

**SINTESIS KARBON AKTIF NANO FIBER DARI SUTRA JAGUNG SEBAGAI  
ELEKTRODA PIRANTI PENYIMPAN ENERGI SUPERKAPASITOR**



**Ketua Peneliti:  
Dr. Rika, S.Si, M.Sc**

**Anggota Peneliti:  
Muhammad Ihsan Hamdy, M. T**

**PENELITIAN KOLABORASI ANTAR PERGURUAN TINGGI**

**LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT  
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SULTAN SYARIF KASIM RIAU**

**2022**

## KATA PENGANTAR

*Alhamdulillah* *rabbi* 'alamin, puji syukur kehadiran Allah SWT yang selalu melimpahkan rahmat dan karunia-Nya, sehingga laporan penelitian cluster kolaborasi antar perguruan tinggi yang berjudul "**Sintesis Karbon Aktif Nano Fiber Dari Sutra Jagung Sebagai Elektroda Piranti Penyimpan Energi Superkapasitor**" ini dapat diselesaikan. Terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam memberikan izin penggunaan Laboratorium Fisika Material dan Nanoteknologi Jurusan Fisika FMIPA UNRI terutama kepada Prof. Dr. Erman Taer, M.Si, para pembantu peneliti, seluruh mahasiswa yang terlibat, serta seluruh tim anggota peneliti. Penelitian ini telah menghasilkan elektroda dengan struktur nano fiber dari sutra jagung dengan perlakuan yang sederhana telah menunjukkan bahwa sutra jagung berpotensi dikembangkan lebih lanjut sebagai bahan dasar dalam pembuatan elektroda karbon untuk aplikasi pada superkapasitor. Namun demikian penulis memahami sepenuhnya bahwa penelitian ini masih sangat terbatas dan banyak kekurangan, untuk itu penulis secara terbuka menerima saran yang membangun.

Akhirnya dengan segala kerendahan hati kami harapkan semoga laporan penelitian ini dapat bermanfaat. Terimakasih.

Pekanbaru, 8 September 2022  
Ketua peneliti,

Dr. Rika, M.Sc

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>HALAMAN COVER</b> .....	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	<b>ii</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>iii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>iv</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>v</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>vi</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	<b>vii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Kajian/Penelitian .....	3
<b>BAB II TINJAUAN KEPUSTAKAAN</b>	
2.1 Superkapasitor .....	4
2.2 Penelitian Terdahulu.....	6
2.3 Rekam Jejak Kerjasama Penelitian.....	6
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b>	
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	10
3.2 Rencana Pembahasan .....	11
<b>BAB IV HASIL DAN LUARAN YANG DICAPAI</b>	
4.1 Elektroda Karbon Superkapasitor dari Sutra jagung .....	12
4.1.1 Analisa Derajat Kristalinitas .....	12
4.1.2 Analisa Morfologi Permukaan dan Sifat Pori.....	13
4.1.3 Analisa Eeergi Dispersif Spektroskopi.....	17
4.1.4 Analisa Sifat Elektrokimia.....	18
4.3 Luaran yang Telah Dicapai.....	23
<b>BAB V KESIMPULAN</b>	
5.1 Kesimpulan.....	24
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>25</b>
<b>LAMPIRAN</b> .....	<b>28</b>

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1.</b>	Rekam jejak publikasi .....	7
<b>Tabel 4.1.</b>	Luas permukaan spesifik, volume pori, dan ukuran pori rata-rata CSAC7 dan CSAC9.....	16
<b>Tabel 4.2.</b>	Komposisi unsur CSAC7 dan CSAC9 .....	17
<b>Tabel 4.3.</b>	Capaian luaran penelitian .....	23

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1.</b>	Perkembangan penyelidikan bahan elektroda superkapasitor .....	5
<b>Gambar 2.2.</b>	Struktur superkapasitor .....	6
<b>Gambar 3.1.</b>	Diagram alir penelitian .....	10
<b>Gambar 4.1.</b>	Pola XRD dari Sampel CSAC7 dan CSAC9 .....	12
<b>Gambar 4.2.</b>	Makrograf SEM CSAC6 dalam pembesaran (a) 5.000x, (b) 40.000x, CSAC7 dalam pembesaran (c) 5.000x, (d) 40.000x, CSAC8 dalam pembesaran (e) 5.000x, (f) 40.000x, CSAC9 dalam pembesaran (g) 5.000x, (h) 40.000x .....	14
<b>Gambar 4.3.</b>	Isoterm Adsorpsi-Desorpsi Nitrogen CSAC7 dan CSAC9 .....	15
<b>Gambar 4.4.</b>	Profil Ukuran Pori CSAC7 dan CSAC9 .....	16
<b>Gambar 4.5.</b>	Kurva CV dari CSAC6, CSAC7, CSAC8, dan CSAC9 .....	18
<b>Gambar 4.6.</b>	Kurva Kapasitansi Spesifik vs Tingkat Pemindaian CSAC6, CSAC7, CSAC8, dan CSAC9 .....	19
<b>Gambar 4.7.</b>	a) Kurva GCD CSAC6, CSAC7, CSAC8, dan CSAC9, (b) Kurva GCD pada kerapatan arus CSAC7 yang berbeda, dan (c) Plot Ragone dari CSAC6, CSAC7, CSAC8, dan CSAC9 dalam 1 M elektrolit H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	20
<b>Gambar 4.8.</b>	(a) Plot Nyquist, (b) Plot sudut fase bode, (c) kapasitansi nyata (C') vs. plot frekuensi, dan (d) kapasitansi imajiner (C'') vs. plot frekuensi perangkat simetris CSAC7 .....	21

## DAFTAR LAMPIRAN

<b>LAMPIRAN 1</b>	Full Paper Jurnal Internasional.....	28
<b>LAMPIRAN 2</b>	Proses Pembuatan Elektroda Karbon .....	49
<b>LAMPIRAN 3</b>	Data Pengujian Sifat Kristalinitas .....	50
<b>LAMPIRAN 4</b>	Data Pengujian BET .....	51
<b>LAMPIRAN 5</b>	Data Pengujian SEM .....	52
<b>LAMPIRAN 6</b>	Data Pengujian EDS .....	53
<b>LAMPIRAN 7</b>	Data Pengujian EIS .....	54

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Karbon adalah bahan fungsional yang telah banyak dipelajari dalam beberapa tahun terakhir. Sifat-sifat fisik dan kimia yang sempurna dari bahan tersebut menghasilkan berbagai bentuk dan ukuran. Dengan demikian, karbon digunakan di banyak bidang [1]. Keuntungan lain adalah ketersediaan bahan baku yang melimpah, yang berarti biaya produksi relatif rendah. Salah satu sumber yang digunakan dalam produksi karbon adalah biomassa [2-4]. Misalnya, perkebunan dan bentuk pertanian berkelanjutan lainnya merupakan sumber biomassa yang berlimpah. Di Indonesia, perkebunan kelapa sawit, karet, padi, kelapa dan jagung menghasilkan sejumlah besar biomassa. Biomassa juga dapat diperoleh dari pembukaan lahan. Biomassa sering digunakan sebagai bahan sumber dalam produksi karbon dengan biaya yang relatif rendah. Jagung adalah salah satu tanaman yang dibudidayakan sebagai salah satu makanan pokok dan banyak ditemukan di Indonesia. Ketersediaannya dalam jumlah besar adalah keuntungan dari penggunaannya dalam produksi karbon. Beberapa laporan menyebutkan bahwa sutra jagung telah digunakan sebagai pengobatan herbal [4-5]. Dalam penelitian ini, penggunaan sutra jagung sebagai bahan yang baru dalam produksi elektroda karbon untuk aplikasi superkapasitor diselidiki.

Superkapasitor, juga dikenal sebagai kapasitor lapisan ganda, adalah jenis perangkat penyimpanan energi listrik yang menggunakan karbon dengan luas permukaan yang tinggi sebagai elektroda [1,6-7]. Penyimpanan energi terjadi berdasarkan pembentukan pasangan ion dan elektron yang terdapat di antarmuka elektroda / elektrolit [8]. Muatan ini terbentuk dalam pori mikro elektroda karbon [9]. Elektroda karbon dengan luas permukaan tinggi dihasilkan dari karbonisasi dan aktivasi bahan asal, seperti biomassa [2]. Penggunaan berbagai jenis biomassa sebagai bahan baku dalam memproduksi elektroda karbon telah banyak dilaporkan. Beberapa makalah telah mempelajari sintesis elektroda karbon dari bahan biomassa, termasuk kelapa sawit [10], sekam padi [11], tongkol jagung [12], biji alpokat [13], dan serbuk gergaji kayu karet [14]. Farma et. al melaporkan elektroda karbon yang dibuat dari tandan kosong kelapa sawit menggunakan kombinasi aktivasi fisika dan kimia. Luas permukaan dan kapasitansi spesifik dari elektroda ditemukan setinggi  $1.704 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  dan  $150 \text{ F g}^{-1}$  [10]. Teo et. al menghasilkan elektroda dengan luas permukaan sebesar  $2.696 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  dan kapasitansi spesifik  $147 \text{ F g}^{-1}$  menggunakan bahan asal dari sekam padi [11]. Tongkol jagung digunakan sebagai bahan baku dalam produksi superkapasitor oleh Qu et. Al. Luas

permukaan  $1.210 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  dan kapasitansi spesifik  $314 \text{ F g}^{-1}$  telah diperoleh [12]. Huang et. al menghasilkan elektroda superkapasitor dari biji alpukat dengan luas permukaan  $1.737 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  dan kapasitansi spesifik  $165 \text{ F g}^{-1}$  [13]. Laporan-laporan ini menunjukkan bahwa bahan karbon yang berasal dari residu pertanian memiliki luas permukaan yang besar dan kapasitansi spesifik yang tinggi. Laporan lain mengungkapkan bahwa pencarian prekursor biomassa baru untuk menghasilkan elektroda karbon yang unggul terus berlanjut. Penggunaan bahan limbah biomassa juga menjadi pilihan dalam upaya mengurangi biaya produksi elektroda karbon. Ada sejumlah laporan tentang penggunaan bahan limbah, seperti residu limbah kentang [3], limbah papan partikel [15], limbah daun teh [16], limbah tanaman [17] dan daun yang jatuh [18]. Luas permukaan dan kapasitansi spesifik dari elektroda karbon yang bahan bakunya berasal dari kisaran limbah dari  $1.000 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  hingga  $3.000 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  dan  $100 \text{ F g}^{-1}$  hingga  $330 \text{ F g}^{-1}$ . Sifat kapasitif yang unggul, luas permukaan yang besar dan biaya produksi yang relatif rendah merupakan keunggulan yang terus dicari dalam biomassa yang digunakan untuk mensintesis elektroda karbon untuk superkapasitor. Keuntungan ini juga menginformasikan pertimbangan kami tentang pemanfaatan sutra jagung sebagai bahan baku untuk produksi elektroda karbon. Sutra jagung yang digunakan untuk membuat elektroda karbon monolit dikumpulkan dari limbah pedagang jagung bakar disekitar wilayah Panam dan berhampiran dengan kampus UIN SUSKA Riau, Pekanbaru, Indonesia. Bentuk monolith menawarkan cara lain untuk mengurangi biaya produksi elektroda karbon dengan mengurangi biaya menggunakan perekat. Penelitian ini akan meninjau sifat fisika dan elektrokimia dari sebuah elektroda karbon yang terbuat dari sutra jagung berdasarkan beberapa aspek seperti: (1) suhu karbonisasi, (2) suhu aktivasi fisik dan (3) agen aktivasi kimia. Proposal penelitian ini nantinya akan menunjukkan bahwa sutra jagung dapat dianggap sebagai calon bahan baku potensial untuk pembuatan karbon monolit aktif untuk aplikasi superkapasitor.

## **1.2 Rumusan masalah**

Permasalahan utama dalam penelitian ini adalah menemukan jalur pembuatan elektroda karbon tanpa perekat dari sutra jagung untuk digunakan sebagai elektroda pada piranti penyimpan energi superkapasitor

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan umum penelitian ini adalah untuk menemukan rute pembuatan elektroda karbon dari sutra jagung yang diperoleh dari limbah pedagang jagung bakar diwilayah



Panam sekitar UIN SUSKA Riau sebagai elektroda karbon aktif untuk piranti penyimpan energi superkapasitor.

#### **1.4 Kajian/Penelitian**

Pembuatan elektroda karbon tanpa perekat dari sutra sagung meliputi beberapa langkah kerja meliputi proses pengeringan, pra-karbonisasi, pengilingan, pengayakan, aktivasi kimia, penekanan, karbonisasi dan aktivasi fisika. Variasi dan pengujian pada tiap langkah kerja menjadi kunci keberhasilan untuk diperolehnya elektroda berprestasi tinggi. Pengujian sifat fisika dan elektrokimia seperti, uji morfologi permukaan, luas permukaan, uji kapasitansi, energi dan daya menjadi kunci keberhasilan jalur yang di tempuh, sehingga akhirnya dapat diperoleh sel superkapasitor dengan energi dan daya yang tinggi.

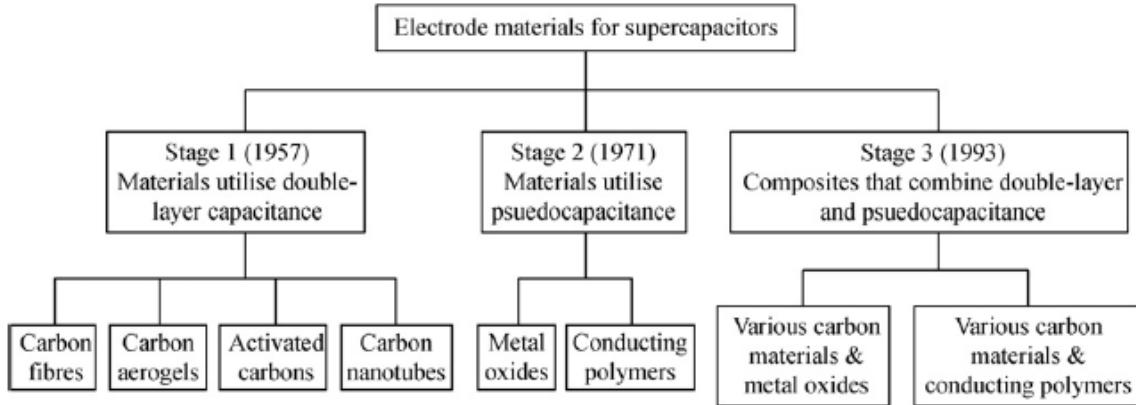
## BAB II

### TINJAUAN KEPUSTAKAAN

#### 2.1 Superkapasitor

Superkapasitor atau ultrakapasitor [18] adalah istilah yang digunakan untuk piranti penyimpan energi listrik yang mempunyai nilai kapasitan mencapai ribuan farad. Superkapasitor menjadi piranti penyimpan energi listrik yang baik untuk penyimpanan energi. Komersial produk superkapasitor mempunyai spesifik energi dibawah  $10 \text{ Wh kg}^{-1}$ , lebih rendah jika dibandingkan dengan baterai litium ion baterai dapat mencapai  $150 \text{ Wh kg}^{-1}$ . Superkapasitor mempunyai spesifik daya yang lebih tinggi dari baterai. Sisi positif lain adalah siklus hidup yang lebih tinggi, dapat dioperasikan pada jangkauan temperatur yang lebih besar dan cas serta dis cas yang cepat.

Penyelidikan pada supercapasitor dapat dibagi dalam dua kelompok berdasarkan pada cara penyimpanan energi yang disebut: 1) superkapasitor redox dan 2) kapasitor elektrokimia dua lapisan. Superkapasitor redox (juga dikenal dengan istilah pseudocapacitor), dimana sebuah tipe transfer muatan reversibel Faradaic yang menghasilkan kapasitan, yang bukan elektrostatis murni (sehingga diberi awalan 'pseudo' yang membedakan dari kapasitan electric statik). Sedangkan, penyimpanan tenaga pada kapasitor elektrokimia dua lapisan (KEDL) hampir menyerupai kapasitor tradisional yaitu melalui pemisahan muatan. Superkapasitor dapat menyimpan lebih banyak energi per unit masa atau volume dari pada kapasitor konvensional karena: 1) pemisahan muatan terjadi pada jarak yang sangat kecil pada KEDL yang terjadi pada perbatasan elektoda dan elektrolit [1]. 2) Jumlah muatan yang dapat tersimpan dapat ditingkatkan dengan luas permukaan yang tinggi. Mekanisme penyimpanan energi berlangsung secara cepat karena melibatkan perpindahan ion dari dan keluar permukaan elektroda. Pembagian lengkap tentang jenis bahan elektroda ditampilkan pada Gambar 2.1 Superkapasitor jenis KEDL adalah kategori supercapasitor yang sangat maju dikembangkan. Karbon dalam berbagai bentuk, secara intensif terus di kaji dan digunakan secara meluas sebagai material elektroda pada KEDL yang pengembangan di fokuskan pada pencapaian luas permukaan yang lebih tinggi dengan berbagai bahan asal yang lebih murah, limbah perkotaan merupakan bahan asal yang potensial dijadikan bahan asal elektroda superkapasitor dengan harga yang relatif murah.



**Gambar 2.1.** Perkembangan penyelidikan bahan elektroda superkapasitor.

Struktur superkapasitor terdiri dari dua buah elektroda yang terendam dalam elektrolit, dengan sebuah pemisah ion-permeabel yang terletak diantara kedua elektroda, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2. Dalam piranti seperti itu, masing-masing antar muka elektroda elektrolit mewakili sebuah kapasitor sehingga sebuah sell lengkap dapat dipandang sebagai dua kapasitor tersusun secara seri. Untuk kapasitor simetris (elektroda yang sama), kapasitan sel, ditunjukkan sebagai :

$$\frac{1}{C_{cell}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (1)$$

dimana  $C_1$  dan  $C_2$  mewakili kapasitan untuk elektrod pertama dan kedua [9]. Kapasitan dwi-lapisan,  $C_{dl}$ , pada masing-masing antara muka elektrod ditunjukkan dengan rumusan

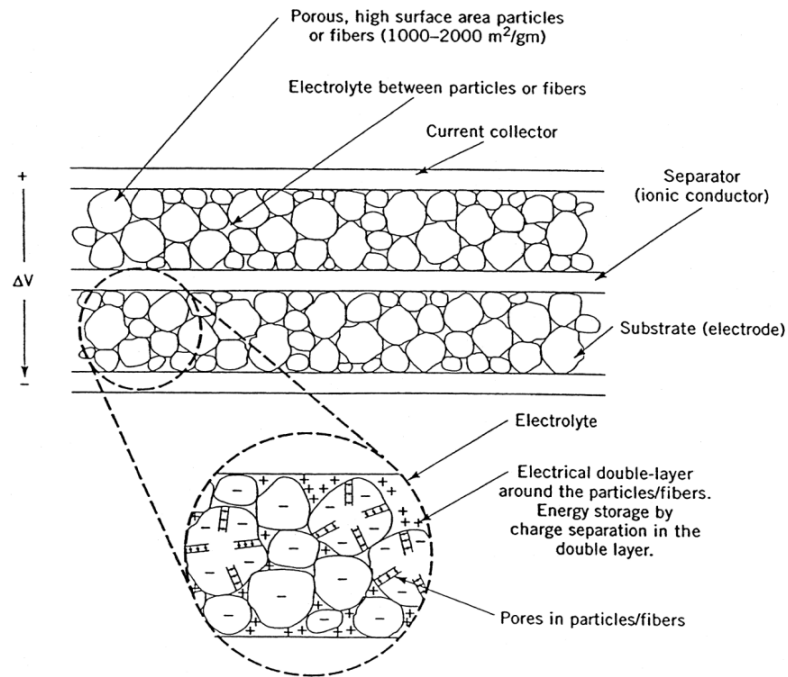
$$C_{dl} = \frac{\epsilon A}{4\pi t} \quad (2)$$

Dimana  $\epsilon$  adalah konstanta dielektrik dari daerah dwi-lapisan,  $A$  adalah luas permukaan dari elektroda dan  $t$  adalah tebal dari dwi-lapisan elektrik. Pada kapasitor dwi-lapisan, merupakan kombinasi dari luas permukaan yang tinggi (biasanya  $> 1500 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ) dengan pemisahan muatan yang sangat kecil (Angstroms) yang dapat menghasilkan kapasitan yang tinggi [19]. Energi ( $E$ ) dan daya ( $P_{max}$ ) dari superkapasitor dapat ditentukan berdasarkan

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

$$P_{max} = \frac{V^2}{4R} \quad (4)$$

dimana  $C$  adalah kapasitan dc dalam Farads,  $V$  adalah tegangan dan  $R$  adalah ekuivalen tahanan series (ESR) dalam ohm [20].



**Gambar 2.2.** Struktur superkapasitor

## 2.2 Penelitian Terdahulu Pembuatan Elektroda Supercapacitor dari Sutra Jagung

Kajian superkapasitor berbasis biomassa sutra jagung memiliki potensi besar untuk dikembangkan. Potensi sutra jagung sebagai elektroda superkapasitor telah diteliti J Zhou tahun 2020 yang telah di publikasi di jurnal internasional Journal of Electroanalytical Chemistry [21]. Hasil yang di laporkan Zhou ini diperoreh bahwa sutra jagung memiliki keunggulan struktur hoolow mikro fiber dengan kapasitansi spesifik tertinggi adalah sebesar 291 F/g dan luas permukaan spesifik 1962 F/g. Hasil ini menunjukkan elektroda karbn dari sutra jagung potensial dikembangkan sebagai elektroda karbon superkapasitor.

Dari survei sementara keberadaan sutra jagung di lingkungan kampus UIN Suska Riau ditemukan dalam jumlah yang besar. Dari observasi didapati bahwa belum ada pemanfaatan sutra jagung yang pernah dilaporkan. Sutra jagung terdiri dari serat-serat memanjang yang terdiri dari selulosa, hemiselulosa dan lingnit. Struktur biomassa seperti ini biasanya dapat menghasilkan bahan karbon dengan luas permukaan yang tinggi sehinhha sesuai digunakan sebagai elektroda seperkapasitor dengan kapasitansi yang tinggi yang akhirnya mampu menyimpan energi yang tinggi pula.

## 2.3. Rekam Jejak Kerjasama Penelitian

Rekam jejak kerjasama penelitian antara peneliti utama Dr. Rika M.Sc dan kawan kawan dari Fakultas Sains dan Teknologi UIN Suska Riau dengan kolaborator luar dari

Universitas Riau terkait penelitian tentang pemanfaatan limbah biomassa sebagai elektroda karbon superkapasitor telah terjalin sejak lima tahun terakhir. Kerjasama ini ditandai dengan publikasi bersama antara peneliti utama dari UIN SUSKA dan peneliti dari kolaborator Universitas Riau. Kajian terdahulu yang telah dilakukan dalam grup riset antara peneliti utama Dr. Rika M.Sc dan kawan kawan dari Fakultas sains dan Teknologi UIN suska Riau dengan mitra dalam negeri dari Universitas Riau yaitu Prof. Dr. Erman Taer, M.Si terkait penelitian tentang pemanfaatan limbah biomassa untuk mendapatkan karbon nano struktur dari limbah biomassa sudah intensif dilakukan dalam lima tahun terakhir. Prof. Dr. Erman Taer M.Si cukup aktif meneliti tentang pemanfaatan limbah biomassa sebagai bahan asal dalam pembuatan piranti penyimpan energi superkapasitor, ditunjukkan dengan h-indeks scopus beliau 16 dengan 89 dokumen, data terlampir. Beberapa penelitian penting yang telah dipublikasikan bersama antara lain di tampilkan pada Tabel 2.1 Penelitian ini diharapkan akan meningkatkan lagi kerjasama yang telah dijalin dengan penambahan jumlah publikasi di tingkat internasional dan nasional.

**Tabel 2.1.** Rekam jejak publikasi bersama peneliti utama Dr. Rika Taslim dan mitra dari Universitas Riau Prof. Dr. Erman Taer.M.Si

No.	Judul Artikel Ilmiah	Nama Jurnal	Volume/Nomor/ Tahun/	Ref
1	Interconnected activated carbon nanofiber derived from mission grass for electrode materials of supercapacitor.  <b>Rika Taslim</b> , Muhammad Ihsan Hamdy, Merry Siska, Erman Taer, Deris Afdal Yusra, Apriwandi, Marhama Jelita, Susi Afriani and Novi Gusnita	Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology, IOP, Q2	12 035013 (9pp)/ /2021	[22]
2	Solid coin-like design activated carbon nanospheres derived from shallot peel precursor for boosting supercapacitor performance  E Taer, A Apriwandi, DR Andani, <b>R Taslim</b>	Journal of Materials Research and Technology, Elsevier Q1	15/1732-1741 /2021	[23]
3	Porous hollow biomass-based carbon nanofiber/nanosheet for high-performance supercapacitor  Erman Taer, Apriwandi Apriwandi, Agustino Agustino, Mega Ratna Dewi,	International Journal of Energy Research, John Wiley & Sons Q1	2021	[24]

<b>Rika Taslim</b>				
4	Nanofiber-enrich activated carbon coin derived from tofu dregs as electrode materials for supercapacitor  Erman Taer, Apriwandi, Fainida Hasanah, <b>Rika Taslim</b>	Communications In Science And Technology, KIPMI, Q4	2021	[25]
5	Conversion <i>Syzygium oleana</i> leaves biomass waste to porous activated carbon nanosheet for boosting supercapacitor performances  Erman Taer, Apriwandi Apriwandi, <b>Rika Taslim</b> , Agustino Agustino, Deris Afdal Yusra	journal-of-materials-research-and-technology, Elsevier Q1	2020	[26]
6	Synthesis of High Porous Activated Carbon Nanofibers using the Single-Step Pyrolysis of Reeds Waste and Its Applications in Supercapacitor Electrodes  <b>Rika Taslim</b> , Erman Taer, Suedi, Merry Siska, Suwandana, Agustino, Apriwandi	Technology Reports of Kansai University Q3	Vol 62, (09) 2020	[27]
7	Porous activated carbon monolith with nanosheet/nanofiber structure derived from the green stem of cassava for supercapacitor application  Erman Taer, Novi Yanti, Widya Sinta Mustika, Apriwand Apriwandi <b>Rika Taslim</b> , Agustino Agustino	International Journal of Energy Research, John Wiley & Sons Q1	2020	[28]
8	A rod-like mesoporous carbon derived from agro-industrial cassava petiole waste for supercapacitor application  Erman Taer, Apriwandi Apriwandi, Bima Kumala Levanade Dalimunthe and <b>Rika Taslim</b>	J Chem Technol Biotechnol John Wiley & Sons Q1	2020	[29]
9	Enhancing the performance of supercapacitor electrode from chemical activation of carbon nanofibers derived	Carbon Letters Springer Q2	2020	[30]

---

*Areca catechu* husk via one - stage  
integrated pyrolysis

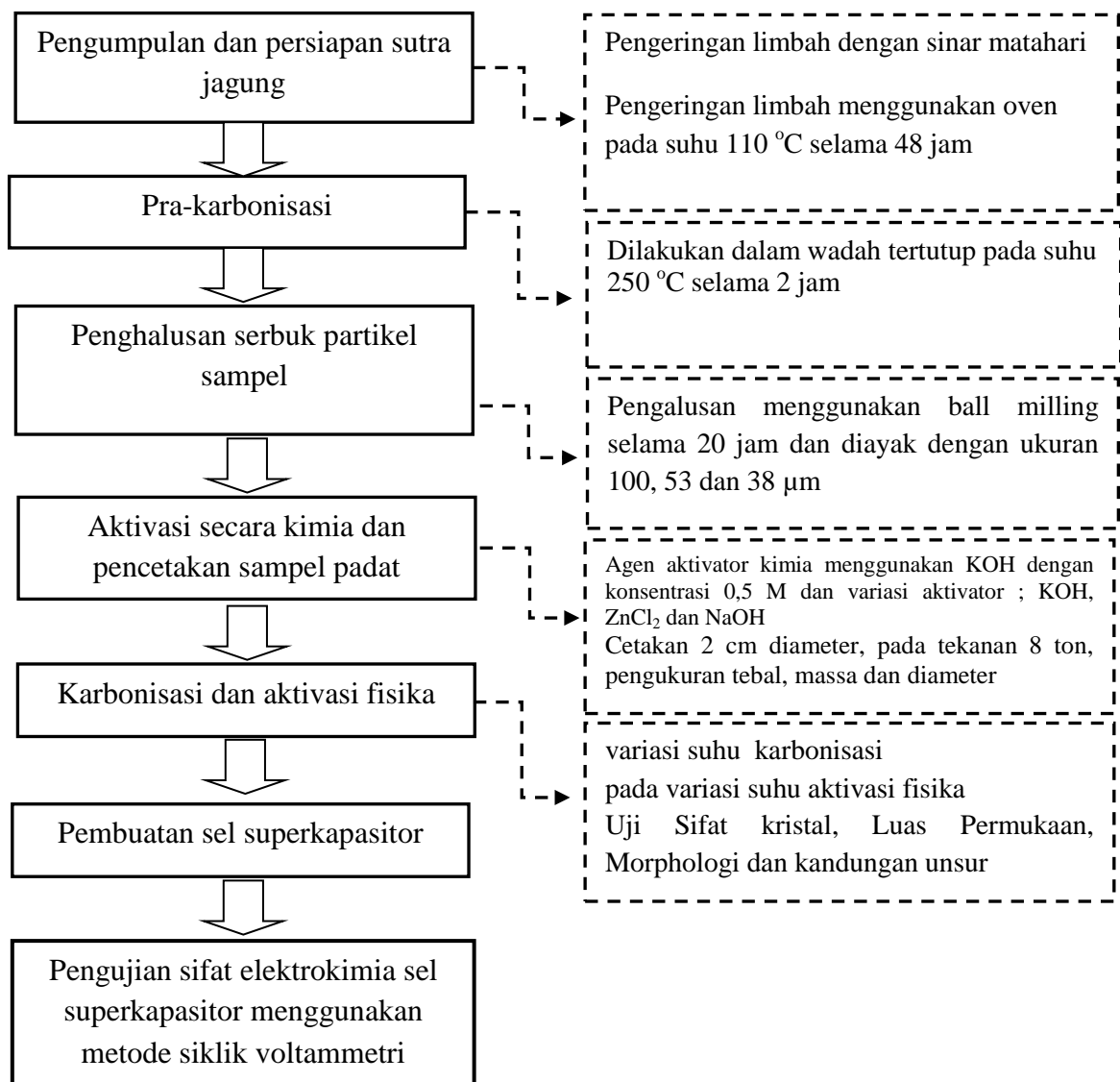
Erman Taer · Friska Febriyanti · Widya  
Sinta Mustika · **Rika Taslim** · Agustino  
Agustino · Apriwandi Apriwandi

- 
- |           |  |   |      |      |
|-----------|--|---|------|------|
| <b>10</b> | The synthesis of activated carbon nanofiber electrode made from acacia leaves ( <i>Acacia mangium</i> wild) as supercapacitors | Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology, IOP, Q1 | 2020 | [31] |
|-----------|--|---|------|------|
- Erman Taer, Kristin Natalia, Apriwandi Apriwandi, **Rika Taslim**, Agustino Agustino and Rakhmawati Farma
-

### BAB III

## METODE DAN TEKNIK PENGALIAN DATA

Adapun instrumen penelitian ini adalah melalui survey lapangan limbah sutra jagung yang ada di lingkungan UIN Suska Riau dan mendata jumlahnya dan dilanjutkan dengan pekerjaan laboratorium untuk menyiapkan sampel dan kemudian juga akan dilanjutkan pengiriman sampel ke beberapa laboratorium di luar lingkungan UIN Suska. Secara berurutan proses kegiatan penelitian ini dapat di lihat pada diagram alir berikut ini.



**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian

Selanjutnya untuk analisa sifat-sifat dasar material seperti uji sifat termal di Laboratorium biomassa UNILA Lampung, sifat kristal di laboratorium Fisika UNP Padang, uji morphologi dengan alat Scanning Elektron Micrograph (SEM) di laboratorium material



ITB Bandung, uji luas permukaan di laboratorium teknik kimia ITB, serta uji prestasi kapasitif di laboratorium material dan nanoteknologi FMIPA Universitas Riau.

Gambar 3.1 memaparkan tahapan-tahapan penyiapan sampel dapat dijelaskan dimana sampel sutra jagung yang diteliti untuk dijadikan elektoda piranti superkapasitor adalah berasal dari lingkungan kampus UIN Suska Riau ini di kumpulkan melalui petugas kebersihan Kampus. Sampel sutra jagung tumbuhan pertama sekali mengalami penjemuran dan pengeringan, penghancuran dan di pra-karbonisasi. Setelah itu dihancurkan sampai menjadi serbuk dengan ukuran partikel yang seragam dengan melalui proses pengayakan. Selanjutnya beberapa proses aktivasi kimia dan fisika dan sampai dihasilkannya pelet karbon setelah melalui proses pencetakan. Akhir sekali adalah proses perakitan sel superkapasitor dan proses pengujian sifat elektrokimia menggunakan cyclic voltammetry (CV).

### **3.2 Rencana Pembahasan**

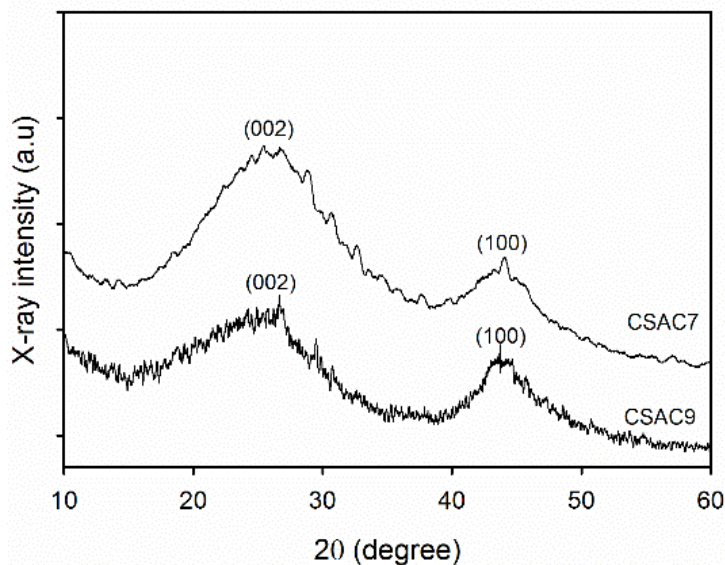
Pembahasan penelitian difokuskan pada pembahasan hasil uji yang telah diperoleh meliputi pembahasan sifat morfologi permukaan menggunakan alat serapan gas N<sub>2</sub>, pembahasan sifat derajat kristalinitas menggunakan alat difraksi sinar X, pembahasan kandungan unsur yang terkandung menggunakan alat energi dispersive sinar X, pembahasan kandungan energi dan daya yang dapat disimpan oleh sel superkapasitor menggunakan metode siklik voltametri dan cas-discas pada arus konstan.

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Elektroda Karbon Superkapasitor dari Sutra Jagung

#### 4.1.1 Analisa Derajat Kristalinitas

Sifat perubahan fase kristal karbon berpori hierarkis berbasis sutra jagung ditinjau menggunakan metode bubuk X-ray diffraction (XRD). Pola XRD dengan suhu aktivasi fisik yang berbeda terutama antara 700 dan 900 °C, ditunjukkan pada Gambar 4.1

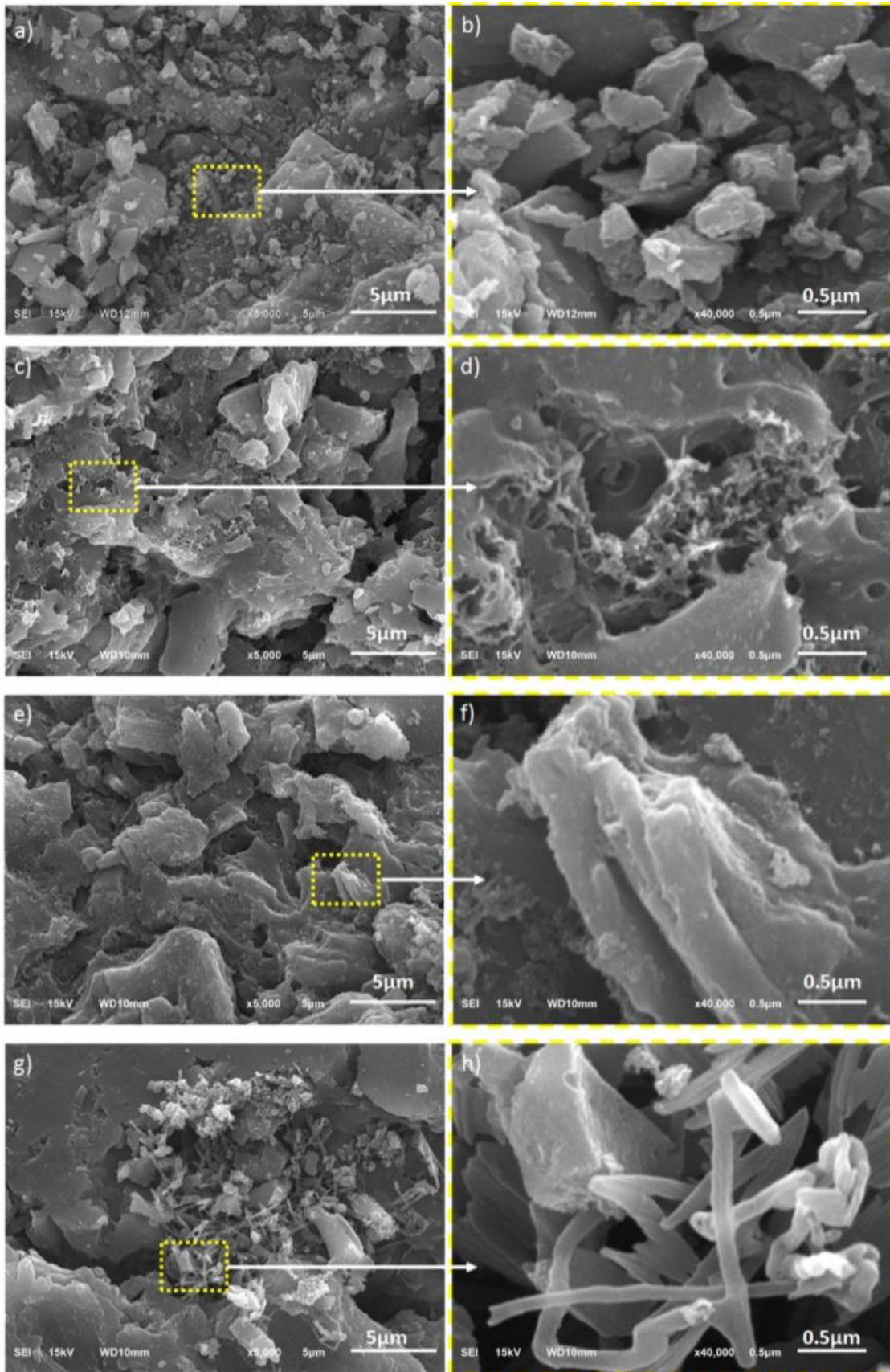


**Gambar 4.1** Pola XRD dari Sampel CSAC7 dan CSAC9

CSAC7 menampilkan dua puncak luas yang dikonfirmasi dengan jelas pada sudut  $2\theta$   $24,34^\circ$  dan  $43,92^\circ$  yang sesuai dengan bidang hamburan 002 dan 100. Karakteristik ini menunjukkan bahwa struktur karbon turbostratik/terganggu memiliki sifat amorf yang tinggi [26]. Di sisi lain, CSAC9 melakukan puncak luas rendah pada sudut  $2\theta$   $24,86^\circ$  dan  $44,13^\circ$  yang menunjukkan sifat amorf terdegradasi ke arah grafitisasi karena perlakuan suhu tinggi. Selanjutnya, puncak luas yang paling jelas di bidang pantulan 002 yang berkisar antara sudut  $24,34^\circ$ - $24,86^\circ$  menunjukkan struktur lembaran aromatik acak, sedangkan bidang pantulan 100 dari  $43,92^\circ$ -  $44,13^\circ$  menegaskan jenis karbon yang dekat dengan struktur grafit, dalam hal ini, pelemahan struktur grafit terhadap pembentukan struktur karbon yang terganggu [27,28]. Bidang refleksi 002 dan 100 dilemahkan dari sampel CSAC7 ke CSAC9 karena proses pirolisis suhu tinggi dari 700 hingga 900 °C cenderung meningkatkan struktur karbon aktif acak yang terganggu, sehingga memulai pembentukan amorf yang lebih baik [29]. Properti ini penting untuk meningkatkan struktur pori hierarkis yang baik dalam sampel karbon.

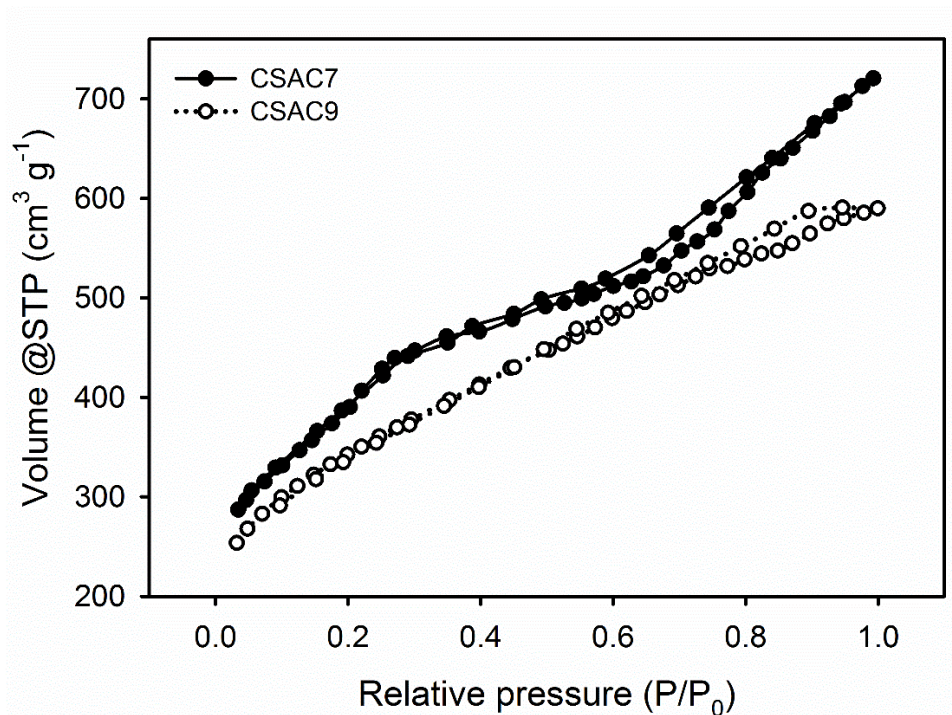
#### **4.1.2 Analisa Morfologi Permukaan dan Sifat Pori**

Struktur morfologi limbah sutra jagung berbasis karbon aktif dievaluasi menggunakan metode SEM pada tegangan 15 kV. Gambar 4.2 menunjukkan struktur morfologis dengan suhu aktivasi fisik yang berbeda yaitu 600°C, 700°C, 800°C, dan 900°C. Secara umum, struktur permukaan luar sampel didominasi oleh bahan curah, agregasi dan rumpun partikel keriput besar, sementara beberapa bagian menampilkan struktur permukaan bagian dalam yang berbeda untuk setiap suhu. Pada suhu 600°C Gambar 4.2a, karbon aktif terdiri dari agregasi partikel dengan kerutan permukaan. Selain itu, zoom yang lebih besar pada Gambar 4.2b menunjukkan bahwa permukaan sampel relatif rata di setiap agregasi tanpa pori-pori yang jelas. Selanjutnya, aktivasi fisik pada suhu yang lebih tinggi di atas 700°C menyebabkan dekomposisi yang lebih baik menjadi komponen dasar termasuk hemiselulosa, selulosa, lignin dibandingkan dengan 600°C. Ini menunjukkan morfologi permukaan yang relatif berbeda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2c-d. Gambar 4.2c menunjukkan struktur lubang pori yang relatif dominan dalam kisaran 64-7.214 nm. Struktur pori yang beragam termasuk mesopori dan makropori dikonfirmasi pada area pembesaran yang lebih besar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2d. Mesopori memiliki ukuran berkisar antara 18-48 nm, sedangkan makropori berada di kisaran 73-136 nm. Namun, struktur mikropori tidak ditemukan pada pembesaran ini. Kombinasi struktur mesopori dan makropori sangat menguntungkan dalam proses difusi ion halus serta arah penyerapannya dalam bentuk 3D untuk meningkatkan dan mempertahankan energi tinggi dan kepadatan daya superkapasitor masing-masing [10,30]. Analisis ini selanjutnya dikonfirmasi menggunakan voltametri siklik.



**Gambar 4.2** Makrograf SEM CSAC6 dalam pembesaran (a) 5.000x, (b) 40.000x, CSAC7 dalam pembesaran (c) 5.000x, (d) 40.000x, CSAC8 dalam pembesaran (e) 5.000x, (f) 40.000x, CSAC9 dalam pembesaran (g) 5.000x, (h) 40.000x

Peningkatan suhu aktivasi fisika 800°C pada sampel CSAC8 menunjukkan morfologi permukaan yang diisi dengan makropori yang memiliki ukuran relatif besar kurang dari 300 nm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2e. Selain itu, Gambar 4.2f menunjukkan morfologi yang berbeda di mana struktur seperti batang tubular berkerumun ditemukan. Ini karena porositas suhu yang lebih tinggi memungkinkan pemecahan struktur karbon utama yang berasal dari selulosa dan lignin secara drastis. Bentuk batang disumbangkan dari struktur dasar selulosa sedangkan bentuk tubular luar dikaitkan dengan lignin [31]. Analisis ini telah dilaporkan dalam penelitian sebelumnya dengan prekursor biomassa yang berbeda seperti tangkai daun singkong [32] dan cangkang kakao [33]. Selain itu, suhu 900°C memaksimalkan proses dekomposisi dasar selulosa dan lignin untuk membentuk morfologi permukaan serat karbon yang jelas, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2g-h. Diameter serat nano yang diperoleh relatif bervariasi dalam kisaran 76 nm hingga 127 nm. Serat serat nanofiber yang dominan memungkinkan pori-pori yang terhubung dengan baik dalam kisaran ukuran yang relatif kecil [34]. Karakteristik ini meningkatkan kinerja superkapasitor yang tinggi.



**Gambar 4.3** Isoterm Adsorpsi-Desorpsi Nitrogen CSAC7 dan CSAC9

Analisis isoterm adsorpsi/desorpsi nitrogen dari karbon aktif berpori hierarkis berbasis sutra jagung pada suhu pirolisis yang berbeda diperlukan untuk mengevaluasi dampak struktur pori dan sifat porositas. Gambar 4.3 menunjukkan kurva isoterm adsorpsi-desorpsi N<sub>2</sub> dari kedua sampel, CSAC7 memiliki adsorpsi N<sub>2</sub> yang signifikan pada tekanan relatif

$0,0 < P/P_0 < 0,2$ , sehingga mengkonfirmasi jumlah mikropori yang relatif besar. Selanjutnya, loop histeresis tipe H4 ditunjukkan dengan jelas pada rentang tekanan relatif yang relatif panjang yaitu  $0,2 < P/P_0 < 0,9$  yang menunjukkan karakteristik mesopori yang seragam pada CSAC7 seperti yang disajikan pada Tabel 4.1. Puncak pada tekanan tinggi  $P/P_0 > 0,9$  menunjukkan adanya makropori, tetapi penambahan suhu aktivasi fisika hingga  $900^\circ\text{C}$  pada CSAC9 menunjukkan penyerapan isoterm  $\text{N}_2$  yang berbeda dibandingkan dengan CSAC7. Hasil serupa selanjutnya dikonfirmasi melalui profil penyerapan gas  $\text{N}_2$  yang disajikan pada Gambar 4.3. Reaksi KOH pada suhu karbonisasi  $700^\circ\text{C}$  menunjukkan pengurangan kepadatan pelet tertinggi sebesar 29,85% yang menunjukkan bahwa sampel CSAC7 memiliki pori-pori yang melimpah untuk kinerja elektroda superkapasitor yang tinggi. Kurva adsorpsi-desorpsi  $\text{N}_2$  CSAC9 menunjukkan adsorpsi yang relatif linier meningkat yang tidak terlalu tinggi pada tekanan rendah, sehingga menunjukkan adanya mikropori rendah. Selain itu, loop histeresis tipe H4 tidak terbentuk sepenuhnya pada kisaran tekanan yang relatif pendek dari  $P/P_0 = 0,6$  hingga  $0,95$  yang terutama disebabkan oleh pori-pori yang tumbuh ke arah yang lebih besar dan didominasi oleh tipe seperti leher botol sempit dengan permukaan bagian dalam yang lebih besar [37] seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.2

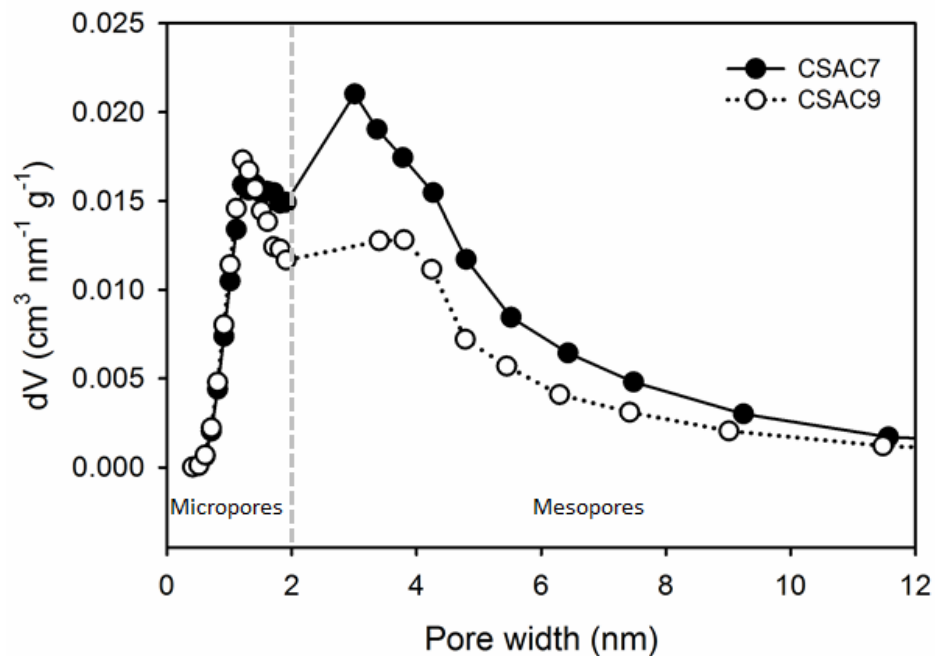
**Table 4.1** Luas permukaan spesifik, volume pori, dan ukuran pori rata-rata CSAC7 dan CSAC9

Sampel	$S_{\text{BET}}$ ( $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ )	$S_{\text{micro}}$ ( $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ )	$S_{\text{meso}}$ ( $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ )	$V_{\text{tot}}$ ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ )	$V_{\text{micro}}$ ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ )	$V_{\text{meso}}$ ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ )	$D_{\text{aver}}$ (nm)
CSAC7	1096.951	531.087	565.864	1.115	0.314	0.801	4.06
CSAC9	744.818	423.360	321.458	0.9126	0.4476	0.465	3.15

Distribusi ukuran pori seperti yang disajikan pada (Gambar 4.4) menunjukkan bahwa kedua sampel memiliki kombinasi mikropori dan makropori. Hasil ini relatif konsisten dengan SEM yang juga menegaskan struktur berpori hierarkis. CSAC7 memiliki struktur pori-pori 3D yang terhubung secara hierarkis yang mengarah ke adanya mesopori dengan puncaknya pada 3,89 nm. Selain itu, impregnasi kimia KOH pada pirolisis suhu tinggi  $700^\circ\text{C}$  memungkinkan prekursor menghasilkan kombinasi mikropori dan mesopora yang baik untuk meningkatkan kinerja elektroda basa.

Persentase mikropori dan mesopori CSAC7 adalah 48,41% dan 51,59% dengan luas permukaan tinggi  $1.096,951 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ . Luas permukaan yang tinggi ditambah dengan kombinasi pori-pori yang terhubung secara hierarkis diyakini dapat meningkatkan sifat elektrokimia superkapasitor [38]. Selain itu, fraksi volume mesopori yang tinggi berpotensi memfasilitasi

transportasi ion yang cepat dan bertindak sebagai reservoir ion elektrolit, sehingga mengurangi jarak difusi ion ke permukaan karbon, memastikan kemampuan laju tinggi dan kepadatan daya yang tinggi. Selain itu, CSAC9 menampilkan distribusi ukuran pori yang relatif mirip dengan CSAC7 tetapi didominasi oleh mikropori dengan persentase 56,84%. Impregnasi KOH pada suhu yang lebih tinggi hingga 900°C memungkinkan degradasi agregasi karbon dan mengikis dinding pori utama, sehingga menciptakan struktur tubular dan nanofiber. Ini secara bersamaan mengurangi luas permukaan spesifik CSAC9 menjadi 744,818 m<sup>2</sup>g<sup>-1</sup> dengan diameter rata-rata 3,15 nm seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.1. Namun demikian, sifat porositas yang dikembangkan dari bahan karbon penting untuk transportasi dan penetrasi ion elektrolit yang cepat [39]. Hasil ini konsisten dengan data SEM.



**Gambar 4.4** Profil ukuran pori CSAC7 dan CSAC9

#### 4.1.3 Analisa Energi Dispersif Spektroskopi

Komposisi unsur sampel karbon aktif berpori pada suhu aktivasi 700°C dan 900°C untuk CSAC7 dan CSAC9 diperiksa menggunakan teknik Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) dalam rentang energi 0-20 keV. Tabel 4.2 menunjukkan komposisi unsur sampel CSAC7 dan CSAC9 secara rinci. Unsur karbon (C) memiliki persentase tertinggi sekitar 83,7485-85,2755% diikuti oleh oksigen 8,0333-8,6075%, silikon (Si) 3,2471-3,1535%, kalium (K) 1,6359-3,9428%, magnesium (Mg) 0,8317-0,7930%, dan aluminium (Al) 0,4022-0,3290%.

**Table 4.2** Komposisi unsur CSAC7 dan CSAC9

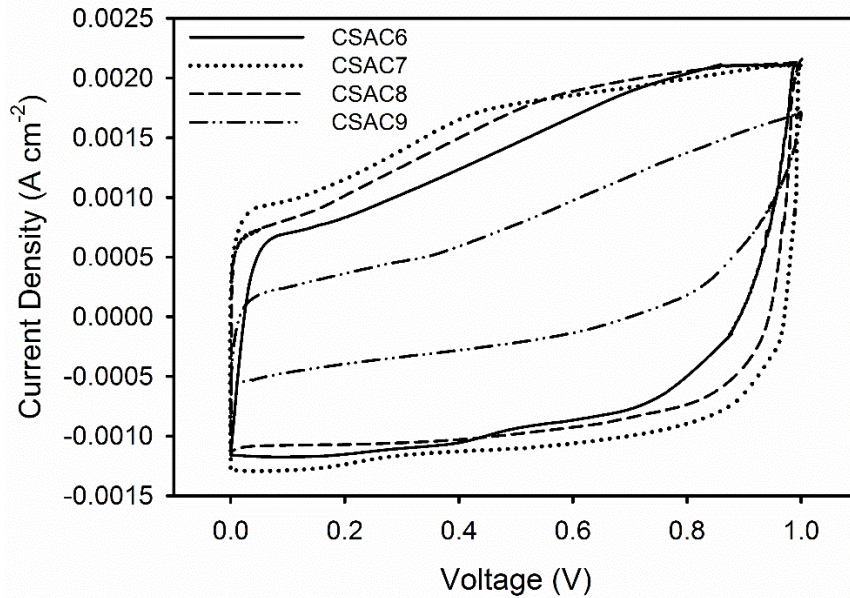
Element	CSCA7 (%)	CSAC9 (%)
Carbon (C)	85.2755	83.7485
Oxygen (O)	8.6075	8.0333
Silicon (Si)	3.2471	3.1535
Potassium (K)	1.6359	3.9428
Magnesium (Mg)	0.8317	0.7930
Aluminium (Al)	0.4022	0.3290

Pirolisis suhu tinggi 700°C untuk CSAC7 menunjukkan komposisi karbon tertinggi sebesar 85,2755%. Properti ini dianggap meningkatkan sifat kapasitif dari bahan elektroda. Selain itu, oksigen unsur tertinggi juga ditemukan dalam sampel CSAC7 yang berkontribusi pada keterbasahan material sehingga memulai efek pseudokapasitan [35]. Peningkatan suhu aktivasi hingga 900°C untuk CSAC9 mengurangi persentase karbon dan oksigen dalam sampel. Ini karena aktivasi suhu tinggi menguapkan unsur-unsur penyusun material dalam bentuk lebih banyak H<sub>2</sub>O dan CO<sub>2</sub>. Selain itu, unsur-unsur lain seperti Silikon, Kalium, Magnesium, dan Aluminium diperoleh dalam jumlah yang relatif rendah dari sumber dasar biomassa yang belum sepenuhnya menguap [36].

#### 4.1.4 Analisa Sifat Elektrokimia

Parameter utama yang digunakan untuk mengevaluasi sifat elektrokimia karbon aktif berpori hierarkis termasuk kapasitansi spesifik tinggi, peningkatan energi dan kepadatan daya tetap, serta kapasitansi retensi. Berdasarkan analisis penyerapan gas N<sub>2</sub>, karbon aktif berbasis sutra jagung memiliki kombinasi mikropori dan mesopori yang mampu menampung muatan ion aktif yang relatif tinggi dan memfasilitasi difusi tanpa halangan pada antarmuka elektroda/elektrolit. Kinerja elektrokimia CSAC6, CSAC7, CSAC8, dan CSAC9 berdasarkan suhu aktivasi fisik yang berbeda dievaluasi dengan konfigurasi dua elektroda dalam elektrolit berair menggunakan voltametri siklik dan teknik pengisian-pengosongan galvanostatik. Kurva voltametri siklik (CV) pada 600°C, 700°C, 800°C, dan 900°C ditunjukkan pada (Gambar 4.5). Profil CV menunjukkan bentuk kuasi-persegi panjang, menunjukkan perilaku khas superkapasitor tipe lapisan ganda elektrokimia (EDLC) dalam sistem elektrolitik berair pada tingkat pemindaian 1 mV s<sup>-1</sup>.

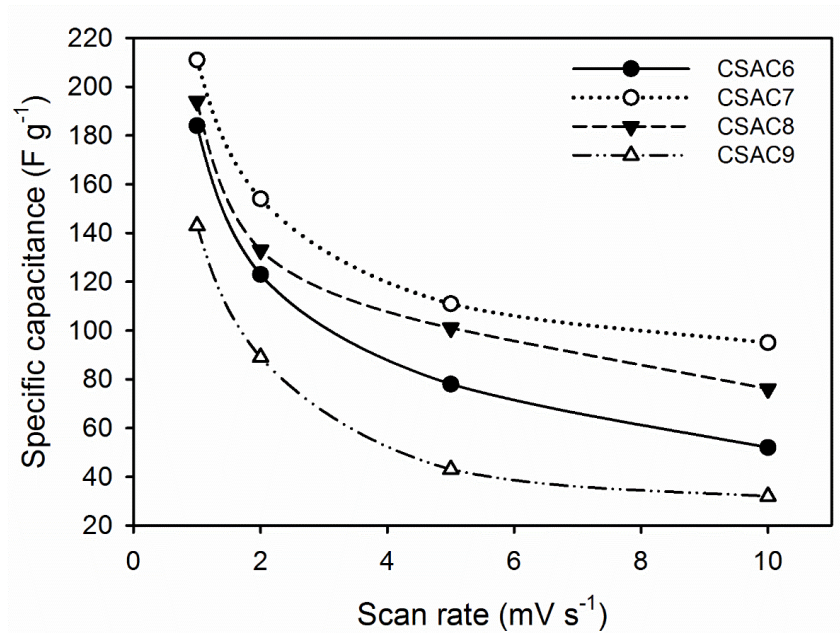




**Gambar 4.5** Kurva CV dari CSAC6, CSAC7, CSAC8, dan CSAC9

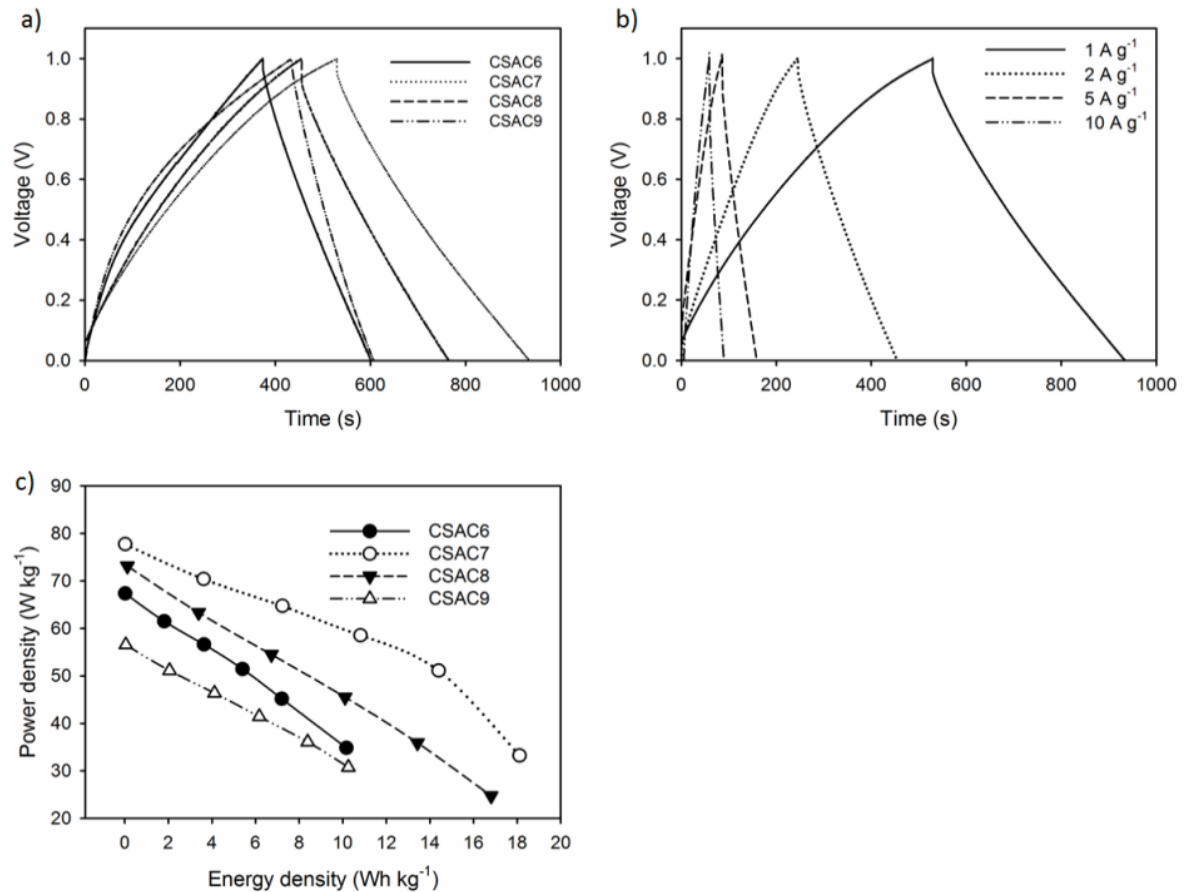
Selain itu, sifat pseudokapasidansi ditemukan relatif rendah seperti yang ditunjukkan oleh lonjakan kerapatan arus tegangan berkisar antara 0,3-0,6V. Properti ini merupakan kontribusi dari sifat heteroatom dan keterbasahan oksigen unsur dalam sampel. Secara umum, semua sampel menunjukkan sifat elektrokimia yang serupa. Dengan menggunakan persamaan standar, kapasitansi spesifik CSAC6, CSAC7, CSAC8, dan CSAC9 dievaluasi masing-masing menjadi 184, 211, 194, dan 143 F g<sup>-1</sup>. Peningkatan suhu aktivasi fisika meningkatkan sifat kapasitif superkapasitor sebesar 211 F g<sup>-1</sup>. Ini karena suhu CSAC7 yang lebih tinggi menunjukkan struktur permukaan mesopori dan makropori yang relatif kaya, yang menyediakan luas permukaan tinggi dan jalur difusi muatan ionik ke segala arah, sehingga memfasilitasi sifat kapasitif yang tinggi. Analisis ini konsisten dengan hasil SEM dan penyerapan gas N<sub>2</sub> pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3. Pada 800°C, struktur permukaan sifat kapasitif dikurangi menjadi 194 F g<sup>-1</sup>. Hal ini dikarenakan peningkatan suhu aktivasi fisika pada sampel CSAC8 menunjukkan morfologi permukaan yang diisi dengan makropori dengan ukuran yang relatif besar kurang dari 300 nm, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2e. Selain itu, morfologi struktur seperti batang tubular berkerumun memungkinkan fraktur yang mempersempit jalur transportasi ion pada permukaan elektroda. Suhu lebih lanjut ditingkatkan hingga 900°C untuk CSAC9 memungkinkan erosi dan kerusakan dinding partikel agregasi karbon dan struktur seperti batang untuk menutupi pori-pori yang ada, ini mengurangi sifat kapasitif menjadi 143 F g<sup>-1</sup>. Meskipun struktur pori menampilkan serat nano yang relatif padat, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2h, ia tidak dapat

mempertahankan distribusi pori hierarkis 3D dari mikropori dan mesopori sehingga mengurangi sifat elektrokimia.



**Gambar 4.6** Kurva kapasitansi spesifik vs. tingkat pemindaian CSAC6, CSAC7, CSAC8, dan CSAC9

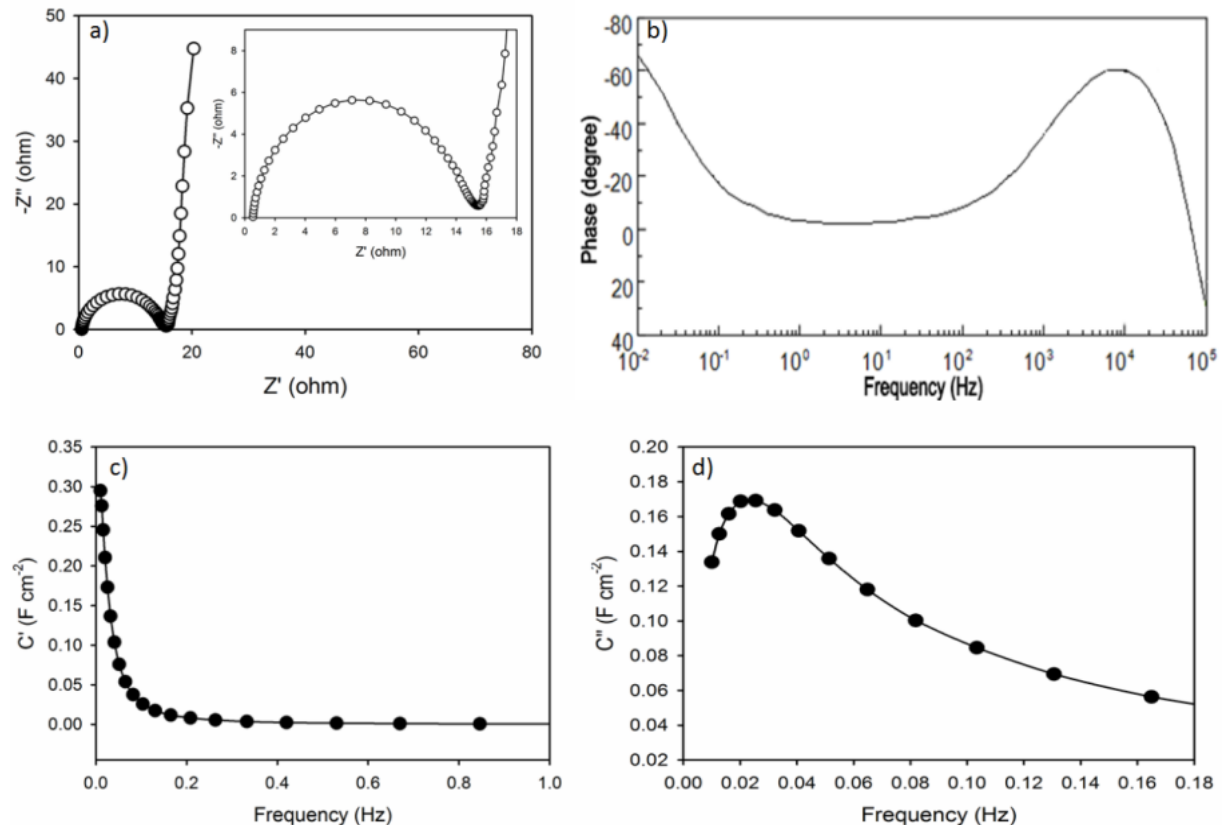
Kapasitansi spesifik CSAC6, CSAC7, CSAC8, dan CSAC9 juga dievaluasi pada tingkat pemindaian yang berbeda dari  $1 \text{ mV s}^{-1}$  hingga  $10 \text{ mV s}^{-1}$ , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.6. Karbon aktif yang mempertahankan kapasitansi spesifik tertinggi sebesar 45% adalah CSAC7, diikuti oleh CSAC8, CSAC6, dan CSAC9 dengan nilai masing-masing 39%, 28%, dan 23%. Kurva charge-discharge (GCD) galvanostatik dari sel simetris CSAC6, CSAC7, CSAC8, dan CSAC9 pada kerapatan arus  $1 \text{ A g}^{-1}$  ditunjukkan pada Gambar 4.7a. Secara umum, kurva GCD menampilkan profil normal untuk tipe EDLC dengan penurunan  $iR$  yang sedikit samar. Menurut profil GCD, kapasitansi spesifik yang diproduksi di CSAC6, CSAC7, CSAC8, dan CSAC9 masing-masing adalah  $152$ ,  $237$ ,  $174$  dan  $124 \text{ g}^{-1}$ , dalam elektrolit  $1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ . Suhu aktivasi yang lebih tinggi dari  $600^\circ\text{C}$  hingga  $700^\circ\text{C}$  mengkonfirmasi kombinasi mikro-mesopori  $48,41\%$  dan  $51,59\%$  menunjukkan sifat elektrokimia tertinggi dari  $152 \text{ F g}^{-1}$  hingga  $237 \text{ F g}^{-1}$ . Hasil ini berkorelasi dengan SEM,  $\text{N}_2$  gas adsorpsi/desorpsi, dan analisis CV. Suhu aktivasi yang tinggi dari  $700^\circ\text{C}$  hingga  $900^\circ\text{C}$  menurunkan nilai kapasitif elektroda karbon hingga  $124 \text{ F g}^{-1}$  untuk sampel CSAC9. Ini terkait dengan runtuhnya dinding pori dan erosi struktur kerangka karbon untuk menutupi situs aktif muatan ionik di bawah [37].



**Gambar 4.7** (a) Kurva GCD CSAC6, CSAC7, CSAC8, dan CSAC9, (b) Kurva GCD pada kerapatan arus CSAC7 yang berbeda, dan (c) Plot Ragone dari CSAC6, CSAC7, CSAC8, dan CSAC9 dalam 1 M elektrolit H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Selanjutnya, resistansi pada CSAC7 lebih rendah pada 0,0025Ω karena dominasi mesopori yang relatif tinggi yang meningkatkan difusi muatan ionik ke segala arah dibandingkan dengan CSAC6, CSAC8, dan CSAC9 yang memiliki nilai resistansi yang lebih tinggi masing-masing sebesar 0,012, 0,27, dan 0,034 Ω. Selain itu, profil GCD CSAC7 ditinjau pada kepadatan arus yang berbeda dari 1, 2, 5, dan 10 A g<sup>-1</sup>, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7b. Dapat dicatat bahwa kurva GCD CSAC7 masih mempertahankan bentuk segitiga simetris primer pada 10 A g<sup>-1</sup> yang menunjukkan perilaku kapasitor lapisan ganda yang stabil, respons ion yang cepat, dan resistansi internal yang rendah dalam proses EDL<sup>42</sup>. Pada 1 A g<sup>-1</sup>, sampel CSAC7 memberikan kapasitansi spesifik 237 F g<sup>-1</sup> dan masih mempertahankan 210 F g<sup>-1</sup> pada 10 A g<sup>-1</sup>, memulai kinerja tingkat tinggi sebesar 88,6%. Untuk membandingkan kinerja kedua sampel secara mendalam, plot Ragone digunakan untuk mengevaluasi energi dan kepadatan daya yang dihitung menggunakan rumus standar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7c. Superkapasitor simetris CSAC6, CSAC7,

CSAC8 dan CSAC9 yang dirakit dengan elektrolit 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dalam pemisah organik memiliki kepadatan energi 10,1712, 18,1081, 16,8049 dan 10,2596 Wh kg<sup>-1</sup> serta kepadatan daya 67,3793, 77,74, 73,1373 dan 56,5421 W kg<sup>-1</sup>, masing-masing. Kemampuan elektrokimia CSAC7 yang tinggi disebabkan oleh struktur berpori hierarkis 3D dan luas permukaan spesifik yang menyediakan area transfer ion yang pendek dan dapat diakses ke segala arah agar muatan ionik dapat berdifusi pada antarmuka elektroda/elektrolit.



**Gambar 4.8** (a) Plot Nyquist, (b) Plot sudut fase bode, (c) kapasitansi nyata (C') vs. plot frekuensi, dan (d) kapasitansi imajiner (C'') vs. plot frekuensi perangkat simetris CSAC7

Konfirmasi elektrokimia tinggi CSAC7 ditinjau secara mendalam melalui Nyquist Plot dengan area difusi terbatas dalam rentang frekuensi 0,01 Hz hingga 100.000 Hz, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8a. Terjemahan horizontal di sepanjang sumbu Z' menegaskan R<sub>s</sub> 0,87 Ωcm<sup>2</sup> yang relatif rendah yang menunjukkan proses adsorpsi dan desorpsi ion yang baik pada antarmuka elektroda-elektrolit. Selanjutnya, RCT (12,3 Ωcm<sup>2</sup>) yang ditafsirkan pada posisi setengah lingkaran mengkonfirmasi transfer muatan cepat secara kinetikal sebagai akibat dari arus yang melewati elektroda yang membentuk lapisan listrik. Hal ini disebabkan oleh struktur pori-pori hierarkis dengan kombinasi mikro, meso, dan

makropori inisiasi situs aktif yang diikuti oleh kemampuan difusi ion ke segala arah tanpa hambatan. Selain itu, garis lurus yang cenderung tegak lurus pada frekuensi rendah menegaskan laju transfer ion kapasitif murni dan tinggi pada elektroda CSAC7. Plot sudut fase Bode dari CSAC7 juga dievaluasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8b. Sudut fase pada frekuensi rendah mengungkapkan informasi spesifik tentang kemampuan elektroda untuk menghasilkan lapisan ganda listrik. Elektroda CSAC7 menampilkan sudut fase mendekati  $-90^\circ$  yang menunjukkan bahwa lapisan dielektrik normal versi EDLC disertai dengan gangguan degradasi ion karena doping heteroatom sendiri. Selain itu, plot sudut fase Bode memberikan informasi lebih lanjut untuk karakteristik bahan konduktif melalui analisis kapasitansi nyata ( $C'$ ) dan kapasitansi imajiner ( $C''$ ) sehubungan dengan frekuensi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8b, dan Gambar 4.8c. Nilai  $C'$  lemah di frekuensi yang lebih rendah dan daerah frekuensi yang lebih tinggi, nilai  $C'$  menunjukkan ketergantungan frekuensi yang lebih sedikit, menunjukkan perilaku resistif murni di CSAC7. Selain itu, nilai kapasitansi imajiner  $C''$  pada frekuensi puncak menegaskan waktu relaksasi 9,25 detik, menunjukkan bahwa perangkat CSAC7 simetris bertindak sebagai kapasitor murni. Nilai ini menunjukkan ukuran seberapa cepat energi perangkat yang tersimpan dapat didistribusikan secara efisien. Sebagai perbandingan, serat nano karbon yang diperoleh berdasarkan limbah sutra jagung menunjukkan sifat elektrokimia yang lebih tinggi daripada karbon nanofiber berbasis selulosa bakteri dan ampas tahu yang diperoleh melalui aktivasi kimia KOH dan  $H_3PO_4$  [40,43]. Selain itu, meskipun serat nano karbon berbasis polimer menunjukkan kapasitansi spesifik yang unggul, penelitian kami mampu menghasilkan kepadatan energi yang lebih tinggi daripada yang dilaporkan sebelumnya seperti yang dikonfirmasi dalam wasit [42]. Hal ini disebabkan oleh kombinasi struktur nanofiber dan mikro-mesopori yang memungkinkan penyediaan situs aktif tinggi dan saluran transportasi ion. Selain itu, desain elektroda bebas pengikat mendukung kinerja elektrokimia superkapasitor yang tinggi.

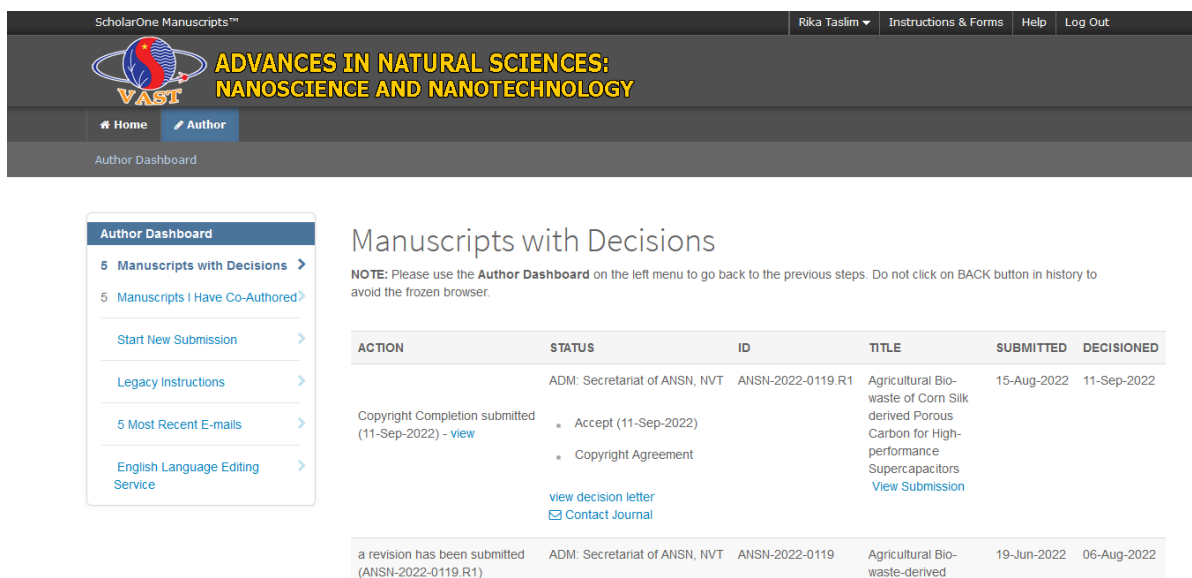
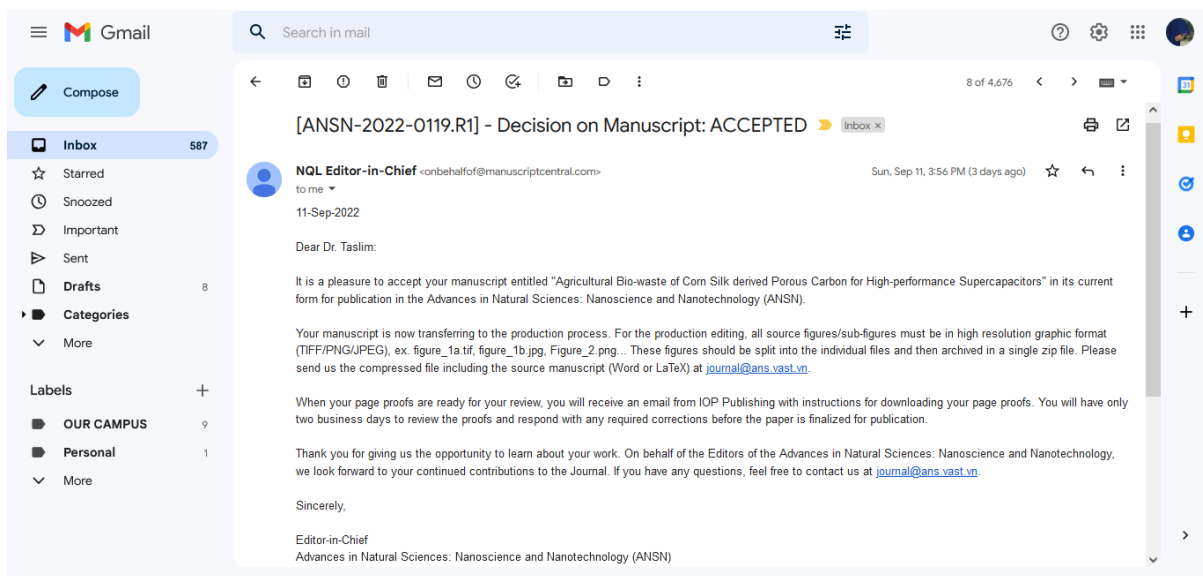
### 4.3 Luaran yang telah Dicapai

Dari serangkaian pelaksanaan kegiatan penelitian, data-data yang telah diperoleh telah dilakukan analisa, untuk selanjutnya dibuat artikel ilmiah. Sebuah artikel ilmiah telah *submit* dan sudah dalam status *accepted* di jurnal internasional bereputasi dan berfaktor dampak (Scopus Q2) yaitu “*Advanced in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*” Tahun 2022. Judul artikel dan url artikel secara lengkap ditampilkan pada Tabel 4.3 berikut.

**Tabel 4.3.** Capaian luaran penelitian

Judul artikel	Nama jurnal, Volume, dan url artikel	Publisher
Agricultural Bio-Waste of Corn Silk derived Porous Carbon for High-Performance Supercapacitors	<i>Advanced in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology</i> , 2022, <i>Accepted article</i>	IOP Publishing
<p><b>Penulis:</b> Rika Taslim, Suryandri Halbi, Apriwandi Apriwandi, Erman Taer</p>		

• **Bukti *accepted article*:**



## **BAB V**

### **KESIMPULAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil penelitian, serat nano karbon berpori hierarkis berhasil diperoleh dari sutra jagung dengan menggunakan teknik berbiaya rendah, sederhana, dan berkelanjutan tanpa bahan pengikat untuk kepadatan energi superkapasitor simetris yang tinggi. Aktivasi KOH menggunakan pirolisis terintegrasi satu langkah memiliki sifat material yang sangat baik termasuk struktur kerangka kerja, porositas, keterbasahan, dan amorfitas. Selain itu, suhu aktivasi fisik yang berbeda menampilkan struktur pori-pori yang khas dengan keunggulan individu. Pada 700°C, struktur pori hierarkis 3D ditampilkan diikuti oleh luas permukaan yang tinggi yang mengarah pada pembentukan kombinasi ideal mikro dan mesopora untuk meningkatkan kinerja tinggi bahan elektroda. Menggunakan sistem bebas pengikat dua elektroda, CSAC7 menunjukkan sifat elektrokimia terbaik dengan kapasitansi spesifik 237 Fg<sup>-1</sup> dalam elektrolit 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Oleh karena itu, kepadatan energi maksimum 18,19 Wh kg<sup>-1</sup> dan kepadatan daya 77,74 W kg<sup>-1</sup> pada kerapatan arus 1 A g<sup>-1</sup>. Hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan yang diterapkan dalam penelitian ini mengkonfirmasi potensi sutra jagung sebagai bahan berbasis karbon aktif dengan sifat tinggi.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Poonam, Sharma K, Arora A and Tripathi S K 2019 Review of supercapacitors: Materials and devices *J. Energy Storage* 21 801–25
- [2] Kumar R, Sahoo S, Joanni E, Singh R K, Tan W K, Kar K K and Matsuda A 2019 Recent progress in the synthesis of graphene and derived materials for next generation electrodes of high performance lithium ion batteries *Prog. Energy Combust. Sci.* 75 100786
- [3] Chen T and Dai L 2013 Carbon nanomaterials for high-performance supercapacitors *Mater. Today* 16 272–80
- [4] Zhai Y, Dou Y, Zhao D, Fulvio P F, Mayes R T and Dai S 2011 Carbon Materials for Chemical Capacitive Energy Storage *Adv. Mater.* 23 4828–50
- [5] Taer E and Taslim R 2018 Brief Review: Preparation Techniques of Biomass Based Activated Carbon Monolith Electrode for Supercapacitor Applications *AIP Conference Proceedings* vol 1927 pp 020004-1-020004–4
- [6] Miller E E, Hua Y and Tezel F H 2018 Materials for energy storage: Review of electrode materials and methods of increasing capacitance for supercapacitors *J. Energy Storage* 20 30–40
- [7] Tiwari S K, Sahoo S, Wang N and Huczko A 2020 Graphene research and their outputs: Status and prospect *J. Sci. Adv. Mater. Devices* 5 10–29
- [8] Mensah-Darkwa K, Zequine C, Kahol P K and Gupta R K 2019 Supercapacitor energy storage device using biowastes: A sustainable approach to green energy *Sustain.* 11
- [9] Bhat V S, Kanagavalli P, Sriram G, B R P, John N S, Veerapandian M, Kurkuri M and Hegde G 2020 Low cost, catalyst free, high performance supercapacitors based on porous nano carbon derived from agriculture waste *J. Energy Storage* 32 101829
- [10] Fu Y, Zhang N, Shen Y, Ge X and Chen M 2018 Micro-mesoporous carbons from original and pelletized rice husk via one- step catalytic pyrolysis *Bioresour. Technol.* 269 67–73
- [11] Su X, Li S, Jiang S, Peng Z, Guan X and Zheng X 2018 Superior capacitive behavior of porous activated carbon tubes derived from biomass waste-cotonier strobili fibers *Adv. Powder Technol.* 29 2097–107
- [12] Tan H, Tang J, Kim J, Kaneti Y V, Kang Y M, Sugahara Y and Yamauchi Y 2019 Rational design and construction of nanoporous iron- and nitrogen-doped carbon electrocatalysts for oxygen reduction reaction *J. Mater. Chem. A* 7 1380–93
- [13] Yin L, Chen Y, Li D, Zhao X, Hou B and Cao B 2016 3-Dimensional hierarchical porous activated carbon derived from coconut fibers with high-rate performance for symmetric supercapacitors *Mater. Des.* 111 44–50
- [14] Wan L, Chen D, Liu J, Zhang Y, Chen J, Du C and Xie M 2020 Facile preparation of porous carbons derived from orange peel via basic copper carbonate activation for supercapacitors *J. Alloys Compd.* 823 153747
- [15] Sodtipinta J, Ieosakulrat C, Poonyayant N, Kidkhunthod P, Chanlek N, Amornsakchai T and Pakawatpanurut P 2017 Interconnected open-channel carbon nanosheets derived from pineapple leaf fiber as a sustainable active material for supercapacitors *Ind. Crops Prod.* 104 13–20



- [16] Chen Z, Wang X, Xue B, Li W, Ding Z, Yang X, Qiu J and Wang Z 2020 Rice husk-based hierarchical porous carbon for high performance supercapacitors : The structure-performance relationship Carbon N. Y. 161 432–44
- [17] Liangshuo L, Lin Q, Xinyu L, Ming D and Xin F 2020 Preparation of biomass-based porous carbon derived from waste ginger slices and its electrochemical performance Optoelectron. Adv. Mater. Rapid Commun. 14 548–55
- [18] He X, Li R, Han J, Yu M and Wu M 2013 Facile preparation of mesoporous carbons for supercapacitors by one-step microwave-assisted ZnCl<sub>2</sub> activation Mater. Lett. 94 158–60
- [19] Taer E, Pratiwi L, Apriwandi, Mustika W S, Taslim R and Agustino 2020 Three-dimensional pore structure of activated carbon monolithic derived from hierarchically bamboo stem for supercapacitor application Commun. Sci. Technol. 5 22–30
- [20] Yang V, Senthil R A, Pan J, Kumar T R, Sun Y and Liu X 2020 Hierarchical porous carbon derived from jujube fruits as sustainable and ultrahigh capacitance material for advanced supercapacitors J. Colloid Interface Sci. 579 347–56
- [21] Jiang X, Guo F, Jia X, Zhan Y, Zhou H and Qian L 2020 Synthesis of nitrogen-doped hierarchical porous carbons from peanut shell as a promising electrode material for high-performance supercapacitors J. Energy Storage 30 101451
- [22] Shang Z, An X, Liu L, Yang J, Zhang W, Dai H, Cao H, Xu Q, Liu H and Ni Y 2021 Chitin nanofibers as versatile bio-templates of zeolitic imidazolate frameworks for N-doped hierarchically porous carbon electrodes for supercapacitor Carbohydr. Polym. 251 117107
- [23] Men B, Guo P, Sun Y, Tang Y, Chen Y, Pan J and Wan P 2019 High-performance nitrogen-doped hierarchical porous carbon derived from cauliflower for advanced supercapacitors J. Mater. Sci. 54 2446–57
- [24] Mitravinda T, Nanaji K, Anandan S, Jyothirmayi A, Chakravadhanula V S K, Sharma C S and Rao T N 2018 Facile Synthesis of Corn Silk Derived Nanoporous Carbon for an Improved Supercapacitor Performance J. Electrochem. Soc. 165 A3369–79
- [25] Zhou J, Yuan S, Lu C, Yang M and Song Y 2020 Hierarchical porous carbon microtubes derived from corn silks for supercapacitors electrode materials J. Electroanal. Chem. 878 114704
- [26] Girgis B S, Temerk Y M, Gadelrab M M and Abdullah I D 2007 X-ray Diffraction Patterns of Activated Carbons Prepared under Various Conditions Carbon Sci. 8 95–100
- [27] Serafin J, Baca M, Biegun M, Mijowska E, Kaleńczuk R J, Sreńscek-Nazzal J and Michalkiewicz B 2019 Direct conversion of biomass to nanoporous activated biocarbons for high CO<sub>2</sub> adsorption and supercapacitor applications Appl. Surf. Sci. 497 143722
- [28] Márquez-Montesino F, Torres-Figueroa N, Lemus-Santana A and Trejo F 2020 Activated Carbon by Potassium Carbonate Activation from Pine Sawdust (*Pinus montezumae* Lamb.) Chem. Eng. Technol. 43 1716–25
- [29] Taer E, Apriwandi A, Taslim R, Agustino A and Yusra D A 2020 Conversion Syzygium oleana leaves biomass waste to porous activated carbon nanosheet for boosting supercapacitor performances J. Mater. Res. Technol. 9 13332–40

- [30] Gou G, Huang F, Jiang M, Li J and Zhou Z 2020 Hierarchical porous carbon electrode materials for supercapacitor developed from wheat straw cellulosic foam *Renew. Energy* 149 208–16
- [31] Jiang W, Pan J and Liu X 2019 A novel rod-like porous carbon with ordered hierarchical pore structure prepared from Al-based metal-organic framework without template as greatly enhanced performance for supercapacitor *J. Power Sources* 409 13–23
- [32] Taer E, Apriwandi, Dalimunthe B K L and Taslim R 2021 A rod-like mesoporous carbon derived from agro-industrial cassava petiole waste for supercapacitor application *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 96 662–71
- [33] Taer E, Apriwandi A, Agutino A, Taslim R, Mustika W S and Exa Fadli 2021 Surface modification: unique ellipsoidal/strobili-fiber structure of porous carbon monolith for electrode supercapacitor *Nanosci. Technol. An Int. J.* 12 45–63
- [34] Duan B, Gao X, Yao X, Fang Y, Huang L, Zhou J and Zhang L 2016 Unique elastic N-doped carbon nanofibrous microspheres with hierarchical porosity derived from renewable chitin for high rate supercapacitors *Nano Energy* 27 482–91
- [35] Liu F, Wang Z, Zhang H, Jin L, Chu X, Gu B, Huang H and Yang W 2019 Nitrogen, oxygen and sulfur co-doped hierarchical porous carbons toward high-performance supercapacitors by direct pyrolysis of kraft lignin *Carbon N. Y.* 149 105–16
- [36] Abioye A M and Ani F N 2015 Recent development in the production of activated carbon electrodes from agricultural waste biomass for supercapacitors: A review *Renew. Sustain. Energy Rev.* 52 1282–93
- [37] Ayinla R T, Dennis J O, Zaid H M, Sanusi Y K, Usman F and Adebayo L L 2019 A review of technical advances of recent palm bio-waste conversion to activated carbon for energy storage *J. Clean. Prod.* 229 1427–42.

# LAMPIRAN 1

## Full Paper Jurnal Internasional

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

### Agricultural Bio-waste of Corn Silk derived Porous Carbon for High-performance Supercapacitors

Rika Taslim<sup>1,\*</sup>, Suryandri Halbi<sup>1</sup>, Apriwandi Apriwandi<sup>2</sup>, Erman Taer<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Industrial Engineering, State Islamic University of Sultan Syarif Kasim, 28293 Simpang Baru, Riau, Indonesia

<sup>2</sup> Department of Physics, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University of Riau, 28293 Simpang Baru, Riau, Indonesia

Email: [rikataslim@gmail.com](mailto:rikataslim@gmail.com)

**Abstract.** This study aims to develop a novel, simple, efficient, and low-cost method to prepare hierarchical porous carbon nanofiber derived from corn silks (CSAC) through a one-step carbonization-physical activation process. The carbon precursors were activated by KOH solution at a high pyrolysis temperature to prepare activated porous carbon as an electrode material for supercapacitors without using binders. This study focused on the effect of different activation temperatures of 600, 700, 800, and 900°C on the production of highly porous carbon nanofiber. An enhancement mechanism is proposed, which not only performed high nanofiber structures to possess the large specific active surface area to enhance energy density but also achieve micro-mesopores combination to realize fast ion-transport channels for boosting high power density. A maximum specific surface area of approximately 1096.951 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> was achieved by CSAC7. Furthermore, the electrochemical performance was evaluated using 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution as an electrolyte through a novel two-electrode binder-free system. The electrode materials produced a maximum specific capacitance of 237 F g<sup>-1</sup> at a current density of 1 A g<sup>-1</sup>. These excellent characteristics show that the synthetic approach has a great potential for fabricating high-performance supercapacitors.

Keywords: Nanofiber, porous carbon, electrode material, supercapacitor.

Classification numbers: 5.16, 5.18

#### 1. Introduction

Supercapacitors are globally considered as superior storage devices due to the higher energy and power density compared to batteries, capacitors, and fuel cells [1]. In addition,

1  
2  
3 they function as suitable materials for electrical components, pulse laser systems, and other  
4  
5 electronic devices [2]. Supercapacitors are also directly utilized or combined with batteries  
6  
7 for certain electrical facilities, such as electric braking, starters, vehicle, and generators [3].  
8  
9 The electric double-layer capacitors (EDLC) are considered to be the best type due to the  
10  
11 variable and adaptable active materials, low cost, abundant availability, superior material  
12  
13 properties, maximum electrolyte flow rate, high operating temperature and conductivity,  
14  
15 compatible with a variety of low and high current components, environmentally friendly, and  
16  
17 relatively safer [4]. However, supercapacitors still have various challenges such as the  
18  
19 relatively low energy compared to the high power density, expensive active materials, and  
20  
21 complex synthetic methods. In different studies, the energy density of supercapacitors has  
22  
23 been increased with various approaches, but with a reduced power density. The main key to  
24  
25 improving the performance of supercapacitors is the active electrode material, followed by  
26  
27 the electrolyte and separator [5]. Three groups of active electrode materials have been  
28  
29 reported including conduction polymers, metal oxides, and carbon [6]. Conducting polymer  
30  
31 materials and metal oxides were used to successfully increase the energy density up to 200  
32  
33 Wh kg<sup>-1</sup> [7]. This is several times greater than the result from other studies in the last decade.  
34  
35 However, both materials require complex, complicated, corrosive, and toxic instruments,  
36  
37 hence, they are not recommended for environmentally friendly mass production. Therefore,  
38  
39 activated carbon from biomass and bio-organic waste is more promising as it has superior and  
40  
41 attractive characteristics including abundant availability, renewability, easy fabrication, and  
42  
43 low cost [8,9]. Activated carbon materials also have a good performance in increasing and  
44  
45 maintaining energy density, although the energy density produced is still relatively low  
46  
47 compared to metal oxides and conduction polymers [10]. Additionally, biomass precursors  
48  
49 rich in structurally diverse porosity and significant heteroatoms provide a large number of  
50  
51 active ion contacts and facilitate the transport of electrolytic ion charges in various pores  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

1  
2  
3 including micro-, meso-, and macro- leading to a high performance of energy and balanced  
4 power density [11]. Moreover, the 3D hierarchical pore structure obtained from the biomass-  
5 derived activated carbon has been shown to increase the energy density up to 5 times coupled  
6 with a high power density [12]. Hierarchical porous carbon consisting of micro-, meso-, and  
7 macropores are obtained from various biomass precursors such as onion peel [13], pineapple  
8 leaves [14], rice husk [15], ginger waste [16], peanut shells [17], bamboo stem [18], and  
9 jujube fruit [19]. The peanut shell agricultural biomass produced activated carbon having a  
10 3D hierarchical pore structure as well as abundant micropores and mesopores with surface  
11 area=2014.6 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>. Activated carbon is prepared by a new and low-cost method using  
12 ZnCl<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> activation which produced a specific capacitance of 310 F g<sup>-1</sup> in a 3-electrode  
13 system [20]. Shang *et al.*, (2021) obtained activated carbon from chitin (*Portunus*  
14 *trituberculatus* Crab) waste [21], which was converted into hierarchical porous carbon  
15 through ZIF-8 nanoparticles bio-template followed by high-temperature carbonization,  
16 leading to a specific capacitance of 182 F g<sup>-1</sup>. Similar results were also obtained from  
17 different biomass precursors such as cauliflower which produced a unique hierarchical pore  
18 structure using KOH activation at 700°C high-temperature simple which possessed a high  
19 surface area of 2061 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> [22]. However, the activated carbons obtained from the above  
20 precursors are prepared in powder form, hence, they require synthetic binders and insulators  
21 to test the electrochemical properties. Although the counter electrodes used are good  
22 conduction materials, it is still considered to reduce the efficiency. Also, the template/bio-  
23 template method often used to ascertain the 3D pore structure is a relatively risky technique  
24 because the final step requires more treatment to remove the by-products. On the other hand,  
25 corn silk agricultural biomass has high potential as a hierarchical porous carbon precursor.  
26 The basic fibrous structure allows the discovery of dense nanofibers on activated carbon,  
27 thereby adding to its renewability. Although the use of corn silk as a starting material for  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

activated carbon in supercapacitors has been previously reported, the method of preparation using binders through a relatively complicated technique is considered to limit its novelty. Therefore, this study aims to prepare binder-free activated carbon through a novel one-step activation of KOH/CO<sub>2</sub>. The chosen strategy has been shown to produce higher capacitance compared to Mitravinda *et al.* (2018) [23] which used different methods and possesses higher energy density compared to a study by Zhou *et al.* (2020) [24]. In addition, we selected H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> aqueous electrolytes because of their advantages including the highest ionic concentration, highest conductivity, and low viscosity compared to other aqueous electrolytes. In result, the optimum specific capacitance of activated carbon obtained is 237 F g<sup>-1</sup> with a maximum energy density of 18.19 Wh kg<sup>-1</sup> in an aqueous electrolyte of 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Materials

The corn silks (CS) were initially obtained from the traditional plantations of the Kampar community, Riau and then cut into small pieces within a range of 2 cm, cleaned, and sundried for 48 hours to obtain dry samples. Furthermore, the samples were pre-carbonized and crushed using a crusher machine to obtain dried corn silk powder. The KOH activating agent, HCl, and aqueous electrolyte H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> were obtained from Merck KGaA, 4271 Darmstadt, Germany, and Panreac Quimica Sau, Espana, while deionized water (DI) as a material for neutralizing samples was made on a lab scale. The organic separator from the duck eggshell membrane was extracted with 1 M HCl solution.

### 2.2. Synthesis of carbon pellets

30 g of dried corn silks powder was dispersed with a 0.5 m/L KOH solution on a hotplate at 300 rpm for 2 hours. The sample was filtered and dried in an oven at 110 °C, while the corn silk powder was converted into pellets using a hydraulic press without using

1  
2  
3 any adhesive material, hence, the adhesive properties of the pure powder were derived  
4 originally from the sample. A total of 20 pellets samples were prepared for pyrolysis using  
5 carbonization in the N<sub>2</sub> gas environment and physical activation with CO<sub>2</sub> in the furnace tube.  
6  
7 In addition, the pyrolysis process began from a temperature of 30° C to 600 °C in N<sub>2</sub> gas and  
8 then increased to 900 °C in a CO<sub>2</sub> environment. Four different carbonization temperatures  
9 were applied namely 600 °C, 700 °C, 800 °C, and 900 °C. Moreover, to facilitate data  
10 interpretation, samples were labeled CSAC-x, CSAC was corn silk activated carbon (CSAC),  
11 while x was the number 6, 7, 8, and 9 indicating carbonization at the four temperatures. The  
12 pelleted carbon samples were neutralized using DI water.  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23

### 2.3. Characterization of materials

24  
25  
26 The carbon pellets' density was evaluated based on changes in mass, thickness, and  
27 diameter during the pyrolysis process through standard equations. Furthermore, the  
28 amorphous properties of the samples were characterized using the XRD (X-ray diffraction)  
29 technique at an angle range of 5-60° in a Cu K $\alpha$  radiation source (Phillips expert powder  
30 instrument). Surface morphology and variation of sample elements were also examined  
31 through the SEM-EDS (Scanning electron microscopy-energy dispersive spectroscopy)  
32 technique using the JEOL-JSM-LA-3600 instrument at a voltage of 15kV. Additionally, the  
33 specific surface area and pore diversity were determined through the N<sub>2</sub> gas absorption  
34 technique and evaluated using BET and BJH calculations.  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46

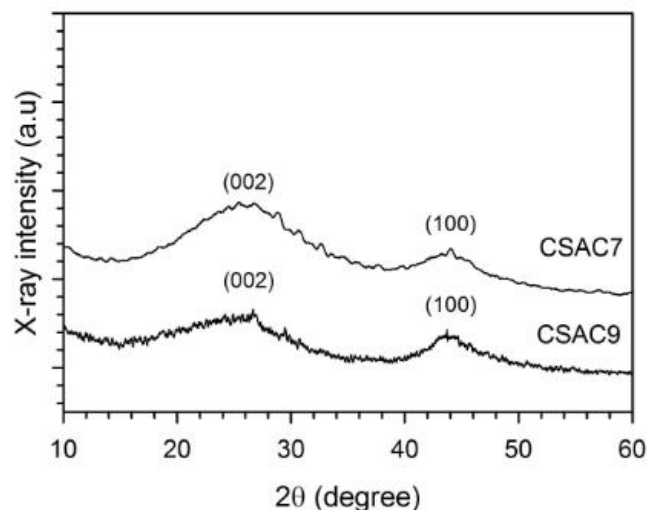
### 2.4. Supercapacitor electrochemical performance

47  
48  
49 The electrochemical properties of the supercapacitor were evaluated in two-electrode  
50 configurations. The supercapacitor cells were made in the form of sandwich layers consisting  
51 of a cell body made of acrylic, stainless steel current collector, pelleted carbon electrodes,  
52 and an organic separator from the duck eggshell membrane. Interestingly, the semi-  
53 permeable duck eggshell membrane allows the electrolyte ions to diffuse optimally on the  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

1  
2  
3 surface of the carbon electrode [25]. The cyclic voltammetry (CV) and galvanostatic charge-  
4 discharge (GCD) methods are techniques commonly used in evaluating specific capacitance,  
5 as well as energy and power density. CV was evaluated using the CV-UR Rad-Er 1380  
6 instrument at a constant voltage range of 0-1.0V at a scan rate of 1 mV s<sup>-1</sup>, while GCD used  
7 the 2018 CD-UR Rad-Er at a fixed current of 1 A, both instruments were calibrated with a  
8 mean error of ± 6.01%.

### 17 3. Results and discussions

19 Crystal phase change properties of corn silk-based hierarchical porous carbon were  
20 reviewed using the powder X-ray diffraction (XRD) method. The XRD pattern with different  
21 physical activation temperatures particularly between 700 and 900 °C, are shown in Figure 1.  
22  
23  
24  
25  
26

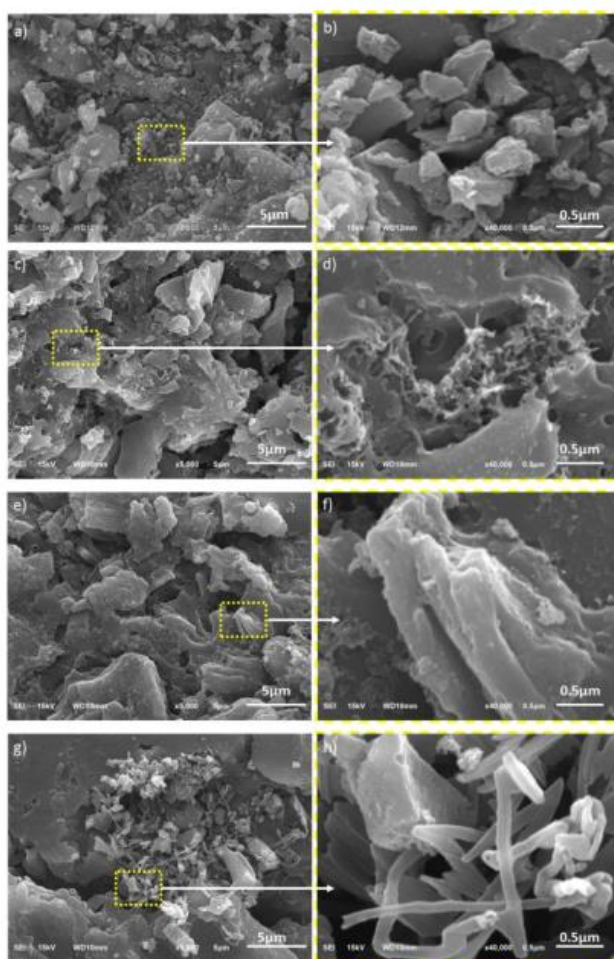


27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
**Figure 1.** The XRD pattern of CSAC7 and CSAC9

The CSAC7 display two clearly confirmed broad peaks at 2θ angles 24.34° and 43.92° which correspond to the (002) and (100) scattering planes. These characteristics show that the structure of the turbostratic/disturbed carbon has a high amorphous nature [26]. This property is important for improving the good hierarchical pore structures in carbon samples. On the other hand, CSAC9 performed low broad peaks at angles of 2θ=24.86° and 44.13° indicating



1  
2  
3  
4 the amorphous nature degraded towards graphitization due to high-temperature treatment.  
5  
6 Furthermore, the most obvious broad peaks in the (002) reflection plane ranging between  
7  
8 angle  $24.34^{\circ}$ - $24.86^{\circ}$  indicate a random aromatic sheet structure, while the (100) reflection  
9  
10 plane from  $43.92^{\circ}$ -  $44.13^{\circ}$  confirms the type of carbon that is close to the graphite structure,  
11  
12 in this case, the attenuation of the graphite structure towards the formation of a disturbed  
13  
14 carbon structure [27].  
15  
16



57  
58 **Figure 2.** The SEM macrograph of CSAC6 in magnification of (a) 5000x, (b) 40000x,  
59 CSAC7 in magnification of (c) 5000x, (d) 40000x, CSAC8 in magnification of (e)  
60 5000x, (f) 40000x, CSAC9 in magnification of (g) 5000x, (h) 40000x

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

The morphological structure of activated carbon-based corn silk waste was evaluated using the SEM method at a voltage of 15 kV. Figure 2 shows the morphological structure with different physical activation temperatures of 600, 700, 800, and 900 °C. In general, the surface structure of the sample is dominated by bulk materials, aggregation and clumps of large wrinkled particles, while some parts display a different inner surface structure for each temperature. At 600 °C (Figure 2a), the activated carbon consisted of particle aggregations with surface wrinkles. Additionally, a larger zoom in Figure 2b shows that the sample surface is relatively flat in each aggregation without any obvious pores. Furthermore, comparatively to 600 °C, physical activation at a higher temperature led to a better decomposition into the basic components such as hemicellulose, cellulose, and lignin. This indicates a relatively different surface morphology as shown in Figure 2c-d. Figure 2c shows the relatively dominant pore holes structure in the 64-7214 nm range. The diverse pore structure including mesopores and macropores were confirmed at a larger magnification area as shown in Figure 2d. Mesopores have a size ranging from 18-48 nm, while macropores are in the range of 73-136 nm. However, micropores structures were not found at this magnification. An increase in the physical activation temperature of 800 °C in the CSAC8 sample shows a surface morphology filled with macropores which have a relatively large size less than 300 nm as shown in Figure 2e. In addition, Figure 2f shows a distinct morphology in which clustered tubular-rod-like structures are found. This is because the higher temperature porosity allows the breakdown of the main carbon structure derived from cellulose and lignin drastically. The rod shape is contributed from the basic structure of cellulose while the outer tubular shape is attributed to lignin [28]. This analysis has been reported in previous studies with different biomass precursors such as cassava petiole [29] and cacao shells [30]. Moreover, the temperature of 900°C maximized the basic decomposition process of cellulose and lignin to form a clear surface morphology of carbon

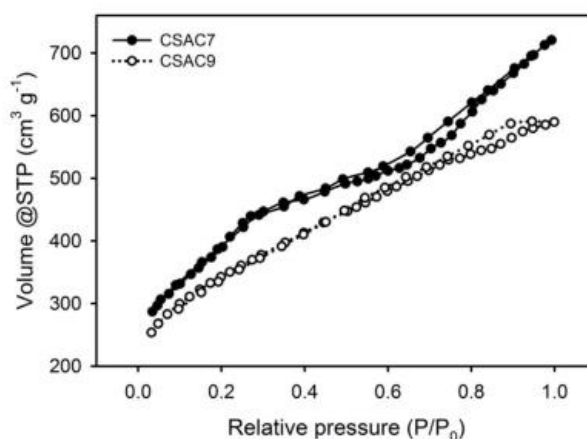
fibers, as shown in Figure 2g-h. The diameter of the obtained nanofibers varied relatively in the range of 76 nm to 127 nm. The predominant nanofiber fiber allows well-connected pores in a relatively small size range [31]. The elemental composition of porous activated carbon samples at activation temperatures of 700 °C and 900 °C for CSAC7 and CSAC9 was examined using energy dispersive spectroscopy (EDS) techniques in the energy range of 0-20 keV. Table 1 shows the elemental composition of the CSAC7 and CSAC9 samples in detail. Elemental carbon (C) has the highest percentage of approximately 83.7485-85.2755% followed by oxygen 8.0333-8.6075%, silicon (Si) 3.2471-3.1535%, potassium (K) 1.6359-3.9428%, magnesium (Mg) 0.8317-0.7930%, and aluminum (Al) 0.4022-0.3290%.

**Table 1. The elemental composition of CSAC7 and CSAC9**

Element	CSCA7 (%)	CSAC9 (%)
Carbon (C)	85.2755	83.7485
Oxygen (O)	8.6075	8.0333
Silicon (Si)	3.2471	3.1535
Potassium (K)	1.6359	3.9428
Magnesium (Mg)	0.8317	0.7930
Aluminum (Al)	0.4022	0.3290

High-temperature pyrolysis of 700 °C for CSAC7 showed the highest carbon composition of 85.2755%. This property is considered to increase the capacitive properties of the electrode material. Furthermore, the highest elemental oxygen was also found in the CSAC7 sample which contributed to the wettability of the material thereby initiating the pseudocapacitance effect [32]. An increase in the activation temperature up to 900 °C for CSAC9 reduced the percentage of carbon and oxygen in the sample. This is because the activation of high temperatures evaporates the constituent elements of the material in the form of more H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub>. Moreover, other elements such as Silicon, Potassium, Magnesium, and Aluminum are obtained in relatively low amounts from basic sources of biomass that have not been completely evaporated [33].

The analysis of  $N_2$  adsorption/desorption isotherms of corn silk-based hierarchical porous activated carbon at different pyrolysis temperatures are needed to evaluate the impact of pore structure and porosity properties. Figure 3 shows the  $N_2$  adsorption-desorption isotherm curve of both samples, CSAC7 had significant  $N_2$  adsorption at a relative pressure of  $0.0 < P/P_0 < 0.2$ , thereby confirming the relatively large number of micropores.



**Figure 3.** Nitrogen adsorption-desorption isotherms of CSAC7 and CSAC9

**Table 2.** Specific surface area, pore volume and average pores size of CSAC7 and CSAC9

Sample	$S_{BET}$ ( $m^2 g^{-1}$ )	$S_{micro}$ ( $m^2 g^{-1}$ )	$S_{meso}$ ( $m^2 g^{-1}$ )	$V_{tot}$ ( $cm^3 g^{-1}$ )	$V_{micro}$ ( $cm^3 g^{-1}$ )	$V_{meso}$ ( $cm^3 g^{-1}$ )	$D_{aver}$ (nm)
CSAC7	1096.951	531.087	565.864	1.115	0.314	0.801	4.06
CSAC9	744.818	423.360	321.458	0.9126	0.4476	0.465	3.15

Furthermore, the H4 type hysteresis loop was clearly shown over a relatively long relative pressure range of  $0.2 < P/P_0 < 0.9$  indicating uniform mesoporous characteristics at CSAC7 as presented in Table 2. The tail at high-pressure  $P/P_0 > 0.9$  shows the presence of macropores, but the addition of the physical activation temperature up to  $900^\circ C$  in CSAC9 showed a different  $N_2$  isotherm absorption compared to CSAC7. The  $N_2$  adsorption-desorption curve of CSAC9 shows a relatively linearly increasing adsorption which is not too high at low pressure, thereby indicating the presence of low micropores. In addition, the H4 type hysteresis loop is not formed completely at a relatively short pressure range of  $P/P_0 = 0.6$  to  $0.95$  which is mainly due to the pores growing towards the larger one and is dominated by narrow bottle neck-like types with a larger inner surface [34] as shown in Table 2. The pore

size distribution as presented in Figure 4 show that both samples have a combination of micropores and macropores. This result is relatively consistent with SEM which also confirms the hierarchical porous structure. CSAC7 has a structure of hierarchically connected 3D pores leading to the presence of mesopores with a peak at 3.89 nm. Furthermore, the chemical impregnation of KOH at 700 °C high-temperature pyrolysis allows the precursor to produce a good combination of micropores and mesopores to improve the performance of the base electrode.

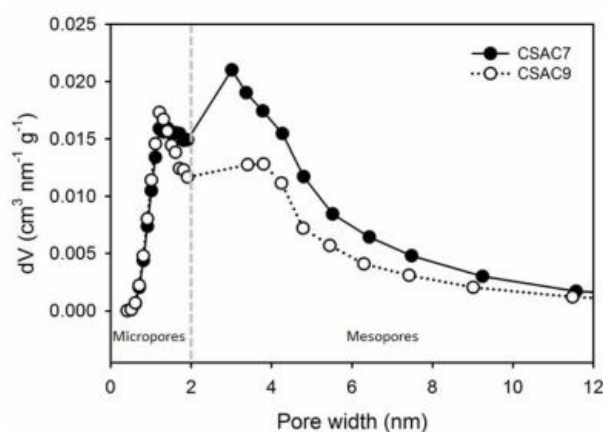
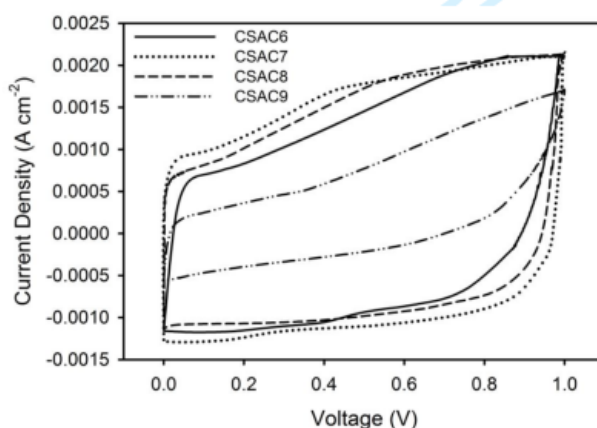


Figure 4. Pore sizes profile of CSAC7 and CSAC9

The microporous and mesoporous percentages of CSAC7 were 48.41% and 51.59% with a high surface area of 1096.951 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>. The high surface area coupled with the combination of the hierarchically connected pores is believed to improve the electrochemical properties of supercapacitors [35]. In addition, the high mesoporous volume fraction potentially facilitates rapid ion transport and act as an electrolyte ion reservoir, thereby reducing the ion diffusion distance to the carbon surface, ensuring high rate capability and high power density. Moreover, CSAC9 displays a relatively similar pore size distribution with CSAC7 but is dominated by micropores with a percentage of 56.84%. KOH impregnation at higher temperatures up to 900°C allows degradation of carbon aggregation and erodes the main pore walls, thereby creating tubular and nanofiber structures. This simultaneously reduces the

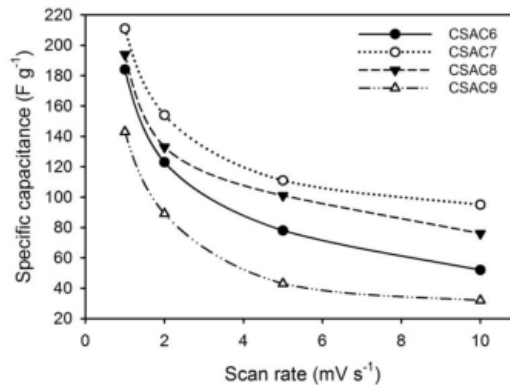
1  
2  
3 specific surface area of CSAC9 to  $744.818 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  with an average diameter of 3.15 nm as  
4  
5 shown in Table 2. Nevertheless, the developed porosity properties of carbon materials are  
6  
7 important for electrolyte ions' rapid transport and penetration [36]. These results are  
8  
9 consistent with the SEM and density data.  
10  
11

12 The main parameters used to evaluate the electrochemical properties of hierarchical  
13 porous activated carbon include high specific capacitance, increased energy and fixed power  
14 density, as well as retention capacitance. Based on the  $\text{N}_2$  gas absorption analysis, the corn  
15 silk-based activated carbon has a combination of micropores and mesopores that is able to  
16 accommodate a relatively high charge of active ions and facilitate diffusion without  
17 obstruction at the electrode/electrolyte interface. The electrochemical performance of  
18 CSAC6, CSAC7, CSAC8, and CSAC9 based on different physical activation temperatures  
19 was evaluated with a two-electrode configuration in an aqueous electrolyte using cyclic  
20 voltammetry and galvanostatic charge-discharge techniques. Cyclic voltammetry (CV) curves  
21 at 600, 700, 800, and 900 °C are shown in Figure 5. The CV profile exhibits a quasi-  
22 rectangular shape, indicating the typical behavior of electrochemical double-layer type  
23 supercapacitors (EDLC) in an aqueous electrolytic system at a scan rate of  $1 \text{ mV s}^{-1}$ .  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39



**Figure 5.** CV curve of CSAC6, CSAC7, CSAC8, and CSAC9

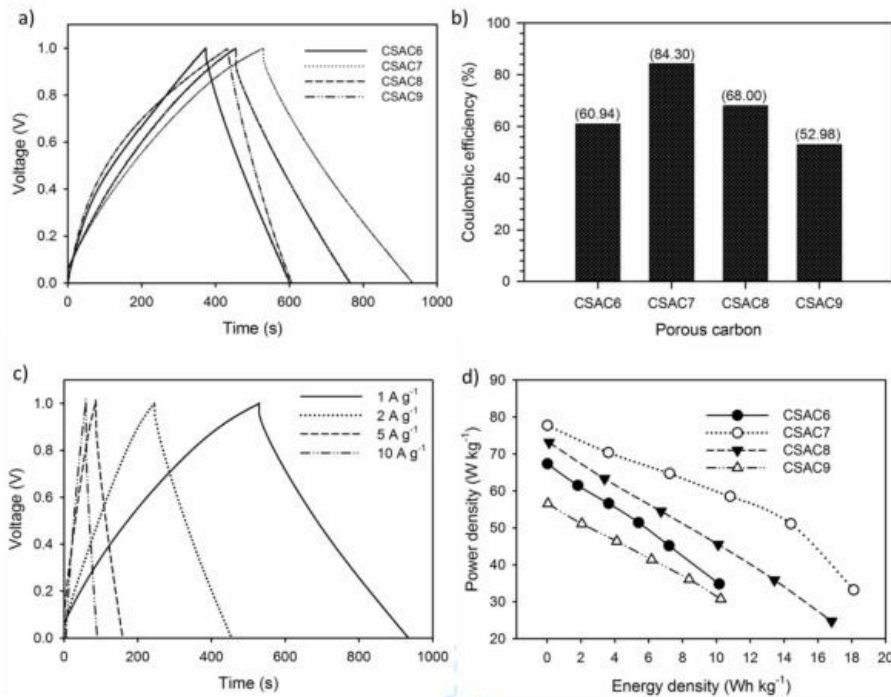
In addition, the pseudocapacitance property was found to be relatively low as indicated by a spike in current density of the voltage ranging from 0.3-0.6V. This property is a contribution of the heteroatom and wettability properties of elemental oxygen in the sample. In general, all samples exhibited similar electrochemical properties. By using standard equations, the specific capacitances of CSAC6, CSAC7, CSAC8, and CSAC9 was evaluated to be 184, 211, 194, and 143 F g<sup>-1</sup>, respectively. An increase in the physical activation temperature improved the capacitive properties of the supercapacitor by 211 F g<sup>-1</sup>. This is because the higher temperature of CSAC7 showed a relatively rich surface structure of mesopores and macropores, which provides a high surface area and diffusion path of ionic charge in all directions, thereby facilitating the high capacitive properties. This analysis is consistent with SEM results and N<sub>2</sub> gas absorption in Figures 2 and 3. At 800 °C, the surface structure of the capacitive properties was reduced to 194 F g<sup>-1</sup>. This is because the increase in the physical activation temperature in the CSAC8 sample shows a surface morphology filled with macropores with a relatively large size less than 300 nm, as shown in Figure 2e. In addition, the morphology of the clustered tubular rod-like structure allows for fractures that narrow the ion transport pathways on the electrode surface.



**Figure 6.** The curve of specific capacitance vs. scan rate of CSAC6, CSAC7, CSAC8, and CSAC9

1  
2  
3 A further temperature is increased up to 900 °C for CSAC9 allows the erosion and  
4  
5 breakdown of the particle walls of carbon aggregation and rod-like structures to cover the  
6  
7 existing pores, this reduced the capacitive properties to 143 F g<sup>-1</sup>. Although the pore structure  
8  
9 displays relatively dense nanofibers, as shown in Figure 2h, it is unable to maintain the 3D  
10  
11 hierarchical pore distribution of micropores and mesopores thereby reducing the  
12  
13 electrochemical properties. The specific capacitances of CSAC6, CSAC7, CSAC8, and  
14  
15 CSAC9 were also evaluated at different scan rates from 1 mV s<sup>-1</sup> to 10 mV s<sup>-1</sup>, as shown in  
16  
17 Figure 6. The activated carbon which maintained the highest specific capacitance of 45% was  
18  
19 CSAC7, followed by CSAC8, CSAC6, and CSAC9 with values of 39%, 28%, and 23%,  
20  
21 respectively. The galvanostatic charge-discharge (GCD) curves of symmetric cells CSAC6,  
22  
23 CSAC7, CSAC8, and CSAC9 at a current density of 1 A g<sup>-1</sup> are shown in Figure 7a. In  
24  
25 general, the GCD curve displays a normal profile for the EDLC type with a slightly faint iR  
26  
27 drop. According to the GCD profile, the specific capacitances produced at CSAC6, CSAC7,  
28  
29 CSAC8, and CSAC9 were 152, 237, 174 and 124 F g<sup>-1</sup>, respectively, in the electrolyte of 1 M  
30  
31 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Higher activation temperature from 600°C to 700°C confirmed micro-mesopores  
32  
33 combinations of 48.41% and 51.59% displayed the highest electrochemical properties from  
34  
35 152 F g<sup>-1</sup> to 237 F g<sup>-1</sup>. These results correlate with SEM, N<sub>2</sub> gas adsorption/desorption, and  
36  
37 CV analysis. The high activation temperature of from 700°C to 900°C decreased the  
38  
39 capacitive value of the carbon electrode up to 124 F g<sup>-1</sup> for the CSAC9 sample. This is  
40  
41 associated with the collapse of the pore walls and the erosion of the carbon framework  
42  
43 structure to cover the active site of the ionic charge below [34].  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

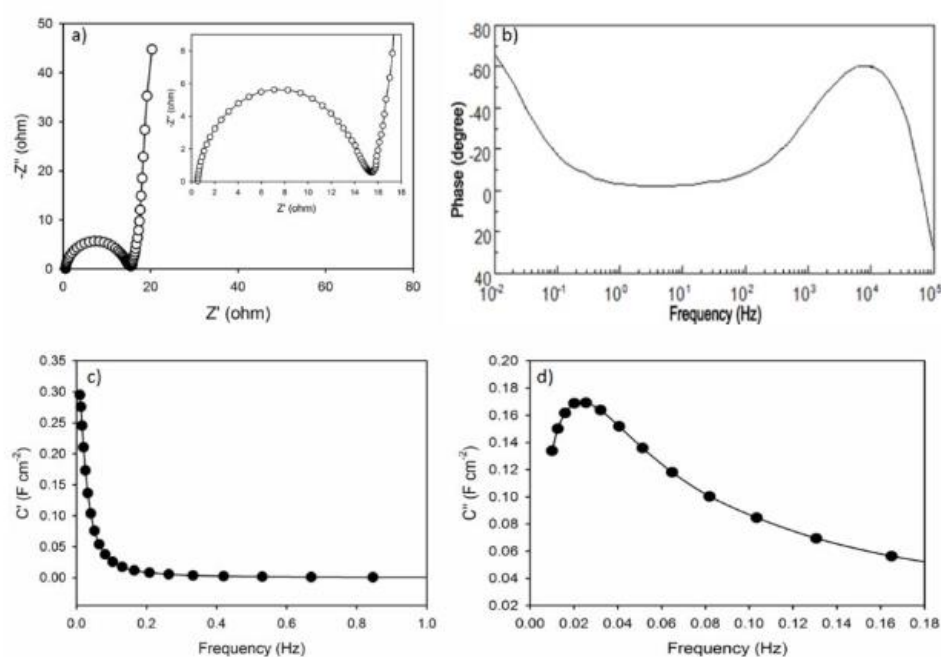




**Figure 7.** (a) GCD curve, (b) Coulombic efficiency of CSAC6, CSAC7, CSAC8, and CSAC9 (c) GCD curve at different current density of CSAC7, and (d) Ragone plot of CSAC6, CSAC7, CSAC8, and CSAC9 in 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> electrolyte

Furthermore, the resistance in CSAC7 was lower at 0.0025Ω due to the relatively high dominance of the mesopores which improved the diffusion of ionic charges in all directions compared to CSAC6, CSAC8, and CSAC9 which has a higher resistance value of 0.012, 0.27, and 0.034 Ω, respectively. This is also contributed by the semi-permeable duck eggshell membrane which allows the electrolyte ions to diffuse optimally on the surface of the carbon electrode [25]. In addition, the charge and discharge times on the GCD profiles reflect the coulombic efficiency of GLACs, as shown in Figure 7b. CSAC7 had the highest coulombic efficiency of about 84.30%, followed by CSAC8, CSAC6 and CSAC9 68.00%, 60.94 and 52.98%, respectively which confirmed confirming the high collective interpenetration and

accessibility of the electrolytes. Moreover, the GCD profile of CSAC7 was reviewed at different current density of 1, 2, 5, and 10 A g<sup>-1</sup>, as shown in Figure 7c. It can be noted that the GCD curves of CSAC7 still maintain primary symmetric triangle shape at 10 A g<sup>-1</sup> suggesting stable double-layer capacitor behaviors, fast ion response, and low internal resistance in EDL processes<sup>42</sup>. At 1 A g<sup>-1</sup>, CSAC7 sample delivers a specific capacitance of 237 F g<sup>-1</sup> and it still maintains 210 F g<sup>-1</sup> at 10 A g<sup>-1</sup>, initiating a high-rate performance of 88.6%.



**Figure 8.** (a) Nyquist plot, (b) Bode phase angle plot, (c) real capacitance ( $C'$ ) vs. frequency plot, and (d) imaginary capacitance ( $C''$ ) vs. frequency plot of CSAC7 symmetrical devices

To compare the performance of both samples in-depth, Ragone plots were used to evaluate the energy and power density which are calculated using standard formulas as shown in Figure 7c. Symmetrical supercapacitors CSAC6, CSAC7, CSAC8 and CSAC9 assembled

1  
2  
3 with an aqueous electrolyte of 1M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> in an organic separator had energy densities of  
4  
5 10.1712, 18.1081, 16.8049 and 10.2596 Wh kg<sup>-1</sup> as well as power densities of 67.3793,  
6  
7 77.74, 73.1373 and 56.5421 W kg<sup>-1</sup>, respectively. The high electrochemical capability of  
8  
9 CSAC7 is due to the 3D hierarchical porous structure and the specific surface area which  
10  
11 provides a short and accessible ion transfer area in all directions for ionic charges to diffuse at  
12  
13 the electrode/electrolyte interface.  
14  
15

16  
17 The high electrochemical confirmation of CSAC7 was reviewed in depth via a Nyquist  
18  
19 Plot with a limited diffusion area in the frequency range of 0.01 Hz to 100,000 Hz, as shown  
20  
21 in Figure 8a. Horizontal translation along the Z' axis confirms a relatively low R<sub>s</sub> 0.87 Ωcm<sup>2</sup>  
22  
23 indicating a good ions adsorption and desorption process at the electrode-electrolyte  
24  
25 interface. Furthermore, the RCT (12.3 Ωcm<sup>2</sup>) interpreted at the semicircular position  
26  
27 confirmed the fast charge transfer kinetically as a result of the current passing through the  
28  
29 electrode forming an electric layer. This is due to the hierarchical pores structure with a  
30  
31 combination of micro, meso, and macropores initiates the active site which is followed by the  
32  
33 ability of ion diffusion in all directions without any obstacles. In addition, the straight line  
34  
35 that tends to be perpendicular at low frequencies confirms the pure capacitive and high ion  
36  
37 transfer rate at the CSAC7 electrode. The Bode phase angle plot of CSAC7 was also  
38  
39 evaluated as shown in Figure 8b. The phase angle at low frequencies reveals specific  
40  
41 information about the ability of the electrode to generate an electric double layer. CSAC7  
42  
43 electrode displays a phase angle close to -90° indicating that the normal dielectric layer of the  
44  
45 EDLC version is accompanied by impaired ion degradation due to self-heteroatom doping. In  
46  
47 addition, the Bode phase angle plot provides further information for the characteristics of the  
48  
49 conductive material through analysis of the real capacitance (C') and the imaginary  
50  
51 capacitance (C'') with respect to frequency, as shown in Figures 8b, and 8c. The C' values are  
52  
53 weak in the lower frequency and higher frequency regions, the C' values show less frequency  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
dependence, indicating a purely resistive behavior in CSAC7. Moreover, the value of the  
imaginary capacitance  $C''$  at the peak frequency confirms a relaxation time of 9.25 seconds,  
indicating that the symmetrical CSAC7 device acts as a pure capacitor. This value indicates a  
measure of how quickly the stored energy of the device can be efficiently distributed. For  
comparison, the obtained carbon nanofiber-based on corn silk waste showed higher  
electrochemical properties than the carbon nanofiber-based on bacterial cellulose and tofu  
dregs obtained through chemical activation of KOH and  $H_3PO_4$  [37,38]. In addition, although  
polymer-based carbon nanofibers exhibit superior specific capacitance, our study was able to  
produce higher energy densities than the previously reported as confirmed in referee [39].  
This is due to the combination of nanofiber and micro-mesoporous structures allowing the  
provision of high active sites and ion-transport channels. Moreover, the binder-free electrode  
design supports the high electrochemical performance of the supercapacitor.

#### 31 **4. Conclusion**

32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
Based on the results, hierarchically porous carbon nanofiber was successfully obtained  
from corn silk using a low-cost, simple, and sustainable technique without a binding material  
for a high energy density of symmetric supercapacitors. In addition, different physical  
activation temperatures display distinctive pores structure with individual advantages. At 700  
 $^{\circ}C$ , a 3D hierarchical pore structure was displayed followed by a high surface area leading to  
the formation of an ideal combination of micro and mesopores for enhancing the high  
performance of the electrode material. Using a two-electrode binder-free system, CSAC7  
showed the best electrochemical properties with a specific capacitance of  $237\text{ F g}^{-1}$  in a 1 M  
 $H_2SO_4$  aqueous electrolyte. Hence, the maximum energy density of  $18.19\text{ Wh kg}^{-1}$  and  
power density of  $77.74\text{ W kg}^{-1}$  at current density of  $1\text{ A g}^{-1}$ . This result shows that the  
approach applied in this study confirmed the potential of corn silk as an activated carbon  
based material with high properties.

### Acknowledgement

This study was funded by the collaborative grants between universities, State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau with contract No. 873/Un.04/L. 1/TL.01/03/2022.

### References

- [1] Poonam, Sharma K, Arora A and Tripathi S K 2019 Review of supercapacitors: Materials and devices *J. Energy Storage* **21** 801–25
- [2] Kumar R, Sahoo S, Joanni E, Singh R K, Tan W K, Kar K K and Matsuda A 2019 Recent progress in the synthesis of graphene and derived materials for next generation electrodes of high performance lithium ion batteries *Prog. Energy Combust. Sci.* **75** 100786
- [3] Farma R, Anugrah A P, Apriyani I and Awitdrus A 2022 Facile synthesis of Veitchia merilli coir-based porous carbon using combined chemical and physical activation routes as electrode material for energy storage *Adv. Nat. Sci: Nanosci. Nanotechnol.* **13** 015009
- [4] Hoa L T M 2021 Surface functionalisation of multi-walled carbon nanotubes with tris(2-aminoethyl)amine and their characterisation *Adv. Nat. Sci: Nanosci. Nanotechnol.* **12** 025014
- [5] Chaudhary S, Raja M and Sinha O P 2021 A review on the different types of electrode materials for aqueous supercapacitor applications *Adv. Nat. Sci: Nanosci. Nanotechnol.* **12** 015011
- [6] Zheng S, Li Q, Xue H, Pang H and Xu Q 2020 A highly alkaline-stable metal oxide@metal-organic framework composite for high-performance electrochemical energy storage *National Science Review* **7** 305–314
- [7] Tiwari S K, Sahoo S, Wang N and Huczko A 2020 Graphene research and their outputs: Status and prospect *J. Sci. Adv. Mater. Devices* **5** 10–29
- [8] Taer E and Taslim R 2018 Brief Review: Preparation Techniques of Biomass Based Activated Carbon Monolith Electrode for Supercapacitor Applications *AIP Conference Proceedings* **1927** 020004-1-020004-4
- [9] Bhat V S, Kanagavalli P, Sriram G, B R P, John N S, Veerapandian M, Kurkuri M and Hegde G 2020 Low cost, catalyst free, high performance supercapacitors based on porous nano carbon derived from agriculture waste *J. Energy Storage* **32** 101829
- [10] Gallay P, López-Mujica M, Ortiz E, Zhang Y, Perrachione F, Montemerlo A, Galicia L, Bedioui F, Rodriguez M, Dalmaso P, Rubianes M, Gutierrez F, Eguilaz M and Rivas G 2020 Carbon Nanomaterials-Based Electrochemical Biosensors for the Quantification of High Impact Biomarkers *Meet. Abstr.* **MA2020-01** 1893
- [11] Wang D, Nai J, Li H, Xu L and Wang Y 2019 A robust strategy for the general synthesis of hierarchical carbons constructed by nanosheets and their application in high performance supercapacitor in ionic liquid electrolyte *Carbon* **141** 40-49
- [12] Wang D, Pan Z, Chen G, and Lu Z 2021 Glycerol derived mesopore-enriched hierarchically carbon nanosheets as the cathode for ultrafast zinc ion hybrid supercapacitor applications *Electrochim. Acta* **379** 13817
- [13] Mehare M D, Deshmukh A D and Dhoble S J 2020 Preparation of porous agro-waste-derived carbon from onion peel for supercapacitor application *J. Mater. Sci.* **55** 4213–24
- [14] Sodtipinta J, Ieosakulrat C, Poonyayant N, Kidkhunthod P, Chanlek N, Amornsakchai T and Pakawatpanurut P 2017 Interconnected open-channel carbon nanosheets derived

- 1  
2  
3  
4 from pineapple leaf fiber as a sustainable active material for supercapacitors *Ind. Crops Prod.* **104** 13–20
- 5  
6 [15] Chen Z, Wang X, Xue B, Li W, Ding Z, Yang X, Qiu J and Wang Z 2020 Rice husk-based hierarchical porous carbon for high performance supercapacitors : The structure-performance relationship *Carbon N. Y.* **161** 432–44
- 7  
8 [16] Liangshuo L, Lin Q, Xinyu L, Ming D and Xin F 2020 Preparation of biomass-based porous carbon derived from waste ginger slices and its electrochemical performance *Optoelectron. Adv. Mater. Rapid Commun.* **14** 548–55
- 9  
10 [17] He X, Li R, Han J, Yu M and Wu M 2013 Facile preparation of mesoporous carbons for supercapacitors by one-step microwave-assisted ZnCl<sub>2</sub> activation *Mater. Lett.* **94** 158–60
- 11  
12 [18] Taer E, Pratiwi L, Apriwandi, Mustika W S, Taslim R and Agustino 2020 Three-dimensional pore structure of activated carbon monolithic derived from hierarchically bamboo stem for supercapacitor application *Commun. Sci. Technol.* **5** 22–30
- 13  
14 [19] Yang V, Senthil R A, Pan J, Kumar T R, Sun Y and Liu X 2020 Hierarchical porous carbon derived from jujube fruits as sustainable and ultrahigh capacitance material for advanced supercapacitors *J. Colloid Interface Sci.* **579** 347–56
- 15  
16 [20] Jiang X, Guo F, Jia X, Zhan Y, Zhou H and Qian L 2020 Synthesis of nitrogen-doped hierarchical porous carbons from peanut shell as a promising electrode material for high-performance supercapacitors *J. Energy Storage* **30** 101451
- 17  
18 [21] Shang Z, An X, Liu L, Yang J, Zhang W, Dai H, Cao H, Xu Q, Liu H and Ni Y 2021 Chitin nanofibers as versatile bio-templates of zeolitic imidazolate frameworks for N-doped hierarchically porous carbon electrodes for supercapacitor *Carbohydr. Polym.* **251** 117107
- 19  
20 [22] Men B, Guo P, Sun Y, Tang Y, Chen Y, Pan J and Wan P 2019 High-performance nitrogen-doped hierarchical porous carbon derived from cauliflower for advanced supercapacitors *J. Mater. Sci.* **54** 2446–57
- 21  
22 [23] Mitravinda T, Nanaji K, Anandan S, Jyothirmayi A, Chakravadhanula V S K, Sharma C S and Rao T N 2018 Facile Synthesis of Corn Silk Derived Nanoporous Carbon for an Improved Supercapacitor Performance *J. Electrochem. Soc.* **165** A3369–79
- 23  
24 [24] Zhou J, Yuan S, Lu C, Yang M and Song Y 2020 Hierarchical porous carbon microtubes derived from corn silks for supercapacitors electrode materials *J. Electroanal. Chem.* **878** 114704
- 25  
26 [25] Li W, Chen C, Wang H, Li P, Jiang X, Yang J and Liu J 2022 Hierarchical porous carbon induced by inherent structure of eggplant as sustainable electrode material for high performance supercapacitor *J. Mater. Res. Technol.* **17** 1540–52
- 27  
28 [26] Ni W and Shi L 2019 Review Article: Layer-structured carbonaceous materials for advanced Li-ion and Na-ion batteries: Beyond graphene *J. Vacuum Science & Technology A* **37** 040803
- 29  
30 [27] Serafin J, Baca M, Biegun M, Mijowska E, Kaleńczuk R J, Sreńscek-Nazzal J and Michalkiewicz B 2019 Direct conversion of biomass to nanoporous activated biocarbons for high CO<sub>2</sub> adsorption and supercapacitor applications *Appl. Surf. Sci.* **497** 143722
- 31  
32 [28] Jiang W, Pan J and Liu X 2019 A novel rod-like porous carbon with ordered hierarchical pore structure prepared from Al-based metal-organic framework without template as greatly enhanced performance for supercapacitor *J. Power Sources* **409** 13–23
- 33  
34 [29] Taer E, Apriwandi, Dalimunthe B K L and Taslim R 2021 A rod-like mesoporous carbon derived from agro-industrial cassava petiole waste for supercapacitor application *J. Chem. Technol. Biotechnol.* **96** 662–71
- 35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

- [30] Taer E, Apriwandi A, Agutino A, Taslim R, Mustika W S and Exa Fadli 2021 Surface modification: unique ellipsoidal/strobili-fiber structure of porous carbon monolith for electrode supercapacitor *Nanosci. Technol. An Int. J.* **12** 45–63
- [31] Ni W, Shi L and Resol 2022 Vegetable Fibers Composites *Materials Research Foundations* **122** 154-198
- [32] Liu F, Wang Z, Zhang H, Jin L, Chu X, Gu B, Huang H and Yang W 2019 Nitrogen, oxygen and sulfur co-doped hierarchical porous carbons toward high-performance supercapacitors by direct pyrolysis of kraft lignin *Carbon N. Y.* **149** 105–16
- [33] Zhou D-D, Zhang X-W, Mo Z-W, Xu Y-Z, Tian X-Y, Li Y, Chen X-M and Zhang J-P 2019 Adsorptive separation of carbon dioxide: From conventional porous materials to metal–organic frameworks *EnergyChem* **1** 100016
- [34] Bai Y, Liu C, Chen T, Li W, Zheng S, Pi Y, Luo Y and Pang H 2021 MXene-Copper/Cobalt Hybrids via Lewis Acidic Molten Salts Etching for High Performance Symmetric Supercapacitors *Angew. Chem. Int. Ed.* **60** 25318
- [35] Surya K and Michael M S 2020 Novel interconnected hierarchical porous carbon electrodes derived from bio-waste of corn husk for supercapacitor applications *J. Electroanal. Chem.* **878** 114674
- [36] Wang Y, Qiao M and Mamat X 2021 Nitrogen-doped macro-meso-micro hierarchical ordered porous carbon derived from ZIF-8 for boosting supercapacitor performance *Appl. Surf. Sci.* **540** 148352
- [37] Hao X, Wang J, Ding B, Wang Y, Chang Z, Dou H and Zhang X 2017 Bacterial-cellulose-derived interconnected meso-microporous carbon nanofiber networks as binder-free electrodes for high-performance supercapacitors *J. Power Sources* **352** 34–41
- [38] Taer E, Hasanah F and Taslim R 2021 Nanofiber-enrich activated carbon coin derived from tofu dregs as electrode materials for supercapacitor *Commun. Sci. Technol.* **6** 41–8
- [39] Li J, Zou Y, Xiang C, Xu F, Sun L, Li B and Zhang J 2021 *Osmanthus fragrans*-derived N-doped porous carbon for supercapacitor applications *J. Energy Storage* **42** 103017

## LAMPIRAN 2

### Proses Pembuatan Elektroda Karbon



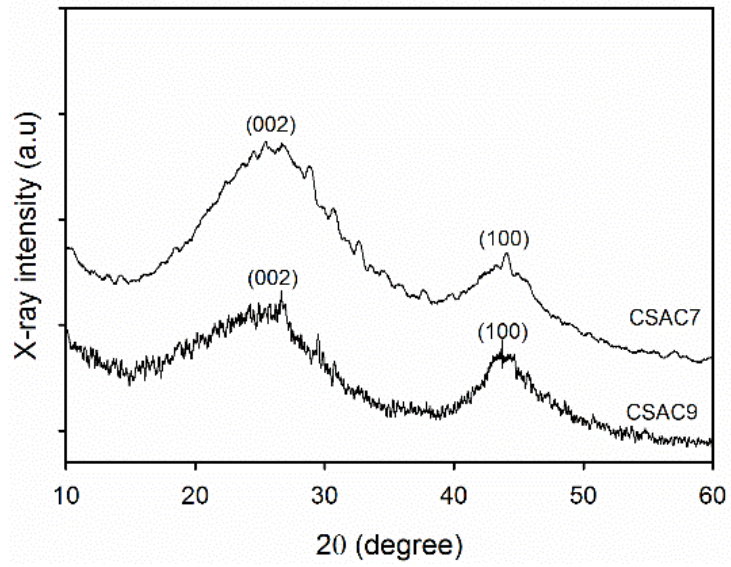
Keterangan: (a) Sutra jagung sebagai bahan asal pembuatan elektroda superkapasitor, (b) Serbuk pra-karbon dari sutra jagung, (c) Aktivasi kimia, (d) Pencetakan pelet, (e) Proses karbonisasi dan aktivasi fisika, (f) Pelet hasil karbonisasi dan aktivasi fisika, (g) Susunan sel superkapasitor, dan (h) Pengujian CV



### LAMPIRAN 3

#### Data Pengujian Sifat Kristalinitas

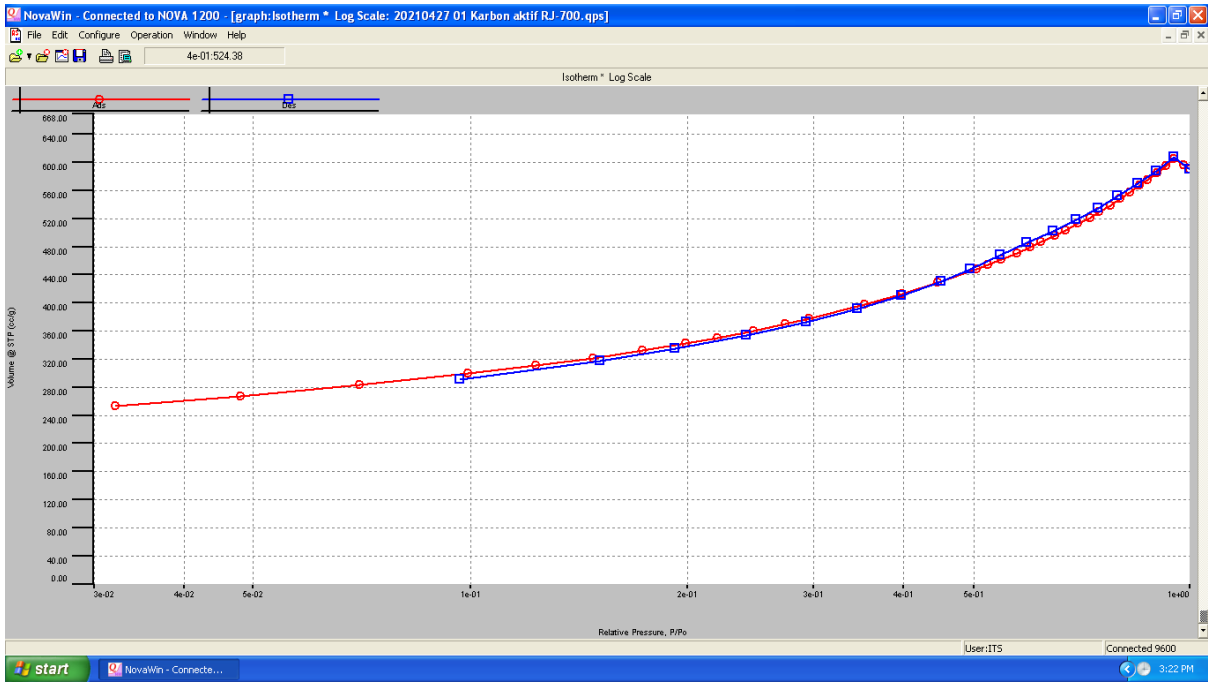
#### Data Hasil Pengujian Sifat Kristalinitas



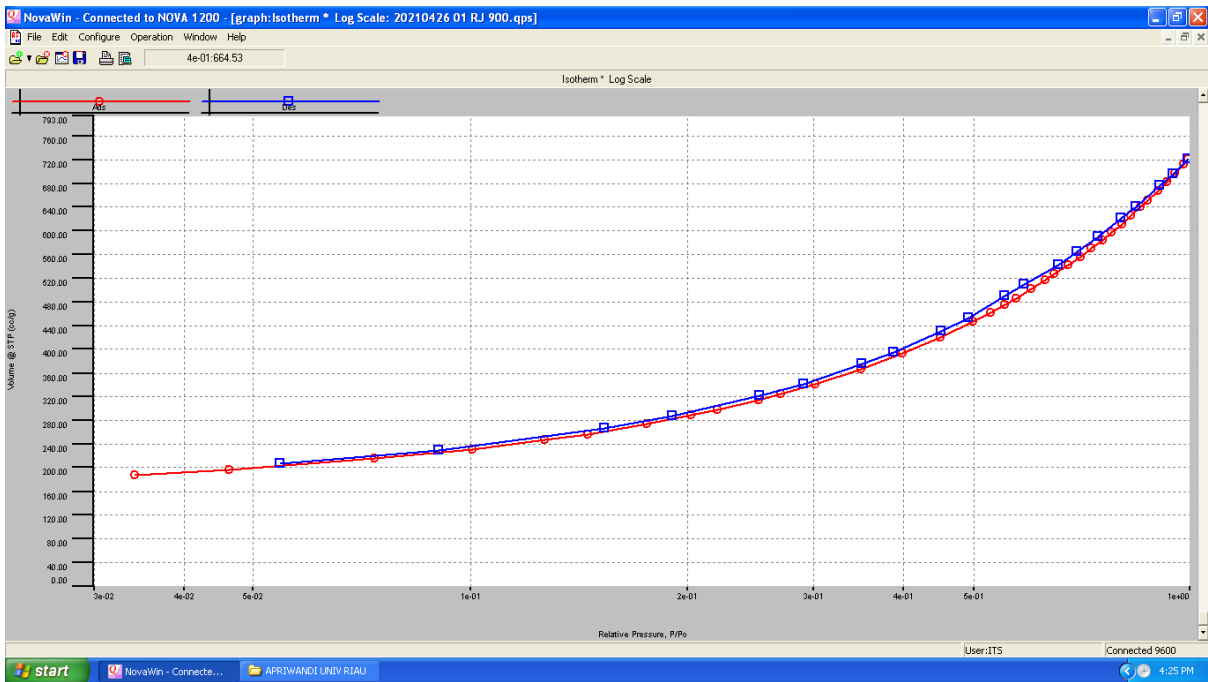
## LAMPIRAN 4

### Data Pengujian BET

#### Data Hasil Pengujian BET CSAC7



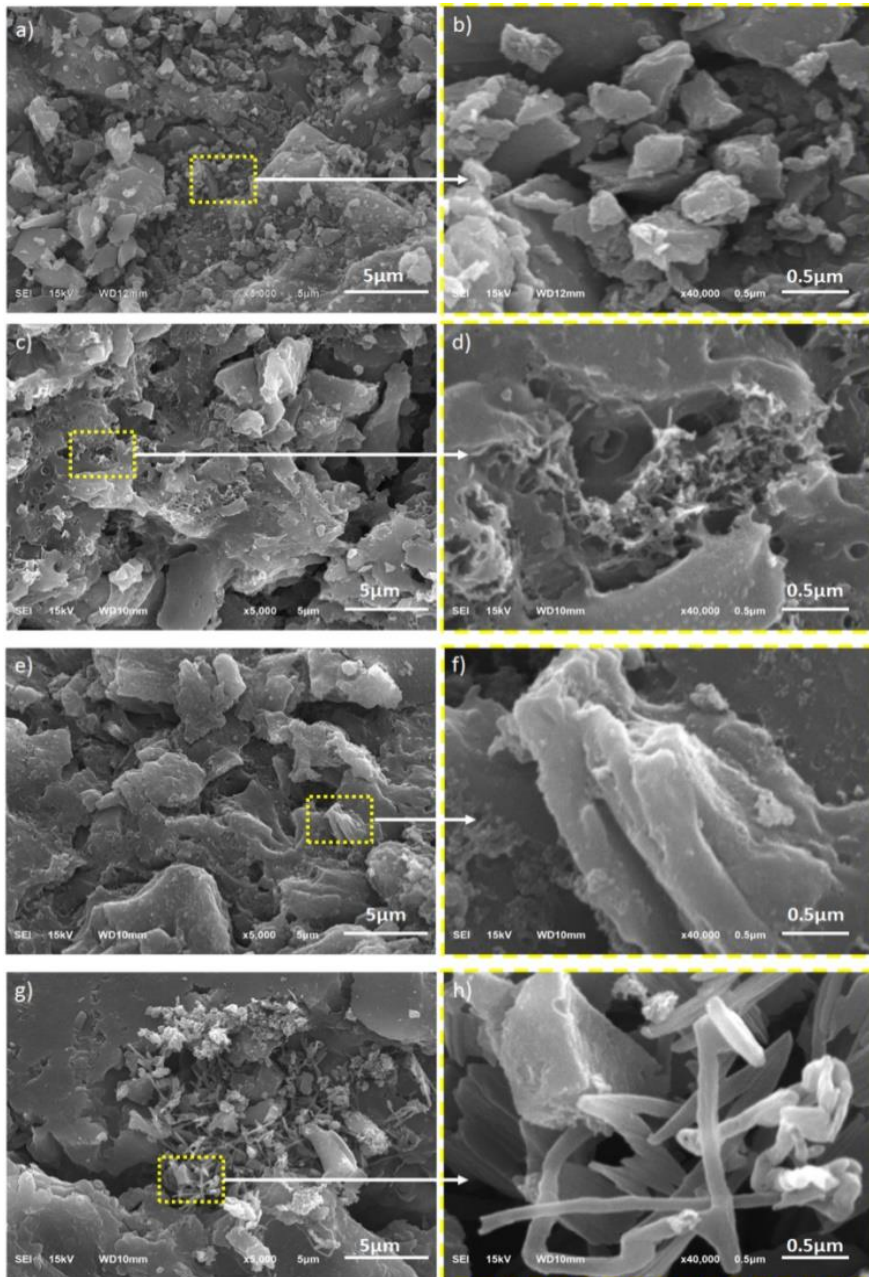
#### Data Hasil Pengujian BET CSAC9



## LAMPIRAN 5

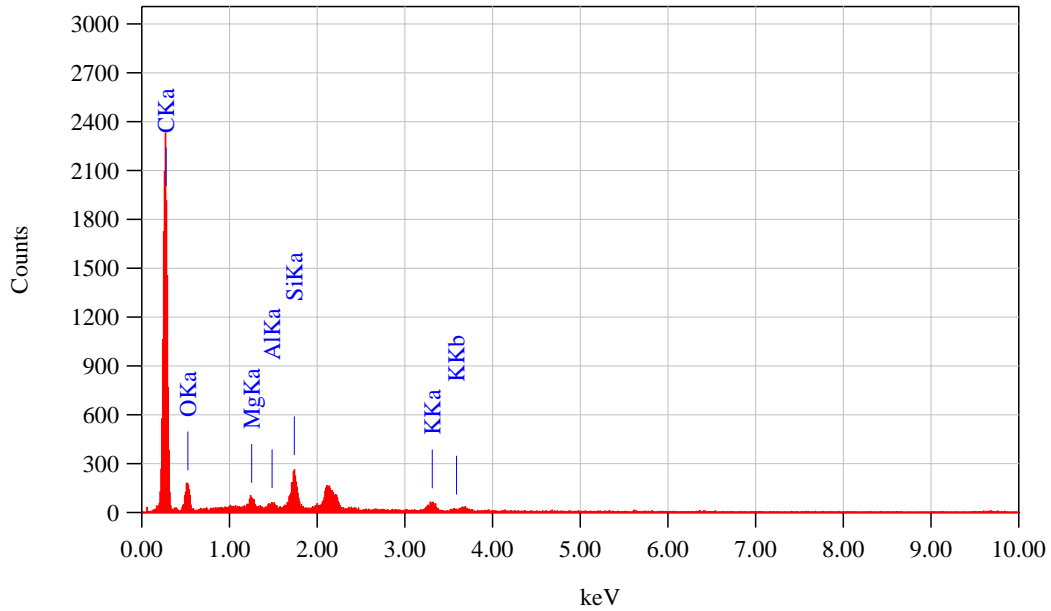
## Data Pengujian SEM

### Data Hasil Pengujian SEM

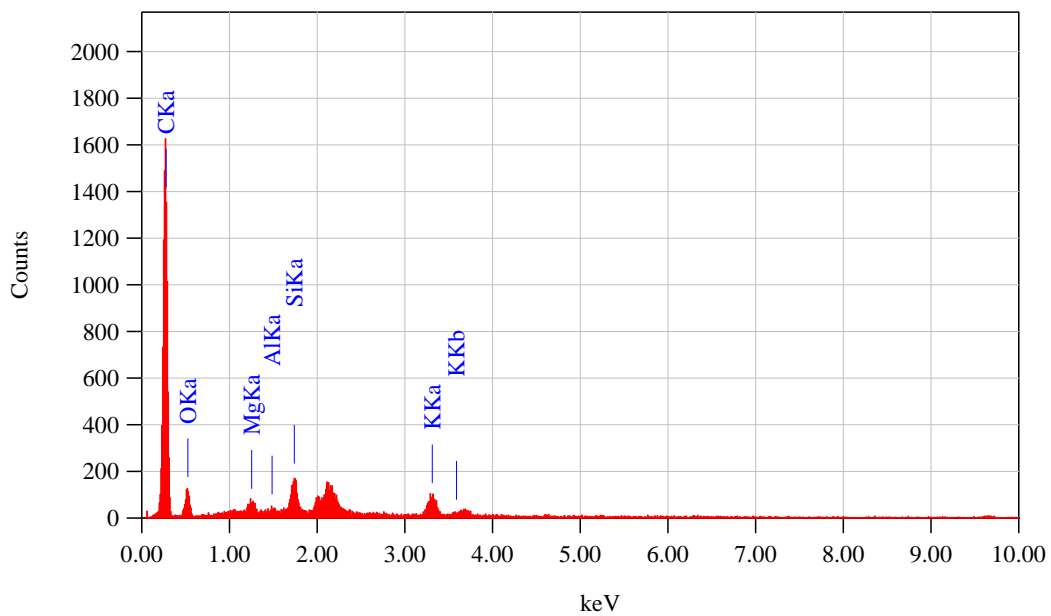


**LAMPIRAN 6**  
**Data Pengujian EDS**

**Data Hasil Pengujian EDS sampel CSAC7**



**Data Hasil Pengujian EDS sampel CSAC9**



## LAMPIRAN 7

### Data Pengujian EIS

