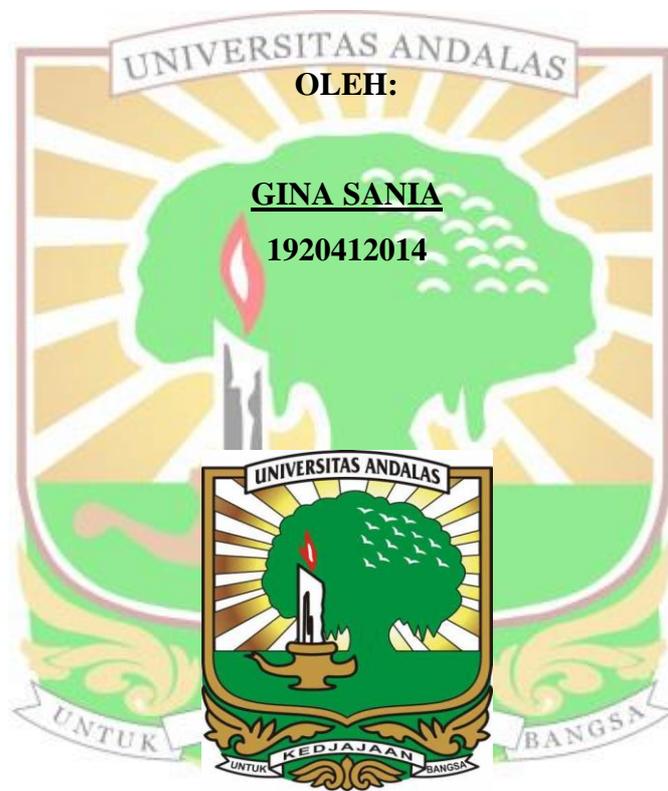


**PEMANFAATAN KARBON AKTIF DARI AMPAS BIJI KOPI (*Robusta*)
YANG DIAKTIVASI MENGGUNAKAN VARIASI KONSENTRASI
KALIUM HIDROKSIDA (KOH) SEBAGAI BAHAN DASAR
ELEKTRODA SUPERKAPASITOR**

TESIS



**PEMBIMBING I : PROF. DR. HERMANSYAH AZIZ
PEMBIMBING II: PROF. DR. ERMAN TAER**

**PROGRAM PASCASARJANA KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS ANDALAS
PADANG
2021**

**PEMANFAATAN KARBON AKTIF DARI AMPAS BIJI KOPI (*ROBUSTA*)
YANG DIAKTIVASI MENGGUNAKAN VARIASI KONSENTRASI
KALIUM HIDROKSIDA (KOH) SEBAGAI BAHAN DASAR
ELEKTRODA SUPERKAPASITOR**



**PROGRAM PASCASARJANA KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS ANDALAS
PADANG
2021**

HALAMAN PERSETUJUAN

Judul Tesis : Pemanfaatan Karbon Aktif dari Ampas Biji Kopi (*Robusta*) yang Diaktivasi menggunakan Variasi Konsentrasi Kalium Hidroksida (KOH) sebagai Bahan Dasar Elektroda Superkapasitor

Nama Mahasiswa : Gina Sania

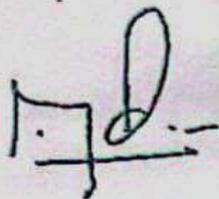
Nomor BP : 1920412014

Program Studi : Magister Kimia

Tesis ini telah diuji dan dipertahankan didepan sidang Panitia Ujian Akhir Mahasiswa Program Studi Magister (S2) Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Andalas dan dinyatakan lulus pada tanggal 25 Agustus 2021.

Menyetujui,

Pembimbing I



Prof. Dr. Hermansyah Aziz
NIP. 195301261979031002

Pembimbing II



Prof. Dr. Erman Taer
NIP. 197109231995121002

Mengetahui,

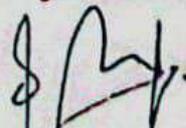
Ketua Jurusan Kimia



Dr. Mai Efdi
NIP. 197205301999031003

Ketua Program Studi

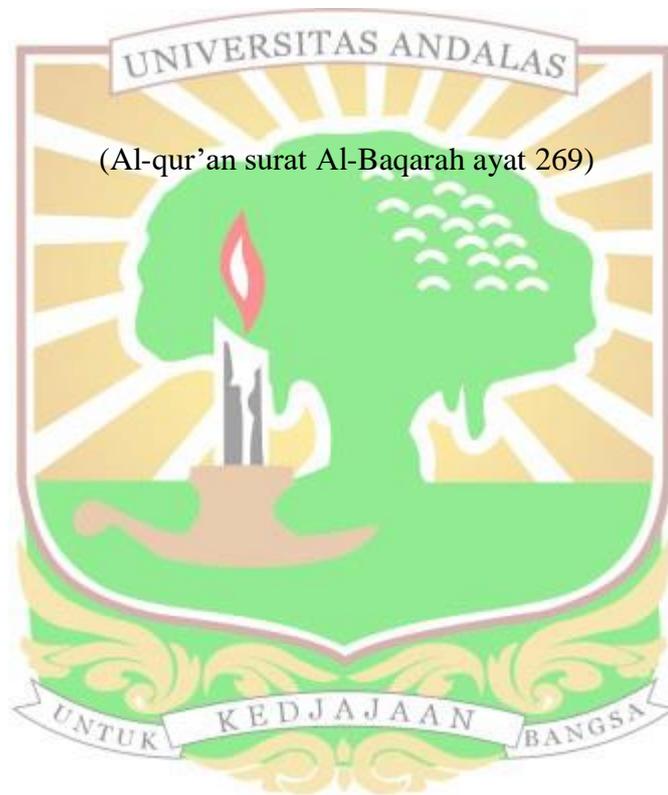
Magister Kimia



Dr. Zulkhadjri M.Eng
NIP. 197102051997021001

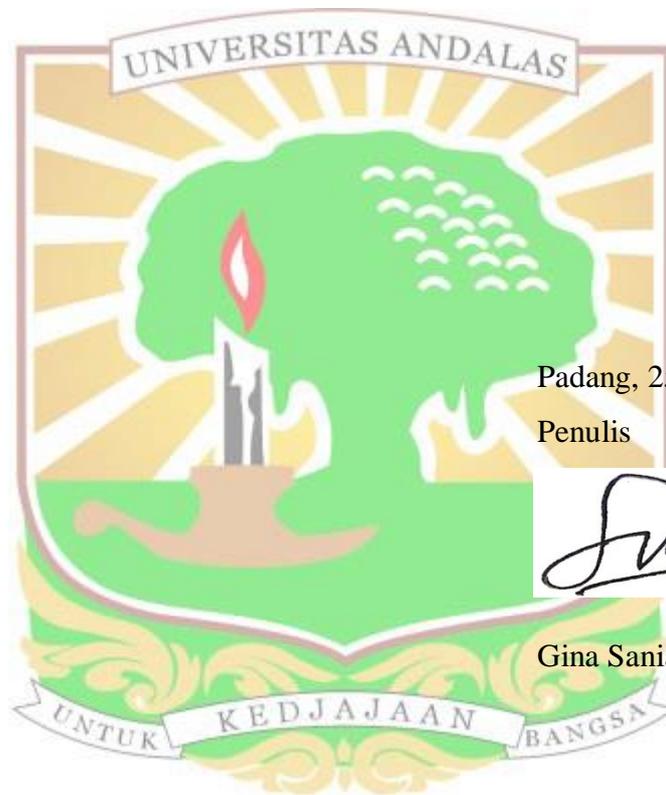
HALAMAN PENGHARGAAN

Allah menganugerahkan hikmah
kepada siapa yang dikehendaki-Nya.
Dan barang siapa yang dianugerahi hikmah,
ia benar-benar telah dianugerahi karunia yang banyak,
dan hanya orang berakal lah yang dapat
menggambil pelajaran dari hikmah tersebut



RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan pada tanggal 02 April 1996 di Bukittinggi, dari Bapak Haikal dan Ibu Dewi Yulianti. Penulis menamatkan SD di SDN 24 Ujung Gurun Padang pada tahun 2008, SMP di MTsN Model Padang pada tahun 2011, dan SMA di SMAN 10 Kota Padang pada tahun 2014. Penulis memperoleh gelar Sarjana Kimia pada tahun 2018 di Universitas Andalas dan memperoleh gelar Magister Kimia pada tahun 2021 di Universitas Andalas.



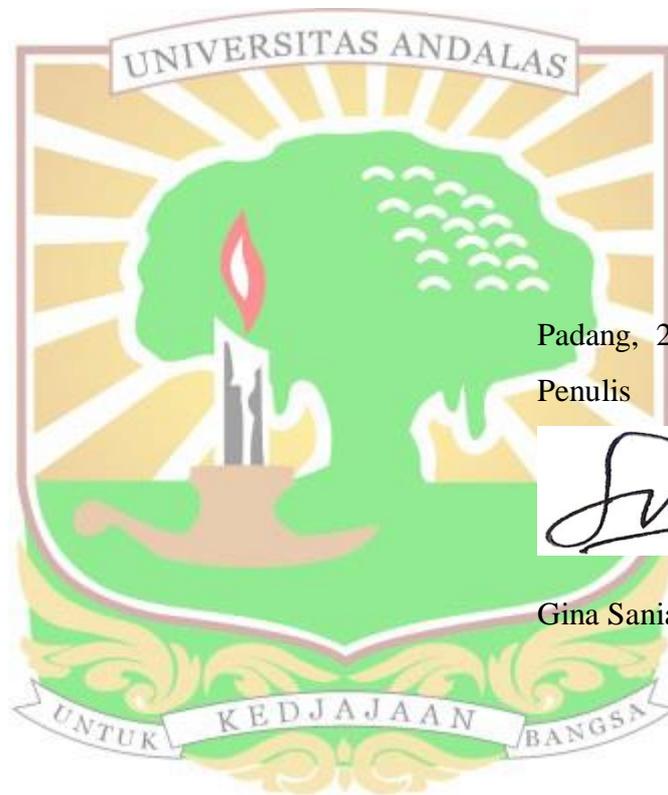
Padang, 25 Agustus 2021

Penulis

Gina Sania

HALAMAN PERNYATAAN

Dengan ini saya Gina Sania yang beralamat di Perumdam ¾ Blok M no 3, Tunggul Hitam Padang menyatakan bahwa dalam Tesis ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kemagisteran di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.



Padang, 25 Agustus 2021

Penulis

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Gina Sania', is placed over a white rectangular box.

Gina Sania

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT yang telah mengarahkan dan melimpahkan segala berkah, rahmat, dan karunia-NYA sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan tesis ini. Tidak lupa sholawat yang tak henti kita hadiahkan kepada baginda Nabi besar Muhammad SAW, sumber suri tauladan yang baik bagi kita semua. Tesis ini ditulis berdasarkan hasil penelitian yang berjudul "Pemanfaatan Karbon Aktif dari Ampas Biji Kopi (*Robusta*) yang Diaktivasi menggunakan Variasi Konsentrasi Kalium Hidroksida (KOH) sebagai Bahan Dasar Elektroda Superkapasitor" sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Magister Sains (M.Si) pada program studi Magister Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Andalas.

Dalam proses penyusunan tesis ini tidak terlepas dari banyak bantuan dan dukungan dari semua pihak yang berjasa bagi penulis, karena itu dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang tak terhingga kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Hermansyah Aziz, selaku Dosen pembimbing I. Terimakasih atas semua kesabaran, pengorbanan waktu, tenaga dan pikirannya untuk memberikan bimbingan, arahan, nasehat dengan sabar dari awal selama masa studi dan proses penulisan tesis ini.
2. Bapak Prof. Dr. Erman Taer selaku Dosen Pembimbing II yang telah membimbing, mengarahkan dan memberikan banyak saran serta nasehat kepada penulis selama proses penulisan tesis ini.
3. Bapak Prof. Dr. Emriadi, Ibu Prof. Dr. Safni, Ibu Dr. Diana Vanda Wellia selaku Dosen Penguji pada ujian Tesis yang telah mengarahkan dan memberikan banyak saran serta nasehat kepada penulis selama proses penulisan tesis ini.
4. Ibu Dr. Eng Yulia Eka Putri, M. Si selaku Sekretaris Jurusan Kimia Universitas Andalas dan Bapak Dr. Zulhadjri, M. Eng selaku Ketua Kaprodi Program Studi S2 Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Andalas, terima kasih sudah memberikan banyak bantuan dan arahnya selama masa studi.

5. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Andalas, terima kasih atas kesabarannya dalam mendidik setiap Mahasiswa, semoga Allah SWT membalas semua kebaikan yang dilakukan dengan ganjaran pahala terbaik.
6. Seluruh Staf Administrasi & Pendidikan, Analis Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Andalas. Terima kasih untuk dedikasi terbaiknya dalam menjalankan pekerjaannya. Terima kasih atas bantuannya selama menempuh masa studi.
7. Bapak Prof. Dr. Syukri Arief, selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Andalas.
8. Rekan-rekan seperjuangan Magister Kimia 2019 FMIPA Unand, Terima kasih atas waktu dan kebersamaannya selama menempuh masa studi di Jurusan Kimia. Semoga silaturahmi terus terjaga dan semoga Allah SWT memudahkan setiap langkah perjuangan kita semua.
9. Rekan-rekan mahasiswa satu divisi Laboratorium Elektrokimia Universitas Andalas serta rekan-rekan Laboratorium Fisika Material Universitas Riau yang telah memberikan arahan mulai dari penelitian hingga penulisan tesis ini selesai. Terima kasih untuk semua waktu kebersamaannya, bantuan dan pertolongan selama melaksanakan penelitian semoga bernilai kebaikan dimata Allah SWT.
10. Terimakasih kepada keluarga dan kerabat tercinta yang selalu memberikan energi positif, khususnya kedua orangtua yang tidak hentinya memberikan support dalam keadaan apapun. Semoga selalu diberikan keberkahan dan kesehatan dalam hidupnya.

Semoga Allah SWT selalu melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya kepada mereka semua yang telah banyak membantu, memberi semangat dan dukungan dalam penyelesaian Tesis ini. Harapan penulis semoga tesis dapat dijadikan referensi ilmu pengetahuan dan bahan diskusi bersama untuk berbagai pihak yang membutuhkan.

Padang, 25 Agustus 2021



Penulis

Pemanfaatan Karbon Aktif dari Ampas Biji Kopi (*Robusta*) yang Diaktivasi Menggunakan Variasi Konsentrasi Kalium Hidroksida (KOH) Sebagai Bahan Dasar Elektroda Superkapasitor.

Oleh : Gina Sania (1920412014)

(Dibawah bimbingan : Prof. Dr. Hermansyah Aziz dan Prof. Dr. Erman Taer)

Intisari

Karbon aktif dari ampas biji kopi *robusta* yang diaktivasi menggunakan variasi konsentrasi KOH sebesar 0,2 M, 0,3 M, dan 0,5 M telah digunakan sebagai bahan dasar elektroda superkapasitor. Sintesis elektroda karbon aktif diawali dengan proses aktivasi kimia dan dilanjutkan dengan proses karbonisasi. Sampel di karbonisasi pada suhu 800°C dengan laju pemanasan 5°C/menit dalam kondisi gas inert (N₂). Pada penelitian ini, karbon aktif ampas biji kopi *robusta* dikarakterisasi menggunakan SEM EDX (*Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive X-Ray*) dan SAA (*Surface Area Analyzer*) sedangkan sifat elektrokimia sel superkapasitor diukur menggunakan metoda *Cyclic Voltammetry* (CV) dan *Galvanostatic Charge-Discharge* (GCD). Dari kurva isotherm adsorpsi yang dihasilkan oleh karbon aktif ampas biji kopi *robusta* menggunakan karakterisasi SAA, didapatkan kurva isotherm tipe IV yang menunjukkan bahwa struktur mesopori lebih dominan. Pada pengukuran sifat elektrokimia menggunakan metoda CV dan GCD, elektroda karbon aktif menggunakan konsentrasi KOH 0,3 M menghasilkan nilai kapasitansi spesifik tertinggi yaitu sebesar 123 Fg⁻¹ dan 192 Fg⁻¹ dengan persentase unsur C sebesar 73,36 % dan luas permukaan spesifik sebesar 795,687 m²g⁻¹. Karbon aktif dari ampas biji kopi *robusta* yang diaktivasi menggunakan aktivator KOH memiliki *performance* yang baik dan dapat dijadikan sebagai bahan dasar elektroda superkapasitor yang ramah lingkungan.

Kata Kunci : Karbon aktif, ampas biji kopi *robusta*, sel superkapasitor, KOH

**Utilization of Activated Carbon from Waste Coffee Grounds (*Robusta*)
Activated Using Potassium Hydroxide (KOH) as a Material for
Supercapacitor Electrodes.**

By : Gina Sania (1920412014)

(Supervised : Prof. Dr. Hermansyah Aziz dan Prof. Dr. Erman Taer)

Abstract

Activated carbon from *robusta* waste coffee with KOH's variation concentration 0.2 M, 0.3 M, and 0.5 M has been used as a material for supercapacitor electrode. Synthesis of activated carbon started with chemical activation process and continued with carbonization process. Sample was carbonized at 800⁰C temperature with a heating rate 5⁰C/min under inert gas (N₂) conditions. In this study, activated carbon from *robusta* waste coffee was characterized using SEM-EDX (Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive X-Ray) and SAA (Surface Area Analyzer) and the electrochemical properties of supercapacitor cell measured by Cyclic Voltammetry (CV) and Galvanostatic Charge-Discharge (GCD) methods. The isotherm adsorption curve of *robusta* waste coffee activated carbon is type IV which is the mesopore structure is dominant. In electrochemical properties using CV and GCD methods, activated carbon electrode using 0.3 M KOH concentration produced the highest specific capacitance is 123 Fg⁻¹ and 192 Fg⁻¹ with a percentage of C element is 73.36% and specific surface area is 795,687 m²g⁻¹. Activated carbon from *robusta* waste coffee with KOH activator has a good performance and can be used as a material for environmentally supercapacitor electrodes.

Keywords : Activated carbon, *robusta* waste coffee, supercapacitor cell, KOH

DAFTAR ISI

HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PENGHARGAAN	iv
RIWAYAT HIDUP	v
HALAMAN PERNYATAAN.....	vi
KATA PENGANTAR	vii
INTISARI.....	ix
ABSTRACT	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR SINGKATAN	xv
DAFTAR SIMBOL	xvi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvii
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian.....	5
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Superkapasitor.....	6
2.2 Karbon Aktif.....	7
2.3 Karbon Aktif dari Ampas Biji Kopi <i>Robusta</i>	8
2.4 Kapasitansi.....	9
2.5 <i>Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive X-Ray</i>	10
2.6 <i>Surface Area Analyzer (SAA)</i>	11
2.7 <i>Cyclic Voltammetry (CV)</i>	11
2.8 <i>Galvanostatic Charge-Discharge (GCD)</i>	12
BAB III. METODE PENELITIAN	13
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	13
3.2 Alat	13

3.3	Bahan.....	13
3.4	Prosedur Kerja.....	13
3.4.1	Preparasi Ampas Biji Kopi <i>Robusta</i>	13
3.4.2	Proses Aktivasi Karbon Aktif Ampas Biji Kopi <i>Robusta</i>	14
3.4.3	Pembuatan Pelet Elektroda Superkapasitor	14
3.4.4	Proses Karbonisasi Pelet Elektroda Superkapasitor	14
3.4.5	Preparasi Sel Superkapasitor.....	14
3.4.6	Pembuatan Separator	15
3.4.7	Pengukuran Sifat Elektrokimia Rangkaian Superkapasitor.....	15
3.4.8	Karakterisasi Karbon Aktif Ampas Biji Kopi <i>Robusta</i>	15
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN		16
4.1	Pengaruh Variasi Konsentrasi KOH terhadap Sifat Fisis dari Elektroda Karbon Aktif Ampas Biji Kopi <i>Robusta</i>	16
4.1.1	Analisa Densitas	16
4.1.2	Karakterisasi <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	18
4.1.3	Karakterisasi <i>Energy Dispersive X-Ray</i> (EDX).....	20
4.1.4	Analisa Serapan Gas N ₂	21
4.2	Pengukuran Sifat Elektrokimia Karbon Aktif Ampas Biji Kopi <i>Robusta</i>	25
4.2.1	Metoda <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV).....	25
4.2.2	Metoda <i>Galvanostatic Charge-Discharge</i> (GCD).....	28
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN.....		31
5.1	Kesimpulan.....	31
5.2	Saran.....	31
DAFTAR PUSTAKA		32
LAMPIRAN		42

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1	Komposisi Kimia Ampas Biji Kopi 9
Tabel 4.1	Luas permukaan spesifik, ukuran pori rata-rata dan volume pori pada karbon aktif ampas biji kopi <i>robusta</i> 22
Tabel 4.2	Hasil pengukuran nilai kapasitansi spesifik, rapat energi, dan rapat daya pada laju paemindaian 1 mV/s menggunakan konsentrasi aktivator yang berbeda 28
Tabel 4.3	Pengaruh variasi konsentrasi terhadap nilai kapasitansi spesifik dan resistansi 30



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Mekanisme kerja superkapasitor dalam keadaan (a) <i>Charge</i> ; (b) <i>Discharge</i>	7
Gambar 2.2 Kurva CV	11
Gambar 2.3 Kurva GCD	12
Gambar 4.1 Grafik perubahan denstitas elektroda karbon sebelum dan sesudah proses karbonisasi	16
Gambar 4.2 Hasil Karakterisasi SEM karbon aktif ampas biji kopi <i>robusta</i> menggunakan konsentrasi aktivator KOH 0,3 M pada perbesaran (a) 5000 x dan (b) 60.000 x	18
Gambar 4.3 Hasil Karakterisasi EDX karbon aktif ampas biji kopi <i>robusta</i> menggunakan konsentrasi aktivator KOH 0,3 M	20
Gambar 4.4 Kurva isothermal gas N ₂	23
Gambar 4.5 Distribusi ukuran pori karbon aktif ampas biji kopi <i>robusta</i>	25
Gambar 4.6 Kurva <i>cyclic voltammetry</i> dari elektroda karbon aktif ampas biji kopi <i>robusta</i> pada laju pemindaian 1 mVs ⁻¹	26
Gambar 4.7 Grafik hubungan nilai kapasitansi karbon aktif dari ampas biji kopi <i>robusta</i> menggunakan variasi laju pemindaian	27
Gambar 4.8 Kurva <i>charge-discharge</i> elektroda karbon aktif ampas biji kopi <i>robusta</i> pada kerapatan arus 1 A/gr.	29

DAFTAR SINGKATAN

EDLC	: <i>Electric Double Layer Capacitor</i>
KOH	: Kalium Hidroksida
ZnCl ₂	: Zink Klorida
MgCl ₂	: Magnesium Klorida
CO ₂	: Karbon Dioksida
H ₂ SO ₄	: Asam Sulfat
H ₃ PO ₄	: Asam Pospat
HCl	: Asam Klorida
NaOH	: Natrium Hidroksida
N ₂	: Nitrogen
SEM-EDX	: <i>Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray</i>
CV	: <i>Cyclic Voltammetry</i>
GCD	: <i>Galvanostatic Charge-Discharge</i>
SAA	: <i>Surface Area Analyzer</i>
BET	: Brunauer-Emmett-Teller
BJH	: Barrett-Joyner Halenda



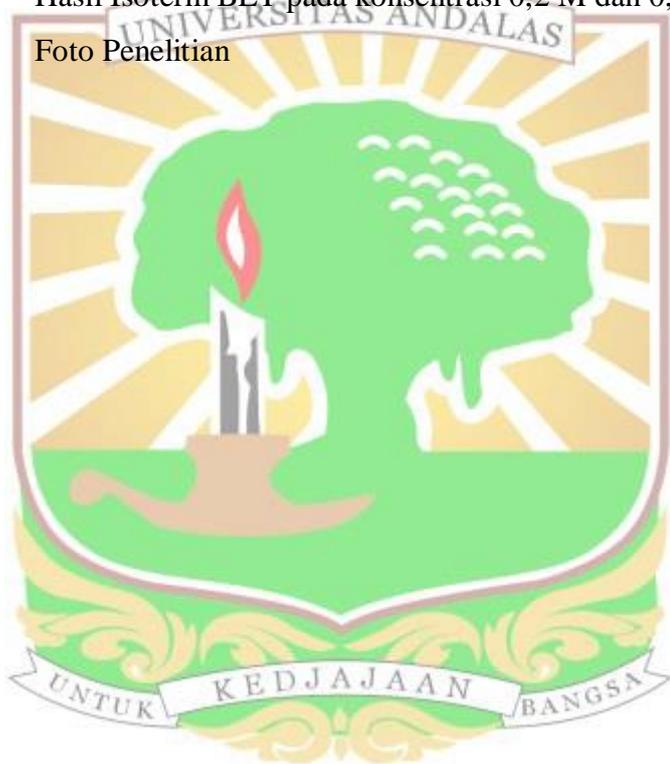
DAFTAR SIMBOL

C	: Kapasitansi (F)
A	: Luas penampang (m^2)
Q	: Muatan (C)
Csp	: Kapasitansi spesifik (Fg^{-1})
R	: Hambatan (Ω)
m	: Massa pelet (g)
v	: Volume pelet (cm^{-3})
E	: Kerapatan energi ($Wh\ kg^{-1}$)
P	: Kerapatan daya ($W\ kg^{-1}$)
V	: Tegangan (V)
S	: Laju pemindaian (mVs^{-1})
I	: Arus (A)
Ic	: Arus pengisian (A)
Id	: Arus pengosongan (A)
t	: Waktu (s)



DAFTAR LAMPIRAN

		Halaman
Lampiran 1	Skema Kerja	42
Lampiran 2	Perhitungan Pembuatan Larutan KOH	45
Lampiran 3	Perhitungan Kapasitansi Spesifik menggunakan Metode GCD	46
Lampiran 4	Data Pengukuran Densitas	48
Lampiran 5	Hasil Karakterisasi <i>Energy Dispersive X-Ray</i> (EDX)	51
Lampiran 6	Hasil Isoterm BET pada konsentrasi 0,2 M dan 0,3 M	52
Lampiran 7	Foto Penelitian	53



BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada zaman yang serba modern ini, teknologi berpengaruh besar dalam menunjang kehidupan manusia sebagai piranti penyimpanan energi listrik. Contohnya laptop, television, dan telepon yang biasa kita gunakan sehari-hari. Teknologi ini membutuhkan baterai sebagai piranti penyimpanan energi (Riyanto, 2014). Selain baterai, para peneliti telah berusaha untuk mengembangkan energi yang berkelanjutan untuk menyimpan dan memanfaatkan energi secara efisien serta ramah lingkungan. Salah satu produk inovasi teknologi penyimpanan energi yang mampu menyimpan energi dalam jumlah yang besar dan memiliki waktu hidup yang lebih lama serta ramah lingkungan adalah superkapasitor.

Superkapasitor merupakan perangkat penyimpanan energi yang berbeda dari baterai, sel bahan bakar, dan kapasitor (Taer *et al.* 2018). Superkapasitor ini telah menarik banyak perhatian karena kerapatan daya yang tinggi, laju *charge-discharge* yang cepat, dan siklus hidup yang panjang (Chiu dan Lin, 2019). Prinsip kerja dari superkapasitor ini adalah memanfaatkan bahan-bahan yang memiliki luas permukaan yang besar sebagai elektroda sehingga dapat meningkatkan performanya. Berbagai kategori bahan berbasis karbon, seperti *carbon nanotube* (He *et al.* 2017), *carbon nanofibers* (Wang *et al.* 2017) dianggap sebagai elektroda yang menjanjikan untuk sel superkapasitor (Boyjoo *et al.* 2017).

Bahan karbon banyak digunakan sebagai bahan aktif untuk superkapasitor karena prekursor karbon berbiaya rendah dan melimpah dialam (Baojun dan Chang, 2016), selain itu karbon aktif juga memiliki luas permukaan yang besar, porositas tinggi dan konduktivitas listrik yang baik. Karbon Aktif juga dapat menyimpan muatan melalui adsorpsi fisik dan desorpsi ion elektrolit pada permukaan elektroda (Chiu dan Lin, 2019).

Selama beberapa tahun terakhir, sejumlah literatur telah diterbitkan mengenai penggunaan bahan karbon berpori berbasis biomassa (Inal *et al.* 2015) sebagai bahan elektroda superkapasitor (Zhong *et al.* 2015). Beberapa contoh bahan biomassa yang telah digunakan yaitu cangkang kelapa sawit (Aziz *et al.* 2016), cangkang biji karet (Pagketananga *et al.* 2015), batang jagung (Yuhe dan Keliang,

2016), serat kelapa (Yin dan Chen, 2016) dan masih banyak lainnya. Para peneliti selalu fokus pada peningkatan kemampuan penyimpanan energi yang dihasilkan dari biomassa baru (Chiu dan Lin, 2019), karena masih terdapat beberapa limbah lain yang penggunaannya belum dimaksimalkan sebagai bahan elektroda superkapasitor. Salah satu bahan yang memiliki peluang besar sebagai sumber karbon aktif berpori adalah ampas biji kopi *Robusta*, karena selama ini penelitian tentang pemanfaatan ampas biji kopi *Robusta* sebagai elektroda superkapasitor belum optimal. Selain bersifat alami dan tidak beracun, ampas biji kopi juga merupakan salah satu limbah yang paling banyak ditemukan dalam kehidupan sehari-hari (Chiu dan Lin, 2019).

Secara umum, pemanfaatan ampas biji kopi *robusta* dipilih karena provinsi Aceh sudah terkenal sebagai provinsi dengan produksi dan konsumsi kopi *robusta* terbesar di negara ini. Ini bisa dilihat dari banyaknya kedai kopi yang tersebar di setiap provinsi di Indonesia. Setiap hari, kedai-kedai tersebut menghasilkan limbah biji kopi dalam jumlah yang besar tanpa adanya upaya untuk mengubahnya menjadi berbagai produk berharga. (Mariana *et al.* 2018). Selain itu, secara teoritis ampas biji kopi juga mengandung karbohidrat (38–42%), melanoidin (23%), lipid (11–17%), dan komponen lainnya. Senyawa ini sangat cocok dijadikan sebagai sumber pembuatan karbon aktif sebagai elektroda superkapasitor (Esquivel dan Jimenez, 2012).

Sebelumnya, pemanfaatan ampas biji kopi sebagai bahan dasar elektroda superkapasitor telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Salah satunya oleh Philipp dkk pada tahun 2021 mengenai pembuatan karbon aktif yang *didopping* menggunakan oksida logam dari limbah roti dan ampas biji kopi. Karbon aktif yang *didopping* oleh oksida logam disintesis menggunakan Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , dan MnO_2 . Untuk karbon aktif yang dihasilkan dari limbah roti didapatkan nilai kapasitansi spesifik sebesar $40,3 \text{ Fg}^{-1}$ sedangkan untuk karbon aktif yang dihasilkan dari ampas biji kopi, didapatkan nilai kapasitansi spesifik sebesar 87 Fg^{-1} . Namun, nilai kapasitansi yang didapatkan perlu ditingkatkan menggunakan serangkaian metoda aktivasi yang berbeda agar dapat meningkatkan kinerja elektrokimia dari superkapasitor (Philipp *et al.* 2021).

Pada tahun 2019, Yi Han Chiu dkk melakukan penelitian mengenai pembuatan elektroda superkapasitor dari karbon aktif ampas biji kopi menggunakan 6 aktivator yang berbeda yaitu H_3PO_4 , HCl , FeCl_3 , ZnCl_2 , NaOH dan KOH . Peneliti juga mengamati sifat fisik dari gugus fungsi hidrofobik dan hidrofilik, luas permukaan dan volume pori untuk karbon aktif yang dibuat menggunakan aktivator yang berbeda. Elektroda karbon aktif yang dibuat menggunakan aktivator KOH menghasilkan nilai kapasitansi spesifik tertinggi yaitu sebesar $105,3 \text{ Fg}^{-1}$ dengan luas permukaan spesifik $1250 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$. Bisa dilihat bahwa kinerja elektrokapasitif KOH lebih baik dibandingkan dengan aktivator lainnya (Chiu dan Lin, 2019).

Pada tahun 2021, Alberto dkk juga memanfaatkan karbon aktif dari ampas biji kopi sebagai elektroda superkapasitor menggunakan aktivator KOH pada perbandingan massa sampel dan KOH sebesar 1 : 1,5. Karbonisasi yang dilakukan pada penelitian ini dilakukan menggunakan gas inert N_2 . Dari pengukuran sifat elektrokimia yang dilakukan menggunakan metode *cyclic voltammetry*, didapatkan nilai kapasitansi spesifik sebesar 84 Fg^{-1} dengan luas permukaan sebesar $585 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ (Alberto *et al.* 2021).

Selain biomassa ampas biji kopi, beberapa penelitian telah dilakukan mengenai pembuatan elektroda superkapasitor dari beberapa biomassa yang berbeda menggunakan aktivator KOH . Menurut (Li *et al.* 2018), dibandingkan dengan zat pengaktif lainnya, kalium hidroksida (KOH) merupakan zat pengaktif yang paling efektif dan ramah lingkungan sehingga lebih disukai dalam proses aktivasi kimiawi untuk pembuatan karbon aktif berpori.

Salah satu penelitian mengenai pembuatan elektroda superkapasitor menggunakan aktivator KOH dilakukan oleh Taer dkk pada tahun 2018. Penelitian ini menggunakan karbon aktif monolit dari biomassa batang bambu yang diaktivasi dengan variasi konsentrasi aktivator ZnCl_2 dan KOH sebesar 0,1 M, 0,3 M, 0,5 M, dan 0,7 M. Untuk aktivator ZnCl_2 didapatkan nilai kapasitansi spesifik tertinggi pada konsentrasi 0,3 M yaitu sebesar 63 Fg^{-1} sedangkan untuk aktivator KOH didapatkan nilai kapasitansi spesifik tertinggi pada konsentrasi 0,5 M yaitu sebesar 73 Fg^{-1} . Hal ini dikarenakan terjadinya perubahan ukuran pori

rata-rata paling optimal dari mikropori ke mesopori pada konsentrasi tersebut (Taer *et al.* 2018).

Pada tahun 2019, Perdana dkk juga melakukan penelitian menggunakan biomassa cangkang kelapa sawit yang diaktivasi oleh KOH pada perbandingan 1:3, 1:4, 1:5. Didapatkan nilai kapasitasansi spesifik tertinggi pada perbandingan 1:5 yaitu sebesar $99,151 \text{ Fg}^{-1}$ dengan luas permukaan spesifik sebesar $793,326 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$. Hal ini disebabkan karena pembentukan mikropori oleh aktivator KOH pada perbandingan 1:5 lebih besar. Sedangkan pada perbandingan 1:3 dan 1:4, nilai kapasitasansinya menurun dikarenakan jumlah KOH yang sedikit menyebabkan jumlah pori yang terbentuk pada proses aktivasi belum sempurna dan luas permukaan yang dihasilkan kecil (Perdana *et al.* 2019). Dapat disimpulkan bahwa semakin banyak struktur mikropori yang terbentuk maka akan semakin besar luas permukaan spesifik karbon aktif yang dihasilkan.

Dari beberapa penelitian yang sudah dilakukan menggunakan beberapa bahan biomassa dan aktivator yang berbeda, kapasitasansi yang dihasilkan masih perlu ditingkatkan. Oleh karna itu, dibutuhkan penelitian lebih lanjut menggunakan metoda yang berbeda dari penelitian sebelumnya agar didapatkan nilai kapasitasansi yang lebih optimal. Pada penelitian ini, telah dilakukan pembuatan elektroda superkapasitor berbahan dasar karbon aktif dari ampas biji kopi *robusta* menggunakan variasi konsentrasi aktivator KOH sebesar 0,2 M, 0,3 M, dan 0,5 M. Hal ini bertujuan untuk melihat pengaruh konsentrasi aktivator KOH terhadap nilai kapasitasansi spesifik yang dihasilkan.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh variasi konsentrasi aktivator KOH terhadap struktur pori dan luas permukaan dari karbon aktif ampas biji kopi *Robusta*?
2. Bagaimana kinerja dari karbon aktif ampas biji kopi *Robusta* yang dihasilkan sebagai bahan elektroda superkapasitor?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mempelajari kondisi pembuatan karbon aktif dari ampas biji kopi *Robusta* menggunakan variasi konsentrasi aktivator KOH dan hubungannya dengan karakteristik pori dari karbon aktif yang dihasilkan.
2. Mempelajari pengaruh penggunaan elektroda dari karbon aktif yang dihasilkan terhadap kinerja atau karakteristik elektrokimia sel superkapasitor.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah dapat mengeksplorasi ampas biji kopi *Robusta* sebagai bahan dasar untuk membuat elektroda superkapasitor yang selama ini belum dimanfaatkan secara optimal serta memberikan metoda alternatif dalam pemenuhan alat penyimpan energi terbarukan dengan kapasitas dan rapat daya yang relatif tinggi.



BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

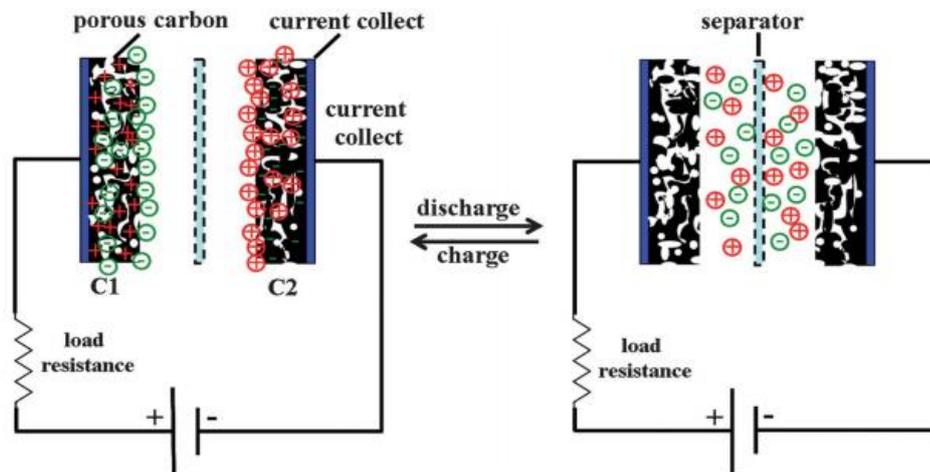
2.1 Superkapasitor

Superkapasitor merupakan perangkat penyimpanan energi yang menarik karena memiliki keunggulan *charge-discharge* yang cepat, kerapatan daya yang tinggi, dan siklus hidup yang panjang (Rajasekaran *et al.* 2020). Umumnya, superkapasitor dapat dibagi menjadi 2 yaitu *pseudocapacitors* dan *electric double-layer capacitors* (EDLC). Secara umum, mekanisme penyimpanan energinya berbeda (Jiang *et al.* 2013). Berdasarkan reaksi redoks Faradaic, bahan *pseudocapacitor* seperti RuO_2 (Patil *et al.* 2011), NiO (Yuan *et al.* 2009), Ni(OH)_2 (Ji *et al.* 2013) dan MnO_2 (Chen *et al.* 2010) biasanya menunjukkan kapasitansi spesifik yang tinggi. Namun, reaksinya yang tidak stabil dapat menyebabkan degradasi pada kinerjanya (Huang *et al.* 2014). Di sisi lain, EDLC menyerap dan mengisi daya melalui permukaan lapisan ganda, di mana muatan dalam elektrolit tersebut secara fisik teradsorpsi pada permukaan elektroda (Jiang *et al.* 2013).

Superkapasitor terdiri dari dua plat elektroda yang direndam dalam larutan elektrolit dan dipisahkan oleh membran berpori. Bahan elektroda superkapasitor tidak hanya memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi tetapi juga memiliki struktur pori yang besar untuk akses ion dari larutan ke permukaan elektroda. Kapasitansi spesifik dari superkapasitor tidak hanya diatur oleh luas permukaan elektroda tetapi juga oleh faktor lain yaitu porositas (Xi dan An, 2014). Pada superkapasitor, muatan listrik disimpan berdasarkan interaksi elektrostatik dalam lapisan ganda listrik pada permukaan elektroda (Merlet *et al.* 2012).

Superkapasitor juga dapat digunakan dalam aplikasi kendaraan listrik sebagai perangkat penyimpanan energi saat dikombinasikan dengan baterai atau sel bahan bakar (Taer *et al.* 2018). Saat ini, sel superkapasitor banyak diteliti dan dikembangkan untuk mengisi celah energi antara kapasitor dan baterai. Penyimpanan energi dalam sel superkapasitor terjadi karena pembentukan pasangan elektron dan ion di daerah meso- dan mikropori dari elektroda karbon yang terjadi pada batas elektroda dan elektrolit (Sharma dan Bhatti, 2010). Beberapa ion dan pasangan elektron terbentuk sehingga lebih banyak energi yang dapat disimpan. Bentuk dan ukuran elektroda karbon berpori merupakan faktor

kunci dalam menentukan karakteristik energi dan daya yang dihasilkan (Gonzalez *et al.* 2016). Proses *charge* (penyimpanan muatan) dan *discharge* (pelepasan muatan) pada superkapasitor dapat dijelaskan pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 Mekanisme kerja superkapasitor dalam keadaan (a) Charge; (b) Discharge (Xi dan An, 2014)

2.2 Karbon Aktif

Karbon aktif telah menjadi pilihan bahan elektroda yang ideal, dibandingkan dengan bentuk karbon lainnya karena sifatnya yang ramah lingkungan dan biaya yang rendah (Gu dan Yushin, 2013). Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian yang signifikan telah dilakukan untuk menyiapkan karbon aktif dari berbagai produk pertanian seperti rumput laut, tempurung kelapa, serbuk gergaji, biji pinus, kulit kastanye, kulit biji bunga matahari, limbah daun teh, dan lain-lain (Rajasekaran *et al.* 2020). Limbah tersebut dapat diubah menjadi karbon aktif melalui proses aktivasi fisik (Liu *et al.* 2016) dan aktivasi kimia (Amuda *et al.* 2007). Dalam proses aktivasi fisik, misalnya aktivasi gas CO_2 , uap atau campuran gas digunakan dalam pembuatan karbon aktif. Dalam proses aktivasi kimia, prekursor karbon yang diturunkan dari biomassa dicampur dengan pereaksi kimia seperti H_3PO_4 , FeCl_3 , KOH , H_2SO_4 , NaOH dan ZnCl_2 (Rajasekaran *et al.* 2020).

Karbon aktif yang berasal dari bahan biomassa pertanian memiliki sejumlah besar heteroatom seperti gugus fungsi O dan N yang dapat meningkatkan nilai kapasitansi. Distribusi ukuran pori yang optimal, seperti mikropori, mesopori, dan

makropori pada karbon berpori, dapat memperpendek jalur difusi ion elektrolitik ke area permukaan pori (Asim *et al.* 2018). Berdasarkan ukurannya, pori-pori dibedakan atas 3 jenis, yaitu :

1. Mikropori adalah pori-pori dengan ukuran lebih kecil dari 2 nm.
2. Mesopori adalah pori-pori dengan ukuran 2-50 nm.
3. Makropori adalah pori-pori dengan ukuran lebih besar dari 50 nm (Rufford *et al.* 2009).

Secara khusus, jumlah mesopori sangat penting untuk mempercepat transportasi ion dan meningkatkan luas permukaan. Selain itu, keberadaan heteroatom seperti O, N dan P atau S pada karbon tersebut dianggap sebagai strategi yang menjanjikan untuk meningkatkan kemampuan penyimpanan energi kapasitor elektrokimia (Asim *et al.* 2018). Menurut Marsh (2006), karbon tidak pernah bebas dari oksigen kecuali dalam keadaan ekstrim, dimana terjadi pembakaran disekitar suhu 950°C dalam keadaan vakum atau adanya hydrogen dan pendinginan (Marsh *et al.* 2006). Pada superkapasitor, karbon aktif biasanya digunakan sebagai elektroda negatif dan positif sedangkan polimer padat digunakan sebagai elektrolit dan pemisah antara katoda dan anoda (Liew *et al.* 2015).

2.3 Karbon Aktif dari Ampas Biji Kopi *Robusta*

Aceh merupakan salah satu wilayah penghasil kopi terbesar di Indonesia. Pada umumnya, buah kopi terdiri dari kulit buah, daging, dan biji. Bagian biji kopi biasanya dimanfaatkan menjadi minuman penyegar sedangkan bagian buah lainnya tidak digunakan dan akan terbuang sebagai limbah dari hasil pengolahan kopi. Di Provinsi Aceh, khususnya di Banda Aceh, minuman kopi dibuat secara tradisional dengan menuangkan air mendidih melalui kantung penyaring tekstil kecil yang berisi ampas biji kopi. Kopi yang lebih pekat dapat diperoleh dengan menuangkan filtratnya secara terus-menerus melalui kantong filter. Selama pembuatan kopi, air meresap ke dalam biji kopi dengan melalui proses sangrai dan didalam biji kopi tersebut dapat membentuk tekstur mikropori ataupun makropori. Limbah dari biji kopi ini yang akan dimanfaatkan sebagai bahan prekursor karbon aktif untuk elektroda superkapasitor. Hampir 50 % karbohidrat

yang terkandung dalam ampas biji kopi, yang mana karbohidrat inilah yang akan berperan penting sebagai sumber karbon (Mariana dan Mulana, 2018). Komposisi kimiawi dari ampas biji kopi dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 2.1 Komposisi kimia ampas biji kopi

Komposisi Kimia	Kadar (%)
Karbohidrat	38-42
Melanoidin	23
Lemak	11-17
Protein	10
Mineral	4,5-4,7
Asam alifatik	2,4-2,5
Kafein	1,3-2,4

2.4 Kapasitansi

Kapasitansi merupakan faktor penting untuk superkapasitor karena menunjukkan berapa banyak energi yang dapat disimpan (Sun *et al.* 2016). Kapasitansi bergantung pada bentuk dan ukuran konduktor dan akan bertambah bila ada sebuah material pengisolasi atau dielektrik. Kapasitansi diukur berdasarkan besar muatan yang dapat disimpan pada suatu kenaikan tegangan dan dapat dilihat pada persamaan berikut :

$$C = \frac{Q}{V} \quad (1)$$

dimana, C adalah kapasitansi, Q adalah muatan yang diberikan pada plat, dan V adalah tegangan yang diberikan (Abioye dan Ani, 2015). Nilai Kapasitansi spesifik (C_{sp}) untuk satu elektroda dalam superkapasitor dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$C_{sp} = \frac{I_c - I_d}{S_{xm}} \quad (2)$$

dimana C_{sp} adalah kapasitansi spesifik, I_c adalah arus pada saat pengisian, I_d adalah arus pada saat pengosongan, S adalah laju pemindaian, dan m adalah massa elektroda karbon aktif (Chen dan Dai, 2013).

Pada superkapasitor, kerapatan energi bergantung pada kapasitansi dan voltasenya. Jika salah satu atau keduanya dinaikkan maka rapat energi akan meningkat. Dapat dilihat pada persamaan berikut ini :

$$E = \frac{1}{2} Csp V^2 \quad (3)$$

Dimana E adalah kerapatan energi, C adalah nilai kapasitansi dan V adalah tegangan (Abioye dan Ani, 2015). Kerapatan daya (P) dapat dilihat pada persamaan berikut :

$$P = \frac{E}{\Delta t} \quad (4)$$

dimana Rs adalah resistansi dari superkapasitor, dan ini dipengaruhi oleh :

- Resistansi elektronik dari elektroda
- Hambatan antara elektroda dan kolektor arus
- Ketahanan elektrolit
- Resistensi ionik ion yang bergerak dalam pori-pori kecil, dan
- Resistensi ionik yang bergerak melalui pemisah (Li dan Wei, 2013).

2.5 Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX)

Scanning Elektron Microscopy (SEM) dan *Energy Dispersive X-Ray* (EDX) merupakan alat yang digunakan untuk mengetahui morfologi permukaan suatu senyawa padatan dan komposisi unsur kimia yang terdapat dalam suatu senyawa. *Scanning Elektron Microscopy* (SEM) merupakan suatu tipe mikroskop elektron yang menggambarkan permukaan sampel melalui proses *scan* dengan menggunakan elektron sebagai pengganti cahaya untuk melihat benda dengan resolusi tinggi (Gunawan dan Azhari, 2010).

Energy Dispersive X-ray (EDX) digunakan untuk mengetahui kandungan unsur kimia dari suatu material. Prinsip kerja dari EDX yaitu menangkap dan mengolah sinyal fluoresensi sinar X yang dikeluarkan oleh sampel. Apabila teknik SEM dan EDX digabungkan, maka keduanya dapat dipakai untuk mengidentifikasi unsur-unsur yang dimiliki oleh fasa yang terlihat pada struktur mikro (Barmawi *et al.* 2012).

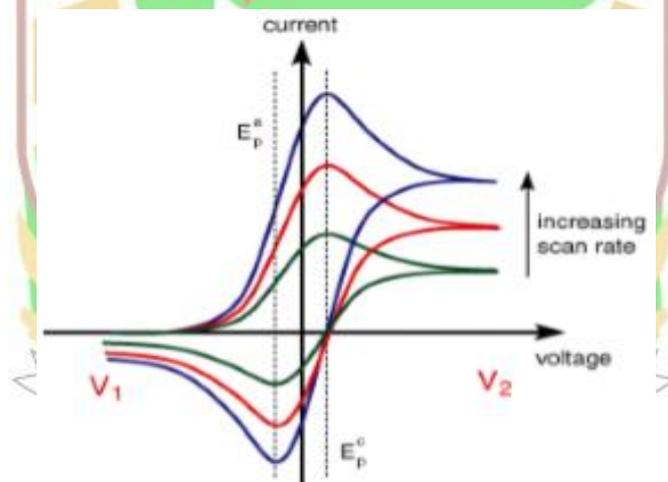
2.6 Surface Area Analyzer (SAA)

Surface Area Analyzer (SAA) merupakan salah satu alat utama dalam karakterisasi material. Alat ini khususnya digunakan untuk metoda BET dan BJH

sebagai karakterisasi luas permukaan, distribusi pori, adsorpsi, desorpsi dan volume suatu material (Grandys *et al.* 2004). Untuk mengetahui karakteristik karbon aktif yang diperoleh maka dilakukan karakterisasi fisik yaitu analisa luas permukaan dan distribusi ukuran pori. Analisa ini menggunakan metoda yang ada pada SAA. Analisa luas permukaan dilakukan dengan adsorpsi gas N_2 melalui metode Brunauer-Emmett-Teller (BET), sedangkan distribusi ukuran pori dianalisa menggunakan metode Barrett-Joyner Halenda (BJH) (Siti *et al.* 2015).

2.7 Cyclic Voltammetry (CV)

Voltametri siklik merupakan pengukuran elektrokimia potensiodinamik dimana pada masing-masing elektroda kerja diberikan potensial dalam arah yang berlawanan untuk kembali kepotensial awalnya. Siklus ini dapat diulang berkali-kali. Hasil voltammogram siklik memberikan plot potensial dengan arus yang dapat dihitung menjadi nilai kapasitansi dari superkapasitor (Kamikuri *et al.* 2014).



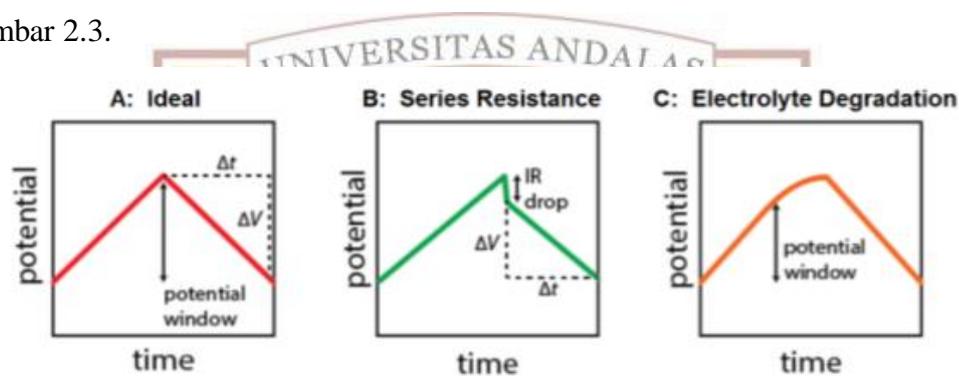
Gambar 2.2 Kurva CV (Climent dan Feliu, 2018)

Voltametri siklik (CV) Umumnya digunakan untuk studi proses redoks, dalam analisis reaksi elektrokimia antara ion dan atom pada permukaan elektroda untuk memahami reaksi intermediet dalam memperoleh stabilitas reaksi produk, untuk informasi kualitatif tentang mekanisme reaksi elektroda, sifat kualitatif dari reaksi transfer muatan antara ion elektrolit dan elektron dari permukaan elektroda (Sangeeta *et al.* 2018). Prinsip pengukuran CV adalah memberikan tegangan ke elektroda antara dua batas tegangan dan mengukur arus yang dihasilkan. Pada

superkapasitor, CV digunakan untuk menghitung kapasitansi spesifik elektrodanya.

2.8 Galvanostatic Charge-Discharge (GCD)

GCD merupakan salah satu metode pengukuran yang sering digunakan untuk mengevaluasi sifat elektrokimia superkapasitor. Superkapasitor dibebankan dan dilepaskan antara dua titik tegangan yang ditentukan pada arus konstan. Idealnya, plot tegangan yang dihasilkan dari waktu ke waktu adalah linier, dengan kemiringan positif dan negatif bolak-balik, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Kurva GCD (Kampouris *et al.* 2015)

Penyimpangan liniaritas dapat terjadi akibat peningkatan tegangan tiap pertambahan waktu, dengan resistansi seri yang menyebabkan tegangan sel turun dengan cepat (penurunan IR) saat beralih dari pengisian daya ke pengosongan. Selain itu, degradasi elektrolit atau reaksi redoks lainnya akan menghasilkan plot kurva tinggi atau titik belok pada plot tegangan. Dalam pengukuran ini, nilai kapasitansi spesifik dapat dihitung menggunakan persamaan berikut ini :

$$C_{sp} = \frac{(I \cdot \Delta t)}{(m \cdot \Delta V)} \quad (5)$$

Dimana I adalah arus pengisian, Δt adalah waktu pengosongan, ΔV adalah tegangan dan m adalah massa dari elektroda karbon aktif (Wang *et al.* 2010).

BAB III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan mulai dari bulan Februari 2021 sampai bulan Mei 2021 di Laboratorium Elektrokimia/Fotokimia Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Andalas dan Laboratorium Fisika Material Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Riau. Penggunaan *Furnace N₂*, pengukuran *Cyclic Voltammetry (CV)*, dan pengukuran *Galvanostatic Charge-Discharge (GCD)* dilakukan di laboratorium Jurusan Fisika Universitas Riau. Karakterisasi *Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX)* dan *Surface Area Analyzer (SAA)* dilakukan di Laboratorium Teknik Kimia Institut Teknologi Surabaya.

3.2 Alat

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini adalah *hot plate (IKA'C-MAG HS4)*, timbangan digital, *oven, furnace N₂ (Nabertherm)*, plat *stainless steel, ball milling, Hydraulic Press*, jangka sorong, ampelas, kertas pH dan peralatan gelas laboratorium.

3.3 Bahan

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah ampas biji kopi *robusta* (diambil dari warung kopi Aceh di Provinsi Nanggroe Aceh Darussalam), asam sulfat (H_2SO_4) p.a, kalium hidroksida (KOH) (Merck), membran cangkang telur, HCl dan aquades.

3.4 Prosedur Kerja

3.4.1 Preparasi Ampas Biji Kopi *Robusta*

Ampas biji kopi *robusta* dicuci dengan aquades dan dikeringkan pada suhu ruang. Sampel yang sudah bersih dikeringkan dalam oven pada suhu 110°C. Setelah itu ampas biji kopi *robusta* dihaluskan dengan *ball milling* dan diayak menggunakan ayakan berukuran 38 µm. Selanjutnya sampel disiapkan untuk proses aktivasi.

3.4.2 Proses Aktivasi Ampas Biji Kopi *Robusta*

Proses aktivasi dilakukan dengan mencampurkan sampel ampas biji kopi *robusta* dan KOH menggunakan variasi konsentrasi KOH 0,2 M, 0,3 M, dan 0,5 M.

Aktivator KOH ditimbang sesuai dengan konsentrasi yang diinginkan dan dilarutkan dalam 100 mL aquades. Kemudian ampas biji kopi *robusta* ditimbang sebanyak 20 g dan dicampurkan dengan larutan KOH yang sudah disiapkan, diaduk sampai homogen selama 3 jam pada kecepatan 300 rpm dengan suhu 80°C. Setelah itu, campuran didinginkan pada suhu kamar dan dikeringkan dalam oven pada suhu 110°C untuk menghilangkan kadar air.

3.4.3 Pembuatan Pelet Elektroda Superkapasitor

Campuran yang sudah kering dihaluskan dan ditimbang sebanyak 0,7 g kemudian dicetak menjadi pelet menggunakan *hidroulic press* dengan tekanan sebesar 8 ton dan ditahan selama 2 menit. Pelet yang sudah terbentuk ditimbang massanya dan diukur diameter serta ketebalannya. Setelah itu pelet dibungkus dengan tisu dan ditempatkan dalam wadah untuk dikarbonisasi dengan *furnace* dibawah atmosfer N₂.

3.4.4 Proses Karbonisasi Pelet Elektroda Superkapasitor

Proses karbonisasi dilakukan dengan laju pemanasan 5°C/menit dibawah atmosfer N₂ kemudian dipanaskan secara bertingkat dengan suhu awal 400°C lalu ditahan selama 1 jam dan suhu dinaikkan 600°C kemudian ditahan lagi selama 1 jam dan suhu dinaikkan lagi hingga 800°C dan ditahan selama 1,5 jam.

3.4.5 Preparasi Sel Superkapasitor

Setelah selesai di karbonisasi, pelet ditimbang dan diukur lagi ketebalan dan diameternya. Setelah itu dinetralkan dengan aquades hingga pH 7 dan dikeringkan dalam oven pada suhu 110 °C. Kemudian pelet dipoles dengan amplas untuk memperkecil luas permukaan dan mengurangi ketebalan elektroda karbon dengan ketebalan sekitar 0,2 mm dan diameter sekitar 8 mm. Setelah mendekati ukuran yang diinginkan maka sampel ditimbang dan direndam ke dalam larutan elektrolit H₂SO₄ selama 2 hari.

3.4.6 Pembuatan Separator

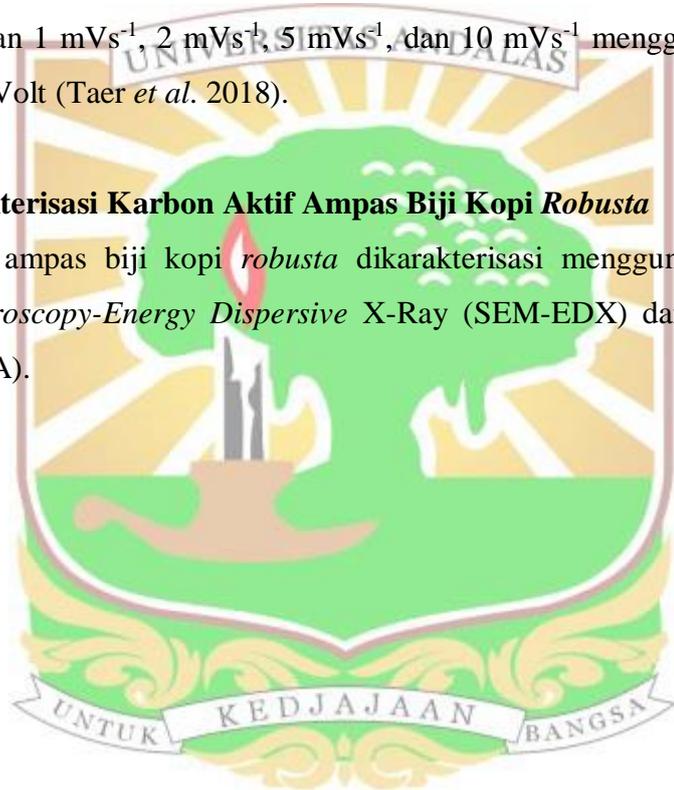
Cangkang telur direndam dalam larutan HCl 1 M selama 2 hari. Kemudian membran telur dipisahkan dari cangkangnya. Setelah itu, membran dicuci dengan aquades hingga pHnya netral dan dipotong dengan ukuran 1x1 cm.

3.4.7 Pengukuran Sifat Elektrokimia dari Rangkaian Superkapasitor

Sifat elektrokimia diukur dengan *cyclic voltammetry* dan *galvanostatic charge-discharge* menggunakan 2 elektroda yang diapit oleh *plat stainless* sebagai *current collector*. Kedua elektroda tersebut disusun seperti *sandwich* dan dibagian tengahnya diberikan separator sebagai pemisah. Sifat elektrokimia ini diukur pada laju pemindaian 1 mVs^{-1} , 2 mVs^{-1} , 5 mVs^{-1} , dan 10 mVs^{-1} menggunakan rentang tegangan 0-1 Volt (Taer *et al.* 2018).

3.4.8 Karakterisasi Karbon Aktif Ampas Biji Kopi *Robusta*

Karbon aktif ampas biji kopi *robusta* dikarakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX)* dan *Surface Area Analyzer (SAA)*.

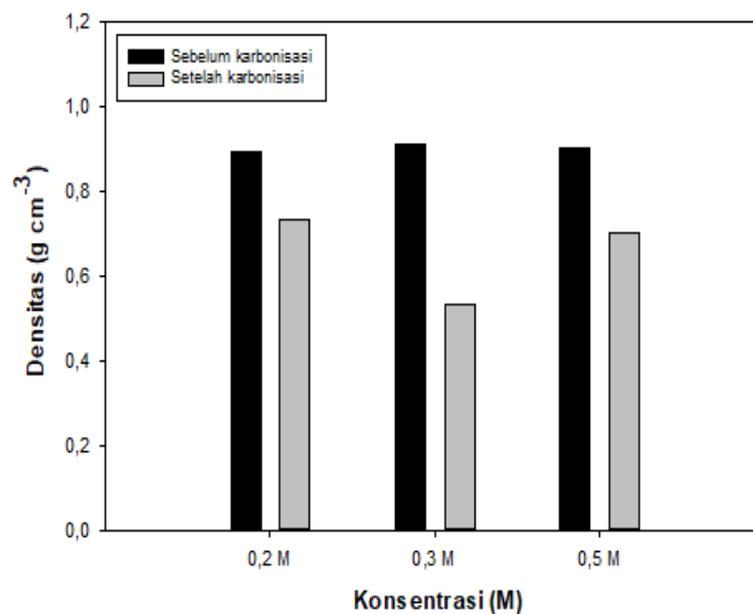


BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengaruh Variasi Konsentrasi KOH terhadap Sifat Fisis dari Elektroda Karbon Aktif Ampas Biji Kopi *Robusta*

4.1.1 Analisa Densitas

Densitas dihitung berdasarkan pengukuran massa dan dimensi pelet karbon aktif sebelum dan sesudah proses karbonisasi. Menurut Taer dkk (2018), densitas dipengaruhi oleh proses karbonisasi yang dapat menghilangkan senyawa tidak murni seperti kadar air, oksigen, nitrogen, dan senyawa volatil lainnya. Ini diikuti dengan pemecahan rantai karbon dari senyawa yang lebih kompleks sehingga menyebabkan pori-pori melebar dan menghasilkan pori-pori baru pada elektroda karbon aktif (Raymundo *et al.* 2015). Gambar 4.1 menunjukkan densitas elektroda karbon aktif ampas biji kopi *robusta* sebelum dan sesudah proses karbonisasi menggunakan variasi konsentrasi aktivator KOH.



Gambar 4.1 Grafik perubahan densitas elektroda karbon sebelum dan sesudah proses karbonisasi

Densitas elektroda pada konsentrasi 0,2 M, 0,3 M dan 0,5 M sebelum proses karbonisasi masing-masingnya adalah 0,89 gcm⁻³, 0,91 gcm⁻³, dan 0,90 gcm⁻³ sedangkan setelah proses karbonisasi adalah 0,73 gcm⁻³, 0,53 gcm⁻³, dan 0,70 gcm⁻³. Densitas elektroda setelah proses karbonisasi terlihat menurun dari konsentrasi 0,2 M ke 0,3 M dan meningkat pada konsentrasi 0,5 M. Perubahan densitas yang hampir sama juga terjadi pada bahan biomassa lainnya menggunakan aktivator KOH seperti *pandanus tectorius* 0,84 gcm⁻³ (Taer *et al.*

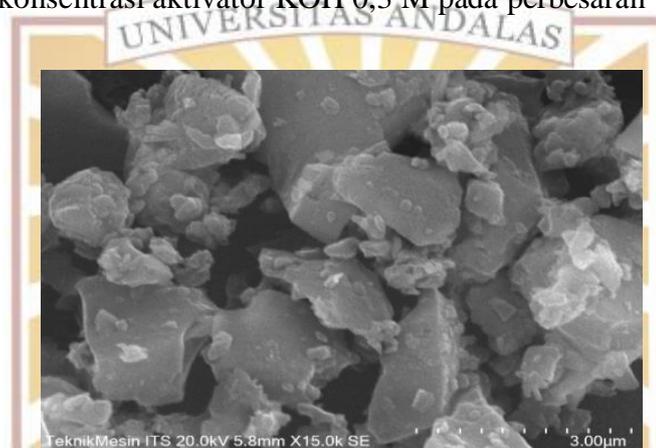
2011), daun ketapang $0,79 \text{ gcm}^{-3}$ (Taer *et al.* 2018), dan serat kelapa $0,72 \text{ gcm}^{-3}$ (Amuda *et al.* 2018). Kehilangan massa selama proses karbonisasi menyebabkan pembentukan ikatan yang lebih kuat oleh atom karbon sehingga terjadinya penyusutan dimensi elektroda (Taer *et al.* 2019). Persentase penurunan densitas terbesar terjadi pada konsentrasi 0,3 M yaitu sebesar 42%. Hal ini disebabkan karna banyaknya unsur-unsur selain karbon yang hilang atau menguap pada saat proses karbonisasi dan menyebabkan terjadinya pembentukan porositas (Taer *et al.* 2018).

Selain proses karbonisasi, konsentrasi aktivator yang digunakan juga dapat mempengaruhi perubahan densitas suatu sampel. Hal ini dibuktikan melalui penelitian yang dilakukan oleh Taer dkk pada tahun 2020 mengenai pembuatan elektroda karbon aktif dari batang bambu menggunakan konsentrasi KOH yang berbeda yaitu 0,1 M dan 0,3 M. Perubahan nilai densitas terbesar terjadi pada elektroda karbon aktif menggunakan konsentrasi KOH 0,1 M. Ini dikarenakan pada konsentrasi 0,3 M terjadinya kerusakan porositas yang disebabkan oleh peningkatan konsentrasi aktivator. Taer dkk juga menyatakan bahwa penyusutan densitas menandakan pembentukan pori dan difusi ion yang lebih baik sehingga dapat meningkatkan kinerja elektrokimia (Taer *et al.* 2020).

Pada tahun 2015, Pagketananga dkk juga melakukan penelitian menggunakan biomassa kulit karet pada aktivator yang sama (KOH). Peneliti menyatakan bahwa penurunan densitas yang besar dapat dihubungkan dengan luas permukaan elektroda karbon aktif, dimana semakin banyak porositas yang terbentuk maka akan semakin besar luas permukaan yang dihasilkan. Luas permukaan yang besar dapat menyimpan ion lebih banyak, sehingga semakin banyak pasangan ion yang terbentuk. Banyaknya pasangan ion yang terbentuk akan menghasilkan nilai kapasitansi spesifik yang tinggi (Pagketananga *et al.* 2015). Namun, nilai densitas juga harus didukung oleh data lain seperti SEM, EDX, dan pengukuran elektrokimia lainnya karna nilai densitas tidak selalu berpengaruh besar terhadap nilai kapasitansi spesifik (Chen *et al.* 2018).

4.1.2 Karakterisasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Metoda karakterisasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM) bertujuan untuk mengetahui struktur morfologi permukaan suatu material. Menurut Yahya dkk (2015), parameter ini dipengaruhi oleh bahan biomassa yang dipilih, bahan pengaktif kimia yang digunakan dan perlakuan lain dalam produksi karbon aktif. Umumnya, bahan biomassa mengandung selulosa, hemiselulosa (Abioye *et al.* 2015), dan lignin (Gonzalez *et al.* 2018) yang memiliki potensi untuk berkembang menjadi berbagai struktur karbon, termasuk lembaran karbon (Zhao *et al.* 2018), fiber (Su *et al.* 2018), nanotube (Jiang *et al.* 2019), dan partikel (Zhao *et al.* 2019). Gambar 4.2 menunjukkan morfologi permukaan elektroda karbon aktif menggunakan konsentrasi aktivator KOH 0,3 M pada perbesaran 15.000 x.



Gambar 4.2 Hasil Karakterisasi SEM karbon aktif ampas biji kopi *robusta* menggunakan konsentrasi aktivator KOH 0,3 M pada perbesaran 15.000 X

Struktur morfologi permukaan karbon aktif ampas biji kopi *robusta* pada konsentrasi 0,3 M menunjukkan penyebaran pori yang lebih homogen dan merata dimana ukuran pori yang paling dominan adalah mesopori dan ada sejumlah kecil mikropori (didukung oleh data BET dan BJH), yang diasumsikan dapat memberikan luas permukaan spesifik yang lebih besar dan konduktivitas listrik yang lebih baik seperti yang diperkirakan (Sankar *et al.* 2019). Data SEM ini juga mendukung kinerja elektrokimia dari karbon aktif karena ruang antara partikel pada sampel ampas biji kopi *robusta* dikaitkan dengan kelancaran proses difusi ion ke dalam struktur mesopori-mikropori pada permukaan elektroda karbon aktif (Taer *et al.* 2019).

Selain itu, aktivator KOH menyebabkan pemecahan lignoselulosa, sehingga menghasilkan beberapa pori baru pada permukaan elektroda karbon aktif

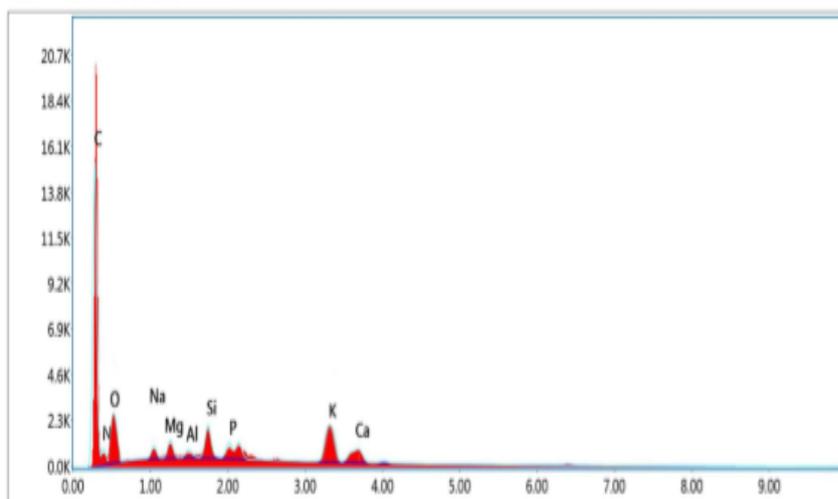
(Espinoza *et al.* 2018). Pori-pori yang dihasilkan akan menjadi tempat menyimpan muatan pada permukaan elektroda karbon aktif sehingga menghasilkan nilai kapasitansi yang besar (Sangeeta *et al.* 2018). Ini dapat dikaitkan dengan kinerja elektroda berdasarkan pengukuran sifat kapasitif dimana elektroda ini terbukti memiliki kemampuan penyimpanan energi yang lebih baik dibandingkan dengan elektroda lain (Liew *et al.* 2015). Hal ini serupa dengan yang dilaporkan oleh Misnon pada tahun 2015 menggunakan aktivator yang sama (KOH) pada biomassa cangkang kelapa sawit, yang menyatakan bahwa karbon aktif dengan perlakuan aktivasi kimia dapat meningkatkan porositas dari bahan biomassa yang digunakan.

Proses karbonisasi pada suhu 800°C di bawah atmosfer N_2 juga mempengaruhi morfologi permukaan yang dihasilkan karena dapat menguraikan struktur lignoselulosa (Danish *et al.* 2018). Pada tahun 2019, penelitian serupa juga dilakukan oleh Wang dkk mengenai pembuatan elektroda superkapasitor menggunakan aktivator KOH yang dikarbonisasi dibawah atmosfer gas inert N_2 . Morfologi permukaan yang diaktivasi menggunakan KOH menghasilkan penyebaran pori yang lebih merata. Wang melaporkan selama proses karbonisasi, senyawa volatil dengan berat molekul rendah seperti oksigen, nitrogen dan hidrogen berubah menjadi gas. Oleh karena itu, senyawa tersebut dilepaskan dalam fase gas, yang mengakibatkan terjadinya pembentukan pori pada elektroda karbon aktif (Wang *et al.* 2019).

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Alberto dkk pada tahun 2021 menggunakan bahan biomassa yang sama (ampas biji kopi) dengan aktivator KOH, didapatkan juga morfologi permukaan yang lebih homogen dengan jumlah pori yang lebih banyak. Ini menandakan bahwa struktur mikropori dan mesopori yang dianalisis secara isotherm terletak didalam dinding partikel karbon. Morfologi berpori ini disebabkan oleh interaksi kimia antara aktivator KOH dan permukaan prekursor (Alberto *et al.* 2021).

4.1.3 Karakterisasi *Energy Dispersive X-Ray* (EDX)

Untuk mengetahui komposisi unsur kimia pada permukaan karbon aktif ampas biji kopi *robusta*, dilakukan pengujian menggunakan karakterisasi *Energy Dispersive X-Ray* (EDX). Menurut Asim dkk (2018), proses karbonisasi yang dilakukan di bawah atmosfer gas inert dapat menghindari pembakaran pada material karbon. Disamping itu, suhu karbonisasi yang tinggi juga dapat menghasilkan kemurnian karbon yang lebih tinggi (He *et al.* 2017). Pada umumnya, semakin tinggi kandungan karbon dalam suatu bahan biomassa, maka akan semakin besar kecenderungan untuk mendapatkan nilai kapasitansi spesifik yang lebih baik (Kamikuri *et al.* 2014). Komposisi unsur dari karbon aktif ampas biji kopi *robusta* dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Hasil Karakterisasi EDX karbon aktif ampas biji kopi *robusta* menggunakan konsentrasi aktivator KOH 0,3 M

Elektroda karbon aktif dari ampas biji kopi *robusta* pada konsentrasi aktivator KOH 0,3 M mengandung unsur karbon yang tinggi yaitu sebesar 73,36 %. Selain itu didapatkan juga unsur selain karbon, seperti oksigen, magnesium, aluminium, kalium, kalsium, dan natrium yang tertinggal akibat proses karbonisasi atau ikatan yang tidak sempurna selama proses aktivasi (Jiang *et al.* 2019). Penurunan homogenitas partikel penyusun ampas biji kopi *robusta* juga menyebabkan banyaknya material lain selain karbon yang tidak hilang selama proses pemanasan dan pencucian.

Pada tahun 2016, Chen Hao dkk telah melakukan penelitian mengenai pembuatan elektroda superkapasitor dari biomassa ampas kopi menggunakan suhu aktivasi yang berbeda sebesar 600°C, 700°C, dan 800°C. Elektroda yang

diaktivasi menggunakan suhu karbonisasi 700⁰C dibawah atmosfer N₂, menghasilkan unsur karbon tertinggi yaitu sebesar 87,16%. Unsur karbon yang dihasilkan oleh penelitian Chen Hao dkk lebih tinggi dibandingkan dengan karbon yang dihasilkan pada ampas biji *robusta*. Hal ini dikarenakan perlakuan berbeda yang diberikan pada setiap biomassa akan menghasilkan komposisi yang berbeda.

Pembuatan elektroda superkapasitor dari biomassa yang diaktivasi dengan aktivator KOH juga dilakukan oleh Taer dkk pada tahun 2019. Taer dkk menggunakan karbon aktif monolith yang berasal dari batang bambu dengan konsentrasi KOH sebesar 0,1 M dan 0,3 M pada suhu karbonisasi 700⁰C dibawah atmosfer N₂. Karbon aktif batang bambu yang diaktivasi menggunakan konsentrasi 0,1 M menghasilkan unsur karbon yang tinggi (76,66%) dibandingkan dengan konsentrasi 0,3 M (68,61%) (Taer *et al.* 2019). Menurut Marsh (2006), perbedaan jenis prekursor akan menghasilkan jumlah karbon yang berbeda karena terdapat perbedaan jumlah lignoselulosa yang terkandung pada setiap prekursor yang digunakan (Marsh *et al.* 2006).

4.1.4 Analisa Serapan Gas N₂

Luas permukaan spesifik dan distribusi ukuran pori dari karbon aktif ampas biji kopi *robusta* dianalisa menggunakan metode Brunauer-Emmett-Teller (BET) dan Barrett-Joyner Halenda (BJH). Selain menentukan luas permukaan spesifik, metode BET juga dapat menentukan jenis isoterm adsorpsi-desorpsi dari karbon aktif yang dihasilkan menggunakan serapan gas N₂. Menurut Boyjoo dkk (2017), semakin tinggi luas permukaan spesifik suatu biomassa, maka akan semakin besar nilai kapasitansi spesifik yang dihasilkan karena luas permukaan yang tinggi dapat mendukung kinerja elektroda superkapasitor yang optimal. Pengaruh variasi konsentrasi aktivator KOH terhadap luas permukaan spesifik, ukuran pori rata-rata, dan total volume pori pada karbon aktif ampas biji kopi *robusta* dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Luas permukaan spesifik, ukuran pori rata-rata dan volume pori karbon aktif ampas biji kopi *robusta*

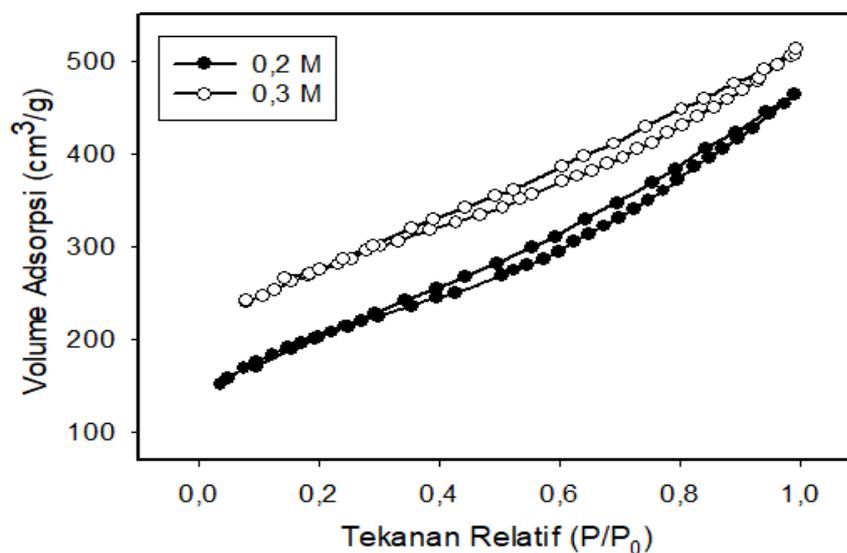
Konsentrasi Sampel	Luas permukaan spesifik (m ² /g)	Ukuran pori rata-rata (nm)	Volume pori (cm ³ /g)
0,2 M	687,741	4,17	0,7175
0,3 M	795,687	3,98	0,7840

Elektroda karbon aktif ampas biji kopi *robusta* pada konsentrasi 0,3 M memiliki luas permukaan spesifik tertinggi yaitu sebesar 795,687 m²/g dengan ukuran pori rata-rata sebesar 3,98 nm dan volume pori sebesar 0,7840 cm³/g. Sebaliknya, luas permukaan spesifik dan volume pori yang dihasilkan pada konsentrasi 0,2 M lebih kecil dibandingkan dengan konsentrasi 0,3 M, akan tetapi ukuran pori rata-rata yang dihasilkan lebih besar. Hal ini sama dengan yang dilaporkan oleh Hasanah dkk (2020) mengenai pembuatan elektroda karbon aktif dari ampas teh menggunakan aktivator yang sama dimana luas permukaan spesifik tertinggi juga dihasilkan pada konsentrasi 0,3 M yaitu sebesar 1451,07 m²/g. Hasanah dkk menyatakan bahwa volume total pori memiliki hubungan berbanding terbalik dengan ukuran pori rata-rata dimana semakin kecil ukuran pori rata-rata, maka akan semakin besar luas permukaan spesifik yang dihasilkan karena kemampuan interkalasi logam kalium ke dalam struktur material berpori dapat meningkatkan jumlah pori dalam elektroda karbon aktif (Hasanah *et al.* 2020).

Penelitian serupa juga dilaporkan oleh Alberto dkk pada tahun 2020 mengenai pembuatan elektroda superkapasitor dari karbon aktif ampas biji kopi menggunakan aktivator KOH. Luas permukaan spesifik yang dihasilkan pada penelitian Alberto dkk lebih rendah dibandingkan dengan luas permukaan spesifik yang dihasilkan pada karbon aktif ampas biji kopi *robusta* yaitu sebesar 586 m²/g. Menurut Taer dkk (2019), peningkatan konsentrasi aktivator yang digunakan pada pembuatan elektroda superkapasitor umumnya menghasilkan luas permukaan spesifik yang lebih tinggi. Sebelumnya juga telah dilakukan penelitian menggunakan biomassa ampas biji kopi oleh Aziz dkk pada tahun 2018 dengan aktivator NaOH. Didapatkan juga luas permukaan spesifik yang lebih rendah dibandingkan dengan karbon aktif ampas biji kopi *robusta* yang diaktivasi oleh KOH yaitu sebesar 103,946 m²/g. Hal ini mengindikasikan bahwa perbedaan jenis

prekursor, aktivator, dan perlakuan aktivasi yang digunakan akan menghasilkan luas permukaan karbon aktif yang berbeda.

Perbedaan ukuran pori dan luas permukaan spesifik yang dihasilkan juga dapat dikaitkan dengan kurva isotherm adsorpsi-desorpsi oleh gas N_2 yang dapat dilihat pada gambar 4.4. Menurut Yadav dkk (2020), tekanan relatif sangat berpengaruh terhadap volume adsorpsi karbon aktif karena volume adsorpsi yang besar menandakan banyaknya gas N_2 yang terserap melewati pori-pori karbon aktif dan menyebabkan volume pori semakin besar. Volume pori yang besar juga akan menghasilkan luas permukaan yang besar.



Gambar 4.4 Kurva isothermal gas N_2

Perubahan tekanan relatif (P/P_0) terhadap volume adsorpsi gas N_2 ampas biji kopi *robusta* dilakukan pada temperatur 77 K. Kurva adsorpsi penyerapan gas N_2 terjadi antara tekanan relatif 0 hingga 1 kemudian dilanjutkan dengan desorpsi dari tekanan relatif 1 hingga 0 kembali. Penyerapan gas N_2 pada elektroda karbon aktif ampas biji kopi *robusta* terjadi pada campuran mikropori dan mesopori. Dilihat pada gambar 4.4, perubahan tekanan relatif sebanding dengan volume adsorpsi yang dihasilkan. Perubahan yang sama juga didapatkan oleh penelitian Lyve dkk (2019) menggunakan karbon aktif dari serbuk kayu dengan aktivator KOH, yang menyatakan bahwa semakin besar tekanan yang diberikan maka semakin tinggi volume adsorpsi yang dihasilkan.

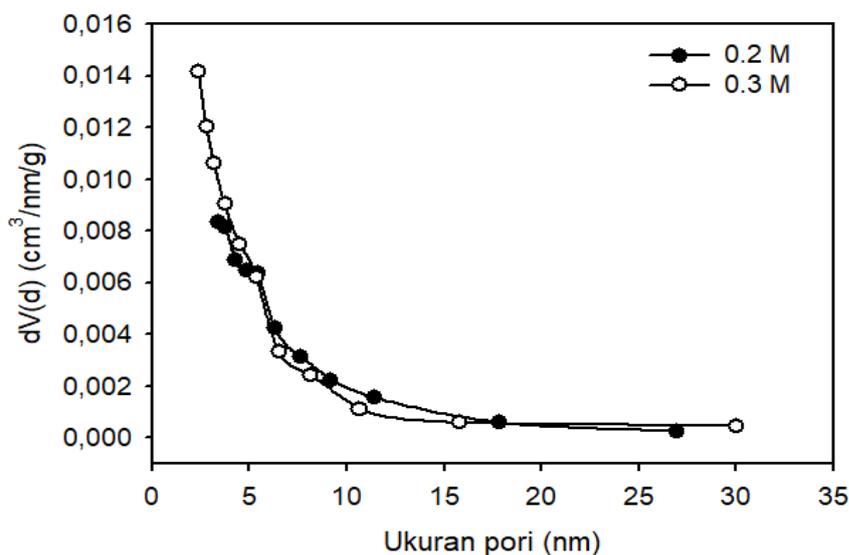
Karbon aktif ampas biji kopi *robusta* pada konsentrasi 0,3 M memiliki volume adsorpsi tertinggi dibandingkan dengan konsentrasi 0,2 M. Ini

menandakan bahwa penyerapan gas N_2 yang terjadi pada konsentrasi 0,3 M lebih banyak dibandingkan dengan konsentrasi 0,2 M, sehingga dihasilkan volume pori yang lebih besar. Volume pori yang lebih besar menyebabkan luas permukaan spesifik pada konsentrasi 0,3 M juga besar sesuai yang disajikan pada Tabel 4.1. Hal ini serupa dengan yang dilaporkan oleh Joni dkk (2021) menggunakan biomassa cangkang buah ketaping dengan perbandingan konsentrasi aktivator KOH 0,3 M, 0,4 M, dan 0,5 M, dimana volume adsorpsi tertinggi dihasilkan pada karbon aktif cangkang ketaping yang menggunakan konsentrasi 0,5 M.

Berdasarkan klasifikasi yang dirumuskan oleh *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC), ampas biji kopi *robusta* pada konsentrasi 0,2 M dan 0,3 M termasuk jenis isoterm tipe IV yang merupakan campuran mikropori dan mesopori namun lebih dominan mesopori (De Lange *et al.* 2014). Jenis isoterm yang sama juga dihasilkan oleh penelitian Chiu dkk (2019) pada biomassa ampas biji kopi menggunakan 6 aktivator yang berbeda. Untuk aktivator H_3PO_4 , HCl, dan $FeCl_3$ didapatkan jenis isoterm tipe I dimana struktur mikropori lebih dominan sedangkan untuk aktivator $ZnCl_2$, NaOH, dan KOH didapatkan jenis isoterm tipe IV. Menurut Huang dkk (2018), struktur mesopori dan mikropori memiliki peran masing-masing terhadap kinerja superkapasitor dimana mesopori terkait dengan daya yang dihasilkan sedangkan mikropori terkait dengan besarnya energi yang disimpan pada superkapasitor.

Pada gambar 4.4, *Loop* histeresis terjadi pada tekanan relatif antara 0,4 hingga 0,99 P/P_0 . Ini menandakan bahwa peningkatan tekanan relatif menyebabkan pori-pori yang terbentuk semakin besar yang artinya mengandung lebih banyak struktur mesopori (Zhang *et al.* 2018), sebaliknya pada tekanan relatif rendah ($P/P_0 < 0,4$), serapan isotermal mengalami penjumlahan akibat terjadinya pembentukan struktur mikropori pada elektroda karbon aktif ampas biji kopi *robusta*. Bentuk kurva yang hampir sama juga terjadi pada penelitian Taer dkk (2018) mengenai pembuatan elektroda karbon aktif dari pisang kukus dengan aktivator KOH, dimana jenis isoterm yang dihasilkan merupakan tipe IV. *Loop* histeresis juga terjadi pada tekanan relatif antara 0,4 hingga 0,99 P/P_0 yang berarti bahwa ukuran pori dominan dari karbon aktif pisang kukus adalah mesopori. Distribusi ukuran pori dari karbon aktif ampas biji kopi *robusta* yang dihitung dari

data desorpsi menggunakan metode Barret-Joyner-Halenda (BJH) dapat dilihat lebih jelas pada gambar 4.5.



Gambar 4.5 Distribusi ukuran pori karbon aktif ampas biji kopi *robusta*

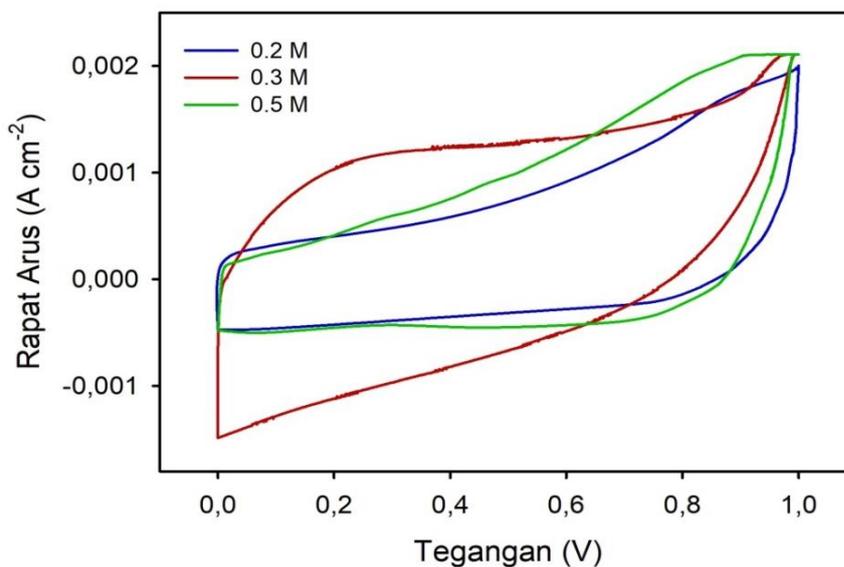
Menurut klasifikasi *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC), pori dibagi menjadi 3 jenis, yaitu mikropori ($d < 2\text{nm}$), mesopori ($2 < d < 50\text{nm}$), dan makropori ($d > 50\text{nm}$) (Rufford *et al.* 2009). Berdasarkan klasifikasi tersebut, elektroda karbon aktif ampas biji kopi *robusta* didominasi oleh mesopori sesuai yang ditunjukkan pada gambar 4.5. Ukuran pori karbon aktif ampas biji kopi *robusta* paling banyak berkisar antara 1,99 nm hingga 10 nm. Elektroda karbon aktif ampas biji kopi *robusta* pada konsentrasi 0,3 M memiliki puncak tertinggi dibandingkan dengan konsentrasi 0,2 M. Hal yang sama juga dilaporkan oleh Taer dkk (2020) menggunakan karbon aktif dari batang pinang yang diaktivasi dengan KOH. Ukuran pori yang didapatkan pada karbon aktif batang pinang juga berkisar antara 1-10 nm.

4.2 Pengukuran sifat elektrokimia Karbon Aktif Ampas Biji Kopi *Robusta*

4.2.1 Metoda *Cyclic Voltammetry* (CV)

Metoda ini bertujuan untuk menguji kinerja sel superkapasitor dari elektroda karbon aktif ampas biji kopi *robusta*. Menurut Armynah dkk (2019), bentuk kurva CV tergantung pada arus *charge* dan *discharge* yang diberikan, dimana semakin besar arus *charge* dan *discharge*, maka semakin lebar bentuk kurva yang dihasilkan. Kurva ini menunjukkan hubungan antara tegangan (V) dan arus (A)

pada kecepatan pindai 1 mVs^{-1} seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.6. Arus *charge* (I_c) ditunjukkan pada tegangan 0 sampai 1, sedangkan arus *discharge* (I_d) ditunjukkan pada tegangan 1 sampai 0.



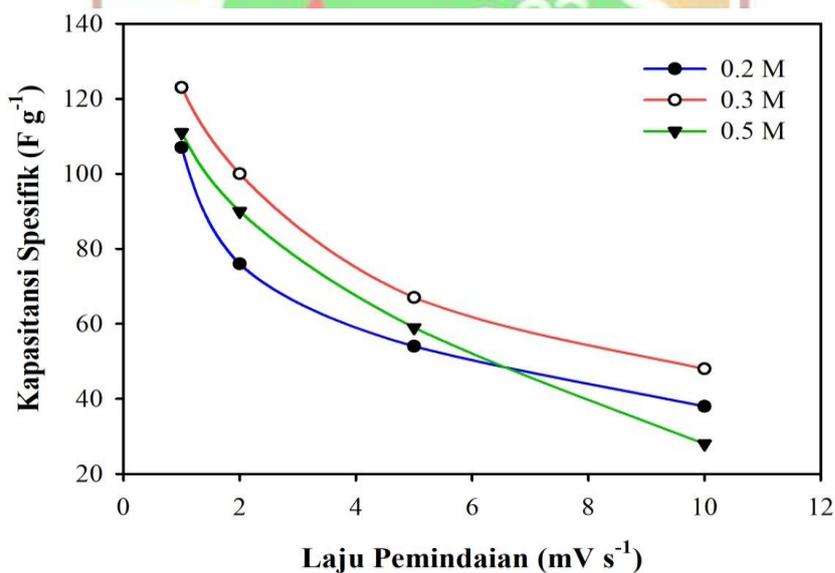
Gambar 4.6 Kurva *cyclic voltammetry* dari elektroda karbon aktif ampas biji kopi *robusta* pada laju pemindaian 1 mVs^{-1}

Pengukuran ini dilakukan menggunakan kecepatan pindai 1 mVs^{-1} karena memiliki waktu yang lebih lama untuk ion berdifusi ke dalam pori-pori elektroda sehingga proses *charge* dan *discharge* selama pengukuran terjadi secara optimal (Zhong *et al.* 2015). Elektroda karbon aktif menggunakan konsentrasi 0,2 M menghasilkan kurva paling sempit diantara semua konsentrasi karena memiliki volume pori yang kecil dan jari-jari pori yang besar sehingga menghambat ion dari larutan elektrolit H_2SO_4 untuk berdifusi ke permukaan elektroda. Sebaliknya, pada konsentrasi 0,3 M, kurva CV yang dihasilkan paling lebar karena memiliki jari-jari pori yang kecil dan luas permukaan spesifik yang besar sehingga memudahkan ion untuk masuk ke permukaan elektroda karbon aktif sesuai yang ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Penelitian serupa juga dilakukan oleh Chiu dkk pada tahun 2019 menggunakan ampas biji kopi dengan 6 aktivator berbeda dimana elektroda karbon aktif yang diaktivasi menggunakan aktivator KOH menunjukkan luas kurva yang paling besar dibandingkan dengan aktivator lain. Ini menandakan bahwa KOH memiliki kemampuan penyimpanan energi yang jauh lebih baik dibandingkan dengan elektroda lainnya. Dengan menggunakan aktivator yang

sama (KOH), Taer dkk pada tahun 2020 juga melakukan penelitian menggunakan biomassa batang bambu pada konsentrasi KOH 0,1 M dan 0,3 M. Karbon aktif batang bambu yang diaktivasi menggunakan konsentrasi 0,3 M juga memiliki kurva CV paling lebar dibanding konsentrasi 0,1 M. Hal ini serupa dengan yang didapatkan pada karbon aktif ampas biji kopi *robusta* dimana pada konsentrasi 0,3 M, kemampuan ion untuk membentuk lapis rangkap listrik pada permukaan elektroda terjadi secara optimal.

Selain itu, laju pemindaian yang digunakan untuk pengukuran sifat elektrokimia juga dapat mempengaruhi besar atau kecilnya nilai kapasitansi spesifik yang dihasilkan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7. Elektroda karbon aktif dari ampas biji kopi *robusta* diukur menggunakan beberapa variasi laju pemindaian, dimana nilai kapasitansi spesifik tertinggi dihasilkan pada laju pemindaian 1 mVs^{-1} .



Gambar 4.7 Grafik hubungan nilai kapasitansi karbon aktif dari ampas biji kopi *robusta* menggunakan variasi laju pemindaian

Untuk konsentrasi KOH 0,3 M didapatkan nilai kapasitansi spesifik tertinggi sebesar 123 Fg^{-1} sedangkan untuk konsentrasi 0,2 M, didapatkan nilai kapasitansi spesifik terendah sebesar 107 Fg^{-1} . Hal ini serupa dengan yang dilakukan oleh Philip dkk pada tahun 2021 menggunakan karbon aktif yang *didopping* dengan oksida logam pada biomassa ampas kopi, dimana kapasitansi spesifik yang dihasilkan meningkat seiring dengan berkurangnya laju pemindaian yang diberikan. Kapasitansi yang dihasilkan oleh penelitian Philip dkk lebih rendah

dibandingkan kapasitansi yang dihasilkan pada penelitian ampas biji kopi *robusta* yaitu sebesar 87 Fg^{-1} . Pada tahun 2021, Novitra dkk juga melakukan penelitian menggunakan biomassa ampas biji kopi *robusta* dengan konsentrasi aktivator NaOH yang berbeda sebesar 0,2 M, 0,3 M, dan 0,4 M. Nilai kapasitansi spesifik tertinggi dihasilkan oleh konsentrasi 0,3 M yaitu sebesar 120 Fg^{-1} pada laju pemindaian 1 mVs^{-1} .

Menurut Taer dkk (2020), laju pemindaian mempunyai hubungan berbanding terbalik dengan kapasitansi spesifik dimana semakin kecil laju pemindaian yang diberikan maka akan semakin besar nilai kapasitansi spesifik yang dihasilkan sesuai yang ditunjukkan pada persamaan 2. Selain kapasitansi spesifik, sifat elektrokimia dari superkapasitor juga dapat dianalisis dengan menggunakan persamaan 3 dan 4 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil pengukuran nilai kapasitansi spesifik, rapat energi, dan rapat daya pada laju pemindaian 1 mVs^{-1} menggunakan konsentrasi aktivator yang berbeda.

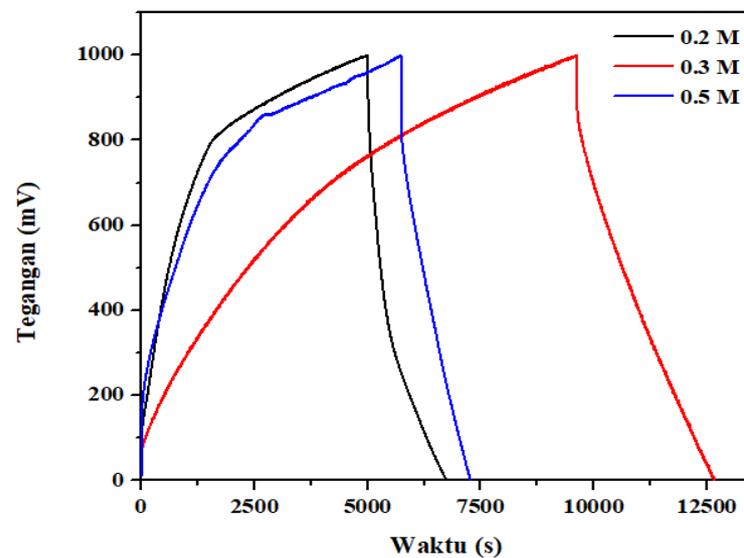
Konsentrasi Sampel	Csp (F g^{-1})	E (Wh kg^{-1})	P (W kg^{-1})
0,2 M	107	14,8611	53,5535
0,3 M	123	17,0833	61,5614
0,5 M	111	15,4166	55,5553

Menurut Taer dkk (2018), kapasitansi spesifik yang tinggi juga akan mempengaruhi sifat kapasitif dari elektroda karbon aktif dimana ketika kapasitansi spesifik meningkat, maka nilai rapat energi dan rapat daya yang dihasilkan juga akan meningkat. Elektroda karbon aktif dari ampas biji kopi *robusta* menggunakan konsentrasi 0,3 M menghasilkan rapat energi dan rapat daya tertinggi dibandingkan dengan elektroda pada konsentrasi 0,2 M dan 0,5 M.

4.2.2 Metoda *Galvanostatic Charge-Discharge* (GCD)

Selain metoda *cyclic voltammetry*, pengukuran sifat elektrokimia juga dapat diukur menggunakan metoda *Galvanostatic Charge-Discharge*. Metoda ini bertujuan untuk mengetahui kinerja sel superkapasitor dengan menunjukkan hubungan antara tegangan (V) dan waktu (s) seperti yang ditunjukkan pada

Gambar 4.8. Pengukuran GCD karbon aktif ampas biji kopi *robusta* dilakukan pada kerapatan arus *charge-discharge* 1 Ag^{-1} . Menurut Wei dkk (2020), semua kurva *charge-discharge* memiliki bentuk yang sama menyerupai segitiga sama kaki yang hampir simetri. Hal ini serupa dengan yang dilaporkan oleh Chiu dkk (2019) menggunakan ampas biji kopi dengan 6 aktivator berbeda dimana kurva yang dihasilkan oleh semua aktivator memiliki bentuk segitiga sama kaki. Ini mengindikasikan adanya sifat kapasitor elektrokimia lapis ganda listrik yang menjanjikan pada sampel.



Gambar 4.8 Kurva *charge-discharge* elektroda karbon aktif ampas biji kopi *robusta* pada kerapatan arus 1 Ag^{-1} .

Pada elektroda karbon aktif ampas biji kopi *robusta*, semua kurva *charge-discharge* memiliki pola yang hampir sama. Ini merupakan pola khas untuk sel superkapasitor berbasis elektroda karbon. Ketiga sel menunjukkan penurunan tegangan yang tajam pada awal kurva pelepasan. Elektroda karbon aktif menggunakan konsentrasi aktivator 0,3 M memiliki waktu pengosongan yang lebih lama dibandingkan dengan konsentrasi 0,2 M dan 0,5 M. Hal ini dikarenakan semakin lama waktu yang dibutuhkan ion untuk berdifusi ke permukaan elektroda, maka akan semakin optimal proses *charge-discharge* yang terjadi selama pengukuran dan nilai kapasitansi yang dihasilkan akan semakin besar.

Sebelumnya, Yuhe Cao dkk (2016) juga melaporkan pembuatan karbon aktif dari batang jagung menggunakan aktivator KOH. Yuhe dkk menyatakan bahwa

waktu pengisian sangat berpengaruh terhadap kinerja elektroda superkapasitor. Penurunan yang tajam pada saat proses pengosongan disebabkan karena jari-jari pori yang lebih kecil mempengaruhi transportasi ion elektrolit sehingga membutuhkan lebih banyak waktu untuk berpindah kepermukaan elektroda karbon aktif (Jin *et al.* 2014). Dapat disimpulkan bahwa kapasitansi spesifik berbanding lurus dengan waktu sesuai dengan persamaan 5 (Wang *et al.* 2010).

Tabel 4.3 Pengaruh variasi konsentrasi terhadap nilai kapasitansi spesifik dan resistansi

Konsentrasi Sampel	Csp (F g ⁻¹)	Resistansi (10 ⁻³ Ω)
0,2 M	177	18
0,3 M	192	8
0,5 M	181	14

Berdasarkan Tabel 4.3, nilai kapasitansi spesifik tertinggi diperoleh dari elektroda karbon aktif menggunakan konsentrasi KOH 0,3 M. Resistansi juga meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi dari 0,3 M ke 0,5 M. Hal ini disebabkan karena adanya pori-pori kecil yang berkembang semakin banyak sehingga sedikit menghambat aksesibilitas ion pada permukaan elektroda karbon aktif (Liu *et al.* 2019). Penelitian serupa juga dilakukan oleh Alberto menggunakan karbon aktif ampas kopi dimana seiring dengan meningkatnya kapasitansi yang dihasilkan sebesar 84 Fg⁻¹, resistansi yang dihasilkan juga semakin kecil. Pada pengukuran ini, nilai kapasitansi spesifik yang dihasilkan lebih besar dibandingkan dengan pengukuran CV. Menurut Stroller dkk (2010), kedua metode tersebut dapat dibandingkan, namun masing-masing memberikan informasi yang berbeda.

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa karbon aktif dari ampas biji kopi *robusta* yang diaktivasi menggunakan variasi konsentrasi aktivator KOH telah berhasil dijadikan sebagai elektroda superkapasitor. Aktivator KOH mampu dijadikan sebagai zat pengaktif yang ramah lingkungan karena dapat menyebabkan pemecahan lignoselulosa, sehingga didapatkan permukaan yang halus dan penyebaran pori yang lebih merata. Hal ini dapat dibuktikan melalui hasil karakterisasi SEM yang telah dilakukan. Berdasarkan hasil karakterisasi EDX, ampas biji kopi *robusta* pada konsentrasi 0,3 M memiliki kandungan karbon sebesar 73,36 %.

Dari hasil pengujian BET dan BJH, elektroda ini merupakan jenis isoterm tipe IV dimana ukuran pori dominan adalah mesopori dan luas permukaan spesifik yang dihasilkan sebesar $795,687 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ dengan ukuran pori rata-rata sebesar 3,98 nm. Elektroda karbon aktif menggunakan konsentrasi KOH 0,3 M menghasilkan nilai kapasitansi maksimum sebesar 123 Fg^{-1} dengan kerapatan energi $17,0833 \text{ Wh kg}^{-1}$ dan kerapatan daya sebesar $61,5614 \text{ W kg}^{-1}$ dalam pengaplikasiannya sebagai elektroda superkapasitor.

5.2 Saran

Untuk meningkatkan nilai kapasitansi yang lebih besar, disarankan untuk melakukan proses pencampuran dengan karbon aktif lain, variasi suhu pada proses karbonisasi, dan menggunakan variasi gas pada proses pirolisis agar meningkatkan luas permukaan karbon aktif.

DAFTAR PUSTAKA

- A, González., et al. 2016. Review on supercapacitors: technologies and materials. *Renewable and Sustainable Energy*. vol. 58,pp. 1189-1206.
- Abioye, A. M., Ani, F. N. 2015. Recent development in the production of activated carbon electrodes from agricultural waste biomass for supercapacitors: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 52 : 1282–1293.
- Alberto, Adan-Mas., Lorena Alcaraz., Pablo Arévalo-Cid., Félix. A. López-Gómez., Fátima Montemor. 2021. Coffee-derived activated carbon from second biowaste for supercapacitor applications. *Waste Management*. 120 : 280-289.
- Armynah B, Taer E, Djafar Z, Piarah W H and Tahir D. 2019. *Int. J. Electrochem. Sci.* 14 : 7076.
- Asim, A. Mohammed., Chao, Chen., Zhihong, Zhu. 2018. Low-Cost, High-Performance Supercapacitor Based on Activated Carbon Electrode Materials Derived from Baobab Fruit Shells. *Journal of Colloid and Interface Science*. S0021-9797 (18) 31426-7.
- Aziz, H., Tetra, O.N., Alif, A., Syukri, Ramadhan W. 2016. Electrical properties of supercapacitor electrode-based on activated carbon from waste palm kernel shells. *Der Pharma Chemica*. 8(15), 227-232.
- Baojun, Yu., Zhenzhen, Chang. 2016. The key pre-pyrolysis in lignin based activated carbon preparation for high performance supercapacitors. *Material Chemistry and physics*. 1-7.
- Barmawi, I., Taer, E., Umar, A., Lukita, J., Lustania. 2012. Penumbuhan Nanopartikel Logam dengan Metode Kimia Basah untuk Meningkatkan Prestasi Supercapacitor Elektrokimia. Prosiding SNTK TOPI, Pekanbaru.
- Boyjoo, Y., Cheng, Y., Zhong, H., Tian, H., Pan, J., Pareek, VK., et al. 2017. From waste Coca Cola® to activated carbons with impressive capabilities for CO₂ adsorption and supercapacitors. *Carbon*. 116 : 490-9.
- Bunaciu, A.A., Udristioiu, E.G., Aboul, H.Y. 2015. X-Ray diffraction instrumentation and applications. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. 45 : 289-299.

- C, Yuan., X, Zhang., L, Su., B, Gao., L, Shen. 2009. Facile synthesis and self-assembly of hierarchical porous NiO nano/micro spherical superstructures for high performance supercapacitors. *J. Mater. Chem.* 19 : 5772–5777.
- C, Zhong., S, Gong., L, e. Jin., P, Li., Q, Cao. 2015. Preparation of nitrogen-doped pitch based carbon materials for supercapacitors. *Materials Letters.* 156 : 1–6.
- Chen, Hao Wang., Wei, Chen Wen., Hsin, Cheng Hsu., Bing, Yuan Yao. 2016. High-capacitance KOH-activated nitrogen-containing porous carbon material from waste coffee grounds in supercapacitor. *Advanced Powder Technology.* Volume 27 : 1387-1395.
- Chen, T., Dai, L. 2013. Carbon nanomaterials for highperformance supercapacitors. *Materials Today.* 16 : 272-280.
- Chiu, Yi-Han and Lin, Lu-Yin. 2019. Effect of activated agents for producing activated carbon using a facile one-step synthesis with waste coffee grounds for symmetric supercapacitor. *Journal of the taiwan institute of chemical engineers.* (101) 177-185.
- Climent, V. & Feliu, J.M. 2018. Cyclic voltammetry. *Encyclopedia of Interfacial Chemistry: Surface Science and Electrochemistry.* hal.48–74.
- D, Liu., W, Zhang., H, Lin., Y, Li., H, Lu., Y, Wang. 2016. A green technology for the preparation of high capacitance rice husk-based activated carbon. *J. Clean. Prod.* 112 : 1190–1198.
- Danish, M., Ahmad T. 2018. A review on utilization of wood biomass as a sustainable precursor for activated carbon production and application. *Renew Sustain Energy Rev.* 87 : 1–21.
- Deng, P., Lei, S., Wang, W., Zhou, W., Ou, X., Chen, L., Xiao, Y. & Cheng, B. 2018. Conversion of biomass waste to multi-heteroatom-doped carbon networks with high surface area and hierarchical porosity for advanced supercapacitors. *Journal of Materials Science,* 53(20): 14536–14547.
- De Lange., M F. et al. 2014. Adsorptive characterization of porous solids: Error analysis guides the way. *Microporous and Mesoporous Materials.* 200 : 199–21

- Espinoza-acosta JL., Torres-chávez PI., Olmedo-martínez JL., Vega-rios A., Flores-gallardo S., Zaragoza-contreras EA. 2018. Lignin in storage and renewable energy applications: a review. *J Energy Chem.* 27 : 1422 – 1438.
- Fic. K., Platek A., Piwek J., Frackowiak E. 2018. Sustainable materials for electrochemical capacitors. *Mater Today.* 21 : 437–454.
- González, A., Goikolea, E., Barrena, J. A., and Mysyk, R., 2016, “Review on Supercapacitors: Technologies and Materials,” *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 58, pp. 1189–1206.
- Gonzalez., Garcia P. 2018. Activated carbon from lignocellulosics precursors: a review of the synthesis methods, characterization techniques and applications. *Renew Sustain Energy Rev.* 82 : 1393 – 1414.
- Grandys, P Rika., D, Istria., P, R Ahmad., F, Amanda P. 2004. Analisis luas permukaan arang aktif dengan menggunakan metode BET (SAA). Universitas Negeri Semarang, Semarang.
- Gunawan, B., Azhari, C. 2010. Karakterisasi spektrofotometri IR dan Scanning Elektron Microscopy (SEM) sensor gas dari bahan polimer poly ethylen glycol (PEG). *Jurnal Sains dan Teknologi.* 3 : 1-17.
- H, Jiang., P, S Lee., C, Li. 2013. 3D carbon based nanostructures for advanced supercapacitors. *Energy Environ. Sci.* 6 : 41–53.
- H. Jin, X. Wang, Z. Gu, J.D. Hoefelmeyer, K. Muthukumarappan, J. Julson. 2014. Graphitized activated carbon based on big bluestem as an electrode for supercapacitors. *RSC Advances.* 4 : 14136.
- H, Sun., S, L. Xie., Y, M. Li., Y, S. Jiang., X, M. Sun., B, J. Wang., H, S. Peng. 2016. Large-area supercapacitor textiles with novel hierarchical conducting structures. *Adv. Mater.* 28 : 8431–8438.
- H, Wang., Q. Gao., J. Hu. 2010. Micropore and Mesopore. *Mater.* 131 : 89.
- Hasanah, Husnul., Syukri., Aziz, Hermansyah. 2020. Synthesis of Activated Carbon From Waste Tea by KOH Activation as High Performance Supercapacitors Electrodes. *J. Chem. Pharm. Res.* 12 (6) : 6-12.
- He, S-S., Hu, Y-J., Wan, J-X., Gao, Q., Wang, Y-H., Xie, S-L., et al. 2017. Biocompatible carbon nanotube fibers for implantable supercapacitors. *Carbon.* 122 : 162-167.

- Huang G, Liu Y, Wu X, Cai J (2019) Activated carbons prepared by the KOH activation of a hydrochar from garlic peel and their CO₂ adsorption performance. *New Carbon Mater* 34:247–257.
- I, I.G. Inal., S, M. Holmes., A, Banford., Z, Aktas. 2015. The performance of supercapacitor electrodes developed from chemically activated carbon produced from waste tea. *Applied Surface Science*. 357 : 696–703.
- Iqbal, M.F., Ashiq, M.N., Hassan, M.U., Nawaz, R., Masood, A., Razaq, A. 2018. Excellent electrochemical behavior of graphene oxide based aluminum sulfide nanowalls for supercapacitor applications. *Energy*. 159 : 151-159.
- J, Ji., L, Zhang., H, Ji., Y, Li., X, Zhao., X, Bai., X, Fan., F, Zhang., R, S. Ruoff. 2013. Nanoporous Ni(OH)₂ thin film on 3D ultrathin-graphite foam for asymmetric supercapacitor. *ACS Nano*. 7 : 6237–6243.
- J. S. M, B. G. Sumpter, V. Meunier, *Angewandte*. 2008. *Chemie International Ed*. 47 : 520.
- Jiang, W., Li L., Pan J., Senthil RA., Jin X., Cai J., Wang J., Liu X. 2019. Hollow-tubular porous carbon derived from cotton with high productivity for enhanced performance supercapacitor. *J Power Sources*. 438 : 226936.
- Joni, Rahma., Syukri., Aziz, H. 2021. Study of Activated Carbon Characteristic from Ketaping Fruit Shell (*Terminalia Catappa*) as Supercapacitor Electrode. *J. Aceh Phys Soc*. 10(1) : 1-6.
- K, Huang., J, Zhang., G, Shi., Y, Liu. 2014. Hydrothermal synthesis of molybdenum disulfide nanosheets as supercapacitors electrode material. *Electrochim. Acta*. 132 : 397–403.
- Kamikuri, N., Hamasuna, Y., Tashima, D., Fukuma, M., Kumagai S., Madden J., D, W. 2014. Low-cost Activated Carbon Materials Produced from Used Coffee Grounds for Electric Double-layer Capacitors. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*. 3492-501.
- Kampouris, D.K., Ji, X., Randviir, E.P. & Banks, C.E. 2015. A new approach for the improved interpretation of capacitance measurements for materials utilised in energy storage. *RSC Advances*, 5(17): 12782–12791.
- Li, X., Wei, B. 2013. Supercapacitors based on nanostructured carbon. *Nano Energy*. 2 : 159–173.

- Liew, C. W., Ramesh, S., Arof, A. K. 2015. Characterization of ionic liquid added poly(vinyl alcohol) based proton conducting polymer electrolytes and electrochemical studies on the supercapacitors. *Int. J. Hydrog. Energy*. 40 : 852–862.
- Mariana., Marwan., F, Mulana. 2018. Activation and characterization of waste coffee grounds as bio-sorbent. *Materials Science and Engineering*. 334 : 012029.
- Marsh, Harry., Rodriguez, Francisco., Reinoso. 2006. *Activated Carbon*. ELSEVIER. United Kingdom.
- Merlet, C., Rotenberg, B., Madden, P.A., Taberna, P L., Simon, P., Gogotsi, Y., Salanne, M. 2012. On the molecular origin of supercapacitance in nanoporous carbon electrodes. *Nat. Mater*. 11 : 306–310.
- Mison, I.I., Khairiyyah, N., Radhiyah, M.Z., Baiju, A.A., Jose, V.R.. 2015. Electrochemical properties of carbon from oil palm kernel shell for high performance supercapacitors. *Electrochimica Acta*. 174 (1):78-86.
- O, S. Amuda., A, A. Giwa., I, A. Bello. 2007. Removal of heavy metal from industrial wastewater using modified activated coconut shell carbon. *Biochem. Eng. J*. 36 : 174–181.
- P, Esquivel., V, M. Jimenez. 2012. Functional Properties of coffee and coffee by products. *Food Res. Int*. 46 : 488-495.
- P, Sharma and T, S. Bhatti. 2010. A review on electrochemical double-layer capacitors. *Energy Conversion and Management*. vol. 51,pp. 2901-2912.
- Pagketananga, T., Artnaseawa, A., Wongwichaa, P., Thabuota, M. 2015. Microporous Activated Carbon from KOH-Activation of Rubber Seed-Shells for Application in Capacitor Electrode. *Energy Procedia*. 79:651–656.
- Perdana, Yola Azli., Aziz, H., Emriadi. 2019. Effect of KOH Activator on the Performance of Activated Carbon from Oil Palm Kernel Shell as Supercapacitor Electrode Material. *J. Aceh Phys.Soc*.
- Philipp, Konnerth., Dennis, Jung., Jan, W. Straten., Klaus, Raffelt., Andrea, Kruse. 2021. Metal oxide-doped activated carbons from bakery waste and

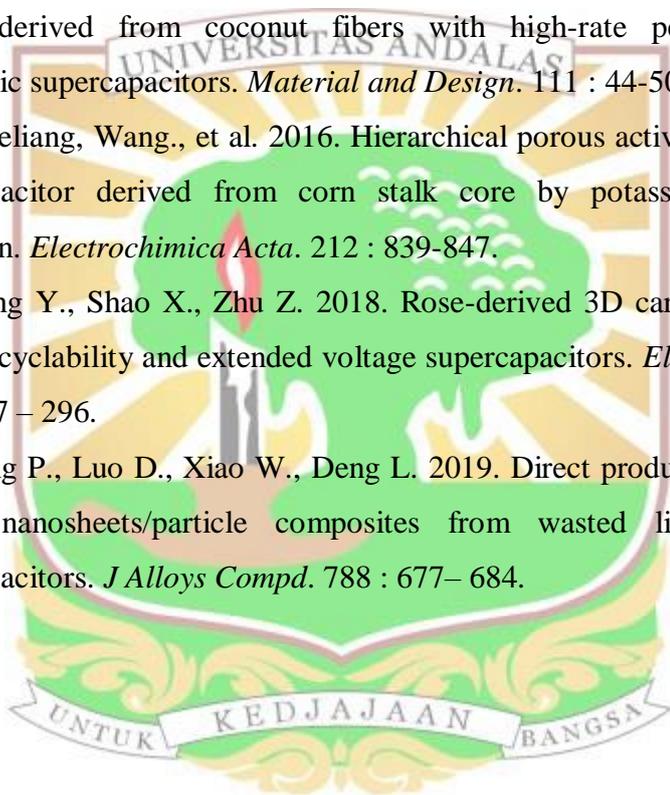
- coffeegrounds for application in supercapacitors. *Materials Science for Energy Technologies*. 4 : 69-80.
- R. L. Tseng, S. K. Tseng, F. C. Wu, C. C. Hu, C. C. Wang, J. Chin. Institute. *Chem. Engineers*, 39 (2008) 37–47.
- Ra E J., Raymundo-Piñero E., Lee Y H and Béguin F. 2009. *Carbon*. 47 : 2984.
- Rajasekaran, Sofia Jeniffer., Raghavan, Vimala. 2020. Facile synthesis of activated carbon derived from Eucalyptus globulus seed as efficient electrode material for supercapacitors. *Diamond & Related Materials*. 109 : 108038.
- Riyanto, Agus. 2014. Superkapasitor sebagai Piranti Penyimpan Energi Listrik Masa Depan. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Fisika Al-Birun*. 3(2) : 153-159.
- S, Chen., J, Zhu., X, Wu., Q, Han., X, Wang. 2010. Graphene oxide–MnO₂ nanocomposites for supercapacitors. *ACS Nano*. 4 : 2822–2830.
- S, Li., K, Han., P, Si., J, Li., C, Lu. 2018. High–performance activated carbons prepared by KOH activation of gulfweed for supercapacitors. *Int. J. Electrochem. Sci*. 13 : 1728–1743.
- S, Sankar., A. Talha., A. Ahmed., A.I. Inamdar., H. Im., Y. Bin., Y. Lee., D. Young., S. Lee. 2019. Biomass-derived ultrathin mesoporous graphitic carbon nano flakes as stable electrode material for high-performance supercapacitors. *Mater. Des*. 169 : 107688.
- Sangeeta, Rawal, Bhawana, Joshi., Yogesh, Khumar. 2018. Synthesis and characterization of activated carbon from the biomass of *Saccharum bengalense* for electrochemical supercapacitors. *Journal of Energy Storage*. 20418-426.
- Satish R, Aravin V, Ling W C, Woei N K and Madhavi S. 2015. *Electrochim. Acta*. 182 474.
- Siti, Z., Aris, W., Nur, H., Apriza, M., Yoga, A. P., Lutfi, N., Novita, D. 2015. Analisis Luas Permukaan Zeolit Alam Termodifikasi Dengan Metode BET Menggunakan Surface Area Analyzer (SAA). Dalam Pelatihan Instrumen Jurusan Kimia FMIPA Universitas Negeri Semarang, Semarang.

- Stoller MD., Ruoff RS. 2010. Best practice methods for determining an electrode material's performance for ultracapacitors. *Energy Environ Sci.* 3 : 1294 – 1301.
- Su X., Li S., Jiang S., Peng Z., Guan X., Zheng X. 2018. Superior capacitive behavior of porous activated carbon tubes derived from biomass waste-cottonier strobili fibers. *Adv Powder Technol.* 29 : 2097 – 2107.
- Taer, E., Deraman, M., Talib, I.A., Awitdrus, A., Hashmi, S.A., Umar, A.A. 2011. Preparation of a Highly Porous Binderless Activated Carbon Monolith from Rubber Wood Sawdust by a Multi-Step Activation Process for Application in Supercapacitors. *Int. J. Electrochem. Sci.* 6 : 3301-3315.
- Taer, E., Taslim, R., Sugianto., Paiszal, M., Mukhlis., Mustika, W.S., Agustino. 2018. Meso- and Microporous Carbon Electrode and Its Effect on the Capacitive, Energy and Power Properties of Supercapacitor. *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*. vol. 9, pp.1263-1271.
- Taer, E., et al. 2018. The relationship of surface area to cell capacitance for monolith carbon electrode from biomass materials for supercapacitor application. *International Conference on Science and Technology*. Series 1116.
- Taer, E., A. Afrianda, R. Taslim, Krisman, Minarni, A. Agustino, U. Malik, A. Apriwandi. 2018. *J. Phys. Conf. Ser.* 1120 : 012007.
- Taer, E., Apriwandi, R. Handayani, R. Taslim, Awitdrus, A. Amri, Agustino, I. Iwantono. 2019. The Synthesis of Bridging Carbon Particles with Carbon Nanotubes from Areca catechu Husk Waste as Supercapacitor Electrodes. *Int. J. Electrochem. Sci.* 14 : 9436–9448.
- Taer, E., A. Agustino., A. Awitdrus., R. Farma., R. Taslim. 2020. The Synthesis of Carbon Nanofiber Derived From Pineapple Leaf Fibers as a Carbon Electrode for Supercapacitor Application. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*. Vol. 18 / 031004-1.
- Taer, E., Agrandi, Purnama., Apriwandi., Agustino., Rika, Taslim., Widya, Sinta Mustika. 2019. An Optimization Method to Determine Optimum

- Carbonization Temperature of Banana Stems Based Activated Carbon for Supercapacitors. *Materials Science and Engineering*. 599 : 012030.
- Taer, E., A, Apriwandi., Y, S. Ningsih., R, Taslim., Agustino. 2019. Preparation of Activated Carbon Electrode from Pineapple Crown Waste for Supercapacitor Application. *International Journal of Electrochemical Science*. 2462 – 2475.
- Taer, E., Taslim R., Mustika W S., Kurniasih B., Agustino., Afrianda A and Apriwandi. 2018. *Int. J. Electrochem. Sci*. 138428
- Taer, E., Rika, Taslim., Apriwandi., Agustino. 2020. Carbon nanofiber electrode synthesis from biomass materials for supercapacitor applications. *2nd International Conference and Exhibition on Powder Technology*. 2219, 020001-1–020001-7.
- Taer, E., R, Taslim., W, S Mustika., S, Nurjannah., R I Yani., Y. P Sari. 2019. Preparation of Mission Grass Flower-Based Activated Carbon Monolith Electrode for Supercapacitor Application. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 14 : 7317-7331.
- Taer, E., Kristin Natalia., Apriwandi., Rika Taslim., Agustino., Rakhmawati Farma. 2020. The synthesis of activated carbon nanofiber electrode made from acacia leaves (*Acacia mangium wild*) as supercapacitors. *Vietnam Academy of Science and Technology*. 11 : 025007.
- Thambidurai A, Lourdusamy J K, John J V and Ganesan S. 2014. *Korean J. Chem. Eng*, 31 : 268
- T, E. Rufford., D, Hulicova-Jurcakova., Z, Zhu., G, Q. Lu. 2008. Nanoporous carbon electrode from waste coffee beans for high performance supercapacitors. *Electrochem. Commun.* 10 : 1594–1597.
- T, E. Rufford., D, Hulicova-Jurcakova., Z, Zhu., G, Q. Lu. 2009. Empirical analysis of the contributions of mesopores and micropores to the double-layer capacitance of carbons. *J. Phys. Chem. C*. 113 : 19335–19343.
- U, Patil., S, Kulkarni., V, Jamadade., C, Lokhande. 2011. Chemically synthesized hydrous RuO₂ thin films for supercapacitor application. *J. Alloys Compd*. 509 : 1677–1682.

- W, Gu., G, Yushin. 2013. Review of nanostructured carbon materials for electrochemical capacitor applications: advantages and limitations of activated carbon, carbide- derived carbon, zeolite-templated carbon, carbon aerogels, carbon nanotubes, onion-like carbon, and grapheme. *WIRE Energy Environ.* 3 : 424–473.
- W. S. K. Sing, H. D. Everett, W. A. R. Haul, L. Moscou, A. R. Pierotti, J. Rouquerol, T. Siemieniewska. 1985. *Pure & App. Chem.* 57 : 603.
- Wang, L., Huang, M., Chen, S., Kang, L., He, X., Lei, Z., et al. 2017. δ -MnO₂ nanofiber/single-walled carbon nanotube hybrid film for all-solid-state flexible supercapacitors with high performance. *Journal of Materials Chemistry A.* 5 : 19107-15.
- Wang Y., Qu Q., Gao S., Tang G., Liu K., He S., Huang C. 2019. Biomass derived carbon as binder-free electrode materials for supercapacitors. *Carbon.* 155 : 706–726.
- Wei H., Wang H., Li A., Li H., Cui D., Dong M. 2020. Advanced porous hierarchical activated carbon derived from agricultural wastes toward high performance supercapacitors. *J Alloys Compd.* 820 : 153111.
- X, Gao., W, Xing., J, Zhou., G, Wang., S, Zhuo., Z, Liu., Q, Xue., Z, Yan. 2014. Superior capacitive performance of active carbons derived from *Enteromorpha prolifera*. *Electrochimica Acta.* 133 : 459–466.
- X, Zhao., L, Wei., J, Julson., Z, Gu., Y, Cao. 2015. Catalytic cracking of inedible camelina oils to hydrocarbon fuels over bifunctional Zn/ZSM-5 catalysts. *Korean Journal of Chemical Engineering.* 32 : 1528–1541.
- X, Zhao., L, Wei., S, Cheng., Y, Cao., J, Julson., Z, Gu. 2015. Catalytic cracking of carinata oil for hydrocarbon biofuel over fresh and regenerated Zn/Na-ZSM-5. *Applied Catalysis A: General.* 507 : 44–55.
- X. Wei, J. Wei, Y. Li, H. Zou, Robust hierarchically interconnected porous carbons derived from discarded *Rhus typhina* fruits for ultrahigh capacitive performance supercapacitors, *J. Power Sources.* 414 (2019) 13–23.
- X. Wu, X. Hong, Z. Luo, K.S. Hui, H. Chen, J. Wu, K.N. Hui, L. Li, J. Nan, Q. Zhang. 2013. *Electrochim. Acta.* 89 : 400.

- Xi, Lin Wu and An, Wu Xu. 2014. Carbonaceous hydrogels and aerogels for supercapacitors. *Journal of Materials Chemistry A*. 2 : 4852–4864.
- Yadav, N., Ritu, Promila, Hashmi, S.A. 2020. Hierarchical porous carbon derived from eucalyptus bark as sustainable electrodes for highperformance solid-state supercapacitor. *Sustainable Energy Fuels*. 1 : 1-35.
- Yahya, MA., Al-qodah Z., Ngah CWZ. 2015. Agricultural biowaste materials as potential sustainable precursors used for activated carbon production. A review. *Renew Sustain Energy Rev*. 46 : 218–235.
- Yin, Lihong., Chen, Yong. 2016. 3-Dimensional hierarchical porous activated carbon derived from coconut fibers with high-rate performance for symmetric supercapacitors. *Material and Design*. 111 : 44-50
- Yuhe, Cao., Keliang, Wang., et al. 2016. Hierarchical porous activated carbon for supercapacitor derived from corn stalk core by potassium hydroxide activation. *Electrochimica Acta*. 212 : 839-847.
- Zhao C., Huang Y., Shao X., Zhu Z. 2018. Rose-derived 3D carbon nanosheets for high cyclability and extended voltage supercapacitors. *Electrochim Acta*. 291 : 287 – 296.
- Zhao N., Zhang P., Luo D., Xiao W., Deng L. 2019. Direct production of porous carbon nanosheets/particle composites from wasted litchi shell for supercapacitors. *J Alloys Compd*. 788 : 677– 684.



LAMPIRAN

Lampiran 1. Skema Kerja

1. Preparasi Ampas Biji Kopi *Robusta*

Ampas Biji Kopi *Robusta*

- dicuci dengan aquades
- dikeringkan pada suhu ruang
- dioven pada suhu 110⁰C untuk menghilangkan kadar air

Ampas Biji Kopi Kering

- didinginkan
- dihaluskan dengan *ball milling*
- diayak menggunakan ayakan berukuran 38 μ m
- disiapkan untuk proses aktivasi

Ampas Biji Kopi *Robusta*

2. Proses Aktivasi Ampas Biji Kopi *Robusta*

Ampas Biji Kopi *Robusta*

- ditimbang sebanyak 20 g
- diaktivasi menggunakan larutan KOH dengan variasi konsentrasi 0,2 M, 0,3 M dan 0,5 M dalam 100 mL aquades
- diaduk sampai homogen selama \pm 3 jam pada suhu 80⁰C
- disaring dan dioven pada suhu 110⁰C selama 1 hari

Karbon Aktif Kering

3. Proses Pembuatan Pelet Elektroda Superkapasitor

Karbon Aktif Kering

- dihaluskan dan ditimbang sebanyak 0,7 g
- dicetak menjadi pelet menggunakan *hidroullic press* pada tekanan 8 ton dan ditahan selama 2 menit
- ditimbang massa dan diukur diameter serta ketebalan
- disiapkan untuk proses karbonisasi

Pelet Elektroda Superkapasitor

4. Proses Karbonisasi Pelet Elektroda Superkapasitor

Pelet Elektroda Superkapasitor

- dibungkus menggunakan tisu
- ditempatkan dalam tabung *furnace* dibawah atmosfer N_2 dengan laju pemanasan $5^\circ C/\text{menit}$
- dipanaskan secara bertingkat dengan suhu awal $400^\circ C$ lalu ditahan selama 1 jam
- dinaikkan suhu hingga $600^\circ C$ dan ditahan selama 1 jam
- dinaikkan lagi suhu hingga $800^\circ C$ dan ditahan selama 1,5 jam

Pelet Karbon Aktif Ampas Biji Kopi *Robusta*

5. Preparasi Sel Superkapasitor

Pelet Karbon Aktif Ampas Biji Kopi *Robusta*

- ditimbang dan diukur diameter serta ketebalannya
- dicuci dengan aquades hingga pH netral
- dikeringkan dalam oven pada suhu $110^\circ C$

Pelet Kering

- dipoles dengan amplas hingga ketebalan sekitar 0,2 mm dan diameter sekitar 8 mm
- ditimbang massanya
- direndam dalam larutan elektrolit H_2SO_4 selama 2 hari

Pelet Elektroda Karbon Aktif

6. Pembuatan Separator

Cangkang telur

- direndam dalam larutan HCl 1M selama 2 hari
- dipisahkan antara membran dan cangkangnya
- membran dicuci dengan akuades hingga pH netral
- dipotong kisaran 1x1 cm

Membran cangkang telur

7. Rangkaian Sel Superkapasitor

Elektroda Superkapasitor



- disusun bentuk sandwich yang dipisahkan oleh separator dibagian tengahnya
- dilakukan pengukuran sifat elektrokimia dengan *Cyclic Voltammetry* (CV) dan *Galvanostatic Charge-Discharge* (GCD)

Hasil (Csp)



Lampiran 2. Perhitungan Pembuatan Larutan KOH

a. Konsentrasi 0,2 M

Diketahui :

$$\text{Mr KOH} = 56,11 \text{ g/mol}$$

$$\text{Konsentrasi} = 0,2 \text{ M}$$

Dalam 100 mL aquades

$$\begin{aligned} \text{g KOH} &= \frac{0,2 \text{ mol}}{1 \text{ L}} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \times \frac{56,11 \text{ g}}{1 \text{ mol}} \times 100 \text{ mL} \\ &= 1,1222 \text{ g} \end{aligned}$$

b. Konsentrasi 0,3 M

Diketahui :

$$\text{Mr KOH} = 56,11 \text{ g/mol}$$

$$\text{Konsentrasi} = 0,3 \text{ M}$$

Dalam 100 mL aquades

$$\begin{aligned} \text{g KOH} &= \frac{0,3 \text{ mol}}{1 \text{ L}} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \times \frac{56,11 \text{ g}}{1 \text{ mol}} \times 100 \text{ mL} \\ &= 1,6833 \text{ g} \end{aligned}$$

c. Konsentrasi 0,5 M

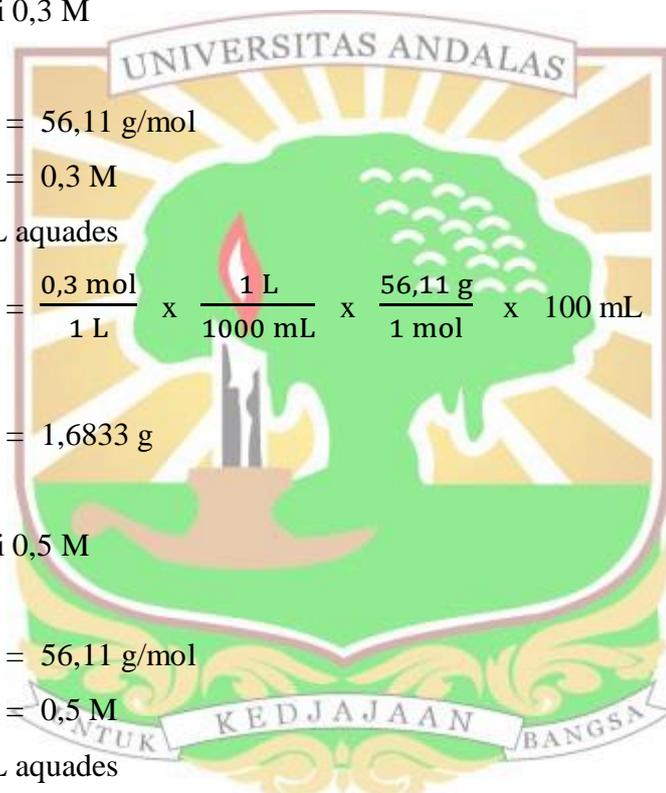
Diketahui :

$$\text{Mr KOH} = 56,11 \text{ g/mol}$$

$$\text{Konsentrasi} = 0,5 \text{ M}$$

Dalam 100 mL aquades

$$\begin{aligned} \text{g KOH} &= \frac{0,5 \text{ mol}}{1 \text{ L}} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \times \frac{56,11 \text{ g}}{1 \text{ mol}} \times 100 \text{ mL} \\ &= 2,8055 \text{ g} \end{aligned}$$



Lampiran 3. Perhitungan Kapasitansi Spesifik menggunakan Metode GCD

a. Konsentrasi KOH 0.2 M

Diketahui :

$$I = 1 \text{ A/g}$$

$$\Delta t = 1746 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$\Delta V = 998 \cdot 10^{-3} \text{ Volt}$$

$$m = 0,00985 \text{ g}$$

Maka nilai Csp adalah

$$\begin{aligned} C_{sp} &= \frac{I \cdot \Delta t}{m \cdot \Delta V} \\ &= \frac{1 \cdot 1746 \cdot 10^{-3}}{0,00985 \cdot 998 \cdot 10^{-3}} \\ &= 177 \text{ Fg}^{-1} \end{aligned}$$

b. Konsentrasi KOH 0.3 M

Diketahui :

$$I = 1 \text{ A/g}$$

$$\Delta t = 3040 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$\Delta V = 998 \cdot 10^{-3} \text{ Volt}$$

$$m = 0,0158 \text{ g}$$

Maka nilai Csp adalah

$$\begin{aligned} C_{sp} &= \frac{I \cdot \Delta t}{m \cdot \Delta V} \\ &= \frac{1 \cdot 3040 \cdot 10^{-3}}{0,0158 \cdot 998 \cdot 10^{-3}} \\ &= 192 \text{ Fg}^{-1} \end{aligned}$$

c. Konsentrasi KOH 0.5 M

Diketahui :

$$I = 1 \text{ A/g}$$

$$\Delta t = 2286 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$\Delta V = 998 \cdot 10^{-3} \text{ Volt}$$

$$m = 0,01265 \text{ g}$$

Maka nilai Csp adalah

$$\begin{aligned} C_{sp} &= \frac{I \cdot \Delta t}{m \cdot \Delta V} \\ &= \frac{1 \cdot 2286 \cdot 10^{-3}}{0,01265 \cdot 998 \cdot 10^{-3}} \\ &= 181 \text{ Fg}^{-1} \end{aligned}$$



Lampiran 4. Data Pengukuran Densitas

1. Data pengukuran densitas sebelum karbonisasi pada konsentrasi KOH 0.2 M

No	Massa (gr)	Diameter d(cm)	Tebal t(cm)	R (cm)	v (cm ³)	ρ (gr/cm ³)
1	0,62	1,96	0,23	0,98	0,68	0,91
2	0,68	1,99	0,25	0,99	0,78	0,87
3	0,64	1,95	0,25	0,98	0,73	0,87
4	0,65	1,97	0,24	0,98	0,74	0,88
5	0,67	1,99	0,25	0,99	0,76	0,88
6	0,66	2,02	0,24	1,01	0,78	0,85
7	0,64	1,96	0,23	0,98	0,69	0,93
8	0,61	1,93	0,22	0,96	0,64	0,96
9	0,65	1,97	0,25	0,98	0,76	0,86
10	0,66	1,96	0,25	0,98	0,76	0,87
11	0,64	1,96	0,24	0,98	0,73	0,88
12	0,61	1,96	0,22	0,98	0,67	0,91
13	0,69	1,99	0,27	0,99	0,83	0,83
14	0,67	1,96	0,26	0,98	0,77	0,87
15	0,64	1,95	0,25	0,98	0,74	0,86
16	0,67	1,98	0,25	0,99	0,77	0,87
17	0,62	1,98	0,22	0,99	0,67	0,92
18	0,60	1,90	0,21	0,95	0,59	1,02
						0,89

2. Data pengukuran densitas sesudah karbonisasi pada konsentrasi KOH 0.2 M

No	Massa (gr)	Diameter d(cm)	Tebal t(cm)	R (cm)	V (cm ³)	P (gr/cm ³)
1	0,14	1,18	0,18	0,59	0,20	0,70
2	0,16	1,19	0,20	0,60	0,22	0,73
3	0,15	1,19	0,19	0,59	0,21	0,72
4	0,16	1,19	0,19	0,60	0,22	0,74
5	0,15	1,18	0,18	0,59	0,20	0,75
6	0,14	1,18	0,18	0,59	0,20	0,73
						0,73

3. Data pengukuran densitas sebelum karbonisasi pada konsentrasi KOH 0.3 M

No	Massa	Diameter	Tebal	r	V	ρ
----	-------	----------	-------	---	---	--------

	(gr)	d(cm)	t(cm)	(cm)	(cm ³)	(gr/cm ³)
1	0,64	1,96	0,23	0,98	0,69	0,93
2	0,66	1,98	0,26	0,99	0,79	0,84
3	0,66	1,96	0,24	0,98	0,73	0,90
4	0,64	1,96	0,25	0,98	0,75	0,85
5	0,67	1,96	0,26	0,98	0,78	0,85
6	0,67	1,97	0,26	0,99	0,79	0,85
7	0,64	1,96	0,27	0,98	0,82	0,78
8	0,68	1,95	0,25	0,98	0,74	0,93
9	0,67	1,96	0,25	0,98	0,76	0,88
10	0,69	1,95	0,26	0,97	0,77	0,89
11	0,68	1,97	0,24	0,99	0,74	0,91
12	0,63	1,95	0,23	0,98	0,70	0,90
13	0,65	1,96	0,28	0,98	0,84	0,78
14	0,69	1,97	0,26	0,99	0,80	0,86
15	0,66	1,97	0,26	0,98	0,79	0,83
16	0,69	1,96	0,26	0,98	0,79	0,87
17	0,67	1,97	0,24	0,99	0,73	0,92
18	0,67	1,96	0,22	0,98	0,66	1,02
19	0,68	19,83	0,26	0,92	0,70	0,97
20	0,63	19,56	0,23	0,78	0,45	1,41
						0,91

4. Data pengukuran densitas sesudah karbonisasi pada konsentrasi KOH 0.3 M

No	Massa (gr)	Diameter d(cm)	Tebal t(cm)	r (cm)	V (cm ³)	P (gr/cm ³)
1	0,14	1,28	0,21	0,64	0,27	0,51
2	0,16	1,29	0,23	0,64	0,29	0,54
3	0,12	1,25	0,20	0,63	0,25	0,48
4	0,12	1,25	0,20	0,62	0,25	0,49
5	0,14	1,27	0,21	0,64	0,27	0,52
6	0,17	1,30	0,23	0,65	0,30	0,57
7	0,14	1,28	0,20	0,64	0,25	0,55
8	0,16	1,29	0,22	0,65	0,29	0,55
9	0,15	1,29	0,21	0,64	0,28	0,54
10	0,14	1,27	0,20	0,64	0,26	0,55
11	0,13	1,26	0,20	0,63	0,25	0,52
						0,53

5. Data pengukuran densitas sebelum karbonisasi pada konsentrasi KOH 0.5 M

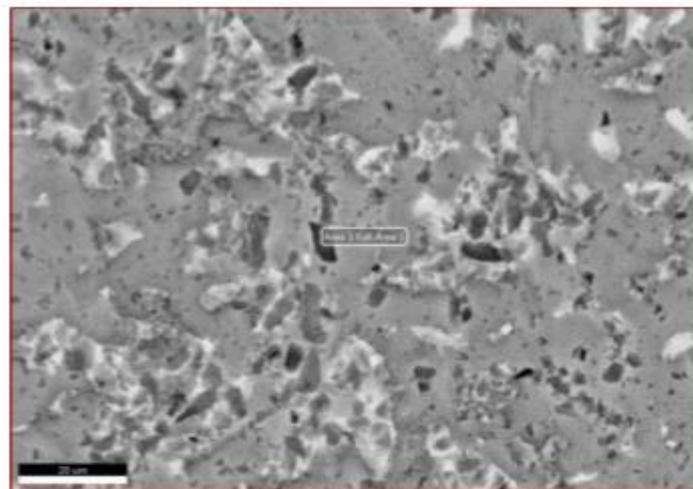
No	Massa	Diameter	Tebal	r	v	P
----	-------	----------	-------	---	---	---

	(gr)	d(cm)	t(cm)	(cm)	(cm ³)	(gr/cm ³)
1	0,65	1,97	0,22	0,99	0,66	0,98
2	0,66	1,92	0,22	0,96	0,62	1,06
3	0,68	1,96	0,23	0,98	0,70	0,97
4	0,67	1,95	0,25	0,98	0,74	0,90
5	0,69	1,98	0,27	0,99	0,83	0,83
6	0,67	1,94	0,24	0,97	0,70	0,96
7	0,66	1,98	0,25	0,99	0,78	0,84
8	0,65	1,96	0,25	0,98	0,74	0,88
9	0,67	1,99	0,26	0,99	0,79	0,85
10	0,68	1,96	0,27	0,98	0,80	0,85
11	0,68	1,95	0,25	0,98	0,76	0,89
12	0,69	1,98	0,23	0,99	0,71	0,97
13	0,66	1,97	0,26	0,99	0,78	0,85
14	0,65	1,96	0,26	0,98	0,78	0,83
15	0,68	1,98	0,26	0,99	0,81	0,84
16	0,68	1,98	0,25	0,99	0,77	0,88
17	0,69	1,98	0,25	0,99	0,77	0,90
18	0,66	1,95	0,24	0,98	0,71	0,93
19	0,68	1,98	0,25	0,99	0,77	0,89
						0,90

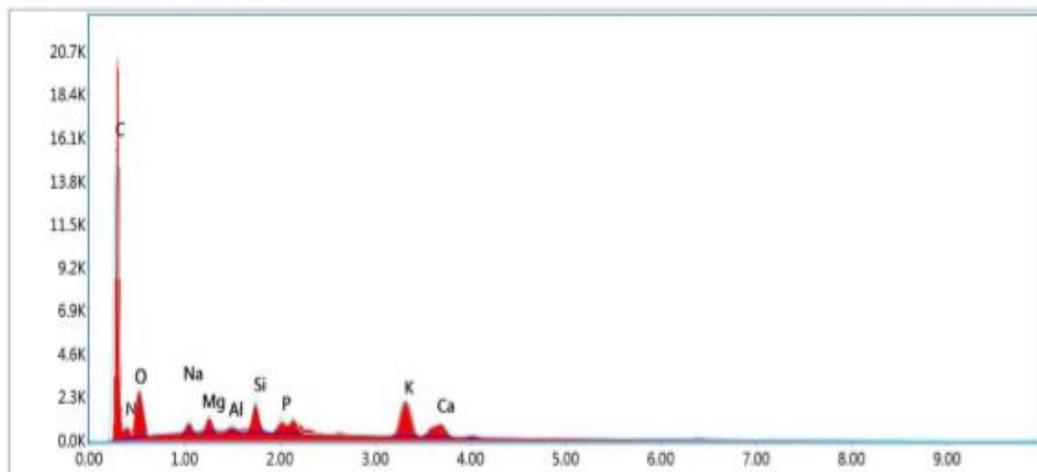
6. Data pengukuran densitas sesudah karbonisasi pada konsentrasi KOH 0.5 M

No	Massa	Diameter	Tebal	r	V	P
	(gr)	d(cm)	t(cm)	(cm)	(cm ³)	(gr/cm ³)
1	0,11	1,14	0,14	0,57	0,14	0,79
2	0,14	1,19	0,19	0,60	0,21	0,66
3	0,12	1,16	0,15	0,58	0,16	0,73
4	0,15	1,24	0,19	0,62	0,23	0,65
5	0,12	1,14	0,15	0,57	0,16	0,76
6	0,14	1,19	0,18	0,60	0,20	0,70
7	0,14	1,18	0,19	0,59	0,21	0,68
8	0,13	1,18	0,17	0,59	0,19	0,69
9	0,15	1,22	0,19	0,61	0,23	0,66
10	0,13	1,17	0,17	0,59	0,18	0,72
11	0,14	1,20	0,19	0,60	0,22	0,64
						0,70

Lampiran 5. Hasil Karakterisasi *Energy Dispersive X-Ray* (EDX)



UNIVERSITAS ANDALAS



Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	73.36	87.34	961.91	7.66	0.2058	1.0586	0.4670	1.0000
N K	2.81	3.72	50.43	89.99	0.0102	1.0312	0.0996	1.0000
O K	11.00	7.31	94.86	10.44	0.0395	1.0075	0.1568	1.0000
NaK	1.47	1.07	49.25	9.91	0.0071	0.9097	0.4900	1.0017
MgK	1.42	0.98	75.76	6.86	0.0092	0.9237	0.6456	1.0029
AlK	0.56	0.39	36.86	8.70	0.0046	0.8882	0.7852	1.0051
SiK	2.38	1.32	147.25	4.46	0.0186	0.9064	0.8571	1.0072
PK	1.46	0.78	76.20	3.76	0.0123	0.8694	0.9050	1.0108
KK	2.86	1.16	140.18	2.40	0.1104	0.8350	1.0052	1.0145
CaK	2.68	1.08	74.84	5.66	0.0231	0.8491	0.9709	1.0106

Lampiran 6. Hasil Isoterm BET Pada Konsentrasi 0.2 M

Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction
for NOVA instruments
©1994-2007, Quantachrome Instruments
version 10.01

*** The data this report is based upon is incomplete (analysis unfinished) ***

Analysis Report
Operator:ITS Date:2021/06/30 Operator:ITS Date:7/12/2021
Sample ID: Vega Filename: C:\QCdata\Physisorb\2020\20210630 01 KOH 0,5M.qps
Sample Desc: Serbuk Comment: 30 Juni 2021
Sample weight: 0.0404 g Sample Volume: 0 cc
Outgas Time: 3.0 hrs OutgasTemp: 300.0 C
Analysis gas: Nitrogen Bath Temp: 77.3 K
Press. Tolerance:0.100/0.100 (ads/des)Equil time: 60/60 sec (ads/des) Equil timeout: 120/120 sec (ads/des)
Analysis Time: 291.0 min End of run: 2021/06/30 16:29:49 Instrument: Nova Station A
Cell ID: 7
t-Method Calc. method: Carbon black
Adsorbate Nitrogen Temperature 77.350K
Molec. Wt.: 28.013 g Cross Section: 16.200 Å² Liquid Density: 0.808 g/cc

Relative Pressure	Thickness (Å)	Volume @ STP (cc/g)
3.590000e-02	3.2127e+00	150.525
4.776500e-02	3.2901e+00	157.188
7.453700e-02	3.4657e+00	167.830
9.503000e-02	3.6009e+00	174.937
1.217670e-01	3.7784e+00	183.529
1.486920e-01	3.9585e+00	190.508
1.711920e-01	4.1100e+00	195.631
1.986110e-01	4.2958e+00	202.469
2.214300e-01	4.4514e+00	207.372
2.475770e-01	4.6308e+00	213.358
2.704320e-01	4.7886e+00	218.601
2.987740e-01	4.9856e+00	224.799
3.534300e-01	5.3695e+00	236.762
8.718980e-01	9.2727e+00	405.414
8.963360e-01	9.4684e+00	415.601
9.207460e-01	9.6649e+00	426.891
9.491440e-01	9.8947e+00	442.934
9.724850e-01	1.0085e+01	453.544
9.912680e-01	1.0238e+01	463.856
9.440660e-01	9.8535e+00	445.159
8.930710e-01	9.4422e+00	423.025
8.424580e-01	9.0384e+00	405.647
7.921640e-01	8.6417e+00	383.445
7.545000e-01	8.3475e+00	368.766
6.944600e-01	7.8837e+00	346.865
6.424510e-01	7.4870e+00	329.415
5.918170e-01	7.1054e+00	310.495
5.548190e-01	6.8295e+00	298.803
4.955440e-01	6.3924e+00	281.808
4.439720e-01	6.0171e+00	267.196
3.953460e-01	5.6675e+00	254.351
3.425860e-01	5.2930e+00	240.857
2.921120e-01	4.9392e+00	227.595
2.422560e-01	4.5942e+00	213.821
1.923800e-01	4.2534e+00	200.423
1.538400e-01	3.9931e+00	188.735
9.534200e-02	3.6030e+00	170.590

V-t method summary

Thickness method: Carbon-black

Slope = 41.624
Intercept = 16.586
Correlation coefficient, r = 0.992892

Micropore volume = 0.026 cc/g
Micropore area = 43.892 m²/g
External surface area = 643.849 m²/g

Lampiran 7. Foto Penelitian



Ampas biji kopi *robusta*



Dikeringkan dan ditimbang hingga berat konstan



Diayak menggunakan ayakan berukuran 38 μm



KOH dilarutkan dalam 100 mL aquadest pada konsentrasi yang berbeda



Dicampurkan dengan 20 g ampas biji kopi *robusta*



Dikeringkan semalaman hingga kadar air hilang



Ditimbang 0.7 g sampel, dicetak membentuk pelet menggunakan *hidroullic press* pada tekanan 8 ton dan diukur diameter serta ketebalannya



Dikarbonisasi menggunakan *furnace* N_2 pada suhu 800°C secara bertingkat dengan laju pemanasan $5^\circ\text{C}/\text{menit}$



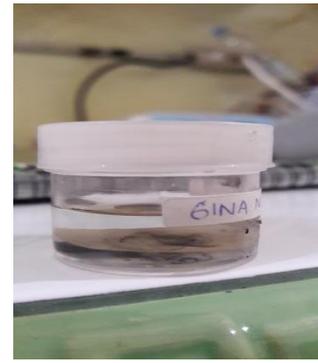
Pelet elektroda karbon aktif setelah karbonisasi, dicuci menggunakan aquades hingga pH netral dan dikeringkan dalam oven



Dipoles hingga ketebalan sekitar 0.2 mm dan diameter sekitar 8 mm



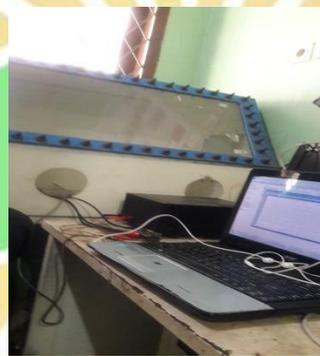
Ditimbang massanya



Direndam dalam larutan elektrolit H_2SO_4 selama 2 hari



Disusun seperti sandwich dan dipisahkan oleh separator ditengahnya



Diukur sifat elektrokimianya menggunakan CV dan GCD

