

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan transisi global menuju energi bersih dan terjangkau yang bersifat intermiten atau tidak selalu tersedia setiap saat, berbeda dengan energi fosil yang cenderung konstan, maka kebutuhan akan sistem penyimpanan energi yang efisien dan tahan lama pun meningkat (Feng & Lazkano, 2025). Superkapasitor merupakan salah satu solusi yang menjanjikan untuk mengatasi permasalahan keterbatasan penyimpanan energi konvensional seperti baterai karena keunggulannya dalam hal waktu pengisian yang cepat, siklus hidup yang panjang, dan kepadatan dayanya yang tinggi (Elsehsah et al., 2024). Karakteristik penyimpanan energi yang baik memiliki luas permukaan yang tinggi, mikro pori dengan persentase tinggi, dan kestabilan elektrokimia yang baik (Abdel Maksoud et al., 2021).

Performa superkapasitor biasanya bergantung pada karakteristik material bahan pembuat elektrodanya (Sharma & Chand, 2023). Salah satu bahan terbaik dan ramah lingkungan dalam pembuatan sel elektroda superkapasitor adalah material berbasis karbon (Forouzandeh et al., 2020). Karbon aktif menjadi salah satu bahan berbasis karbon terbaik dengan luas permukaan spesifik yang tinggi, stabilitas kimia yang baik, dan struktur pori yang dapat dimodifikasi untuk disesuaikan dengan karakteristik penyimpanan energi, sehingga menjadi kandidat material elektroda superkapasitor yang efektif dan efisien (Zhang et al., 2022).

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan bahan organik seperti bagian-bagian tumbuhan yang kaya kandungan selulosa dan lignin sebagai material karbon aktif dapat menghasilkan sel elektroda yang efisien untuk penyimpanan energi (Muddasar et al., 2022). Bagian seperti daun, batang, biji, dan kulit merupakan bahan dari tumbuhan yang dapat digunakan sebagai sumber karbon (Gan, 2021).

Aktivasi karbon aktif umumnya memadukan dua metode, yaitu aktivasi fisika dan aktivasi kimia. Aktivasi fisika yang efektif menggunakan metode pirolisis dengan atmosfer gas nitrogen (N_2) dengan suhu tertentu untuk mengubah bahan menjadi karbon dan mengaktifkan pori permukaan tanpa mempercepat oksidasi material (Szkoda et al., 2023). Penelitian yang dilakukan oleh (Armynah et al., 2024a) menggunakan bahan dari daun alpukat dengan KOH sebagai aktivator dan pirolisis N_2 pada variasi suhu 500, 600, 700, dan 800°C menunjukkan bagaimana pengaruh pemberian suhu pada material dapat memengaruhi efektivitas sel



Penelitian lain menunjukkan suhu 700°C cocok untuk bahan yang berasal dari alpukat dengan kapasitas 209 $F.g^{-1}$ pada 1 $A.g^{-1}$ dan densitas energi 135,5 $W.kg^{-1}$. Sehingga dapat dilihat bahwa suhu yang terlalu tinggi ataupun rendah dapat memengaruhi hasil, maka diperlukan pemahaman tentang suhu terbaik untuk menentukan menjadi karbon aktif.

Selain aktivasi fisika, aktivasi kimia juga berpengaruh pada karakteristik karbon aktif. Aktivasi kimia dilakukan dengan menggunakan bahan kimia dengan sifat asam atau basa seperti KOH, Na_2CO_3 , HCl, H_2SO_4 , H_3PO_4 , dan ZnCl_2 untuk memperluas permukaan dan mengaktifkan pori pada permukaan material. ZnCl_2 menjadi salah satu aktivator asam terbaik yang mampu menaikkan porositas material karbon (Susanti et al., 2022). Penelitian yang dilakukan oleh (Durai et al., 2021) menggunakan salah satu daun yang berasal dari famili *Sapindaceae*, yaitu daun pohon maple sebagai prekursor karbon aktif yang diaktivasi menggunakan ZnCl_2 dan karbonisasi pada atmosfer N_2 pada suhu 800°C selama 4 jam untuk dijadikan sel elektroda superkapasitor. Hasil yang didapatkan menunjukkan luas permukaan yang tinggi pada karbon aktif sebesar $1042,28 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ dan kapasitansi sebesar 217 F.g^{-1} pada densitas arus 1 A.g^{-1} . Selain itu, didapatkan retensi kapasitansi 91,6% setelah 2000 kali pengisian-pengosongan pada densitas arus 5 A.g^{-1} . Meskipun aktivasi dengan ZnCl_2 memberikan hasil yang demikian baiknya, pohon maple jarang didapatkan di Indonesia, sehingga perlu mencari daun yang sejenis dan mudah didapatkan untuk mempermudah pengembangan bahan elektroda superkapasitor.

Salah satu daun yang sefamili dengan pohon maple dan sangat mudah ditemukan di Indonesia adalah daun kelengkeng. Selain itu, belum banyak dimanfaatkan serta diteliti potensinya sebagai elektroda sel superkapasitor. Daun ini memiliki potensi yang besar untuk menjadi bahan karbon aktif karena kaya akan bahan sumber karbon yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Sebelumnya, penelitian yang dilakukan oleh c mensintetis daun kelengkeng sebagai karbon aktif untuk elektroda superkapasitor tanpa tambahan bahan sintesis dengan fokus studi pada pengaruh konsentrasi ZnCl_2 sebagai zat aktivator dan pirolisis menggunakan gas N_2 dengan suhu konstan yang menghasilkan kapasitansi spesifik $169,83 \text{ F.g}^{-1}$ dan densitas energi $19,04 \text{ Wh.kg}^{-1}$ pada daya densitas $124,37 \text{ W.kg}^{-1}$. Hasil dari sintesis bahan ini menunjukkan kapasitansinya lebih rendah dari bahan lainnya. Namun, studi ini hanya menganalisis pengaruh konsentrasi ZnCl_2 pada sampel dan belum menganalisis bagaimana pengaruh suhu pirolisis pada atmosfer N_2 untuk pembentukan karbon aktif sebagai sel elektroda superkapasitor. Padahal ada potensi dengan menganalisis suhu terbaik aktivasi akan membuka pengembangan karbon aktif daun kelengkeng untuk elektroda superkapasitor yang efektivitasnya lebih optimal.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh perlakuan suhu pirolisis 650 , 700 , dan 750°C pada atmosfer N_2 untuk pembuatan karbon aktif yang disintesis dari daun kelengkeng (*Dimocarpus longan*) sebagai sel



superkapasitor karena berpengaruh pada efektivitasnya. Zat aktivator berupa ZnCl_2 sebagai zat aktivator dengan merujuk literatur karbon aktif yang dihasilkan kemudian dikarakterisasi untuk analisis kimianya untuk memberikan analisis mengenai dampak luas permukaan bahan yang menentukan suhu terbaik untuk aktivasi karbon aktif dari daun kelengkeng. Selain itu, penelitian ini juga menunjukkan potensi untuk memproduksi sel elektroda

superkapasitor berbasis karbon aktif yang lebih ramah lingkungan, efisien, dan mendukung transisi ke energi yang lebih bersih.

1.2 Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang di atas, maka tujuan penelitian dari penelitian ini yaitu:

1. Menganalisis pengaruh variasi suhu pirolisis (650°C, 700°C, dan 750°C) dalam atmosfer gas nitrogen (N_2) terhadap karbon aktif yang disintesis dari daun kelengkeng (*Dimocarpus longan*) dengan aktivator $ZnCl_2$.
2. Menentukan suhu pirolisis maksimum yang menghasilkan performa karbon aktif terbaik sebagai elektroda superkapasitor.

1.3 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini yaitu mendorong pemanfaatan limbah biomassa lokal, khususnya daun kelengkeng, sebagai bahan baku ramah lingkungan dan berkelanjutan untuk teknologi penyimpanan energi serta memberikan alternatif material elektroda yang ekonomis dan potensial untuk meningkatkan kinerja superkapasitor.



BAB II METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan mulai Desember 2024 sampai April 2025. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Material dan Energi, Laboratorium Elektronika dan Instrumentasi, Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin dan Laboratorium Fisika Material, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Riau.

2.2 Alat dan Bahan Penelitian

2.2.1 Alat penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini yakni:

1. Oven
2. Blender
3. Mortar
4. Timbangan digital
5. *Magnetic stirrer*
6. Kertas pasir P1200
7. Kertas saring
8. Ayakan 200 mesh
9. *Stainless steel*
10. Gelas kimia
11. Corong
12. Cawan petri
13. Pinset
14. *Furnace*
15. Thermogravimetric (TG) dan *Differential Thermogravimetry* (DTG)
16. *Fourier Transform Infrared* (FT-IR)
17. *X-Ray Diffraction* (XRD)
18. *Cyclic Voltammetry* (CV)
19. *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS)

2.2.2 Bahan penelitian

Bahan yang digunakan pada penelitian ini yakni:

1. Akuades



ng
lorida (ZnCl_2)
HCL)
telur bebek

2.3 Prosedur Penelitian

2.3.1 Pembuatan sampel karbon Aktif

1. Persiapan sampel dan pra-karbonisasi daun kelengkeng

Proses pra-karbonisasi adalah tahap awal dalam membuat elektroda karbon aktif sel superkapasitor. Daun kelengkeng yang sudah kering dipisahkan dari tulang daunnya dan dipotong-potong menjadi potongan kecil. Daun ditimbang menggunakan timbangan digital terlebih dahulu dengan massa yang sudah ditentukan kemudian dibersihkan menggunakan akuades secara bertahap. Massa sampel daun yang telah dibersihkan dan digunakan sebanyak 400 g dan kemudian akan dibagi menjadi 40 g untuk setiap proses pra-karbonisasi, yang akan dilakukan pada suhu 200°C selama 1 jam. Setelah proses pra-karbonisasi selesai sampel ditimbang kembali untuk mengetahui proses penyusutan yang terjadi pada sampel dan didapatkan hasil yang dapat dilihat pada Tabel 1.

2. Penggilingan sampel

Setelah proses pra-karbonisasi, sampel kemudian dihancurkan menggunakan blender dan diayak dengan menggunakan ayakan 200 *mesh* untuk mendapatkan sampel yang lebih halus. Kemudian bubuk sampel sebanyak 5 g diuji menggunakan alat *Thermogravimetric* (TG) dan *Differential Thermogravimetry* (DTG). Pengujian ini berfungsi untuk menganalisis perubahan massa suatu material sebagai fungsi dari suhu atau waktu saat sampel dipanaskan, didinginkan, atau dipertahankan pada suhu tertentu dalam atmosfer tertentu.

3. Aktivasi kimia

Aktivasi kimia pada serbuk daun kelengkeng menggunakan $ZnCl_2$ sebagai aktivator dengan konsentrasi 0,5 M. Persamaan yang digunakan untuk menghitung massa $ZnCl_2$ menggunakan persamaan 1:

$$\text{Massa } ZnCl_2 \text{ (g)} = \text{Molaritas } \left(\frac{\text{mol}}{\text{l}}\right) \times \text{Volume Akuades (l)} \times \text{Mr } ZnCl_2 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right) \quad (1)$$

Proses aktivasi kimia dimulai dengan melarutkan 17 gr $ZnCl_2$ dalam 0,25 L akuades untuk konsentrasi 0,5 M. Larutan ini diaduk menggunakan *magnetic stirrer* pada suhu 80°C selama 1 jam dengan kecepatan 400 rpm. Bubuk sampel daun kelengkeng sebanyak 30 g ditambahkan secara perlahan ke dalam larutan $ZnCl_2$ agar tercampur merata, pengadukan dilanjutkan dengan suhu yang sama selama 2 jam menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan 800 rpm. Setelah selesai, sampel didiamkan hingga mencapai suhu 80°C, sampel dikeringkan menggunakan oven dengan suhu 80°C selama 24 jam. Setelah kering, sampel kemudian dihaluskan dengan mortar dan diayak menggunakan ayakan 200 *mesh* untuk ukuran partikel yang homogen. Selanjutnya, sampel dianalisis menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk melihat struktur kristal



yang dihasilkan dan *Fourier Transform Infra Red* (FTIR) untuk mengetahui gugus fungsi yang terbentuk.

2.3.2 Karbonisasi dan aktivasi fisika (pirolisis)

Pirolisis merupakan tahap dekomposisi bahan pada suhu tinggi tanpa adanya udara. Proses pirolisis dimulai dengan tahap karbonisasi menggunakan tanur pada suhu 650°C, 700°C dan 750°C dalam gas N₂ selama 1 jam, bertujuan untuk menghilangkan bahan-bahan selain karbon. Tahap berikutnya adalah aktivasi fisika dengan gas CO₂ pada suhu 850°C selama 1 jam. Setelah itu, serbuk didiamkan hingga mencapai suhu ruang. Kemudian, dinetralkan menggunakan akuades untuk melihat apakah serbuk tenggelam dan mengeluarkan gelembung. Serbuk yang telah dinetralkan digunakan sebagai elektroda superkapasitor untuk diuji dengan *Cyclic Voltammetry* (CV). Sampel juga akan dianalisis menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD), *Fourier Transform Infra Red* (FTIR), *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS).

2.3.3 Pembuatan separator superkapasitor

Pembuatan separator superkapasitor dapat dilakukan dengan memanfaatkan membran yang terdapat pada kulit telur bebek. Kulit telur bebek dibersihkan menggunakan akuades untuk menghilangkan kotoran yang menempel. Selanjutnya, membran yang melekat dipisahkan dari kulit telur dengan merendam kulit telur dalam larutan 1 M HCL yang bertujuan untuk melarutkan CaCO₃ pada kulit telur sehingga membran dapat terlepas. Membran kemudian dicuci dengan akuades hingga pH membran menjadi netral. Setelah itu, rendam membran telur dalam larutan 1 M H₂SO₄ selama 2 x 24 jam dan separator siap untuk digunakan.

2.3.4 Pembuatan sel superkapasitor

Pembuatan sel superkapasitor dilakukan di laboratorium Fisika Material Universitas Riau menggunakan elektroda berbahan karbon aktif dari daun kelengkeng, *stainless steel* sebagai pengumpul arus, membran kulit telur bebek sebagai separator, dan larutan elektrolit H₂SO₄. Dalam prosesnya, elektroda dari karbon aktif daun kelengkeng direndam dalam larutan H₂SO₄ 1 M selama 2 x 24 jam. Setelah perendaman, elektroda diangkat menggunakan spatula dan ditempatkan di atas *stainless steel* yang telah dibentuk sesuai ukuran elektroda. Proses ini dilakukan dua kali untuk memperoleh kapasitor lapisan ganda listrik. Di antara kedua elektroda, diletakkan separator membran dari kulit telur bebek. Setelah semua komponen tersusun, sel superkapasitor kemudian dijepit menggunakan penjepit kertas untuk memastikan kestabilannya.

2.3.5 Karakterisasi sampel

Karakterisasi sampel dilakukan untuk mengetahui sifat struktural, kimia, morfologi, ia dari karbon aktif yang disintesis, yang keseluruhannya ap performa elektroda, khususnya dalam hal kapasitansi karakterisasi dilakukan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) si struktur kristal karbon aktif setelah karbonisasi. Teknik ini menentukan tingkat kristalinitas material. Struktur kristal yang umunya berkorelasi dengan luas permukaan yang lebih tinggi atkan kemampuan penyimpanan muatan. Dengan demikian,



analisis XRD memberikan landasan awal dalam menilai potensi kapasitansi spesifik elektroda.

Selanjutnya, karakterisasi dilakukan terhadap komposisi kimia permukaan menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR). Pengujian dilakukan pada sampel sebelum dan sesudah karbonisasi untuk mengidentifikasi perubahan gugus fungsi seperti hidroksil, karbonil, dan karboksilat. Gugus-gugus fungsi ini penting karena dapat berinteraksi dengan ion elektrolit melalui reaksi redoks semu (*pseudocapacitance*), yang merupakan salah satu mekanisme utama dalam penyimpanan muatan. Oleh karena itu, data FTIR digunakan untuk mengevaluasi sejauh mana sifat kimia permukaan mendukung peningkatan kapasitansi spesifik.

Karakterisasi morfologi permukaan dilakukan dengan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) terhadap sampel karbon aktif setelah karbonisasi. Teknik ini digunakan untuk mengamati struktur pori yang berperan penting dalam menentukan luas permukaan spesifik material. Pori-pori dengan distribusi dan ukuran yang sesuai dapat memperbesar area kontak antara elektroda dan elektrolit, sehingga meningkatkan jumlah muatan yang dapat disimpan. Oleh karena itu, data SEM secara langsung berkontribusi dalam menilai aspek fisik yang relevan terhadap kapasitansi spesifik.

Karakterisasi unsur kimia permukaan dilakukan menggunakan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS) yang terintegrasi dalam sistem SEM. Teknik ini digunakan untuk mengidentifikasi unsur-unsur penyusun pada permukaan sampel karbon aktif. Kandungan unsur seperti karbon (C), oksigen (O), dan unsur lainnya memberikan informasi penting mengenai keberhasilan proses karbonisasi dan keberadaan gugus fungsional yang dapat memengaruhi sifat elektrokimia material. Unsur karbon yang tinggi menandakan efisiensi konversi biomassa menjadi karbon aktif, sedangkan keberadaan oksigen dapat menunjang pembentukan interaksi elektrostatis dengan elektrolit. Oleh karena itu, data EDS mendukung analisis struktur kimia permukaan yang relevan terhadap kinerja superkapasitor.

Dan analisis massa dilakukan dengan menimbang sampel karbon aktif sebelum dan sesudah proses karbonisasi menggunakan timbangan digital presisi. Tujuan dari pengukuran ini adalah untuk mengetahui efisiensi konversi biomassa menjadi karbon aktif, serta memperkirakan jumlah material yang tersedia untuk uji elektrokimia. Penurunan massa yang signifikan biasanya menunjukkan pelepasan senyawa volatil seperti air, hemiselulosa, dan lignin selama proses pemanasan. Selain itu, nilai massa akhir sangat penting karena digunakan dalam perhitungan

Oleh karena itu, keakuratan dalam pengukuran massa menjadi sangat penting untuk memastikan validitas hasil karakterisasi performa



untuk mengevaluasi sifat elektrokimia secara langsung, dilakukan dengan metode *Cyclic Voltammetry* (CV) dengan perangkat ER 5841. Teknik ini digunakan untuk mengukur respons arus

elektroda terhadap perubahan tegangan, sehingga kapasitansi spesifik yang diperoleh dari uji voltametri siklik dapat dihitung dari persamaan (Page, 2013):

$$C_{sp} = \frac{2}{mv(V_b - V_a)} \int_{V_a}^{V_b} I dV \quad (2)$$

Keterangan:

C_{sp} = Kapasitansi spesifik ($F \cdot g^{-1}$)

I = Arus (A)

V_a = Tegangan batas bawah (V)

V_b = Tegangan batas atas (V)

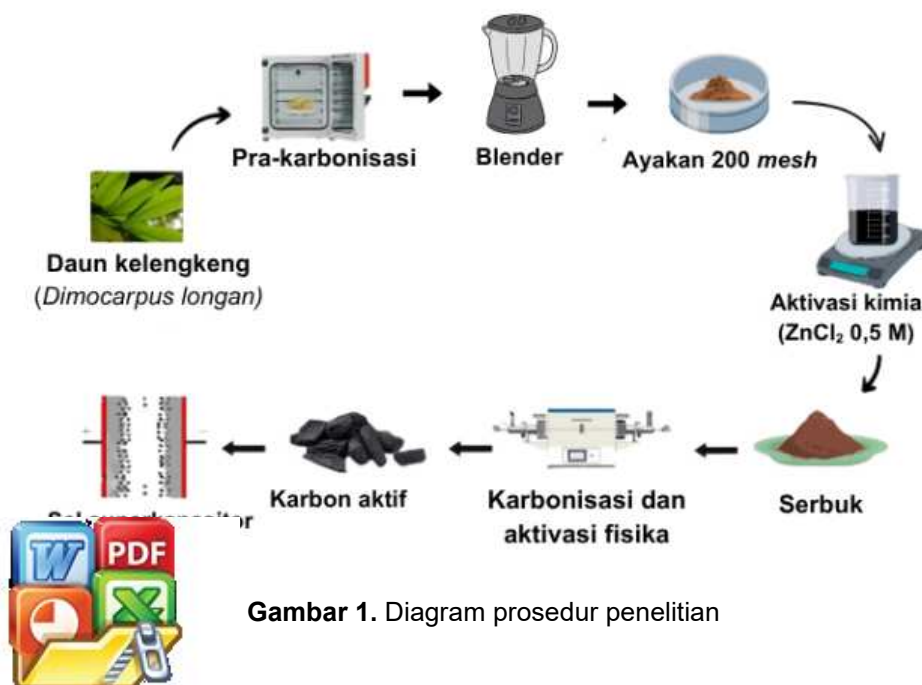
v = Laju pemindaian (V/s)

m = Massa elektroda (g)

$\int I dV$ = Luas area kurva *cyclic voltammetry*

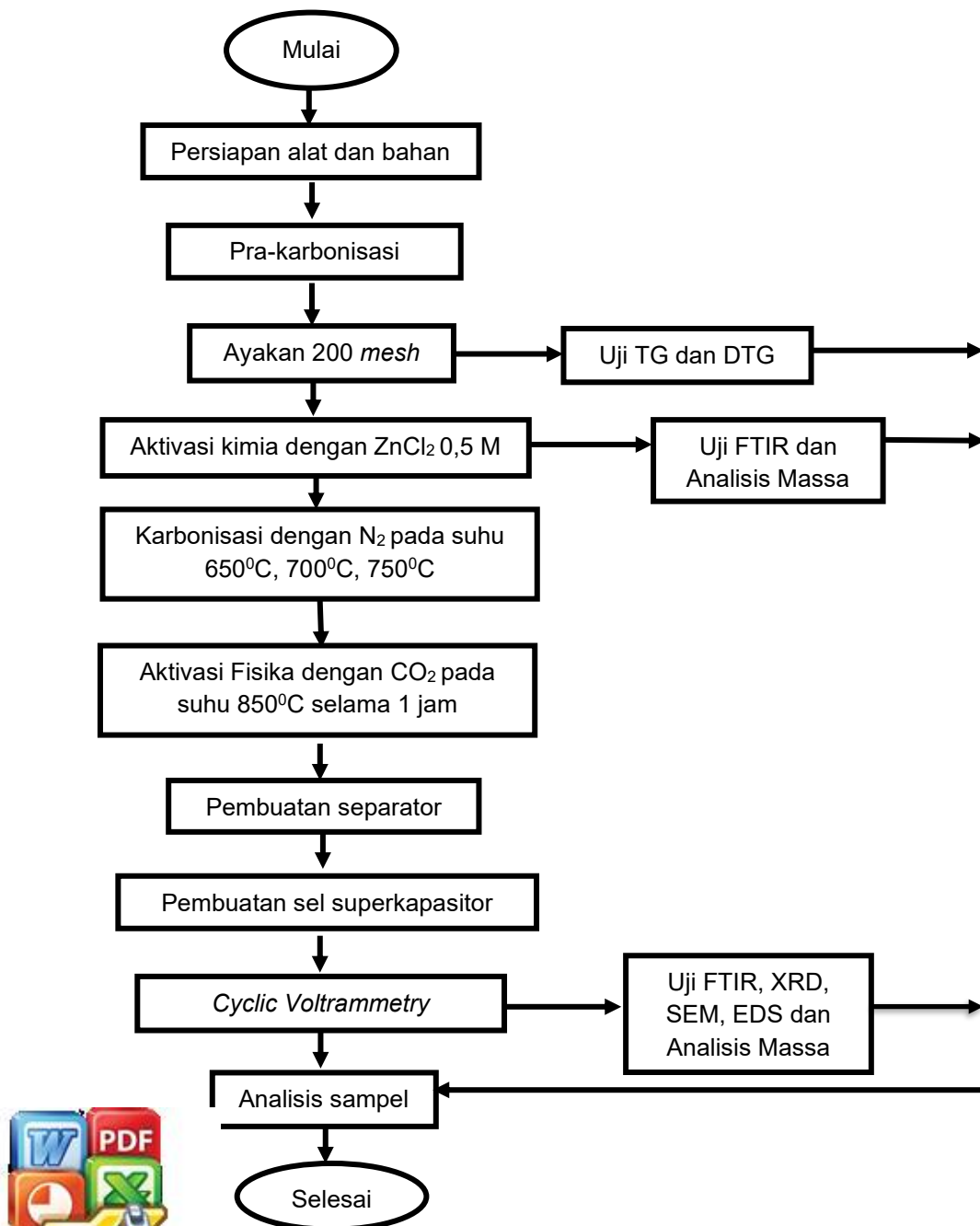
2.3.6 Diagram prosedur penelitian

Pada diagram dijelaskan mengenai pra-karbonisasi menggunakan oven, aktivasi kimia dengan $ZnCl_2$ sebagai aktivator, kemudian dioven dan digunakan ayakan 200 mesh untuk mendapatkan serbuk yang lebih halus, serta proses karbonisasi dan aktivasi fisika menggunakan tanur hingga menghasilkan karbon. Selanjutnya, karbon yang diperoleh digunakan dalam pembuatan sel superkapasitor, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram prosedur penelitian

2.3.7 Diagram alir penelitian



Gambar 2. Diagram alir penelitian

