10 μm .



Gambar 2.1 Ilustrasi baterai dengan 1 pasang elektroda (kiri) dan 3 pasang elektroda (kanan)

(Sumber: (Salvatore, Bruce, Scrosati, Tarascon, & Schalkwijk, 2005))

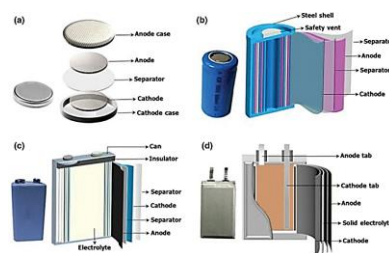
Material yang dipilih sebagai katoda baterai adalah NMC541. Hal ini tentunya tidak terlepas dari hasil hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. NMC541 dapat disintesis dengan metode kopresipitasi.

Baterai dengan material katoda NMC532 memiliki kapasitas *discharge* awal sebesar 162,4 mAh.g⁻¹. Pada siklus ke-50 baterai ini memiliki kapasitas discharge sebesar 156,3 mAh.g⁻¹ atau *capacity retention* 96,2% (Guo, 2016) (Yi, 2017).

Pada penelitian ini menggunakan jumlah material yang sama yaitu 50 cm anoda dan 45 cm katoda, akan divariasikan dimensi baterai sehingga berpengaruh pada jarak antara *current collector* positif dan negatif. Saat *charge* maupun *discharge* ion lithium akan berinterkalasi dari anoda ke katoda dan sebaliknya. Semakin jauh jarak antara *current collector* maka akan semakin besar hambatan yang dirasakan sehingga dapat mempengaruhi performa baterai. Sebaliknya jika jarak keduanya dekat maka hambatan yang dilalui lebih kecil. Hal ini akan meningkatkan performa dan efisiensi dari baterai.

2.2 Baterai dan Prinsip Kerjanya

Baterai adalah sebuah sel listrik dimana di dalamnya berlangsung proses elektrokimia yang reversibel (dapat berbalikan) dengan efisiensinya yang tinggi (Asmae Berrada, 2019) (Purwamargapratala, et al., 2023). Setiap sel baterai terdiri dari elektroda positif (katoda), elektroda negatif (anoda), separator dan elektrolit. Ada 4 buah bentuk baterai yang umum digunakan, yaitu baterai koin, baterai silinder, baterai *pouch stacking*, dan baterai *pouch* prismatik.

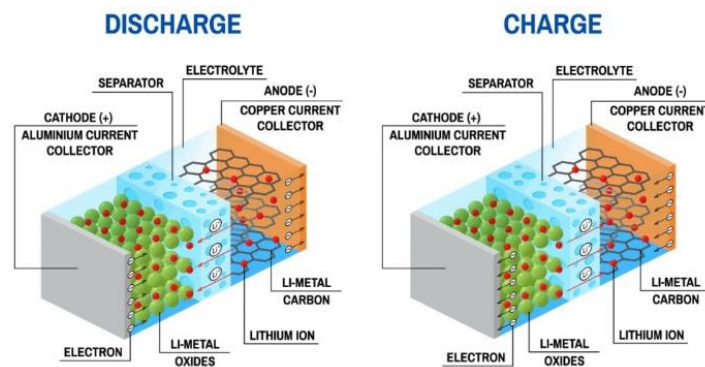


Gambar 2.2 Bentuk dan Komponen Baterai

(Sumber: gesaintech.com)

Pada dasarnya semua memiliki komponen penyusun yang sama, hanya saja beda cara merakit baterainya, sehingga bentuknya berbeda. Komponen utama penyusun baterai adalah *Slurry*. *Slurry* adalah ,bahan aktif

yang dicampur dalam *mixer* raksasa dengan bahan pengikat dan pelarut untuk membentuk cairan yang akan disebut bubur (*Slurry*) (Warner, 2019).



Gambar 2.3 Prinsip kerja baterai lithium ion

(Sumber: electricbee.co)

Selama pelepasan atau ketika digunakan (*Discharge*) ion lithium bergerak dari elektroda negatif (anoda) melalui elektrolit ke elektroda positif (katoda), elektron mengalir dari anoda melalui beban ke katoda dan akan kembali pada saat pengisian (*charge*). Arus pada baterai tercipta dari reaksi kimia antara bahan aktif dan cairan elektrolit (Purwamargapratala, Hardian, Pinem, Kartini, & Zulfa, 2023).

2.3 Baterai Lithium-Ion Sekunder

Baterai lithium-ion sekunder adalah jenis baterai isi ulang yang menggunakan ion lithium sebagai komponen utama elektrokimianya (Purwamargapratala, Sudaryanto, & Akbar., 2020). Ion lithium memiliki ukuran yang cukup kecil sehingga dapat bergerak melalui pemisah (separator) mikro-permeabel antara anoda dan katoda. Ada dua jenis baterai berdasarkan kemampuannya diisi ulang yaitu baterai primer dan sekunder. Baterai lithium dapat dibuat sebagai baterai primer ataupun sekunder. Keduanya memiliki fungsi dan karakter yang berbeda. Sebuah baterai primer memiliki kemampuan pakai satu kali saja, satu kali *discharge*, sementara baterai sekunder memiliki kemampuan *charge/discharge* berulang-ulang. Reaksi kimia dalam baterai sekunder bersifat *reversible* sedangkan pada baterai primer *irreversible*. Meski demikian keunggulan

utama dari baterai primer adalah kapasitasnya yang jauh lebih tinggi dikarenakan bagian anodanya memakai material lithium metal, dibandingkan baterai lithium sekunder yang 'lithium'-nya terkandung dalam senyawa insersi (*insertion compound*). Namun keunggulan baterai sekunder yang mampu diisi ulang ini lebih banyak aplikasinya dalam pemakaian hampir semua perangkat elektronik portabel. Sedangkan baterai lithium primer spesial yang memiliki densitas energi tinggi lebih banyak diaplikasikan untuk tujuan khusus, seperti dalam militer yang digunakan sebagai sumber energi dala berbagai teknologi balistik.

Baterai Lithium-ion dengan ukuran paket yang relatif kecil, mereka mengemas energi yang besar. Baterai ini termasuk jenis baterai sekunder, yaitu baterai sekunder adalah baterai yang dapat diisi ulang sehingga dapat digunakan kembali dan memiliki siklus hidup yang panjang (Asmae Berrada, 2019) (Purwamargapratala, et al., 2023). Baterai lithium ini sedang dikembangkan secara luas untuk perangkat elektronik dan kendaraan listrik (Benjamin Schumma, 2023) (Lvwei Huang, 2019). Kelebihan yang dimiliki baterai li-ion adalah dimensi yang kecil, kemampuan penyimpanan daya yang lebih baik. (Tianmei Chen, 2020). Baterai jenis ini juga memiliki kekurangan, yaitu temperatur yang tinggi mempercepat baterai lithium ion untuk terdegradasi (Yongquan Sun, 2021).

2.4 Manufaktur Baterai

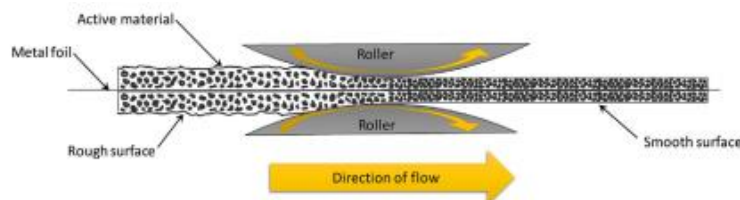
Tahap pertama dalam pembuatan baterai adalah dengan mencampur (*mixing*) material aktif yang di perlukan dalam suatu mesin pencampur dengan menambahkan cairan untuk membentuk sesuatu yang disebut "*Liquid-slurry*". Komposisinya terdiri dari material aktif anoda/katoda, cairan yang berdasarkan *N-Methyl Pyrrolidone* (NMP), satu atau lebih karbon konduktif seperti karbon hitam, bahan perekat berdasarkan *polyvinylidene flouride* (PVDF) yang berguna untuk menggabungkan semuanya menjadi satu (Warner, 2019).



Gambar 2.4 Mesin *mixing*

(Sumber: Alibaba.com)

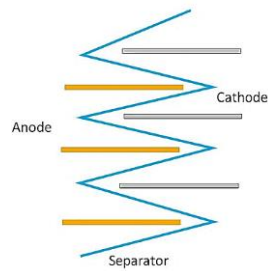
Langkah berikutnya pelapisan, Proses ini membuat *slurry* melapisi aluminium *foil* dengan ketebalan yang terkontrol, setelah itu aluminium yang sudah dilapisi akan dikeringkan. Setelah kering lembaran yang terlalu lebar akan di potong dengan mesin *slitting* dengan lebar yang kita inginkan, setelah itu masuk ketahap penekanan (*pressing/calendering*). Proses kalendering bertujuan meningkatkan kepadatan energi elektroda dan meningkatkan konduktivitas elektrik dengan parameter tekanan dan temperatur kalendering (Emiliano N. Primo, 2021) .



Gambar 2.5 Proses Kalendering

(Sumber: (Warner, 2019)

Setelah itu lembaran bisa digulung untuk membentuk baterai silinder ataupun baterai *pouch* prismatic. Baterai *pouch stacking* memerlukan proses pemotongan lebih dulu sesuai cetakan. Kemudian baterai bisa di rakit dan dimasukkan kedalam *glove box* untuk dilakukan pengisian elektrolit. Setelah itu baterai harus didiamkan selama satu hari agar cairan elektrolit yang dimasukkan dapat membasahi seluruh komponen baterai, proses tersebut disebut proses *aging*.



Gambar 2.6 Menyusun baterai *pouch stacking* dengan *Z-Fold Separator*

(Sumber: (Warner, 2019))

Berikutnya gulungan akan di masukan ke dalam bungkusnya (*case*), bisa berbentuk silinder, kantong maupun prismatic. Wadah sel kantong selanjutnya divacuum untuk memaksa elektrolit meresap melalui lapisan senyawa yang ditumpuk atau dilipat dengan keempat tepi ditutup rapat. *Formation* merupakan proses pengisian dan pengosongan awal untuk sel baterai dan sangat mirip untuk sel silinder, *hard-case*, dan kantong. Selama proses *formation*, gas terbentuk dan menumpuk di dalam wadah. Sel kantong bergantung pada ukuran kantong tambahan yang terpasang, yang dirancang untuk menyerap pembentukan gas. Kantong tambahan berisi gas selanjutnya dipotong dan sel kantong disegel kembali (Schröder, Aydemir, & Seliger, 2017).

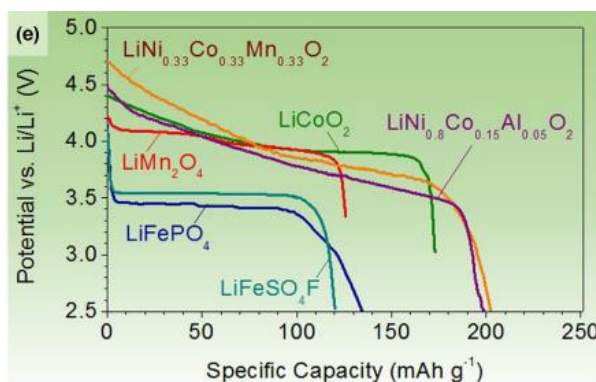
Proses penuaan berlangsung pada suhu berbeda hingga 30 hari dan merupakan langkah proses terakhir dalam pembuatan sel. Selama proses *aging* akan terbentuk lapisan *solid electrolyte interphase (SEI)* dibagian material anoda. Ketika lapisan SEI itu terbentuk akan muncul juga gas yang berasal dari reaksi pembentukan ini. Gas tersebut harus di keluarkan agar tidak menyebabkan masalah keamanan, dan tidak mengurangi umur pakai dari selnya (Warner, 2019). kemudian sel baterai lanjut ke tahap pengujian tegangan untuk memastikan baterai tidak mengalami *short circuit*.

2.5 Material Katoda

Katoda interkalasi adalah jaringan host yang solid, yang dapat menyimpan ion tamu. Ion tamu dapat dimasukkan dan dikeluarkan dari jaringan host secara terbalik. Dalam baterai Li-ion, Li^+ adalah ion tamu dan

senyawa jaringan inangnya adalah logam kalkogenida, oksida logam transisi, dan senyawa polianion. (Naoki Nitta, 2015). LiTiS_2 (LTS) dipelajari secara luas karena kepadatan energi gravimetrinya yang tinggi dikombinasikan dengan siklus hidup yang panjang (1000+ siklus) dan akhirnya dikomersialkan oleh Exxon (Whittingham, 2004).

Namun, sebagian besar penelitian katoda interkalasi saat ini difokuskan pada senyawa oksida logam transisi dan polianion karena tegangan operasinya yang lebih tinggi dan kemampuan penyimpanan energi yang lebih tinggi. Biasanya, katoda interkalasi memiliki kapasitas spesifik 100–200 mAh/g dan tegangan rata-rata 3–5 V.



Gambar 2.7 profil pelepasan katoda-katoda interkalasi (Fisher, 2014) (Adam Sobkowiak, 2013) (Surendra K. Martha, 2011).

2.5.1 LiCoO_2 (LCO)

Pertama kali diperkenalkan oleh Mizushima (K. Mizushima, 1980) adalah bentuk katoda oksida logam transisi berlapis yang pertama dan paling sukses secara komersial. Awalnya dikomersialkan oleh SONY, dan bahan ini masih digunakan di sebagian besar baterai Li-ion komersial. LCO adalah bahan katoda yang sangat menarik karena kapasitas spesifik teoretisnya yang relatif tinggi yaitu 274 mAh.g^{-1} , kapasitas volumetrik teoretis yang tinggi sebesar 1363 mAh.cm^{-3} , *self-discharge* rendah, tegangan debit tinggi, dan performa siklus yang baik (Aurelien Du Pasquier, 2003). Keterbatasan utamanya adalah biaya tinggi, stabilitas termal rendah, dan kapasitas cepat memudar pada laju arus tinggi atau selama siklus dalam. Katoda LCO mahal

karena tingginya biaya Co dan stabilitas termal yang rendah. LCO memiliki stabilitas termal terendah dari semua bahan katoda komersial (Roth, 2012).

2.5.2 LiNiO₂ (LNO)

LNO memiliki struktur kristal yang sama dengan LiCoO₂ dan kapasitas spesifik teori berkisar 275 mAh.g⁻¹. LNO juga lebih tidak stabil secara termal dibandingkan LCO karena Ni³⁺ lebih mudah tereduksi dibandingkan Co³⁺ (Hajime Arai, 1998).

2.5.3 LiMnO₂ (LMO)

Material ini menjanjikan karena Mn jauh lebih murah dan kurang beracun dibandingkan Co atau Ni. LMO berlapis anhidrat dan stoikiometri disiapkan hampir dua dekade lalu. Namun demikian, stabilitas siklus LMO yang buruk (terutama pada suhu tinggi) telah menghambat komersialisasi secara luas.

2.5.4 LiFePO₄ (LFP)

LFP adalah material yang mewakili struktur olivin, yang terkenal dengan stabilitas termal dan kemampuan daya tinggi (Roth, 2012). Namun secara umum, kepadatan rendah elektroda LFP berstruktur nano dan potensial rata-rata yang rendah membatasi kepadatan energi sel LFP.

2.5.5 LiFeSO₄F (LFSF)

LFSF menjadi salah satu bahan katoda yang menarik karena tegangan selnya yang tinggi dan kapasitas spesifik yang berkisar 151 mAh.g⁻¹ (N. Recham, 2009). Untungnya LiFeSO₄F memiliki konduktivitas ionik/elektronik yang lebih baik sehingga tidak terlalu membutuhkan lapisan karbon dan/atau nanopartikel. LiFeSO₄F juga dapat ekonomis karena dapat dipersiapkan dengan sumber daya yang melimpah.

2.5.6 LiNi_xCo_yMn_zO₂ (NCM, aka NMC)

NMC memiliki kapasitas spesifik yang dapat dicapai serupa atau lebih tinggi dibandingkan LCO dan tegangan operasi serupa namun memiliki biaya lebih rendah karena kandungan Co berkurang. LiNi_{0,33}Co_{0,33}Mn_{0,33}O₂ adalah bentuk umum NMC dan banyak

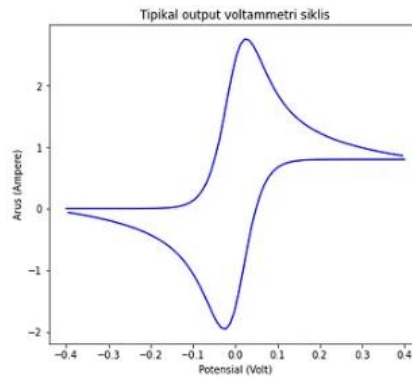
digunakan di pasar baterai. Beberapa upaya baru-baru ini, seperti pembentukan NMC berpori makro, menunjukkan kapasitas spesifik reversibel setinggi 234 mAh g⁻¹ dan kemampuan siklus yang baik bahkan pada temperatur 50°C (K. M. Shaju, 2006).

2.6 Performa Baterai

Performa baterai yang diukur bisa terdiri dari kapasitas hingga kepadatan energi. Kepadatan energi adalah jumlah energi yang tersimpan dalam suatu sistem per liter atau per kilogram. Dibandingkan dengan sel kantong, *case* sel silinder dan sel *hard case* lebih berat. Hal ini menyebabkan berkurangnya kepadatan energi. Selain itu, desain gabungan yang ditumpuk atau dilipat, seperti yang digunakan untuk sel kantong, menunjukkan kepadatan energi volumetrik dan gravimetri yang lebih tinggi, yang mewakili atribut menarik untuk aplikasi otomotif. Karena bentuknya yang bulat, kerapatan pengepakan LIB silinder yang disambung secara elektrik lebih rendah dibandingkan kerapatan pengepakan LIB prismatic (Schröder, Aydemir, & Seliger, 2017). Ada beberapa pengujian yang bisa dilakukan untuk mengetahui performa baterai. Baterai yang dihasilkan dengan material katoda NMC541 diuji menggunakan beberapa alat uji yang ada di Pusat Riset Fisika (PRF-BRIN) sebagai berikut:

2.6.1 *Cyclic Voltammetry* (CV)

Pengujian CV dilakukan untuk mengonfirmasi puncak reduksi atau oksidasi. Voltmeter siklik adalah teknik elektrokimia untuk mengukur respons arus larutan redoks dengan memindai bolak-balik dengan potensial linier. Metode ini dapat diterapkan untuk memperoleh informasi tentang termodinamika proses redoks, tingkat energi analit, dan kinetika reaksi transfer elektron.

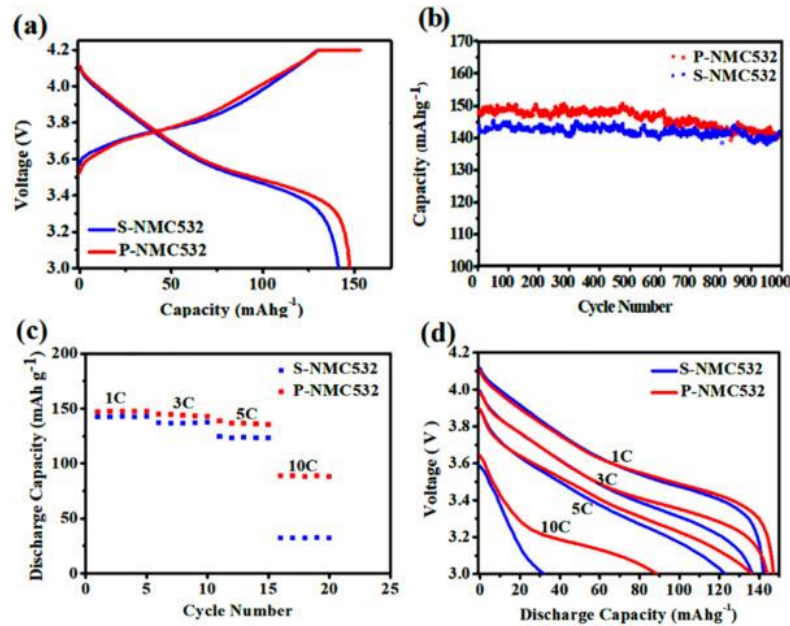


Gambar 2.8 Contoh Grafik Hasil CV
(Sumber: van-plaosan.medium.com)

Potensiometer digunakan untuk menyapu potensial linier antara elektroda kerja dan elektroda referensi hingga tercapai batas yang telah ditentukan. Pada titik balik, energi potensial disapu ke arah yang berlawanan. Proses ini diulangi beberapa kali selama pemindaian dan pengukuran perubahan arus antara elektroda kerja dan elektroda referensi. Seseorang memperoleh grafik karakteristik berbentuk bebek yang dikenal sebagai voltmeter siklik.

2.6.2 Charge-Discharge (CD)

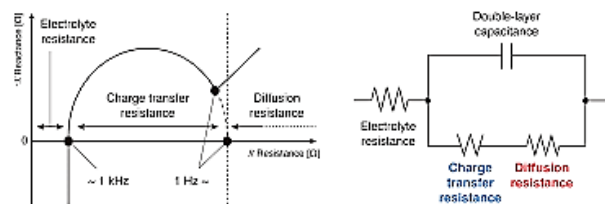
Pengujian CD dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui kapasitas spesifik baterai pada saat proses *charge* maupun *discharge*. Selain itu juga bisa untuk mengetahui kemampuan siklus baterai dan variasi arus *charge-discharge* (*C-Rate*).



Gambar 2.9 Contoh hasil CD (a) Kurva CD muatan awal dalam sel penuh pada 1C; (b) siklus hidup kapasitas CD dalam sel penuh pada 25 °C; (c) kapasitas pelepasan laju dan (d) kurva pelepasan muatan (Xiaopei Zhu, 2022).

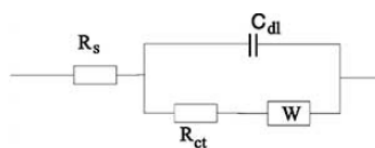
2.6.3 Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)

Pengujian EIS dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui nilai R_s dan R_{ct} dari baterai yang ada. Impedansi elektrokimia biasanya diukur dengan menerapkan potensial AC ke sel elektrokimia dan kemudian mengukur arus yang melalui sel.



Gambar 2.10 Contoh Plot Nyquist (EIS)

(Sumber:gamry.com)

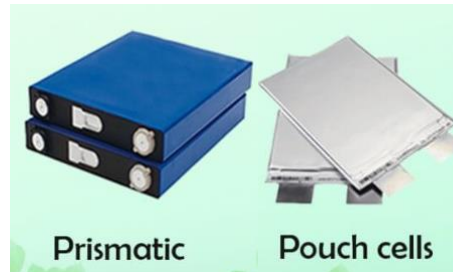


Gambar 2.11 Equivalent Circuit and Charge-Transfer Control

(Sumber:gamry.com)

2.7 Baterai Kantung (*Pouch Stacking* dan *Prismatic*)

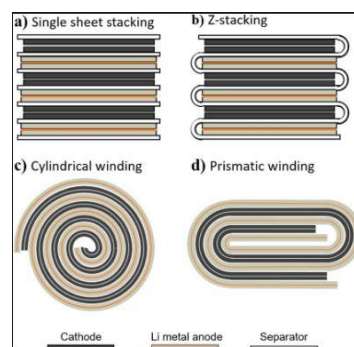
Baterai kantung atau *pouch* dibagi menjadi 2 berdasarkan susunannya, yaitu baterai *pouch stacking* dan baterai *pouch prismatic*.



Gambar 2.12 Baterai *pouch stacking* dan *prismatic*
(Sumber:takomabattery.com)

Meskipun kedua jenis sel ini memiliki banyak kesamaan, keduanya juga memiliki ciri-ciri berbeda yang membedakannya. Setiap bentuk memiliki kekurangan dan kelebihan masing-masing.

Baterai lithium-ion prismatic adalah baterai dengan sel prismatic atau tumpukan sel prismatic. Sel prismatic adalah sel yang selnya dibungkus dalam selubung yang terbuat dari baja atau aluminium. Baterai lithium-ion prismatic menawarkan stabilitas lebih dibandingkan jenis baterai lainnya. Baterai lithium-ion kantong memiliki plastik aluminium yang menutupi lithium-ion cair atau agak padat. Baterai litium kantong menggunakan sel kantong yang menggunakan tab foil konduktif, bukan silinder logam sebagai pemegang elektroda. Sel kantong tidak memiliki bentuk atau ukuran standar. Oleh karena itu, setiap produsen sel kantong dapat mendesainnya sendiri sesuai kebutuhan.



Gambar 2.13 Jenis-Jenis Gulungan Elektroda baterai
(Sumber:researchgate.com)

2.7.1 Perbedaan Sel Prismatik vs sel *pouch stacking*

Secara bentuk sel prismatik dan kantong berbentuk persegi panjang. Namun bentuk pouchnya lebih fleksibel dan dapat disesuaikan dengan kebutuhan pengaplikasiannya. Sel prismatik menggunakan penutup aluminium atau baja yang dikeraskan, sedangkan sel kantong menggunakan tab foil konduktif (penutup aluminium foil berlapis polimer). Penutup sel kantong membuatnya fleksibel. Secara ukuran Sel prismatik mungkin berukuran sedikit lebih besar. Namun, karena desainnya tunduk pada persyaratan pabrikan, keduanya dapat dibuat lebih besar atau lebih kecil tergantung kebutuhan. Secara kapasitas sel Karena fleksibilitas desainnya, kapasitas sel kantong dapat ditingkatkan. Namun, sel prismatik memiliki kapasitas lebih besar karena dapat ditumpuk dalam wadah kaku lebih baik daripada sel dalam kantong. Dari segi ketahanan, sel kantong lebih rentan rusak akibat suhu dan kelembapan yang tinggi. Hal ini dapat berdampak negatif terhadap *life time* dari baterai. Dalam hal ini, sel prismatik lebih baik daripada sel kantong. Namun, jika kondisi baterai juga buruk, kemungkinan baterai kantong meledak dan terbakar akan jauh lebih kecil dibandingkan baterai persegi, dan hanya akan tampak menggelembung. Harga baterai sampai batas tertentu bergantung pada standarisasi produksi dan pengaruh faktor-faktor seperti bahan baku baterai. Namun produksi sel kantong lebih mahal dibandingkan sel prismatik karena volume dan biaya bahannya. Selain itu, proses produksi sel kantong lebih rumit dibandingkan dengan sel prismatik. Secara umum, sel kantong lebih mahal.

2.7.2 Penerapan sel prismatik vs sel *pouch stacking*

Sel kantong, karena ringan, andal, fleksibel, dan ukurannya yang kecil, lebih disukai untuk perangkat seperti ponsel pintar, drone, dan laptop ultra tipis. Sel ini juga lebih aman dibandingkan sel prismatik karena kecil kemungkinannya untuk meledak. Sebaliknya, sel prismatik lebih baik untuk ESS (*energy storage system*) dan mobil listrik. Meskipun kinerja sel-sel ini bergantung pada tempat

penggunaannya, sel kantong memiliki kinerja lebih baik per area aplikasi. Sel prismatic lebih rentan terhadap masalah pengelolaan panas. Sel prismatic yang lebih kecil yang digunakan pada ponsel, tablet, dan laptop memiliki kapasitas mulai dari 800 mAh hingga 4000 mAh. Desain sel prismatic yang lebih besar digunakan dalam sistem penyimpanan energi seperti pasokan daya baterai dan *powertrain* listrik untuk kendaraan listrik dan hibrida.

2.7.3 Kelebihan dan kekurangan sel prismatic vs sel *pouch stacking*

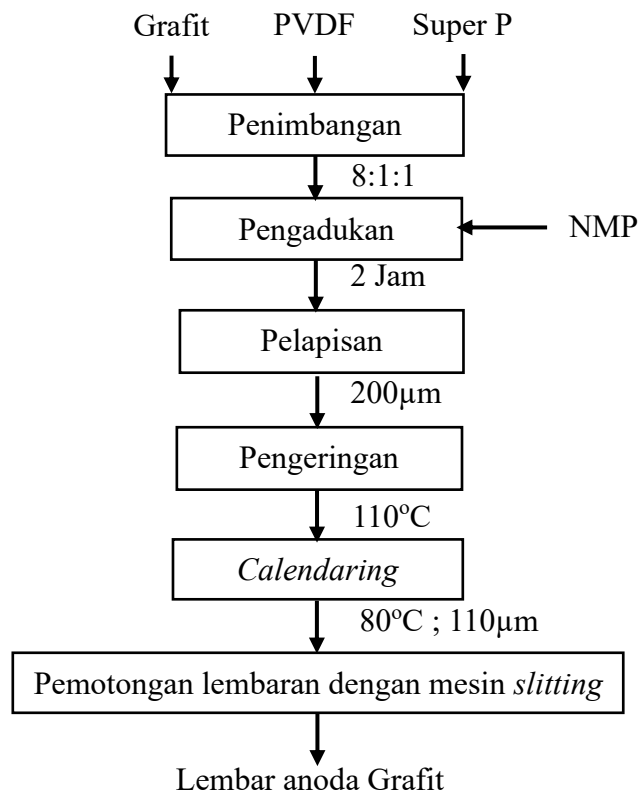
Kelebihan sel kantong yaitu: siklus hidupnya panjang. Serangkaian pengujian pada sel-sel ini menemukan bahwa setelah 4000 siklus pengisian daya. Sel kantong lebih aman dibandingkan jenis sel lainnya. Bahkan ketika mereka mempunyai masalah internal dan membengkak, sel-sel kantong dapat mengatasi tekanan tersebut. Kekurangan sel kantong yaitu sel kantong menawarkan ketahanan beban mekanis yang relatif lebih buruk dibandingkan dengan sel silinder. Sel kantong lebih mahal untuk diproduksi dibandingkan sel baterai tradisional. Kelebihan sel prismatic yaitu: Sel prismatic memiliki lebih banyak energi per sel dibandingkan dengan sel silinder. Sel prismatic lebih murah untuk diproduksi dibandingkan dengan sel silinder. Kekurangan sel prismatic yaitu: *packaging* yang berat (baja atau aluminium) dari baterai sel prismatic memiliki efek membatasi kepadatan energi paket baterai.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

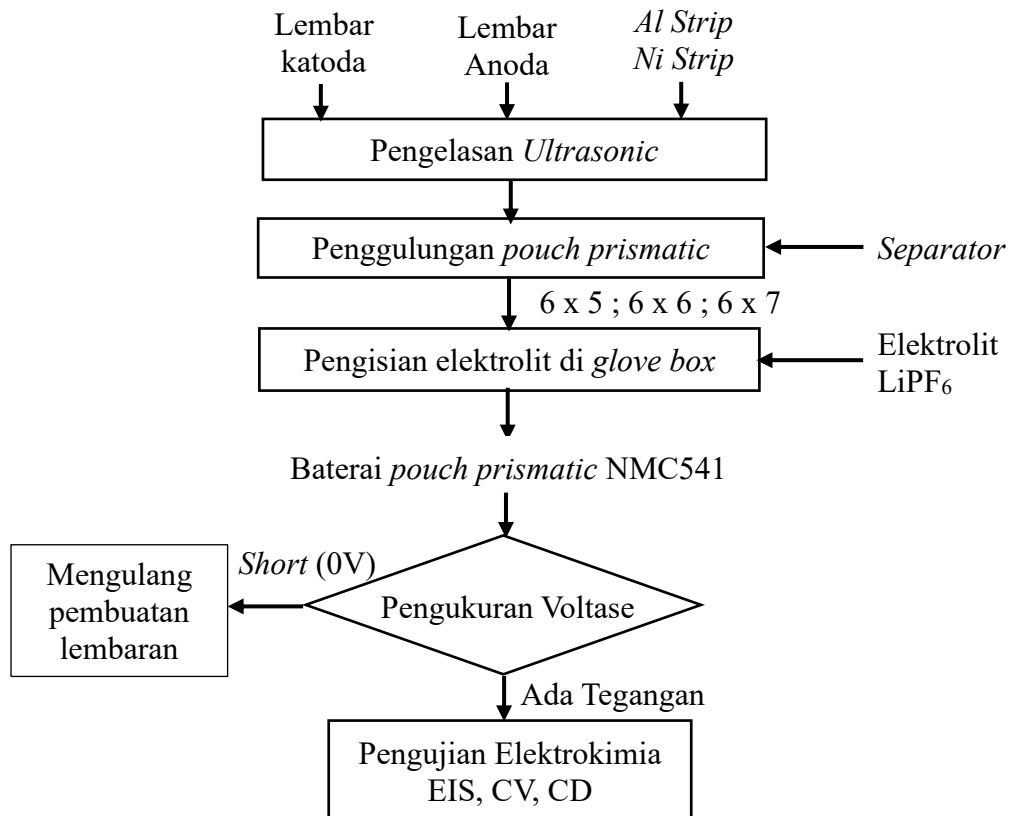
3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini terdiri dari proses pembuatan lembaran NMC541, lembaran anoda grafit dan proses perakitan dan pengujian baterai *pouch prismatic*. Dibawah ini adalah diagram alir pembuatan anoda grafit:



Gambar 3.1 Diagram Alir pembuatan lembaran anoda Grafit

Pembuatan lembaran katoda NMC541 dilakukan dengan cara yang sama dengan diagram alir diatas, hanya saja menggunakan material NMC541 dan rasio penimbangan (material aktif : PVDF : super P) sebesar (9:0,5:0,5). Lembaran katoda dan anoda yang sudah jadi kemudian di lakukan pengujian LCR terlebih dahulu untuk mengetahui konduktivitas bahan tersebut.



Gambar 3.2 Diagram Alir perakitan dan pengujian baterai

3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Gedung 440 Pusat Riset Fisika (PRF) KST BJ Habibie, Serpong, Tangerang Selatan, Banten pada bulan agustus sampai oktober 2023.

3.3 Alat dan Bahan

Berikut ini adalah alat dan bahan yang digunakan selama melakukan percobaan:

3.3.1 Alat yang Digunakan

Berikut adalah alat-alat yang digunakan selama penelitian:

1. Timbangan Digital

Alat ini digunakan untuk menimbang material aktif yang digunakan, dengan beban maksimal 500 gram.



Gambar 3.3 Timbangan Digital
(Sumber: Dokumen Pribadi)

2. Mesin *Vacuum Mixer*

Alat ini digunakan untuk proses *mixing* agar lebih merata, pengadukan dilakukan dalam keadaan *vacuum*.



Gambar 3.4 *Vacuum Mixer*
(Sumber: Dokumen Pribadi)

3. Wadah Logam

Alat ini sebagai wadah penampungan *slurry* yang akan diaduk dengan mesin *Vacuum Mixer*



Gambar 3.5 Wadah Logam
(Sumber: Dokumen Pribadi)

4. Spatula

Alat ini digunakan untuk menuangkan *slurry* ke atas aluminium *foil* saat proses pelapisan.



Gambar 3.6 Spatula

(Sumber: Dokumen Pribadi)

5. Mesin *Coating*

Alat ini digunakan untuk melakukan proses pelapisan material aktif keatas aluminium *foil*



Gambar 3.7 Mesin *Coating*

(Sumber: Dokumen Pribadi)

6. Mesin Kalendering

Alat ini digunakan untuk melakukan penekanan (*hot press*) kepada lembaran katoda.



Gambar 3.8 Mesin Kalendering

(Sumber: Dokumen Pribadi)

7. Mesin Slitting

Alat ini digunakan untuk memotong lembaran katoda maupun anoda.



Gambar 3.9 Mesin Slitting

(Sumber: Dokumen Pribadi)

8. *Glove Box*

Alat ini digunakan untuk melakukan perakitan baterai koin dan pengisian elektrolit.



8

Gambar 3.10 Glove Box
(Sumber: Dokumen Pribadi)

9. Pipet

Alat ini digunakan untuk meneteskan pelarut (NMP).



Gambar 3.11 Pipet
(Sumber: Dokumen Pribadi)

10. Mesin Uji LCR

Alat ini digunakan untuk mengetahui nilai konduktivitas dari sampel



Gambar 3.12 HIOKI LCR
(Sumber: Dokumen Pribadi)

11. Mesin Uji CV

Alat ini digunakan untuk mengetahui nilai tegangan pada baterai



Gambar 3.13 Mesin Uji CV
(Sumber: Dokumen Pribadi)

12. Mesin Uji CD

Alat ini digunakan untuk mengetahui kemampuan baterai terhadap siklus pemakaian.



Gambar 3.14 Mesin *Charge-Discharge*
(Sumber: Dokumen Pribadi)

13. Mesin Uji EIS

Alat ini digunakan untuk mengukur impedansi dari baterai.



Gambar 3.15 Mesin Uji EIS
(Sumber: Dokumen Pribadi)

3.3.2 Bahan yang Digunakan

Berikut adalah bahan-bahan yang digunakan selama penelitian:

1. Bubuk NMC 541

Bahan ini digunakan sebagai material aktif katoda



Gambar 3.16 Bubuk NMC 541

(Sumber: Dokumen Pribadi)

2. PVDF

Bahan ini digunakan sebagai pengikat / *binder*



Gambar 3.17 Bubuk PVDF

(Sumber: Dokumen Pribadi)

3. *Carbon Conductive (Super P)*

Bahan ini digunakan sebagai penambah konduktivitas material.

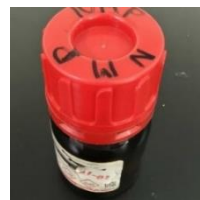


Gambar 3.18 Super P

(Sumber: Dokumen Pribadi)

4. NMP

Bahan ini digunakan sebagai pelarut

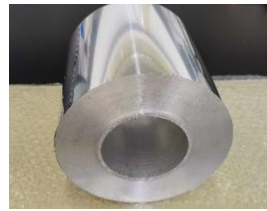


Gambar 3.19 Pelarut NMP

(Sumber: Dokumen Pribadi)

5. Aluminium Foil

Bahan ini digunakan sebagai alas *slurry*



Gambar 3.20 Alumunium Foil

(Sumber: Dokumen Pribadi)

6. Elektrolit LiPF₆

Bahan ini digunakan sebagai medium transpor ion.



Gambar 3.21 Cairan elektrolit

(Sumber: Dokumen Pribadi)

3.4 Prosedur Penelitian

Berikut ini adalah prosedur percobaan yang digunakan dalam penelitian:

1. Melakukan pembuatan lembaran elektroda baterai.
2. Menimbang bahan aktif katoda, karbon konduktif dan PVDF dengan perbandingan 9:0,5:0,5. (perbandingan 8:1:1 untuk anoda).
3. Masukkan semua bahan kedalam wadah logam.
4. Memberikan NMP secukupnya kedalam wadah logam. (NMP:*Solid particle* = 70:30)
5. Melakukan proses *mixing* dengan mesin *vacuum mixer* selama 2 jam.
6. Melakukan proses *coating* dengan ketebalan 200 μm pada kedua sisi dengan temperatur pengeringan 110°C dan kecepatan *coating* 250mm/min.
7. Melakukan proses pemotongan dengan mesin *slitting*.

8. Melakukan proses kalendering lembar katoda sampai ketebalan menjadi 110 μm , dengan temperatur kalendering 80 $^{\circ}\text{C}$
9. Melakukan perakitan dengan variasi ukuran baterai.
10. Melakukan pengisian elektrolit baterai *pouch prismatic* didalam *glove box*.
11. Menguji performa baterai dengan menggunakan mesin uji LCR, EIS, CV, dan CD.
12. Melakukan analisis data performa baterai *pouch prismatic* dengan variasi dimensi baterai.

3.5 Karakterisasi dan Analisis Performa

3.5.1 Cyclic Voltammetry (CV)

Pengujian CV ini dilakukan Wonnatech untuk mengetahui koefisien difusi ion lithium dari sampel. Hasil dari pengujian ini berupa data tegangan dan arus dalam bentuk grafik yang disebut *cyclic voltammogram*. Data pengujian CV ini akan menunjukkan reversibilitas proses redoks yang terjadi ketika tegangan input dialirkan ke dalam sampel baterai dan dapat diperoleh nilai koefisien difusi ion lithiumnya. Pengujian CV digunakan untuk mengukur koefisien difusi ion Li^+ melalui persamaan Randles- Selvcik (Zhu, 2019).

$$i_p = 2,69 \times 10^5 \cdot n^{3/2} A C \cdot \sqrt{Dv} \dots \dots \dots (3.1)$$

Keterangan:

i_p = arus puncak maksimum (A)

n = jumlah elektron yang ditransfer dalam reaksi redoks (biasanya 1)

A = luas elektroda (cm^2)

D = koefisien difusi ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$),

C = konsentrasi ($\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3}$),

v = scan rate ($\text{V} \cdot \text{s}^{-1}$).

Pengujian dilakukan dengan menggunakan *automatic battery cycler* WBCS3000 merek Wonateck di Pusat Riset Fisika-Badan Riset Inovasi Nasional (PRF-BRIN).

3.5.2 *Charge-Discharge (CD)*

Analisis *charge-discharge* dilakukan dengan alat *automatic battery cycler* WBCS300 untuk menentukan nilai kapasitas spesifik dari baterai, khususnya kapasitas *discharging*. Pada pengujian ini digunakan mode constant current dan dilakukan variasi arus. Data yang diperoleh dari pengujian ini diolah juga dengan menggunakan software WBCS3000 dengan memasukkan nilai tegangan dan besar arus yang dikalikan dengan waktu maka akan diperoleh grafik tegangan sebagai fungsi *charge-discharge capacity* (mAh/gram) yang juga dinamakan grafik *charge-discharge*. Pengujian *charge-discharge* dilakukan dengan menggunakan *automatic battery cycler* WBCS3000 merek Wonateck di Pusat Riset Fisika-Badan Riset Inovasi Nasional (PRF-BRIN).

3.5.3 *Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)*

Pengujian EIS dilakukan dengan memberikan tegangan AC sebagai sumber tegangan dan variasi frekuensi (0.1 –50 kHz) kepada baterai katoda $\text{LiNi}_{0,5}\text{Mn}_{0,4}\text{Co}_{0,1}\text{O}_2$. Hasil dari pengujian EIS berupa kurva semicircle yang diolah menggunakan software Nova 1.11 untuk mengetahui nilai R_s dan R_{ct} . Analisis EIS ini digunakan untuk mengetahui interaksi elektron dan ion Li yang berpindah dari katoda ke anoda dan sebaliknya. Sehingga dapat diketahui nilai konduktivitas elektrik dari material katoda $\text{LiNi}_{0,5}\text{Mn}_{0,4}\text{Co}_{0,1}\text{O}_2$ pada baterai lithium ion tersebut. Pengujian impedansi dilakukan dengan menggunakan alat EIS Autolab AUT85998 dan software Nova autolab versi 1.11 di Pusat Riset Fisika-Badan Riset Inovasi Nasional (PRF-BRIN).

BAB IV

DATA DAN ANALISA

4.1 Komposisi *Slurry* Katoda dan Anoda

Slurry akan dituangkan diatas aluminium foil untuk proses *coating*. Aluminium foil yang digunakan berukuran lebar 15 cm. Bagian lebar yang terlapsi oleh *slurry* hanya 13 cm saja. Pembuatan anoda dilakukan dengan cara yang sama dengan menggunakan bahan aktif grafit. *Copper foil* yang digunakan berukuran lebar 25 cm. Bagian lebar yang terlapsi oleh *slurry* hanya 13 cm saja. Massa jenis dari pelarut NMP sebesar 1,028 gr/ml.

Berikut ini adalah komposisi dari bahan aktif katoda/anoda, pengikat PVDF dan karbon konduktif super P yang digunakan untuk membuat *slurry* dan melapsi foil dengan ukuran 160 cm x 13 cm:

Tabel 4.1 Komposisi *slurry* anoda

BAHAN	RASIO	JUMLAH (gr)
Grafit	0,8	29,04
Super P	0,1	3,63
PVDF	0,1	3,63
Total Solid Content (gr)		36,3

Tabel 4.2 Perhitungan Jumlah Pelarut NMP Anoda

FASE	RASIO	JUMLAH (ml)
<i>Solid</i>	0,3	36,3
<i>Liquid</i> (NMP)	0,7	84,7

Tabel 4.3 Komposisi *slurry* katoda

BAHAN	RASIO	JUMLAH (gr)
NMC541	0,9	39,6
Super P	0,05	2,2
PVDF	0,05	2,2
Total Solid Content (gr)		44

Tabel 4.4 Perhitungan Jumlah Pelarut NMP Katoda

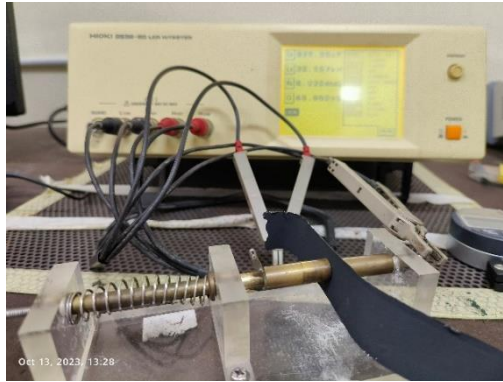
FASE	RASIO	JUMLAH (ml)
<i>Solid</i>	0,3	44
<i>Liquid (NMP)</i>	0,7	102,67

Dalam pembuatan katoda digunakan rasio bahan aktif lebih tinggi yaitu 9:0,05:0,05 sedangkan untuk anoda grafit rasio komposisi *slurry* yang digunakan adalah 8:1:1 karena dari penelitian sebelumnya menghasilkan baterai dengan performa yang baik (Yuan, et al., 2022). Masing-masing komposisi di aduk menggunakan *vacuum mixer*. Dalam melakukan proses *mixing* urutan pengadukan juga menentukan hasil. Pada penelitian ini PVDF dan NMP di aduk terlebih dahulu sampai terlarut sekitar 45 menit. Setelah PVDF larut, di tambahkan super P dan di aduk sampai larut sekitar 15 menit, terakhir dimasukan bahan aktif dan dimulai pengadukan selama 2 jam. Setelah selesai proses *mixing* kemudian *slurry* yang terbentuk harus segera *dicoating*-kan.

4.2 Analisa Data LCR

Konduktivitas adalah nilai yang mempengaruhi perpindahan ion litium dari anoda ke katoda (*discharge*) dan dari katoda ke anoda (*charge*). Jika konduktivitas materialnya bagus, transfer ion litium akan cepat. Sebaliknya, jika konduktivitas material buruk, transfer ion litium akan lambat (Purwamargapratala, Sari, & Kartini, 2021).

Lembaran katoda yang terbentuk kemudian di uji LCR untuk mengetahui konduktivitasnya dengan variasi frekuensi pengujian 42 Hz – 1 MHz dan *probe* jepit dengan luas area 0,785 cm² pada suhu ruangan. Untuk setiap elektroda dilakukan dua kali pengukuran. Pengukuran LCR ditunjukkan pada gambar dibawah ini:



Gambar 4.1 Pengukuran LCR

Perhitungan nilai konduktivitas di tentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\sigma = G \frac{l}{A}$$

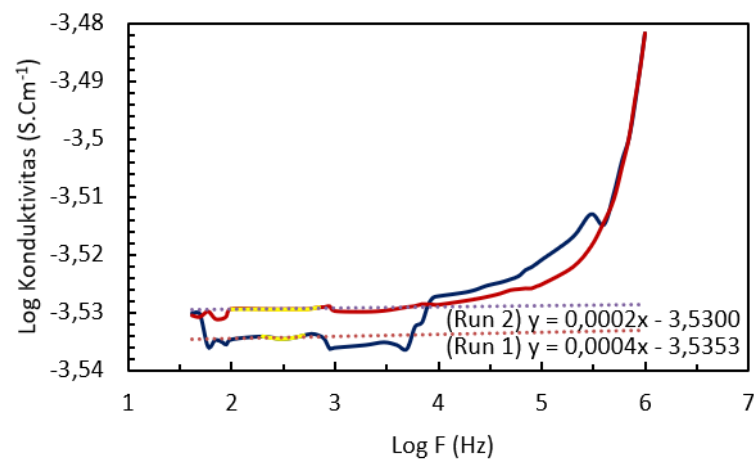
Keterangan:

σ = Konduktivitas (Siemens/cm)

G = Konduktansi (Siemens)

l = Tebal elektroda (cm)

A = Luas area (cm²)



Gambar 4.2 Hasil pengukuran LCR katoda

Dari hasil pengukuran konduktansi katoda menggunakan alat HIOKI LCR sebanyak dua kali didapat nilai sebesar 0,0002915 dan 0,0002951 S.cm⁻¹ dengan rerata nilai konduktansi sebesar 0,0002933 S.cm⁻¹. Ketebalan katoda

double side coated yang diukur sebesar 0,0228 cm. Dibawah ini adalah cara menghitung nilai konduktivitasnya:

$$\log_{10} \sigma = -3,53$$

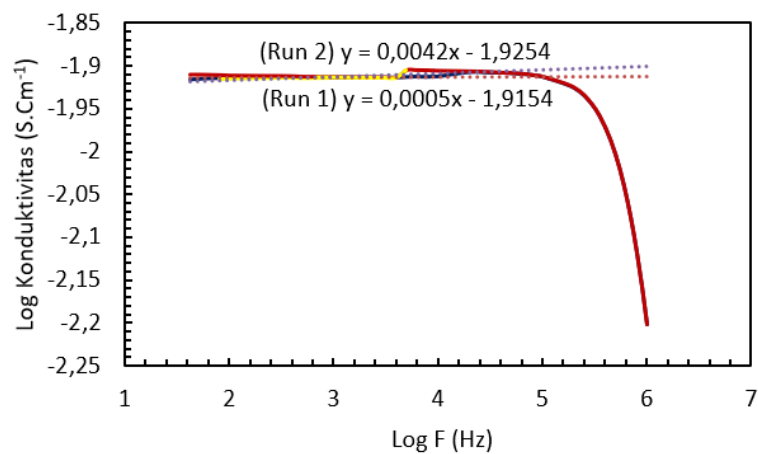
$$\sigma = 10^{-3,53}$$

$$\sigma = 0,0002951 \text{ S. cm}^{-1}$$

$$\log_{10} \sigma = -3,5353$$

$$\sigma = 10^{-3,5353}$$

$$\sigma = 0,0002915 \text{ S. cm}^{-1}$$



Gambar 4.3 Hasil pengukuran LCR anoda

Dari hasil pengukuran konduktansi anoda menggunakan alat HIOKI LCR sebanyak dua kali didapat nilai sebesar 0,0121507 dan 0,0118741 S.cm⁻¹ dengan rerata nilai konduktansi sebesar 0,0120124 S.cm⁻¹. Ketebalan anoda *double side coated* yang diukur sebesar 0,0181 cm.

$$\log_{10} \sigma = -1,9154$$

$$\sigma = 10^{-1,9154}$$

$$\sigma = 0,0121507 \text{ S. cm}^{-1}$$

$$\log_{10} \sigma = -1,9254$$

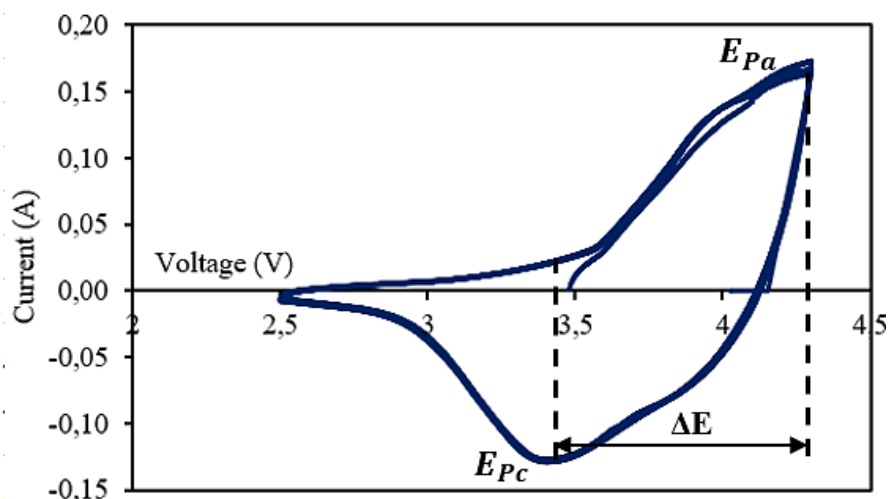
$$\sigma = 10^{-1,9254}$$

$$\sigma = 0,0118741 \text{ S. cm}^{-1}$$

4.3 Analisa Data *Cyclic Voltammetry* (CV)

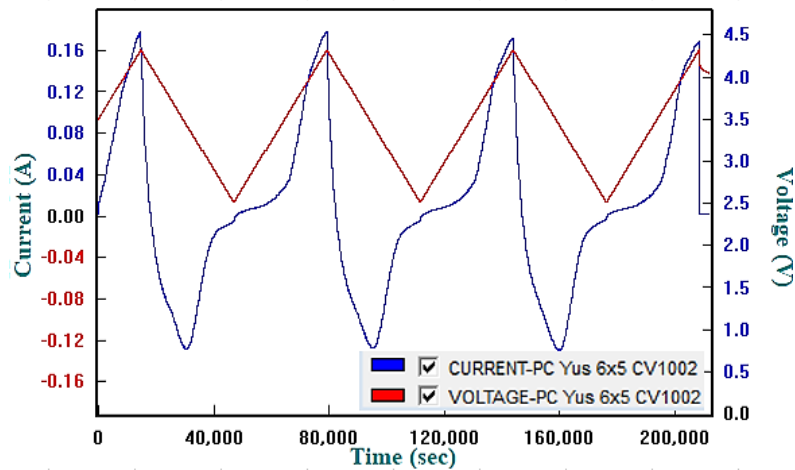
Untuk menyelidiki penyisipan dan pelepasan Li-ion dalam sel sampel, pengujian *cyclic voltammetry* (CV) dilakukan dalam rentang tegangan 2,5 hingga 4,3 V pada *scan rate* 60 $\mu\text{V/s}$. Pada grafik CV terdiri atas dua puncak, yaitu puncak oksidasi pada daerah arus positif dan puncak reduksi pada daerah arus negatif. Pada saat *charging* terjadi proses interkalasi (proses oksidasi) dimana ion-ion lithium bergerak dari katoda ke anoda. Sedangkan, pada saat *discharging* ion-ion lithium bergerak dari anoda ke katoda, yaitu terjadinya proses de-interkalasi (proses reduksi).

Hasil pengujian *Cyclic Voltammetry* disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara tegangan dengan arus pengujian.



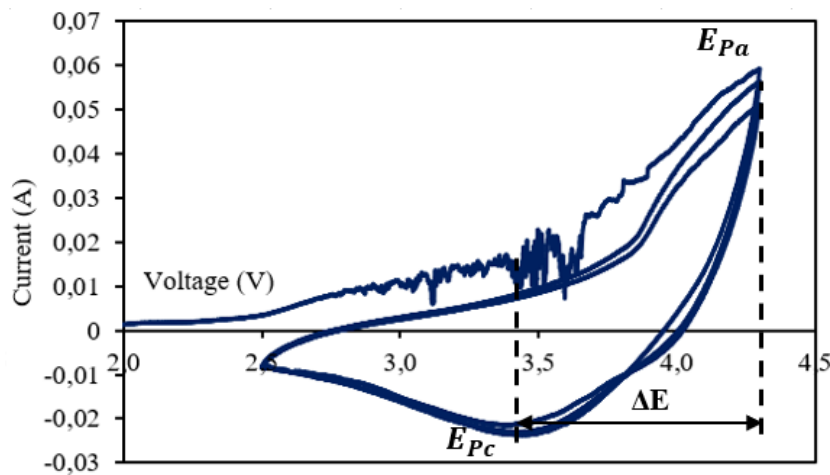
Gambar 4.4 Hasil CV NMC541-6x5

Gambar diatas menunjukkan hasil CV NMC541-6x5, arus anodik tertinggi ketika mencapai puncak oksidasi (E_{pa}) sebesar 4,2956 V. Setelah mengalami oksidasi arus akan turun dan berbalik menuju negatif untuk melakukan proses reduksi. Proses reduksi terjadi pada arus katodik, dengan puncak reduksi (E_{pc}) sebesar 3,4836 V. Hal ini dilakukan beberapa siklus untuk mengetahui kestabilan dari hasil yang didapat. Selisih potensial (ΔE) yang biasa disebut juga jarak interkalasi menandakan cepat lambatnya transfer ion lithium dalam elektrolit. Hal tersebut dapat mempengaruhi kapasitas spesifik baterai. Selisih potensial atau jarak interkalasi yang didapat pada sampel dengan ukuran 6x5 cm sebesar 0,8120 V.



Gambar 4.5 Waktu pengujian CV NMC541-6x5

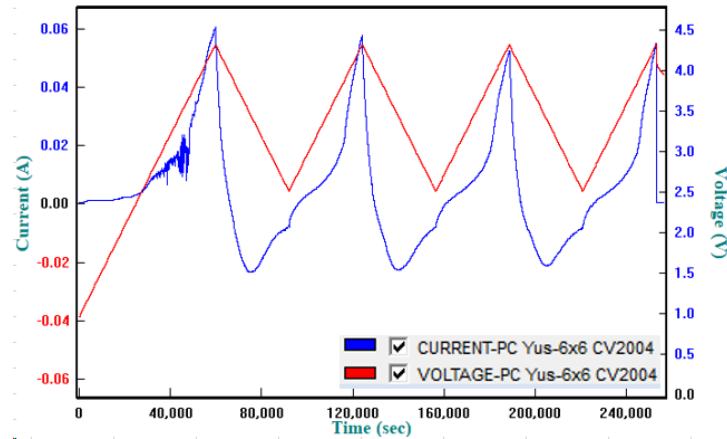
Gambar 4.5. menunjukkan total waktu yang digunakan selama pengujian CV sampel 6x5 adalah sekitar 58,3 Jam. Selisih potensial dari peristiwa oksidasi dan reduksi menunjukkan reversibilitas material baterai. Selisih potensial tegangan (ΔE) secara kualitatif menentukan tingkat reversibilitas dan kinetik ion Li saat transfer muatan. Nilai ΔE yang semakin kecil mengindikasikan reversibilitas yang lebih baik dan kinetik transfer ion yang tinggi saat interkalasi dan deinterkalasi.



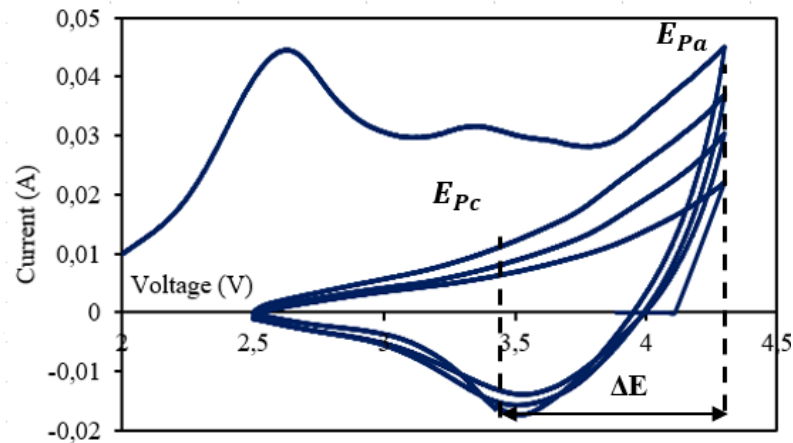
Gambar 4.6 Hasil CV NMC541-6x6

Gambar diatas menunjukkan hasil CV NMC541-6x6, arus anodik tertinggi ketika mencapai puncak oksidasi (E_{pa}) sebesar 4,2997 V. Setelah mengalami oksidasi arus akan turun dan berbalik menuju negatif untuk melakukan proses reduksi. Proses reduksi terjadi pada arus katodik, dengan

puncak reduksi (E_{pc}) sebesar 3,4561 V. Hal ini dilakukan beberapa siklus untuk mengetahui kestabilan dari hasil yang didapat. Selisih potensial (ΔE) atau jarak interkalasi yang didapat pada sampel dengan ukuran 6x6 cm sebesar 0,8436 V. Gambar 4.7. menunjukan total waktu yang digunakan selama penguian CV sampel 6x6 adalah sekitar 72,2 Jam.



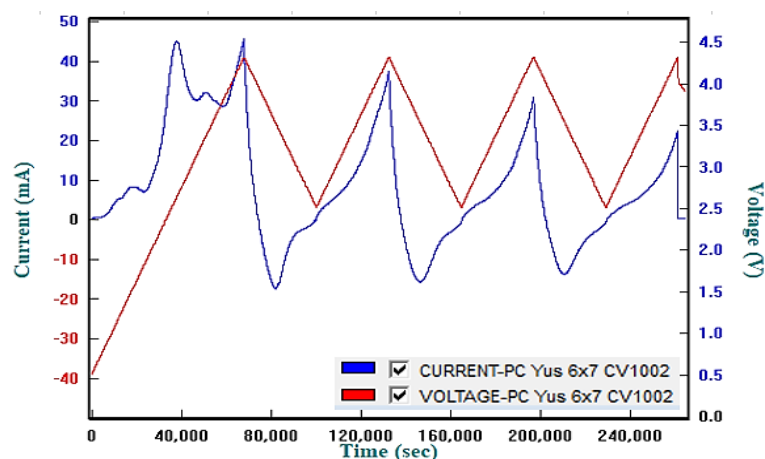
Gambar 4.7 Waktu penguian CV NMC541-6x6



Gambar 4.8 Hasil CV NMC541-6x7

Gambar diatas menunjukkan hasil CV NMC541-6x7, arus anodik tertinggi ketika mencapai puncak oksidasi (E_{pa}) sebesar 4,2994 V. Setelah mengalami oksidasi arus akan turun dan berbalik menuju negatif untuk melakukan proses reduksi. Proses reduksi terjadi pada arus katodik, dengan puncak reduksi (E_{pc}) sebesar 3,4298 V. Hal ini dilakukan beberapa siklus untuk mengetahui kestabilan dan memastikan hasil yang didapat. Terlihat bahwa terjadi degradasi pada sel baterai yang ditandai dengan tidak

bertumpuknya garis pada hasil CV, degradasi atau penurunan performa baterai terjadi karena meningkatnya hambatan dalam baterai (R_{ct}) seperti yang ditunjukkan pada referensi (Li, Zhang, Dongyan, & Yan, 2020). Garis dengan tegangan dibawah 2,5 V muncul karena mula mulanya baterai berada pada kondisi tegangan yang rendah. Hal lain yang kemungkinan mempengaruhi hasil adalah kontak antara elektroda, separator dan elektrolit didalam baterai yang kurang baik. Selisih potensial (ΔE) atau jarak interkalasi yang didapat pada sampel dengan ukuran 6x7 cm sebesar 0,8696 V. Gambar 4.9. menunjukan waktu yang digunakan selama penguian CV sampel 6x7 adalah sekitar 75 Jam.



Gambar 4.9 Waktu pengujian CV NMC541-6x7

Tabel 4.5 Hasil Uji *Cyclic Voltammetry* NMC

Kode Sampel	E _{pa} (V)	E _{pc} (V)	ΔE (V)
NMC541-6x5	4,2956	3,4836	0,8120
NMC541-6x6	4,2997	3,4561	0,8436
NMC541-6x7	4,2994	3,4298	0,8696

Berdasarkan Tabel 4.5 terlihat bahwa sampel NMC541-6x5 memiliki nilai ΔE paling rendah sehingga tingkat reversibilitas dan kinetik ion Li saat transfer muatan terbilang lebih baik daripada sampel lain. Karena material yang digunakan sama, maka puncak anodik dan katodiknya cenderung sama, pengujian ini mengonfirmasi hal tersebut sekaligus menunjukkan pengaruh dimensi terhadap nilai ΔE .

4.4 Analisa Data *Charge-Discharge* (CD)

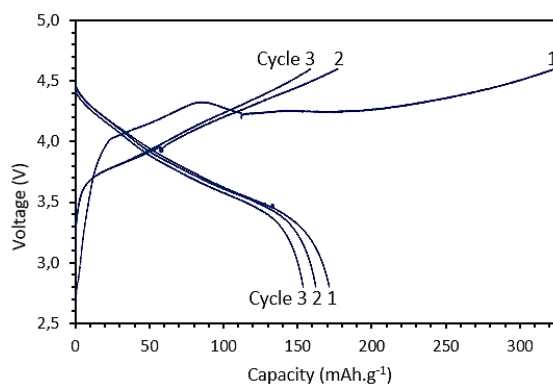
Profil *charge/discharge* yang digunakan dan waktu yang dibutuhkan berbeda beda untuk setiap pabrikan baterai. Secara umum proses ini membutuhkan waktu beberapa jam sampai satu hari untuk selesai karena *charge/discharge* dilakukan pada laju arus yang lambat berkisar 0,1C sampai 0,2C (Warner, 2019). Pengukuran dilakukan dalam tegangan *cut-off* 2,8-4,6V dan laju pengisian/pengosongan 0,1C. Semua baterai diuji *charge-discharge* pertama kali menggunakan arus 0,0947 A atau 0,1C dengan menggunakan perhitungan kapasitas teoritis NMC532 yang paling mendekati NMC541. Kapasitas teoritis NMC532 bervariasi dari berbagai sumber berkisar 160-186,675 mAh.g⁻¹. Ini dilakukan untuk mengetahui kapasitas *discharge* maksimum yang dimiliki oleh setiap sampel, sehingga perhitungan *C-rate* dapat dilakukan sesuai kapasitasnya masing-masing.

Dibawah ini adalah hasil pengujian *charge-discharge* untuk sampel NMC541-6x5:

Tabel 4.6 Hasil *charge discharge* 3 siklus pertama NMC541-6x5

Cycle	Cap Chg (mAh.g ⁻¹)	Cap Dchg (mAh.g ⁻¹)	Efficiency (%)
1	323,890	171,418	52,924
2	177,222	162,320	91,591
3	158,915	153,760	96,756

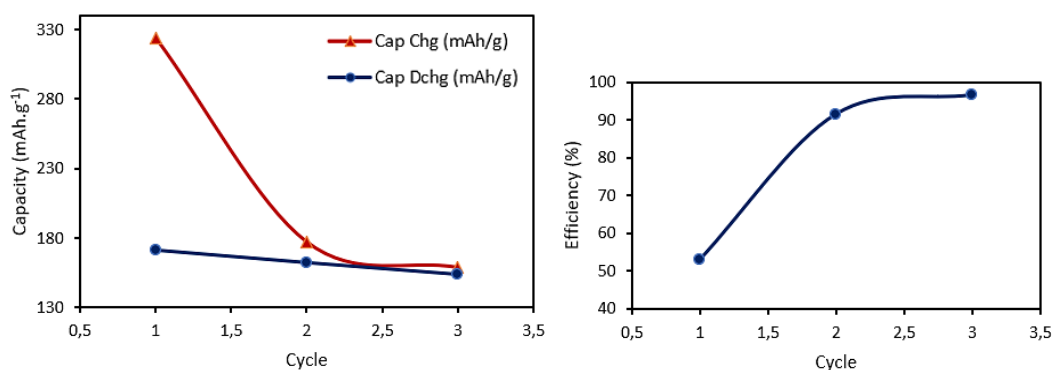
Untuk sampel NMC541-6x5 pada tahap *charging* siklus pertama mampu mencapai kapasitas *charge* sebesar 323,890 mAh.g⁻¹, kapasitas *discharge* hanya 171,418 mAh.g⁻¹, dengan efisiensi 52,924%. Nilai efisiensi tertinggi dicapai pada siklus ke-3 yakni sebesar 96,756 %.



Gambar 4.10 *Charge discharge* 3 siklus pertama NMC541-6x5.

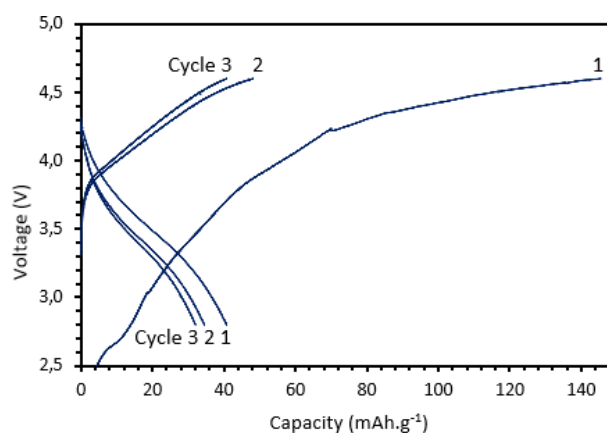
Kapasitas pengisian daya atau efisiensi Coulombic (CE) sebagai parameter baterai untuk memantau besarnya reaksi samping, telah menjadi perhatian besar dalam beberapa tahun terakhir (Yang, Wang, Zhao, Tsui, & Bae, 2018). Efisiensi pengisian/pengosongan adalah rasio energi yang dapat dikeluarkan dari baterai (kapasitas *discharge*) dibagi dengan energi yang dapat dimasukkan (kapasitas *charge*) (Sudaryanto, Purwamargapratala, Yulianti, Honggowiranto, & Kartini., 2020).

Hasil *charge-discharge* pada siklus pertama biasanya memiliki efisiensi yang rendah karena baterai belum stabil. Karena itu pada siklus kedua dan ketiga dapat dilihat seperti gambar di bawah nilai kapasitas *charge* semakin mendekati nilai kapasitas *discharge*, sehingga nilai efisiensi meningkat. Umumnya baterai di uji ratusan bahkan ribuan siklus.



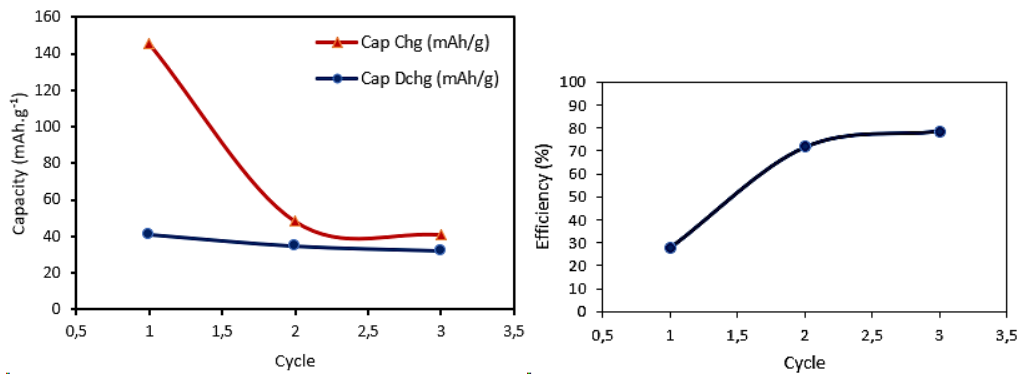
Gambar 4.11 Kapasitas spesifik dan efisiensi 3 siklus pertama NMC541-6x5.

Dibawah ini adalah hasil pengujian *charge-discharge* untuk sampel NMC541-6x6:



Gambar 4.12 Charge discharge 3 siklus pertama NMC541-6x6

Untuk sampel NMC541-6x6 pada tahap *charging* siklus pertama mampu mencapai kapasitas *charge* sebesar $145,467 \text{ mAh.g}^{-1}$, kapasitas *discharge* hanya $40,772 \text{ mAh.g}^{-1}$, dengan efisiensi $28,029\%$. Nilai efisiensi ini 50% lebih rendah dari sampel NMC541-6x5 siklus pertama. Pada siklus kedua dan ketiga sampel NMC541-6x6 juga menunjukkan hal yang sama, nilai kapasitas *charge* dan *discharge* mulai mendekati dan efisiensi juga meningkat. Nilai efisiensi siklus ke-3 sebesar $78,621\%$.

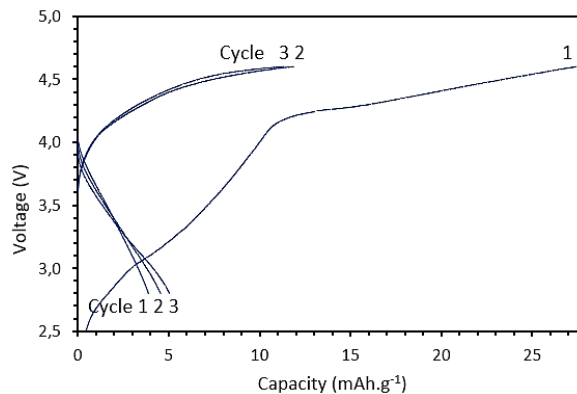


Gambar 4.13 Kapasitas spesifik dan efisiensi 3 siklus pertama NMC541-6x6

Tabel 4.7 Hasil *charge discharge* 3 siklus pertama NMC541-6x6

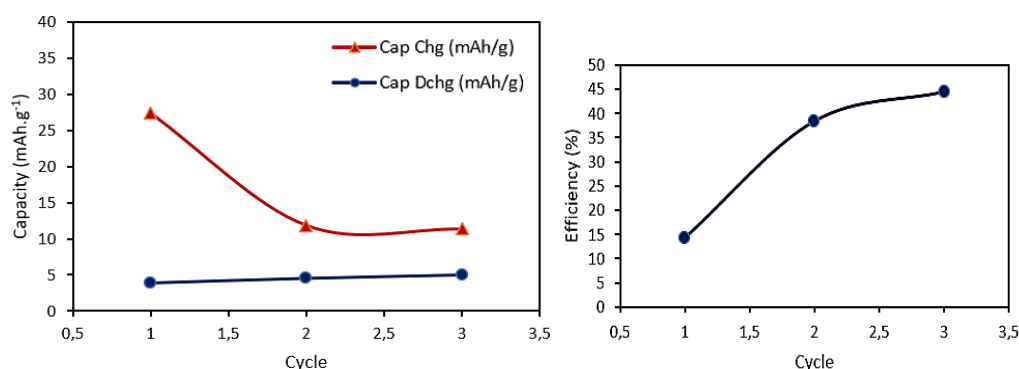
Cycle	Cap Chg (mAh.g ⁻¹)	Cap Dchg (mAh.g ⁻¹)	Efficiency (%)
1	145,467	40,772	28,029
2	48,163	34,554	71,744
3	40,753	32,040	78,621

Dibawah ini adalah hasil pengujian *charge-discharge* untuk sampel NMC541-6x7:



Gambar 4.14 *Charge discharge* 3 siklus pertama NMC541-6x7

Sampel NMC541-6x7 pada tahap *charging* siklus pertama mencapai kapasitas *charge* sebesar $27,425 \text{ mAh.g}^{-1}$, kapasitas *discharge* hanya $3,880 \text{ mAh.g}^{-1}$, dengan efisiensi $14,148 \%$. Nilai efisiensi ini 73% lebih rendah dari sampel NMC541-6x5 siklus pertama. Pada siklus kedua dan ketiga sampel NMC541-6x7 juga menunjukkan hal yang sama yakni nilai kapasitas *charge* dan *discharge* mulai mendekati dan efisiensi juga meningkat, walaupun masih lebih kecil dibandingkan dua sampel lainnya. Nilai efisiensi terbesar dicapai pada siklus ke-3 yaitu $44,406 \%$.



Gambar 4.15 Kapasitas spesifik dan efisiensi 3 siklus pertama NMC541-6x7

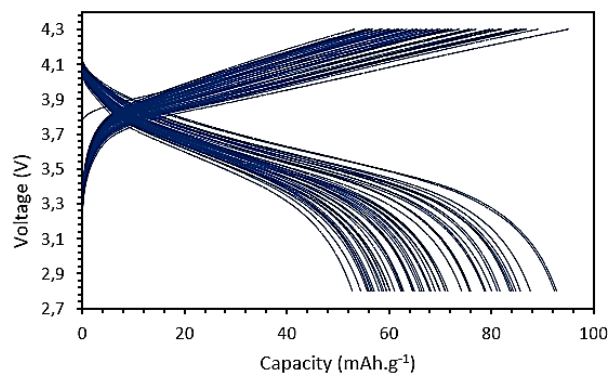
Tabel 4.8 Hasil *charge discharge* 3 siklus pertama NMC541-6x7

Cycle	Cap Chg (mAh.g ⁻¹)	Cap Dchg (mAh.g ⁻¹)	Efficiency (%)
1	27,425	3,880	14,148
2	11,854	4,548	38,364
3	11,356	5,042	44,406

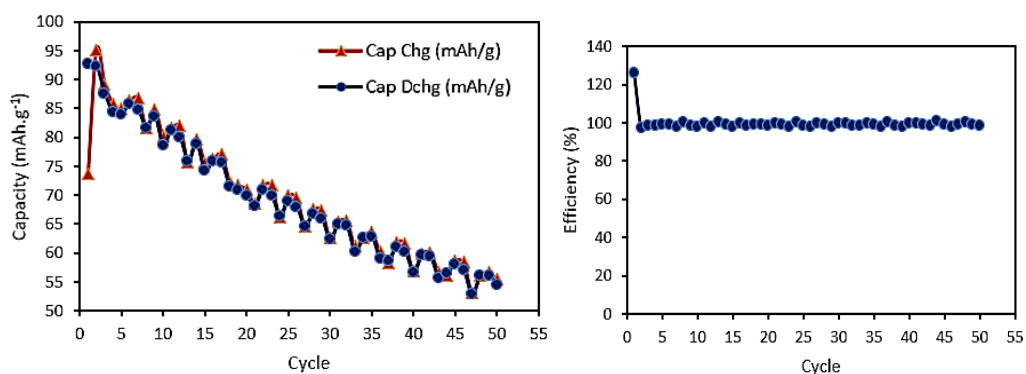
4.4.1 Analisa Data *Charge Discharge* Siklus Panjang

Pengujian *charge-discharge* telah dilakukan sebelumnya sebanyak 3 siklus dengan rentang tegangan $2,8 - 4,6 \text{ V}$ dengan arus $0,1\text{C}$ sebesar $0,0947\text{A}$. Setelah diketahui hasilnya, pengujian *charge-discharge* dilakukan kembali dengan nilai arus $0,1\text{C}$ berdasarkan kapasitas maksimal dari 3 siklus pertamanya, yaitu sebesar $0,0868\text{A}$ untuk NMC541-6x5 sebanyak 50 siklus, untuk mengetahui degradasi yang terjadi pada baterai ketika digunakan dalam waktu yang lama. Arus yang digunakan pada pengujian panjang ini berbeda-beda sesuai pengujian 3 siklus pertama.

Sampel NMC541-6x5 diuji 50 siklus dengan rentang 2,8 – 4,3 Volt dengan arus 0,0868A atau 0,1C berdasarkan pengujian 3 siklus pertama. Rentang voltase yang digunakan menyesuaikan dengan puncak anodik (oksidasi) yang didapatkan dari pengujian CV. Dibawah ini adalah grafik hasil *charge-discharge* sebanyak 50 siklus.



Gambar 4.16 Hasil CD 50 Siklus NMC541-6x5



Gambar 4.17 Kapasitas spesifik dan efisiensi 50 siklus NMC541-6x5

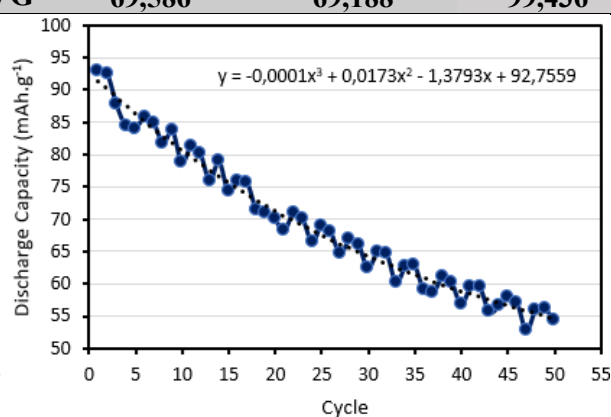
Dari data diatas terlihat bahwa semakin tinggi siklus pengujian maka nilai kapasitas *charge* maupun *discharge* terlihat menurun secara bersama sama. Nilai efisiensi terlihat cukup konstan mendekati 100%, meskipun pada siklus pertama, nilai kapasitas *charge* lebih kecil dari pada kapasitas *discharge* sehingga nilai efisiensi yang didapat melebihi angka 100% yakni 125,9%. Hal ini terjadi karena kondisi baterai mula mula berada pada tegangan yang cukup tinggi mendekati batas *cut off voltage* 4,3V, sehingga kapasitas saat *charge* yang tercatat kecil, kemudian langsung memasuki tahap *discharge*.

Dibawah ini adalah tabel yang menunjukkan dengan lengkap nilai kapasitas *charge-discharge* dan efisiensinya untuk setiap siklus.

Tabel 4.9 Hasil 50 siklus CD NMC541-6x5

Cycle	Cap Chg (mAh/g)	Cap Dchg (mAh/g)	Efficiency (%)
1	73,690	92,792	125,922
2	95,053	92,399	97,208
3	89,203	87,651	98,260
4	85,804	84,317	98,267
5	84,983	83,971	98,810
6	86,351	85,699	99,245
7	86,817	84,816	97,696
8	81,671	81,707	100,045
9	84,719	83,647	98,734
10	80,298	78,703	98,013
11	81,573	81,190	99,530
12	82,022	80,081	97,634
13	75,723	75,953	100,304
14	79,733	78,903	98,960
15	75,645	74,205	98,097
16	76,205	75,928	99,637
17	77,040	75,731	98,301
18	72,282	71,501	98,919
19	71,678	70,989	99,039
20	70,980	69,971	98,578
21	68,498	68,197	99,561
22	71,695	71,020	99,059
23	71,699	69,980	97,603
24	66,252	66,446	100,293
25	69,942	69,028	98,693
26	69,501	67,969	97,796
27	64,660	64,623	99,943
28	67,481	66,845	99,058
29	67,382	66,039	98,008
30	62,599	62,343	99,591
31	65,373	64,977	99,394
32	65,556	64,699	98,693
33	61,155	60,197	98,435
34	62,628	62,611	99,973
35	63,498	62,831	98,950
36	60,133	58,979	98,081
37	58,344	58,630	100,490
38	61,902	61,087	98,683

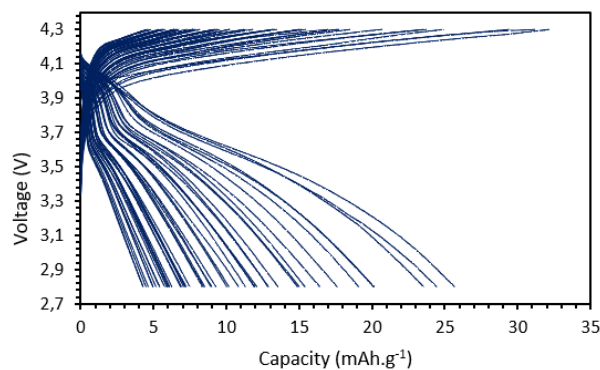
39	61,624	60,188	97,670
40	56,788	56,755	99,943
41	59,868	59,547	99,464
42	60,057	59,490	99,057
43	56,738	55,738	98,238
44	56,160	56,489	100,585
45	58,693	58,047	98,900
46	58,398	57,103	97,782
47	53,187	52,817	99,305
48	55,972	56,001	100,051
49	56,640	56,109	99,063
50	55,423	54,458	98,258
AVG	69,586	69,188	99,436



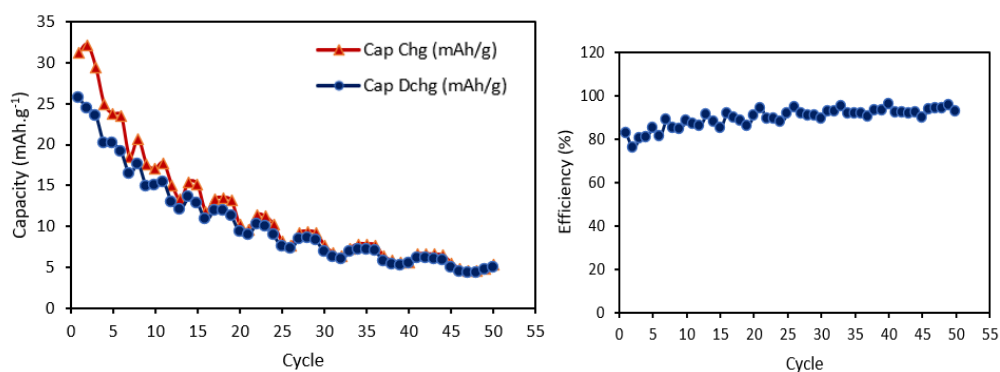
Gambar 4.18 Trend Kapasitas NMC541-6x5

Dengan menggunakan Ms.Excel bisa kita munculkan *trendline* dari data kapasitas *discharge* spesifik yang ada. Didapat persamaan polinom berderajat tiga, $Y = -0,0001X^3 + 0,0173X^2 - 1,3793X + 92,7559$. Persamaan ini bisa kita gunakan untuk memperkirakan pada siklus keberapa baterai ini akan habis dan tidak bisa digunakan kembali. Nilai Y melambangkan kapasitas dalam mAh.g⁻¹ dan nilai X melambangkan siklus. Pada siklus ke-122 maka sisa kapasitas yang dimiliki adalah 0,389 mAh.g⁻¹.

Sampel NMC541-6x6 diuji 50 siklus dengan rentang 2,8 – 4,3 Volt dengan arus 0,0206 A atau 0,1C berdasarkan pengujian 3 siklus pertama. Dibawah ini adalah grafik hasil *charge-discharge* sebanyak 50 siklus.



Gambar 4.19 Hasil CD 50 Siklus NMC541-6x6



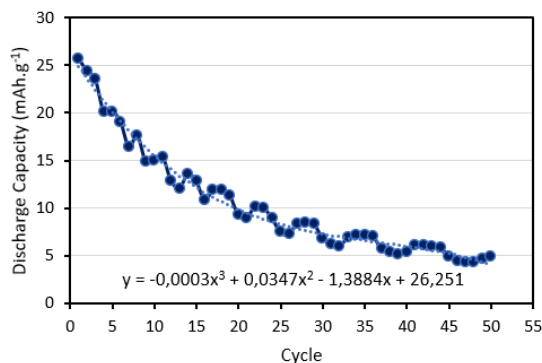
Gambar 4.20 Kapasitas spesifik dan efisiensi 50 siklus NMC541-6x6

Gambar diatas menunjukkan bahwa nilai kapasitas *charge* yang dimiliki oleh NMC541-6x6 tidak berbeda jauh dari kapasitas *discharge*-nya, sehingga nilai efisiensinya berada di sekitar 80-90%. Hal yang diduga menjadi penyebab rendahnya nilai kapasitas adalah karena kontak antara elektroda, elektrolit dan separator yang kurang baik, semakin jauh jarak antara *current collector* sehingga semakin besar hambatan yang harus dilalui. Tabel 4.10 menunjukkan detailnya.

Tabel 4.10 Hasil 50 siklus CD NMC541-6x6

Cycle	Cap Chg (mAh/g)	Cap Dchg (mAh/g)	Efficiency (%)
1	31,166	25,651	82,304
2	32,160	24,426	75,953
3	29,444	23,524	79,896
4	24,910	20,111	80,735
5	23,718	20,131	84,877
6	23,540	19,065	80,990
7	18,489	16,398	88,688
8	20,683	17,594	85,065

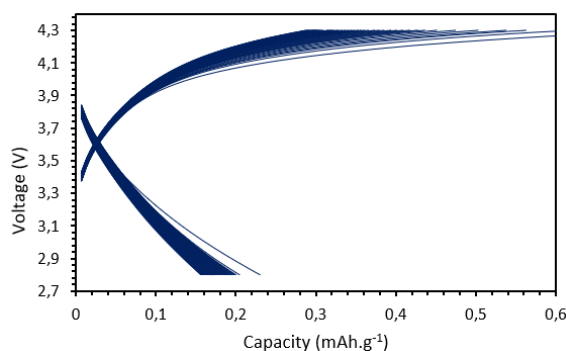
9	17,600	14,880	84,542
10	17,008	14,997	88,176
11	17,731	15,396	86,829
12	14,989	12,884	85,955
13	13,268	12,076	91,015
14	15,436	13,526	87,630
15	15,124	12,837	84,880
16	11,808	10,822	91,656
17	13,324	11,925	89,497
18	13,494	11,906	88,227
19	13,166	11,294	85,778
20	10,213	9,268	90,753
21	9,558	8,990	94,060
22	11,378	10,167	89,362
23	11,204	10,014	89,381
24	10,208	8,933	87,507
25	8,162	7,476	91,590
26	7,654	7,242	94,611
27	9,194	8,412	91,488
28	9,381	8,498	90,579
29	9,193	8,334	90,660
30	7,693	6,843	88,944
31	6,753	6,244	92,463
32	6,409	5,932	92,565
33	7,302	6,911	94,643
34	7,836	7,173	91,540
35	7,817	7,157	91,553
36	7,707	7,054	91,535
37	6,375	5,746	90,129
38	5,790	5,386	93,017
39	5,556	5,157	92,810
40	5,650	5,417	95,872
41	6,562	6,044	92,097
42	6,621	6,091	91,995
43	6,589	6,037	91,621
44	6,429	5,908	91,897
45	5,522	4,952	89,680
46	4,774	4,470	93,626
47	4,544	4,271	93,988
48	4,562	4,278	93,765
49	4,852	4,629	95,407
50	5,366	4,965	92,534
AVG	11,878	10,349	89,487



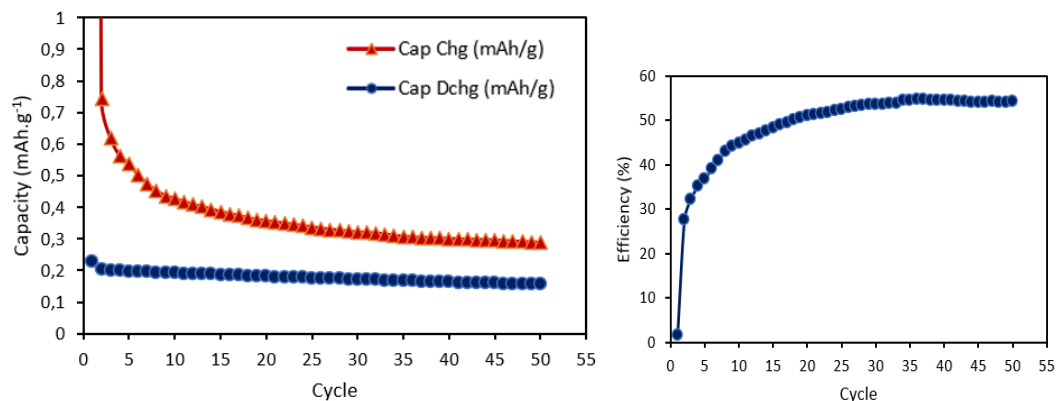
Gambar 4.21 Trend Kapasitas NMC541-6x6

Dengan menggunakan Ms.Excel bisa kita munculkan *trendline* dari data kapasitas *discharge* spesifik yang ada. Didapat persamaan $Y = -0,0003X^3 + 0,0347X^2 - 1,3884X + 26,251$. Persamaan ini bisa kita gunakan untuk memperkirakan pada siklus seberapa baterai ini akan habis dan tidak bisa digunakan kembali. Nilai Y melambangkan kapasitas dalam mAh.g⁻¹ dan nilai X melambangkan siklus. Setelah dihitung didapati bahwa pada siklus ke-65 maka sisa kapasitas yang dimiliki sebesar 0,225 mAh.g⁻¹.

Sampel NMC541-6x7 diuji 50 siklus dengan rentang 2,8 – 4,3 Volt dengan arus 0,0126A atau 0,5C berdasarkan pengujian 3 siklus pertama. Nilai arus 0,1C sebesar 0,0025A terlalu kecil untuk diinput pada mesin *charge discharge* yang digunakan, karena nilai arus minimum yang bisa di input adalah 0,01A atau 10 mA. Hal ini terjadi karena terlalu kecilnya kapasitas baterai yang dihasilkan. Dibawah ini adalah grafik hasil *charge-discharge* sebanyak 50 siklus.



Gambar 4.22 Hasil CD 50 Siklus NMC541-6x7



Gambar 4.23 Kapasitas spesifik dan efisiensi 50 siklus NMC541-6x7

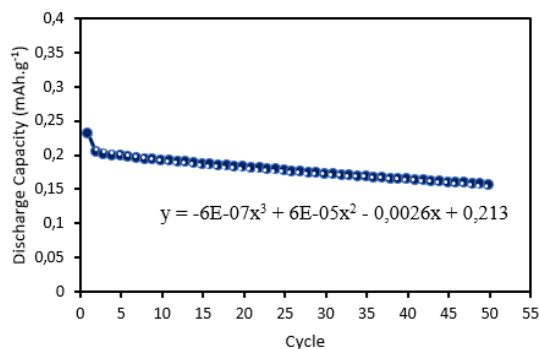
Dari gambar diatas terlihat bahwa nilai kapasitas *charge* yang dimiliki oleh NMC541-6x7 selalu lebih besar dari kapasitas *discharge*-nya, sehingga nilai efisiensinya hanya berada di sekitar 50%, bahkan lebih rendah lagi pada 10 siklus pertamanya. Salah satu hal yang diduga menjadi penyebab rendahnya nilai kapasitas adalah karena kontak antara elektroda, elektrolit dan separator yang kurang baik dan juga kemungkinan disebabkan oleh adanya gas didalam baterai karena tindak menggunakan mesin *vacuum sealing* saat proses assembly karena mesinnya rusak, hipotesis lain adalah semakin jauh jaraknya maka semakin besar hambatan dan jarak difusi yang harus dilalui.

Dibawah ini adalah tabel yang menunjukkan dengan lengkap nilai kapasitas *charge-discharge* dan efisiensinya untuk setiap siklus.

Tabel 4.11 Hasil 50 siklus CD NMC541-6x7

Cycle	Cap Chg (mAh/g)	Cap Dchg (mAh/g)	Efficiency (%)
1	13,656	0,230	1,684
2	0,742	0,204	27,541
3	0,620	0,200	32,250
4	0,563	0,198	35,213
5	0,538	0,198	36,780
6	0,503	0,196	39,006
7	0,475	0,195	41,038
8	0,451	0,194	42,883

9	0,436	0,192	44,128
10	0,427	0,191	44,830
11	0,417	0,190	45,608
12	0,409	0,189	46,338
13	0,401	0,188	47,004
14	0,393	0,188	47,676
15	0,385	0,186	48,378
16	0,379	0,185	48,915
17	0,373	0,185	49,454
18	0,365	0,183	50,199
19	0,360	0,182	50,584
20	0,356	0,181	50,929
21	0,352	0,180	51,204
22	0,348	0,180	51,583
23	0,345	0,179	51,811
24	0,341	0,178	52,157
25	0,337	0,177	52,459
26	0,333	0,176	52,798
27	0,329	0,175	53,142
28	0,326	0,174	53,265
29	0,323	0,173	53,534
30	0,321	0,172	53,657
31	0,319	0,171	53,628
32	0,317	0,170	53,709
33	0,315	0,170	53,857
34	0,309	0,169	54,506
35	0,307	0,168	54,568
36	0,305	0,167	54,707
37	0,303	0,166	54,701
38	0,303	0,165	54,512
39	0,301	0,164	54,508
40	0,300	0,163	54,474
41	0,299	0,163	54,397
42	0,298	0,162	54,236
43	0,297	0,161	54,156
44	0,297	0,160	53,989
45	0,295	0,160	54,018
46	0,294	0,159	54,101
47	0,292	0,158	54,209
48	0,291	0,157	54,105
49	0,289	0,157	54,126
50	0,288	0,156	54,222
AVG	0,632	0,178	48,816



Gambar 4.24 Trend Kapasitas NMC541-6x7

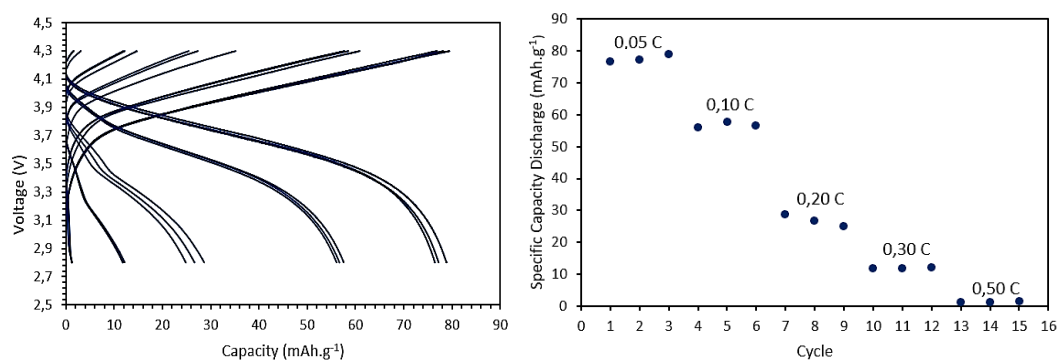
Dengan menggunakan Ms.Excel bisa kita munculkan *trendline* dari data kapasitas *discharge* spesifik yang ada. Didapat persamaan polinom berderajat tiga, $Y = -6 \times 10^{-7} X^3 + 6 \times 10^{-5} X^2 - 0,0026 X + 0,213$. Persamaan ini menggunakan persamaan polinom berderajat tiga agar sama dengan sampel lainnya. Persamaan ini bisa kita gunakan untuk memperkirakan pada siklus seberapa baterai ini akan habis dan tidak bisa digunakan kembali. Nilai Y melambangkan kapasitas dalam mAh.g⁻¹ dan nilai X melambangkan siklus. Pada siklus ke-94 maka sisa kapasitas yang dimiliki sangat kecil sebesar 0,0004 mAh.g⁻¹, agar bisa dibandingkan kapasitas yang tersisa dibatasi 0,2-0,3 mAh.g⁻¹. Pada siklus kedua sampel ukuran 6x7, kapasitasnya sudah 0,208 mAh.g⁻¹. Dari Tabel 4.12 terlihat bahwa sampel NMC541-6x5 memiliki kapasitas dan efisiensi yang lebih baik dibandingkan sampel lain. Sampel 6x7 sudah menunjukkan kapasitas yang kecil sejak awal sehingga pengujian CD 50 siklus ini terpaksa menggunakan nilai C rate yang berbeda mengikuti kemampuan, sehingga tidak bisa dibandingkan secara langsung dengan sampel lainnya,

Tabel 4.12 Tabulasi Pengujian Siklus Panjang NMC541

Kode Sampel	Avg Cap Chg (mAh.g ⁻¹)	Avg Cap Dchg (mAh.g ⁻¹)	Avg Efficiency (%)	Life Cycle	Remaining Cap (mAh.g ⁻¹)
NMC541-6x5	69,586	69,188	99,436	122	0,389
NMC541-6x6	11,878	10,349	89,487	65	0,225
NMC541-6x7	0,632	0,178	48,816	2	0,208

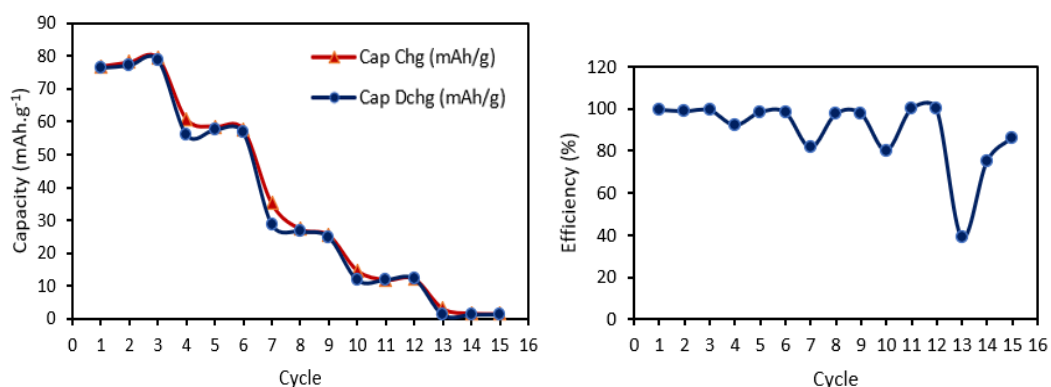
4.4.2 Analisa Data Charge Discharge Variasi C-Rate

Pengujian *charge discharge* dengan variasi arus dilakukan untuk mengetahui karakter baterai pada nilai arus berbeda. Uji ini dilakukan dengan sampel NMC541-6x5. *C-rate* 0,05 C, 0,10 C, 0,20 C, 0,30 C, 0,50 C atau sebesar 0,043, 0,086, 0,174, 0,260, 0,434 A digunakan sebanyak 3 siklus masing masing.



Gambar 4.25 Pengaruh *C-rate* terhadap kapasitas baterai

Seperti yang terlihat pada grafik diatas bahwa semakin tinggi *C-rate* yang digunakan maka nilai kapasitas yang dimiliki semakin menurun, pada 0,5C nilai kapasitas *discharge* yang didapat hanya sekitar 1,2–1,3 mAh.g⁻¹. Penurunan kapasitas karena meningkatnya arus kemungkinan disebabkan oleh menebalnya *solid electrolyte interface* (SEI). (Li, Zhang, Dongyan, & Yan, 2020). Gambar 4.26 dan Tabel 4.13 menunjukkan penurunan kapasitas baterai seiring meningkatnya siklus dan arus.



Gambar 4.26 Pengaruh *C-rate* terhadap kapasitas spesifik dan efisiensi

Tabel 4.13 Pengaruh *C-rate* terhadap kapasitas dan efisiensi baterai

Cycle	Current (A)	Cap Chg (mAh/g)	Cap Dchg (mAh/g)	Efficiency (%)
1	0,043	76,924	76,470	99,409
2	(0,05C)	78,188	77,225	98,768
3		79,496	78,859	99,199
4	0,087	60,876	56,097	92,149
5	(0,10C)	58,573	57,566	98,281
6		57,739	56,668	98,146
7	0,174	35,148	28,670	81,570
8	(0,20C)	27,352	26,657	97,460
9		25,478	24,865	97,595
10	0,260	14,714	11,790	80,123
11	(0,30C)	11,897	11,882	99,869
12		12,238	12,215	99,810
13	0,434	3,136	1,217	38,801
14	(0,50C)	1,685	1,262	74,881
15		1,529	1,319	86,306

Kapasitas sel yang cepat memudar pada laju pengisian dan pengosongan 0,5C terutama disebabkan oleh hilangnya persediaan Li dari struktur katoda dan pelapisan logam Li pada elektroda grafit saat laju pengisian tinggi. Analisis lain mengatakan bahwa terjadi peningkatan molaritas garam pada cairan elektrolit pada laju pengecasan yang tinggi. Dengan meningkatkan laju pengecasan, semakin banyak kapasitas yang hilang karena limitasi dari transpor ion Lithium (Wua, Bai, & Li, 2020). Selain itu hal lain terjadi ketika kita meningkatkan laju pengisian, seperti meningkatnya produksi gas, gas yang dihasilkan oleh satu elektroda dapat bermigrasi ke elektroda lainnya (Wua, Bai, & Li, 2020). (Qu, Mo, & Zhang, 2019) memuat dalam artikelnya terkait NMC532 yang diperkuat menggunakan litium karbonat (Li_2CO_3), pengujian variasi C rate (*Rate Capability*) dengan nilai 0,2C, 0,5C, 1C, 2C, 5C, 8C dan terakhir kembali ke 0,2C dengan total 35 siklus/ 5 siklus untuk setiap variasi C-rate. LNCM-1.05 hanya menyediakan 154,1 mAh.g^{-1} , 140,9 mAh.g^{-1} , 125,1 mAh.g^{-1} , 101,6 mAh.g^{-1} , 55,9 mAh.g^{-1} , dan 21,5 mAh.g^{-1} , sesuai dengan laju arus 0,2 C, 0,5 C, 1 C, 2 C, 5 C, dan 8 C, masing-masing.

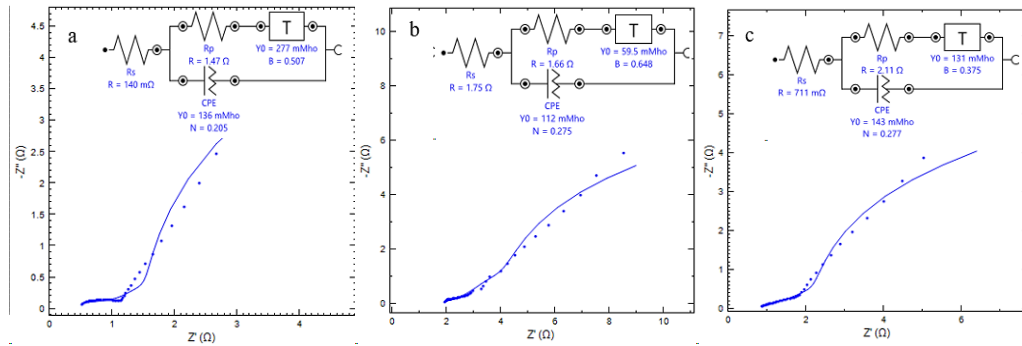
Perbedaan kemampuan *rate capability* sampel yang didapat dengan sampel hasil referensi dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti material yang digunakan berbeda, lalu pada referensi yang ada baterai koin *half cell* NMC532 ditambahkan lithium karbonat, Agen Li_2CO_3 dipilih sebagai fluks untuk mencegah masuknya unsur pengotor lainnya. Selain itu, sejumlah besar Li_2CO_3 mendorong ion-ion reaktan untuk berdifusi. Hal ini meringankan pertukaran antara Li^+ dan Ni^{2+} , yang meningkatkan integritas struktur kristal sampel LNMC (Qu, Mo, & Zhang, 2019).

Berbeda dengan sampel yang digunakan pada penelitian ini yang mana tidak didoping menggunakan material lain, selain itu impuritas dari material NMC yang digunakan juga tidak dipastikan menggunakan pengujian lain seperti XRD misalnya. Baterai *full cell* dan *half cell* juga mempengaruhi hasil pengukuran yang dihasilkan. Baterai *full cell* menggunakan anoda grafit, sedangkan baterai koin *half cell* biasanya menggunakan *lithium metal* sebagai anodanya.

4.5 Analisa Data *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS)

Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) adalah metode pengujian non-destruktif yang biasa digunakan untuk mengkarakterisasi baterai lithium-ion. Pengujian ini menggunakan frekuensi 0,1 – 50 kHz. Impedansi internal baterai adalah salah satu karakteristik yang berdampak langsung pada tegangan baterai, efisiensi dan kapasitas baterai. Secara umum, impedansi meningkat seiring bertambahnya usia sel baterai dan menurunnya kualitas bahan elektroda (K.W.Beard, 2019) (Nina Meddings, 2020). EIS (*Electrochemical Impedance Spectroscopy*) digunakan untuk mengkarakterisasi sifat kelistrikan sampel. Data keluaran, nilai impedansi Z dan sudut fasa θ , dinyatakan dalam bentuk plot Nyquist sebagai hubungan antara bagian nyata dan bagian imajiner dari impedansi tersebut (Purwamargapratala, Syahrial, Putra, Kartini, & Jodi, 2023).

Pengukuran Spektroskopi Impedansi Elektrokimia dilakukan untuk mempelajari lebih lanjut sifat elektrokimia bahan katoda. Dibawah ini adalah hasil pengukuran EIS untuk masing-masing sampel:

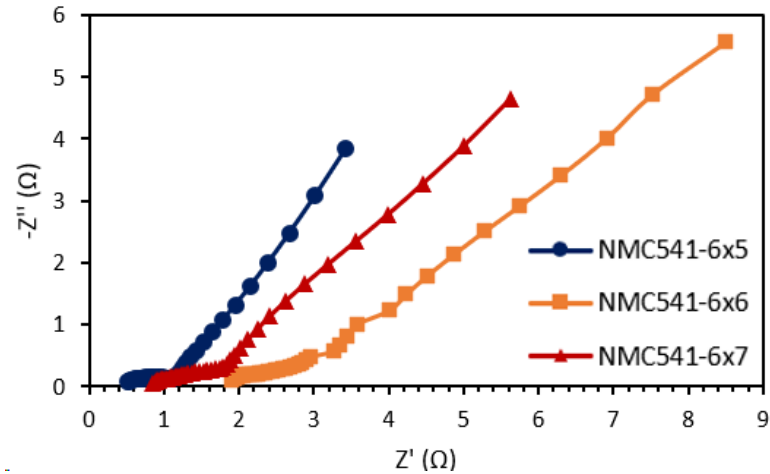


Gambar 4.27 Hasil EIS; a) NMC541-6x5; b) NMC541-6x6; c) NMC541-6x7

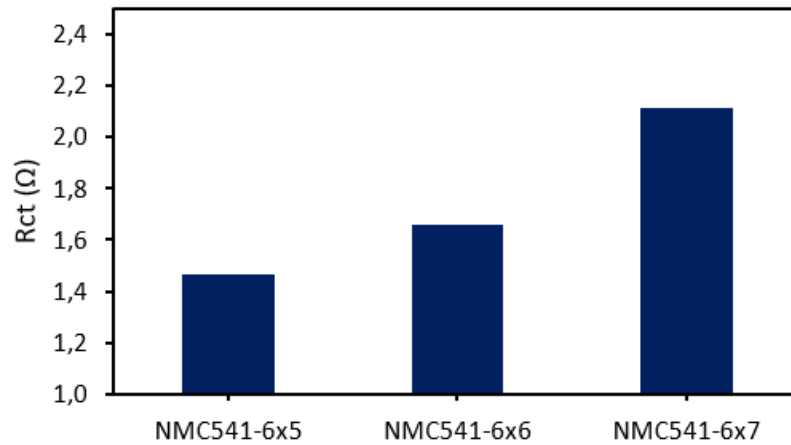
Parameter EIS yang disesuaikan ditunjukkan pada Tabel 4.14 dibawah. Secara umum, resistansi larutan (R_s) dan resistansi perpindahan muatan (R_{ct}) mewakili resistansi transpor Li^+ dan resistansi perpindahan muatan dalam elektrolit. R_{ct} merupakan parameter penting yang sangat mempengaruhi kinerja elektrokimia bahan katoda. Selama tahap awal *aging*, terjadi penurunan resistensi transfer muatan, kemungkinan terkait dengan peningkatan *double-layer capacitance* (Ylva Olofsson, 2014). Dalam pemeriksaan fenomena pelapisan, *constant phase element* (CPE) sering digunakan sebagai alternatif *double-layer capacitance* (Cdl). Tebalnya lapisan pelindung pada permukaan logam ditunjukkan dengan adanya penurunan nilai CPE. Perubahan nilai CPE menunjukkan bahwa molekul air pada permukaan logam mengalami perubahan. Peningkatan ketebalan bilayer setelah penurunan konstanta dielektrik permukaan menyebabkan CPE menurun (Ylva Olofsson, 2014).

Tabel 4.14 Hasil uji EIS simulasi dan *fitting*

Kode Sampel	R_s (Ω)	R_{ct} (Ω)	CPE (mMho)
NMC541-6x5	0,1402	1,4675	277
NMC541-6x6	1,747	1,656	60
NMC541-6x7	0,7112	2,1107	131



Gambar 4.28 Kurva gabungan Nyquist plot



Gambar 4.29 Grafik pengaruh dimensi terhadap resistansi

Hasil Resistansi seluruh sampel ditunjukkan pada Gambar 4.29. NMC541-6x7 memiliki nilai Rct terbesar, sedangkan NMC541-6x5 memiliki nilai Rct terendah. Berdasarkan Gambar 4.28 hasil gabungan kurva Nyquist di atas terlihat bahwa NMC541-6x6 berada lebih kanan dibandingkan dengan sampel lain, walau demikian berdasarkan Gambar 4.29, Rct sebesar 1,656 Ω . NMC541-6x7 memiliki nilai Rct terbesar yakni 2,1107 Ω . Semakin besar hambatannya maka semakin kecil kemampuannya dalam menghantarkan listrik. Nilai Rct terendah dimiliki oleh NMC541-6x5 dibandingkan sampel lain yang memiliki nilai ketahanan transfer muatan lebih tinggi. Resistansi yang rendah disebabkan oleh polarisasi yang rendah, yang telah terbukti meningkatkan sifat elektrokimia (Li & and Lee, 2018).

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Proses perakitan baterai *pouch prismatic* diawali dengan pembuatan lembaran elektroda. Separator digunakan diantara katoda dan anoda yang kemudian bersama sama dilipat bertumpuk (*flat winding*). Hasil gulungan kemudian dimasukkan pada *case*. *Case* yang digunakan adalah *laminated Al foil* yang kemudian di segel dengan *hot sealing machine*. Baterai dimasukkan kedalam *glove box* untuk disuntikan elektrolit dan di segel kembali untuk dilakukan pengujian pertama.
2. Performa kapasitas baterai *pouch* yang dihasilkan bervariasi sesuai dengan variasi dimensi yang dilakukan. Beberapa faktor yang mempengaruhi performa baterai *pouch* adalah kontak area, jika pada proses *seal* akhir menggunakan mesin *vacuum sealing* maka kontak antar komponen baterai akan lebih baik dan mendorong performa yang lebih baik juga.
3. Pengaruh dimensi terhadap performa baterai pouch sebabkan karena jarak antara *current collector* yang ikut berubah seiring dengan perubahan dimensi lipatan baterai. Dari data pengujian yang didapat sampel dengan lipatan terkecil yakni NMC541-6x5 memiliki kapasitas *discharge* dan efisiensi terbesar, pengujian 50 siklus rata rata sebesar 69,188 mAh.g⁻¹ dengan rerata efisiensi 99,436 %. Sampel dengan lipatan menengah yakni NMC541-6x6 memiliki kapasitas dan efisiensi 50 siklus rata-rata sebesar 10,349 mAh.g⁻¹ dan 89,487% berturut-turut. Untuk sampel dengan lipatan terkecil NMC541-6x7 sebesar 0,178 mAh.g⁻¹ dan 48,816% berturut-turut. Nilai hambatan (Rct) NMC541-6x5 sampai NMC541-6x7 berturut turut adalah 1,4675 Ω, 1,656 Ω, dan 2,1107 Ω.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan setelah dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Melarutkan *binder* sebaiknya lebih lama agar benar benar larut dan material aktif tidak terlepas pada saat *calendaring* dan menghindari kehilangan kapasitas.
2. Hasil *flat winding* sebaiknya ditekan terlebih dahulu menggunakan alat *press* untuk memastikan kontak yang menyeluruh.
3. Menggunakan *vacuum sealer machine* ketika hendak mensegel kantung berbahan *laminated Al*, untuk mencegah adanya udara yang terperangkap dan meningkatkan kontak area.

DAFTAR PUSTAKA

- Aaron Wade, T. M. (2020). Multi-Length Scale Analysis of Individual NMC811 Particle Degradation Using X-Ray Computed Tomography. *The Electrochemical Society*, 2(11), 23. DOI 10.1149/MA2020-021123mtgabs
- Adam Sobkowiak, M. R.-W. (2013, june). Understanding and Controlling the Surface Chemistry of LiFeSO₄F for an Enhanced Cathode Functionality. *Chemistry of Materials*. doi:<https://doi.org/10.1021/cm401063s>
- Asmae Berrada, K. L. (2019). Energy Storage. In *Gravity Energy Storage* (pp. 1-23). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816717-5.00001-3>
- Aurelien Du Pasquier, I. P. (2003, march). A comparative study of Li-ion battery, supercapacitor and nonaqueous asymmetric hybrid devices for automotive applications. *Journal of Power Sources*, 115(1), 171-178. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00718-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00718-8)
- Basak, S. D. (2022, September). Characterizing battery materials and electrodes via in situ/operando transmission electron microscopy. *The Journal of Chemical Physics*. <https://doi.org/10.1063/5.0075430>
- Benjamin Schumma, S. K. (2023). Dry battery electrode processing, what's next? *Next Energy*, 2023. doi:<https://doi.org/10.1016/>
- Capkova, D. (2023). Investigation of the temperature and DOD effect on the performance-degradation behavior of lithium–sulfur pouch cells during calendar aging. *Applied Energy*, 332. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120543>
- Chladil L, K. D. (2021). In-situ XRD study a chromium doped LiNi_{0.5}Mn_{1.5}PO₄ Cathode for Li-Ion Battery. *J.Energy Storage*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2021.102907>.
- Emiliano N. Primo, M. C. (2021). Understanding the calendaring processability of LNMC333-based cathodes. *Journal of Power Sources*, 1-11.
- Fisher, M. S. (2014). Lithium and sodium battery cathode materials: computational insights into voltage, diffusion and nanostructural properties. *Chemical Society Reviews*(1). <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2014/cs/c3cs60199d>

- Guo, D. W. (2016). Co-modification of NMC532 cathode materials with zirconium substitution and surface polypyrrole coating: towards superior high voltage electrochemical performances for lithium ion batteries. *Electrochimica Acta*, 196, 101-109. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.02.156>
- Hajime Arai, S. O.-i. (1998). Thermal behavior of $\text{Li}_{1-y}\text{NiO}_2$ and the decomposition mechanism. *Solid State Ionics*, 295-302. [https://doi.org/10.1016/S0167-2738\(98\)00075-7](https://doi.org/10.1016/S0167-2738(98)00075-7)
- K. Mizushima, P. J. (1980). Li_xCoO_2 ($0 < x < 1$): A new cathode material for batteries of high energy density. *Materials Research Bulletin*, 15(6), 783-789. doi:[https://doi.org/10.1016/0025-5408\(80\)90012-4](https://doi.org/10.1016/0025-5408(80)90012-4)
- K. M. Shaju, P. B. (2006). Macroporous LNMC333: A High-Power and High-Energy Cathode for Rechargeable Lithium Batteries. *Advanced Materials*, 18(17), 2330-2334. <https://doi.org/10.1002/adma.200600958>
- K. Beard. (2019). *Lindens Handbook of Batteries, 5th Ed.* McGraw Hill Education.
- Li, J., Zhang, M., Dongyan, & Yan, Y. (2020). Effect of Sintering Conditions on Electrochemical Properties of NMC811 as Cathode Material. *International Journal of Electrochemical Science*, 1881 – 1892,. doi:[doi:10.20964/2020.03.63](https://doi.org/10.20964/2020.03.63)
- Li, V. D., & Lee, J. (2018). Na-doped layered $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ with improved rate capability and cycling stability. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 22, 1165-1173.
- Lukman Noerochim, S. a. (2021). Recent Development of Nickel-Rich and Cobalt-Free Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries. *Journal of the electrochemical society*, 7(4), 84. <https://doi.org/10.3390/batteries7040084>
- Lvwei Huang, b. Z. (2019). Thermal runaway behavior during overcharge for large-format lithium-ion batteries with different packaging patterns. *Journal Energy of Storage*.
- Martins, L., Guimarães, L., Botelho Junior, A., Tenório, J., & Espinosa, D. (2021). Electric Car Battery: An overview on Global Demand, Recycling and Future Approaches towards Sustainability. *J. Environ. Manag*, 295. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113091>

- Miao, Y., Hynan, P., Von Jouanne, A., & Yokochi, A. (2019). Current Li-ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements. *Energies*(12). <http://doi.org/10.3390/en12061074>
- N. Recham, J.-N. C.-M. (2009, November). A 3.6 V Li-based fluorosulphate insertion positive electrode for LIB. *Nature Materials*, 9, 68-74.
- Naoki Nitta, F. W. (2015, June 5). Li-ion battery materials: present and future. *Materials Today*, 18. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mattod.2014.10.040>
- Nina Meddings, M. H.-S. (2020). Application of electrochemical impedance spectroscopy to commercial Li-ion cells: A review. *Journal of Power Sources* , 1-27.
- Nutthaphon Phattharasupakun, J. W. (2021). Core-shell Ni-rich NMC-Nanocarbon cathode from scalable solvent-free mechanofusion for high-performance 18650 Li-ion batteries. *Energy Storage Materials*(36), 485-495. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2021.01.032>
- Purwamargapratala, Y., Hardian, M., Pinem, M. P., Kartini, E., & Zulfa, A. (2023). The Effect of Increasing the Thickness of NMC541 Cathode Calendaring on the Performance of Lithium-Ion Batteries. *Journal of Electronic Materials*. <https://doi.org/10.1007/s11664-023-10783-2>
- Purwamargapratala, Y., Safitri, J. F., Nursanto, E. B., Jodi, H., Kartini, E., & Zulfia, A. (2023). EFFECT OF AMMONIA ON THE SYNTHESIS OF NMC 541 CATHODE MATERIALS WITH THE SOL-GEL METHOD. *Jurnal Sains Materi Indonesia (JUSAMI)*.
- Purwamargapratala, Y., Sari, C. N., & Kartini, E. (2021). Effect of yttrium oxide Y₂O₃ on the conductivity of LNCM523 as lithium-ion batteries cathode material. *AIP Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1063/5.0066405>
- Purwamargapratala, Y., Sudaryanto, & Akbar., F. (2020). Neutron tomography study of a lithium-ion coin battery. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 1436. doi:doi:10.1088/1742-6596/1436/1/012029
- Purwamargapratala, Y., Syahrial, A. Z., Putra, T. Y., Kartini, E., & Jodi, H. (2023). The Conductivity Enhancement of 1.5Li₂O-P₂O₅ Solid Electrolytes by Montmorillonite Addition. *International Journal of Renewable Energy Development*, 186-192.

- Roth, D. H. (2012). A General Discussion of Li Ion Battery Safety. *The Electrochemical Society Interface*, 21, 37. DOI 10.1149/2.F03122if
- Sadik-Zada, E. R. (2023). Sustainable management of lithium and green hydrogen and long-run perspectives of electromobility. *Journal of The Electrochemical Society*, 12, 1992. DOI: 10.1016/j.techfore.2022.121992
- Salvatore, A. A., Bruce, P., Scrosati, B., Tarascon, J.-M., & Schalkwijk, W. v. (2005). Nanostructured materials for advanced energy conversion and storage devices. *Nature Materials*, 77. DOI: 10.1038/nmat1368
- Schröder, R., Aydemir, M., & Seliger, G. (2017). Comparatively assessing different shapes of lithium-ion battery cells. *Procedia Manufacturing*, 104-111. doi: 10.1016/j.promfg.2017.02.013
- Shen, X., Zhang, X., Ding, F., Huang, J., Xu, R., & Chen. (2021). Advanced Electrode Materials in Lithium Batteries: Retrospect and Prospect. *Energy Mater. Adv.* <http://doi.org/10.34133/2021/1205324>
- Sudaryanto, Purwamargapratala, Y., Yulianti, E., Honggowiranto, W., & Kartini., E. (2020). Electrochemical Impedance Spectroscopy Study. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 924. doi:10.1088/1757-899X/924/1/012035
- Surendra K. Martha, O. H. (2011). On the Thermal Stability of Olivine Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 158. DOI 10.1149/1.3622849
- Thomas Entwistle, E. e. (2022). Co-precipitation synthesis of nickel-rich cathodes for Li-ion batteries. *Energy Reports*, 67-73. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.06.110>
- Tianmei Chen, Y. H. (2020, April). Applications of Lithium-Ion Batteries in Grid-Scale Energy Storage Systems. *Tianjin University*, 26, 209-217.
- Tsai, W. (2018). Single-particle measurements of electrochemical kinetics in NMC and NCA cathodes for Li-ion batteries. *Energy environment science*, 4(11), 860-871. [http://refhub.elsevier.com/S2405-8297\(21\)00038-6/sbref0003](http://refhub.elsevier.com/S2405-8297(21)00038-6/sbref0003)
- Wang, D., Liu, W., Zhang, X., Huang, (2019). Review of Modified Nickel-Cobalt Lithium Aluminate Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries. *International journal of Photoenergy*. <http://doi.org/10.1155/2019/2730849>

- Warner, J. T. (2019). Lithium-ion cell Manufacturing. Dalam J. T. Warner, *Lithium-Ion Battery Chemistries: A Primer* (hal. 222-248). Elsevier Science.
- Whittingham, M. (2004). Lithium Batteries and Cathode Materials. *Chemical Review*, 10(104), 4271-4302. <https://doi.org/10.1021/cr020731c>
- Wua, X., Bai, Y., & Li, Z. (2020). Effects of Charging Rates on LNMC622/Graphite Li-ion Cells. *U.S. Department of Energy*. <http://energy.gov/downloads/doe-public-access-plan>
- Xiaopei Zhu, L. C.-Z. (2022). Critical rate capability barrier by the (001) microtexture of a single-crystal cathode for long lifetime lithium-ion batteries. *Journal of Materiomics*, 8(3), 649-655. <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2021.11.008>
- Yang, F., Wang, D., Zhao, Y., Tsui, K. L., & Bae, a. S. (2018). A study of the relationship between coulombic efficiency and capacity degradation of commercial lithium-ion batteries. *Energy*, 145, 486–495.
- Yi, Z. (2017). Controllable Synthesis of NMC532OH By a Co-precipitation Method. *Advances in Engineering Research*, 141. <https://www.atlantispress.com/proceedings/icmmce-17/25882388>
- Ylva Olofsson, J. G. (2014). *Impedance spectroscopy characterisation of automotive NMC/graphite Li-ion cells aged with realistic PHEV load profile*. Ljubljana, Slovenia: University of Ljubljana.
- Yongquan Sun, S. Z. (2021). Calendar degradation of LIB under high storage temperature based on EIS. *Microelectronics Reliability*. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114316>
- Yuan, K., Tu, T., Shen, C., Zhou, L., Liu, J., li, J., & Xie, K. (2022). Self-ball milling strategy to construct high-entropy oxide coated LNMC811 with enhanced electrochemical performance. *Journal of Advanced Ceramics*, 11(6), 882-892. <https://doi.org/10.1007/s40145-022-0582-6>
- Zhu, J. a. (2019). Single-crystal based studies for correlating the properties and high-voltage performance of Li[NixMnyCo1-x-y]O2 cathodes. *Journal of Materials Chemistry*, 5463-5474. <https://doi.org/10.1039/c8ta10329a>

LAMPIRAN

Lampiran A. Foto Dokumentasi Kegiatan

- Proses *Coating* dan *Calendaring*

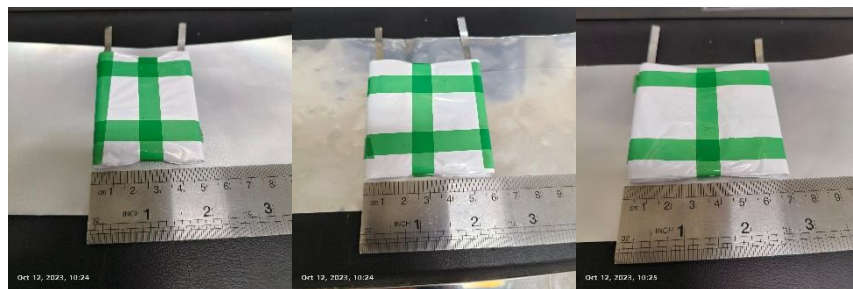


Gambar A.1 Proses *Coating* dan *Calendaring*

- Perakitan / *Assembly* Baterai



Gambar A.2 Susunan Elektroda



Gambar A.3 Variasi Dimensi Lipatan Baterai



Gambar A.4 *Hot sealing* baterai



Gambar A.5 Pengisian Elektrolit

- Pengukuran Voltase Awal



Gambar A.6 Pengecekan Voltase awal (0 V Jika *Short*)

- Pengujian *Cyclic Voltammetry*



Gambar A.7 Pengujian *Cyclic Voltammetry*

- Pengujian *Charge Discharge*



Gambar A.8 Pengujian *Charge Discharge*

- Pengujian *Electrochemical Impedance Spectroscopy*



Gambar A.9 Pengujian *Electrochemical Impedance Spectroscopy*

Lampiran B. Data Hasil Pengukuran

Tabel B.1 Hasil Pengukuran Konduktansi Elektroda

ANODA			KATODA	
Run 1	Run 2	Frequency	Run 1	Run 2
G(S)	G(S)	(Hz)	G(S)	G(S)
5,25E-01	5,32E-01	42	1,02E-02	1,01E-02
5,26E-01	5,32E-01	50	1,02E-02	1,01E-02
5,27E-01	5,32E-01	60	1,00E-02	1,02E-02
5,27E-01	5,32E-01	70	1,00E-02	1,01E-02
5,27E-01	5,32E-01	80	1,00E-02	1,01E-02
5,27E-01	5,32E-01	90	1,00E-02	1,01E-02
5,27E-01	5,31E-01	100	1,01E-02	1,02E-02
5,28E-01	5,31E-01	200	1,01E-02	1,02E-02
5,28E-01	5,30E-01	300	1,01E-02	1,02E-02
5,28E-01	5,30E-01	400	1,01E-02	1,02E-02
5,28E-01	5,29E-01	500	1,01E-02	1,02E-02
5,28E-01	5,29E-01	600	1,01E-02	1,02E-02
5,28E-01	5,29E-01	700	1,01E-02	1,02E-02
5,28E-01	5,29E-01	800	1,01E-02	1,02E-02
5,28E-01	5,29E-01	900	1,00E-02	1,02E-02
5,28E-01	5,29E-01	1000	1,00E-02	1,02E-02
5,28E-01	5,29E-01	2000	1,00E-02	1,02E-02
5,28E-01	5,29E-01	3000	1,00E-02	1,02E-02
5,28E-01	5,29E-01	4000	1,00E-02	1,02E-02
5,29E-01	5,39E-01	5000	1,00E-02	1,02E-02
5,29E-01	5,39E-01	6000	1,01E-02	1,02E-02
5,29E-01	5,39E-01	7000	1,01E-02	1,02E-02
5,29E-01	5,39E-01	8000	1,02E-02	1,02E-02
5,29E-01	5,38E-01	9000	1,02E-02	1,02E-02
5,30E-01	5,38E-01	10000	1,02E-02	1,02E-02
5,36E-01	5,37E-01	20000	1,02E-02	1,02E-02

5,35E-01	5,36E-01	30000	1,03E-02	1,02E-02
5,35E-01	5,35E-01	40000	1,03E-02	1,02E-02
5,34E-01	5,35E-01	50000	1,03E-02	1,03E-02
5,33E-01	5,34E-01	60000	1,03E-02	1,03E-02
5,32E-01	5,33E-01	70000	1,03E-02	1,03E-02
5,32E-01	5,32E-01	80000	1,03E-02	1,03E-02
5,30E-01	5,31E-01	90000	1,04E-02	1,03E-02
5,29E-01	5,30E-01	100000	1,04E-02	1,03E-02
5,13E-01	5,14E-01	200000	1,05E-02	1,03E-02
4,90E-01	4,91E-01	300000	1,06E-02	1,04E-02
4,61E-01	4,61E-01	400000	1,05E-02	1,05E-02
4,29E-01	4,29E-01	500000	1,07E-02	1,06E-02
3,95E-01	3,95E-01	600000	1,08E-02	1,08E-02
3,62E-01	3,62E-01	700000	1,09E-02	1,09E-02
3,30E-01	3,30E-01	800000	1,10E-02	1,11E-02
2,99E-01	2,99E-01	900000	1,12E-02	1,12E-02
2,72E-01	2,72E-01	1000000	1,14E-02	1,14E-02

Tabel B.2 Koordinat EIS Nyquist Plot NMC

NMC541-6x5		NMC541-6x6		NMC541-6x7	
Z' (Ω)	-Z'' (Ω)	Z' (Ω)	-Z'' (Ω)	Z' (Ω)	-Z'' (Ω)
0,5110	0,0665	1,9138	0,0795	0,8563	0,0641
0,5339	0,0844	1,9494	0,1129	0,8826	0,0834
0,5566	0,0985	1,9897	0,1389	0,9058	0,0970
0,5837	0,1095	2,0215	0,1560	0,9334	0,1070
0,6121	0,1176	2,0620	0,1677	0,9618	0,1143
0,6395	0,1232	2,0659	0,1747	0,9916	0,1200
0,6686	0,1282	2,1083	0,1779	1,0191	0,1256
0,6980	0,1323	2,1486	0,1802	1,0466	0,1314
0,7278	0,1360	2,1867	0,1829	1,0744	0,1381
0,7582	0,1392	2,2234	0,1868	1,0984	0,1452
0,7896	0,1421	2,2519	0,1913	1,1292	0,1541
0,8209	0,1441	2,2877	0,1983	1,1621	0,1641
0,8533	0,1452	2,3215	0,2066	1,1974	0,1748
0,8860	0,1452	2,3608	0,2157	1,2339	0,1860
0,9185	0,1440	2,4059	0,2255	1,2748	0,1977
0,9507	0,1417	2,4515	0,2356	1,3188	0,2096
0,9819	0,1384	2,4894	0,2465	1,3656	0,2215
1,0115	0,1345	2,5361	0,2580	1,4152	0,2332
1,0390	0,1304	2,5848	0,2706	1,4672	0,2445
1,0639	0,1272	2,6404	0,2845	1,5213	0,2553

1,0863	0,1260	2,6969	0,2996	1,5768	0,2651
1,1066	0,1284	2,7547	0,3174	1,6325	0,2743
1,1258	0,1357	2,8015	0,3395	1,6863	0,2847
1,1466	0,1492	2,8522	0,3694	1,7391	0,2994
1,1666	0,1711	2,9100	0,4100	1,7871	0,3237
1,1892	0,2030	2,9736	0,4688	1,8342	0,3629
1,2167	0,2468	3,2679	0,5521	1,8857	0,4217
1,2522	0,3047	3,3494	0,6644	1,9466	0,5042
1,2980	0,3787	3,4527	0,8106	2,0225	0,6143
1,3577	0,4706	3,5856	0,9941	2,1202	0,7545
1,4341	0,5820	4,0145	1,2155	2,2482	0,9278
1,5293	0,7154	4,2391	1,4765	2,4140	1,1350
1,6449	0,8775	4,5235	1,7785	2,6247	1,3780
1,7857	1,0764	4,8710	2,1161	2,8838	1,6566
1,9507	1,3175	5,2842	2,4954	3,1957	1,9773
2,1499	1,6199	5,7622	2,9111	3,5608	2,3415
2,3871	1,9983	6,3040	3,3994	3,9827	2,7689
2,6724	2,4794	6,9210	4,0051	4,4618	3,2796
3,0145	3,0814	7,5268	4,7100	5,0080	3,8920
3,4303	3,8507	8,5057	5,5560	5,6327	4,6527