

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam beberapa tahun terakhir, kebutuhan energi di seluruh dunia terus meningkat dikarenakan perkembangan industri yang semakin pesat dengan jumlah penduduk yang terus bertambah dimana ketergantungan terhadap sumber energi fosil seperti minyak dan gas bumi telah menimbulkan berbagai permasalahan lingkungan, salah satunya yaitu peningkatan emisi gas rumah kaca yang menyebabkan pemanasan global (Kumar, 2026). Oleh karena itu, pengembangan sumber daya energi terbarukan lebih tepatnya penyimpanan energi merupakan salah satu hal yang paling banyak diteliti saat ini (Jesus, 2023). Superkapasitor muncul sebagai salah satu solusi untuk mengatasi peningkatan permintaan penyimpanan energi yang efisien dan berkinerja tinggi (Kavishka D, 2024). Selain itu, superkapasitor memiliki kemampuan untuk menyimpan energi dalam jumlah yang besar dengan waktu yang singkat (Yasen, 2021).

Suatu daun dapat dijadikan biomassa untuk bahan elektroda superkapasitor jika memiliki komposisi lignoselulosa yang tinggi dan mengandung gugus fungsional seperti hidroksil, karbonil, dan karboksil yang bisa membantu pembentukan struktur karbon berpori setelah proses karbonisasi dan aktivasi kimia (Yang, 2019). Kandungan tersebut memiliki peran penting dalam meningkatkan luas permukaan spesifik dan kapasitas penyimpanan muatan melalui mekanisme *electric double layer* (EDLC) (Yang, 2019). Daun yang memiliki kandungan senyawa organik seperti fenolik, flavonoid, dan tanin juga dapat memperkaya jumlah gugus heteroatom (O dan N) pada permukaan karbon sehingga meningkatkan sifat elektrokimia material yang dihasilkan (Doan, 2020).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa aktivasi KOH dapat menghasilkan pengembangan pori dan meningkatkan luas permukaan karbon aktif dari biomassa karena sifatnya yang kuat dan kemampuannya menembus struktur karbon secara merata (Chew et al., 2023). Aktivasi menggunakan kalium hidroksida (KOH) telah terbukti lebih efektif dibanding aktivator lain seperti ZnCl_2 , H_3PO_4 , atau NaOH karena menghasilkan luas permukaan spesifik dan volume pori yang lebih tinggi melalui reaksi reduksi antara KOH dan karbon pada suhu tinggi (Liu, 2024). Proses ini melibatkan pembentukan senyawa perantara seperti K_2CO_3 dan K_2O yang berfungsi mengikis dinding karbon dan membentuk pori mikroskopik yang seragam (Chew, 2023). Selain itu, aktivasi KOH dapat memperkenalkan gugus fungsional oksigen pada permukaan karbon, yang berperan penting dalam peningkatan kapasitansi spesifik superkapasitor (Liu, 2024).

Proses pirolisis atau karbonisasi biomassa daun biasanya dilakukan pada rentang suhu 400°C sampai 900°C, tergantung pada jenis biomassa dan tujuan aktivasi (Wang, 2024). Pada suhu 400°C sampai 600°C, proses dekomposisi termal lignin dan selulosa menghasilkan arang (biochar) dengan yield tinggi tetapi pori yang belum berkembang (Wang, 2024). Sementara itu, pada suhu 700°C sampai 900°C, terbentuk struktur grafitik dan pori mikro yang lebih luas yang

sangat diinginkan untuk aplikasi superkapasitor (Yang, 2019). Namun, suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan penurunan yield dan kerusakan struktur pori, sehingga optimasi suhu karbonisasi menjadi penting dalam menentukan performa akhir elektroda (Wang, 2024). Karbonisasi di bawah atmosfer inert seperti nitrogen (N_2) memberikan keuntungan karena mencegah oksidasi dan pembakaran biomassa, menjaga kestabilan struktur karbon, serta meningkatkan konduktivitas listrik material yang dihasilkan (Wang, 2024). Selain itu, gas N_2 membantu mempertahankan gugus aromatik dan mendorong pembentukan karbon terstruktur yang baik. Selain itu, penggunaan gas nitrogen (N_2) selama proses karbonisasi dapat membantu menjaga struktur aromatik pada material dan mendukung terbentuknya karbon dengan struktur yang lebih teratur. Sementara itu, aktivasi fisika menggunakan gas karbon dioksida (CO_2) dapat meningkatkan jumlah serta ukuran pori-pori pada karbon aktif, sehingga luas permukaannya menjadi lebih besar dan kemampuannya dalam menyimpan muatan juga meningkat (Chew, 2023).

Secara taksonomi, tanaman sawo durian termasuk dalam famili *Sapotaceae*, genus *Chrysophyllum*, dan spesies *Chrysophyllum Cainito*, yang merupakan tanaman tropis hijau abadi yang tersebar luas di Asia Tenggara, termasuk Indonesia (Doan, 2020). Famili *Sapotaceae* dikenal memiliki jaringan lignoselulosa yang padat dan kandungan senyawa aromatik tinggi (Doan, 2020). Struktur daun sawo durian ini memberikan keuntungan tambahan dalam proses karbonisasi karena komponen lignin dan selulosa yang tinggi mampu membentuk kerangka karbon stabil dengan porositas teratur setelah proses termal (Doan, 2020).

Sebelumnya, penelitian pembuatan karbon aktif dari famili *Sapotaceae* telah dilakukan. Penelitian yang menggunakan Biji sawo (*Manilkara zapota*) dengan aktivasi KOH 10% dari massa dengan suhu karbonisasi di bawah atmosfer N_2 700°C dan 800°C menghasilkan kapasitansi sebesar 334 F.g⁻¹ pada suhu 700°C dengan aktivasi fisik menggunakan CO_2 (Naik et al., 2024), daun mangga (*Mangifera Indica*) menghasilkan kapasitansi sebesar 521,65 F.g⁻¹ dengan suhu 525°C, 625°C dan suhu terbaik 725°C pada gas CO_2 (Hedge, 2024) dan daun pasang atau ek menghasilkan kapasitansi tertinggi sebesar 228 F.g⁻¹ dengan suhu karbonisasi 700°C dengan aktivasi KOH 0,3 M dengan aktivasi fisika pada suhu 800°C gas CO_2 (Serafin, 2022).

Daun sawo durian (*Chrysophyllum Cainito*) diketahui mengandung senyawa flavonoid, tanin, saponin, steroid, dan fenolik dalam kadar tinggi yang mendukung pembentukan karbon aktif berpori setelah aktivasi (Doan, 2020). Oleh karena itu, daun sawo durian berpotensi besar sebagai sumber biomassa karbon untuk pembuatan elektroda superkapasitor ramah lingkungan dan berbiaya rendah (Yang, 2019).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pemanfaatan daun sawo durian (*Chrysophyllum Cainito*) sebagai bahan baku karbon aktif dengan metode kombinasi aktivasi kimia menggunakan KOH 0,3 M dengan sampel digiling halus hingga ukuran 100 mesh dan menggunakan

ballmilling hingga berukuran 200 mesh dengan variasi suhu karbonisasi yang digunakan adalah 600°C, 700°C, dan 800°C di bawah atmosfer N₂, lalu aktivasi fisik menggunakan gas CO₂ pada suhu 800°C. Kebaruan dari penelitian ini dibandingkan penelitian biomassa daun lainnya adalah penggunaan daun sawo durian (*Chrysophyllum cainito*) sebagai bahan baku karbon aktif elektroda superkapasitor dan penelitiannya yang masih sangat terbatas. Adapun pembeda dari penelitian ini yaitu, prekursor kandungan daun sawo durian yang mengandung lignin sebesar 10% dan himselulosa sebesar 20%. Selain itu penelitian ini menggunakan aktivasi kimia KOH dengan konsentrasi 0,3 M serta variasi suhu 600°C, 700°C, dan 800°C di bawah atmosfer N₂ dengan aktivasi fisika gas CO₂ konstan pada suhu 800°C dan pengujian voltametri siklik (CV) yang menggunakan satu elektroda untuk menentukan kapasitansi spesifik. Karakterisasi selanjutnya dilakukan menggunakan SEM, FTIR, dan XRD untuk menganalisis morfologi, gugus fungsi, dan struktur kristal. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan material elektroda berbasis biomassa lokal yang ramah lingkungan, berkelanjutan, dan berpotensi diaplikasikan dalam sistem penyimpanan energi masa depan.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini yaitu:

1. Memanfaatkan biomassa daun sawo durian sebagai material aktif untuk elektroda superkapasitor melalui proses aktivasi kimia menggunakan larutan KOH 0,3 M dan karbonisasi pada variasi suhu 600°C, 700°C, dan 800°C dalam atmosfer gas nitrogen (N₂).
2. Menentukan nilai kapasitansi spesifik pada sel superkapasitor dari elektroda karbon aktif daun sawo durian.
3. Mengkarakterisasi karbon aktif yang dihasilkan dari proses dengan menggunakan teknik FTIR (*Fourier Transform Infrared*), XRD (*X-ray Diffraction*), dan SEM (*Scanning Electron Microscopy*).

1.3 Manfaat Penelitian

Memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan material berbasis biomassa yang ramah lingkungan dari daun sawo durian untuk mendukung penerapan energi terbarukan, khususnya sebagai material elektroda superkapasitor.

BAB II

METODE PENELITIAN

2.1 Tempat dan Waktu

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Mei 2025 hingga September 2025. Kegiatan penelitian dilaksanakan di Laboratorium Material dan Energi, Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin; Laboratorium Elektronika dan Instrumentasi, Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin; Laboratorium Fisika Material, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Riau; serta Laboratorium Penelitian dan Pengembangan Sains, Universitas Hasanuddin.

2.2 Alat dan Bahan

2.2.1 Alat

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

1. Blender
2. Ayakan 200 mesh
3. *Ball milling*
4. *Magnetic stirrer*
5. Oven
6. Mortar
7. Kertas pasir P1200 dan P1000
8. Kertas saring
9. Jangka sorong digital
10. Timbangan digital
11. Teflon
12. Gelas kimia
13. Corong
14. *Aluminium foil*
15. Sendok
16. Pinset
17. *Hydraulic press*

2.2.2 Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

1. Daun Sawo (di ambil dari Kabupaten Toraja Utara)
2. Kalium Hidroksida (KOH)
3. Akuades
4. Larutan H_2SO_4
5. Membran telur itik
6. HCL

2.3 Prosedur Penelitian

2.3.1 Pembuatan Sampel Karbon Aktif Daun Sawo Durian

1. Persiapan Sampel Pra-Karbonisasi Daun Sawo Durian

Daun sawo durian (*Chrysophyllum Cainito*) sebanyak 400 gram dikumpulkan sebagai sampel penelitian, kemudian dibersihkan menggunakan akuades dan dikeringkan melalui proses penjemuran dibawah terik matahari. Setelah kering, daun sawo durian ditimbang sebanyak 400 gram dibagi menjadi beberapa bagian dengan massa masing-masing 40 gram. Setiap bagian bagian dari daun sawo duriang yang telah kering kemudian menjalani proses pra-karbonisasi pada suhu 200°C selama satu jam. Setelah proses pra-karbonisasi selesai, sampel ditimbang kembali untuk menghitung persentase penurunan massa yang terjadi daun sawo durian.

2. Penggilingan dengan Blender

Setelah proses pra-karbonisasi pada suhu 200°C selama satu jam, sampel daun sawo durian hasil pra-karbonisasi kemudian digiling halus menggunakan blender dan diayak dengan saringan berukuran 100 mesh untuk memperoleh ukuran partikel yang lebih seragam. Selanjutnya, sampel kembali digiling menggunakan ball milling dan diayak dengan ukuran 200 mesh agar diperoleh serbuk yang lebih halus dan sesuai untuk tahap berikutnya. Sampel halus tersebut kemudian dianalisis menggunakan *Thermogravimetric* (TG) dan *Differential Thermogravimetry* (DTG). Analisis ini dilakukan untuk mengetahui mengukur perubahan massa sampel seiring perubahan suhu atau waktu. Data dari hasil analisis TG dan DTG digunakan sebagai acuan dalam menentukan kondisi optimum pada proses karbonisasi dan aktivasi fisika berikutnya.

3. Proses Aktivasi Kimia Daun Sawo Durian

Daun sawo durian digunakan sebagai bahan utama dalam proses aktivasi kimia dengan larutan KOH 0,3 M sebagai aktivator. Untuk menghitung massa KOH dapat digunakan persamaan 1:

$$m = M \times V_a \times Mr \text{ KOH} \quad (1)$$

Dimana m adalah massa aktivator (g), M adalah molaritas (mol/L), V_a adalah Volume akuades (L), Mr adalah massa molekul relatif (g/mol) (Novitra et al., 2022). Proses aktivasi kimia dimulai dengan melarutkan KOH sebesar 2,52 g dengan 150 mL akuades selama 1 jam dengan cara diaduk menggunakan *magnetic stirrer* dengan suhu 80°C dan kecepatan 400 rpm. Setelah 1 jam sampel daun sawo durian sebanyak 30 gram dimasukkan sedikit demi sedikit kedalam larutan dengan kecepatan 600 rpm selama 2 jam sampai homogen. Setelah proses aktivasi selesai, sampel didinginkan hingga mencapai suhu ruang. Selanjutnya, sampel dicuci menggunakan akuades yang diganti beberapa kali hingga diperoleh pH netral, yang dipastikan menggunakan kertas indikator universal. Proses pencucian diikuti dengan penyaringan menggunakan kertas saring hingga diperoleh endapan yang terpisah dengan tekstur bergerindil. Sampel kemudian dikeringkan menggunakan oven pada suhu 100°C selama 7 jam. Seluruh rangkaian proses

aktivasi kimia tersebut (pelarutan KOH, pencampuran sampel, pencucian, penyaringan, dan pengeringan) diulang sebanyak lima kali dengan konsentrasi yang sama untuk memperoleh total sampel teraktivasi kimia sebanyak 120 g. Setelah proses aktivasi sampel akan dihaluskan kembali menggunakan mortar dan disaring dengan ayakan 200 mesh. Sampel kemudian dikarakterisasi dengan menggunakan (FTIR) *Fourier Transform Infra-Red* untuk mengetahui gugus fungsi yang terbentuk dari sampel daun sawo durian.

4. Pembuatan Pelet Elektroda Superkapasitor

Sampel daun sawo durian yang telah diaktivasi secara kimia dan berbentuk serbuk karbon ditimbang sebanyak 0,7 gram, kemudian dicetak menjadi pelet berbentuk koin menggunakan *hydraulic press* dengan tekanan 247,08 MPa selama 5 menit. Pemberian tekanan ini bertujuan untuk memadatkan serbuk karbon sehingga pelet yang dihasilkan lebih padat dan tidak mudah pecah. Setelah proses pencetakan, setiap pelet ditimbang kembali menggunakan timbangan digital serta diukur ketebalan dan diameternya menggunakan jangka sorong digital. Dari keseluruhan proses ini diperoleh 90 pelet yang kemudian dikelompokkan ke dalam tiga variasi suhu, masing-masing terdiri dari 30 pelet.

2.3.2 Karbonisasi Pelet dan Aktivasi Fisika (Pirolisis)

Pirolisis merupakan proses dekomposisi termal pada suhu tinggi tanpa kehadiran oksigen. Proses pirolisis dilakukan dengan memanaskan sampel di dalam tanur menggunakan laju pemanasan $2^{\circ}\text{C min}^{-1}$ dalam atmosfer gas N_2 hingga mencapai suhu target, di mana setiap proses pemanasan berlangsung selama 8 jam untuk masing-masing variasi suhu 600°C , 700°C , dan 800°C . Setelah karbonisasi pada satu suhu selesai, aliran gas N_2 dihentikan dan digantikan dengan aliran gas CO_2 secara konstan pada suhu 800°C untuk melakukan aktivasi fisika selama 1 jam. Setelah proses aktivasi selesai dan sampel didinginkan hingga suhu ruang, langkah yang sama diulang kembali untuk variasi suhu berikutnya. Setelah pelet mencapai suhu ruang, pelet dicuci menggunakan akuades yang diganti beberapa kali sampai menghasilkan pH netral yang dipastikan menggunakan kertas indikator *universal*. Setelah langkah-langkah ini selesai, 5 pelet dari masing-masing suhu dipoles menggunakan kertas amplas P1200 dengan ketebalan $\pm 0,2$ mm dan diameter ± 8 mm. Pelet yang telah dipoles ini dapat digunakan sebagai elektroda superkapasitor dan diuji menggunakan metode *Cyclic Voltammetry* (CV).

2.3.3 Pembuatan Separator Superkapasitor

Proses pembuatan separator diawali dengan membersihkan kulit telur bebek dari kotoran menggunakan akuades. Selanjutnya, kulit telur direndam dalam larutan HCl 1 M untuk melarutkan kalsium karbonat (CaCO_3), sehingga membran telur terlepas dari cangkang. Membran tersebut kemudian dicuci menggunakan akuades hingga mencapai pH netral, lalu direndam dalam larutan H_2SO_4 1 M selama 2 hari. Setelah proses ini, membran dikeringkan, dan separator siap digunakan. Pembuatan separator superkapasitor ini berfungsi memisahkan elektroda positif dan negatif untuk mencegah hubungan arus listrik langsung, namun tetap memungkinkan pergerakan ion.

2.3.4 Pembuatan Sel Superkapasitor

Perakitan sel superkapasitor diawali dengan menyiapkan dua elektroda karbon aktif yang berasal dari daun sawo durian yang telah melalui proses karbonisasi dan aktivasi. Pengumpul arus berupa lempeng *stainless steel* dibentuk mengikuti ukuran elektroda, kemudian dicuci menggunakan akuades dan dikeringkan pada suhu ruang. Elektroda karbon kemudian direndam dalam larutan H_2SO_4 1 M selama 48 jam (2×24 jam) untuk memberikan aktivasi elektrokimia. Setelah proses perendaman selesai, elektroda diangkat dengan spatula dan diletakkan secara hati-hati di atas permukaan *stainless steel*.

Selanjutnya, separator yang terbuat dari membran kulit telur bebek ditempatkan di atas elektroda karbon. Langkah yang sama dilakukan untuk elektroda kedua sehingga terbentuk dua susunan lapisan yang sama. Setelah kedua lapisan siap, keduanya digabungkan dengan posisi saling berhadapan sehingga separator berada di tengah sebagai pemisah antara dua elektroda. Terakhir, seluruh susunan dijepit menggunakan penjepit atau alat tekan untuk memastikan kontak yang kuat antara elektroda dan pengumpul arus, serta mendukung perpindahan ion secara optimal melalui separator selama pengoperasian superkapasitor.

2.3.5 Karakterisasi Sampel

Sampel dianalisis menggunakan teknik XRD (*X-ray Diffraction*) untuk mengamati struktur kristal yang terbentuk dari karbon aktif yang diproduksi. Analisis massa jenis dilakukan dengan cara mengukur diameter dan ketebalan elektroda karbon menggunakan jangka sorong, sedangkan massa sampel diukur menggunakan timbangan digital. Teknik FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang ada pada karbon aktif. Selain itu, performa elektroda sel superkapasitor dievaluasi menggunakan perangkat *Physics Cyclic Voltammetry* (CV) UR Rad-ER 5841. Morfologi permukaan karbon aktif, termasuk distribusi pori-porinya, diamati menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscopy*), yang merupakan teknik pencitraan beresolusi tinggi. Analisis ini dilakukan untuk memahami luas permukaan serta kapasitas penyimpanan muatan karbon aktif pada aplikasi superkapasitor. Pengukuran sifat elektrokimia dilakukan melalui metode *Cyclic Voltammetry* dengan menggunakan alat *Physics CV UR Rad-ER 5841* pada rentang potensial 0,1 hingga 0,5 V dan laju pemindaian 0,001 V/s dalam larutan elektrolit H_2SO_4 1 M. Nilai arus, potensial dan waktu yang didapatkan pada sel superkapasitor digunakan untuk menghitung nilai kapasitansi spesifik dihitung dengan persamaan 2 (Nuradi R. F. et al., 2022):

$$C_{sp} = \frac{I_c - I_d}{s \times m} \quad (2)$$

Keterangan:

C_{sp} = Kapasitansi spesifik (F.g^{-1})

I_c = Arus pada saat *charge* (A)

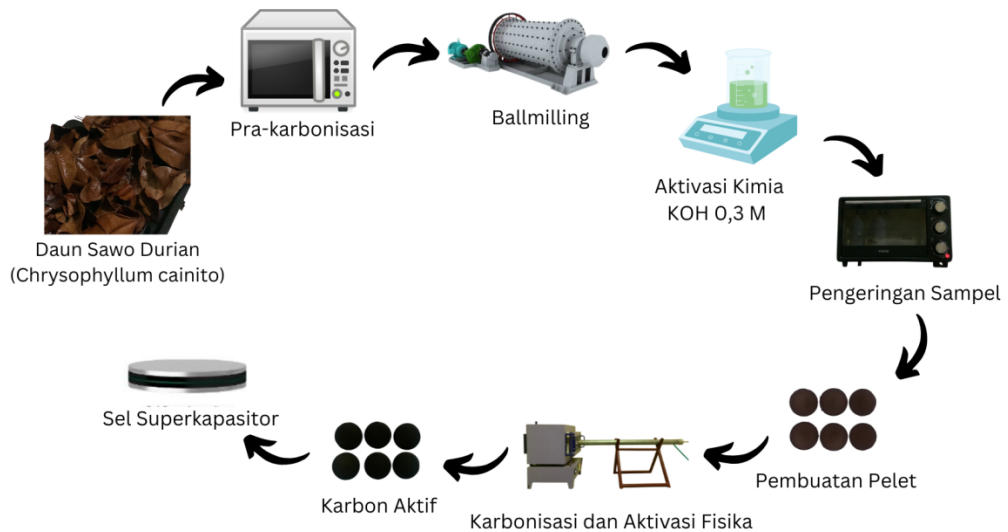
I_d = Arus pada saat *discharge* (A)

s = Laju pemindaian (V/s)

m = Massa elektroda (g)

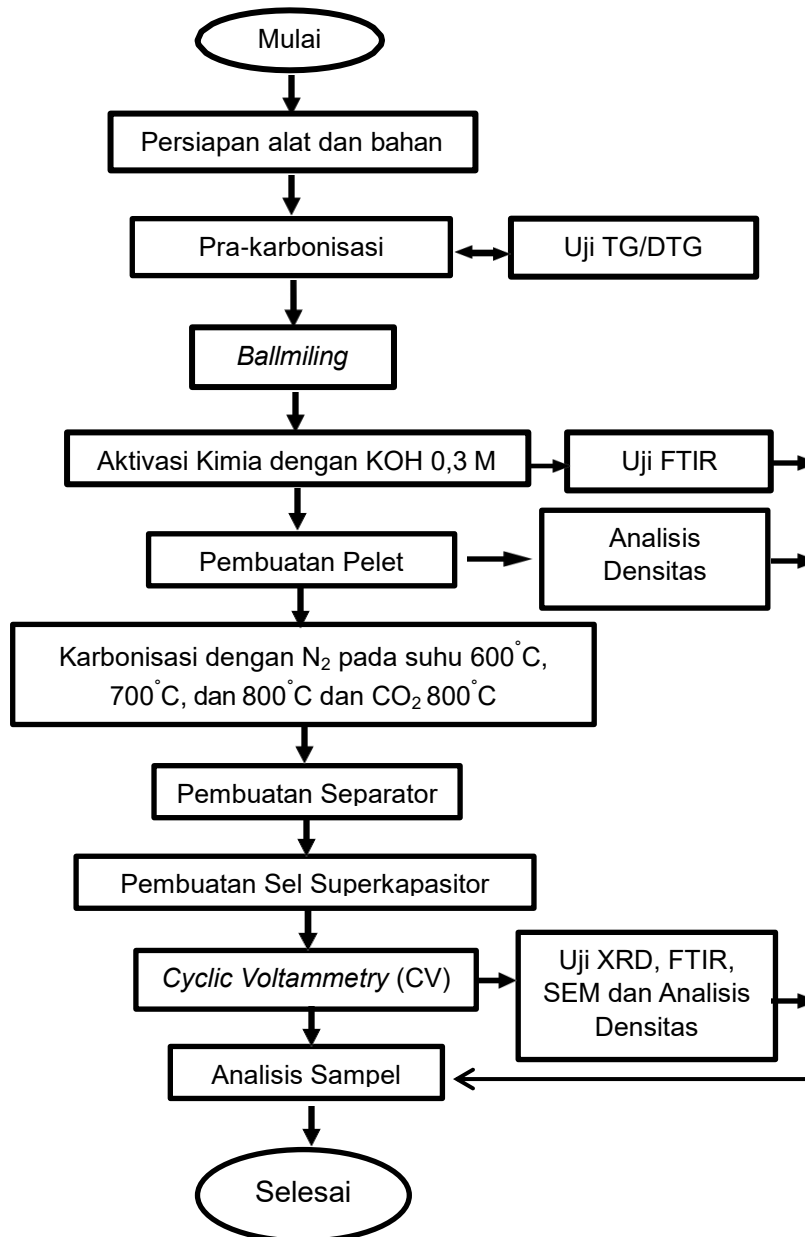
2.3.6 Diagram prosedur penelitian

Diagram prosedur menampilkan tahapan penelitian secara berurutan. Proses pra-karbonisasi dilakukan menggunakan oven sebagai langkah awal. Aktivasi kimia dilaksanakan dengan menggunakan larutan KOH sebagai aktivator dengan konsentrasi 0,3 M. Pelet dibentuk menggunakan mesin hidrolik press. Proses karbonisasi dan aktivasi fisika dilakukan dengan menggunakan tanur hingga dihasilkan karbon aktif. Karbon aktif yang diperoleh digunakan untuk perakitan sel superkapasitor. Seluruh tahapan penelitian divisualisasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram prosedur penelitian

2.3.7 Diagram Alir Penelitian



Gambar 2. Diagram alir penelitian