

**PENGARUH AKTIVASI KIMIA DAN FISIKA TERHADAP LUAS
PERMUKAAN SPESIFIK KARBON AKTIF LIMBAH KULIT KOPI
SEBAGAI MATERIAL ELEKTRODA SUPERKAPASITOR**

(Skripsi)

Oleh

**ASRI HANDAYANI
NPM 2117041039**



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

**PENGARUH AKTIVASI KIMIA DAN FISIKA TERHADAP LUAS
PERMUKAAN SPESIFIK KARBON AKTIF LIMBAH KULIT KOPI
SEBAGAI MATERIAL ELEKTRODA SUPERKAPASITOR**

Oleh

Asri Handayani

Penelitian ini dilatar belakangi oleh kebutuhan akan material elektroda superkapasitor yang ramah lingkungan dan bersumber dari limbah biomassa, khususnya limbah kulit kopi yang kaya akan lignoselulosa. Tujuan utama dari penelitian ini adalah mensintesis dan mengkarakterisasi karbon aktif berbasis limbah kulit kopi melalui variasi aktivasi kimia dan fisika, dengan fokus pada pengaruh jenis aktivator (KOH, NaOH, ZnCl_2 , H_3PO_4), konsentrasi, suhu, dan waktu aktivasi terhadap sifat fisik dan elektrokimia material. Delapan sampel karbon aktif (K1–K8) disiapkan menggunakan desain eksperimen metode Taguchi dengan orthogonal array L8. Prosedur melibatkan proses pirolisis, aktivasi kimia, dan aktivasi fisika pada suhu 700-900 °C selama 1-3 jam, diikuti dengan karakterisasi menggunakan XRD, SEM-EDS, BET, serta uji performa elektrokimia melalui metode *Cyclic Voltammetry* (CV). Hasil karakterisasi XRD menunjukkan bahwa seluruh sampel memiliki struktur semi-kristalin dengan dominasi fasa amorf. Uji SEM menunjukkan hasil gambar dari morfologi permukaan berpori yang semakin berkembang seiring peningkatan suhu dan rasio aktivator. Analisis BET mencatat peningkatan luas permukaan spesifik dari 96,38 m^2/g (K1) hingga 388,73 m^2/g (K8), menandakan keberhasilan aktivasi. Uji CV menunjukkan kapasitansi spesifik tertinggi sebesar 8,80 F/g pada sampel K8. Melalui analisis metode Taguchi, kombinasi optimal diperoleh pada penggunaan H_3PO_4 5%, suhu 700 °C, dan waktu 1 jam, yang menghasilkan karakteristik fisik dan elektrokimia terbaik. Secara keseluruhan, kombinasi aktivasi kimia dan fisika terbukti efektif dalam meningkatkan performa karbon aktif limbah kulit kopi sebagai material elektroda superkapasitor.

Kata kunci: Karbon aktif, kulit kopi, aktivasi, kapasitansi, superkapasitor.

ABSTRACT

THE EFFECT OF CHEMICAL AND PHYSICAL ACTIVATION ON THE SPECIFIC SURFACE AREA OF ACTIVATED CARBON FROM COFFEE SKIN WASTE AS A SUPERCAPACITOR ELECTRODE MATERIAL

Oleh

Asri Handayani

This research is motivated by the need for environmentally friendly supercapacitor electrode materials sourced from biomass waste, especially coffee husk waste which is rich in lignocellulose. The main objective of this research is to synthesize and characterize coffee husk waste-based activated carbon through variations in chemical and physical activation, with a focus on the effect of activator type (KOH, NaOH, ZnCl₂, H₃PO₄), concentration, temperature, and activation time on the physical and electrochemical properties of the material. Eight activated carbon samples (K1–K8) were prepared using the Taguchi method experimental design with an L8 orthogonal array. The procedure involved pyrolysis, chemical activation, and physical activation at 700–900 °C for 1–3 hours, followed by characterization using XRD, SEM-EDS, BET, and electrochemical performance testing using the Cyclic Voltammetry (CV) method. The XRD characterization results showed that all samples had a semi-crystalline structure with a dominant amorphous phase. SEM test shows the image results of the porous surface morphology that increasingly develops with increasing temperature and activator ratio. BET analysis recorded an increase in the specific surface area from 96,38 m²/g (K1) to 388,73 m²/g (K8), indicating successful activation. CV test showed the highest specific capacitance of 8,80 F/g in the K8 sample. Through Taguchi method analysis, the optimal combination was obtained at the use of 5 % H₃PO₄, a temperature of 700 °C, and a time of 1 hour, which produced the best physical and electrochemical characteristics. Overall, the combination of chemical and physical activation proved effective in improving the performance of coffee husk waste activated carbon as a supercapacitor electrode material.

Keywords: Activated carbon, coffee husk, activation, capacitance, supercapacitor.

**PENGARUH AKTIVASI KIMIA DAN FISIKA TERHADAP LUAS
PERMUKAAN SPESIFIK KARBON AKTIF LIMBAH KULIT KOPI
SEBAGAI MATERIAL ELEKTRODA SUPERKAPASITOR**

Oleh

ASRI HANDAYANI

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat Mencapai Gelar
SARJANA SAINS**

Pada

**Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

Judul Skripsi

: Pengaruh Aktivasi Kimia dan Fisika Terhadap Luas
Permukaan Spesifik Karbon Aktif Limbah Kulit Kopi
Sebagai Material Elektroda Superkapasitor

Nama Mahasiswa

: **Asri Handayani**

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2117041039

Program Studi

: Fisika

Fakultas

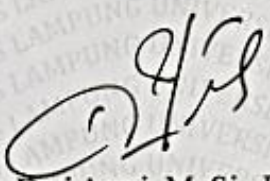
: Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

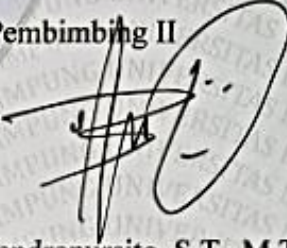
MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

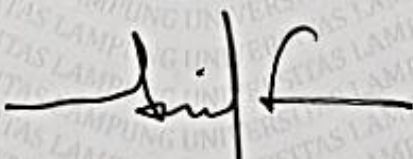
Pembimbing I

Pembimbing II


Dra. Dwi Asmi, M. Si., Ph.D.
NIP. 196312281986102001


Yusup Hendronursito, S.T., M.T.
NIP. 198503142014011001

2. Ketua Jurusan Fisika FMIPA


Arif Surtano, S.Si., M.Si., M.Eng.
NIP. 197109092000121001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Dra. Dwi Asmi, M.Si., Ph.D.**

Sekretaris : **Yusup Hendronursito, S.T., M.T.**

Penguji Bukan Pembimbing : **Prof. Drs. Posman Manurung, M.Si., Ph.D.**

2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Drs. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.
NIP. 197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 10 September 2025

PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Asri Handayani
Nomor Pokok Mahasiswa : 2117041039
Jurusan : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi saya dengan judul **"Pengaruh Aktivasi Kimia dan Fisika Terhadap Luas Permukaan Spesifik Karbon Aktif Limbah Kulit Kopi Sebagai Material Elektroda Superkapasitor"** adalah benar hasil karya sendiri, baik ide, hasil, maupun analisisnya. Selanjutnya saya tidak keberatan jika sebagian atau keseluruhan data di dalam skripsi digunakan oleh dosen atau program studi dalam kepentingan publikasi atas persetujuan penulis dan sepanjang nama saya disebutkan sebelum dilakukan publikasi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan penuh kesadaran untuk dapat digunakan sebagaimana mestinya.

Bandar Lampung, 10 September 2025



Asri Handayani
NPM 2117041039

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Asri Handayani, dilahirkan Pada 30 April 2002 di desa Merambung, Kecamatan Tanjung Raja, Kabupaten Lampung Utara. Putri dari pasangan Bapak Amirulhadi dan Ibu Amina sebagai anak ke-5 dari 6 bersaudara.

Penulis menyelesaikan pendidikan di Taman Kanak-Kanak (TK) Al-Islamiah Tanjung Raja lulus pada Tahun 2008, SDN 02 Merambung lulus pada tahun 2014, MTS Islamiyah Srimenanti lulus pada tahun 2017, MAN 1 Lampung Utara pada tahun 2020. Selama di bangku SD-SMA penulis aktif dalam kegiatan ekstrakurikuler Pramuka dan ROHIS. Pada tahun 2021 penulis terdaftar sebagai mahasiswi Jurusan Fisika FMIPA Unila melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN) dan menerima beasiswa KIP-K. Selama menjadi mahasiswi, penulis pernah mengikuti kegiatan karya wisata ilmiah (KWI) sebagai peserta pada tahun 2021 dan panitia pada tahun 2022. Tahun 2022-2023 penulis juga menjadi bagian anggota Komunitas Baca (KOMBACA) dan finalis Duta Baca Perpustakaan Universitas Lampung, serta telah mengikuti kegiatan seminar nasional sebagai panitia. Penulis juga telah melaksanakan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di Lembaga Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN), Tanjung Bintang dengan judul “Proses Leaching Mineral Berharga dari Granit Pada Penelitian di Laboratorium Hidroelektrometalurgi BPTM-BRIN Tanjung Bintang Lampung Selatan”. Penulis juga aktif pada kegiatan kemahasiswaan. Penulis pernah mengikuti kegiatan pertukaran mahasiswa merdeka (PMM) pada tahun 2024 di Universitas Veteran Jawa Timur. Di akhir tahun 2024-2025 juga aktif dalam mengajar les privat di lembaga MM Private Solution, Edu Private dan Baitun Najaah Institute.

MOTTO

“Success is the sum of small efforts repeated day after day”

(Robbert Collier)

“Janganlah engkau mengucapkan perkataan yang engkau sendiri tak suka mendengarnya jika orang lain mengucapkannya kepadamu” (Ali bin Abi Thalib)

“Maka, sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan, Sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan” (QS. Al-Insyirah: 6-7)

“Ya Tuhanku, lapangkanlah untukku dadaku, dan mudahkanlah untukku urusanku” (QS. Ta-Ha:25)

“Ya Allah, aku memohon kepada-Mu ilmu yang bermanfaat, rizki yang baik, dan amal yang diterima.” (HR. Ibnu Majah)

“Kesulitan yang kita hadapi mungkin sebab dosa yang kita lakukan, tapi kemudahan yang kita dapatkan adalah doa dari orang tua dan orang-orang yang pernah kita bantu dalam masa sulitnya”

(Asri)

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dengan menyebut nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang

Al-ḥamdu lillāhi rabbil-'ālamīn, dengan ketulusan, ketekunan, rasa sabar, percaya diri, yakin dan tawakal serta atas izin Allah SWT. Kupersembahkan karya ini kepada:

Orang tuaku:

Ubak Amirulhadi

dan

Umak Amina

Terima kasih yang sebesar-besarnya karena tidak pernah mengeluh saat berpeluh tenaga, berguyur keringat, berpanaskan matahari, berlelah pikiran atas segala usaha dan kasih sayang yang telah diberikan kepada penulis dengan tulus dan penuh keikhlasan serta selalu mendoakan kebaikan, memberikan dukungan untuk keberhasilan dan juga kebahagiaan anak-anaknya..

Kakak-kakak aku, yang aku banggakan:

Andre Hamzah, Megi Andrian, Haziz Aprian dan Jefri Muhari

Adik aku tersayang:

Hani Juwinda

Terima kasih karena selalu memberikan dukungan dan juga semangat dalam menyelesaikan penulisan skripsi ini.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis haturkan kepada Allah SWT atas segala rahmat dan karunia yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "Pengaruh Aktivasi Kimia dan Fisika Terhadap Luas Permukaan Spesifik Karbon Aktif Limbah Kulit Kopi Sebagai Material Elektroda Superkapasitor" yang merupakan syarat untuk meraih gelar Sarjana Sains (S.Si.) pada bidang Material Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

Skripsi ini membahas tentang karakteristik limbah kulit kopi sebagai bahan karbon aktif untuk material elektroda superkapasitor. Pada skripsi ini dilakukan analisis terhadap karbon aktif limbah kulit kopi dengan menggunakan BET, XRD, SEM-EDS dan *Cyclic Voltammetry* (CV).

Pada penulisan skripsi ini, penulis menyadari bahwa masih terdapat kekurangan baik dalam isi maupun cara penyajian. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran guna perbaikan di masa mendatang. Akhir kata semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan bagi pembaca umumnya. Aamiin.

Bandar Lampung, 10 September 2025



Asri Handayani

SANWACANA

Puji syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT., karena atas rahmat dan hidayah-Nya skripsi ini dapat diselesaikan. Skripsi dengan judul **"Pengaruh Aktivasi Kimia dan Fisika Terhadap Luas Permukaan Spesifik Karbon Aktif Limbah Kulit Kopi Sebagai Material Elektroda Superkapasitor"** adalah salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains di Universitas Lampung.

Dalam kesempatan ini, penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Ibu Dra. Dwi Asmi, M.Si., Ph.D. selaku Pembimbing Utama atas kesediaannya memberikan motivasi, pengetahuan, dan saran dalam penulisan skripsi ini.
2. Bapak Yusup Hendronursito M.T. selaku Pembimbing Kedua atas kesediaannya memberikan motivasi, pengetahuan, dan arahan, dalam penulisan skripsi ini.
3. Bapak Prof. Drs. Posman Manurung, M.Si., Ph.D. selaku Penguji, terimakasih atas kritik dan saran yang telah diberikan selama penulisan skripsi ini.
4. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si. selaku Dekan FMIPA Universitas Lampung.
5. Bapak Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng. selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
6. Ibu Suprihatin S.Si., M.Si. selaku Pembimbing Akademik penulis selama menjadi mahasiswa Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
7. Bapak Anggoro Trimursito selaku Kepala Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN) Tanjung Bintang Lampung Selatan.
8. Bapak/Ibu Peneliti Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN) Tanjung Bintang Lampung Selatan, yang senantiasa memberikan bantuan dalam penelitian.

9. Bapak/Ibu Dosen Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
10. Bapak/Ibu Staf Administrasi Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
11. Kedua Orang tua penulis, Bapak Amirulhadi & Ibu Aminah yang selalu memberikan do'a dan dukungan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
12. Kakak (Andre Hamzah, Megi Andrian, Haziz Aprian, dan Jefri Muhari) adik (Hani Juwinda), Ipar (Ayuk Tarisih dan Ayuk Tiba), Keponakan ku yang lucu (Succi dan Amril) yang selalu membersamai setiap langkah penulis dalam penyelesaian skripsi ini.
13. Regita Ayu Putri S.E (Sahabat senasib 11 tahun dan sudah seperti saudara) yang telah menemani penulis di setiap keluh kesah dan selalu mendengarkan curhatan penulis selama menyusun skripsi ini.
14. Sahabat semasa MTs dan MAN yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu, dan Fisika FMIPA Universitas Lampung 2021 dan semua teman (Nella, Mayang, Anggis, Devi) teman sepembimbingan yang telah membantu penulis disaat ketidaktahuan penulis selama menyusun skripsi ini serta teman-teman yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.
15. Terakhir, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang mendalam kepada diri sendiri, **Asri Handayani**. Terima kasih telah bertahan sejauh ini. Untuk setiap lelah, keraguan, dan keberanian yang lahir di tengah ketakutan. Aku bangga pada diri yang terus melangkah meski hampir menyerah. Semoga raga kuat, hati tegar, dan jiwa lapang dalam setiap proses kehidupan. Terima kasih untukku.

Akhir kata, penulis haturkan do'a semoga Allah SWT. memberikan balasan berlipat ganda dan memudahkan segala langkah kita atas bantuan yang telah diberikan dalam penyelesaian skripsi ini.

Bandar Lampung, 10 September 2025



Asri Handayani

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	ix
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan masalah	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Pemanfaatan Kulit Kopi Sebagai Karbon Aktif.....	5
2.2 Karakteristik dan Proses Produksi Karbon Aktif.....	6
2.3 Elektroda Sebagai Piranti Superkapasitor	7
2.4 Superkapasitor Media Penyimpanan Energi Terbarukan	9
2.5 Aktivasi Kimia dan Fisik pada Karbon Aktif	11
2.6 Analisis Karbon Aktif Menggunakan <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	13
2.7 Prinsip Kerja <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	17
2.8 Prinsip Kerja <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM)	18
2.9 Prinsip Kerja <i>Brunauer Emmett Teller</i> (BET)	19
2.10 <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV)	21
2.11 Metode Taguchi	23
III. METODE PENELITIAN	
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	25
3.2 Alat Penelitian	25
3.2.1 Fungsi dan Gambar Alat	26
3.3 Bahan-bahan Penelitian	28
3.3.1 Fungsi dan Gambar Bahan Penelitian	29
3.4 Waktu dan Tempat Penelitian.....	25
3.5 Alat Penelitian	25

3.5.1 Fungsi dan Gambar Alat	26
3.6 Bahan-bahan Penelitian	28
3.6.1 Fungsi dan Gambar Bahan Penelitian	29
3.7 Prosedur Penelitian	30
3.7.1 Pembuatan Karbon Aktif limbah kulit kopi	30
3.7.2 Proses Aktivasi Karbon Aktif Secara Kimia dan Fisika	30
3.8 Penamaan Kode Sampel Berdasarkan Metode Taguchi	31
3.9 Karakterisasi Sampel Karbon Aktif Limbah Kopi	32
3.9.1 Karakterisasi Menggunakan (BET).....	33
3.9.2 Karakterisasi Menggunakan XRD	33
3.9.3 Karakterisasi Menggunakan SEM-EDS.....	34
3.9.4 Uji Performa Elektrokimia	37
3.10 Diagram Alir	

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Karakterisasi BET Karbon Aktif Limbah Kulit Kopi	38
4.2 Hasil Karakterisasi XRD Karbon Aktif Limbah Kulit Kopi	43
4.3 Hasil Karakterisasi SEM-EDS Karbon Aktif Limbah Kopi.....	46
4.4 Hasil Uji Performa Elektrokimia Karbon Aktif Limbah Kulit Kopi....	47
4.5 Hasil Analisa Metode Taguchi	52

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan	61
5.2 Saran	62

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Struktur dasar superkapasitor	8
2.2 <i>Electric double layer supercapacitor</i>	10
2.3 Pola XRD karbon aktif.....	15
2.4 Skematik hukum Bragg.....	17
2.5 Skema kerja SEM.....	18
2.6 Kurva CV	22
2.7 Alat <i>cyclic voltammetry</i>	22
3.1 Reaktor <i>pyrolysis</i>	26
3.2 <i>Furnace</i> nitrogen	26
3.3 Oven	27
3.4 <i>Ball mill</i>	27
3.5 Alat-alat penelitian	28
3.6 Limbah kulit kopi.....	29
3.7 Bahan aktivator karbon aktif.....	29
3.8 Desain prosedur pembuatan karbon aktif.....	31
3.9 Skema uji performa elektrokimia.....	35
3.10 Skema pengujian <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV)	36
3.17 Diagram alir penelitian.....	37
4.1 Grafik isoterm adsorpsi-desorpsi nitrogen karbon aktif limbah kulit kopi A = K1 (KOH 2 %, 700 °C, 3 Jam); B= K3 (NaOH 5 %, 900 °C, 3 Jam).....	40
4.2 Grafik isoterm adsorpsi-desorpsi nitrogen karbon aktif limbah kulit kopi C = K5 (ZnCl ₂ 2 %, 900 °C, 1 Jam); D= K8 (NaOH 5 %, 900 °C, 3 Jam).....	41
4.3 Pola difraksi sinar-X (XRD) karbon aktif limbah kulit kopi untuk sampel K1 hingga K8	43

4.4 Hasil karakterisasi SEM karbon aktif dengan skala 10 μ m. A= K1 (KOH 2 %, 700 °C, 3 Jam); B= K2 (KOH 5 %, 900 °C, 1 Jam); C= K3 (NaOH 5 %, 900 °C, 3 Jam); D= K4 (NaOH 2 %, 700 °C, 1 Jam)	48
4.5 Hasil karakterisasi SEM karbon aktif dengan skala 10 μ m. E= K5 (ZnCl ₂ 2 %, 900 °C, 1 Jam); F= K6 (ZnCl ₂ 5 %, 700 °C, 3 Jam); G= K7 (H ₃ PO ₄ 2 %, 900 °C, 3 Jam); H= K8 (H ₃ PO ₄ 2 %, 700 °C, 1 Jam)	49
4.6 Kurva Voltamogram <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV) limbah kulit kopi	52
4.7 Plot efek utama terhadap nilai rata-rata	57
4.8 Plot efek utama untuk rasio SN.....	59

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1 Perbandingan aktivasi kimia dan fisika.....	13
3.1 Alat-alat penelitian	25
3.2 Bahan-bahan penelitian.....	28
3.3 Linear graph 8 <i>orthogonal array</i> karbon aktif limbah kulit kopi.....	31
3.4 Kode sampel karbon aktif limbah kulit kopi hasil metode taguchi.....	32
3.5 Alat karakterisasi.....	33
4.1 Hasil karakterisasi BET karbon aktif limbah kulit kopi.....	38
4.2 Hasil perhitungan karakterisasi XRD karbon aktif limbah kulit kopi.....	45
4.3 Nilai kapasitansi karbon aktif limbah kulit kopi	53
4.4 Hasil analisa metode Taguchi karbon aktif limbah kulit kopi	55

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Karbon aktif merupakan material amorf berbasis karbon dengan luas permukaan tinggi, yang diperoleh melalui proses karbonisasi dan aktivasi (Yanti *et al.*, 2024). Saat ini, karbon aktif banyak dimanfaatkan dalam berbagai penelitian terutama di bidang penyimpanan energi. Peningkatan konsumsi energi global serta tuntutan terhadap teknologi yang ramah lingkungan telah mendorong pengembangan sistem penyimpanan energi yang efisien. Dalam hal ini, karbon aktif berperan penting sebagai material elektroda pada superkapasitor, terutama tipe *electric double-layer capacitors* (EDLC). Superkapasitor tipe ini menawarkan berbagai keunggulan, seperti densitas daya tinggi, waktu pengisian yang cepat, efisiensi energi tinggi, serta umur siklus yang lebih panjang dibandingkan dengan baterai konvensional (Prayogatama dan Kurniawan, 2022). Namun, kinerja superkapasitor sangat dipengaruhi oleh sifat elektrokimia material elektrodanya. Di antara berbagai material yang digunakan sebagai elektroda, karbon aktif menjadi pilihan utama dalam banyak penelitian saat ini. Hal ini disebabkan oleh sejumlah keunggulan yang dimiliki karbon aktif, seperti luas permukaan spesifik yang tinggi, struktur pori yang dapat disesuaikan, konduktivitas listrik yang baik, serta biaya produksi yang relatif rendah (Yanti *et al.*, 2024).

Seperti yang telah dipaparkan sebelumnya, bahan baku karbon aktif yang berasal dari biomassa atau limbah pertanian semakin banyak dikembangkan. Salah satu jenis limbah yang memiliki potensi tinggi adalah kulit kopi, yang mengandung komponen lignoselulosa seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Kandungan lignoselulosa ini berperan penting dalam mempermudah pembentukan struktur pori selama proses karbonisasi dan aktivasi (Mukhiemer *et al.*, 2024). Proses aktivasi merupakan tahapan utama dalam produksi karbon aktif karena

menentukan pengembangan pori dan luas permukaan spesifik material. Secara umum, aktivasi dibedakan menjadi dua pendekatan, yaitu aktivasi fisika dan aktivasi kimia. Aktivasi fisika dilakukan melalui pemanasan pada suhu tinggi menggunakan gas inert, uap air, atau CO₂ yang berperan dalam membuka pori dan mempertahankan stabilitas struktur karbon. Sementara itu, aktivasi kimia melibatkan agen seperti KOH, ZnCl₂, dan H₃PO₄, yang bekerja melalui mekanisme dehidrasi, redoks, dan aromatisasi, serta berkontribusi terhadap pembentukan mikropori dan peningkatan luas permukaan pada karbon aktif yang akan melewati tahap karakterisasi (Abioye and Ani, 2020; Prayogatama dan Kurniawan, 2022).

Penelitian yang dilakukan oleh (Mukhiemer *et al.*, 2024) menunjukkan bahwa kombinasi aktivasi fisika dan kimia menggunakan ZnCl₂ pada karbon aktif dari limbah kulit kopi mampu meningkatkan luas permukaan dari 458 m²/g, aktivasi fisika saja menjadi sekitar 830 m²/g. Selain itu, kapasitansi spesifik yang dihasilkan mencapai 261 F/g dengan stabilitas siklus yang tinggi >5000 siklus, mengindikasikan performa elektroda yang unggul. Sebaliknya, penelitian oleh (Khadka *et al.*, 2024) yang menggunakan metode aktivasi kimia tunggal hanya menghasilkan kapasitansi spesifik sebesar 113,81 F/g meskipun luas permukaannya cukup besar (825,5 m²/g), menandakan bahwa parameter lain seperti struktur pori dan konduktivitas turut mempengaruhi performa akhir. Hasil serupa juga ditunjukkan oleh (Yanti *et al.*, 2024) yang melaporkan nilai serapan iodin hingga 545,67 mg/g pada karbon aktif kulit kopi yang diaktivasi dengan KOH, tetapi hanya menghasilkan kapasitansi spesifik 18,012 F/g.

Berdasarkan studi sebelumnya, metode aktivasi memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat fisik dan performa elektrokimia karbon aktif. Aktivasi kimia efektif dalam membentuk mikropori dan meningkatkan luas permukaan, sementara aktivasi fisika lebih mampu mempertahankan kestabilan struktur karbon. Oleh karena itu, penelitian ini menjadi penting karena penelitian sebelumnya yang secara komprehensif membandingkan jenis aktivator kimia, suhu, dan waktu aktivasi terhadap karakteristik karbon aktif dari limbah kulit kopi masih sangat terbatas. Limbah kulit kopi merupakan bahan yang melimpah namun belum

banyak dimanfaatkan. Terutama di Indonesia, yang menghasilkan lebih dari 1 juta ton limbah kulit kopi per tahun (Statistik Kopi Indonesia, 2025). Pemanfaatannya sebagai karbon aktif bernilai tinggi menjadi solusi potensial dalam mengurangi limbah sekaligus mendukung pengembangan material energi berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh suhu (700 °C dan 900 °C), waktu aktivasi (1 dan 3 jam), serta jenis aktivator kimia (NaOH, KOH, ZnCl₂, dan H₃PO₄) terhadap karakteristik karbon aktif kulit kopi melalui analisis BET (*Brunauer–Emmett–Teller*), XRD (*X-ray Diffraction*), SEM (*Scanning Electron Microscopy*), dan performa elektrokimia CV (*Cyclic Voltammetry*). Selain itu, penelitian ini diharapkan memperluas pemahaman tentang optimasi proses aktivasi menggunakan metode taguchi yang masih jarang diterapkan pada karbon aktif berbasis limbah kulit kopi.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh suhu, waktu, dan jenis aktivator terhadap sifat fisik karbon aktif?
2. Bagaimana kombinasi kondisi aktivasi fisika dan kimia dapat menghasilkan karbon aktif mesopori dengan luas permukaan tinggi?
3. Bagaimana kinerja kapasitansi spesifik karbon aktif sebagai elektroda superkapasitor?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mensintesis karbon aktif dari limbah kulit kopi dengan variasi suhu (700 °C dan 900 °C), waktu (1 dan 3 jam), serta jenis aktivator kimia (NaOH, KOH, ZnCl₂, dan H₃PO₄).
2. Menganalisis pengaruh parameter aktivasi terhadap luas permukaan sampel karbon aktif limbah kulit kopi dengan karakterisasi BET, SEM, dan XRD.
3. Mengidentifikasi kondisi aktivasi optimum untuk menghasilkan karbon aktif mesopori dengan luas permukaan tinggi.

4. Mengevaluasi kapasitansi spesifik karbon aktif sebagai elektroda superkapasitor melalui uji performa elektrokimia (CV).
5. Mengkaji keterkaitan antara aktivasi fisika dan kimia terhadap sifat fisik dan elektrokimia karbon aktif.

1.4 Batasan Masalah

Adapun Batasan masalah penelitian sebagai berikut.

1. Limbah kulit kopi kering digunakan sebagai bahan dasar karbon aktif.
2. Sampel diproses melalui pirolisis dalam reaktor tertutup dan diaktivasi dalam *furnace* beratmosfer nitrogen.
3. Variasi perlakuan dirancang menggunakan metode Taguchi untuk efisiensi dan optimasi kondisi.
4. Aktivasi kimia menggunakan NaOH, KOH, ZnCl₂, dan H₃PO₄ pada konsentrasi 2 % dan 5 %.
5. Aktivasi fisika dilakukan dengan menggunakan *furnace* nitrogen pada suhu 700 °C dan 900 °C selama 1 dan 3 jam.
6. Karakterisasi dilakukan melalui BET (luas permukaan), SEM (morfologi), XRD (struktur), dan performa elektrokimia CV (kapasitansi).

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian sebagai berikut.

1. Menyediakan data ilmiah pemanfaatan limbah kulit kopi sebagai karbon aktif mesopori untuk superkapasitor.
2. Mendukung pengurangan limbah dan pemanfaatan biomassa terbarukan.
3. Mendorong inovasi material elektroda ramah lingkungan.
4. Menawarkan alternatif elektroda efisien dan berkelanjutan.
5. Menjadi dasar optimasi aktivasi karbon dengan metode Taguchi.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pemanfaatan Kulit Kopi Sebagai Karbon Aktif

Produksi kopi di Indonesia merupakan salah satu komoditas unggulan dalam subsektor pertanian yang banyak diminati, setelah kayu dan karet. Tingginya permintaan terhadap kopi menjadikannya sebagai sumber devisa penting di luar sektor migas, khususnya bagi negara-negara berkembang. Namun demikian, kegiatan produksi kopi menghasilkan limbah yang cukup signifikan, terutama kulit kopi, yang hingga kini masih belum dimanfaatkan secara optimal (*Dewi et al.*, 2021). Indonesia sebagai salah satu produsen kopi terbesar di dunia tercatat menghasilkan lebih dari 1 juta ton limbah kulit kopi setiap tahunnya (Statistik Kopi Indonesia, 2025).

Namun, peningkatan produksi kopi juga menimbulkan permasalahan lingkungan, salah satunya berupa limbah padat seperti kulit kopi. Untuk mengurangi dampak tersebut, diperlukan solusi inovatif yang mampu mengubah limbah tersebut menjadi produk bernilai tambah. Salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan adalah pemanfaatan kulit kopi sebagai bahan baku karbon aktif, mengingat kandungannya yang meliputi selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Kandungan lignin yang tinggi mendukung efisiensi proses karbonisasi dan memungkinkan material ini digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk sebagai elektroda baterai (Purnama dan Taufik, 2019).

Karbon aktif dari kulit kopi memiliki luas permukaan yang besar dan struktur berpori yang baik, sehingga efektif dalam menyerap logam berat dan senyawa beracun. Sifat adsorptif ini menjadikannya berpotensi untuk aplikasi dalam pemurnian air dan udara. Selain itu, karbon aktif juga dikenal memiliki ketahanan kimia dan mekanis yang tinggi, serta lebih ekonomis dibandingkan karbon aktif

komersial. Ketersediaannya yang melimpah dan biaya produksi yang relatif rendah menjadikan karbon aktif dari kulit kopi sebagai alternatif material yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Di masyarakat, kulit kopi memang telah dimanfaatkan sebagai pupuk organik. Namun, dalam bidang penelitian, potensinya sebagai karbon aktif mulai banyak dikaji, khususnya dalam pengembangan material adsorben. Kandungan karbon total dalam kulit kopi tergolong tinggi, berkisar antara 47,8-58,9 %, yang menjadikannya efektif dalam menyerap berbagai bahan kimia dan toksin (Guntama *et al.*, 2023). Proses produksi karbon aktif dari kulit kopi dapat dilakukan melalui metode aktivasi fisik maupun kimia, tergantung pada karakteristik yang diinginkan dari produk akhir.

2.2 Karakteristik dan Proses Produksi Karbon Aktif

Karbon aktif merupakan material karbon amorf dengan sistem pori yang berkembang dan luas permukaan spesifik tinggi, yang menjadikannya unggul untuk aplikasi penyimpanan energi, adsorpsi, dan pemurnian (Shahcheragh *et al.*, 2023). Struktur karbon aktif terdiri atas mikropori (<2 nm), mesopori (2-50 nm), dan makropori (>50 nm), di mana mikropori berkontribusi besar terhadap kapasitas spesifik dan luas permukaan, sedangkan mesopori mempercepat difusi molekul dan ion (Pam *et al.*, 2022).

Bahan baku karbon aktif biasanya berasal dari biomassa lignoselulosa seperti cangkang kelapa, sekam padi, atau kulit buah, karena kandungan karbonnya tinggi dan mudah diperoleh secara ekonomis (Malini *et al.*, 2023). Dalam proses produksinya, karbon aktif diperoleh melalui dua tahap utama yaitu karbonisasi dan aktivasi. Karbonisasi dilakukan dengan memanaskan bahan pada kondisi tanpa oksigen (*pyrolysis*) untuk menghilangkan senyawa volatil dan memperkaya kadar karbon (Maniarasu *et al.*, 2023). Selanjutnya, aktivasi dilakukan untuk memperluas sistem pori dan meningkatkan luas permukaan spesifik. Aktivasi fisika umumnya menggunakan gas pengoksidasi seperti CO₂ atau uap air pada suhu tinggi (>800 °C), dan mampu menciptakan struktur pori yang relatif stabil, namun kurang terkontrol (Shahcheragh *et al.*, 2023). Sementara itu, aktivasi kimia menggunakan agen seperti H₃PO₄, KOH, atau ZnCl₂ yang meresap ke dalam

struktur biomassa dan menciptakan pori melalui mekanisme dehidrasi dan reaksi redoks pada suhu yang lebih rendah (400-700 °C), menghasilkan karbon aktif dengan mikropori yang lebih dominan dan efisiensi lebih tinggi (Pam *et al.*, 2022)

Menurut (Malini *et al.*, 2023), karakteristik permukaan karbon aktif dapat ditingkatkan lebih lanjut melalui fungsionalisasi kimia, misalnya dengan memperkenalkan gugus hidroksil atau karbonil, yang tidak hanya meningkatkan afinitas terhadap molekul target (seperti CO₂), tetapi juga mendukung pembentukan ikatan elektrokimia dalam aplikasi superkapasitor. Kombinasi antara struktur mikropori yang luas dan gugus permukaan fungsional menghasilkan karbon aktif dengan kapasitansi tinggi dan stabilitas siklus yang baik.

Penelitian terbaru (Gurtner *et al.*, 2025) juga menunjukkan bahwa optimalisasi parameter proses, seperti rasio impregnasi kimia, suhu aktivasi, dan waktu tahan, sangat mempengaruhi sifat akhir karbon aktif. Misalnya (Maniarasu *et al.*, 2023) menekankan bahwa peningkatan suhu aktivasi dan rasio impregnasi dapat secara signifikan meningkatkan luas permukaan dan kapasitas adsorpsi terhadap CO₂. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian (Malini *et al.*, 2023), yang menunjukkan bahwa penyesuaian proses aktivasi pada *char* gasifikasi kayu menghasilkan karbon aktif dengan distribusi pori yang optimal dan efisiensi produksi tinggi.

Dengan demikian, karakteristik dan efisiensi karbon aktif sangat dipengaruhi oleh jenis bahan baku, metode aktivasi yang digunakan, serta parameter proses yang dikontrol selama produksi. Pemahaman menyeluruh terhadap proses ini menjadi penting dalam pengembangan material karbon aktif untuk aplikasi teknologi bersih dan energi berkelanjutan.

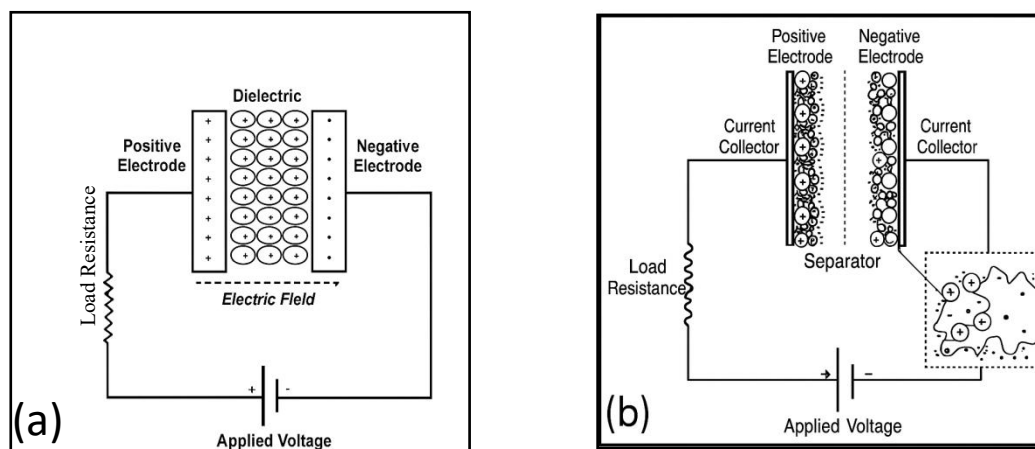
2.3 Elektroda Sebagai Piranti Superkapasitor

Elektroda merupakan komponen konduktif yang berperan penting dalam sistem elektrokimia, termasuk superkapasitor, karena menjadi media transfer muatan antara elektroda dan elektrolit. Dalam sistem elektrolisis, elektroda terbagi menjadi dua jenis, yaitu anoda sebagai tempat terjadinya oksidasi dan katoda

sebagai tempat terjadinya reduksi. Kedua fungsi ini dapat bergantian tergantung pada arah tegangan yang diberikan, dan dalam beberapa sistem dapat ditemukan elektroda bipolar yang berfungsi sebagai anoda sekaligus katoda tergantung pada polaritas selnya (Anggraini *et al.*, 2019).

Dalam perangkat superkapasitor, elektroda memegang peranan kunci dalam menentukan performa kapasitansi karena berfungsi sebagai tempat penyimpanan muatan melalui mekanisme *double-layer* atau reaksi redoks permukaan (Yuda *et al.*, 2021). Oleh sebab itu, pemilihan material elektroda menjadi faktor yang sangat penting. Kriteria elektroda yang ideal mencakup luas permukaan spesifik yang tinggi, struktur pori yang sesuai khususnya mesopori, konduktivitas listrik yang baik, serta kestabilan kimia dan termal yang cukup tinggi (Huda *et al.*, 2022).

Karbon aktif merupakan salah satu material yang paling umum digunakan dalam fabrikasi elektroda superkapasitor karena memiliki karakteristik yang sesuai dengan persyaratan tersebut. Selain itu, karbon aktif dapat disintesis dari berbagai limbah biomassa seperti sekam padi atau limbah plastik, dengan metode yang relatif murah dan ramah lingkungan (Yuda *et al.*, 2021; Huda *et al.*, 2022). Proses aktivasi fisika dan kimia pada karbon aktif diketahui mampu memperluas luas permukaan serta menciptakan porositas yang menunjang peningkatan kapasitansi spesifik dari superkapasitor. Adapun struktur dasar superkapasitor ditunjukkan pada **Gambar 2.1**.



Gambar 2.1 Skema kapasitor: (a) kapasitor konvensional; (b) superkapasitor.

Gambar 2.1 merupakan struktur dasar superkapasitor yang terdiri dari elektroda negatif (-) dan positif (+) yang umumnya terbuat dari karbon aktif atau material konduktif lainnya. Sedangkan separator berfungsi memisahkan kedua elektroda agar tidak terjadi hubungan langsung, namun tetap memungkinkan ion bergerak. Elektrolit berperan sebagai media penghantar ion yang berada di antara elektroda, memungkinkan pembentukan lapisan ganda listrik (*Electric Double Layer*). Tanda panah merah dan biru menunjukkan arah pergerakan muatan pada masing-masing elektroda saat proses pengisian (Halper *et al.*, 2006).

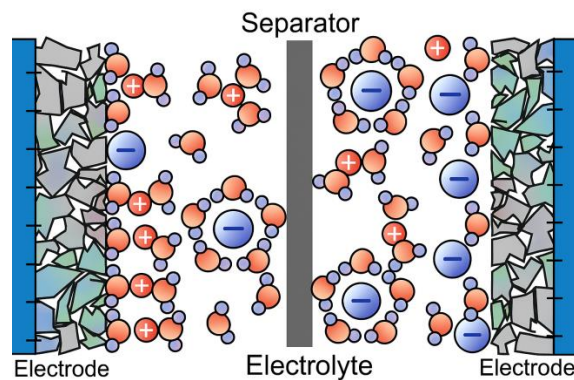
2.4 Superkapasitor Media Penyimpanan Energi Terbarukan

Superkapasitor merupakan salah satu inovasi modern dalam teknologi penyimpanan energi yang dikembangkan untuk mengatasi keterbatasan kapasitor konvensional dan baterai. Perangkat ini mampu menyimpan dan melepaskan energi secara cepat, memiliki kapasitansi tinggi, densitas daya yang besar, serta siklus hidup yang jauh lebih panjang dibandingkan baterai pada umumnya (Nurhasmia *et al.*, 2021). Berbeda dengan baterai yang mengandalkan reaksi kimia, superkapasitor bekerja berdasarkan prinsip penyimpanan elektrostatis, sehingga proses pengisian dan pelepasan muatannya berlangsung jauh lebih cepat dan efisien.

Dari segi struktur, superkapasitor memiliki dua elektroda yang dipisahkan oleh material dielektrik dan direndam dalam larutan elektrolit. Untuk meningkatkan performa penyimpanan energi, permukaan elektroda dirancang memiliki luas yang besar dan jarak antar elektroda dibuat sangat kecil. Hal ini memungkinkan terbentuknya kapasitansi yang tinggi dan energi yang tersimpan lebih besar dibandingkan kapasitor biasa. Keunggulan ini menjadikan superkapasitor sangat potensial digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk pada kendaraan listrik seperti bus listrik, yang membutuhkan kapasitas energi cukup besar dan waktu pengisian daya yang singkat (Nurhasmia *et al.*, 2021).

Karbon aktif menjadi salah satu material yang paling banyak digunakan sebagai elektroda pada superkapasitor, terutama tipe *Electric Double Layer Capacitor*

(EDLC). Karakteristik karbon aktif yang memiliki luas permukaan tinggi, porositas baik, serta konduktivitas listrik yang stabil menjadikannya ideal untuk meningkatkan kapasitas penyimpanan muatan melalui mekanisme pembentukan lapisan ganda listrik (Syarif, 2014). Umumnya, perangkat EDLC terdiri atas dua elektroda karbon aktif, elektrolit cair atau gel, dan separator yang berfungsi untuk mencegah hubungan langsung antara kedua elektroda. Adapun susunan material dari EDLC (*Electric Double Layer Supercapacitor*) ditunjukkan pada **Gambar 2.2**.



Gambar 2.2 *Electric double layer supercapacitor* (Zhou, 2014).

Gambar 2.2 menunjukkan struktur dasar dari *Electric Double Layer Capacitor* (EDLC), yang terdiri atas dua elektroda karbon aktif, separator, elektrolit, dan kolektor arus. Energi disimpan melalui pembentukan lapisan ganda listrik di permukaan elektroda, tanpa melibatkan reaksi kimia. Ion dari elektrolit teradsorpsi pada permukaan elektroda bermuatan, menghasilkan penyimpanan muatan secara elektrostatis. Penjelasan ini sesuai dengan (Simon and Gogotsi 2008), yang menyatakan bahwa pada EDLC, mekanisme penyimpanan energi terjadi melalui akumulasi ion pada antarmuka elektroda-elektrolit, dan bergantung pada luas permukaan elektroda serta aksesibilitas pori-pori.

Desain ini mendukung penyimpanan muatan secara efisien melalui mekanisme fisik tanpa reaksi kimia. Sebagai contoh penerapan, (Alif *et al.*, 2016) merancang elektroda superkapasitor dalam bentuk *sandwich*, menggunakan batang padi yang telah dimodifikasi dengan pelapisan karbon aktif. Material tersebut disusun dengan menggunakan separator berbahan PVA (*polyvinyl alcohol*) di bagian tengah, yang berfungsi untuk mengisolasi kedua elektroda. Seluruh rangkaian

kemudian dijepit menggunakan lempengan tembaga sebagai kolektor arus, untuk memastikan penghantaran listrik yang optimal. Setelah elektroda selesai difabrikasi, pengujian kapasitansi dilakukan guna mengevaluasi kinerjanya. Proses pengujian dilakukan dengan menggunakan elektrolit berupa larutan KOH 6 M dalam etanol, karena larutan ini memiliki konduktivitas tinggi dan stabilitas elektrokimia yang baik (Febriyanto *et al.*, 2019). Nilai kapasitansi yang diperoleh dari pengujian ini menjadi salah satu parameter utama dalam menilai performa superkapasitor secara keseluruhan.

2.5 Aktivasi Kimia dan Fisik pada Karbon Aktif

Penggunaan karbon aktif sudah dikenal sejak zaman Mesir Kuno (sekitar 1500 SM), ketika arang digunakan untuk menyerap bau dari luka yang membusuk, sebuah aplikasi medis awal dari prinsip adsorpsi. Tokoh seperti Hippocrates (abad ke-4 SM) dan Pliny the Elder (abad ke-1 M) juga melaporkan penggunaan arang untuk meredakan keracunan dan infeksi. Penggunaan karbon aktif kemudian berkembang di abad ke-18, terutama dalam pemurnian cairan seperti air, alkohol, dan gula, dengan bahan baku dari kayu, tulang, dan darah hewan (Doczekalska *et al.*, 2022).

Memasuki awal abad ke-20, teknologi aktivasi karbon aktif mengalami perkembangan penting dengan diperkenalkannya penggunaan uap dan bahan kimia dalam proses aktivasi. Selama Perang Dunia I, di Amerika Serikat dikembangkan metode aktivasi uap pada arang tempurung kelapa, menghasilkan karbon aktif granul. Kemajuan ini menjadi landasan bagi produksi karbon aktif secara industri melalui dua pendekatan utama yaitu aktivasi fisika dan aktivasi kimia (Ramadhani *et al.*, 2020). Salah satu tahap penting dalam proses produksi karbon aktif adalah aktivasi, yang bertujuan menghilangkan senyawa volatil, tar, dan senyawa organik lainnya, serta membuka struktur pori karbon. Aktivasi ini dapat dilakukan melalui dua pendekatan utama, yakni aktivasi kimia dan aktivasi fisika. Aktivasi kimia merupakan proses pemutusan rantai karbon dalam struktur organik dengan bantuan zat kimia tertentu. Proses ini mampu menghasilkan luas permukaan yang tinggi dan porositas yang baik, menjadikannya pilihan unggul

untuk pembuatan material berpori, katalis, dan adsorben. Menurut (Anggraeni dan Yuliana 2015), aktivasi kimia menawarkan keunggulan berupa waktu proses yang singkat dan hasil karbon yang lebih reaktif, meskipun memerlukan pencucian pasca aktivasi untuk menghilangkan residu bahan kimia.

Bahan baku lignoselulosa, seperti limbah pertanian, umumnya diaktivasi secara kimia menggunakan larutan seperti KOH, H₂SO₄, ZnCl₂, H₃PO₄, atau NaOH (Shofa, 2012). Proses diawali dengan pencampuran karbon dengan larutan aktivator, kemudian dikeringkan dan dipanaskan. Pemanasan ini menyebabkan zat kimia menembus struktur karbon, membuka pori-pori, serta melepaskan senyawa kontaminan (Dewi *et al.*, 2009).

Kelemahan dari metode ini adalah potensi limbah kimia dan perlunya proses pencucian yang intensif. Meski demikian, bahan kimia seperti KOH tetap banyak digunakan karena memiliki sifat basa kuat dan higroskopis yang efektif dalam menciptakan struktur pori (Istiqomah *et al.*, 2016). Penelitian oleh (Yanti *et al.*, 2023) menggunakan larutan KOH pada karbon aktif dari kulit kopi menunjukkan bahwa KOH dapat memperbesar porositas dan meningkatkan kapasitas spesifik hingga 18,012 F/g berdasarkan uji *cyclic voltammetry* pada laju pindai 3 mV/s.

Aktivasi fisika merupakan metode non kimia yang melibatkan pemanasan karbon pada suhu tinggi (800-1000 °C) dengan aliran gas seperti uap air, karbon dioksida, nitrogen, atau oksigen. Gas-gas ini bereaksi dengan karbon dalam reaksi endotermik yang menghasilkan karbon monoksida dan hidrogen, sekaligus membuka pori-pori karbon dan meningkatkan luas permukaannya (Marsh, 2006).

Aktivasi fisika lebih ramah lingkungan karena tidak menghasilkan limbah cair kimia dan prosesnya relatif lebih sederhana. Meskipun umumnya menghasilkan luas permukaan yang lebih rendah dibandingkan aktivasi kimia, metode ini tetap efektif terutama dalam skala industri yang menuntut proses berkelanjutan (Anggraeni dan Yuliana, 2015). Beberapa penelitian menyarankan penggunaan kombinasi aktivasi kimia dan fisika untuk memperoleh karbon aktif dengan karakteristik superior. Proses ini biasanya melibatkan aktivasi kimia terlebih dahulu, dilanjutkan dengan pemanasan ulang menggunakan gas pengoksidasi

pada suhu tinggi. Kombinasi ini dapat meningkatkan luas permukaan dan stabilitas struktur karbon. (Yuliusman, 2016) menunjukkan bahwa karbon aktif dari tempurung kelapa yang diaktivasi menggunakan KOH dan dilanjutkan dengan aktivasi fisika pada suhu 750 °C menghasilkan luas permukaan hingga 953 m²/g, jauh lebih besar dibanding aktivasi kimia tunggal yang hanya menghasilkan 349,758 m²/g. Metode ini memiliki perbandingan dari segi aspek, aktivasi kimia maupun aktivasi fisika. Adapun perbandingan dari metode ini berdasarkan dari yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti ditunjukkan pada **Tabel 2.1**.

Tabel 2.1 Perbandingan Aktivasi Kimia dan Fisika

Aspek	Aktivasi Kimia	Aktivasi Fisika
Luas permukaan	Tinggi >2000 m ² /g	Tinggi, <1000 m ² /g
Porositas	Mikropori	Mikropori dan mesopore
Efisiensi Energi	Lebih rendah	Lebih tinggi
Lingkungan	Limbah cair harus dikelola	Ramah lingkungan
Proses	Memerlukan pencucian	Sederhana
Suhu Operasi	500-900 °C	700-1000 °C

Tabel 2.1 merupakan kesimpulan dari pemilihan metode aktivasi yang bergantung pada tujuan akhir, jenis bahan baku, dan efisiensi proses. Kombinasi keduanya juga dapat menjadi strategi optimal untuk menghasilkan karbon aktif berkualitas tinggi.

2.6 Analisa Struktur Karbon Aktif Menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD)

Salah satu teknik karakterisasi material yang sangat penting dalam bidang material maju adalah difraksi sinar-X (*X-ray diffraction*). Teknik ini digunakan untuk mengungkap informasi mengenai struktur kristal suatu material, termasuk parameter seperti jarak antar bidang kristal, ukuran kristalit, dan tingkat keteraturan atom. Dengan memanfaatkan prinsip difraksi, XRD memungkinkan analisis mikrostruktur secara mendalam. Analisis ini menjadi dasar dalam menentukan performa fungsional suatu material. Dalam pengembangan material berskala nano, misalnya XRD berperan penting dalam menentukan ukuran kristalit pada skala nanometer, yang memiliki pengaruh signifikan terhadap sifat

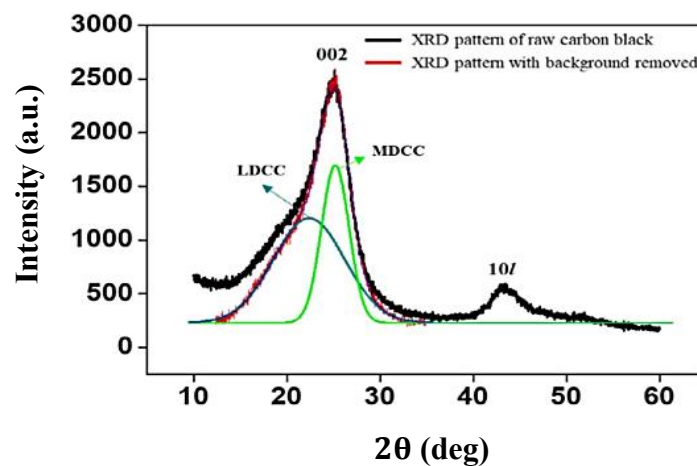
mekanik, termal, dan optik material tersebut. Dalam kasus material superkonduktor, XRD digunakan untuk memastikan terbentuknya struktur kristal yang sesuai, yang merupakan prasyarat utama dalam mencapai sifat superkonduktivitas. Oleh karena itu, penguasaan teknik XRD menjadi hal yang esensial bagi para peneliti dalam memahami hubungan antara struktur, sifat, dan kinerja material. Hal ini menjadikan XRD sebagai alat utama dalam penelitian ilmu material, yang secara signifikan berkontribusi terhadap pengembangan teknologi berbasis material (Muttaqin *et al.*, 2023). Salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan dalam penelitian analisis struktur adalah modifikasi ikatan molekul atau struktur bahan alami untuk menghasilkan material dengan sifat yang lebih unggul. Bahan berbasis karbon seperti batu bara, arang, karbon hitam, serat karbon, dan grafit, memiliki struktur yang bervariasi, mulai dari amorf hingga kristalin, dengan tingkat grafitisasi yang berbeda-beda (Lee *et al.*, 2021).

Analisis struktur bahan karbon dengan metode *X-Ray Diffraction* (XRD) memungkinkan klasifikasi berdasarkan kemudahan grafitisasi. Untuk memahami pengaruh variasi mikrostruktur terhadap intensitas difraksi sinar-X, pola difraksi dari grafit heksagonal (h-grafit) dan karbon turbostratik (t-karbon) disimulasikan menggunakan persamaan umum Debye. Kepadatan numerik jarak antar atom NDID (*Numerical Density of Interatomic Distances*), yang sensitif terhadap ukuran dan mikrostruktur kristalit, digunakan untuk mengkarakterisasi struktur tersebut. Simulasi komputer menunjukkan bahwa sudut difraksi dan lebar garis difraksi pada setengah maksimum FWHM (*Full Width at Half Maximum*) dipengaruhi oleh ukuran kristalit dan faktor distorsi seperti rotasi, translasi, kelengkungan, fluktuasi lokal jarak antar lapisan, serta posisi atom.

Oleh karena itu, sudut difraksi dan FWHM tidak dapat digunakan secara langsung untuk menentukan parameter kisi dan ukuran kristalit karbon turbostratik. Karbon turbostratik sendiri merupakan varian dari grafit heksagonal dengan struktur berlapis grafena yang memiliki tingkat keteraturan susunan berbeda (Li *et al.*, 2007). Dalam konteks analisis XRD sangat diperlukan, terutama untuk karakterisasi elektroda karbon aktif seperti yang digunakan pada sistem polianilin/zeolit. Elektroda tersebut menggabungkan konduktivitas tinggi dari

polianilin dengan kemampuan zeolit untuk menampung dan menetralkan kation Mg melalui adsorpsi, interkalasi, dan pertukaran ion. Hal ini berpotensi meminimalkan dimensi sel dan mengoptimalkan pemanfaatan elektroda Mg. Stabilitas elektroda terhadap penuaan termal juga menjadi perhatian penting dalam penelitian ini (Papathanassiou *et al.*, 2005).

Penelitian oleh (Lee *et al.*, 2021) menunjukkan bahwa parameter kristalinitas karbon aktif dapat dianalisis melalui rasio intensitas difraksi kristal terhadap amorf, yang sebanding dengan rasio massa masing-masing fase, dengan asumsi komposisi kimia keduanya serupa. Fraksi relatif antara bagian kristalin dan amorf dapat dihitung dari intensitas maksimum puncak 002, sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 2.3**.



Gambar 2.3 Pola XRD Karbon Aktif (Lee *et al.*, 2021).

Gambar 2.3 merupakan hasil grafik dengan pemasangan pola XRD karbon hitam menggunakan dua puncak Gaussian *Less Developed Crystalline Carbon* (LDCC) yaitu karbon kristal yang kurang berkembang, kemudian untuk yang lebih berkembang *More Developed Crystalline Carbon* (MDCC). Adapun untuk menghitung fraksi kristal dan amorf dihitung menggunakan **Persamaan 2.1**.

$$\text{Crystalline fraction} = \frac{\text{Crystal Area}}{\text{Crystal Area} + \text{Amorf Area}} \times 100\% \quad (2.1)$$

Persamaan 2.1 merupakan persamaan yang digunakan untuk menganalisis struktur, menentukan beberapa parameter kristalinitas, yang mencakup derajat

kristalin, jarak antar bidang aromatik (d_{002}), tinggi tumpukan lapisan aromatik (L_c), lebar bidang aromatik (L_a), serta jumlah lapisan aromatik (N). Jarak antar bidang kristal (d -spacing) diperoleh dari posisi sudut puncak difraksi. Sementara itu, ukuran kristalit L_c dan L_a dapat dihitung berdasarkan nilai sudut difraksi (2θ) serta lebar puncak pada setengah intensitas maksimumnya (FWHM). Nilai L_c dan L_a , yang masing-masing merepresentasikan dimensi kristalit sepanjang arah c dan a , lalu dihitung dari pantulan (002) dan (100) (Scherrer, 1918; Cullity and Stock, 2001). Kemudian untuk nilai d_{002} diperoleh melalui penerapan hukum Bragg. Sehingga ukuran kristalit ini mencerminkan jumlah lapisan aromatik dalam tumpukan struktur karbon. Berdasarkan penjelasan tersebut, maka ditunjukkan **Persamaan 2.2** hingga **Persamaan 2.4**.

$$L_a = \frac{1,84 \lambda}{B_a \cos \varphi_a} \quad (2.2)$$

$$L_c = \frac{0,89 \lambda}{B_c \cos \varphi_c} \quad (2.3)$$

$$d_{002} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (2.4)$$

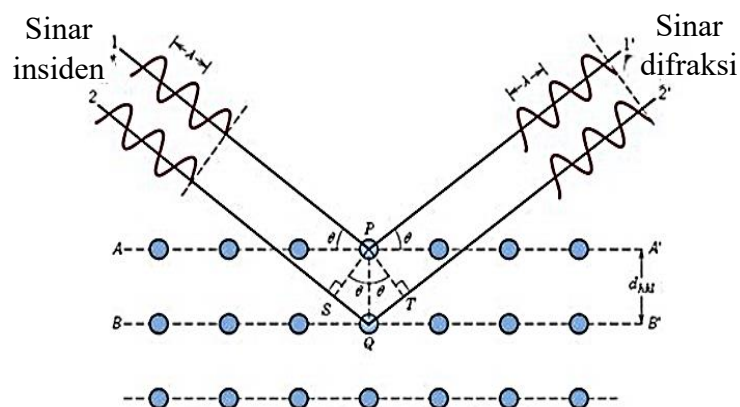
Berdasarkan **Persamaan 2.2** hingga **Persamaan 2.4** dimana λ adalah panjang gelombang radiasi, B_a dan B_c adalah FWHM (100) dan (002) dalam radian, kemudian untuk φ_a dan φ_c adalah sudut hamburan yang sesuai. Adapun untuk menghitung jumlah lapisan tipis karbon aktif menggunakan **Persamaan 2.5**.

$$N = \frac{L_{002} + D_{002}}{D_{002}} \quad (2.5)$$

Persamaan 2.1 hingga **Persamaan 2.5** merupakan persamaan yang digunakan untuk menganalisa parameter dari kristalinitas karbon aktif yang meliputi L_a dan L_c yang dihitung dengan persamaan Scherrer, d_{002} dari Hukum Bragg, serta jumlah lapisan aromatik (N) dari rasio L_c/d_{002} (Scherrer, 1918; Bragg and Bragg, 1913; Franklin, 1951; Warren, 1941).

2.7 Prinsip Kerja X-Ray Diffraction (XRD)

Difraksi sinar-X pertama kali ditemukan pada tahun 1912, dan sejak saat itu telah berkembang menjadi salah satu metode karakterisasi yang paling luas digunakan dalam ilmu material (Leng, 2009). Prinsip dasar dari teknik ini didasarkan pada fenomena hamburan dan interferensi gelombang. Ketika sinar-X mengenai suatu kristal, sebagian energinya diserap, sebagian ditransmisikan, dan sebagian lagi mengalami hamburan. Gelombang yang dihamburkan kemudian mengalami interferensi. Jika gelombang-gelombang tersebut berada dalam fase yang sama, maka akan terjadi interferensi konstruktif yang menghasilkan intensitas maksimum. Sebaliknya, jika gelombang berada dalam fase yang berlawanan, maka akan terjadi interferensi destruktif yang saling meniadakan. Pola interferensi inilah yang dianalisis dalam XRD untuk memperoleh informasi struktur kristal. Hubungan antara sudut difraksi, jarak antar bidang kristal, dan panjang gelombang sinar-X dijelaskan melalui persamaan Bragg, yang menjadi dasar utama dalam interpretasi data XRD (Cullity, 1978).



Gambar 2.4 Skematik hukum Bragg (Cullity, 1978).

Gambar 2.4 merupakan skematik hukum Bragg dan didapat persamaan hukum Bragg. Adapun persamaan hukum Bragg ditunjukkan pada **Persamaan 2.6**.

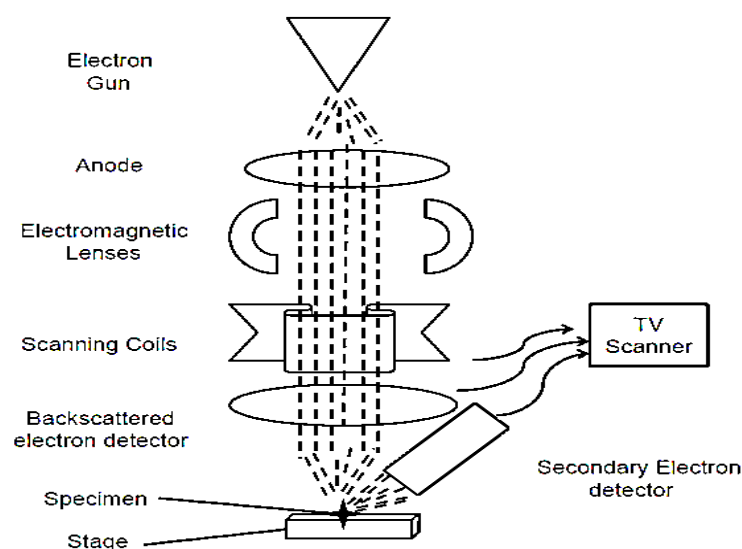
$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2.6)$$

Persamaan 2.6 merupakan persamaan Hukum Bragg yang didapat pada **Gambar 2.4** dari difraksi sinar-X. **Gambar 2.4** dapat dideskripsikan bahwa sinar datang yang datang pada titik bidang pertama dan dihamburkan oleh atom P. Sinar

datang yang kedua menumbuk bidang berikutnya dan dihamburkan oleh atom Q. Sinar ini menempuh jarak $SQ+QT$ bila dua sinar tersebut paralel dan dengan fasa yang sangat menguatkan. Jarak tempuh itu merupakan kelipatan (n) panjang gelombang. Sehingga diperoleh **Persamaan 2.6** (Callister and Rethwisch, 2010).

2.8 Prinsip Kerja *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

SEM merupakan salah satu jenis mikroskop elektron yang digunakan untuk menghasilkan citra beresolusi tinggi dari permukaan suatu sampel. Prinsip kerja SEM melibatkan pemindaian permukaan sampel dengan berkas elektron, di mana interaksi antara elektron dan atom-atom pada permukaan menghasilkan sinyal yang ditangkap oleh detektor membentuk gambar (Setyaningsih and Septiano, 2019). *Scanning Electron Microscopy* (SEM) memiliki elektron dengan panjang gelombang yang lebih kecil dibandingkan cahaya, sehingga mampu memberikan resolusi yang jauh lebih tinggi. Jika mikroskop cahaya hanya dapat mencapai resolusi sekitar 200 nanometer, maka mikroskop elektron mampu mencapai resolusi hingga 0,1–0,2 nanometer. Ketika berkas elektron berinteraksi dengan atom-atom dalam spesimen, dihasilkan sinyal yang memuat informasi mengenai topografi permukaan spesimen, komposisi kimianya dan sifat-sifat lain seperti kemampuan konduktivitas listrik (Wijayanto dan Bayuseno 2014). Adapun skema kerja (SEM) ditunjukkan pada **Gambar 2.5**.



Gambar 2.5 Skema kerja SEM (Tare *et al.*, 2009).

Gambar 2.5 merupakan skema kerja dari alat *Scanning Electron Microscopy* (SEM), yaitu sebuah instrumen karakterisasi material yang menggunakan berkas elektron untuk menghasilkan gambar resolusi tinggi dari permukaan suatu spesimen. Proses dimulai dari electron gun yang memancarkan berkas elektron. Berkas ini kemudian dipercepat melalui anoda dan difokuskan oleh lensa magnetik agar membentuk titik fokus yang kecil. Setelah itu, berkas elektron diarahkan oleh kumparan pemindai (*scanning coils*) sehingga dapat menyapu permukaan spesimen secara menyeluruh dalam pola raster. Interaksi antara berkas elektron dan spesimen menghasilkan berbagai sinyal, seperti elektron sekunder dan elektron terserak balik (*backscattered electrons*). Elektron sekunder ditangkap oleh detektor elektron sekunder untuk menghasilkan gambar topografi permukaan dengan resolusi tinggi. Sementara itu, detektor *backscattered electron* digunakan untuk menghasilkan gambar dengan kontras berdasarkan perbedaan komposisi unsur, karena elektron terserak balik sensitif terhadap nomor atom. Spesimen ditempatkan pada stage yang dapat diatur posisi dan orientasinya. Akhirnya, sinyal dari detektor diteruskan ke TV scanner atau layar monitor, yang kemudian menampilkan citra permukaan spesimen dalam bentuk gambar digital. SEM sangat penting dalam bidang sains material, mikroelektronika, metalurgi, dan biologi karena mampu mengungkap morfologi dan struktur permukaan dengan detail yang sangat tinggi (Tare *et al.*, 2009).

2.9 Brunauer Emmett Teller (BET)

Metode *Brunauer Emmett Teller* (BET) merupakan teknik yang digunakan secara luas untuk menentukan luas permukaan spesifik material berpori secara akurat dan terukur. Metode ini dapat diaplikasikan pada berbagai bentuk material, baik padatan maupun serbuk (Irwansyah *et al.*, 2024). Nama BET sendiri berasal dari tiga ilmuwan pengembangnya, yaitu Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett, dan Edward Teller. Metode ini pertama kali diperkenalkan pada tahun 1938 melalui publikasi mereka yang berjudul *Adsorption of Gases in Multimolecular Layers* (Brunauer *et al.*, 1938). Penentuan luas permukaan spesifik sangat penting karena parameter ini berperan dalam mempengaruhi perilaku material pada berbagai aplikasi, seperti katalisis, adsorpsi gas, reaksi kimia, serta dalam bidang energi.

Oleh karena itu, metode BET banyak digunakan dalam penelitian ilmiah, proses industri, maupun kontrol kualitas (Yang et al., 2023).

Prinsip dasar metode BET berfokus pada fenomena adsorpsi gas pada permukaan padatan. Ketika molekul gas bersentuhan dengan permukaan, gaya tarik-menarik menyebabkan molekul-molekul tersebut menempel, membentuk lapisan pertama (monolayer). Seiring dengan meningkatnya tekanan gas, terbentuk lapisan tambahan sehingga terjadi adsorpsi multilayer. Fenomena ini kemudian divisualisasikan dalam bentuk isoterm adsorpsi, di mana volume gas teradsorpsi diplot terhadap tekanan relatif (Nasrollahzadeh *et al.*, 2019).

Metode BET mengasumsikan bahwa molekul gas akan membentuk lapisan monolayer yang merata pada permukaan, tanpa adanya interaksi lateral antar molekul gas yang telah teradsorpsi. Dalam praktiknya, pengukuran dilakukan dengan mengalirkan gas adsorbat (umumnya nitrogen pada suhu 77 K) ke permukaan material, kemudian menaikkan tekanan secara bertahap. Volume gas yang teradsorpsi pada setiap tekanan relatif dicatat untuk menghasilkan isoterm BET. Bagian linier dari isoterm pada rentang tekanan relatif 0,05-0,35 menjadi fokus utama dalam perhitungan luas permukaan (Thomas, 2023). Persamaan BET diturunkan dari pengembangan teori Langmuir dan dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{1}{V \left(\frac{P_0}{P} - 1 \right)} = \frac{C-1}{V_m C} \cdot \frac{P}{P_0} + \frac{1}{V_m C} \quad (2.7)$$

dimana V adalah volume gas yang teradsorpsi pada tekanan relatif P/P_0 , V_m adalah volume gas yang membentuk monolayer, dan C adalah konstanta BET yang terkait dengan energi adsorpsi lapisan pertama. Dengan memplot $\frac{1}{V(P/P_0-1)}$ terhadap P/P_0 , diperoleh garis lurus pada rentang tekanan relatif tertentu. Dari kemiringan dan intersep garis lurus tersebut dapat dihitung nilai V_m serta konstanta C . Selanjutnya, luas permukaan spesifik (S_{BET}) dihitung dengan persamaan:

$$(S_{BET}) = \frac{V_m N_A \sigma}{V} \quad (2.8)$$

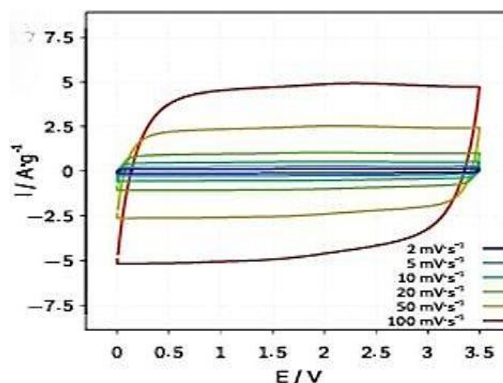
Di mana N_A adalah bilangan Avogadro, σ adalah luas penampang molekul nitrogen ($0,162 \text{ nm}^2$), dan V adalah volume molar gas pada kondisi standar (Brunauer *et al.*, 1938; Sing, 2001). Metode BET telah banyak diaplikasikan dalam karakterisasi material berpori, termasuk karbon aktif, zeolit, serta material mesopori seperti MCM-41 dan SBA-15. Pengukuran luas permukaan spesifik sangat penting karena semakin besar luas permukaan maka semakin tinggi kemampuan material untuk berinteraksi dengan molekul lain, sehingga meningkatkan performa dalam berbagai aplikasi, misalnya sebagai katalis, adsorben, maupun elektroda superkapasitor (Thommes *et al.*, 2015). Dengan demikian, metode *Brunauer Emmett Teller* menjadi salah satu teknik paling penting dalam memahami sifat permukaan dan porositas material berpori.

2.10 Cyclic Voltammetry (CV)

Siklus voltametri (*cyclic voltammetry*) merupakan salah satu teknik dalam elektroanalisis yang digunakan untuk memperoleh informasi mengenai sifat elektroaktif suatu analit melalui pengukuran arus sebagai fungsi dari potensial yang diterapkan. Dalam pengukuran CV, tegangan diberikan secara linier bolak balik terhadap elektroda kerja, sehingga memicu polarisasi dan menghasilkan kurva histeresis arus terhadap potensial. Karakteristik dari elektroda kerja sangat dipengaruhi oleh luas permukaannya, yang secara langsung berpengaruh terhadap nilai arus yang dihasilkan (Herlina *et al.*, 2018).

Metode voltametri banyak dimanfaatkan untuk menganalisis senyawa-senyawa elektroaktif, mempelajari proses adsorpsi maupun difusi yang terjadi di permukaan elektroda, serta memahami mekanisme transfer elektron pada permukaan material elektroda. Kurva CV menggambarkan hubungan antara densitas arus (A) dan tegangan (V), di mana area yang terbentuk di bawah kurva mencerminkan kapasitansi spesifik dari material elektroda. Semakin luas area kurva, maka semakin besar nilai kapasitansi spesifik elektrodanya dalam menyimpan muatan (Taer *et al.*, 2017). Dalam penelitian terkini, hasil kurva CV yang ideal menunjukkan bentuk mendekati persegi, yang merupakan indikasi dari mekanisme penyimpanan muatan melalui pembentukan lapisan ganda listrik

(*electric double-layer capacitance*). Penelitian yang dilakukan (Biegun *et al.*, 2020) telah menghasilkan kurva CV yang ideal dan membentuk persegi. Adapun hasil tersebut ditunjukkan pada **Gambar 2.6**.



Gambar 2.6 Kurva CV (Biegun *et al.*, 2020).

Gambar 2.6 menunjukkan kurva CV hasil penelitian (Biegun *et al.*, 2020), yang memperlihatkan bentuk persegi simetris sebagai indikasi sifat reversibel dan efisien dalam proses pengisian dan pengosongan muatan. Tidak ditemukannya puncak redoks menegaskan bahwa mekanisme penyimpanan muatan sepenuhnya bersifat elektrostatis (EDLC). Penurunan luas kurva pada kecepatan pindai tinggi disebabkan oleh hambatan difusi ion ke dalam pori mikro, meskipun perubahan kapasitas spesifik tetap kecil, menunjukkan struktur pori yang mendukung mobilitas ion. Selain itu, peningkatan suhu dari 20 °C hingga 120 °C meningkatkan arus dan kapasitansi spesifik akibat penurunan viskositas elektrolit cair ionik PYR13-TFSI yang memperbaiki konduktivitas ionik. Secara keseluruhan, karbon aktif dari limbah kopi menunjukkan kinerja EDLC yang stabil dan efisien pada berbagai kondisi uji. Pengujian *Cyclic Voltammetry* pada penelitian menggunakan sistem alat pengujian khusus seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.7**.



Gambar 2.7 Alat *Cyclic Voltammetry* (CV).

Gambar 2.7 menunjukkan alat *Cyclic Voltammetry* (CV) yang digunakan untuk menguji performa elektrokimia material karbon aktif. Alat ini bekerja dengan cara memberikan siklus potensial listrik pada elektroda dalam sel elektrokimia, lalu merekam respon arus yang dihasilkan. Melalui kurva CV yang diperoleh, dapat dianalisis sifat kapasitif material dan dihitung nilai kapasitansi spesifik, yang menunjukkan kemampuan penyimpanan muatan dari karbon aktif.

2.11 Metode Taguchi

Metode Taguchi merupakan salah satu pendekatan statistik dalam perancangan eksperimen (*Design of Experiment*, DOE) yang bertujuan untuk meningkatkan kualitas produk dan meminimalkan variabilitas proses melalui rancangan kuat. Metode ini dikembangkan oleh Genichi Taguchi dan banyak digunakan dalam optimasi parameter proses pada berbagai bidang rekayasa, termasuk pengolahan material dan kimia. Prinsip utama metode ini adalah merancang sistem eksperimen yang mampu mengidentifikasi kombinasi faktor proses yang paling optimal dengan jumlah eksperimen yang minimal (Taguchi, 1987).

Salah satu keunggulan utama dari metode Taguchi adalah penggunaan *Orthogonal Array* (OA), yaitu tabel standar yang dirancang untuk mengatur kombinasi faktor dan level dalam eksperimen secara sistematis. OA memungkinkan peneliti untuk mengamati pengaruh masing-masing faktor secara independen karena sifat ortogonalitasnya. Dengan kata lain, OA memungkinkan analisis pengaruh satu faktor tanpa terganggu oleh faktor lainnya, meskipun hanya menggunakan sebagian kecil dari seluruh kemungkinan kombinasi eksperimen. Misalnya, OA tipe L8 dapat digunakan untuk mengevaluasi hingga tujuh faktor dalam dua level dengan hanya delapan eksperimen, dibandingkan 128 eksperimen bila menggunakan metode full factorial (Roy, 2010).

Setelah eksperimen dilakukan berdasarkan OA, metode Taguchi menganalisis hasilnya menggunakan *Signal to Noise* (S/N) Ratio. Analisis ini bertujuan mengukur kualitas dan konsistensi respon terhadap gangguan (*noise*). Nilai S/N Ratio yang tinggi menunjukkan hasil yang lebih stabil dan lebih tahan terhadap

variasi eksternal. Terdapat tiga kategori umum dalam perhitungan *S/N Ratio*, yaitu *larger the better*, *smaller the better*, dan *nominal the best*. Pemilihan kategori tergantung pada karakteristik target. Untuk aplikasi seperti pembuatan elektroda karbon aktif, di mana parameter performa seperti kapasitansi spesifik ingin dimaksimalkan, maka digunakan pendekatan *larger the better* (Ross, 1996).

Metode Taguchi telah diterapkan secara luas dalam penelitian pengembangan material karbon, termasuk dalam studi aktivasi kimia dan fisika karbon aktif dari biomassa. Misalnya, (Thamizhselvi and Annamalai, 2011) menggunakan metode ini untuk mengoptimalkan parameter aktivasi karbon dari limbah pertanian dan menemukan bahwa pemilihan kombinasi konsentrasi, suhu, dan waktu aktivasi yang optimal secara signifikan meningkatkan performa elektroda karbon aktif.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat penelitian

Penelitian ini dilakukan pada tanggal 01 November 2024-31 Mei 2025 di Laboratorium PP Non Logam Tanjung Bintang Lampung Selatan, dengan judul penelitian tentang Pengaruh Aktivasi Kimia dan Fisika Terhadap Luas Permukaan Spesifik Karbon Aktif Limbah Kulit Kopi Sebagai Material Elektroda Superkapasitor.

3.2 Alat Penelitian

Alat yang digunakan pada penelitian ditunjukkan pada **Tabel 3.1**.

Tabel 3.1 Alat-alat penelitian

No	Nama Alat	Fungsi	Keterangan
1.	Reaktor <i>pyrolysis</i>	Menguraikan senyawa organik ampas kopi	- Suhu tingkat tinggi 100-1000°C
2.	<i>Furnace</i> Nitrogen	Memanaskan sampel	- <i>muffle</i> , tanpa reduktor
3.	Gelas ukur	Mengukur kadar aktivator yang di gunakan	- IWAKI 100 ml
4.	Gelas Beaker	Wadah perendam sampel karbon aktif	- IWAKI CTE33 Made in Thailand 500 ml
5.	Timbangan Digital	Menimbang bahan sampel	- Excellent
6.	Oven	Sebagai pemanas untuk mengurangi kadar air	- Labtech tipe: 250N
7.	Kertas saring	Menyaring sampel	- Market place 58 x 58
8.	Ayakan 40 Mesh	Sebagai pengayak bahan	- Shinko No.70
9.	<i>Ball mill</i>	penghalusan kulit kopi	- PQ-N2 Planetary

Tabel 3.1 merupakan alat yang digunakan dalam proses pengarangan sampai dengan pengaktivatoran karbon, agar proses yang dilakukan dapat berjalan secara baik dan menghasilkan hasil penelitian yang diharapkan.

3.2.1 Fungsi dan Gambar Alat

Alat pertama yang digunakan pada penelitian ini adalah Reaktor *pyrolysis*. Reaktor *pyrolysis* digunakan sebagai pembakaran kulit kopi yang secara terkarbonisasi. Adapun gambar alat ditunjukkan pada **Gambar 3.1**.



Gambar 3.1 Reaktor *pyrolysis*.

Gambar 3.1 merupakan alat reaktor *pyrolysis* yang digunakan pada suhu 700 °C dan 900 °C, adapun fungsi penggunaan alat pada proses penelitian adalah untuk mengurangi kadar air dari kulit kopi dan dapat mengurai senyawa-senyawa yang ada pada kulit kopi. Alat ini juga dapat di atur dalam proses penggunaannya seperti mengatur suhu, tekanan, dan aliran gas dalam reaktor. Sehingga alat ini banyak peneliti menggunakannya dalam proses pembuatan karbon aktif. Kemudian alat yang digunakan pada penelitian ini yaitu *furnace* nitrogen yang ditunjukkan pada **Gambar 3.2**.



Gambar 3.2 *furnace* nitrogen.

Berdasarkan **Gambar 3.2** *furnace* nitrogen digunakan sebagai proses pemanasan sampel dengan menggunakan gas nitrogen. Fungsi alat ini adalah untuk menganalisis zat pada sampel, selain itu proses yang dilakukan pada sampel menggunakan alat ini agar hasil akhir sampel tidak mengalami oksidasi dan

penggunaan suhu yang tinggi tidak mengakibatkan sampel menjadi abu. Alat yang digunakan selain alat-alat di atas adalah oven yang ditunjukkan pada **Gambar 3.3**.



Gambar 3.3 Oven.

Berdasarkan **Gambar 3.3** Alat ini berfungsi untuk memanaskan kulit kopi sampai sampel yang telah jadi pada penelitian yang dilakukan. Oven juga digunakan sebagai proses pengurangan kadar air pada kulit kopi yang dilakukan sebelum proses pengarbonan menggunakan alat reaktor *pyrolysis*. Sehingga kulit kopi yang dikeringkan menggunakan oven dapat mempengaruhi hasil dari pengarbonan. Alat yang digunakan lainnya yaitu *ball mill* ditunjukkan pada **Gambar 3.4**.



Gambar 3.4 *Ball mill*.

Berdasarkan **Gambar 3.4** *Ball mill* merupakan alat penggilingan yang digunakan untuk menghancurkan dan mencampur material dengan menggunakan media bola-bola baja atau keramik yang berputar di dalam silinder. Prinsip kerjanya didasarkan pada tumbukan dan gesekan antara bola dan material yang digiling. Ketika silinder berputar, bola-bola tersebut jatuh dan menghantam material, menyebabkan pecahan dan penghalusan. Alat ini juga untuk menghomogenkan

sampel pada kulit kopi yang akan di proses sebelum pengkarbonan. Adapun alat pendukung lainnya ditunjukkan pada **Gambar 3.5**.



Gambar 3.5 Alat-alat penelitian.

Berdasarkan **Gambar 3.5** merupakan alat pendukung pada penelitian ini. Ayakan 40 mesh berfungsi sebagai pengayak sampel. Kemudian gelas beaker, gelas ukur dan kertas saring berfungsi sebagai wadah dan proses pengaktivasi kimia pada penelitian. Kemudian timbangan yang berfungsi sebagai penimbang bahan mentah sampai sampel yang akan siap diuji.

3.3 Bahan-bahan Penelitian

Adapun bahan-bahan penelitian yang digunakan ditunjukkan pada **Tabel 3.2**.

Tabel 3. 2 Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian

No	Nama Bahan	Fungsi	Keterangan
1.	Kulit kopi	Bahan pembuatan karbon aktif	- Hasil sisa produksi kopi mandiri
2.	Aquades	Sebagai pencuci sampel	- Penyulingan 20 liter
3.	NaOH	Aktivator sampel	- Kemurnian 97%
4.	KOH	Aktivator sampel	- Kemurnian 95%
5.	ZnCl ₂	Aktivator sampel	- Kemurnian 98%
6.	H ₃ PO ₄	Aktivator sampel	- Kemurnian 85%
7.	PVA 72000	Sebagai Binder (Pengikat)	- 820388-44116498 Ewg-kennz
8.	<i>Carbon black</i>	Sebagai Konduktor Listrik	- IT nano AB 7g 98 %
9.	NMP merck	Pelarut Binder	- <i>Merck Chemicals</i>

Tabel 3.2 merupakan bahan-bahan yang digunakan dalam proses aktivasi karbon serta dalam tahap pengujian performa elektrokimia melalui metode *Cyclic Voltammetry* (CV). Bahan-bahan tersebut meliputi bahan baku karbon, aktivator kimia, serta material pendukung untuk pembuatan elektroda.

3.3.1 Fungsi dan Gambar Bahan Penelitian

Bahan pertama yang disiapkan pada penelitian adalah limbah kulit kopi, adapun limbah kulit kopi ditunjukkan pada **Gambar 3.6**.



Gambar 3.6 Limbah Kulit Kopi.

Gambar 3.6 merupakan Limbah kulit sebagai bahan utama dalam penelitian, bahan kulit kopi di dapatkan dari produksi akhir pada proses pemisahan kulit dan biji kopi. Kemudian penelitian ini menggunakan bahan pendukung lainnya yaitu Aquades, NaOH, KOH, $ZnCl_2$ dan H_3PO_4 . Adapun bahan-bahan tersebut ditunjukkan pada **Gambar 3.7**.



Gambar 3.7 Bahan aktivator karbon aktif.

Gambar 3.7 merupakan bahan penelitian seperti NaOH, KOH, $ZnCl_2$ dan H_3PO_4 akan digunakan sebagai perendam atau aktivator kimia pada karbon aktif dan untuk aquades berfungsi sebagai pencuci sampel karbon aktif sampai dengan tingkat Ph netral.

3.4 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dilakukan dengan 3 tahapan yang dipaparkan sebagai berikut.

3.4.1 Pembuatan karbon aktif limbah kulit kopi

Prosedur penelitian pada pembuatan karbon aktif ini adalah:

1. Menyiapkan bahan kulit kopi yang telah dicuci dan dikeringkan, sebelum digunakan dalam proses karbonisasi reaktor *pyrolysis*.
2. Mengoven kulit kopi pada suhu 120 °C dengan waktu selama 3 jam, agar kadar air dalam bahan dapat berkurang.
3. Menimbang bahan kulit kopi sebanyak 100 gram setelah pengovenan dan sebelum memasukkan bahan ke dalam reaktor *pyrolysis*.
4. Melakukan pengarbonan bahan kulit kopi menggunakan reaktor *pyrolysis* pada suhu 700 °C dan 900 °C dengan waktu selama 1 jam dan 3 jam.
5. Menghaluskan bahan yang telah di *pyrolysis* dengan menggunakan *ball mill*.
6. Mengayak bahan kulit kopi dengan menggunakan ayakan 40 mesh.

3.4.2 Proses Aktivasi Karbon Aktif Secara Kimia Dan Fisika

Proses aktivasi karbon aktif secara kimia dan fisika dilakukan dengan cara berikut.

1. Menyiapkan bahan yang akan digunakan.
2. Merendam sampel menggunakan larutan NaOH, KOH, ZnCl₂, H₃PO₄ dengan kadar sebesar 2 % dan 5 % serta berat sampel sebanyak 10 gram pada larutan sebanyak 30 mL. selama 48 jam.
3. Mencuci sampel yang telah direndam dengan menggunakan aquades sampai sampel telah mencukupi pH netral.
4. Memanaskan sampel dengan menggunakan *muffle* dan *tube furnace* pada suhu 900 °C selama 120 menit.
5. Melakukan setiap langkah penelitian dengan meminimalisir waktu dan suhu.

Adapun desain prosedur dari pembuatan karbon aktif sampai dengan proses aktivasi menggunakan bahan kimia, ditunjukkan pada **Gambar 3.8**.



Gambar 3.8 Desain prosedur pembuatan karbon aktif.

Gambar 3.8 menunjukkan alur pembuatan karbon aktif dari kulit kopi melalui beberapa tahapan. Proses dimulai dengan pengeringan kulit kopi dalam oven pada suhu 120 °C selama 3 jam, dilanjutkan dengan pirolisis tanpa oksigen untuk menghasilkan arang. Arang kemudian digiling menggunakan *ball mill*, diayak, dan direndam dalam larutan aktivator kimia untuk meningkatkan luas permukaan dan porositas. Setelah itu, sampel dikeringkan dan diaktivasi termal dalam *furnace*. Produk akhir berupa karbon aktif siap digunakan untuk uji karakterisasi fisik maupun elektrokimia.

3.5 Penamaan Kode Sampel Berdasarkan Metode Taguchi

Penamaan kode sampel dalam penelitian ini mengacu pada metode Taguchi yang efisien menggunakan orthogonal array untuk mengevaluasi pengaruh beberapa faktor secara simultan dan jumlah eksperimen yang minimal. Adapun linear graph 8 orthogonal array karbon aktif kulit kopi **Tabel 3.3**.

Tabel 3.3 Linear graph 8 orthogonal array karbon aktif limbah kulit kopi

Parameter	Level
Jenis Aktivator	KOH, NaOH, ZnCl ₂ , H ₃ PO ₄
Konsentrasi	2 %, 5 %
Suhu Aktivasi	700 °C, 900 °C
Waktu Aktivasi	1 jam, 3 jam

Tabel 3.3 merupakan Linear Graph dari desain Orthogonal Array L8 ($4^1 \times 2^3$), yang menghasilkan delapan kombinasi perlakuan unik. Desain ini melibatkan satu faktor dengan empat level, yaitu jenis aktivator (KOH, NaOH, ZnCl_2 , dan H_3PO_4), serta tiga faktor dengan dua level, yaitu konsentrasi aktivator (2% dan 5%), suhu aktivasi (700 °C dan 900 °C), dan waktu aktivasi (1 jam dan 3 jam). Masing-masing kombinasi perlakuan diberi kode sampel K1 hingga K8 (K = Kopi) untuk memudahkan pelacakan selama proses preparasi dan pengujian karakterisasi, seperti XRD, SEM, BET, dan *Cyclic Voltammetry* (CV). Adapun penamaan kode sampel ditunjukkan pada **Tabel 3.4**.

Tabel 3.4 Kode sampel karbon aktif limbah kulit kopi hasil metode Taguchi

Kode Sampel	Parameter			
	Aktivator	Konsentrasi (%)	Suhu (°C)	Time (Jam)
K1	KOH	2	700	3
K2	KOH	5	900	1
K3	NaOH	5	900	3
K4	NaOH	2	700	1
K5	ZnCl_2	2	900	1
K6	ZnCl_2	5	700	3
K7	H_3PO_4	2	900	3
K8	H_3PO_4	5	700	1

Tabel 3.4 merupakan penamaan kode sampel berdasarkan hasil desain metode Taguchi. Penggunaan kode ini bertujuan untuk meminimalkan kesalahan identifikasi selama seluruh tahapan penelitian, mulai dari preparasi, proses aktivasi, hingga pengujian karakteristik. Setiap kombinasi perlakuan yang ada diaplikasikan dalam empat kali pengulangan, sehingga hasil dari metode Taguchi ini dapat mewakili 32 sampel yang akan diuji lebih lanjut untuk analisis struktur, morfologi, porositas, serta performa elektrokimia.

3.6 Karakterisasi Sampel

Karakterisasi karbon aktif dilakukan dalam dua tahap, yaitu karakterisasi fisik untuk mengetahui luas permukaan, struktur, dan morfologi, serta untuk mengukur kapasitansi spesifik. Adapun alat karakterisasi yang digunakan ditunjukkan pada **Tabel 3.5**.

Tabel 3.5 Alat karakterisasi

No	Nama Alat	Fungsi	Keterangan
1.	BET	Mengetahui luas permukaan	- TriStar II Plus Version 3.03
2.	XRD	Mengidentifikasi sifat amorf	- PANalytiC: E'xpertPro
3.	SEM	Mengamati permukaan sampel	- FESEM thermo scientific Quattro
4.	CV	Mengetahui nilai kapasitansi	- Cortestcs 350

Tabel 3.5 merupakan alat serta tahapan karakterisasi dan pengujian sampel karbon aktif. Karakterisasi dilakukan melalui beberapa metode, yaitu BET untuk menentukan luas permukaan spesifik dan distribusi pori, serta XRD untuk mengidentifikasi struktur kristalin dan sifat amorf pada sampel. Selanjutnya, SEM digunakan untuk mengamati morfologi permukaan karbon aktif, sedangkan *Cyclic Voltammetry* (CV) digunakan untuk mengukur nilai kapasitansi spesifik elektroda.

3.6.1 Karakterisasi *Brunauer-Emmett-Teller* (BET)

Adapun tahapan pengujian menggunakan *Brunauer-Emmett-Teller* (BET) sebagai berikut.

1. Menyiapkan sampel karbon aktif kulit kopi yang telah diayak lolos 40 mesh sebanyak 3 gram.
2. Memanaskan sampel (*Degassing*) dengan suhu 300 °C di bawah vakum atau gas inert yang berfungsi untuk menghilangkan gas atau uap yang teradsorpsi. Serta bertujuan untuk memastikan permukaan bebas dari kontaminan sebelum diukur.
3. Mengukur sampel dengan pengukuran adsorpsi yaitu menggunakan gas nitrogen dilewatkan ke permukaan sampel pada suhu cair nitrogen 77 °K.
4. Mengukur volume gas yang teradsorpsi dengan tekanan relative selama 3 jam.

3.6.2 Karakterisasi karbon aktif Menggunakan XRD

Adapun tahapan yang dilakukan sebagai berikut.

1. Menyiapkan sampel karbon aktif kulit kopi yang telah diayak lolos 40 mesh sebanyak 3 gram.

2. Meletakkan sampel pada tempat sampel (sample holder) kemudian diratakan menggunakan kaca.
3. Memasukkan sampel ke dalam difraktometer, kemudian dilakukan proses penembakan dengan sinar-X
4. Memulai pengujian difraksi dengan menekan tombol “*start*” pada menu di komputer. Proses sinar-X akan meradiasi sampel yang terpancar dari target Cu pada Panjang gelombang 1,5406 Å
5. Kemudian pengukuran yang telah selesai, maka dapat diproses hasil data difraksi dalam bentuk *soft* data yang disimpan dalam bentuk xrdml.
6. Setelah data diperoleh, maka data diolah dengan *software* origin untuk amorf dari karbon aktif kulit kopi.

3.6.3 Karakterisasi Menggunakan SEM-EDS

Adapun tahapan pengujian menggunakan SEM-EDS sebagai berikut.

1. Menyiapkan sampel karbon aktif kulit kopi yang telah diayak lolos 40 mesh sebanyak 3 gram.
2. Meletakkan sampel pada tempat sampel yang telah diletakkan carbon tape, kemudian sisa sampel yang tidak melekat di bersihkan pada carbon tape.
3. Memasukkan sampel ke dalam pemegang sampel SEM.
4. Mengatur kamera, agar dapat memperlihatkan permukaan sampel.
5. Mengatur kecerahan dan perbesaran serta fokus pada sampel.
6. Mengatur spot size pada monitor SEM.
7. Hasil analisis ditampilkan pada monitor EDX, berupa citra permukaan sampel dari SEM dan grafik yang menunjukkan persentase unsur pada sampel.

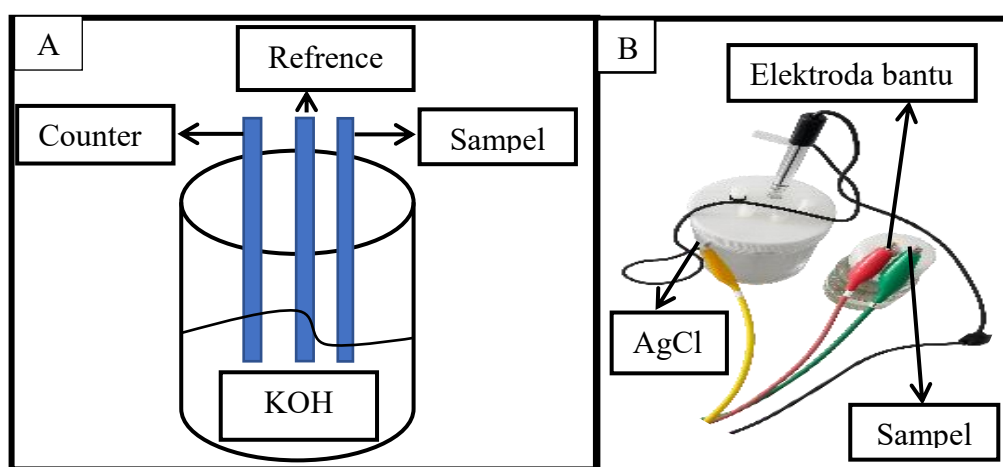
3.6.4 Uji Performa Elektrokimia

Adapun tahapan uji Karakterisasi Performa Elektrokimia sebagai berikut.

1. Menyiapkan sampel karbon aktif yang akan diuji serta dalam keadaan kering agar tidak mengandung kelembaban.
2. Membuat elektroda kerja dengan menghomogenkan antara karbon aktif yang telah kering sebanyak 0,85 gram, *Polyvinyl Alcohol* (PVA) sebanyak 0,10

gram, carbon black sebanyak 0,05 gram dan dilarutkan pada larutan *N-Methyl-2-pyrrolidone* (NMP) dengan menggunakan *magnetic stirrer* sampai terlarut seperti lumpur.

3. Mencampurkan larutan ke elektroda dan mengoven elektroda selama 12 jam dengan suhu sebesar 80 °C.
4. Menyiapkan larutan KOH sebagai perantara uji dan sebagai larutan elektrolit.
5. Merakit sel elektrokimia dengan menyiapkan dan memasang elektroda kerja tempat material diuji, elektroda pembanding yaitu AgCl, elektroda bantu yaitu platina. Adapun skema uji performa CV ditunjukkan pada **Gambar 3.9**.



Gambar 3.9 (A) Skema pengujian, (B) Proses pengujian *Cyclic Voltammetry*.

6. Menghidupkan alat dan komputer saat akan pengujian, Menghubungkan elektroda kerja, elektroda referensi, dan elektroda pembantu ke alat potensiostat/galvanostat.
7. Menentukan rentang potensial kerja dan menetapkan laju scan rate
8. Menentukan jumlah siklus uji sebesar 1 siklus, mengevaluasi bentuk kurva voltamogram untuk melihat sifat redoks (reversibilitas) dari material.
9. Menghitung luas area di bawah kurva sebagai representasi kapasitansi spesifik. Menganalisis perubahan arus terhadap variasi laju pindai untuk memahami karakteristik kinetika material elektroda. Adapun perhitungan kapasitansi spesifik dari data uji *Cyclic Voltammetry* (CV) dapat dilakukan dengan menggunakan **Persamaan 3.1**.

$$C_{sp} = \frac{\int I(V) \Delta V}{2mv} \quad (3.1)$$

Keterangan:

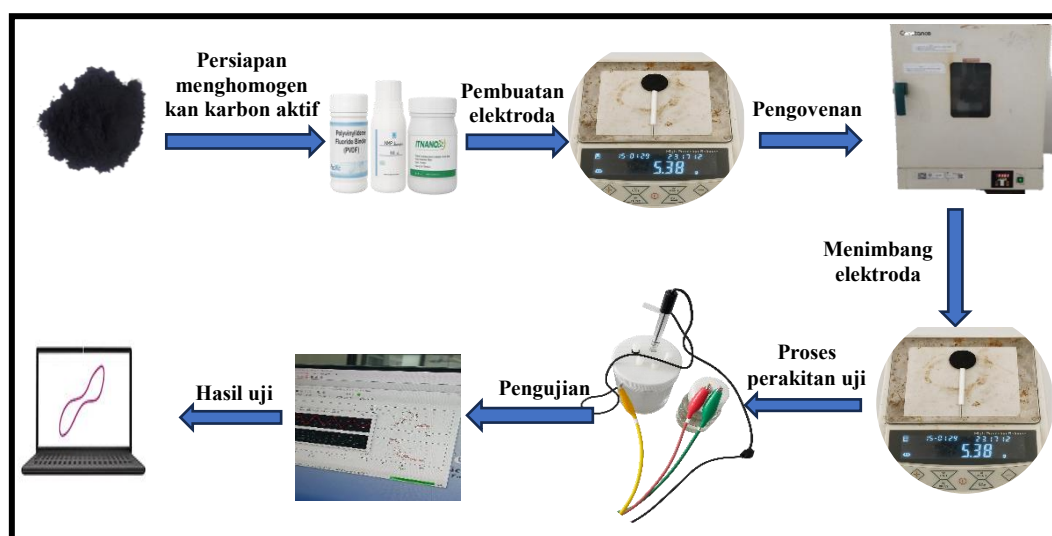
C_s : kapasitansi spesifik (F/g)

m: Massa aktif bahan elektroda (g)

ΔV : Rentang tegangan kerja (V)

v: Laju pindai (scan rate) (V/s) (Ampere-Volt) (Conway, 1999).

Pengujian *Cyclic Voltammetry* (CV) dilakukan sesuai prosedur standar, dan untuk mempermudah pemahaman, telah disusun skema sederhana yang menggambarkan proses pengujian. Skema tersebut dapat dilihat pada **Gambar 3.10**.

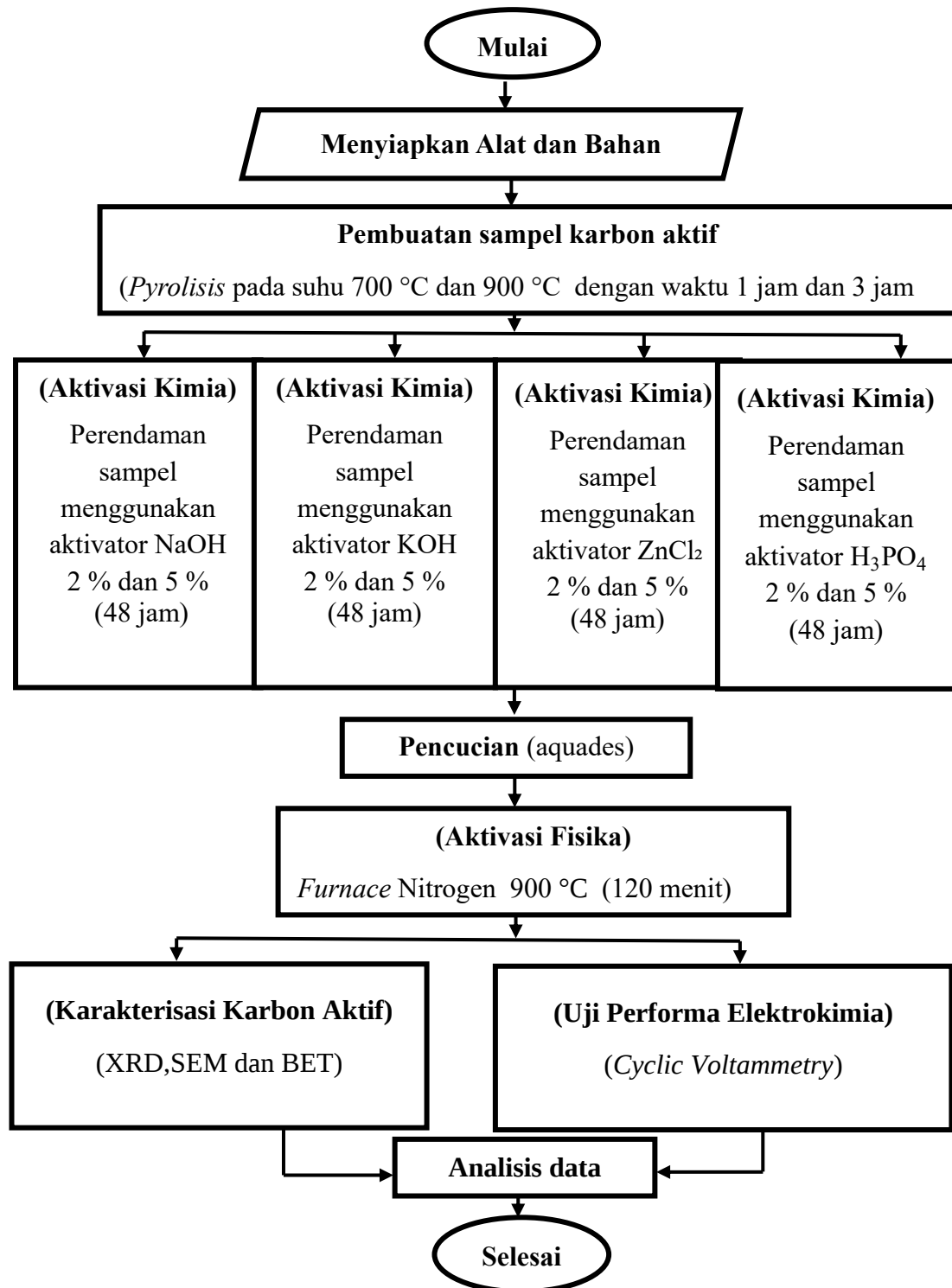


Gambar 3.10 Skema pengujian *Cyclic Voltammetry* (CV).

Gambar 3.10 menunjukkan tahapan pengujian performa elektrokimia dari karbon aktif menggunakan metode *Cyclic Voltammetry* (CV). Proses dimulai dari homogenisasi karbon aktif dengan bahan pengikat dan pelarut untuk membentuk pasta elektroda. Campuran ini kemudian digunakan dalam proses pembuatan elektroda. Setelah itu, elektroda dikeringkan melalui pengovenan, lalu ditimbang untuk memastikan massa elektroda yang akurat. Selanjutnya, elektroda dirakit dalam sel uji bersama dengan elektrolit dan elektroda pembanding dalam proses perakitan uji elektrokimia. Tahap terakhir adalah pengujian menggunakan alat potensiostat, yang menghasilkan data berupa kurva *Cyclic Voltammetry*. Hasil uji ini digunakan untuk menghitung nilai kapasitansi spesifik dan mengevaluasi performa elektrokimia karbon aktif sebagai material elektroda.

3.7 Diagram Alir

Diagram alir pada penelitian ini adalah ditunjukkan pada **Gambar 3.11** .



Gambar 3.11 Diagram alir penelitian.

V. KESIMPULAN

5.1 Keimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan , dapat disimpulkan bahwa:

1. Struktur kristalin dan derajat keteraturan hasil analisis XRD menunjukkan bahwa seluruh sampel karbon aktif (K1–K8) memiliki pola puncak lebar pada 2θ sekitar 23° dan 43° , menandakan struktur semi-kristalin dengan dominasi amorf. Peningkatan suhu aktivasi menyebabkan sedikit pergeseran posisi puncak dan penurunan intensitas, yang mengindikasikan gangguan pada struktur grafit dan peningkatan disorder akibat aktivasi.
2. Morfologi permukaan dan distribusi unsur citra SEM menunjukkan bahwa sampel K1 hingga K8 mengalami peningkatan pori-pori dan ketidakteraturan permukaan secara progresif. Sampel K8 memiliki struktur yang paling berpori dan tidak beraturan, yang menunjukkan bahwa kombinasi suhu tinggi dan rasio aktivator tinggi mendukung terbentuknya struktur mikropori. Analisis EDS memperlihatkan peningkatan kandungan karbon serta penurunan relatif unsur lain seperti K dan O, mendukung proses demineralisasi selama aktivasi.
3. Karakteristik luas permukaan dan porositas (BET) pengujian BET menunjukkan peningkatan signifikan luas permukaan spesifik dari $96,38 \text{ m}^2/\text{g}$ (K1) menjadi $388,73 \text{ m}^2/\text{g}$ (K8). Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan rasio KOH dan suhu aktivasi memperbesar pengembangan pori, terutama mikropori dan mesopori, yang sangat berpengaruh terhadap kinerja elektrokimia.
4. Performa elektrokimia (*Cyclic Voltammetry*) hasil pengujian CV memperlihatkan bahwa sampel K3 dan K8 menunjukkan nilai kapasitansi spesifik tertinggi, yaitu masing-masing $8,35 \text{ F/g}$ dan $8,80 \text{ F/g}$. Sementara itu, sebagian besar sampel lainnya memiliki nilai di bawah 10 F/g . Hal ini

mengindikasikan bahwa parameter aktivasi yang optimal (rasio KOH tinggi dan suhu tinggi) dapat menghasilkan struktur karbon yang lebih kondusif untuk penyimpanan muatan melalui mekanisme *electric double-layer capacitance* (EDLC).

5. Hubungan parameter aktivasi dengan sifat material Secara umum, peningkatan suhu dan rasio KOH menyebabkan peningkatan luas permukaan, pengembangan struktur pori, dan peningkatan kapasitansi. Namun, meskipun nilai kapasitansi spesifik masih berada di bawah standar ideal (100-300 F/g), tren yang diperoleh menunjukkan bahwa modifikasi lebih lanjut terhadap parameter aktivasi dan pasca-pemrosesan berpotensi meningkatkan performa karbon aktif secara signifikan.
6. Metode Taguchi terbukti efektif dalam menentukan kombinasi parameter optimal pada proses pembuatan karbon aktif. Namun, hasil eksperimental menunjukkan bahwa nilai kapasitansi yang diperoleh masih belum sepenuhnya sesuai dengan prediksi, yang kemungkinan disebabkan oleh ketidaksesuaian karakteristik bahan baku yang digunakan. Oleh karena itu, pemilihan prekursor yang tepat menjadi faktor penting untuk meningkatkan kesesuaian antara hasil analisis dan performa aktual karbon aktif.

6.2 Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengeksplorasi variasi rasio aktivator yang lebih tinggi, penggunaan kombinasi aktivator kimia, serta pengujian performa elektrokimia lanjutan seperti *galvanostatic charge-discharge* (GCD) dan *electrochemical impedance spectroscopy* (EIS) guna memperoleh kapasitansi dan stabilitas siklus yang lebih optimal. Selain itu, pemanfaatan limbah biomassa lain sebagai bahan baku alternatif juga layak untuk diteliti.

DAFTAR PUSTAKA

- Abioye, A. M., and Ani, F. N. (2020). High performance supercapacitor based on activated carbon electrodes prepared using microwave temperature as process parameter. *Advances in Engineering Research*, 198(1), 90-95.
- Ahmad, N., Rinaldi, A., Sidoli, M., Magnani, G., Morengi, A., Scaravonati, S., Vezzoni, V., Pasetti, L., Fornasini, L., Ridi, F., Milanese, C., Riccò, M., and Pontiroli, D. (2024). High performance quasi-solid-state supercapacitor based on activated carbon derived from asparagus waste. *Journal of Energy Storage*, 99(1), 1-16.
- Alif, A., Tetra, O. N., Aziz, H., dan Defri, H. (2017a). Pengaruh Aktivator KOH terhadap Kinerja Karbon Aktif dari Cangkang Kelapa Sawit sebagai Bahan Elektroda Superkapasitor. *Jurnal Zarah*, 5(2), 38–43.
- Al-sareji, O. J., Grmasha, R. A., Meiczinger, M., Al-Juboori, R. A., Somogyi, V., and Hashim, K. S. (2024). A Sustainable Banana Peel Activated Carbon for Removing Pharmaceutical Pollutants from Different Waters: Production, Characterization, and Application. *Materials*, 17(5), 1-25.
- Anggraeni, I. S., dan Yuliana, L. E. (2015). Pembuatan Karbon Aktif dari Limbah Tempurung Siwalan (*Borassus Flabellifer* L) dengan Menggunakan Aktivator Seng Klorida ($ZnCl_2$) dan Natrium Karbonat (Na_2CO_3). *Thesis*. 1–103.
- Anggraini, I. N., Nugroho, W. S., Rinaldi, R. S., dan Herawati, A. (2019). Analisis Pengaruh Tegangan Terhadap Karakteristik Kerja Sel Electrolyzer Dengan Variasi Bahan Elektroda. *Jurnal amplifier: Jurnal ilmiah bidang teknik elektro dan komputer*, 9(1), 9–15.
- Apriani, R., Diah Faryuni, I., Wahyuni, D., Kunci, K., Aktif, K., Durian, K., Hidroksida, K., dan Fe, A. (2013). Pengaruh Konsentrasi Aktivator Kalium Hidroksida (KOH) terhadap Kualitas Karbon Aktif Kulit Durian sebagai Adsorben Logam Fe pada Air Gambut. *Jurnal Untan*, 1(2), 82–86.
- Aryani, H. N., Lestari, I., dan Hidayat, S. (2022). Pemanfaatan Karbon Aktif Dari Sekam Padi Sebagai Elektroda Superkapasitor. *JlIF (Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika)*, 06(02), 102–113.

- Azmy, I. (2014). *The effects of polyvinyl alcohol (PVA) concentration on electrochemical performance $\text{LiTi}_2(\text{PO}_4)_3$ by sol-gel process as anode for lithium ion battery type aqueous electrolyte* (Final project, Sepuluh Nopember Institute of Technology). Surabaya: Faculty of Industrial Technology, Department of Materials and Metallurgical Engineering, hlm. 45.
- Badan Pusat Statistik. (2025). *Statistik kopi Indonesia 2025*. Jakarta: Badan Pusat Statistik.
- Biegun, M., Dymerska, A., Chen, X., and Mijowska, E. (2020). Study of the Active Carbon from Used Coffee Grounds as the Active Material for a High-Temperature Stable Supercapacitor with Ionic-Liquid Electrolyte. *Materials*, 13(3919), 1-14.
- Bragg, W. H., and Bragg, W. L. (1913). The reflection of X-rays by crystals. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 88(605), 428–438.
- Brame, J., and Griggs, C. (2016). Surface area analysis using the Brunauer–Emmett–Teller (BET) method (Scientific Operating Procedure Series: SOP-C, ERDC/EL SR-16-3). Environmental Quality and Technology Research Program. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. 13(3919), 1-23.
- Brunauer, S., Emmett, P. H., and Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of The American Chemical Society*, 60(2), 309-319.
- Callister, W. D., and Rethwisch, D. G. (2010). *Materials science and engineering: An introduction* (8th ed). Hoboken, NJ: John Wiley and Sons. 60(2), 1-123
- Chen, M., Kang, X., Wumaier, T. (2013) Preparation of activated carbon from cotton stalk and its application in supercapacitor. *Jurnal Solid State Electrochem* 17, 1005–1012.
- Cullity, B. D. (1978). *Elements of X-ray Diffraction*. Addison-Wesley Publishing Company, hlm 23.
- Dalas, E., Vitoratos, E., Sakkopoulos, S., and Malkaj, P. (2004). Polyaniline/zeolite as the cathode in a novel gel electrolyte primary dry cell. *Journal of Power Sources*, 128(2), 319–325.
- Dahlan, M. S. (2002). *Fisika untuk Sains dan Teknik Modern*. Jakarta: Penerbit Universitas Indonesia. hlm 35.

- Dewi, R. P., Saputra, T. J., dan Widodo, S. (2021). Studi potensi limbah kulit kopi sebagai sumber energi terbarukan di wilayah Jawa Tengah. *Journal of Mechanical Engineering*, 5(1), 41-45.
- Dewi, T. K., Nurrahman, A., and Permana, E. (2009). Manufactured of Activated Carbon from Cassava Skin (*Mannihot Esculenta*). *Jurnal Teknik Kimia*, 16(1), 24-30.
- Doczekalska, B., Bartkowiak, M., Łopatka, H., and Zborowska, M. (2022). Activated carbon prepared from corn biomass by chemical activation with KOH. *BioResources*, 17(1), 1794-1804.
- Franklin, R. E. (1951). The structure of graphitic carbons. *Acta Crystallographica*, 4(3), 253-261.
- Febriyanto, P., Jerry, J., Satria, A. W., dan Devianto, H. (2019). Pembuatan Dan Karakterisasi Karbon Aktif Berbahan Baku Limbah Kulit Durian Sebagai Elektroda Superkapasitor. *Jurnal Integrasi Proses*, 8(1), 19-25.
- Figueroa Campos, G. A., Perez, J. P. H., Block, I., Sagu, S. T., Saravia Celis, P., Taubert, A., and Rawel, H. M. (2021). Preparation of activated carbons from spent coffee grounds and coffee parchment and assessment of their adsorbent efficiency. *Processes*, 9(8), 2-10.
- Guntama, D., Dewi, M. N., Nulhakim, L., Sandi, S. A., Trisnaeni, A., dan Lintang, A. (2023). Pemanfaatan arang aktif ampas kopi Arabika (*Coffea arabica*) dengan aktivator asam klorida (HCl) dan asam fosfat (H_3PO_4) sebagai adsorben logam kromium (Cr) pada limbah tekstil. *Jurnal Migasian*, 7(1), 2-9.
- Gurtner, D., Back, J. O., Bosch, D., Hofmann, A., and Pfeifer, C. (2025). Renewable activated carbon from wood-based gasification char: A comprehensive study on physical activation. *Carbon Resources Conversion*. 8(3), 1-13.
- Guo, Y., & Rockstraw, D. A. (2007). Physical and chemical properties of carbons synthesized from xylan, cellulose, and Kraft lignin by H_3PO_4 activation. *Carbon*, 45(4), 850-858.
- Herlina, H., Zulfikar, M. A., dan Buchari, B. (2018). Studi Oksidasi Elektrokimia Dimediasi Kobal (III) pada Amoksisilin secara Voltammetri Siklik Menggunakan Elektroda Platina, Pt/Co (OH)₂ dan Pt/Co dalam Berbagai Elektrolit Pendukung. *Jurnal Kimia dan Pendidikan Kimia*, 3(2), 82-92.

- Hendronursito, Y., Astuti, W., Sabarman, H., and Santoso, I. (2025). A porous activated carbon derived from banana peel by hydrothermal activation two-step methods. *International Journal of Renewable Energy Development*, 14(2), 322–331.
- Huda, A. N., Lestari, I., dan Hidayat, S. (2022). Pemanfaatan karbon aktif dari sekam padi sebagai elektroda superkapasitor. *Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika*, 6(2), 102-113.
- Irwansyah, F. S., Amal, A. I., Diyanthi, E. W., Hadisantoso, E. P., Noviyanti, A. R., Eddy, D. R., and Risdiana, R. (2024). How to read and determine the specific surface area of inorganic materials using the Brunauer-Emmett-Teller (BET) method. *ASEAN Journal of Science and Engineering*, 4(1), 61–70.
- Istiqomah, A. U., Rahmawati, F., dan Nugrahaningtyas, K. D. (2016). Penggantian Soda Api (NaOH) dengan Kalium Hidroksida (KOH) pada Destilasi Sistem Biner Air-Etanol. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 12(2), 179–189.
- Izzah, S. N. (2020). Peran Asosiasi Eksportir dan Industri Kopi Indonesia (AEKI) dalam Meningkatkan Standar Mutu dan Daya Saing Ekspor Kopi Indonesia di Pasar Eropa. *JOM FISIP*, 7, 1–16.
- Khadka, O., Lawaju, U., Koju, S., Rai, R. C., Nakarmi, M. L., and Joshi, P. (2024). Activated carbon derived from coffee waste as supercapacitor electrode material. *Scientific World*, 17(17), 19–26.
- Latief, Y. N. (2015). *Sejarah awal karbon aktif*. hlm 36.
- Lee, S. M., Lee, S. H., and Roh, J. S. (2021). Analysis of activation process of carbon black based on structural parameters obtained by XRD analysis. *Crystals*, 11(2), 1–11.
- Leng, Y. (2009). *Materials Characterization: Introduction to Microscopic and Spectroscopic Methods*. John Wiley and Sons. hlm 29.
- Li, Z. Q., Lu, C. J., Xia, Z. P., Zhou, Y., and Luo, Z. (2007). X-ray diffraction patterns of graphite and turbostratic carbon. *Carbon*, 45(8), 1686–1695.
- Li, Z., Zhang, L., and Dai, J. (2020). Biomass-derived porous carbon materials for supercapacitor applications. *Sustainable Energy & Fuels*, 4(2), 437–455.

- Liu, H., Zhang, L., Wang, Y., and Zhang, Z. (2015). Structural evolution of biomass-derived carbon for electrochemical energy storage. *Journal of Power Sources*, 285, 303–309.
- Malini, K., Selvakumar, D., and Kumar, N. S. (2023). Activated carbon from biomass: Preparation, factors improving basicity and surface properties for enhanced CO₂ capture capacity – A review. *Journal of CO₂ Utilization*, 67(1), 1-10.
- Maniarasu, R., Rathore, S. K., and Murugan, S. (2023). Biomass-based activated carbon for CO₂ adsorption – A review. *Energy and Environment*, 34(5), 1674–1721.
- Marsh, H., and Rodríguez-Reinoso, F. (2006). *Activated Carbon*. Amsterdam: Elsevier. ISBN: 9780080444635. hlm 45.
- Muttaqin, R., Prayitno. W.S.W., dan Nurbaiti. U. (2023). Pengembangan Buku Panduan Teknik Karakterisasi Material: X-ray Diffractometer (XRD) Panalytical Xpert3 Powder. *Indonesian Journal of Laboratory*, 6(1), 9-16.
- Mukhiemer, S., Daraghmeh, A., Nassar, H., Hussain, S., Lim, H., Han, H., Kim, T. W., and Hilal, H. S. (2024). Physically and chemically activated carbon from coffee waste in high performance supercapacitor electrodes. *Preprints*. 12(1), 2-20.
- Nasrollahzadeh, M., Atarod, M., Sajjadi, M., Sajadi, S. M., and Issaabadi, Z. (2019). Plantmediated green synthesis of nanostructures: mechanisms, characterization, and applications. *Interface Science and Technology*, 28, 199-322.
- Nurhasmia, Subagiada.S., and Natalisanto.A.I. (2021). *Progressive Physics Journal*. 2, 79–88.
- Papathanassiou, A. N., Grammatikakis, J., Sakellis, I., Sakkopoulos, S., Vitoratos, E., and Dalas, E. (2005). Thermal degradation of the dielectric relaxation of 10-90% (w/w) zeolite-conducting polypyrrole composites. *Synthetic Metals*, 150(2), 145–151.
- Pam, A. A., Abdullah, A. H., Tan, Y. P., and Zainal, Z. (2022). Physicochemical properties of porous activated carbon prepared from palm kernel shell through a low-cost activation protocol. *South African Journal of Science*, 1(1), 89–10.

- Prayogatama, A., dan Kurniawan, T. (2022). Modifikasi karbon aktif dengan aktivasi kimia dan fisika menjadi elektroda superkapasitor. *Jurnal Sains dan Teknologi*, 6 (11), 47–58.
- Purnama, F., and Taufik, S. M. (2019). Synthesis of chitosan with-activated carbon from coffee to reduce concentration metal cadmium. *IJSTE–International Journal of Science Technology & Engineering*, 6(1), 2-25.
- Putman, K. J., Tang, H., and Zhao, Z. (2022). Defining graphenic crystallites in disordered carbon through integrated X-ray diffraction and simulation studies. *Carbon*, 197, 641–652.
- Ramadhani, L. F., Nurjannah, I. M., Yulistiani, R., dan Saputro, E. A. (2020). Teknologi aktivasi fisika pada pembuatan karbon aktif dari limbah tempurung kelapa. *Jurnal Teknik Kimia*, 26(2), 42-53.
- Rosson, E., Garbo, F., Marangoni, G., Bertani, R., Lavagnolo, M. C., Moretti, E., Talon, A., Mozzon, M., and Sgarbossa, P. (2020). Activated Carbon from Spent Coffee Grounds: A Good Competitor of Commercial Carbons for Water Decontamination. *Applied Sciences*, 10(16), 2-20.
- Ross, P. J. (1996). *Taguchi Techniques for Quality Engineering* (2nd ed.). New York: McGraw-Hill, hlm. 38.
- Roy, R. K. (2010). *A Primer on the Taguchi Method* (2nd ed.). Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers, hlm. 34.
- Sing, K. S. W. (2001). The use of nitrogen adsorption for the characterization of porous materials. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 187–188, 3–9.
- Scherrer, P. (1918). Bestimmung der Größe und der inneren Struktur von Kolloidteilchen mittels Röntgenstrahlen. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, 1918, 98–100.
- Setyaningsih, N. E., and Septiano, A. F. (2019). Optimasi kualitas citra scanning electron microscopy (SEM) dengan metode contrast to noise ratio (CNR). *Prosiding Seminar Nasional IV Hasil Penelitian Pranata Laboratorium Pendidikan Indonesia, IV*, 2548–1924.
- Sevilla, M., and Mokaya, R. (2014). Energy storage applications of activated carbons: Supercapacitors and hydrogen storage. *Energy & Environmental Science*, 7(4), 1250–1280.

- Shahcheragh, S. K., Bagheri Mohagheghi, M. M., and Shirpay, A. (2023). Effect of physical and chemical activation methods on the structure, optical absorbance, band gap and Urbach energy of porous activated carbon. *SN Applied Sciences*, 5(12), 1-17.
- Shimizu, S., and Matubayasi, N. (2022). Surface Area Estimation: Replacing the Brunauer– Emmett–Teller Model with the Statistical Thermodynamic Fluctuation Theory. *Langmuir*, 38(26), 7989-8002.
- Shofa, 2012. Pembuatan Karbon Aktif Berbahan Baku Ampas Tebu dengan Aktivasi Kalium Hidroksida. Universitas Indonesia. *Thesis*. 1(1), 29–34.
- Simon, P., and Gogotsi, Y. (2008). Materials for electrochemical capacitors. *Nature Material*. 7, 845–854.
- Syarif, N. (2014). Performance of biocarbon based electrodes for electrochemical capacitor. *Energy Procedia*, 52, 18–25.
- Taguchi, G. (1987). *System of Experimental Design: Engineering Methods to Optimize Quality and Minimize Costs*. New York: UNIPUB/Kraus International Publications, hlm. 12.
- Tare, M., Puli, O. R. G., Oros, S. M., and Singh, A. (2009). Drosophila adult eye model to teach Scanning Electron Microscopy in an undergraduate cell biology laboratory. *Drosophila Information Service*, 92, 174–180.
- Taer, E., Zulkifli, Arif, E. N., dan Taslim, R. (2016). Analisa kapasitansi spesifik elektrodakarbon superkapasitor dari kayu karet terhadap laju scan berdasarkan variasi aktivasi HNO₃. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 1(1), 29–34.
- Thamizhselvi, S., and Annamalai, K. (2011). Application of Taguchi Method for Optimizing Process Parameters in the Manufacture of Activated Carbon Electrode from Biomass. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, 3(6), 4976–4984.
- Thomas, J. M. (2023). Advances in adsorption science: From fundamentals to applications. *Chemical Society Reviews*, 52(14), 5432–5461.
- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., and Sing, K. S. (2015a). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87(9–10), 1051–1069.
- Warren, B. E. (1941). X-ray diffraction in random layer lattices. *Physical Review*, 59(9), 693–698.

- Wang, Y., Liu, Y., Chen, Z., Zhang, M., Liu, B., Xu, Z., and Yan, K. (2022). In situ growth of hydrophilic nickel–cobalt layered double hydroxides nanosheets on biomass waste-derived porous carbon for high-performance hybrid supercapacitors. *Green Chemical Engineering*, 3(1), 55–63.
- West, A. R. (1987). *Solid State Chemistry and Its Applications*. John Wiley and Sons. hlm 23.
- Wijayanto, S. O., dan Bayuseno, A. P. (2014). Analisis kegagalan material pipa ferrule nickel alloy N06025 pada waste heat boiler akibat suhu tinggi berdasarkan pengujian: mikrofografi dan kekerasan. *Jurnal Teknik Mesin*, 2(4), 33-39.
- Wu, F. C., Tseng, R. L., Hu, C. C., and Wang, C. C. (2005). Effects of pore structure and electrolyte on the capacitive characteristics of steam- and KOH-activated carbons for supercapacitors. *Journal of Power Sources*, 274, 563–571.
- Yagmur, E., Ozmak, M., and Aktas, Z. (2021). A novel method for production of activated carbon from waste tea by chemical activation with microwave energy. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(1), 3278-3285.
- Yang, S., Cheng, Q., Hu, L., Gu, Y., Wang, Y., and Liu, Z. (2023). Study on the adsorption properties of oxalic acid-modified cordierite honeycomb ceramics for neutral red dyes. *ACS Omega*, 8(12), 11457–11466.
- Yanti, P. N., Setiawan, A., Fikri, A., dan Nurjannah, S. (2023). Karakteristik material elektroda superkapasitor dari arang kulit kopi Arabika yang diaktivasi dengan variasi konsentrasi kalium hidroksida. *Jurnal Teknologi Rekayasa (JTERA)*, 8(2), 315–324.
- Yen, H. Y., and Lin, C. P. (2016). Adsorption of Cd(II) from wastewater using spent coffee grounds by Taguchi optimization. *Desalination and Water Treatment*, 57(24), 11154–11161.
- Yuda, I. W. W., Ibrahim, F. M. M., Ula, N. M., Valiana, V., Triandi, R. T., and Herlina, N. (2021). Elektrode superkapasitor berbahan nanokomposit MnO₂/AC dari limbah plastik dengan teknik elektrodposisi. *Jurnal Integrasi Proses*, 10(2), 77-81.
- Yuliusman. (2016). Pembuatan Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa melalui Aktivasi Kimia dengan KOH dan Fisika dengan CO₂. *Seminar Nasional Teknik Kimia Soebardjo Brotohardjono XII* (June), 1–6.

- Young, R. A. (1993). *The Rietveld Method*. IUCr Monographies of Crystallography 5. Wiley, Oxford. hlm 23.
- Zhou, Z. (2014). Modeling and power control of a marine current turbine system with energy storage devices (*Doctoral dissertation, Universite de Bretagne Occidentale, Brest, France*). hlm 46.
- Zhang, J., Gu, M., and Chen, X. (2023). Supercapacitors for renewable energy applications: A review. *Micro and Nano Engineering*, 1(2), 1-20.
- Zhao, R., Wang, H.-H., Gao, J., Zhang, Y.-J., Li, X., Zhou, J.-J., Liang, P., Gao, X.-W., and Gu, S.-H. (2022). Plant volatile compound methyl benzoate is highly effective against *Spodoptera frugiperda* and safe to non-target organisms as an eco-friendly botanical insecticide. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2(4), 101-114.
- Zubir, M. H. M., and Zaini, M. A. A. (2020). Twigs-derived activated carbons via $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{ZnCl}_2$ composite activation for methylene blue and congo red dyes removal. *Scientific Reports*, 1(4), 1-23.