

BAB IV

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Komposisi Bahan Anoda dan Katoda

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

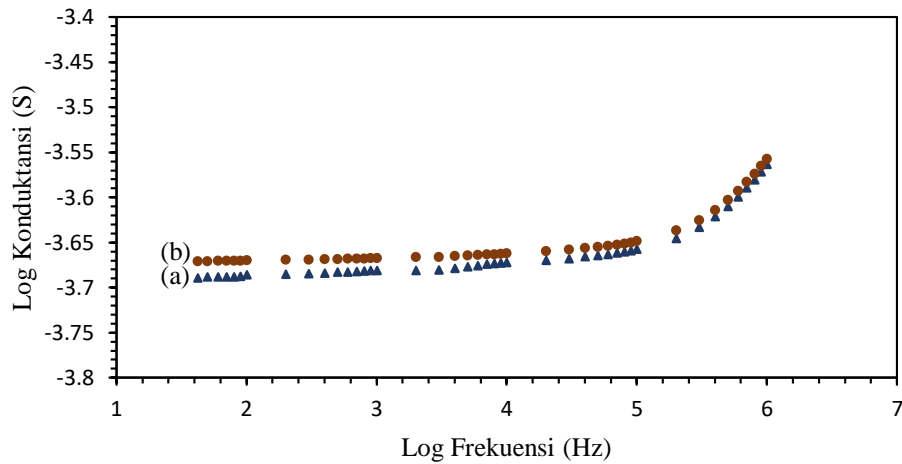
Tabel 4.1 Perbandingan bahan-bahan pada lembaran anoda dan katoda

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

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

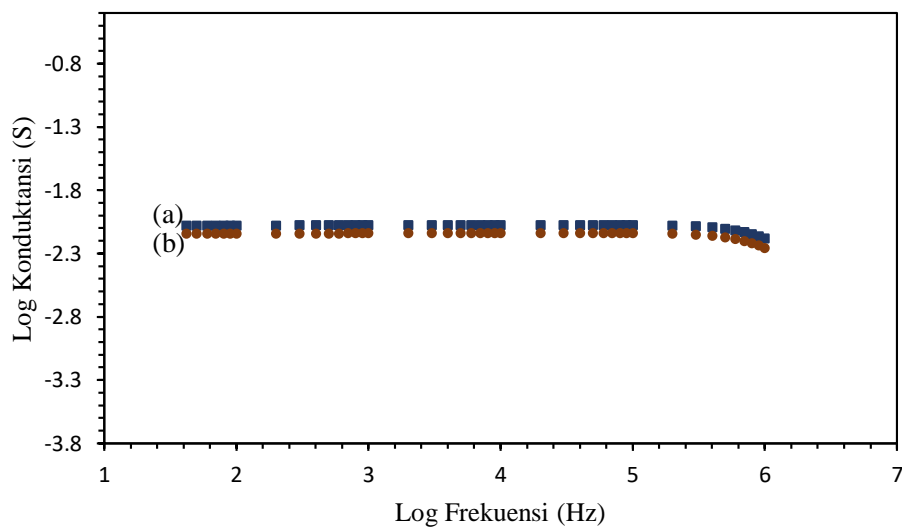
4.2 Analisis Konduktansi dan Konduktivitas Material

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



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

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



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

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

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

Keterangan:

σ : Konduktivitas (S.cm⁻¹)

G : Konduktansi (S)

L : Tebal lembaran (cm)

A : Luas lembaran (cm²)

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

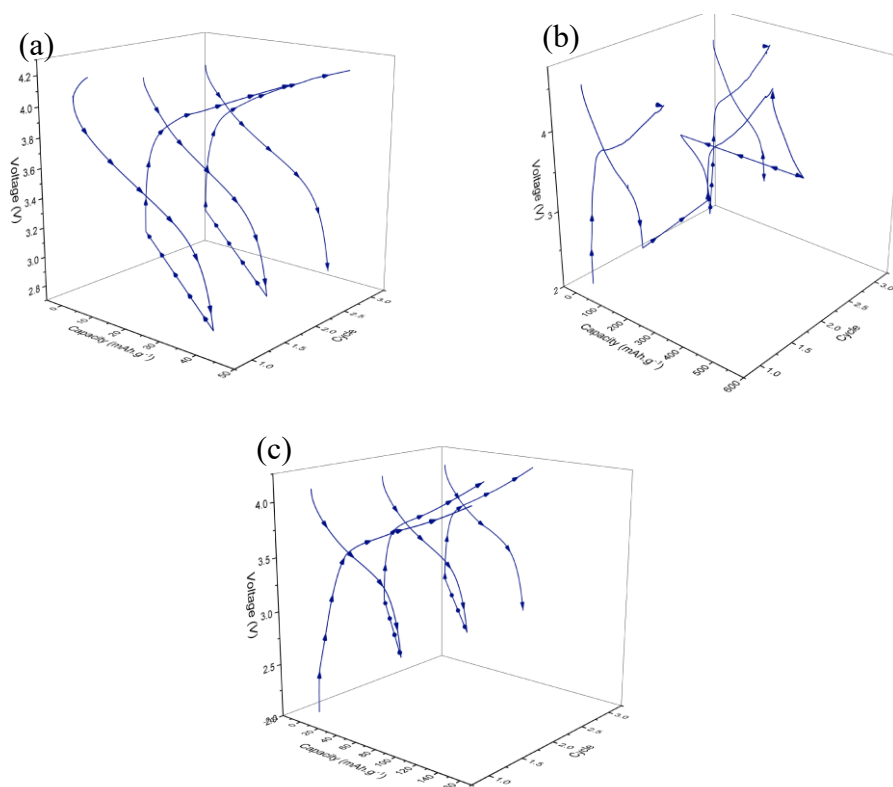
Tabel 4.2 Konduktivitas Bahan Untuk Anoda dan Katoda

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

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

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

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



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

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

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

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

Keterangan

C : Kapasitas spesifik (mAh.g⁻¹)

C_{act} : Kapasitas hasil pengujian (Ah)

m_{am} : Massa material aktif (g)

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

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

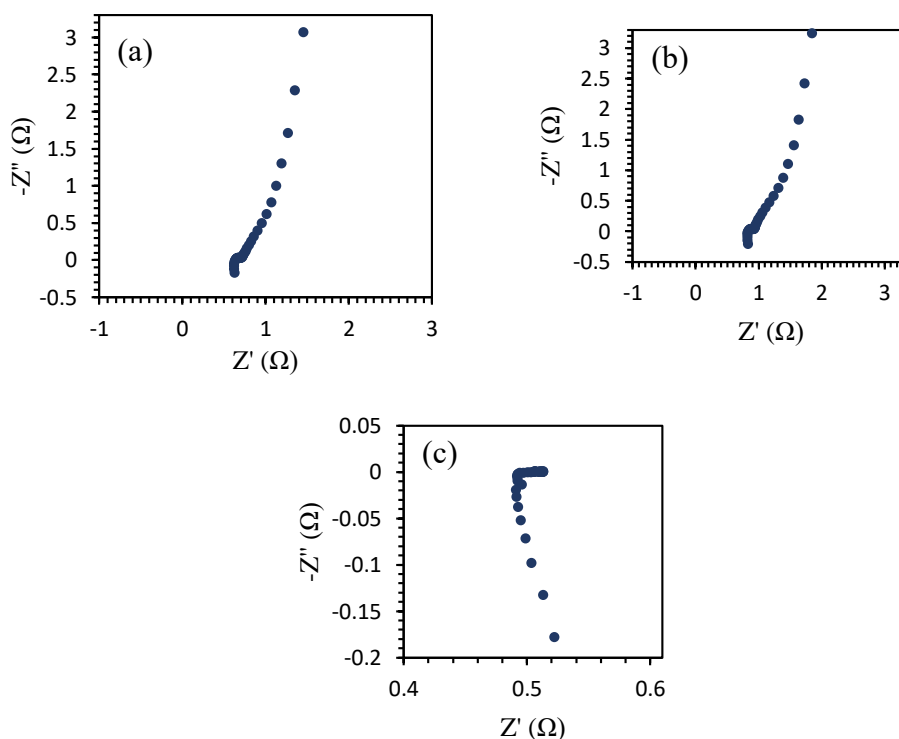
Nama Sampel	Nilai Kapasitas Maksimum (mAh.g ⁻¹)
NMC541 35-40	42,164
NMC541 37,5-37,5	291,295
NMC541 40-35	152,781

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

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

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

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



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

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

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

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

Keterangan:

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

Z_i : Impedansi Riil Akhir (Ω)

Z_o : Impedansi Riil Awal (Ω)

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

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

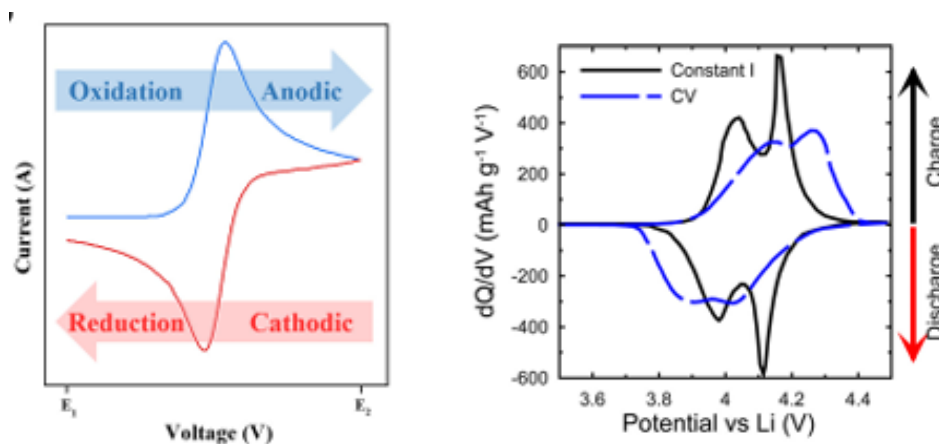
	NMC541 7-8	NMC541 1-1
Z_i (Ω)	0,7	0,9
Z_o (Ω)	0,63	0,83
R_{ct} (Ω)	0,07	0,07

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

4.5 Analisis Elektrokimia Baterai Menggunakan *Cyclic Voltammetry*

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

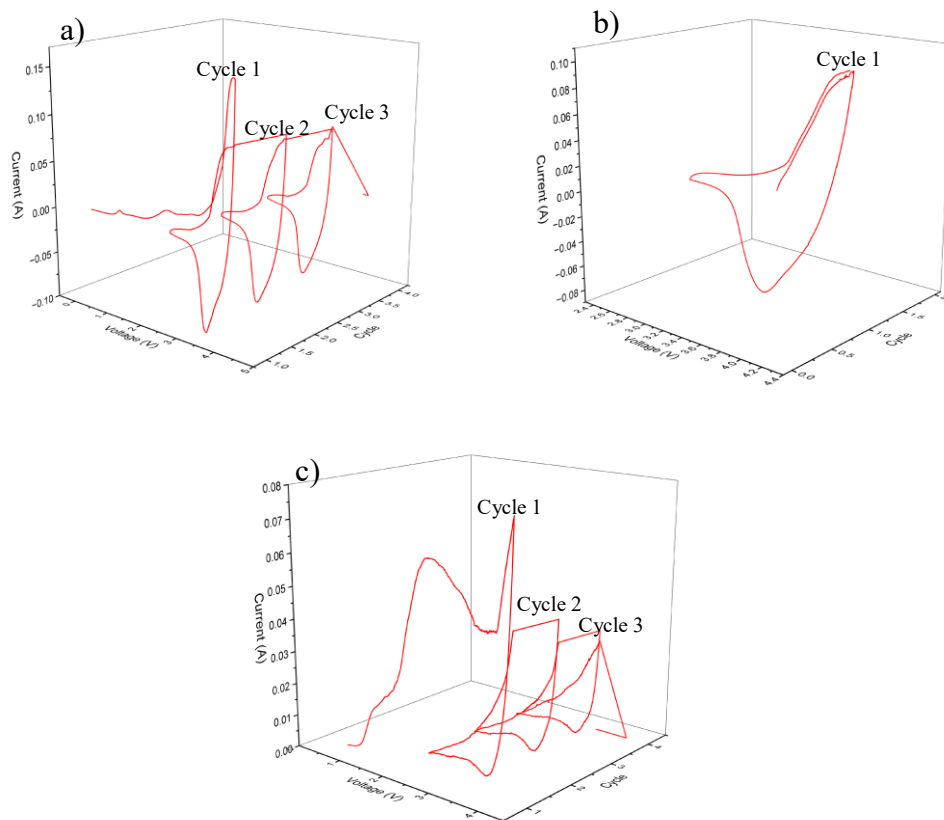
terjadi apabila baterai mengalami pemakaian (*discharge*). Berikut merupakan contoh reaksi oksidasi dan reduksi yang terjadi pada analisis *cyclic voltammetry*.



Gambar 4.5 Grafik pada analisis *Cyclic Voltammetry*

(Sumber: Taewhan Kim, 2020)

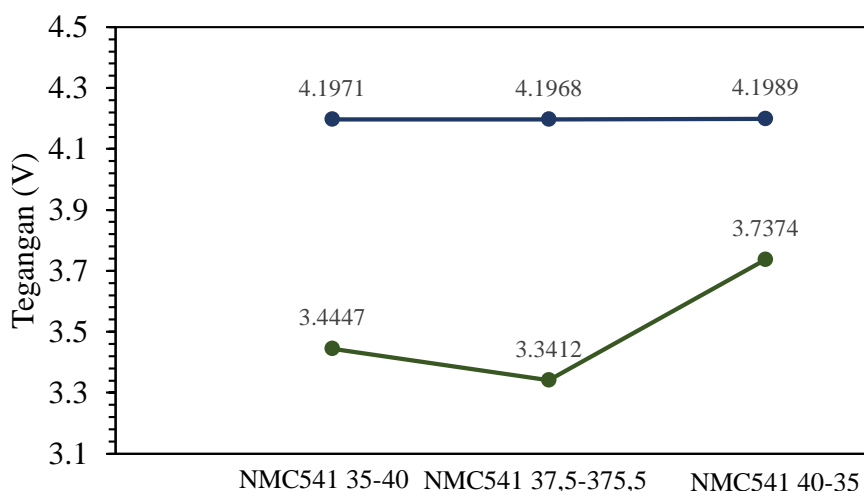
Berdasarkan gambar 4.5, reaksi oksidasi terjadi ketika baterai dilakukan pengisian (*charge*) dan reaksi reduksi terjadi ketika baterai dilakukan pemakaian (*discharge*). Analisis *cyclic voltammetry* menggunakan konvensi dengan standar IUPAC (Zohreh Hirbodvash, 2023). Konvensi ini umum digunakan dalam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



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

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

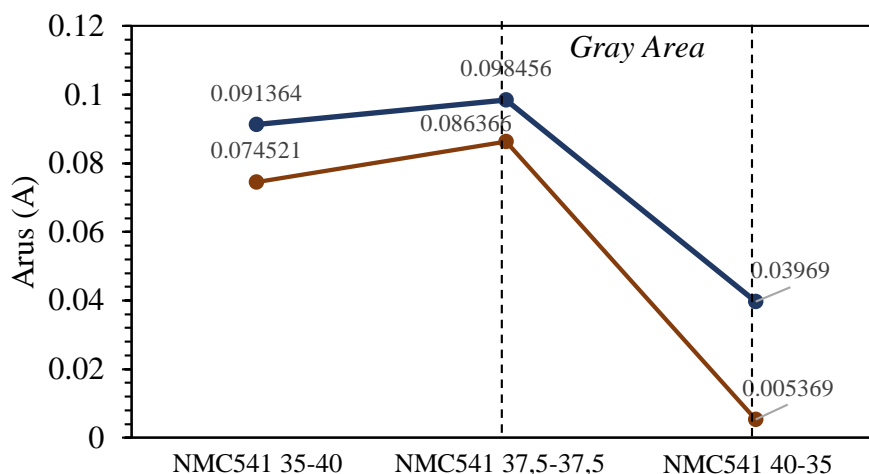
karena saat anodik baterai dalam keadaan *charge* dimana elektron berkumpul pada elektroda. Ketika tegangan dinaikkan arus meningkat secara eksponensial hingga mencapai titik maksimumnya dimana arus yang ditarik menuju elektroda sudah maksimal. Selanjutnya ketika baterai digunakan atau *discharge* maka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



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

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

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



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

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