

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam beberapa tahun terakhir, pengembangan teknologi penyimpanan energi berkembang pesat untuk mendukung kendaraan listrik, perangkat elektronik portabel, dan berbagai aplikasi lainnya. Salah satu fokus utama adalah pembuatan membran berpori, yang memiliki potensi besar di bidang energi, penyimpanan energi, dan sensor [1]. Pada industri energi, teknologi membran banyak dijadikan sebagai membran separator baterai yang memanfaatkan struktur pori berukuran nano [1]. Nanopori merupakan pori-pori berukuran 0-30 nm dan biasanya dihasilkan dari protein pembentuk pori. selain digunakan sebagai cetakan lubang pada bahan sintesis seperti silikon atau grafen, nanopori juga dapat diterapkan pada teknologi membran [2].

Membran berpori memainkan peran kunci dalam meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem, terutama dalam konteks baterai dan perangkat penyimpanan energi lainnya [2]. Ukuran dan distribusi pori dalam membran sangat mempengaruhi transportasi ion, permeabilitas, dan sifat mekanik [3]. Penggunaan membran juga tidak terlepas dari material penyusunnya. Berbagai macam material dapat dijadikan sebagai bahan utama membran seperti polimer. Beberapa jenis polimer yang dapat digunakan seperti polimer alam dan sintetik [4].

Polimer alam adalah polimer yang ditemukan secara alami di lingkungan, biasanya berasal dari sumber biologis seperti pada tumbuhan, hewan dan mikroorganisme, salah satu jenis polimer alam adalah *Polylactic Acid* (PLA) [5]. PLA merupakan salah satu bahan alternatif yang menarik perhatian karena sifatnya yang biodegradable, berasal dari sumber daya terbarukan, dan ramah lingkungan [6]-[7]. PLA memiliki kekuatan mekanis yang baik, namun kelemahan seperti rendahnya konduktivitas ionik dan stabilitas termal membatasi penggunaannya secara langsung dalam aplikasi baterai [8]. Untuk mengatasi kelemahan ini, penambahan material nano seperti *Carbon Quantum Dots* (CQDs) dapat menjadi solusi yang efektif [9].

CQDs adalah nanomaterial dengan konduktivitas tinggi dan karakteristik optik baik [10]. Modifikasi membran PLA-CQDs diharapkan dapat menghasilkan membran dengan karakter yang lebih baik seperti peningkatan kestabilan membran [11], memperkecil ukuran pori-pori membran, serta meningkatkan konduktivitas membran [9]. Selain penggunaan materialnya, pembuatan membran berpori juga dipengaruhi oleh proses pembuatannya [10]. Terdapat berbagai macam metode pembentukan nanopori, dan salah satu metode efisien, fleksibel, dan mudah dioperasikan adalah metode *electrospinning* [12].

Metode *electrospinning* merupakan metode yang efektif dalam fabrikasi membran [12]. Selain prosesnya yang cepat, mudah, dan sederhana, metode *electrospinning* memiliki keunggulan dalam menghasilkan membran dengan sifat mekanik yang baik dan porositas tinggi ($\geq 90\%$). Metode ini juga mampu menghasilkan membran yang homogen, mengontrol proses fabrikasi, orientasi, dan morfologi, serta membentuk pori seragam dengan mengatur parameter-parameter *electrospinning* [13].

Penelitian sebelumnya membentuk membran berbasis *polylactic acid* (PLA) dengan struktur nanopori menggunakan metode *electrospinning*, yang berhasil meningkatkan kapasitas transfer ion dalam aplikasi baterai. Meskipun hasilnya menjanjikan, membran PLA memiliki kelemahan utama yaitu stabilitas termalnya yang rendah, yang membatasi penggunaannya pada suhu operasi tinggi. Selain itu, meskipun struktur nanopori meningkatkan efisiensi transfer ion, kinerja keseluruhan masih terbatas karena PLA murni kurang mampu memenuhi tuntutan performa baterai dalam jangka panjang. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengatasi kelemahan tersebut dengan mengintegrasikan *carbon quantum dots* (CQDs) ke dalam PLA, yang diharapkan dapat meningkatkan konduktivitas ionik dan stabilitas termal membran, serta memperbaiki kekuatan mekaniknya, untuk menghasilkan membran elektrolit baterai yang lebih efisien dan tahan lama [14].

Maka dari permasalahan ini, dilakukan penelitian tentang pembentukan nanopori membran nanopori berbasis CQDs-PLA menggunakan *electrospinning* untuk menghasilkan pori berukuran nanometer, serta mengkaji pengaruhnya terhadap

konduktivitas ionik dan kapasitas baterai. Integrasi CQDs ke dalam PLA diharapkan dapat meningkatkan performa membran dalam aplikasi baterai.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana sintesa membran nanopori berbasis PLA dengan variasi CQDs menggunakan metode *electrospinning* untuk pengaplikasian pada baterai?
2. Bagaimana efektivitas membran nanopori berbasis PLA-CQDs yang disintesis menggunakan metode *electrospinning* dalam meningkatkan kekuatan mekanik, konduktivitas ionik, impedansi, dan reaksi redoks untuk meningkatkan performa dan efisiensi baterai?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengembangkan membran nanopori berbasis PLA-CQDs dengan menggunakan metode *electrospinning* untuk pengaplikasian pada baterai.
2. Menganalisa pengaruh penambahan variasi CQDs pada membran nanopori berbasis PLA terhadap distribusi pori, kekuatan mekanik, dan kinerja membran baterai, termasuk konduktivitas, impedansi, dan reaksi redoks, untuk meningkatkan performa dan efisiensi baterai

1.3 Manfaat

1. Penelitian ini menghasilkan membran nanopori berbasis PLA dengan variasi CQDs yang meningkatkan kekuatan mekanik, transfer ion, konduktivitas, kapasitas, efisiensi reaksi redoks, serta menurunkan impedansi, sehingga secara langsung berkontribusi pada peningkatan performa baterai..
2. Penelitian ini menyediakan wawasan baru mengenai pengaruh variasi CQDs terhadap distribusi pori dan kekuatan mekanik membran, yang secara langsung mendukung peningkatan performa baterai melalui optimalisasi transfer ion, penurunan impedansi, dan efisiensi reaksi redoks pada aplikasi energi..

1.4 Batasan Masalah

1. Pengaruh pengotor pada pencampuran CQDS dan PLA ketika penelitian diabaikan
2. Pencampuran komponen ketika proses pembuatan membran elektrolit dan membran berpori dianggap homogen.
3. Penelitian diaplikasikan dalam penggunaan baterai alumium udara dengan anoda berupa aluminium, katoda berupa karbon.
4. Penelitian ini berfokus pada kekuatan mekanik membran, khususnya pada kekuatan tarik membran.
5. Penelitian ini berfokus pada peningkatan performa baterai yang meliputi konduktifitas, kapasitas, impedensi dan reaksi redoks

1.5 Sistematika Penulisan

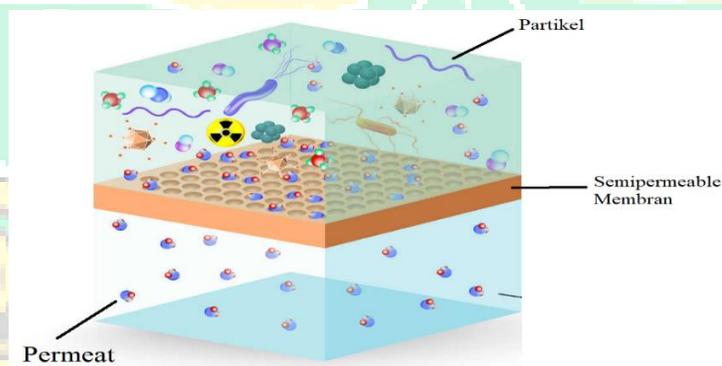
Sistematika penulisan laporan tugas akhir ini terdiri dari tiga bagian, yaitu : BAB I yang terdiri dari latar belakang, tujuan, manfaat, batasan masalah dan sistematika penulisan dari laporan tugas akhir. BAB II dijabarkan teori-teori pendukung yang berhubungan dengan penelitian yaitu tentang *Carbon Quantum Dots* (CQDs) nanopori, *Polyvinil Alcohol* (PVA), dan metoda *electrospinning*. BAB III yaitu metodologi, menjelaskan tentang metode yang dilakukan dalam penelitian yang meliputi studi literatur, identifikasi masalah, alat dan bahan, metodologi riset, variabel penelitian dan prosedur penelitian. BAB IV HASIL yaitu menjabarkan hasil dari penelitian yang telah dilakukan dan terakhir adalah BAB V saran dan kesimpulan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Membran

2.1.1 Definisi membran

Membran didefinisikan sebagai suatu media berpori, berbentuk film tipis, bersifat semipermeabel yang berfungsi untuk memisahkan partikel dengan ukuran molekuler (spesi) dalam suatu sistem larutan [15]. Proses pemisahan membran merupakan teknik yang digunakan untuk memisahkan komponen-komponen dalam suatu campuran berdasarkan perbedaan ukuran partikel, muatan, atau sifat fisik lainnya. Dalam proses ini, campuran dialirkan melalui membran yang memiliki pori-pori dengan ukuran tertentu, sehingga partikel yang lebih besar dari pori membran akan tertahan, sementara partikel yang lebih kecil akan lolos dan menjadi hasil pemisahan yang disebut permeat. Proses ini banyak diterapkan dalam berbagai bidang, seperti penyaringan air, pemurnian udara, dan dalam industri bioteknologi, karena kemampuannya untuk memisahkan dengan efisiensi tinggi dan tanpa memerlukan bahan kimia tambahan [16]. Proses pemisahan membran ditampilkan pada **Gambar 2.1**



Gambar 2. 1 Proses pemisahan membran [16]

2.1.2 Jenis-jenis membran

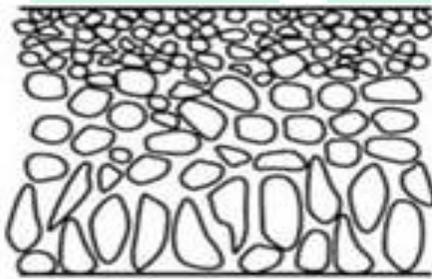
Membran yang digunakan dalam pemisahan molekul dapat diklasifikasikan berdasarkan morfologi, kerapatan pori, fungsi, struktur, dan bentuknya [17].

1. Berdasarkan morfologinya

Dilihat dari morfologinya, membran dapat digolongkan dalam dua bagian [18] yaitu :

a. Membran asimetris

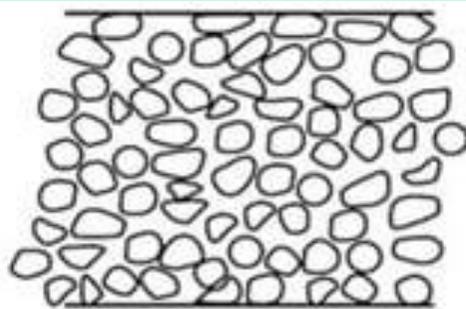
Membran asimetris terdiri dari lapisan tipis di atasnya dan lapisan lebih tebal di bawahnya, dengan ukuran pori yang tidak seragam. Pori di lapisan luar memiliki ukuran antara 0,2-1 μm , lebih kecil dibandingkan pori di bagian pendukung yang berukuran 50-150 μm [18]. Bentuk membran asimetris ditampilkan pada **Gambar 2.2**



Gambar 2. 2 Membran Asimetris [18]

b. Membran simetris

Membran simetris adalah membran yang mempunyai ukuran dan kerapatan pori yang sama disemua bagian, tidak mempunyai lapisan kulit. Ketebalannya berkisar antara 10-200 μm [18]. Bentuk membran simetris ditampilkan pada **Gambar 2.3**.



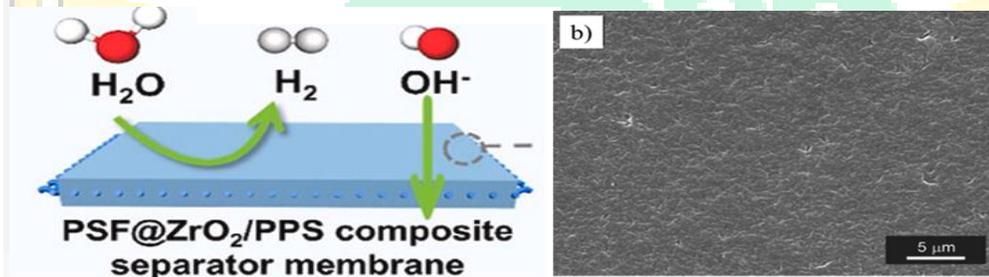
Gambar 2. 3 Membran simetris [18]

2. Berdasarkan kerapatan porinya

Dilihat kerapatan porinya, membran dapat dibedakan dalam dua bagian [19]

a. Membran rapat (membran tak berpori)

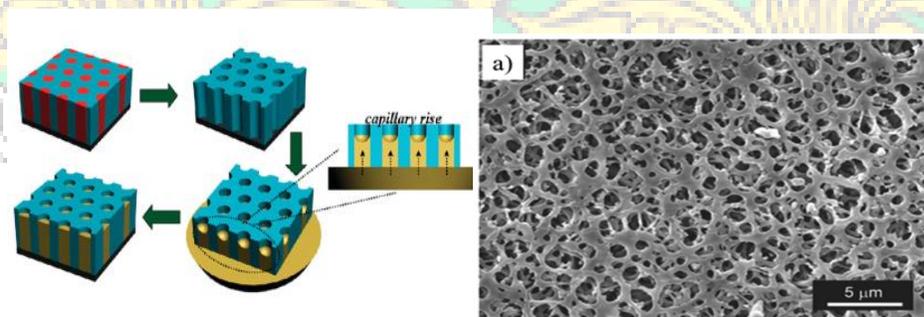
Membran tidak berpori merupakan jenis membran dengan kerapatan pori rendah atau tanpa pori. Membran jenis ini banyak diaplikasikan sebagai pemisah campuran yang memiliki molekul kecil salah satu contohnya adalah pemisahan pada gas. Selain itu, permeabilitas membran ini ditentukan oleh sifat serta tipe polimer yang digunakan [18]. Morfologi membran ditampilkan pada **Gambar 2.4**.



Gambar 2. 4 Membran tidak berpori [18]

b. Membran berpori

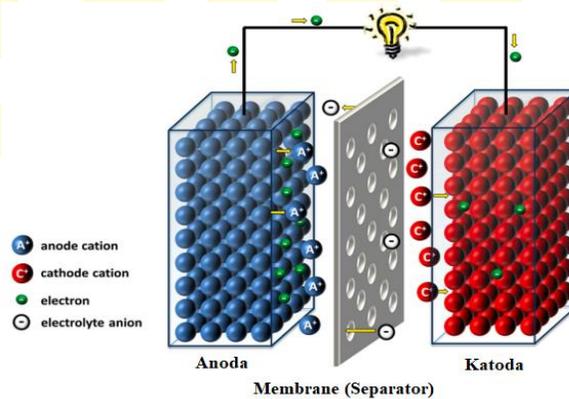
Jenis membran yang memiliki pori-pori kecil atau lubang-lubang mikroskopis pada strukturnya. Membran berpori ini sering digunakan untuk proses ultrafiltrasi, mikrofiltrasi, hyperfiltrasi. Selektifitas membran ini ditentukan oleh ukuran pori dan pengaruh bahan polimer [19]. Morfologi membran dapat ditampilkan pada **Gambar 2.5**.



Gambar 2. 5 Membran berpori [18]

2.2 Baterai

Baterai adalah perangkat yang dapat menyimpan energi kimia kemudian mengkonversinya menjadi energi listrik dan proses ini disebut dengan proses elektrokimia [20]. Baterai juga tersusun dari gabungan sel elektrokimia dan memiliki 3 komponen utama pada konstruksinya yaitu anoda, katoda, dan juga membran elektrolit [20]. Kontruksi baterai ditampilkan pada **Gambar 2.6**.



Gambar 2. 6 Kontruksi baterai [21]

Pada **Gambar 2.6** dapat dilihat bahwasanya baterai tersusun dari 3 komponen dengan fungsi masing-masing berikut fungsi dari komponen penyusun baterai:

1. Anoda
Anoda merupakan elektroda yang menjadi media reaksi oksidasi, oksidasi adalah proses elektrokimia ketika anoda melepas elektron.
2. Katoda
Katoda merupakan elektroda yang menjadi media reaksi reduksi, reduksi adalah proses elektrokimia Ketika anoda menerima elektron.
3. Elektrolit
Elektrolit adalah media yang memungkinkan terjadinya aliran ion antara anoda dan katoda. Elektrolit biasanya berbentuk padat, gel atau cair tergantung tujuan dari penggunaannya.
4. Membran/separator

Membran/separator merupakan media berbentuk lapisan tipis yang memisahkan anoda dan memungkinkan ion untuk bergerak.

2.3 *Polylactic Acid (PLA)*

Polylactic Acid (PLA) adalah polimer sintetis yang diproduksi dari sumber daya terbarukan, seperti pati jagung atau tebu, melalui proses fermentasi yang menghasilkan asam laktat. PLA dikenal sebagai salah satu polimer biodegradable yang paling banyak digunakan, baik dalam industri kemasan makanan, tekstil, hingga aplikasi medis. Keunggulan utama PLA terletak pada sifatnya yang ramah lingkungan, karena dapat terurai secara alami dalam waktu yang lebih singkat jika dibandingkan dengan plastik konvensional seperti polietilena atau polipropilena, yang membutuhkan waktu bertahun-tahun untuk hancur [9].

Dalam konteks aplikasi baterai, PLA menawarkan potensi besar berkat sifat mekaniknya yang baik dan kemampuan untuk dimodifikasi dengan berbagai bahan lain, seperti carbon quantum dots (CQDs), untuk meningkatkan performa material. PLA dapat digunakan sebagai bahan dasar membran elektrolit karena mudah diproses menggunakan metode seperti electrospinning, yang memungkinkan pembuatan serat nanometer dengan struktur pori yang seragam. Struktur ini sangat penting untuk meningkatkan efisiensi transfer ion dalam baterai, sehingga mendukung kinerja baterai yang lebih baik[21]. Bentuk dari PLA dilihat pada

Gambar 2.7



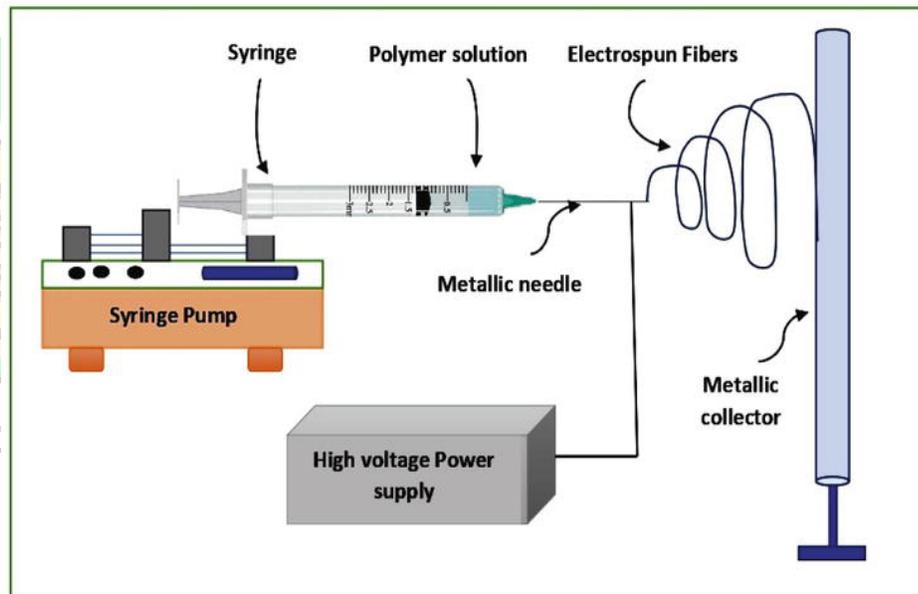
Gambar 2. 7 *Polylactic Acid (PLA)*

2.4 Electrospinning

2.4.1 Pengertian *Electrospinning*

Electrospinning adalah prosedur sederhana untuk membuat serat nano dan nanopori yang telah menarik banyak perhatian dalam beberapa dekade terakhir. Proses ini menggunakan peralatan yang memanfaatkan tegangan tinggi dan prinsip medan listrik untuk menghasilkan serat nano secara kontinu dengan metode yang mudah dan biaya rendah [13].

Metode *electrospinning* larutan biasanya menghasilkan serat dengan diameter antara 100 hingga 10.000 nm, yang memungkinkan terciptanya material dengan sifat unik [5]. Meskipun fungsionalitas pada skala nano masih menjadi tantangan, sutra alami, yang terdiri dari ribuan serat nano berdiameter sekitar 20 nm, menunjukkan potensi besar dalam memanfaatkan efek nano secara maksimal. Hal ini membuka peluang baru untuk mengembangkan material dengan performa yang lebih baik [12]. Mengembangkan teknologi yang dapat menghasilkan serat nano dengan ukuran di bawah 50 nm merupakan tantangan besar [13]. Pada **Gambar 2.8** menunjukkan bentuk dari alat *electrospinning*.



Gambar 2.8 *Electrospinning* [22]

Electrospinning memiliki 3 bagian utama yang ditampilkan pada **Gambar 2.8** yakni: *Power High Voltage*, *syringe pump* dan *spinneret*, serta *collector*

1. *Power High Voltage*

Sumber tegangan tinggi (*Power High Voltage*) adalah komponen penting dalam proses *electrospinning*, yang menyediakan tegangan listrik untuk menghasilkan medan listrik kuat antara jarum (*spinneret*) dan pengumpul (*collector*). kV [22]. *Power High Voltage* ditampilkan pada **Gambar 2.9**.



Gambar 2.9 *High Voltage Power Supply*

2. *Syringe pump*

Syringe pump electrospinning merupakan komponen penting dalam sistem *electrospinning* untuk mengatur aliran larutan polimer ke jarum *spinneret* dengan presisi. Alat ini memungkinkan pemompaan larutan pada kecepatan disesuaikan, memastikan pembentukan serat nano stabil, seragam, dan berkualitas tinggi untuk aplikasi di bidang medis, elektronik, dan filtrasi [22].

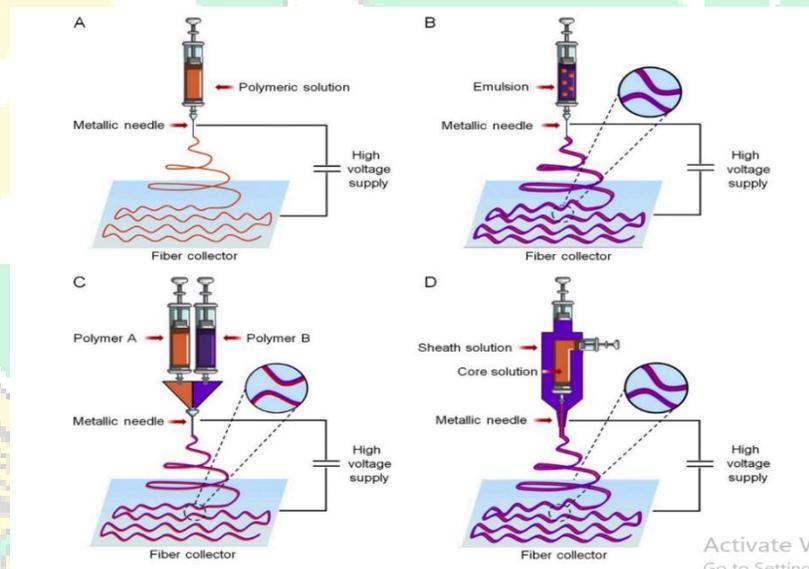
3. *Collector plate*

Collector plate dalam proses *electrospinning* merupakan komponen penting yang berfungsi sebagai media penampungan serat nano yang terbentuk. Ketika larutan polimer dipompa melalui *spinneret* dan dikenakan medan listrik tinggi, serat nano akan

tertarik ke *Collector plate*, di mana serat-serat tersebut mengendap dan membentuk jaringan. Posisi dan desain *Collector plate* sangat mempengaruhi struktur, orientasi, dan distribusi serat, yang selanjutnya memengaruhi kualitas serta karakteristik serat nano yang dihasilkan [23].

2.3.3 Prinsip Kerja *Electrospinning*

Electrospinning merupakan teknik inovatif menggunakan medan listrik tinggi untuk menghasilkan serat nano. Dalam proses ini, larutan polimer dipompa melalui *spinneret* (jarum) dan diberi tegangan tinggi, membentuk jet cair sangat tipis. Medan listrik menarik tetesan cairan menuju *collector*, di mana pelarut menguap dan meninggalkan polimer mengeras menjadi serat nano. Serat-serat ini terendap di *collector* dan membentuk jaringan serat halus [24]. Prinsip kerja *electrospinning* ditampilkan pada **Gambar 2.10**.



Gambar 2. 10 Prinsip kerja *Electrospinning* [26]

Kelebihan dari teknik *electrospinning* terletak pada kemampuannya menghasilkan serat dengan diameter sangat kecil dan seragam, bahkan hingga skala nanometer. Faktor-faktor seperti kekuatan medan listrik, viskositas larutan, dan jarak antara *spinneret* dan *collector* mempengaruhi hasil akhir proses ini. Dengan pengaturan yang tepat, *electrospinning* memungkinkan pembuatan serat dengan struktur dan sifat

yang dapat disesuaikan untuk berbagai aplikasi, seperti material komposit, filter udara dan air, serta bidang medis dan elektronik. Proses ini membuka peluang besar untuk inovasi di berbagai industri berteknologi tinggi [25].

2.4 Carbon Quantum Dots (CQDs)

Carbon Quantum Dots (CQDs) adalah nanopartikel karbon sangat kecil, umumnya di bawah 10 nm, dengan kemampuan memancarkan cahaya yang baik. Sebagai material berbasis karbon, CQDs menawarkan kelebihan seperti stabilitas kimia tinggi, biokompatibilitas, dan rendah toksisitas. CQDs dapat disintesis melalui berbagai metode, baik *top-down* menggunakan sumber biomassa atau bahan organik, maupun *bottom-up* dengan senyawa karbon kecil. Kemampuan memancarkan cahaya pada CQDs berasal dari struktur elektronik dan interaksi permukaan partikel, yang dapat dimodifikasi selama sintesis untuk menyesuaikan panjang gelombang emisi dan meningkatkan efisiensi cahaya. Dibandingkan quantum dots berbasis semikonduktor, CQDs lebih unggul dalam hal biaya produksi lebih rendah, proses pembuatan lebih mudah, dan lebih ramah lingkungan karena tidak menggunakan bahan berbahaya [28].

CQDs dapat digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti sensor untuk mendeteksi ion logam. Di bidang biomedis, CQDs menggantikan pewarna berbasis logam sebagai pewarna cahaya untuk sel dan jaringan. Dalam obat-obatan, CQDs berfungsi sebagai media penghantaran obat yang lebih efisien dan aman. Di elektronik, mereka digunakan dalam perangkat optoelektronik seperti layar fleksibel, LED, dan panel fotovoltaik. Dengan berkembangnya penelitian, potensi aplikasi CQDs semakin luas, menjadikannya material yang menjanjikan di banyak bidang teknologi [29].

2.5 Penelitian terdahulu

Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis membran nanopori berbasis PLA dengan variasi CQDs menggunakan metode electrospinning, yang diharapkan dapat meningkatkan kinerja membran dalam aplikasi baterai. Berdasarkan studi-studi sebelumnya, penambahan CQDs ke dalam matriks PLA terbukti dapat meningkatkan konduktivitas elektronik dan mekanik membran, serta memperbaiki kapasitas penyimpanan energi. Penggunaan teknik electrospinning memungkinkan pembuatan

struktur nanopori yang ideal, yang dapat meningkatkan kinerja elektroda dalam baterai aluminium-udara dan superkapasitor, berikut beberapa penelitian terdahulu terkait bidang ini :

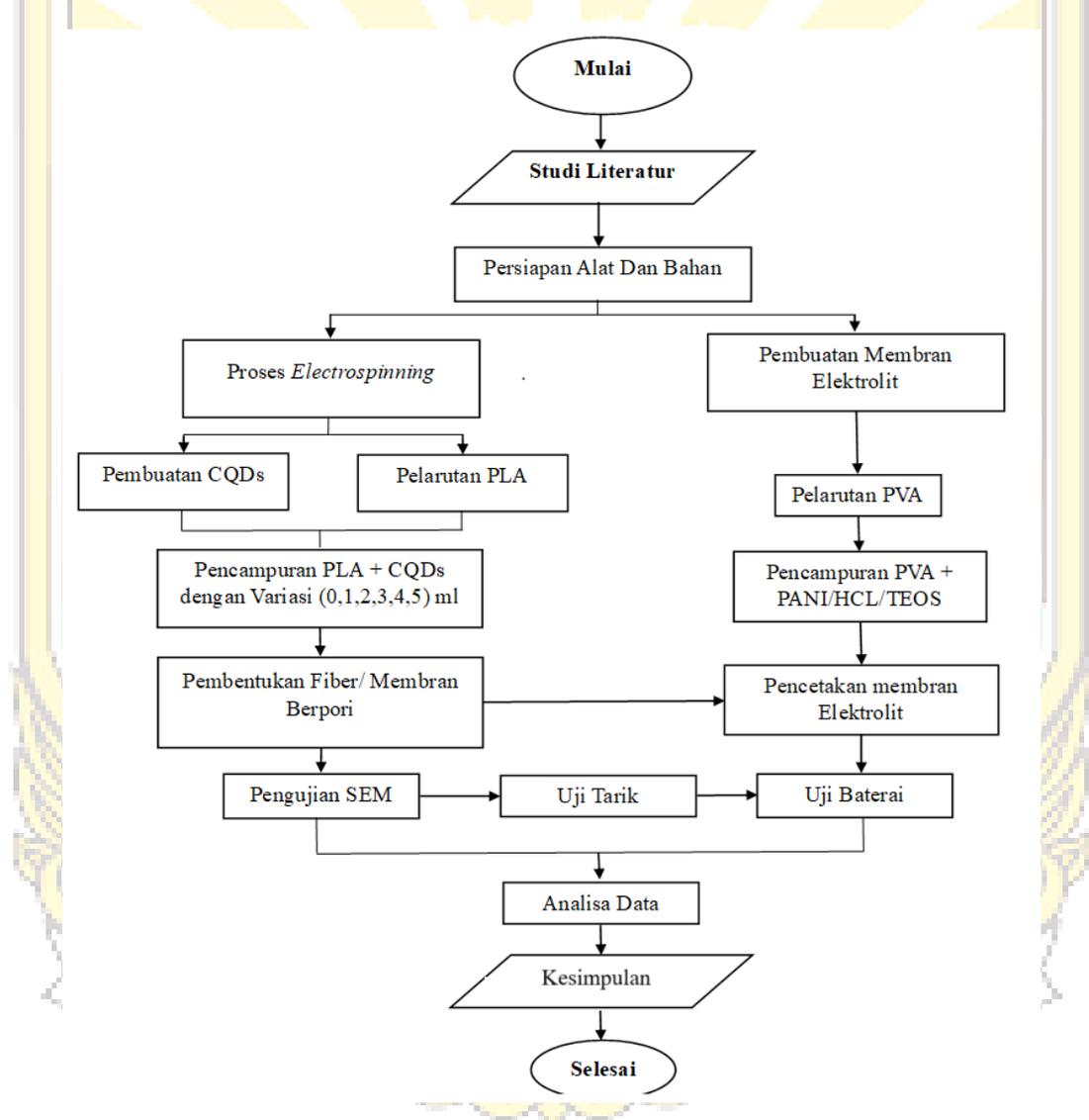
1. Kumar et.al (2021) meneliti pengembangan membran nanopori berbahan PLA. Penggabungan dengan CQDs ke matriks meningkatkan konduktifitas, kapasitas penyimpanan energi membrannya dan diaplikasikan pada superkapasitor .
2. Wang et al. (2021) melakukan penelitian tentang penambahan *Carbon Quantum Dots* (CQDs) pada membrane berbasis polimer dengan hasil bahwasanya terjadi peningkatan konduktifitas ionic dan stabilitas termal sehingga meningkatkan peforma baterai lithium-ion baterai lithium-ion.
3. Zhang et al. (2020) berhasil memproduksi separator berbasis nanofiber dengan struktur permukaan berpori, penelitian ini menunjukkan bahwasanya metode *electrospinning* dapat membentuk membrane yang berpori serta memiliki sifat pemisahan yang unggul.
4. Kim et al. (2018) berhasil memanfaatkan PLA sebagai bahan utama pembuatan membran berpori menggunakan metoda *electrospinning* dan menghasilkan kestabilan mekanik yang baik dan dapat diaplikasikan pada baterai.

Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan menjadi alasan utama dilakukannya penelitian tentang sintesa nanopori berbasis PLA dengan penambahan variasi CQDs menggunakan metode *electrospinning* untuk pengaplikasian pada baterai dengan tujuan mencari alternatif dan inovasi baru dibidang penyimpanan energi.

BAB III METODOLOGI

3.1 Diagram Alur Penelitian

Penelitian ini dilakukan sesuai dengan diagram perencanaan proses kerja yang sistematis. Urutan proses kerja dalam penelitian ini di jelaskan oleh **Gambar 3.1** sebagai berikut:



Gambar 3. 1 Skema Diagram Alur penelitian

3.2 Bahan Penelitian

Dalam penelitian ini terdapat beberapa bahan yang digunakan, yaitu:

1. *Polyvinil Alcohol* (PVA)

Polyvinil Alcohol (PVA) adalah suatu polimer karet sintetis. Polivinil asetat dibuat dari monomernya, vinil asetat. Senyawa ini ditemukan di Jerman oleh Dr. Flitz Klatte pada 1912. Hidrolisis sempurna atau sebagian dari senyawa ini akan menghasilkan PVA. Rasio hasil hidrolisis ini berkisar antara 87% - 99%. PVA ditunjukkan pada **Gambar 3.2**.



Gambar 3. 2 *Polyvinil Alcohol*

2. Urea

Urea adalah senyawa organik dengan rumus kimia $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ yang dikenal juga sebagai karbamida. Dalam industri, urea memiliki berbagai aplikasi, terutama sebagai pupuk nitrogen dengan kandungan nitrogen tinggi (sekitar 46% berat), yang penting untuk pertumbuhan tanaman. Pada penelitian ini urea dimanfaatkan sebagai prekursor atau bahan sumber nitrogen untuk pembentukan *Carbon quantum dots* (CQDs). Urea ditunjukkan pada **Gambar 3.3**.



Gambar 3. 3 Urea

3. *Aquadest*

Aquadest merupakan air dari hasil penyulingan atau biasa disebut dengan proses distilasi atau biasa juga disebut dengan air murni. Proses distilasi ini merupakan suatu proses dengan cara pemisahan adanya bahan kimia menurut perbedaan kecepatan yang menguap atau volatilitas yakni dengan suatu teknik pemisahan berdasar dengan perbedaan titik didih dalam kegunaannya untuk memperoleh senyawa murni. *Aquadest* ditunjukkan pada **Gambar 3.4**.



Gambar 3. 4 *Aquadest*

4. *Polylactic Acid* (PLA)

Polylactic Acid (PLA) adalah bioplastik dari bahan terbarukan seperti pati jagung, singkong, atau tebu, yang bersifat biodegradable dan ramah lingkungan sebagai alternatif plastik berbasis minyak bumi. PLA umum digunakan dalam kemasan makanan, peralatan makan sekali pakai, dan pencetakan 3D karena mudah dicetak dan cukup kuat. Namun, kekurangannya adalah ketahanan panas yang rendah, sehingga kurang cocok untuk aplikasi suhu tinggi. PLA ditunjukkan pada **Gambar 3.5**.



Gambar 3. 5 *Polylactic Acid* (PLA)

5. *Polyaniline* (PANI)

Polyaniline (PANI) adalah polimer konduktif yang unik karena dapat menghantarkan listrik, berbeda dari polimer konvensional yang biasanya bersifat isolator. Terbentuk dari polimerisasi anilin, PANI memiliki berbagai bentuk oksidasi yang memengaruhi warna dan daya hantar listriknya, sehingga banyak digunakan dalam sensor, baterai, superkapasitor, pelapis antikorosi, dan perangkat elektronik fleksibel. Material ini populer karena stabilitasnya, biaya yang terjangkau, dan kemudahan sintesis, menjadikannya menarik untuk pengembangan teknologi elektronik dan material pintar. PANI ditunjukkan pada **Gambar 3.6**.



Gambar 3. 6 *Polyaniline* (PANI)

6. *Tetraethyl Orthosilicate* (TEOS)

Tetraethyl Orthosilicate (TEOS) adalah senyawa kimia yang digunakan sebagai sumber silikon dalam pembuatan material berbasis silika. Bentuk cairannya yang mudah menguap menjadikannya bahan utama dalam proses sol-gel untuk menghasilkan gel silika atau partikel nano. TEOS sering dipakai dalam industri untuk membuat lapisan tipis, serat keramik, kaca, dan material komposit, serta digunakan dalam pembuatan bahan penyerap dan pembawa katalis karena kemampuannya membentuk struktur berpori. TEOS ditunjukkan pada **Gambar 3.7**.



Gambar 3. 7 *Tetraethyl Orthosilicate* (TEOS)

7. Asam Klorida (HCL)

Asam Klorida (HCL) adalah asam kuat yang terbentuk dari reaksi hidrogen klorida dengan air. Cairan ini sangat korosif dan berbau tajam, digunakan dalam berbagai industri untuk pembuatan senyawa kimia, pembersihan logam, pengolahan air, dan produksi makanan. Di laboratorium, HCl sering digunakan untuk analisis kimia dan titrasi, serta juga ditemukan dalam cairan lambung yang membantu pencernaan. Asam Klorida ditunjukkan pada **Gambar 3.8**.



Gambar 3.8 Asam Klorida (HCL)

8. Asetone

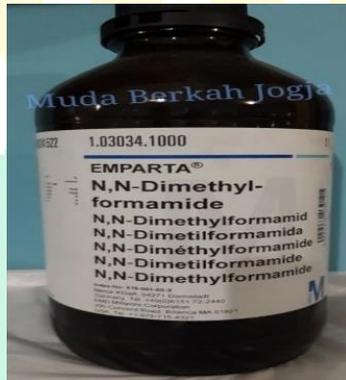
Asetone adalah pelarut organik yang mudah menguap, tidak berwarna, dan berbau khas. Digunakan secara luas dalam industri untuk pelarutan cat, pernis, plastik, serta pembersihan alat laboratorium. *Asetone* juga terdapat dalam produk kosmetik, seperti penghapus kutek, dan digunakan dalam produksi bahan kimia lainnya. Dalam tubuh, aseton diproduksi sebagai hasil sampingan metabolisme lemak, terutama ketika tubuh kekurangan glukosa. *Asetone* ditunjukkan pada **Gambar 3.9**.



Gambar 3.9 *Asetone*

9. Dimetilformamida (DMF)

Dimetilformamida (DMF) adalah pelarut organik yang tidak berwarna, sangat polar, dan digunakan untuk melarutkan berbagai senyawa, termasuk polimer dan logam. Senyawa ini banyak digunakan dalam industri, seperti pembuatan serat sintesis, farmasi, dan elektronik, serta dalam sintesis kimia organik dan ekstraksi bahan. DMF ditunjukkan pada **Gambar 3.10**.



Gambar 3.10 *Dimetilformamida*

3.3 Alat penelitian

1. Tabung Reaksi

Tabung reaksi digunakan sebagai wadah reaksi larutan elektrolit saat proses penelitian. Material tabung reaksi dipilih dengan material kaca dengan tujuan saat pengguna dapat mengamati reaksinya. Material kaca juga dipilih dikarenakan kaca lebih mudah dibersihkan. Tabung reaksi ditunjukkan pada **Gambar 3.11**.



Gambar 3.11 Tabung Reaksi

2. Timbangan digital

Pada penelitian dibutuhkan ketelitian dan ketepatan dalam mengukur konsentrasi larutan elektrolit. Agar pengukuran menjadi lebih teliti maka digunakanlah timbangan digital dengan ketelitian di bawah 500 g yang ditunjukkan ditunjukkan pada **Gambar 3.12** .



Gambar 3. 12 Timbangan Digital

3. *Stopwatch*

Waktu berpengaruh terhadap hasil akhir penelitian dan waktu bisa mengubah hasil pembentukan spesimen menjadi berbeda. Untuk membantu penghitungan waktu saat proses tersebut digunakan *stopwatch*. Dapat dilihat pada **Gambar 3.13** .



Gambar 3. 13 Stopwatch

4. *Scanning Electron Microscope (SEM)*

Scanning electron microscope (SEM) merupakan instrumen yang digunakan untuk membantu mengamati benda berstruktur nano. SEM ditampilkan pada **Gambar 3.14** .



Gambar 3. 14 *Scanning Electron Microscope*

5. *Magnetic Stirrer*

Magnetic Stirrer adalah sebuah alat atau instrumen laboratorium yang juga termasuk ke dalam kategori homogenizer dan digunakan untuk mengaduk atau mencampur larutan dengan bantuan stir bars yang akan berputar di dalam nya. *Magnetic Stirrer* ditampilkan pada **Gambar 3.15** .



Gambar 3. 15 *Magnetic Stirrer*

8. Microwave

Microwave berperan dalam mensintesis *Carbon Quantum Dots (CQDs)* dengan memanfaatkan pemanasan cepat dan merata dari gelombang yang mempercepat reaksi kimia. *Microwave* ditunjukkan pada **Gambar 3.18**.



Gambar 3. 18 *Microwave*

9. Potensiostat

Potensiostat adalah alat yang mengontrol potensial listrik antara elektroda kerja dan referensi serta mengukur arus dalam eksperimen elektrokimia. Alat ini digunakan untuk mengukur kapasitas impedansi dan konduktivitas baterai menggunakan impedance spectroscopy (EIS) dan cyclic voltammetry (CV). Spesifikasinya mencakup rentang potensial antara -10 V hingga +10 V, rentang arus dari nA hingga mA, serta kemampuan mengukur impedansi dalam frekuensi mHz hingga MHz dengan resolusi mikrovolt untuk potensial dan picoampere untuk arus. Potensiostat memungkinkan evaluasi efisiensi dan stabilitas baterai serta sistem penyimpanan energi.

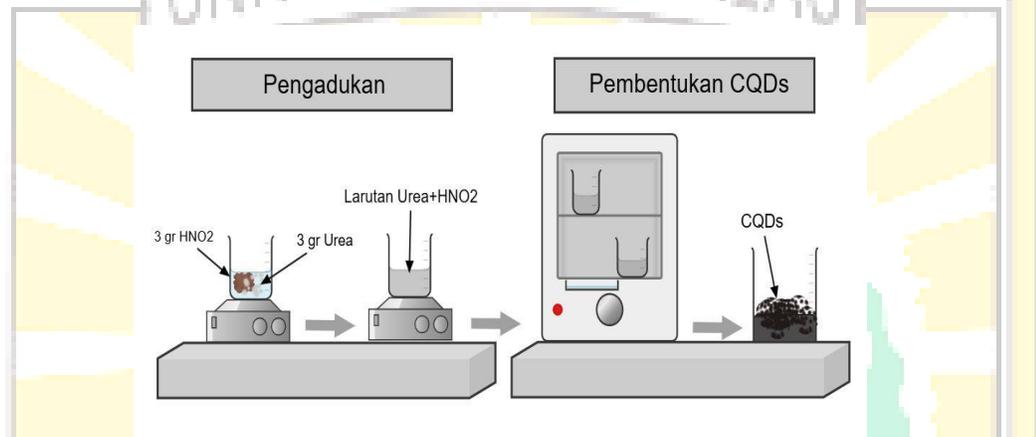


Gambar 3. 19 Potensiostat

3.3 Proses Pembuatan

3.3.1 Pembuatan Carbon Quantun Dots (CQDs)

Skema dari pembuatan *Carbon Quantum Dots* (CQDs) ditampilkan pada Gambar 3.20 .



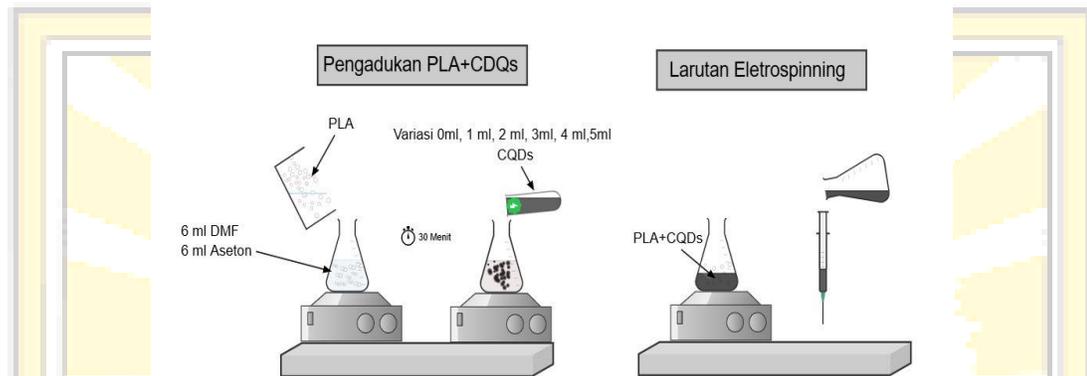
Gambar 3. 20 Skema Kerja Pembuatan CQDs

Berikut merupakan Langkah-langkah dalam pembuatan larutan CQDs [30]:

1. Siapkan Gelas Erlenmeyer ukuran 20 ml
2. Urea sebanyak 3 gram dilarutkan dalam 10 ml *aquadest*.
3. Tambahkan asam nitrit Sebanyak 3 gram dan aduk kembali hingga suhu larutan menurun.
4. Masukkan larutan kedalam *Microwave* dengan suhu 110-160 selama 3 menit, untuk membentuk padatan CQDs.
5. Setelah CQDs terbentuk, larutkan kembali menggunakan 10 ml air suling, diaduk hingga padatan terlarut.
6. Kemudian Larutan CQDs diaaduk kembali menggunakan stirrer dengan suhu 70°C hingga air menguap.
7. Setelah larutan menguap, tambahkan 6 ml Aseton dan 6 ml *Dimethylformamide* aduk hingga homogen.
8. Larutan homogen siap dicampurkan dengan PLA untuk pembentukan fiber /membran berpori.

3.3.2 Pembuatan Larutan *Electrospinning*

Skema dari pembuatan larutan *Electrospinning* berbahan dasar PLA dengan penambahan variasi *Carbon Quantum Dots* (CQDs) sebesar 0,1,2,3,4,5 ml yang ditampilkan pada **Gambar 3.21**.



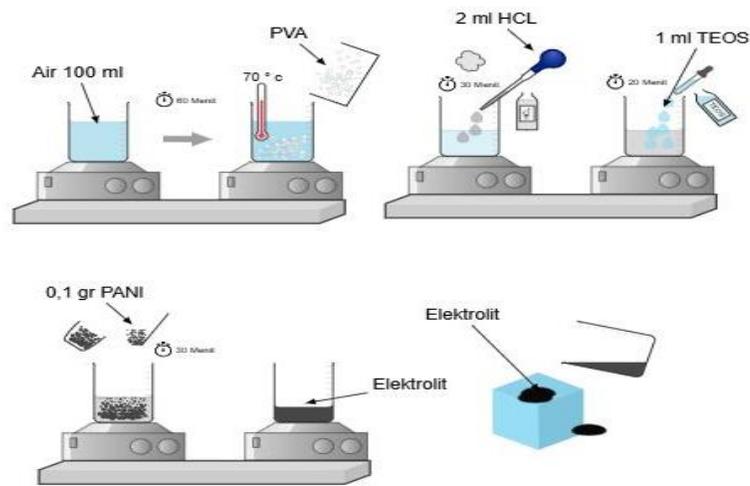
Gambar 3. 21 Skema Kerja Pembuatan Larutan *Electrospinning*

Berikut merupakan langkah-langkah dalam pembuatan larutan *Electrospinning* [31]:

1. Siapkan Gelas Erlenmeyer ukuran 20 ml
2. PLA sebanyak 1,5 gram dilarutkan menggunakan 6 ml aseton, aduk menggunakan *Magnetic stirrer* selama 10 menit pada suhu 60°C
3. Kemudian tambahkan 6 ml DMF aduk kembali selama 10 menit pada suhu ruang
4. Setelah itu tambahkan larutan CQDs, aduk kembali selama 10 menit pada suhu 60 °c.
5. Ulangi langkah 1-4 dengan variasi CQDs sebanyak 0,1,2,3,4,5 ml
6. Larutan yang terbentuk siap dilanjutkan ke proses *Electrospinning*

3.3.3 Pembuatan membran elektrolit

Skema dari pembuatan membran elektrolit untuk baterai ditampilkan pada **Gambar 3.22**.



Gambar 3. 22 Skema Pembuatan membran elektrolit

Berikut merupakan langkah-langkah dalam pembuatan membran elektrolit baterai : [32]

1. Siapkan gelas beaker dengan kapasitas 500 ml
2. 100 ml air suling dipanaskan pada gelas beaker menggunakan *magnetic stirrer* hingga temperature 70 °c.
3. Kemudian, 2 g PVA dicampurkan kedalam air suling serta diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 60 menit.
4. 2 ml HCL diteteskan kedalam larutan PVA, aduk kembali selama 30 menit sampai homogen.
5. Kemudian tuang 1 ml TEOS kedalam larutan PVA-HCl, aduk kembali selama 20 menit.
6. Pada tahapan terakhir 0,1 gr Ponyaniline (PANI) ditambahkan kedalam larutan PVA/HCL/TEOS, aduk kembali selama 30 menit hingga mengental dan siap dicetak.

3.4 Skema penelitian

3.4.1 Proses *Electrospinning*

1. Siapkan alat *Electrospinning* dan atur semua variable agar membentuk hasil yang diinginkan

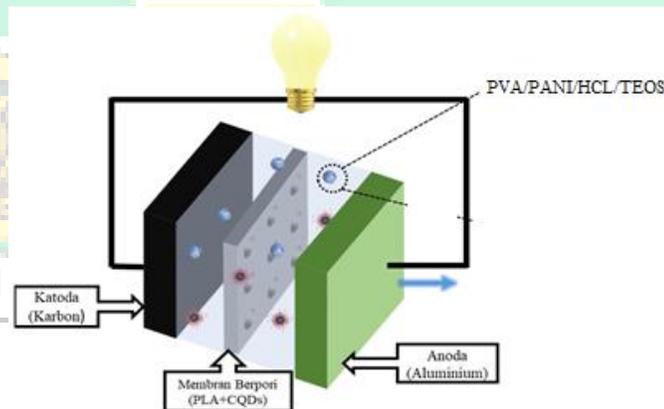
2. Kolektor *Electrospinning* dilapisi dengan aluminium sebagai media penampungan membran pori yang terbentuk
3. Larutan PLA-CQDs yang sudah homogen di masukkan kedalam jarum suntik dengan variasi yang telah ditentukan sebelumnya
4. Hidupkan alat *electrospinning* dan atur voltase hingga 25 kV sehingga terbentuknya fiber.
5. Membran yang terbentuk siap dilanjutkan ke proses pembuatan membran elektrolit dan pengujian.

3.4.2 Proses Pencetakan Sampel Pengujian

1. Sediakan cetakan uji Tarik dan pengujian baterai
2. Membran berpori di bentuk sesuai ukuran cetakan
3. Tuang membran elektrolit kedalam cetakan, dengan volume $\frac{1}{2}$ dari cetakan.
4. Kemudian membran elektrolit pada cetakan dilapisi menggunakan membran berpori
5. Pada proses terakhir tuang kembali membran elektrolit hingga menutupi membran berpori, dan siap untuk dilakukan pengujian

3.4.3 Skema Pengujian Baterai

Skema dan komponen-komponen Baterai ditampilkan pada **Gambar 3.23** .



Gambar 3. 20 Skema Baterai

Pada **Gambar 3.23** menunjukkan susunan dari baterai , yang mana ada beberapa hal yang perlu dipersiapkan sebelum melakukan pengujian baterai. Hal terpenting adalah memastikan 3 komponen baterai (anoda, katoda, membran elektrolit). saling terhubung dalam cangkang baterai. Katoda yang digunakan adalah karbon dengan ukuran 2x2 hal ini dikarenakan sifat konduktifitas yang dimiliki karbon sangat baik, sedangkan anoda menggunakan plat aluminium, dan membran elektrolit yang menjadi media transfer terbuat dari PVA-HCL-PANI-TEOS dan penambahan fiber/membran berpori PLA-CQDs.

3.5 Pengujian

3.5.1 Pengujian distribusi nanopori

Pengujian menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) untuk menganalisis distribusi penyebaran pori dan ukuran diameter pori pada sampel nanopori berbasis PLA dengan variasi CQDs. Pengujian dilakukan menggunakan instrumen SEM Hitachi S-3400N dengan resolusi 1,2 nm, perbesaran mulai dari 10x hingga 1.000.000x, dan rentang tegangan percepatan 200 V hingga 30 kV. Aliran elektron yang diarahkan pada permukaan sampel menghasilkan sinyal, seperti elektron sekunder, elektron terpantul, dan sinar-X. Sinyal tersebut kemudian terdeteksi dan diolah menjadi gambar beresolusi tinggi, yang dianalisis lebih lanjut menggunakan *software ImageJ*. beberapa variable yang dicari pada pengujian ini yang ditampilkan pada **Tabel 3.1** .

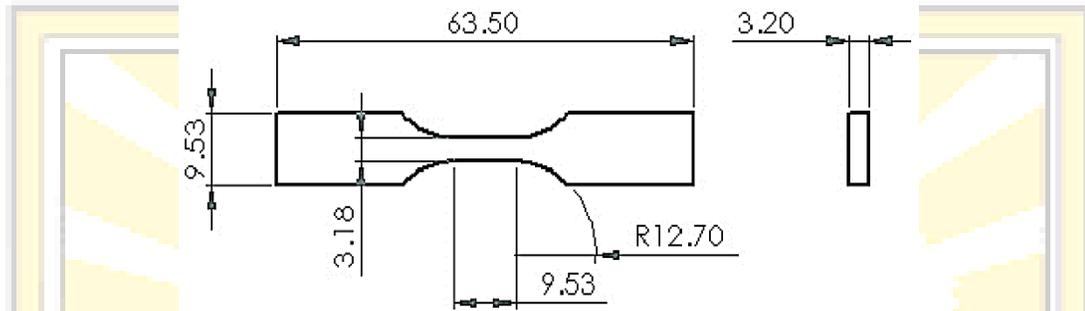
No	Ukuran Diameter (nm)	Frekuensi (Butir)
1		

Tabel 3. 1 Ukuran Pori

3.5.2 Pengujian Tarik

Kekuatan tarik membran elektrolit diukur menggunakan mesin Uji Tarik Instron 3369 dengan kapasitas berkisar dari 5 kN hingga 100 kN, kecepatan pengujian mulai dari 0,001 mm/menit hingga 1000 mm/menit, dan gaya sebesar 0,1 N. Mesin ini biasanya digunakan untuk menentukan sifat material seperti kekuatan tarik,

perpanjangan, dan modulus elastisitas. Uji tarik dapat mengidentifikasi sifat membran elektrolit padat dengan menguji kekuatan dan deformasi di bawah tegangan menggunakan standar ASTM D638 Tipe 5 dengan kecepatan pengujian 20 mm/menit. Pada **Gambar 3.24** menunjukkan dimensi sampel yang akan dilakukan pengujian Tarik.



Gambar 3. 21 Dimensi Uji Tarik

Hasil dari uji tarik berupa data strain-stress diolah untuk mengetahui nilai dari modulus elastisitas, elongasi, dan kekuatan tarik menggunakan **Persamaan 1**, dan **persamaan 2**

Modulus Elastisitas (E)

$$E = \left(\frac{\sigma}{\epsilon} \right) \quad (3.1)$$

Berdasarkan **Persamaan 3.1**, σ menyatakan besarnya tegangan dalam satuan megapascal (MPa), sedangkan ϵ menyatakan regangan yang terjadi dalam satuan sentimeter (cm)

Elongasi (% ϵ)

$$\% \epsilon = \left(\frac{\Delta l}{l_0} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

Berdasarkan **Persamaan 3.2**, Δl menyatakan pertmbahan panjang dalam satuan sentimeter (cm), dan l_0 adalah panjang awal sampel dalam satuan sentimeter (cm).

Ada beberapa variabel yang dicari pada pengujian Tarik yang ditampilkan pada **Tabel 3.2**.

Tabel 3. 2 Pengujian Tarik

Variasi	Modulus Elastisitas (Mpa)	Elongasi (%)	Kekuatan Tarik (Mpa)
---------	---------------------------	--------------	----------------------

0 ml			
1 ml			
2 ml			
3 ml			
4 ml			
5 ml			

3.5.3 Pengujian kapasitas baterai

Untuk mengukur kapasitas baterai dari membran, dilakukan uji *Galvanostatic Discharge*. Metode uji ini digunakan untuk menilai kapasitas dan kinerja daya baterai atau superkapasitor di bawah kondisi *Discharging* konstan menggunakan arus tetap (*Galvanostatic*). Selama pengujian, arus pelepasan yang kontinu diterapkan pada perangkat penyimpanan energi, dan perubahan tegangan dicatat untuk menentukan kapasitas dan efisiensi energi. Kapasitas dihitung menggunakan **Persamaan 3**.

$$\text{Kapasitas} = A \cdot t \quad (3.3)$$

Berdasarkan **Persamaan 3.3**, A menyatakan arus dalam (mA/cm²) dan t adalah waktu (s)

3.5.4 Pengujian Impedensi

Impedansi ($|Z|$) adalah hambatan pada rangkaian baterai terhadap aliran arus bolak-balik (AC), yang terdiri dari resistansi (Z_{re}) dan reaktansi (Z_{im}). Pengujian dilakukan menggunakan metode Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) dalam kondisi potensiostatik, dengan rentang frekuensi 10 mHz hingga 100 kHz. Tegangan yang diterapkan meliputi arus searah (DC) sebesar 1 mV dan arus bolak-balik (AC) sebesar 10 mVrms. Nilai Z_{re} dan Z_{im} dicatat oleh potensiostat selama pengujian. Impedansi dapat dihitung menggunakan **Persamaan 4**.

$$|Z| = \sqrt{Z_{re}^2 + Z_{im}^2} \quad (3.4)$$

Berdasarkan **Persamaan 3.4**, $|Z|$ menyatakan Impedensi (Ω), Z_{re} Resistansi (Ω) dan Z_{im} Reaktansi (Ω).

3.5.5 Pengujian *Ion Conductivity*

Konduktivitas baterai diuji menggunakan potensiostat Corrtest 100E dengan metode Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) pada rentang frekuensi 10 mHz hingga 100 kHz, tegangan DC 0 mV, dan tegangan AC 10 mVrms pada suhu ruang. Proses stabilisasi memakan waktu sekitar 10 menit, dengan luas permukaan elektrolit yang diukur sebesar 4 cm. Nilai konduktivitas dapat dihitung menggunakan

Persamaan 3.5 :

$$\sigma = \frac{1}{\left(\sqrt{Z_{re}^2 + Z_{im}^2}\right)} \quad (3.5)$$

Berdasarkan **Persamaan 3.5**, σ menyatakan Konduktivitas (mS.cm), Z_{re} Resistansi (Ω) dan Z_{im} Reaktansi (Ω).

3.5.6 Pengujian *Cyclic Voltametri*

Pengujian Cyclic Voltammetry (CV) dilakukan untuk mempelajari sifat redoks material dengan mengukur respons arus terhadap perubahan tegangan. Teknik ini membantu mengidentifikasi perilaku oksidasi dan reduksi material serta menganalisis kinerja elektrokimia baterai, superkapasitor, dan perangkat lainnya. Variabel pada pengujian ini dapat dilihat pada **Tabel 3.3** .

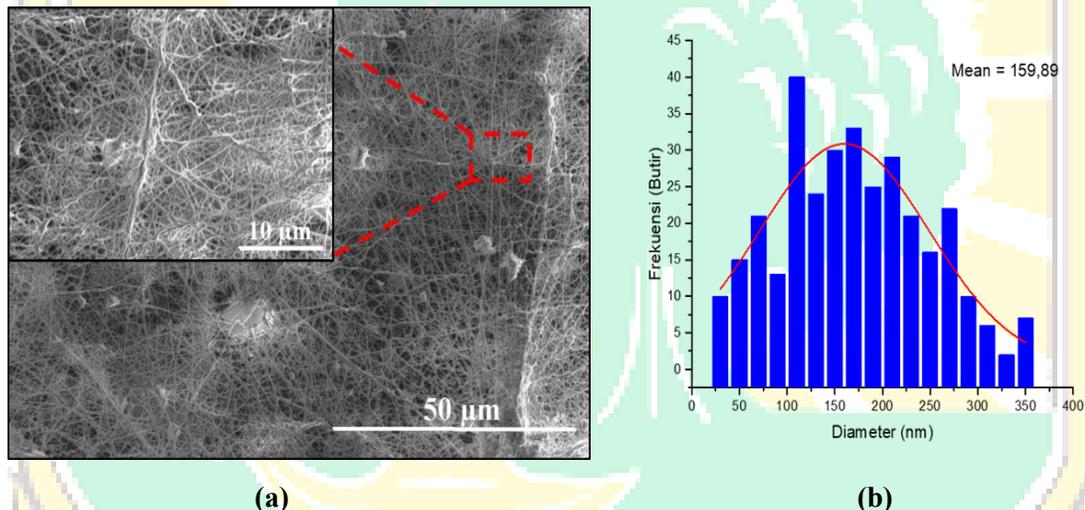
Tabel 3. 3 Pengujian *Cyclic Voltametri*

Variasi	Puncak Anoda (A)	Puncak Katoda (A)
0 ml		
1 ml		
2 ml		
3 ml		
4 ml		
5 ml		

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian distribusi pori

Pengujian distribusi pori dengan Scanning Electron Microscope (SEM) menunjukkan serat halus dengan distribusi merata dan diameter konsisten. Pori mikroskopis yang terbentuk meningkatkan difusi ion, kinerja elektrokimia, daya serap, dan kapasitas penyimpanan energi, menjadikannya bahan potensial untuk aplikasi energi dan sensor. Morfologi dan distribusi penyebaran pori dari sampel ditunjukkan pada **Gambar 4.1**.



Gambar 4.1 (a) Morfologi permukaan nanopor PLA-CQDs (b) Distribusi penyebaran pori

Gambar 4.1 menunjukkan hasil pengolahan data menggunakan aplikasi Image-J, yang memperlihatkan penyebaran pori dengan diameter dan luas yang bervariasi pada sampel. Pori dengan diameter 110 nm memiliki jumlah terbanyak, yaitu 40 butir, sedangkan pori dengan diameter 310 nm memiliki jumlah paling sedikit, yaitu 2 butir. Total jumlah pori yang terbentuk adalah 324 butir, dengan rentang diameter 110-150 nm mencatatkan frekuensi terbanyak, yaitu 94 butir. Berdasarkan Standar ISO/TS 80004-1, yang mendefinisikan skala nanometer antara 1 nm hingga 100 nm, nanopori yang terbentuk memiliki diameter dalam rentang 10-100 nm sebanyak 59 butir

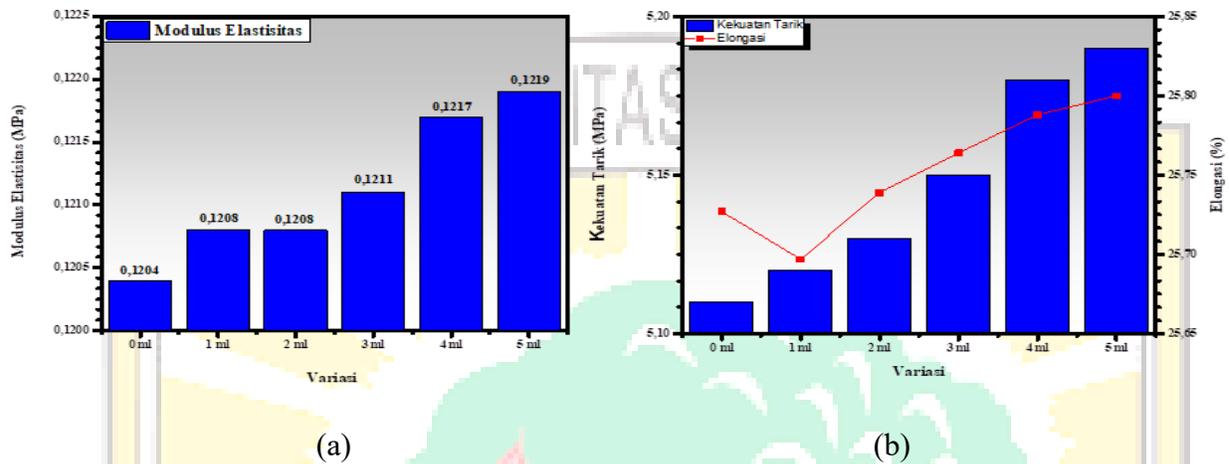
4.2 Pengujian Tarik

Pengujian dilakukan dengan memvariasikan konsentrasi CQDs (0 ml, 1 ml, 2 ml, 3 ml, 4 ml, dan 5 ml). Hasil Pengujian ditunjukkan Pada **Tabel 4.1** .

Tabel 4.1 Data Pengujian Tarik

Variasi	Modulus Elastisitas (Mpa)	Elongasi (%)	Kekuatan Tarik (Mpa)
0 ml	0,1204	25,727	5,11
1 ml	0,1208	25,697	5,12
2 ml	0,1208	25,739	5,13
3 ml	0,1211	25,764	5,15
4 ml	0,1217	25,788	5,18
5 ml	0,1219	25,800	5,19

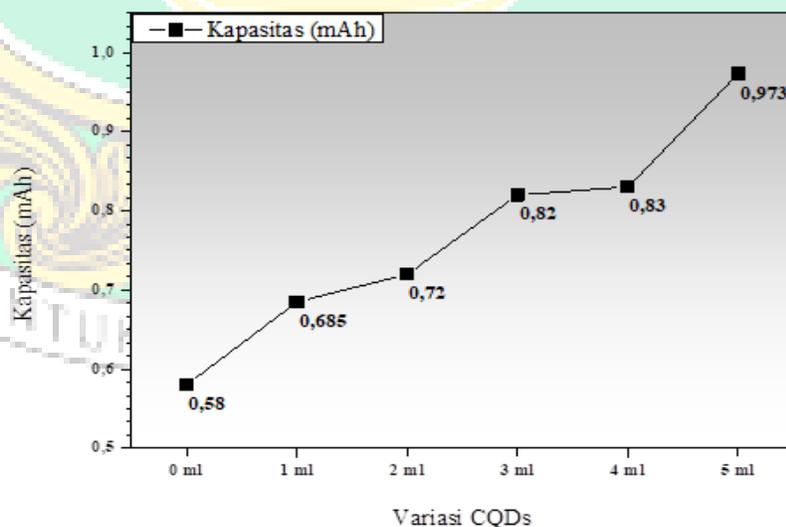
Berdasarkan **Tabel 4.1** menunjukkan peningkatan yang konsisten pada modulus elatisitas, kekuatan tarik, dan perpanjangan seiring dengan bertambahnya volume CQDs. Penambahan CQDs (0 ml) memiliki nilai kekuatan tarik sebesar 5,11 MPa, Modulus Elastisitas meningkatkan kekuatan tarik menjadi 5,12 MPa, modulus elatisitas menjadi 0,1208 MPa, dan elongasi mencapai 25,697%. Dengan penambahan 2 ml CQDs, kekuatan tarik meningkat sedikit menjadi 5,13 MPa, modulus elatisitas tetap pada 0,1208 MPa, dan elongasi meningkat menjadi 25,739%. Penambahan 3 ml CQDs menghasilkan kekuatan tarik 5,15 MPa, modulus elatisitas 0,1211 MPa, dan elongasi meningkat menjadi 25,764%. Peningkatan yang lebih signifikan terlihat pada penambahan 4 ml dan 5 ml CQDs, dengan kekuatan tarik mencapai 5,18 MPa dan 5,19 MPa, modulus elatisitas 0,1217 MPa dan 0,1219 MPa, serta elongasi mencapai 25,788% dan 25,800%. penambahan variasi CQDs sebesar 5 ml menghasilkan modulus elatisitas sebesar 0,1219 MPa yang merupakan nilai tertinggi Peningkatan modulus elatisitas dapat dilihat pada grafik yang terdapat pada **Gambar 4.2**.



Gambar 4. 2 (a) Grafik modulus elastisitas, (b) Grafik hubungan kekuatan tarik dan elongasi

4.3 Pengujian kapasitas baterai

Hasil uji kapasitas baterai menggunakan metode *Galvanostatic* dengan variasi arus (1 mA, 2 mA, 5 mA, dan 10 mA) serta konsentrasi *Carbon Quantum Dots (CQDs)* yang berbeda menunjukkan dampak signifikan terhadap kapasitas dan waktu Discharging baterai yang ditunjukkan pada **Gambar 4.4**. Pada Grafik ini menggambarkan baterai pada berbagai konsentrasi CQDs dan bagaimana penambahan CQDs mempengaruhi kestabilan tegangan serta durasi

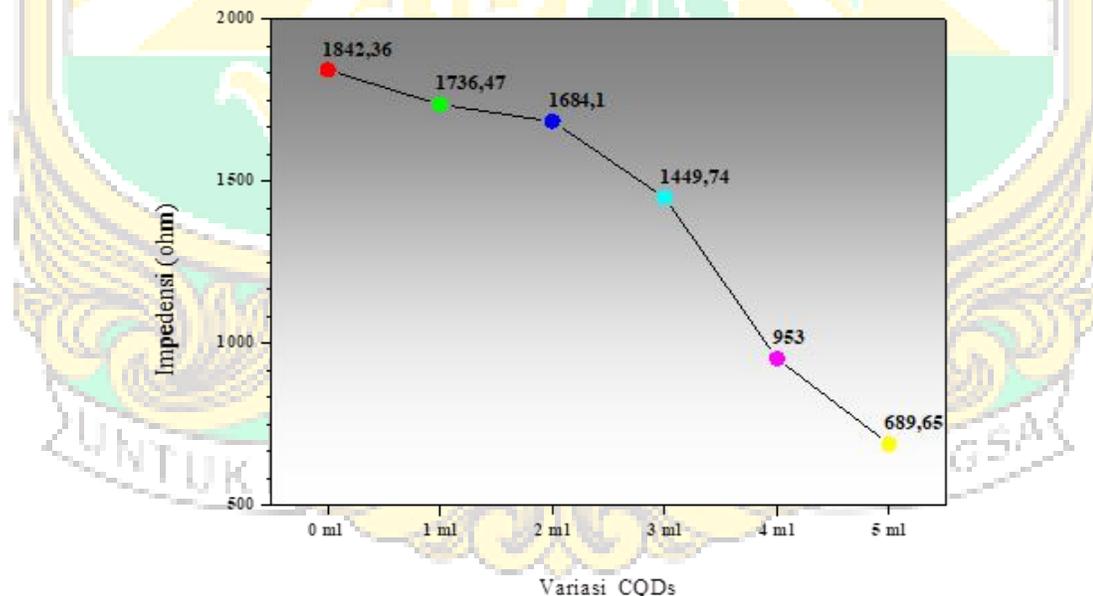


Gambar 4. 4 Grafik Kapasitas Baterai

Penambahan CQDs secara bertahap meningkatkan kapasitas pelepasan. Untuk sampel tanpa CQDs (0 ml), Menghasilkan kapasitas sebesar 0,580 mAh, yang merupakan nilai terendah di antara semua sampel. Dengan penambahan 1 ml CQDs, kapasitas meningkat menjadi 0,685 mAh dan menjadi lebih stabil. Sampel dengan 2 ml CQDs menunjukkan kapasitas 0,720 mAh, sementara sampel dengan 3 ml CQDs mencapai 0,820 mAh. Pada 4 ml CQDs, kapasitas naik sedikit menjadi 0,830 mAh. Sampel dengan 5 ml CQDs menunjukkan kapasitas tertinggi, yaitu 0,973 mAh, yang menunjukkan kinerja terbaik di antara semua variasi yang diuji.

4.4 Pengujian impedensi baterai

Metode *Impedance Electrochemical Spectroscopy* (IES) mengukur impedansi baterai untuk mendapatkan informasi tentang pengaruh penambahan variasi serat PLA-CQDs dalam aplikasi baterai. Grafik impedansi pada **Gambar 4.5** menampilkan dua komponen utama, yaitu komponen riil (Z_{re}) dan komponen imajiner (Z_{im}), yang menggambarkan resistansi dan konduktivitas sistem pada frekuensi tertentu. Gambar tersebut menunjukkan profil impedansi membran elektrolit, yang mencerminkan performa elektrokimia material dalam sistem baterai.



Gambar 4.5 Grafik Impedensi

Berdasarkan grafik impedensi pada Gambar 4.6 disimpulkan bahwasanya ampel dengan 0 ml CQDs, impedansi tercatat sebesar 1842,36 Ohm, menunjukkan resistansi yang relatif tinggi. Namun, dengan penambahan 1 ml CQDs, impedansi menurun menjadi 1736,47 Ohm, penurunan berlanjut seiring dengan peningkatan konsentrasi CQDs: 1684,10 Ohm pada 2 ml, 1449,74 Ohm pada 3 ml, dan 953,00 Ohm pada 4 ml. Pada konsentrasi tertinggi 5 ml, impedansi mencapai nilai terendah yaitu 689,65 Ohm, menunjukkan peningkatan konduktivitas yang signifikan.

Penurunan resistansi yang konsisten ini menunjukkan bahwa penambahan CQDs secara signifikan meningkatkan konduktivitas material, yang sangat menguntungkan untuk aplikasi baterai. Material dengan impedansi rendah memfasilitasi transfer elektron yang lebih cepat dalam sel baterai, sehingga meningkatkan efisiensi proses pengisian dan pelepasan daya. Konduktivitas yang lebih tinggi juga memungkinkan baterai mencapai kapasitas yang lebih besar dan waktu pengisian yang lebih cepat. Temuan ini menunjukkan bahwa modifikasi konsentrasi CQDs dapat mengoptimalkan material untuk aplikasi baterai berkinerja tinggi, membuka jalan bagi pengembangan baterai yang lebih efisien dan tahan lama di masa depan.

4.5 Analisa Pengujian *Ion Conductivity*

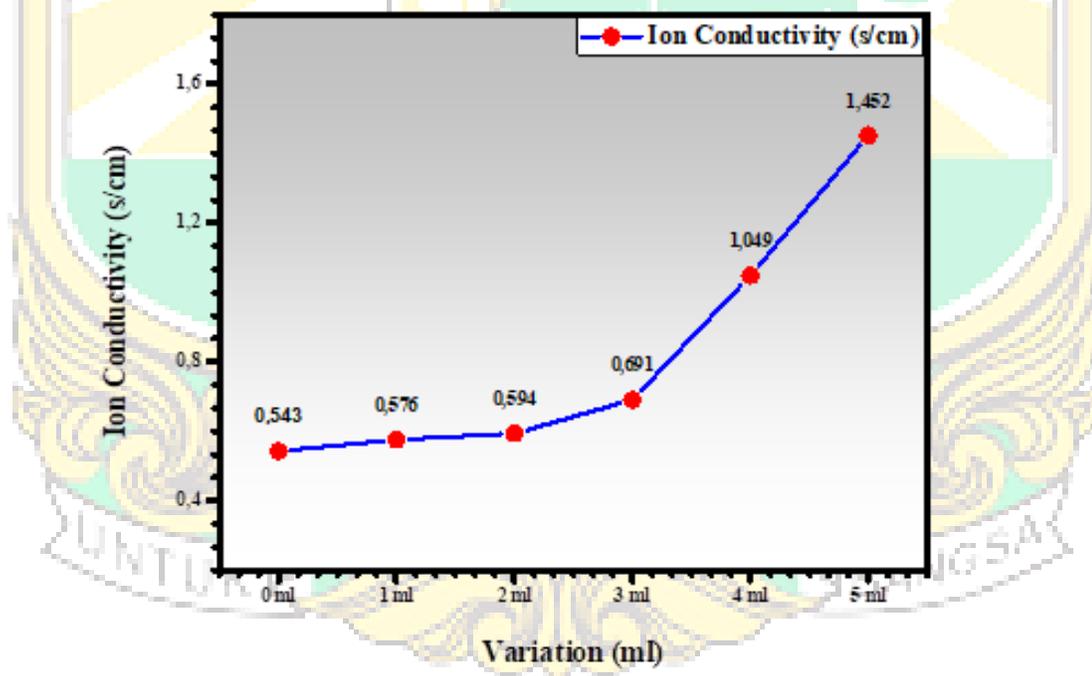
Pengujian *Ion Conductivity* menunjukkan besar konduktivitas baterai yang dihasilkan oleh setiap membran yang mengandung serat PLA dengan variasi konsentrasi CQDs (0 ml, 1 ml, 2 ml, 3 ml, 4 ml, dan 5 ml). Nilai konduktivitas dapat dilihat pada **Tabel 4.2**.

Tabel 4. 2 Data Pengukuran Konduktivitas

Variasi	Z_{re} (Ω)	Z_{im} (Ω)	Konduktivitas (mS/cm)
0 ml	1348,62	1255,19	0,543
1 ml	1560,3	762,095	0,576
2 ml	1484,88	794,55	0,594
3 ml	1306,19	628,9889	0,691

4 ml	739,97	600,544	1,049
5 ml	672,496	152,855	1,452

Berdasarkan data pada **Tabel 4.2** dapat disimpulkan bahwasanya Sampel tanpa CQDs (0 ml) menunjukkan konduktivitas dasar sebesar 0,543 mS/cm. Dengan penambahan CQDs, konduktivitas meningkat menjadi 0,576 mS/cm, 0,594 mS/cm, dan 0,691 mS/cm untuk konsentrasi 1 ml, 2 ml, dan 3 ml, berturut-turut. Peningkatan konduktivitas yang signifikan dan mencolok terlihat dengan penambahan 4 ml dan 5 ml CQDs, menghasilkan konduktivitas masing-masing sebesar 1,049 mS/cm dan 1,452 mS/cm. Temuan ini jelas menunjukkan bahwa penambahan CQDs memberikan efek positif yang substansial dalam meningkatkan konduktivitas ionik membran secara bertahap. Kinerja optimal tercapai pada konsentrasi CQDs 5 ml, yang menghasilkan konduktivitas tertinggi sebesar 1,452 mS/cm. Grafik kenaikan konduktivitas pada 6 sampel dapat dilihat pada **Gambar 4.6**.



Gambar 4. 6 Grafik Pengukuran Konduktivitas

4.6 Analisa Pengujian *Cyclic Voltametri*

Pada pengujian ini menunjukkan besar puncak katoda dan anoda yang dihasilkan oleh setiap membran yang mengandung serat PLA dengan variasi konsentrasi CQDs (0 ml, 1 ml, 2 ml, 3 ml, 4 ml, dan 5 ml). Nilai puncak dilihat pada **Tabel 4.3**.

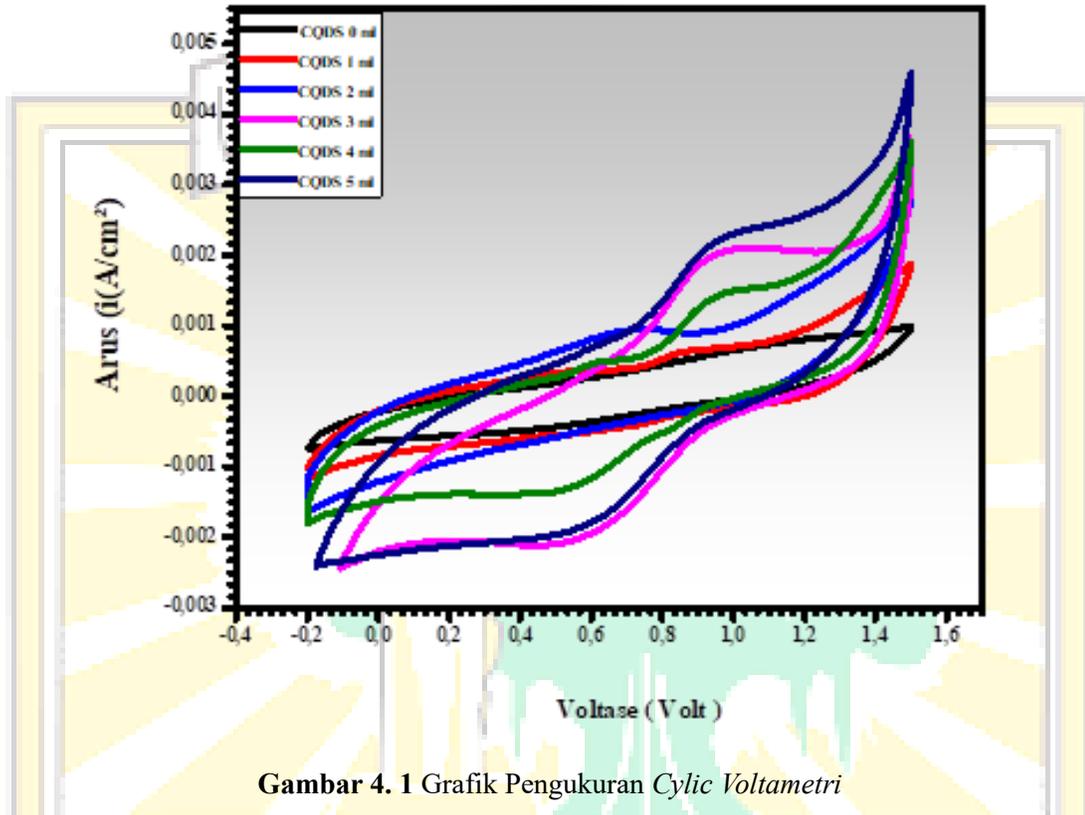
Tabel 4.3 Data Pengukuran *Cyclic Voltametri*

Variasi	Puncak Anoda (A)	Puncak Katoda (A)
0 ml	-0,000737	0,000968
1 ml	-0,00115	0,00186
2 ml	-0,00162	0,00281
3 ml	-0,0024	0,00367
4 ml	-0,0018	0,00359
5 ml	-0,0024	0,0045

Pada **Tabel 4.3** konsentrasi 0 ml CQDs, arus puncak anodic tercatat sebesar -0,000737 A dan arus puncak katodic sebesar 0,000968 A, yang menunjukkan aktivitas elektrokimia yang rendah. Ketika konsentrasi CQDs dinaikkan menjadi 1 ml, arus puncak anodic meningkat menjadi -0,00115 A dan arus puncak katodic meningkat menjadi 0,00186 A, yang menandakan adanya peningkatan aktivitas elektrokimia material.

Selanjutnya, pada konsentrasi 2 ml CQDs, arus puncak anodic mencapai -0,00162 A dan arus puncak katodic menjadi 0,00281 A, yang menunjukkan peningkatan konduktivitas material yang lebih lanjut. Pada konsentrasi 3 ml, arus puncak anodic tercatat sebesar -0,0024 A dan arus puncak katodic sebesar 0,00367 A, yang menunjukkan tren peningkatan yang berlanjut. Namun, pada konsentrasi 4 ml, arus puncak anodic sedikit menurun menjadi -0,0018 A, sementara arus puncak katodic tetap tinggi pada 0,00359 A. Pada konsentrasi tertinggi, yaitu 5 ml, arus puncak anodic

kembali mencapai $-0,0024$ A, dan arus puncak katodic mencapai titik tertinggi sebesar $0,0045$ A. Grafik dari hasil pengujian ini dapat dilihat pada **Gambar 4.8**.



Gambar 4. 1 Grafik Pengukuran *Cyclic Voltametri*

Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan CQDs secara bertahap meningkatkan aktivitas elektrokimia material, terutama yang terlihat dari peningkatan arus puncak katodic.

