



**KEMENTERIAN RISET DAN TEKNOLOGI/ BADAN RISET
DAN INOVASI NASIONAL**

DEPUTI BIDANG PENGUATAN RISET DAN PENGEMBANGAN

Jalan M.H. Thamrin Nomor 8, Jakarta 10340, Gedung II BPPT Lantai 19 – 20

Telepon: (021) 3169707; Faksimile: (021) 3101728, 3102368

Laman: www.risbang.ristekdikti.go.id

Nomor : B/87/E3/RA.00/2020

28 Januari 2020

Lampiran : 4 (Empat) Berkas

Hal : Pengumuman Penerima Pendanaan Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat di Perguruan Tinggi Tahun Anggaran 2020

- Yth. 1. Rektor/ Direktur/ Ketua Perguruan Tinggi Negeri dan Swasta
2. Kepala Lembaga Layanan Pendidikan Tinggi Wilayah I s/d XIV

Berdasarkan Keputusan Kuasa Pengguna Anggaran Deputy Bidang Penguatan Riset dan Pengembangan Kementerian Riset dan Teknologi/ Badan Riset dan Inovasi Nasional Nomor 7/E1/KPT/ 2020 tanggal 24 Januari 2020 tentang Penetapan Pendanaan Pengabdian kepada Masyarakat Tahun Anggaran 2020, Keputusan Kuasa Pengguna Anggaran Deputy Bidang Penguatan Riset dan Pengembangan Kementerian Riset dan Teknologi/ Badan Riset dan Inovasi Nasional Nomor 8/E1/KPT/ 2020 tanggal 24 Januari 2020 tentang Penetapan Pendanaan Penelitian di Perguruan Tinggi Tahun Anggaran 2020, dan Keputusan Kuasa Pengguna Anggaran Deputy Bidang Penguatan Riset dan Pengembangan Kementerian Riset dan Teknologi/ Badan Riset dan Inovasi Nasional Nomor 9/E1/KPT/ 2020 tanggal 24 Januari 2020 tentang Penetapan Hasil Review Pendanaan Penelitian Tahun Anggaran 2020, bersama ini kami sampaikan daftar nama penerima pendanaan Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat tahun anggaran 2020 sebagai berikut:

1. Penerima Pendanaan Penelitian di Perguruan Tinggi Non-PTNBH Usulan Tahun 2019 (Lampiran 1)
2. Penelitian Kontrak Tahun Jamak 2019-2021 yang dilanjutkan pendanaannya (Lampiran 2)
3. Penerima Pendanaan Pengabdian Kepada Masyarakat (Lampiran 3)

Kami informasikan bahwa penerima pendanaan Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat Tahun Anggaran 2020 adalah pengusul yang proposalnya dinyatakan lolos seleksi, dan yang bersangkutan atau institusi telah memenuhi kewajiban sebagai berikut:

1. Mengunggah laporan kemajuan sampai dengan tahun 2019;
2. Mengunggah laporan akhir sampai dengan tahun 2019;
3. Melaksanakan seluruh tahapan seleksi sebagaimana disebutkan dalam Panduan Pelaksanaan Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Perguruan Tinggi Edisi XII Revisi Tahun 2019 untuk skema penelitian desentralisasi bagi Perguruan Tinggi klaster Mandiri, Utama, dan Madya sesuai dengan hasil klasterisasi tahun 2019;
4. Melaksanakan Monitoring dan Evaluasi penelitian secara daring sebagaimana surat Direktur DRPM dengan Nomor B/969/E3.1/RA.06/2019;
5. Mengunggah berkas kelengkapan seminar hasil bagi pelaksana Pengabdian kepada Masyarakat sampai dengan tahun 2019;
6. Tidak sedang dalam status tugas belajar baik untuk ketua maupun anggota, kecuali anggota pada skema Penelitian Pascasarjana;

7. Pendanaan penelitian diberikan dengan memperhatikan kuota berdasarkan h-index peneliti, kecuali untuk skema Penelitian Pascasarjana yang tidak dihitung sebagai kuota;
8. Hanya menjadi ketua di satu judul Pengabdian kepada Masyarakat, untuk pendanaan Pengabdian kepada Masyarakat tahun yang baru.

Adapun penelitian Penelitian Kontrak Tahun Jamak 2019-2021 yang dilanjutkan pendanaannya merupakan penelitian yang telah dinyatakan layak berdasarkan hasil monitoring dan evaluasi pada tahun 2019.

Apabila ada penerima pendanaan Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat sebagaimana tercantum pada lampiran ternyata tidak memenuhi salah satu dari ketentuan di atas, atau pelanggaran terhadap ketentuan Panduan Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Edisi XII Revisi Tahun 2019 maka pendanaannya dapat ditinjau kembali.

Berkenaan dengan hal tersebut, DRPM mengucapkan selamat kepada penerima pendanaan penelitian dan pengabdian kepada masyarakat tahun anggaran 2020. DRPM mengucapkan terimakasih kepada pengusul yang telah berpartisipasi, bagi pengusul yang belum mendapatkan pendanaan tahun ini dapat mengusulkan proposal penelitian dan pengabdian kepada masyarakat untuk pendanaan tahun 2021. Selanjutnya, kami mohon bantuan Bapak/Ibu untuk menyampaikan informasi di atas kepada nama-nama yang tercantum pada lampiran di Perguruan Tinggi masing-masing.

Perlu kami sampaikan bahwa mekanisme penyaluran dana akan dilakukan melalui kontrak. Berkaitan dengan hal ini, perlu kami sampaikan beberapa hal sebagai berikut:

1. Untuk penelitian, diterapkan kontrak tahun tunggal dan kontrak tahun jamak. Kontrak tahun tunggal digunakan untuk kontrak penelitian yang pendanaannya hanya 1 (satu) tahun, adapun kontrak tahun jamak digunakan untuk kontrak penelitian yang pendanaannya lebih dari 1 (satu) tahun.
2. Kontrak dilakukan secara berjenjang. Untuk Perguruan Tinggi Negeri (PTN), kontrak dilakukan antara DRPM dengan Ketua LP/LPPM/LPM/Direktur Politeknik, adapun untuk Perguruan Tinggi Swasta kontrak dilakukan melalui Kepala Lembaga Layanan Pendidikan Tinggi (LLDIKTI) masing - masing wilayah.
3. Pencairan dana penelitian dilakukan dengan 2 (dua) cara yaitu secara sekaligus dan secara bertahap;
4. Untuk Pengabdian kepada Masyarakat di tetapkan kontrak tahun tunggal bagi semua skema dan pencairannya dilaksanakan dalam 2 (dua) tahap.
5. Para penerima pendanaan Penelitian akan diminta untuk mengunggah perbaikan proposal dan RAB sesuai dengan dana yang diterima. Informasi lebih rinci terkait pengunggahan perbaikan proposal akan disampaikan kemudian.
6. Hal-hal lain yang terkait dengan penandatanganan kontrak, pencairan dana, dan pelaksanaan penelitian dan pengabdian kepada masyarakat akan diinformasikan lebih lanjut melalui laman: <http://simlibtamas.ristekdikti.go.id>.

Berkaitan dengan data yang diperlukan untuk penandatanganan kontrak, bersama ini kami kirimkan Daftar Isian (Lampiran 4). Kami mohon Daftar Isian tersebut dapat diisi dan segera dikirim melalui email ke alamat tudrpm.ristekbrin@gmail.com, untuk Penelitian CC ke alamat email terapanriset@gmail.com dengan subjek **Data Kontrak Penelitian** dan untuk Pengabdian Masyarakat CC ke alamat email ppm.drpmristekbrin@gmail.com dengan subjek **Data Kontrak Pengabdian**, paling lambat tanggal 10 Februari 2020. Untuk PTS tidak perlu mengirimkan daftar isian karena Kontrak akan dilakukan dengan LLDIKTI Wilayah masing – masing.

Demikian kami sampaikan, atas perhatian dan kerjasama Bapak/Ibu kami ucapkan terima kasih.

Direktur Riset dan Pengabdian
Masyarakat,

TTD

Ocky Karna Radjasa
NIP 196510291990031001

Tembusan:
Deputi Bidang Penguatan Riset dan Pengembangan;

PENERIMA PENDANAAN PENELITIAN PERGURUAN TINGGI NON-PTNBH USULAN TAHUN 2019

NO	PTN / LLDIKTI	NAMA INSTITUSI	SKEMA	NAMA	NIDN	JUDUL	DURASI PENELITIAN (Tahun)	STATUS USULAN
1	PTN	Akademi Komunitas Negeri Aceh Barat	Penelitian Dosen Pemula	HAIMI ARDIANSYAH	0005118703	Deteksi dan Klasifikasi Gangguan Kualitas Daya Listrik Menggunakan S-Transform dan Linear Data Analysis	1	baru
2	PTN	Akademi Komunitas Negeri Putra Sang Fajar Blitar	Penelitian Dosen Pemula	MOCH. KHOLIL	0705048902	REKONSTRUKSI MODEL 3D DARI BANYAK GAMBAR MENGGUNAKAN ALGORITMA STRUCTURE FROM MOTION (SFM) DAN MULTI VIEW STEREO (MVS) BERBASIS COMPUTER VISION	1	baru
3	PTN	Akademi Komunitas Negeri Putra Sang Fajar Blitar	Penelitian Dosen Pemula	RAFIKA AKHSANI	0001038603	Pengembangan media pembelajaran berbasis Augmented Reality sebagai pendukung bahan ajar pada Lembar Kerja Siswa kelas 3 Madrasah Ibtidaiyah	1	baru
4	PTN	Akademi Komunitas Negeri Putra Sang Fajar Blitar	Penelitian Dosen Pemula	SHANTI IKE WARDANI	0028129201	ANALISIS POTENSI SOCIOPRENEUR DI DESA SALAMREJO KECAMATAN KARANGAN KABUPATEN TRENGGALEK	1	baru
5	PTN	Institut Pertanian Bogor	World Class Research	ARMANSYAH HALOMOAN TAMBUNAN	0018096209	Karakterisasi limbah cair pengolahan kelapa sawit untuk produksi bio-hidrogen	2	baru
6	PTN	Institut Pertanian Bogor	World Class Research	C HANNY WIJAYA	0022046010	Pemberdayaan Potensi Buah Andaliman (<i>Zanthoxylum acanthopodium</i> Dc.) sebagai Flavor Fungsional	2	baru
7	PTN	Institut Pertanian Bogor	World Class Research	IRMA HERAWATI SUPARTO	0023115804	Identifikasi dan Karakterisasi Molekuler Marka Gen Diabetes Melitus Tipe 2 pada <i>Macaca fascicularis</i> dalam Upaya Penapisan dan Penyediaan Hewan Model Diabetes Spontan	2	baru
8	PTN	Institut Pertanian Bogor	World Class Research	JULIE EKASARI	0025077702	The role of microbial management in biofloc system in controlling Vibriosis in shrimp production	2	baru
9	PTN	Institut Pertanian Bogor	World Class Research	MARIMIN	0005096104	Model Penilaian dan Peningkatan Keberlanjutan Agroindustri Berbasis Tebu dan Kelapa Sawit	2	baru
10	PTN	Institut Pertanian Bogor	World Class Research	AGUS PURWITO	0001116108	Perakitan Varietas Unggul Bawang Merah Nasional Tahan Penyakit Utama (<i>Layu Fusarium</i> dan <i>Antraknosa</i>) berbasis Teknik Molekuler dan Metabolomik	3	baru
11	PTN	Institut Pertanian Bogor	World Class Research	AGUS SETIYONO	0010086305	Genotyping Isolat Lokal <i>Coxiella burnetii</i> dan Mapping Zoonosis Q Fever pada Ruminansia di Indonesia	3	baru

NO	PTN / LLDIKTI	NAMA INSTITUSI	SKEMA	NAMA	NIDN	JUDUL	DURASI PENELITIAN (Tahun)	STATUS USULAN
12	PTN	Institut Pertanian Bogor	World Class Research	ARIF SATRIA	0017097104	ANALISIS INTEGRASI KONSERVASI MODERN DAN SISTEM KEARIFAN LOKAL DALAM PENGELOLAAN SUMBERDAYA PESISIR DAN LAUT DI INDONESIA	3	baru
13	PTN	Institut Pertanian Bogor	World Class Research	ASEP GUNAWAN	0004078003	Identifikasi Gen Pengontrol Karkas dan Komposisi Nutrisi Daging Domba Sehat dalam Upaya Perbaikan Mutu Genetik Domba Indonesia	3	baru
14	PTN	Institut Pertanian Bogor	World Class Research	AWANG MAHARIJAYA	0008098004	IDENTIFIKASI KETAHANAN DAN RESISTANCE GENE ANALOGS (RGA) CABAI TERHADAP PENYAKIT DAUN KERITING KUNING DAN VEKTORNYA	3	baru
15	PTN	Institut Pertanian Bogor	World Class Research	AZIS BOING SITANGGANG	0009118601	Produksi selektif peptida bioaktif dari kacang-kacangan: Kombinasi perlakuan fermentasi dan hidrolisis enzimatis pada bioreaktor membran	3	baru
16	PTN	Institut Pertanian Bogor	World Class Research	DEDE HERMAWAN	0011076307	Pengembangan Beton Ringan Ramah Lingkungan Berbahan Tanaman Kenaf (<i>Hibiscus cannabinus</i> L) Berkemampuan Memulihkan Retak Secara Mandiri	3	baru
17	PTN	Institut Pertanian Bogor	World Class Research	DODIK RIDHO NURROCHMAT	0029037007	OPTIMASI MODEL PEMANFAATAN HUTAN UNTUK KESEJAHTERAAN MASYARAKAT	3	baru
18	PTN	Institut Pertanian Bogor	World Class Research	EPI TAUFIK	0002127503	Eksplorasi Heterogenitas Komponen Bioaktif Oligosakarida dalam Susu dan Kolostrum Ternak Perah	3	baru
19	PTN	Institut Pertanian Bogor	World Class Research	FAUZI FEBRIANTO	0009026307	Pengembangan Cellulose Nanocomposites (CNC) Unggul dari Serat Kapok dan Balsa sebagai Material Biodegradabel dan Terbarukan	3	baru
20	PTN	Institut Pertanian Bogor	World Class Research	HAWIS H M	0026037906	Redefining hotspots of marine fishes across Indonesian coral reefs with different anthropogenic pressure using environmental DNA metabarcoding for sustainable fisheries	3	baru
21	PTN	Institut Pertanian Bogor	World Class Research	HENDRADI HARDHIENATA	0014018302	Investigasi permukaan semikonduktor GaN, Perovskite dan BaTiO ₃ pada skala nano menggunakan pendekatan model ikat nonlinier termodifikasi dan teori grup	3	baru
22	PTN	Institut Pertanian Bogor	World Class Research	HUSIN ALATAS	0004067104	Kajian Dinamika dan Karakteristik Sistem Kompleks Berdasarkan Pemodelan Berbasis Agen dan Teori Kerapatan Fungsional	3	baru
23	PTN	Institut Pertanian Bogor	World Class Research	I WAYAN DARMAWAN	0012026605	Eco-Friendly Wood Quality Improvement Through Non-Biocide Method Based on Thermal and Chemical Modification	3	baru
24	PTN	Institut Pertanian Bogor	World Class Research	ISTIE SEKARTINING RAHAYU	0022047405	MODIFIKASI KAYU CEPAT TUMBUH MELALUI PENGEMBANGAN MATERIAL BERMUATAN MAGNET	3	baru

NO	PTN / LLDIKTI	NAMA INSTITUSI	SKEMA	NAMA	NIDN	JUDUL	DURASI PENELITIAN (Tahun)	STATUS USULAN
1587	PTN	Universitas Riau	Penelitian Dasar	LAZUARDI	0004096902	Peningkatan Unjuk Kerja Sistem Elektronik Topologi Current Mirror Dengan Low Current dan Perbaikan S/N Ratio Untuk Meningkatkan Sensitivitas dan Resolusi Biosensor Multikanal	2	baru
1588	PTN	Universitas Riau	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi	AHMAD FADLI	0025107301	PENINGKATAN BIOAKTIVITAS IMPLAN TULANG BERBAHAN DASAR LOGAM MENGGUNAKAN HIDROKSIAPATIT UNTUK Mendukung PRODUKSI IMPLAN TULANG PIPIH DI INDONESIA	2	baru
1589	PTN	Universitas Riau	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi	ANDEWI ROKHMAWATI	0011087301	INTERNALISASI BIAYA SOSIAL PEMBANGKIT LISTRIK BERBAHAN BAKAR FOSIL: ENERGY PRICE MODELING	2	baru
1590	PTN	Universitas Riau	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi	EDY SAPUTRA	0029017302	Produksi Mesoporous Nano Precipitated Silica Sebagai Bahan Drug Delivery Application dari Limbah Fly Ash Sawit	2	baru
1591	PTN	Universitas Riau	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi	EVELYN	0014037504	TEKNOLOGI HURDLE MENGGUNAKAN TERMAL, ULTRASOUND, DAN PULSED ELECTRIC FIELD UNTUK REDUKSI SPORA BAKTERI DAN JAMUR HEAT RESISTANT DALAM JUS NENAS	2	baru
1592	PTN	Universitas Riau	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi	NUR ISLAMI	0022037402	Penggunaan metode geolistrik resolusi tinggi untuk karakterisasi dan pemetaan persentase kandungan intrusi air laut pada aquifer dangkal di Kota Dumai	2	baru
1593	PTN	Universitas Riau	Penelitian Disertasi Doktor	ADEL ZAMRI	0020125906	SINTESIS, STUDI IN SILICO DAN UJI AKTIVITAS BIOLOGIS SENYAWA TURUNAN ASAM 4-OKSOKROTONAT SEBAGAI KANDIDAT ANTIDIABETES	2	baru
1594	PTN	Universitas Riau	World Class Research	AMUN AMRI	0031017205	Struktural dan Kinetika Pembentukan Koating Katoda Lithium Iron Phosphate - Graphene Nanosheets (LiFePO ₄ - GNSs) yang Disintesa dengan Proses Sol-gel	2	baru
1595	PTN	Universitas Riau	World Class Research	EVELYN	0014037504	Pembuatan Dissolving Pulp dari Limbah Agro Industri Menggunakan Proses Soda-Antrakuinon yang Ramah Lingkungan	2	baru
1596	PTN	Universitas Riau	Penelitian Dasar	ADEL ZAMRI	0020125906	DESAIN, SINTESIS DAN EVALUASI AKTIVITAS BIOLOGIS SENYAWA PIRAZOL 1,3,5-TRISUBSTITUSI SEBAGAI INHIBITOR TIROSINASE	3	baru

NO	PTN / LLDIKTI	NAMA INSTITUSI	SKEMA	NAMA	NIDN	JUDUL	DURASI PENELITIAN (Tahun)	STATUS USULAN
1597	PTN	Universitas Riau	Penelitian Dasar	SAKTIOTO	0030107002	Pengembangan Sistem Kopleng Serat Optik Moda Tunggal dan Kisi Bragg Berbasis Interferometer Mach-Zehnder sebagai Biosensor Aliran Darah Pada Pembuluh Darah Jantung	3	baru
1598	PTN	Universitas Riau	Penelitian Dasar	TITANIA TJ NUGROHO	0013105605	Pemurnian dan karakterisasi enzim lakase Trichoderma asperellum LBKURCC1 sebagai biokatalisator pendegradasi limbah zat warna tekstil	3	baru
1599	PTN	Universitas Riau	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi	ERMAN TAER	0023097102	Sintesis Nano Karbon Berbasis Limbah Biomassa Sebagai Bahan Asal Elektroda Superkapasitor dengan Rapat Energi dan Daya Tinggi	3	baru
1600	PTN	Universitas Riau	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi	IDA ZAHRINA	0029047104	Deep Eutectic Solvents (DES) Sebagai Katalis pada Sintesis Emulsifier Mono- dan Digliserida (MDG)	3	baru
1601	PTN	Universitas Riau	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi	MONITA OLIVIA	0013067504	Potensi dan rekayasa beton nano silika presipitasi abu sawit untuk material self healing pada struktur dan infrastruktur berkinerja tinggi di lingkungan gambut	3	baru
1602	PTN	Universitas Riau	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi	NERY SOFIYANTI	0020027401	KAJIAN BIODIVERSITAS DAN PENERAPAN DNA PROFILLING DALAM PENGEMBANGAN POTENSI TUMBUHAN KHAS RIAU DAN PENYUSUNAN FORCYT DNA DATABASE SEBAGAI USAHA KONSERVASI TUMBUHAN LANGKA	3	baru
1603	PTN	Universitas Riau	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi	RAKHMAWATI FARMA	0001097002	BIOMASSA BIJI -BIJIAN SEBAGAI KARBON AKTIF MELALUI PROSES AKTIVASI KIMIA DAN FISIKA UNTUK APLIKASIKAN ELEKTRODA SEL SUPERKAPASITOR	3	baru
1604	PTN	Universitas Riau	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi	YUSTINA	0009016110	Efektivitas Pemanfaatan Limbah untuk Pakan Ikan Budidaya dan Aquaponik melalui Pendekatan STEM-K (Science Technology Engineering Mathematics dan Kewirausahaan) pada Pembelajaran IPA	3	baru
1605	PTN	Universitas Riau	Penelitian Terapan	RIA NELLY SARI	0008116201	MODEL TATA KELOLA DAN SISTEM PENGUKURAN KINERJA BUMDes	3	baru
1606	PTN	Universitas Riau	Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi	FELIATRA	0002086301	Perproduksi protein sel tunggal dari bakteri Bacillus cereus sebagai sumber protein pengganti pada pakan ikan budidaya	3	baru
1607	PTN	Universitas Riau	World Class Research	EDY SAPUTRA	0029017302	Rekayasa Sitiesis dan Aplikasi Nano Material Katalis untuk Produksi Bio-Solar	3	baru
1608	PTN	Universitas Riau	World Class Research	ERMAN TAER	0023097102	Superkapasitor dengan rapat energi dan daya tinggi : Optimalisasi proses penyediaan elektroda	3	baru

NO	PTN / LLDIKTI	NAMA INSTITUSI	SKEMA	NAMA	NIDN	JUDUL	DURASI PENELITIAN (Tahun)	STATUS USULAN
10408	LLDIKTI WILAYAH XIV	Universitas Victory Sorong	Penelitian Dosen Pemula	AGUSTINUS GIDION GIFELEM	1,415E+09	Pola Persukuan Bahasa Moi Ragam Kelin di Kampung Klayili Distrik Klayili Kabupaten Sorong	1	baru
10409	LLDIKTI WILAYAH XIV	Universitas Victory Sorong	Penelitian Dosen Pemula	FENSCA FENOLISA LAHALLO	1,402E+09	Perbandingan Perkembangan Usaha Mikro Kecil dan Menengah (UMKM) Sebelum dan Setelah Mendapatkan Pembiayaan (Studi Kasus Pada UMKM Distrik Aimas Kabupaten Sorong)	1	baru
10410	LLDIKTI WILAYAH XIV	Universitas Victory Sorong	Penelitian Dosen Pemula	FERDINANDO SOLISSA	1,411E+09	PENGARUH PEMBELAJARAN AKUNTANSI YANG BERKARAKTER , MINAT DAN MOTIVASI BELAJAR TERHADAP PRESTASI BELAJAR MAHASISWA AKUNTANSI (STUDI KASUS PADA UNIVERSITAS VICTORY KOTA SORONG).	1	baru
10411	LLDIKTI WILAYAH XIV	Universitas Victory Sorong	Penelitian Dosen Pemula	IRWAN SOULISA	1,401E+09	Upaya pengembangan alat penilaian pembelajaran Berbasis kompetensi pada SMA Papua di kota sorong	1	baru
10412	LLDIKTI WILAYAH XIV	Universitas Victory Sorong	Penelitian Dosen Pemula	MATHEUS SUPRIYANTO RUMETNA	1,403E+09	Rancang Bangun Sistem Informasi Kampung Wisata Arborek	1	baru
10413	LLDIKTI WILAYAH XIV	Universitas Victory Sorong	Penelitian Dosen Pemula	MAYA PATTIWAEI	1,423E+09	Komposisi Jenis dan Populasi Burung Cendrawasih di Kampung Malagufuk Distrik Klayili Kabupaten Sorong Provinsi Papua Barat	1	baru
10414	LLDIKTI WILAYAH XIV	Universitas Victory Sorong	Penelitian Dosen Pemula	MELDA AGNES MANUHUTU	1,421E+09	Sistem Informasi Orang Tua Wali Mahasiswa berbasis Website pada Universitas Victory	1	baru
10415	LLDIKTI WILAYAH XIV	Universitas Victory Sorong	Penelitian Dosen Pemula	NATASYA VIRGINIA LEUWOL	1,214E+09	KAJIAN POTENSI PENGEMBANGAN EKOWISATA SEBAGAI PENDEKATAN TERAPI HUTAN, UNTUK PENGHILANG STRES. (Studi Sosio-Psiko tentang Kajian Potensi Pengembangan Ekowisata Sebagai Pendekatan Terapi Hutan, Untuk Penghilang Stres, di Kawasan Wisata Hutan Mangrove, Kota Sorong)	1	baru
10416	LLDIKTI WILAYAH XIV	Universitas Victory Sorong	Penelitian Dosen Pemula	ROBERTHAIR SURIPATTY	1,406E+09	Transparansi Penyaluran Dan Pengelolaan Dana Desa Terhadap Pemanfaatan Pemberdayaan Masyarakat Papua Di Kabupaten Sorong	1	baru
10417	LLDIKTI WILAYAH XIV	Universitas Victory Sorong	Penelitian Dosen Pemula	SHERLY GASPERSZ	1,412E+09	Penggunaan Media Gambar Berseri Untuk Meningkatkan Kemampuan Berbicara Bahasa Inggris di SMP YPK Syaloom Klademak Kota Sorong	1	baru

NO	PTN / LLDIKTI	NAMA INSTITUSI	SKEMA	NAMA	NIDN	JUDUL	DURASI PENELITIAN (Tahun)	STATUS USULAN
10418	LLDIKTI WILAYAH XIV	Universitas Victory Sorong	Penelitian Dosen Pemula	TIA METANFANUAN	1,408E+09	Pendidikan Agama Kristen sebagai sarana pembentukan karakter anak-anak Suku Moi Di SD YPK Ebenhezer Klawana Distrik Klamono_Kabupaten Sorong Provinsi Papua Barat	1	baru



KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS RIAU
LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT

Kampus Bina Widya, Jalan. HR. Soebrantas Km. 12,5 Panam, Pekanbaru 28293

Telp/Fax (0761) 588156

Website: <http://lppm.unri.ac.id>, Surel: lppm@unri.ac.id

PENELITIAN DRPM YANG DIDANAI TAHUN 2021

NO	NAMA	NIDN	SKEMA	JUDUL	DANA DISETUJUI TAHUN 2021	
1	AMUN AMRI	0031017205	Konsorsium Riset Unggulan Perguruan Tinggi	PENGEMBANGAN CELLULAR LIGHTWEIGHT GEOPOLYMER (CLG) BERBASIS FLY ASH BATUBARA DENGAN PENAMBAHAN GRAPHENE NANOSHEETS	Rp	431.600.000
2	ADEL ZAMRI	0020125906	Penelitian Dasar	DESAIN, SINTESIS DAN EVALUASI AKTIVITAS BIOLOGIS SENYAWA PIRAZOL 1,3,5- RISUBSTITUSI SEBAGAI INHIBITOR TIROSINASE	Rp	225.698.000
3	LAZUARDI	0004096902	Penelitian Dasar	PENINGKATAN UNJUK KERJA SISTEM ELEKTRONIK TOPOLOGI CURRENT MIRROR DENGAN LOW CURRENT DAN PERBAIKAN S/N RATIO UNTUK MENINGKATKAN SENSITIVITAS DAN RESOLUSI BIOSENSOR MULTIKANAL	Rp	276.408.000
4	SAKTIOTO	0030107002	Penelitian Dasar	PENGEMBANGAN SISTEM KOPLING SERAT OPTIK MODA TUNGGAL DAN KISI BRAGG BERBASIS INTERFEROMETER MACH-ZEHNDER SEBAGAI BIOSENSOR ALIRAN DARAH PADA PEMBULUH DARAH JANTUNG	Rp	300.280.000
5	TITANIA TJNUGROHO	0013105605	Penelitian Dasar	PEMURNIAN DAN KARAKTERISASI ENZIM LAKASE TRICHODERMA ASPERELLUM LBKURCC1 SEBAGAI BIOKATALISATOR PENDEGRADASI LIMBAH ZAT WARNA TEKSTIL	Rp	182.707.000
6	YUSNITA RAHAYU	0004117504	Penelitian Dasar	PERANCANGAN ALAT PENDETEKSI VIRUS PADA DARAH BERBASIS ANTENA BIOSENSOR	Rp	169.500.000
7	AZRIYENNI	0001047308	Penelitian Dasar	KONSEP WIDE AREA PROTECTION (WAP) PADA SISTEM TENAGA LISTRIK MENUJU SISTEM SMART GRID	Rp	68.897.000
8	DESI HELTINA	0014127103	Penelitian Dasar	REKAYASA KOMPOSIT CNT/GRAPHENE - TIO2- FE3O4 DENGAN MODIFIKASI PERMUKAAN CNT/GRAPHENE MENGGUNAKAN SURFAKTAN UNTUK PENGOLAHAN LIMBAH FENOL	Rp	133.752.000
9	ERMAN TAER	0023097102	Penelitian Dasar	MIKRO- DAN NANO KARBON FIBER DENGAN KERAPATAN TINGGI BERBASIS BAHAN ALAM SEBAGAI ELEKTRODA KARBON SUPERKAPASITOR	Rp	139.377.000
10	HAPSOH	0001115702	Penelitian Dasar	KETAHANAN TANAMAN TERHADAP SERANGAN HAMA DENGAN APLIKASI AGENS HAYATI Mendukung Pertanian Terpadu Berkelanjutan	Rp	78.957.000
11	JASRIL	0005056304	Penelitian Dasar	SINTESIS TURUNAN BENZILIDENHIDRAZIN SEBAGAI SENYAWA BERPOTENSI ANTIOKSIDAN DAN ANTIKANKER	Rp	139.000.000
12	AHMAD FADLI	0025107301	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi	PENINGKATAN BIOAKTIVITAS IMPLAN TULANG BERBAHAN DASAR LOGAM MENGGUNAKAN HIDROKSIAPATIT UNTUK Mendukung PRODUKSI IMPLAN TULANG PIPIH DI INDONESIA	Rp	257.029.000
13	ANDEWI ROKHMAWATI	0011087301	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi	INTERNALISASI BIAYA SOSIAL PEMBANGKIT LISTRIK BERBAHAN BAKAR FOSIL: ENERGY PRICE MODELING	Rp	82.890.000
14	EDY SAPUTRA	0029017302	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi	PRODUKSI MESOPOROUS NANO PRECIPITATED SILICA SEBAGAI BAHAN DRUG DELIVERY APPLICATION DARI LIMBAH FLY ASH SAWIT	Rp	260.460.000
15	ERMAN TAER	0023097102	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi	SINTESIS NANO KARBON BERBASIS LIMBAH BIOMASSA SEBAGAI BAHAN ASAL ELEKTRODA SUPERKAPASITOR DENGAN RAPAT ENERGI DAN DAYA TINGGI	Rp	146.681.000
16	EVELYN	0014037504	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi	TEKNOLOGI HURDLE MENGGUNAKAN TERMAL, ULTRASOUND, DAN PULSED ELECTRIC FIELD UNTUK REDUKSI SPORA BAKTERI DAN JAMUR HEAT RESISTANT DALAM JUS NENAS	Rp	76.750.000
17	IDA ZHRINA	0029047104	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi	DEEP EUTECTIC SOLVENTS (DES) SEBAGAI KATALIS PADA SINTESIS EMULSIFIER MONO- DAN DIGLISERIDA (MDG)	Rp	143.378.000
18	MONITA OLIVIA	0013067504	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi	POTENSI DAN REKAYASA BETON NANO SILIKA PRESIPITASI ABU SAWIT UNTUK MATERIAL SELF HEALING PADA STRUKTUR DAN INFRASTRUKTUR BERKINERJA TINGGI DI LINGKUNGAN GAMBUT	Rp	125.000.000
19	NERY SOFIYANTI	0020027401	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi	KAJIAN BIODIVERSITAS DAN PENERAPAN DNA PROFILLING DALAM PENGEMBANGAN POTENSI TUMBUHAN KHAS RIAU DAN PENYUSUNAN FORCYT DNA DATABASE SEBAGAI USAHA KONSERVASI TUMBUHAN LANGKA	Rp	150.300.000
20	NERY SOFIYANTI	0020027401	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi	INOVASI BIOPRODUCTS BERBAHAN DASAR TUMBUHAN LOKAL RIAU DALAM MENGHADAPI PANDEMI COVID-19	Rp	247.360.000

NO	NAMA	NIDN	SKEMA	JUDUL	DANA DISETUJUI TAHUN 2021
21	NUR ISLAMI	0022037402	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi	PENGUNAAN METODE GEOLISTRIK RESOLUSI TINGGI UNTUK KARAKTERISASI DAN PEMETAAN PERSENTASE KANDUNGAN INTRUSI AIR LAUT PADA AQUIFER DANGKAL DI KOTA DUMAI	Rp 104.625.000
22	NUR ISLAMI	0022037402	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi	INTEGRASI METODE GEOMAGNETIK, GEOLISTRIK DAN ANALISA FISIKA-KIMIA AIR TANAH UNTUK INVESTIGASI DAN PEMODELAN POTENSI GEOTHERMAL ROKAN HULU, RIAU	Rp 100.550.000
23	RAKHMAWATIFARMA	0001097002	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi	BIOMASSA BIJI -BIJIAN SEBAGAI KARBON AKTIF MELALUI PROSES AKTIVASI KIMIA DAN FISIKA UNTUK APLIKASIKAN ELEKTRODA SEL SUPERKAPASITOR	Rp 151.359.000
24	YUANANURULITA	0009107807	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi	BIOPROSPEK ISOLAT LOKAL TANAH GAMBUT RIAU, PENICILLIUM SP. LBKURCC34 DALAM MEMPRODUKSI METABOLIT BERPOTENSI ANTIBIOTIK DENGAN MODIFIKASI MEDIA NUTRISI TERBATAS DAN STIMULASI BAKTERI PATOGEN STAPHYLOCOCCUS AUREUS.	Rp 150.127.000
25	YUSTINA	0009016110	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi	EFEKTIVITAS PEMANFAATAN LIMBAH UNTUK PAKAN IKAN BUDIDAYA DAN AQUAPONIK MELALUI PENDEKATAN STEM-K (SCIENCE TECHNOLOGY ENGINEERING MATHEMATICS DAN KEWIRAUSAHAAN) PADA PEMBELAJARAN IPA	Rp 72.258.000
26	YUSTINA	0009016110	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi	PEMBELAJARAN E-LEARNING BERBASIS MODEL PROBLEM BASED LEARNING TERHADAP PENCAPAIAN HIGHER ORDER THINKING SKILLS (HOTS) PADA MASA COVID-19	Rp 83.320.000
27	ZETRA HAINULPUTRA	0022068503	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi	MODEL PENGUATAN TECHNOLOGICAL DIDACTICAL AND MATHEMATICAL KNOWLEDGE (TDMK) GURU SEKOLAH DASAR BERBASIS GEOGEBRA DALAM MENDUKUNG PEMBELAJARAN DARING DI MASA NEW NORMAL	Rp 123.910.000
28	DELITA ZUL	0011076801	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi	DETERMINASI KOMPOSISI DAN FUNGSI KOMUNITAS BAKTERI TANAH GAMBUT MELALUI TEKNIK METAGENOM: UPAYA PENENTUAN BARCODE DNA SEBAGAI ALAT UNTUK MONITORING KUALITAS GAMBUT	Rp 115.830.000
29	USMAN	0020016602	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi	SKRINING ISOLAT BAKTERI ASAM LAKTAT DARI DADIH YANG MENGHASILKAN BAKTERIOSIN SEBAGAI BAHAN PENGAWET ALAMI PADA BAKSO IKAN	Rp 82.250.000
30	AMIR AWALUDDIN	0017126201	Penelitian Disertasi Doktor	SINTESIS MNO ₂ SEBAGAI FOTOKATALIS UNTUK DEGRADASI LIMBAH PLASTIK	Rp 59.860.000
31	SARYONO	0011066208	Penelitian Disertasi Doktor	PRODUKSI SENYAWA BIOAKTIF JAMUR TERMOFILIK ASPERGILLUS FUMIGATUS CC269 DAN BAKTERI LKBURCC218 GALUR LOKAL	Rp 57.660.000
32	FELIATRA	0002086301	Penelitian Disertasi Doktor	POTENSI BAKTERI LOKAL RIAU PENDEGRADASI PLASTIK LDPE DAN PLASTIK OXIIUM	Rp 55.750.000
33	TENGKU DAHRIL	0006015404	Penelitian Pengembangan	MEMPRODUKSI TEPUNG CHLORELLA SEBAGAI MAKANAN TAMBAHAN SUPPLEMENT FOOD UNTUK MENINGKATKAN DAYA TAHAN TUBUH MASYARAKAT DARI WABAH COVID 19	Rp 356.350.000
34	HENNYINDRAWATI	0018067606	Penelitian Terapan	REVITALISASI KELEMBAGAAN EKONOMI DAN PENERAPAN INOVASI PRODUK UNTUK MEMPERCEPAT PEMULIHAN EKONOMI UMKM PENGOLAHAN KOMODITAS UNGGULAN PROVINSI RIAU DI ERA PANDEMI COVID-19	Rp 132.140.000
35	RIA NELLY SARI	0008116201	Penelitian Terapan	MODEL TATA KELOLA DAN SISTEM PENGUKURAN KINERJA BUMDES	Rp 304.770.000
36	BAHRUDDIN	0031126808	Penelitian Terapan	PENGEMBANGAN TEKNOLOGI PRODUKSI DAN PROSPEK EKONOMI PRODUK ASPAL-KARET ALAM UNTUK PENINGKATAN KINERJA ASPAL JALAN	Rp 240.600.000
37	AMUN AMRI	0031017205	Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi	KOMPOSIT BETON GEOPOLIMER-GRAFENA SEBAGAI BAHAN SEKAT KANAL (CANAL BLOCK) UNTUK PENCEGAHAN KEBAKARAN LAHAN GAMBUT	Rp 291.450.000
38	BAHRUDDIN	0031126808	Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi	MODIFIKASI LATEKS KARET ALAM DAN PROSPEK EKONOMINYA UNTUK BAHAN BAKU CAT TEMBOK EMULSI	Rp 212.790.000
39	DEWI FORTUNAAYU	0014127601	Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi	APLIKASI EDIBLE COATING ANTIOKSIDAN DAN PENDUGAAN UMUR SIMPAN IKAN PATIN ASAP MENGGUNAKAN METODE AKSELERASI SEBAGAI PRODUK UNGGULAN LOKAL PROVINSI RIAU	Rp 157.820.000
40	ENNI SAVITRI	0015107309	Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi	INOVASI TATA KELOLA DANA DESA MASA PANDEMI COVID-19 DAN PENDAMPINGAN SISTEM KEUANGAN DESA	Rp 226.260.000
41	EVI SURYAWATI	0027046404	Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi	PENGEMBANGAN SUMBER BELAJAR MANDIRI PADA WEBSITE GOPROFTEACH BERBASIS METAKOGNITIF UNTUK Penguatan REFLECTIVE JUDGMENT PENDIDIK	Rp 133.550.000
42	EVY ROSSI	0029096201	Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi	PENGEMBANGAN PRODUKSI PROBIOTIK HALAL BERBASIS BAHAN BAKU LOKAL UNTUK PANGAN FUNGSIONAL	Rp 142.170.000

NO	NAMA	NIDN	SKEMA	JUDUL	DANA DISETUJUI TAHUN 2021
43	FELIATRA	0002086301	Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi	PERODUKSI PROTEIN SEL TUNGGAL DARI BAKTERI BACILLUS CEREUS SEBAGAI SUMBER PROTEIN PENGGANTI PADA PAKAN IKAN BUDIDAYA	Rp 215.153.000
44	JUANDI	0026036802	Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi	INOVASI TEKNOLOGI PASCA PANEN BERBASIS ENERGI LIMBAH BIOMASSA DENGAN MENGGUNAKAN SISTIM TELECONTROL INTERNET OF THINGS	Rp 143.540.000
45	NENI HERMITA	0027028404	Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi	PENGEMBANGAN MODEL HYBRID LEARNING BERBASIS SISTEM AMONG (HLBSA) UNTUK MENINGKATKAN LITERASI DIGITAL DAN 5C (CRITICAL THINKING, COMMUNICATION, COLLABORATION, CREATIVITY, AND CHARACTER) SISWA SEKOLAH DASAR	Rp 168.000.000
46	RITA KURNIA	0025046714	Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi	PENGEMBANGAN MEDIA TEKNOLOGI BERBASIS MEKATRONIK SEBAGAI ALAT PERAGA PEMBELAJARAN PAUD	Rp 75.390.000
47	SAKTIOTO	0030107002	Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi	VIBRASI SERAT KISI BRAGG DALAM PENENTUAN KARAKTERISTIK LAJU PERNAFASAN UNTUK KORELASI KONDISI KESEHATAN PARU- PARU TERHADAP FUNGSI KONSUMSI OKSIGEN	Rp 338.200.000
48	AMUN AMRI	0031017205	World Class Research	STRUKTURAL DAN KINETIKA PEMBENTUKAN KOATING KATODA LITHIUM IRON POSPHATE - GRAPHENE NANOSHEETS (LIFEPO4 - GNSS) YANG DISINTESA DENGAN PROSES SOL-GEL	Rp 151.130.000
49	EDY SAPUTRA	0029017302	World Class Research	REKAYASA SITESIS DAN APLIKASI NANO MATERIAL KATALIS UNTUK PRODUKSI BIO-SOLAR	Rp 136.340.000
50	ERMAN TAER	0023097102	World Class Research	SUPERKAPASITOR DENGAN RAPAT ENERGI DAN DAYA TINGGI : OPTIMALISASI PROSES PENYEDIAAN ELEKTRODA	Rp 179.549.000
51	EVELYN	0014037504	World Class Research	PEMBUATAN DISSOLVING PULP DARI LIMBAH AGRO INDUSTRI MENGGUNAKAN PROSES SODA-ANTRAKUINON YANG RAMAH LINGKUNGAN	Rp 139.535.000
52	MONITA OLIVIA	0013067504	World Class Research	KARAKTERISTIK, DURABILITAS, KINERJA LINGKUNGAN DAN MASA LAYAN BETON GEOPOLIMER HYBRID FABA (FLY ASH BOTTOM ASH) UNTUK MATERIAL INFRASTRUKTUR KINERJA TINGGI PADA LINGKUNGAN GAMBUT	Rp 124.010.000
53	RAKHMAWATIFARMA	0001097002	World Class Research	ELEKTRODA KARBON BERENERGI DAN DAYA TINGGI DARI LIMBAH BIOMASSA TANAMAN PALMAE UNTUK APLIKASI SUPERKAPASITOR	Rp 174.982.000
54	ZUCHRA HELWANI	0024116902	World Class Research	PEMBUATAN BIODIESEL BERBASIS SAWIT YANG MEMILIKI TITIK LELEH RENDAH DAN KESTABILAN OKSIDASI YANG TINGGI SEBAGAI BAHAN BAKAR DI WILAYAH CUACA DINGIN	Rp 112.125.000

**LAPORAN AKHIR PENELITIAN
SKEMA PENUGASAN *WORLD CLASS RESEARCH***



**SUPERKAPASITOR DENGAN RAPAT ENERGI DAN DAYA
TINGGI: OPTIMALISASI PROSES PENYEDIAAN ELEKTRODA**

TIM PENELITI

Prof. Dr. Erman Taer, M.Si (0023097102)
Dr. Rika, M.Sc (2022047903)
Dr. Rakhmawati Farma, M.Si (0001097002)

Dibiayai oleh:
Direktorat Sumber Daya
Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi
Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi
Sesuai dengan Kontrak Penelitian
Nomor: 224/AK.04.AM/2021

**UNIVERSITAS RIAU
DESEMBER 2021**

HALAMAN PENGESAHAN PENELITIAN

SKEMA PENELITIAN PENUGASAN *WORLD CLASS RESEARCH*

Judul Penelitian : Superkapasitor dengan Rapat Energi dan Daya Tinggi:
Optimalisasi Proses Penyediaan Elektroda

Peneliti

Nama Lengkap : Prof. Dr. Erman Taer, M.Si
NIDN : 0023097102
Jabatan Fungsional : Guru Besar
Program Studi : Fisika
Nomor HP : 081275214501
Alamat Surel (email) : erman.taer@lecturer.unri.ac.id

Anggota Peneliti (1)
Nama Lengkap : Dr. Rika, M.Sc
NIDN : 2022047903
Perguruan Tinggi : Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau

Anggota Peneliti (2)
Nama Lengkap : Dr. Rakhmawati Farma, M.Si
NIDN : 0001097002
Perguruan Tinggi : Universitas Riau
Institusi Mitra (jika ada) :-
Nama Institusi Mitra :-
Alamat :-
Penanggung Jawab :-
Tahun Pelaksanaan : Tahun ke 1 dari rencana 3 tahun
Biaya Tahun Berjalan : Rp. 179.549.000,-
Biaya Keseluruhan : Rp. 534.597.000,-


Pekanbaru, 24 November 2021

Mengesahkan:
Dekan FMIPA Universitas Riau



Dr. Syamsudhuha, M.Sc
NIP. 19630512 198903 1 002

Ketua Peneliti,



Prof. Dr. Erman Taer, M.Si
NIP. 19710923 199512 1 002

Menyetujui:
Ketua LPPM Universitas Riau

Prof. Dr. Almasdi Syahza, SE., MP
NIP. 19600822 199002 1 002

RINGKASAN PENELITIAN

Energi dan daya merupakan parameter kunci performansi untuk setiap piranti penyimpanan energi seperti: superkapasitor atau yang dikenal juga sebagai *electrochemical double layer capacitor* (EDLC). Elektroda karbon dengan luas permukaan yang tinggi sangat mempengaruhi proses penyimpanan energi yang dihasilkan melalui pembentukan pasangan ion-electron di bidang batas elektroda dan elektrolit didalam pori-pori mikro elektroda. Semakin banyak pasangan ion-elektron yang terbentuk semakin tinggi energi yang dapat disimpan. Sedangkan daya dipengaruhi oleh laju aliran ion saat berdifusi kedalam pori-pori elektroda saat pembentukan pasangan ion-elektron. Semakin tinggi laju aliran ion semakin tinggi daya yang dihasilkan. Kombinasi energi dan daya tentunya secara sederhana dipengaruhi oleh bentuk struktur matrik dan pori elektroda karbon. Struktur matrik elektroda karbon yang berukuran nano telah banyak diteliti dan menampilan pengaruh positif terhadap energi dan daya yang dihasilkan. Struktur matrik carbon dengan pori makro terkoneksi tiga dimensi menjamin aliran difusi elektrolit dan ion merata ke segala arah dan menjamin penyimpanan energi dan daya yang unggul. Selain itu struktur matrik karbon berupa serat fiber berskala nano juga menjanjikan terciptanya energi dan daya yang tinggi. Serat fiber menghasilkan kombinasi pori mikro dan meso yang dominan dan konduktivitas elektron yang tinggi. Bahan biomassa merupakan bahan asal dengan biaya penyediaan yang murah dan tersedia dalam jumlah yang melimpah secara alami tersusun dalam struktur matrik yang bervariasi dalam ukuran mikro dan nanometer. Komponen utama penyusun biomassa terdiri dari selulosa, hemiselulosa dan lignin. Hemiselulosa dan lignin bisanya menjadi pengikat selulosa, variasi proses seperti alkali, ataupun *acidic* dengan satu tahap ataupun beberapa tahap mempengaruhi ikatan hemiselulosa dan lignin terhadap selulosa. Seleksi bahan asal biomassa dan optimasi proses penyediaan meliputi karbonisasi dan aktivasi diharapkan dapat dihasilkannya bentuk maktrik karbon yang unggul dengan luas permukaan yang tinggi. Pengujian elektroda karbon difokuskan pada uji sifat fisika dan uji sifat elektrokimia. Uji sifat fisika meliputi uji tahanan termal, derajat kristalinitas, morfologi permukaan, komposisi unsur kimia, sifat pori dan luar permukaan elektroda. Tinjauan sifat elektrokimia sel superkapasitor meliputi kapasitansi spesifik, rapat energi dan daya pada sel superkapasitor. Berdasarkan hasil dari serangkaian penelitian yang telah dilakukan, untuk sampel dari limbah daun pisang yang disintesis dengan menggunakan variasi suhu aktivasi fisika (700, 800, dan 900 °C), diperoleh karbon dengan struktur pori hirarkis 3D dengan perilaku elektrokimia pada rapat arus 1 A g⁻¹ dalam elektrolit asam dan basa dengan sifat kapasitif sebesar 245 F g⁻¹ dan 211 F g⁻¹ serta dengan energi spesifik yang sangat baik untuk 34,67 Wh kg⁻¹. Elektroda karbon superkapasitor dengan struktur nanofiber/nanosheet karbon berpori berongga yang berasal dari limbah kulit jengkol disintesis melalui aktivasi kimia dan aktivasi fisik dalam pirolisis langsung. Dua agen aktivator yang berbeda, KOH dan ZnCl₂ digunakan untuk meningkatkan keunggulan kinerja elektroda untuk piranti superkapasitor. Lebih lanjut lagi, aktivator KOH menghasilkan morfologi unik dari nanofiber berongga, serta peningkatan sifat porositas yang berhasil dengan peningkatan SSA secara signifikan dari 15 m² g⁻¹, 163 m² g⁻¹ menjadi 1041,900 m² g⁻¹. Sebaliknya, aktivator ZnCl₂ menunjukkan struktur nanosheet yang unik, yang ditingkatkan oleh mikro dan mesopori. Sifat elektrokimia diuji dengan sistem dua elektroda menunjukkan kapasitansi spesifik yang tinggi yaitu 213 F g⁻¹ dengan energi, dan rapat daya masing-masing sebesar 29,6 Wh kg⁻¹, dan 106,6 W kg⁻¹. Sementara itu, untuk sampel elektroda karbon dari kulit bawang merah yang disintesis dengan menggunakan variasi bahan pengaktif (KOH, ZnCl₂ dan NaOH) secara signifikan menghasilkan struktur nano yang berbeda yaitu nanospheres, diikuti oleh nanofibers

dan nanosheets. Kombinasi sifat nanostruktur ini mampu meningkatkan kapasitansi spesifik material sebesar 170 F g^{-1} dalam elektrolit $1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$. Lebih lanjut lagi, bahan karbon berpori 3D berbasis limbah daun pisang dengan *Self-Oxygen doped* disiapkan dengan kombinasi aktivasi kimia dan fisika menggunakan ZnCl_2 dan CO_2 . Karakteristik elektrokimia dievaluasi dalam bentuk pelet menggunakan elektrolit $1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$. Karbon berpori 3D menunjukkan kapasitansi spesifik yang optimum sebesar 401 F g^{-1} pada rapat arus konstan 1 A g^{-1} , dengan energi spesifik dan daya spesifik masing-masing $55,69 \text{ Wh kg}^{-1}$ dan $200,09 \text{ W kg}^{-1}$. Selain itu, karakteristik elektrokimia juga dievaluasi dalam larutan elektrolit 6 M KOH dan diperoleh kapasitansi spesifik 235 F g^{-1} pada rapat arus 1 A g^{-1} .

Kata Kunci: Optimalisasi, Material Karbon, Superkapasitor.

KATA PENGANTAR

Dengan ucapan Alhamdulillah kami ucapkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, karunia serta hidayah-Nya sehingga pelaksanaan kegiatan dan laporan penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik. Penelitian yang berjudul “Superkapasitor dengan Rapat Energi dan Daya Tinggi: Optimalisasi Proses Penyediaan Elektroda” yang didanai oleh DRPM Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi Republik Indonesia Skema Penelitian Penugasan World Class Research Tahun Pertama dari 3 Tahun pelaksanaan dengan nomor kontrak: 1393/UN.19.5.1.3/PT.01.03/2021.

Pelaksanaan kegiatan penelitian ini, kami mendapat bantuan dari berbagai pihak dan kami mengucapkan terima kasih kepada Rektor Universitas Riau dan Ketua Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat karena telah memberikan dukungan dana penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Agustino, M.Si sebagai pembantu peneliti pada penelitian ini, dan juga kepada Mahasiswa/i yang telah berperan dalam pelaksanaan kegiatan penelitian ini.

Akhirnya, semoga hasil penelitian ini dapat berguna dalam perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi untuk saat ini dan di masa yang akan datang.

Pekanbaru, November 2021

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
RINGKASAN PENELITIAN.....	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan.....	2
1.3 Tujuan Khusus.....	2
1.4 Urgensi Penelitian	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Superkapasitor.....	3
2.2 Sintesis Strukur Karbon Unggul sebagai Elektroda Superkapasitor Berbasis Limbah Biomassa	4
2.3 Peta Jalan/Road Map Penelitian.....	5
BAB III METODE PENELITIAN	8
3.1 Metode.....	8
3.2 Penelitian Terdahulu	8
3.3 Tugas masing-masing anggota Peneliti.....	9
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	11
4.1 Karbon Aktif Dengan Struktur Mikro-Mesopori Sebagai Elektroda Karbon Superkapasitor Elektroda Dari Limbah Daun Pisang	11
4.1.1 Analisis densitas	11
4.1.2 Analisis karakteristik struktur mikro	12
4.1.3 Analisis struktur morfologi.....	14
4.1.4 Analisis elemen sampel	15
4.1.5 Analisis sifat porositas.....	16
4.1.6 Analisis elektrokimia.....	19
4.2 Elektroda Karbon Berbasis Limbah Kulit Jengkol dengan Struktur Nanofiber/Nanosheet Karbon Berpori Berongga untuk Superkapasitor Berkinerja Tinggi	23
4.2.1 Densitas, sifat kristalinitas, fitur morfologis	23
4.2.2 Kandungan kimia dan sifat porositas.....	28
4.2.3 Kinerja elektrokimia	32

4.3 Karbon Aktif <i>Nanosphere</i> dari Limbah Kulit Bawang Merah untuk Meningkatkan Kinerja Superkapasitor	35
4.3.1 Analisis sifat bahan.....	35
4.3.1 Analisis perilaku elektrokimia.....	40
4.4 Superkapasitor Dengan Kapasitif Sangat Tinggi dari Sumber Karbon Berpori 3D Berbasis Biomassa Melalui <i>Self-Oxygen Doped</i>	45
4.4.1 Analisis sifat fisis.....	45
4.4.2 Analisis perilaku elektrokimia.....	53
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	59
5.1 Kesimpulan.....	59
5.2 Saran.....	59
DAFTAR PUSTAKA	60
LAMPIRAN	76

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sebagian besar energi terbarukan disimpan sebagai tenaga listrik. Dengan demikian, ada permintaan besar untuk platform teknis yang dapat diandalkan untuk penyimpanan elektrokimia, termasuk baterai dan superkapasitor elektrokimia (SCs). Secara khusus, SC telah menarik perhatian lebih dari baterai karena laju kemampuan penyimpanan dan stabilitas siklik yang sangat besar dibandingkan dengan baterai. Kemajuan terbaru di SCs dalam hal bahan elektroda dan elektrolit memegang potensi mengisi celah antara baterai dan fuel cel. SC adalah sistem arus pulsa dengan daya spesifik (10.000 W Kg^{-1}) untuk durasi kurang dari 1 menit. Akibatnya, SC dapat digunakan sendiri atau dikombinasikan dengan perangkat penyimpanan energi lain untuk menawarkan peningkatan daya yang lebih efisien dan peningkatan siklus hidup untuk aplikasi seperti kendaraan hybrid, crane, kereta api, dan elevator. Penelitian superkapasitor saat ini ditujukan untuk pengembangan lebih luas dalam teknologi SC yang bertujuan untuk meningkatkan sifat elektrik bahan elektroda. Oleh karena itu, SC adalah piranti yang layak untuk digunakan pada banyak bidang penyimpanan energi.

Kinerja SC dipengaruhi secara signifikan oleh banyak faktor, seperti sifat elektrokimia bahan elektroda, elektrolit yang pilih, dan jendela potensial elektroda. Oleh karena itu, upaya penelitian yang sangat besar telah diarahkan pada pengembangan bahan maju untuk elektroda SC dengan struktur yang sesuai desain untuk memfasilitasi transportasi elektron yang efektif dan difusi ionik. Elektroda karbon merupakan bahan elektroda yang paling banyak diteliti khususnya pada tahun 2018 untuk menemukan struktur elektroda baru untuk meningkatkan kinerja SC [1]. Kajian terkini berfokus pada efisiensi mekanisme penyimpanan SC, memberikan jalur transport ion yang lebih singkat dengan mengembangkan struktur pori dan matrik karbon 3D dalam bahan elektroda yang disesuaikan dengan pilihan elektrolit, pekerjaan yang dilakukan saat ini juga banyak dilakukan dengan pemanfaatan bahan limbah sebagai bahan asal untuk membuat elektroda baru sehingga biaya produksi dapat ditekan serendah mungkin. Besar harapan jika dalam penelitian ini berhasil dilakukan akan ditemui bentuk matrik elektroda karbon unggul dari bahan biomassa yang mampu menyokong terwujudnya superkapasitor dengan energi dan daya tinggi. Hasil ini tentunya dapat di publikasi pada jurnal internasional pada tingkat quartile 1 (Q1) yang merupakan ciri khas penelitian World Class Research (WCR).

1.2 Permasalahan

Permasalahan utama dalam penelitian ini adalah seleksi bahan dan optimalisasi proses penyediaan elektroda karbon dari bahan biomassa untuk mendapatkan matrik karbon yang unggul sehingga mampu memberikan dukungan sifat fisika terhadap sifat elektrokimia saat dikonversi menjadi elektroda dalam sebuah sel guna dihasilkan rapat energi dan daya yang tinggi.

1.3 Tujuan Khusus

Tujuan khusus yang dicapai pada penelitian ini adalah:

- a. Menghasilkan karbon unggul dengan struktur pori 3D dengan kerapatan tinggi.
- b. Membuat dan menghasilkan elektroda karbon dengan luas permukaan optimum
- c. Menghasilkan jalur pembuatan elektroda karbon yang efisien, murah serta ramah lingkungan dalam pengolahan beberapa jenis bahan biomassa.

1.4 Urgensi Penelitian

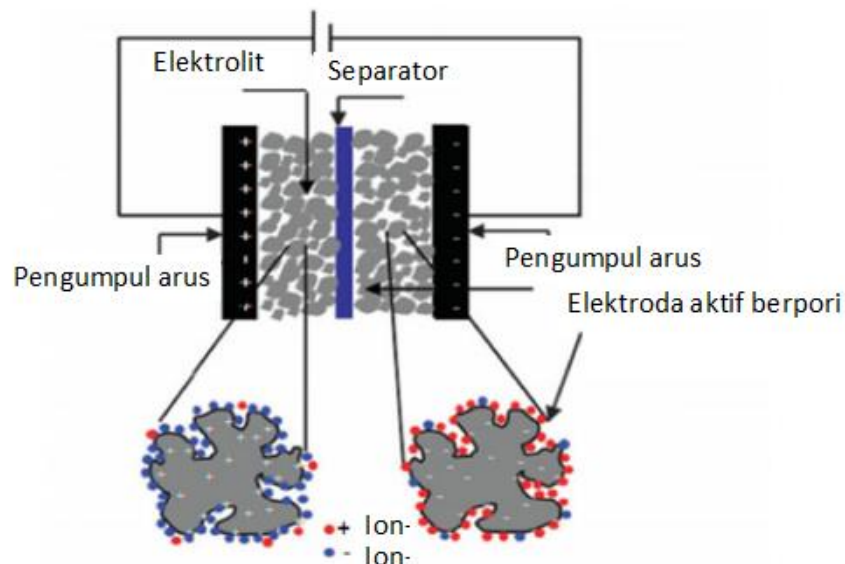
Urgensi penelitian ini adalah:

- a. Menemukan struktur karbon unggul alami pada bahan biomassa sebagai sumber material murah dan multi fungsi.
- b. Menemukan solusi alternatif dalam mengatasi masalah kebutuhan media penyimpan energi yang mampu mentransfer energi dalam waktu yang relatif cepat.
- c. Jalur alternatif yang ditawarkan ini dapat dijadikan sebagai model untuk kegunaan yang lebih luas.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Superkapasitor

Superkapasitor atau kapasitor elektrokimia lapisan ganda adalah salah satu komponen elektronika penyimpanan energi listrik dengan rapat energi dan daya tinggi. Berbeda dengan kapasitor konvensional, superkapasitor memiliki kapasitansi mencapai 10^6 hingga 10^9 kali lipat [2]. Superkapasitor memiliki keseimbangan energi dan daya listrik yang disimpan dengan siklus hidup relatif lama [3]. Penyimpanan energi pada superkapasitor memanfaatkan lapisan ganda untuk membentuk pasangan ion dan elektron pada bidang batas elektrolit dan elektroda.



Gambar 2.1. Susunan elektroda superkapasitor

Perbedaan utama superkapasitor dengan kapasitor konvensional adalah pada struktur penyusunnya. Superkapasitor tersusun atas elektroda yang terbuat dari karbon, muatan-muatan listrik terkumpul pada permukaan elektroda tersebut. Keunggulan ini menjadikan superkapasitor dapat diaplikasikan diberbagai bidang seperti militer, medis, komunikasi hingga komponen elektronik berdaya rendah seperti pada printer atau konsol game. Kapasitansi superkapasitor dapat dihitung menggunakan persamaan (1).

$$\frac{C}{A} = \frac{\epsilon}{4\pi\delta} \quad (1)$$

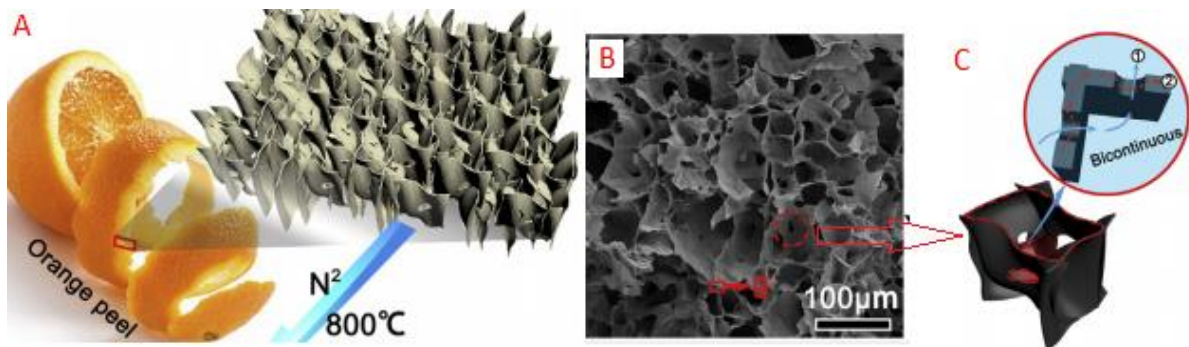
Energi spesifik (Wh Kg^{-1}) dan daya spesifik (W Kg^{-1}) dapat ditentukan menggunakan persamaan 2 dan 3 [4–6].

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

$$P = \frac{E}{\Delta t} \quad (3)$$

2.2 Sintesis Strukur Karbon Unggul sebagai Elektroda Superkapasitor Berbasis Limbah Biomassa

Sintesis material karbon unggul meliputi dengan struktur pori tiga dimensi memberikan keuntungan pada proses difusi ion yang baik dari limbah biomassa sebagai aplikasi elektroda karbon menjadi fokus pada penelitian ini. Contoh struktur karbon unggul dari bahan biomassa kulit jeruk dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2.2. Sintesis karbon 3D, (a) Kulit jeruk sebagai bahan asal, (b) Hasil SEM dan (c) Ilustrasi 3D yang menjamin proses difusi ion dalam elektroda akan baik [7].

Beberapa peneliti sebelumnya telah melaporkan sintesis elektroda karbon dari bahan biomassa juga menunjukkan performansi kapasitor yang unggul. Hasil review yang kami lakukan khususnya tentang kinerja superkapasitor terkait dengan luas permukaan BET (S_{BET}), kapasitansi spesifik (C_{sp}) Rapat Energi (E_s) dan rapat daya (P_s) yang berasal dari bahan biomassa dan dapat dipublikasi pada jurnal *Quartil 1* pada tahun 2019 ditampilkan pada Tabel 1. Secara rinci, Tabel 1 menampilkan berbagai kinerja elektroda superkapasitor dari berbagai macam bahan biomassa. S_{BET} , C_{sp} , E_s dan P_s dikumpulkan dan telah dibuat rentang nilai dimana masing masing berada pada $526-2385 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, $135-420 \text{ F g}^{-1}$, $9,55-45,9 \text{ Wh kg}^{-1}$ dan $221-588,3 \text{ W kg}^{-1}$. Performasi superkapasitor yang telah kami hasilkan sebenarnya telah berada pada rentang diatas, seperti elektroda superkapasitor dari daun jati, $C_{sp} 280 \text{ F g}^{-1}$ [8] dan elektroda superkapasitor dari rumput rija-rija $C_{sp} 294 \text{ F g}^{-1}$, (paper dalam tahap submit pada Jurnal *Advanced Powder Technology*). Optimalisasi yang dilakukan pada proses penyediaan elektroda superkapasitor dan didukung oleh kekayaan jenis biomassa yang ada di Indonesia diharapkan akan dapat ditemukan struktur elektroda karbon unggul sehingga menghasilkan sel

superkapasitor dengan kerapatan energi dan daya yang tinggi, dan dapat dipublikasi pada jurnal *Quartil 1*.

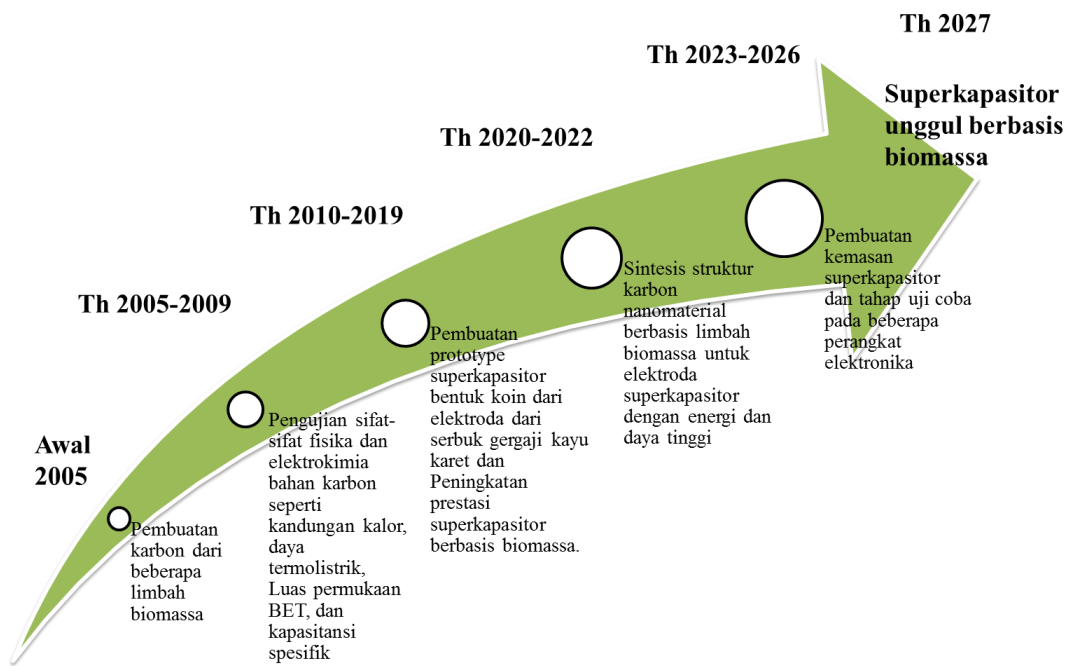
Tabel 1. Kumpulan beberapa tulisan tentang kinerja elektroda superkapasitor dari bahan biomassa yang dapat dipublikasikan pada jurnal internasional *Quartil 1* pada tahun 2019.

Biomassa	S_{BET} ($m^2 g^{-1}$)	C_{sp} ($F g^{-1}$)	E_s ($Wh Kg^{-1}$)	P_s (WKg^{-1})	Nama Jurnal	Ref
Kulit Camellia	526	205	-	-	<i>Journal of Power Sources</i>	[9]
Daun Ginkgo Biloba	835,4	374	45.9	221	<i>Chemical Engineering Science</i>	[10]
Kulit Buah Baobab	-	356	20.86	400	<i>Journal of Colloid and Interface Science</i>	[11]
Kulit Buah Melo	721,91	404	29.30	279.78	<i>Applied Surface Science</i>	[12]
Kulit Jeruk	826	186	-	-	<i>Journal of Colloid and Interface Science</i>	[7]
Kacang	2131	390	20,4	827	<i>Journal of Colloid and Interface Science</i>	[13]
Daun Teh	911,92	167	19,45	33.494,7	<i>Applied Surface Science</i>	[14]
Kelapa	2385	135	-	-	<i>Journal of Alloys and Compounds</i>	[15]
<i>Wheat Straw</i>	2560	294	14	440	<i>Journal of Alloys and Compounds</i>	[16]
Telur	1572,2	420	-	-	<i>Nano Energy</i>	[17]
<i>Camellia Oleifera</i>	1726	367	9,55	478	<i>Journal of Energy Chemistry</i>	[18]
Kulit kacang	1427,81	247,28	32,7	588,3	<i>Journal of Electroanalytical Chemistry</i>	[19]

2.3 Peta Jalan/Road Map Penelitian

Beberapa hasil penelitian penting yang berkaitan langsung dengan penelitian yang diusulkan saat ini antara lain dikemukakan sebagai berikut: Erman Taer dan kawan-kawan,

sejak tahun 2005 telah melakukan studi awal tentang produksi karbon dari berbagai macam bahan biomassa, seperti kelapa sawit, tempurung kelapa, serbuk gergaji kayu dan lainnya. Bahan karbon yang telah dihasilkan telah dianalisa sifat-sifat fisika dan elektrokimia seperti, kandungan kalor, daya termolistrik, luas permukaan spesifik dan kapasitansi spesifik. Pada awal tahun 2010 peneliti mencoba memanfaatkan bahan karbon yang berasal dari biomassa (serbuk gergaji kayu karet) sebagai elektroda superkapasitor berbentuk monolit dengan modifikasi penambahan platinum nano partikel dengan struktur dwi-lapisan melalui bantuan dana berasal dari skim penelitian hibah bersaing dan skim penelitian fundamental untuk tahun 2010. Pengembangan superkapasitor dengan energi dan daya yang lebih besar dilakukan dalam kegiatan penelitian tahun 2011 s/d 2012. Peneliti mencoba membuat *prototype* superkapasitor dengan kombinasi konsep kapasitas dwi-lapisan dan pseudokapasitan dengan menggunakan komposit elektroda karbon dari serbuk gergaji kayu karet dan *ruthenium* oksida. Penelitian ini didanai melalui skim hibah strategis nasional. Selanjutnya, tahun 2013 s/d 2014 peneliti membangun superkapasitor berasaskan gabungan elektroda dengan pori makro teratur dari kayu karet dan penambahan logam oksida untuk mempersingkat proses produksi elektroda superkapasitor dan kegiatan ini didanai melalui skim hibah kerjasama luar negeri dan publikasi internasional. Pada tahun 2015 s/d 2017 peneliti mencoba mengembangkan elektroda campuran nanokarbon berbasis biomassa sebagai inti elektroda dilapisi metal oksida untuk mendapatkan superkapasitor unggul dengan biaya produksi yang relatif lebih murah. Salah satu cara untuk menekan biaya produksi superkapasitor adalah dengan memilih bahan asal dari bahan limbah. Limbah perkotaan potensial dijadikan bahan asal dan untuk itu pada periode 2017 s/d 2019 dijadikan tema dalam penelitian yang diusulkan pada hibah penelitian fundamental. Pengembangan lebih lanjut terhadap material karbon yang digunakan dianggap perlu oleh penulis demi mencapai target energi dan daya yang tinggi terhadap elektroda sel superkapasitor. Berdasarkan pemikiran ini, penulis merasa perlu melakukan optimalisasi pada proses penyediaan elektroda karbon dari bahan biomassa untuk mendapatkan struktur unggul untuk mendukung lebih lanjut performansi sel superkapasitor. Penelitian sintesis optimalisasi penyediaan elektroda karbon superkapasitor dari bahan biomassa direncanakan berhasil baik dalam tiga tahun. Hasil akhir penelitian superkapasitor berbasis bahan biomassa diharapkan mencapai muaranya pada tahun 2026 dan 2027 dengan menciptakan sebuah alat penyimpan energi yang unggul atau sebuah superkapasitor handal. Road-map penelitian secara lengkap dari tahun 2005 sampai 2027 ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 2.3. Peta Jalan penelitian

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

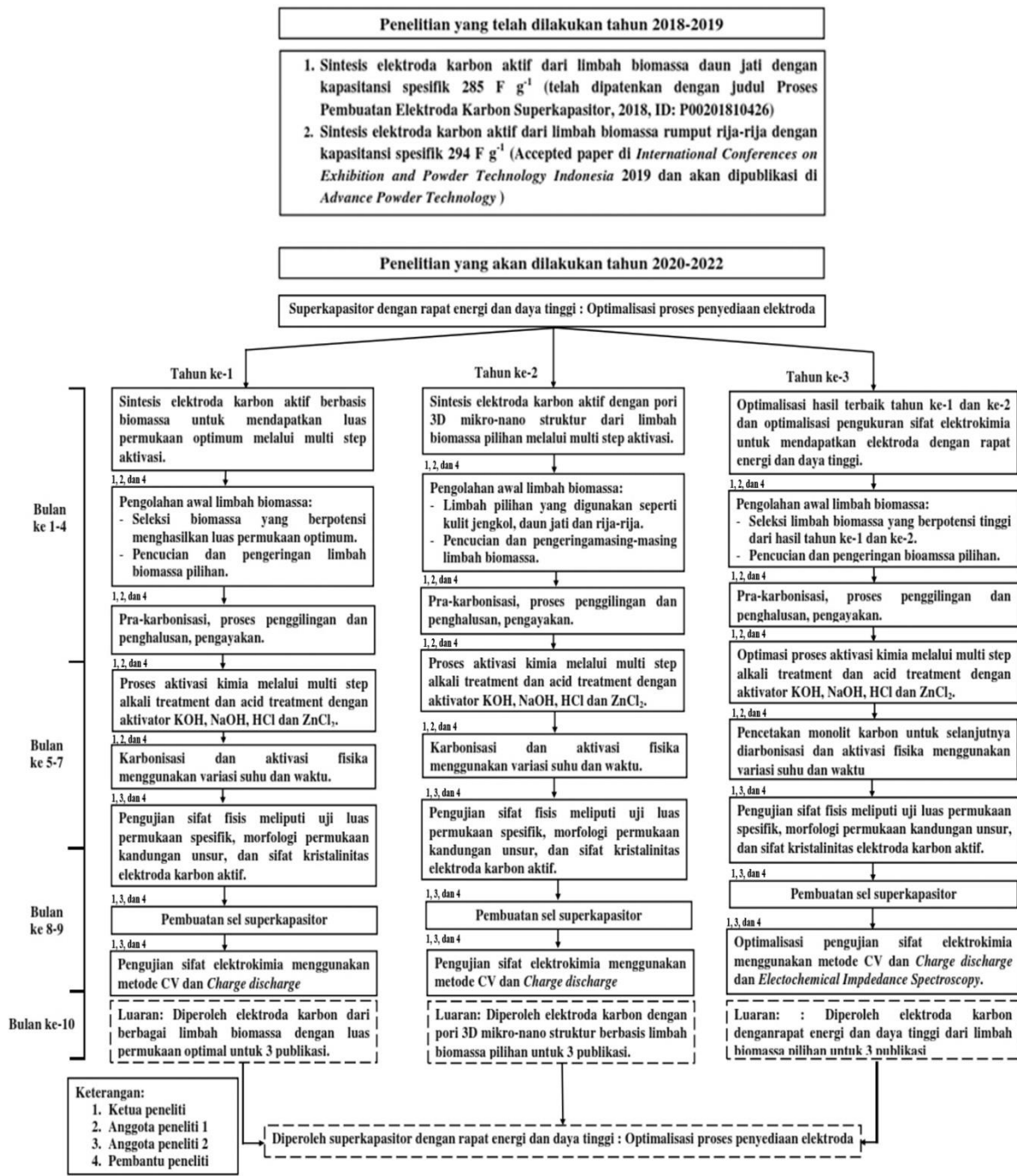
Metode penelitian yang direncanakan selama tiga tahun ini dibagi menjadi tiga bagian berdasarkan kegiatan untuk setiap tahunnya. Penelitian tahun pertama difokuskan menemukan elektroda superkapasitor dengan luas permukaan maksimum pada seleksi bahan biomassa dan kriteria-kriteria alami yang mendukung sebagai bahan dasar untuk sintesis karbon dengan struktur unggul yang diaplikasikan pada elektroda superkapasitor. Pembuatan elektroda karbon diawali dengan meninjau bentuk fisik biomassa yang dipilih. Selanjutnya dilakukan tahapan pra-karbonisasi dan aktivasi untuk meningkatkan luas permukaan nanomaterial. Variasi proses pembuatan elektroda meliputi jenis bahan aktivator, variasi konsentrasi bahan aktivator, variasi suhu karbonisasi dan suhu aktivasi fisika. Tahun kedua difokuskan pada sintesis elektroda karbon unggul dengan luas permukaan tinggi dengan struktur pori 3D dengan variasi alkali treatment dari limbah biomassa. Penelitian tahun ketiga difokuskan pada optimalisasi hasil penelitian tahun pertama dan kedua sehingga didapatkan elektroda karbon dengan struktur pori 3D dan luas permukaan optimum. Diharapkan pada akhir penelitian ini akan diperoleh elektroda karbon dengan struktur pori 3D luas permukaan optimum dan dapat menghasilkan sel superkapasitor dengan kerapatan energi dan daya yang tinggi.

3.2 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu terkait elektroda karbon dengan struktur khusus seperti nanofiber nano fiber berlubang telah dilakukan adalah studi awal sintesis karbon *nanofiber* dari serat batang pisang [20], daun ketapang [21], serat dan mahkota nenas [22] diperoleh kapasitansi spesifik, energi dan daya pada rentang 54-170 F g⁻¹, 5 Wh Kg⁻¹, dan 42 W Kg⁻¹. Studi awal tentang pemanfaatan limbah daun jati sebagai elektroda karbon telah menunjukkan kapasitansi spesifik sel superkapasitor yang tinggi yaitu sebesar 284 F g⁻¹ dan hasil ini telah didaftarkan untuk permintaan paten. Struktur karbon *nanosphere* juga telah berhasil dilakukan studi awal menggunakan bahan biomassa dari limbah rumput rija-rija. Elektroda karbon yang dihasilkan menampilan kapasitansi spesifik, energi dan daya tinggi sebesar 294 F g⁻¹, 10,24 Wh Kg⁻¹ dan 73.87 W Kg⁻¹. Hasil penelitian ini telah diterima dan diseminarkan pada ICePTi 2019 di Solo, Indonesia dan akan diterbitkan pada jurnal internasional *Advance Powder Technology Special Issue (indexed by Scopus, RG Journal Impact: 2,72, H-Index: 45)*.

3.3 Tugas masing-masing anggota Peneliti

Tugas masing-masing anggota peneliti yaitu: (i) Ketua peneliti mengkoordinir jalannya seluruh proses penelitian dan juga menyiapkan draf jurnal untuk publikasi. (ii) Anggota peneliti satu bertanggung jawab mengontrol jalannya penelitian terkait seleksi bahan biomassa dan optimasi alkali treatment pada proses sintesis karbon nanomaterial sebagai elektroda (iii) Anggota peneliti dua bertanggung jawab mengontrol jalannya penelitian terkait karakterisasi material elektroda karbon yang menunjukkan struktur nanomaterial yang jelas berbasis biomassa (iv) Pembantu peneliti bertanggung jawab dalam melakukan tugas harian penelitian di laboratorium. Tugas masing-masing anggota peneliti secara rinci ditampilkan dalam diagram pada Gambar 3.1 berikut.

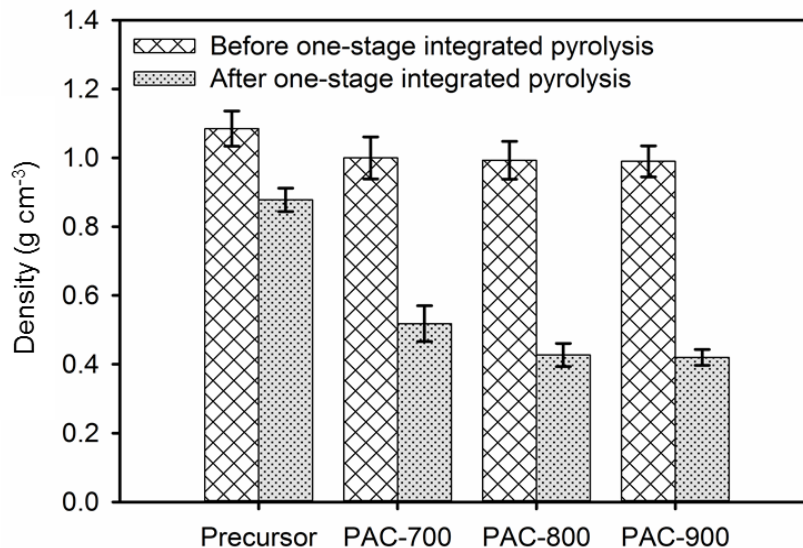


Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karbon Aktif Dengan Struktur Mikro-Mesopori Sebagai Elektroda Karbon Superkapasitor Elektroda Dari Limbah Daun Pisang

4.1.1 Analisis densitas



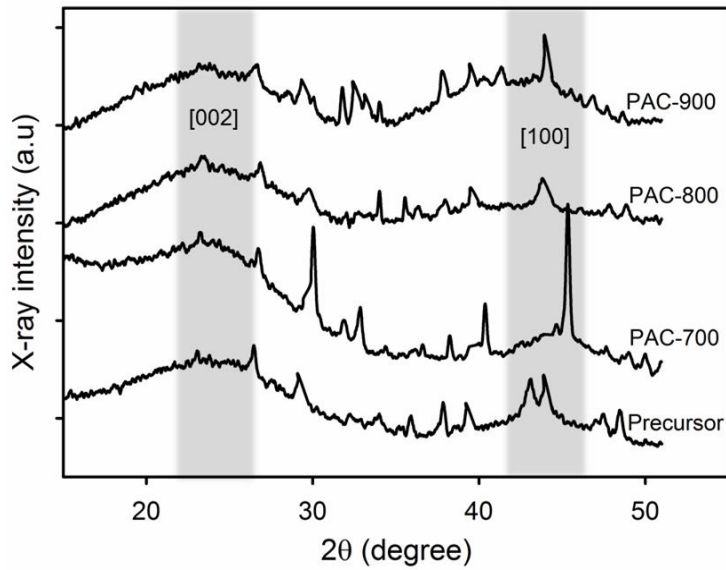
Gambar 4.1. Densitas dari prekursor, PAC-700, PAC-800, dan PAC-900

Perubahan densitas dilakukan untuk mengevaluasi sifat fisika karbon aktif berpori dalam bentuk padat dengan desain pengikat bebas. Proses karbonisasi dan aktivasi fisika pirolisis menyebabkan terjadinya penguapan senyawa non karbon yang bersifat volatil dengan kandungan air yang secara otomatis memperkecil dimensi monolit, meliputi massa, volume, dan densitas. 20 sampel monolit untuk PAC-700, PAC-800, dan PAC-900 ditempatkan ke dalam tabung tungku untuk pirolisis. Proses karbonisasi dari suhu 30 °C hingga 600 °C mereduksi dan menguraikan air, mineral, dan kelembapan, serta semua senyawa kompleks, termasuk hemiselulosa, selulosa, dan lignin [23,24]. Proses ini mengubah prekursor menjadi biochar dengan kemampuan meningkatkan kandungan karbon. Namun, *co-product* karbonisasi berupa tar padat menutupi pori-pori yang telah terbentuk, oleh karena itu perlu dilakukan pengaktifan secara fisika zat tersebut pada suhu tinggi di atmosfer gas CO₂ [25]. Aktivasi fisika dari 600 °C ke suhu yang lebih tinggi cenderung menghilangkan karbonisasi *co-product* yang menutupi pori dan menunjukkan struktur pori yang relatif lebih baik [25,26]. Akibatnya, sampel monolit mengalami penurunan densitas sebelum dan sesudah proses pirolisis berdasarkan suhu aktivasi fisika yang berbeda 700, 800, dan 900 °C ditunjukkan pada Gambar

4.1. Semua sampel menunjukkan penurunan densitas setelah satu- tahapan proses integrasi yang terjadi baik pada karbonisasi maupun aktivasi fisika. Selanjutnya, proses pirolisis secara bertahap mengurangi densitas monolit PAC dari 0,8780, 0,5180, 0,4270 dan 0,4200 g cm⁻³ masing-masing sebesar 18,07%, 47,2%, 56,99% dan 57,57%, menggunakan PAC700, PAC800, dan PAC900. Standar deviasi rata-rata penurunan densitas adalah 0,04.

4.1.2 Analisis karakteristik struktur mikro

Karakteristik struktur mikro sampel PAC dievaluasi lebih lanjut dengan pola difraksi sinar-X (XRD), PAC-700, PAC-800, dan PAC-900, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2. Pola XRD menampilkan dua puncak lebar yang kuat pada skala 2θ oleh sekitar 24.077-25.112° dan 42.461-44.453° (JCPDS No. 41-1487) [27,28]. Derajat ini sesuai dengan refleksi 002, dengan demikian menunjukkan bahan karbon berpori dan keberadaan sejumlah kecil struktur mikrokristalin grafit (100). Karakteristik ini menunjukkan perilaku amorf monolit karbon aktif. Hal ini mirip dengan penelitian lain yang terkait dengan penggunaan kulit durian [29], bunga sakura [30], berbasis kayu [31], dll. Selanjutnya, KOH yang diresapi dan peningkatan suhu aktivasi fisika dipengaruhi oleh dua puncak pelebaran pada 2θ sudut, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Peningkatan suhu aktivasi fisika dari 700 ke 800 °C cenderung memindahkan (002) refleksi ke sudut yang lebih tinggi (24,077° hingga 25,112°) dan (100) ke sudut yang lebih rendah (44,543° hingga 42,461°). Hal ini berspekulasi bahwa adanya kombinasi pori-pori acak kemungkinan mikro atau mesopori [32,33], cenderung meningkatkan situs aktif difusi ion dan meningkatkan kerapatan arus sel superkapasitor. Fitur ini meningkatkan kinerja superkapasitor sampel PAC-800 yang menegaskan adsorpsi/desorpsi gas N₂ dan analisis elektrokimia. Namun, penambahan lebih lanjut dari suhu aktivasi fisika 900 °C mengurangi refleksi ke sudut awal 24,849° dan 43,109°. Selain itu, beberapa puncak tajam juga ditinjau dalam pola XRD, menunjukkan bahwa sampel mengandung beberapa senyawa seperti kristal seperti SiO₂, dan CaCO₃. CaCO₃ diamati pada 37° dan 39° (JCPDS No. 82-1690), sedangkan SiO₂ ditinjau pada 27° dan 29° (JCPDS No. 89-1668). Senyawa ini diekstraksi dari unsur dasar daun pisang, yang dikonfirmasi oleh analisis EDS pada subbagian berikutnya. Kandungan Oksigen dalam senyawa oksida berkontribusi pada kapasitansi semu faradaik dalam perilaku elektrokimia yang berkorelasi dengan analisis voltametri siklik.



Gambar 4.2. Pola XRD dari prekursor, PAC-700, PAC-800, dan PAC-900

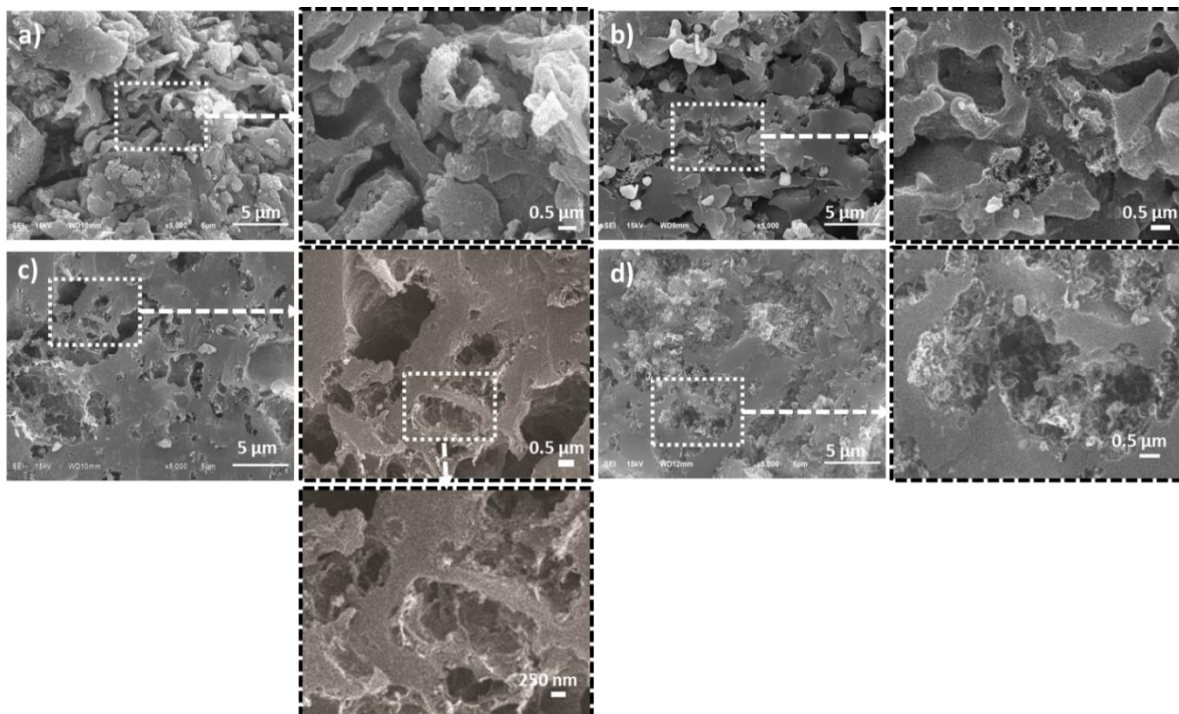
Jarak antar lapisan (d_{002} dan d_{100}) dan dimensi mikrokristalin (L_c dan L_a) dari prekursor, PAC-700, PAC-800, dan PAC-900, dievaluasi menggunakan Hukum Bragg dan persamaan Debye-Scherrer seperti yang dirangkum dalam Tabel 4.1. Nilai d_{002} dan d_{100} normal untuk karbon aktif berpori dan mirip dengan studi pendahuluan. d_{002} menunjukkan nilai sekitar 3,693 hingga 3,515 , dengan peningkatan sekitar 10-15% dibandingkan dengan struktur grafit biasa [34,35]. d_{002} terendah dan tertinggi diamati pada sampel PAC-800 sebesar 3,5 dan prekursor. Selain itu, d_{100} mewakili nilai normal untuk karbon berbasis biomassa [36]. Mikrokristalin L_c dan L_a berhubungan dengan mikroporositas dan luas permukaan spesifik sampel. Menurut studi pendahuluan, L_c yang lebih rendah diperlukan untuk pembentukan luas permukaan yang tinggi. Hubungan mikrokristalin dengan luas permukaan elektroda teraktivasi diberikan oleh rumus empiris $SSA=2/\rho_{xrd}L_c$ di mana $xrd = [d_{002}(\text{grafit})/d_{002}(\text{sampel})] \cdot \rho(\text{grafit})$ dengan $d_{002}(\text{grafit})$ dan $\rho(\text{grafit})$ nilai 0,33354 nm dan 2,268 g cm⁻³ [37,38]. Dalam rumus empiris ini, PAC-800 memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi yang meningkatkan kinerja superkapasitor elektrokimia.

Tabel 4.1. Jarak antar lapisan (d_{002} dan d_{100}) dan dimensi mikrokristalin (L_c dan L_a) dari prekursor, PAC-700, PAC-800, dan PAC-900

Sampel	$2\theta_{002}$ (°)	$2\theta_{100}$ (°)	d_{002} (Å)	d_{100} (Å)	L_c (Å)	L_a (Å)
Prekursor	24,077	44,543	3,693	2,032	13,263	16,171
PAC-700	24,468	43,341	3,635	2,086	8,473	30,977
PAC-800	25,112	42,461	3,515	2,127	7,393	31,536
PAC-900	24,049	43,109	3,617	2,096	8,406	29,182

4.1.3 Analisis struktur morfologi

Struktur morfologi karbon aktif limbah daun pisang menggunakan suhu aktivasi fisika yang berbeda dilakukan dengan analisis *scanning electron microscopy* (SEM), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3. Hasil penelitian menunjukkan bahwa karbon daun pisang tanpa perlakuan aktivasi kimia menampilkan struktur yang mempertahankan berbasis selulosa asli ditandai dengan morfologi seperti batang [39,40]. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3a, tidak ada makro-mesopori yang ditemukan pada permukaan sampel morfologi prekursor ini. Setelah melakukan aktivasi KOH dan proses pirolisis terintegrasi satu langkah, termasuk karbonisasi N₂ dan aktivasi fisika CO₂, sampel menunjukkan mikrograf SEM yang berubah secara dramatis pada suhu aktivasi fisika yang berbeda 700, 800, dan 900 °C. Impregnasi KOH membantu pembentukan saluran makropori dan fragmen karbon yang rusak, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3b-3d. Selanjutnya diperlukan karbonisasi dan aktivasi fisika untuk membentuk pori makro, meso dan mikro. Gambar 4.3b menunjukkan mikrograf SEM dari PAC-700, yang mempertahankan struktur seperti batang dengan permukaan datar. Namun, sampel ini telah menunjukkan beberapa formasi makropori yang saling berhubungan dan struktur berpori seperti keju pada permukaan monolit seperti yang ditunjukkan pada perbesaran SEM PAC-700. Rata-rata ukuran pori yang diperoleh berada pada kisaran 397-130 nm.



Gambar 4.3. Gambar SEM dari (a) prekursor, (b) PAC-700, (c) PAC-800, dan (d) PAC-900

Selain itu, sampel PAC-800 menunjukkan struktur pori yang relatif lebih mirip keju dan menutupi hampir setengah permukaan sampel dibandingkan dengan PAC-700, yang

dikonfirmasi oleh Gambar 4.3c. Selain itu, struktur makro dan mesopori terlihat jelas pada material karbon berpori. Ukuran pori makro yang diperoleh berada pada kisaran 187-59 nm. Selanjutnya, peningkatan suhu aktivasi fisika dari 700 menjadi 800 °C cenderung membuat matriks karbon yang telah diukir oleh KOH dan kerangka seluruh struktur menjadi rapuh sehingga diperoleh pembentukan mikro dan mesopori. Menariknya, PAC-800 juga menampilkan makro dan mesopori 3D seperti yang dikonfirmasi dalam gambar resolusi tinggi. Ini disebabkan oleh keruntuhan makropori setelah pirolisis, yang secara mengejutkan mengarah pada pembentukan mesopori. Struktur pori ini mempercepat difusi ion dan memastikan kinerja elektrokimia yang baik. Selanjutnya, efek sinergis pori-pori gabungan tiga dimensi meningkatkan sifat elektrokimia karbon aktif dibandingkan dengan bahan yang hanya memiliki pori-pori meso dan makro. Kapilaritas pori-pori menyediakan saluran dan ruang resistansi rendah untuk ion elektrolit. Sementara itu, kerangka interkoneksi yang terdiri dari sejumlah besar mesopori dan makropori pada karbon aktif memperpendek jalur migrasi ion pada permukaan berpori karbon elektroda, sehingga meningkatkan daya spesifik elektroda superkapasitor secara bersamaan [41,42]. Gambar 4.3d menunjukkan bahwa mikrograf SEM PAC-900 adalah struktur morfologi seperti keju yang mirip dengan yang sebelumnya. Namun, pori-pori makro dan mesopori terdistribusi secara merata menutupi hampir seluruh tampilan PAC-900. Selanjutnya, peningkatan suhu aktivasi fisika dari 800 ke 900 °C menunjukkan bahwa pori-pori makro terdistribusi secara merata di seluruh permukaan. Ini berarti bahwa selama aktivasi fisika tinggi 900 °C, mesopori menerobos dinding tipis antara makropori, mengubah struktur makropori seperti sarang lebah menjadi tiga dimensi, seperti yang ditunjukkan pada mikrograf SEM dari PAC-900. Selain itu, retaknya dinding pori ini juga menyebabkan terbentuknya pori mikro di permukaan akibat resolusi tinggi dari SEM PAC-900. Sebagai perbandingan, struktur morfologi yang diperoleh pada karbon aktif daun pisang hampir sama dengan beberapa penelitian sebelumnya yang juga menunjukkan struktur morfologi yang hampir sama.

4.1.4 Analisis elemen sampel

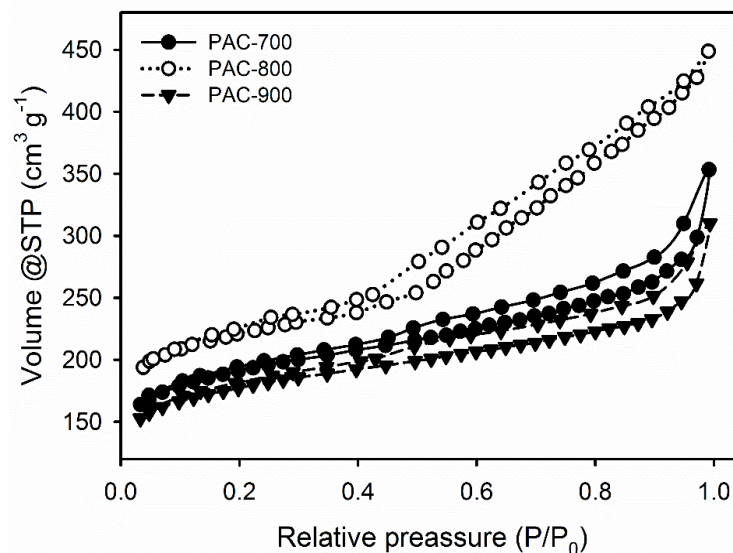
Analisis EDS dilakukan untuk mengkonfirmasi status unsur pada permukaan sampel PAC, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.2. Dengan meningkatnya suhu aktivasi fisika, kandungan karbon (C) untuk prekursor, PAC-700, dan PAC-800 meningkat secara bertahap dari 73,09% menjadi 86,52%. Selain itu, setiap sampel menunjukkan penurunan drastis kadar oksigen (O), kalsium (Ca), Silikon (Si), dan Kalium (K). Hal ini disebabkan oleh dekomposisi senyawa kompleks yang tidak sempurna yang disebabkan oleh proses karbonisasi dan aktivasi

fisika yang lebih kuat pada suhu yang berbeda. Selanjutnya, unsur heteroatom ini merupakan kontribusi dari unsur-unsur dasar yang ada pada setiap limbah biomassa, termasuk daun pisang [43,44]. Selain itu, KOH yang diresapi pada sampel terdiri dari heteroatom, yang memecah semua elemen yang melekat. Peningkatan unsur C dan penurunan heteroatom dalam sampel mendukung sifat elektrokimia yang lebih baik untuk bahan elektroda superkapasitor [45]. Perilaku ini juga berkontribusi pada kapasitif tertinggi di PAC-800, yang dibahas dalam subbagian berikutnya dari sifat elektrokimia. Namun, suhu aktivasi fisika di atas 800 °C hingga 900 °C diperoleh pada elemen C, yang rendah pada 80,22%. Laju ini disebabkan oleh etsa yang lebih tinggi dari elemen C dan menghasilkan oksida dalam sampel, yang diperkuat dengan penambahan O dalam sampel PAC-900. Ketika elemen O meningkat karena proses etsa dan oksidasi, kandungan relatif elemen C secara bertahap menurun.

Tabel 4.2. Kandungan elemental pada permukaan sampel PACs

Sampel	Kandungan unsur				
	C (%)	O (%)	Ca (%)	Si (%)	K (%)
Prekursor	73,09	16,68	7,22	2,49	0,52
PAC-700	81,97	13,88	2,80	1,12	0,23
PAC-800	86,52	11,25	1,35	0,88	0,00
PAC-900	80,22	16,41	2,43	0,62	0,31

4.1.5 Analisis sifat porositas



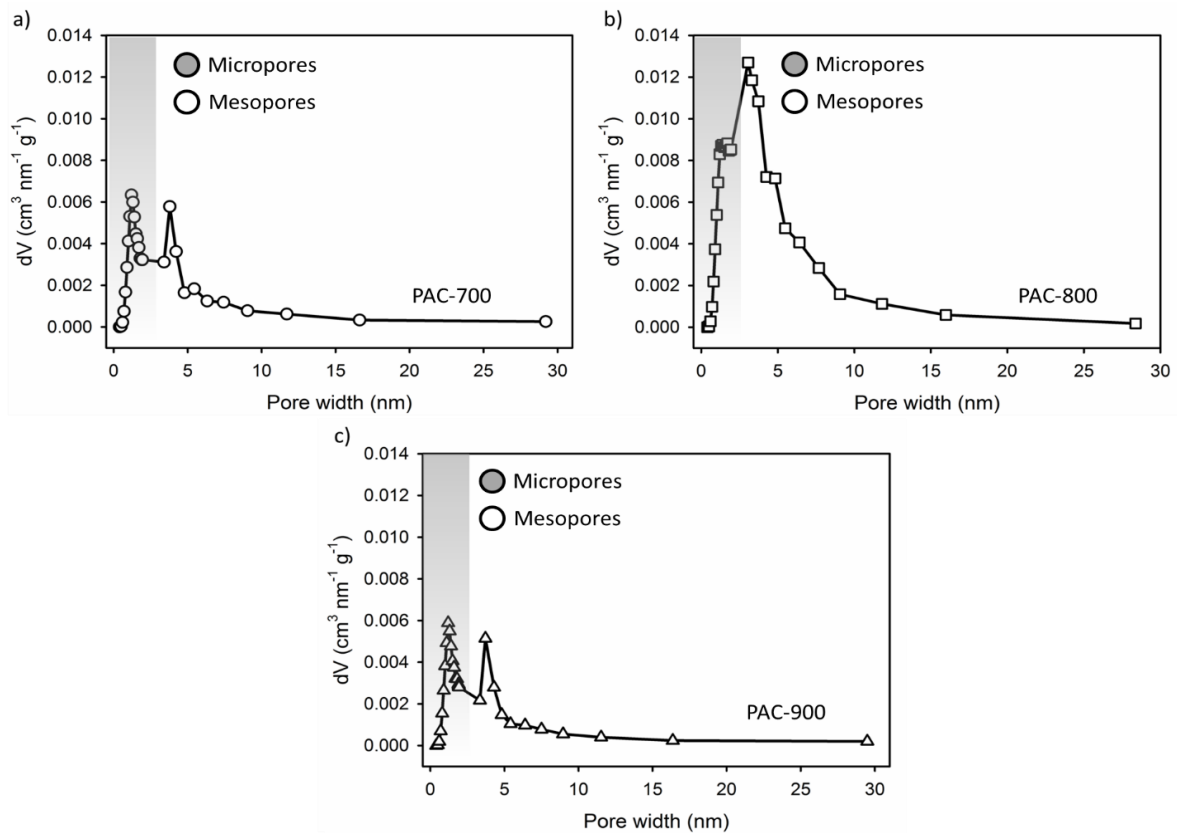
Gambar 4.4. Isoterm adsorpsi/desorpsi Nitrogen dari (a) PAC-700, (b) PAC-800, dan (c) PAC-900

Luas permukaan spesifik dan distribusi ukuran pori merupakan faktor penting yang mempengaruhi kinerja elektrokimia bahan elektroda untuk perangkat penyimpanan energi.

Oleh karena itu, karakteristik porositas daun pisang dari bahan karbon aktif yang diperoleh diteliti lebih lanjut menggunakan gas nitrogen adsorpsi/desorpsi isoterm suhu rendah. Selanjutnya, berdasarkan klasifikasi IUPAC, profil adsorpsi N₂ untuk semua sampel dilakukan loop histeresis tipe IV dan tipe H4 [46,47], seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4. Pada tekanan relatif rendah $P/P_0 < 0,2$, adsorpsi N₂ tinggi dan saturasi ditemukan, yang mengkonfirmasi struktur kaya mikropori di bawah 2 nm, sementara histeresis loop pada $0,4 < P/P_0 < 0,91$ membuktikan adanya mesopori yang baik (2-50 nm) [48,49]. Selanjutnya, peningkatan puncak penyerapan pada tekanan relatif tinggi $P/P_0 > 0,92$ menegaskan adanya makroporositas di atas 50 nm dalam sampel [50]. Hal ini sesuai dengan morfologi permukaan yang ditunjukkan pada gambar SEM, yang menunjukkan kombinasi mikro/meso/makropori pada sampel. Semua parameter porositas dirangkum secara rinci dalam Tabel 4.3. Peningkatan suhu pirolisis dari 700 °C menjadi 800 °C menyebabkan peningkatan luas permukaan spesifik dari 589.017 m² g⁻¹ dalam sampel PAC-700 menjadi 623.491 m² g⁻¹ di PAC-800 serta sampel penyerapan volume total. Menariknya, profil adsorpsi N₂ dalam sampel PAC-800 menunjukkan peningkatan tajam yang hampir linier pada kisaran tekanan $0,51 < P/P_0 < 0,91$, sehingga menunjukkan bahwa mesoporositas yang berkembang dengan baik dan distribusi ukuran pori sampel didominasi oleh tipe sub-mesoporous [50]. Hal ini telah dikonfirmasi pada Tabel 4.3 dengan meningkatkan diameter pori rata-rata dari 3,71 menjadi 4,45 nm. Hal ini membuktikan bahwa impregnasi KOH pada suhu tinggi memiliki kemampuan untuk memperbesar pori-pori sampel sehingga menghasilkan kombinasi yang lebih beragam. Perilaku ini sangat penting dalam proses difusi ion pada elektroda superkapasitor. Selanjutnya, menaikkan suhu pirolisis hingga 900 °C mengurangi luas permukaan BET menjadi 546.121 m² g⁻¹, seperti yang ditunjukkan pada sampel PAC-900. Hal ini disebabkan oleh penguapan mineral dan garam yang mengikis dinding pori secara terus menerus selama proses pirolisis [51].

Distribusi ukuran pori sampel dievaluasi menggunakan metode BJH, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5. Secara keseluruhan, semua sampel menunjukkan mikro-mesoporous pada kisaran 0,31 nm hingga 30 nm, sehingga mengkonfirmasi bahwa karbon aktif daun pisang berhasil dalam memberikan pembentukan struktur berpori hierarkis pada kisaran diameter rata-rata 3,51-4,45 nm. PAC-700 menunjukkan distribusi pori yang bervariasi dengan volume penyerapan tertinggi ditunjukkan oleh mikropori dan berspekulasi keberadaan mikropori yang relatif dominan. Selanjutnya, impregnasi KOH pada suhu 800 °C berhasil menunjukkan sifat mesoporositas yang baik dengan distribusi ukuran pori yang dominan sebesar 4,45 nm. Karakteristik tersebut membuktikan bahwa KOH sangat membantu dalam

pembentukan berbagai struktur pori, terutama struktur mikro dan mesopori pada suhu 800 °C. Namun, pada suhu yang relatif lebih tinggi 900 °C, itu menunjukkan distribusi pori yang sedikit lebih kecil dan mendominasi pada 1,9 nm, yang mengkonfirmasi struktur berpori hierarkis 3D yang meningkat secara signifikan. Selanjutnya, struktur pori 3D dengan kombinasi hierarki mikro-mesoporus secara signifikan menentukan kinerja tinggi bahan elektroda superkapasitor. Mikropori memainkan peran penting dalam menyediakan area permukaan yang tinggi yang mengarah pada pembentukan beberapa lapisan ganda listrik, sementara mesopori cenderung mempromosikan jalur transfer ion yang relatif luas. Kombinasi dari dua perilaku ini menunjukkan sifat elektrokimia yang luar biasa dalam perangkat penyimpanan energi [41,52].



Gambar 4.5. Distribusi ukuran pori dari (a) PAC-700, (b) PAC-800, dan (c) PAC-900

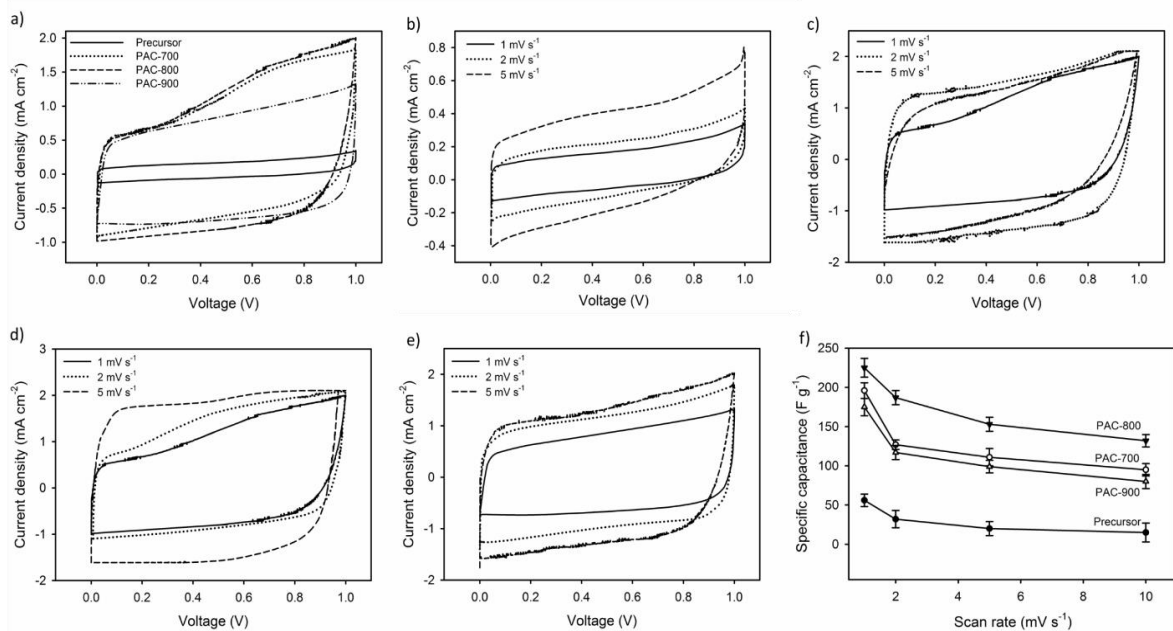
Sebagai perbandingan, Tabel 4.3 menunjukkan luas permukaan spesifik dari prekursor biomassa untuk karbon berpori sebagai bahan elektroda.

Tabel 4.3. Sifat Porositas dari PAC-700, PAC-800, and PAC-900

Sampel	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)
PAC-700	589,017	329,677	259,340	0,5465	0,2695	0,277	3,71
PAC-800	623,491	333,993	289,498	0,6941	0,1971	0,497	4,45
PAC-900	546,121	336,00	210,121	0,4795	0,180	0,2995	3,51

4.1.6 Analisis elektrokimia

Analisis mendalam tentang sifat elektrokimia monolit PAC yang dibuat dari limbah biomassa daun pisang diperlukan untuk optimasi aplikasi elektrokimia. Sifat kapasitif seperti kapasitansi spesifik, energi spesifik, dan daya monolit PAC spesifik dievaluasi menggunakan voltametri siklik dan teknik galvanostatik charge-discharge. Gambar 4.6a menunjukkan kurva voltametri siklik (CV) dari prekursor, PAC700, PAC800, dan PAC900, pada laju pemindaian rendah 1 mV s^{-1} dalam elektrolit berair $1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$. Semua kurva ini dengan jelas menunjukkan area lingkaran persegi panjang yang terdistorsi, dan beberapa kurva menunjukkan puncak besar. Selain itu, ia menunjukkan kinerja kapasitif yang ideal untuk kapasitor lapisan ganda listrik dan disertai dengan karakteristik kapasitansi semu [53,54].



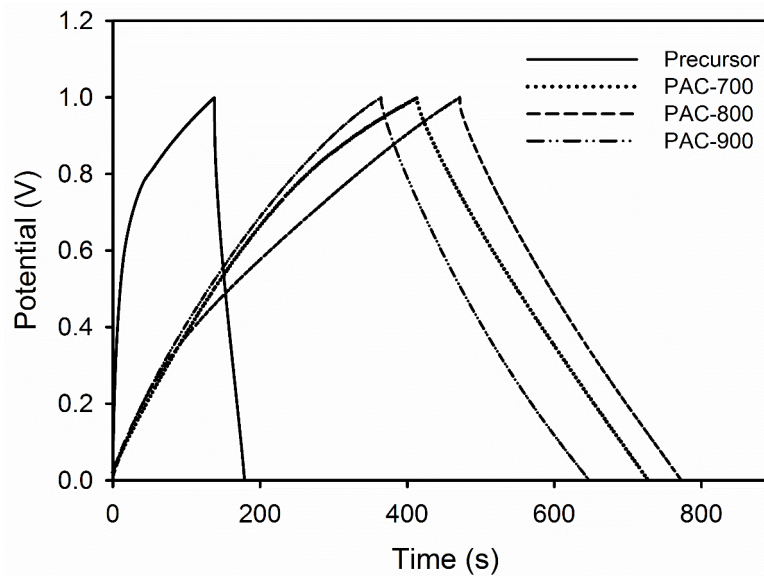
Gambar 4.6. Performansi elektrokimia karbon berpori hirarkis dalam $1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ (a) CV pada scan rate 1 mV s^{-1} , (b) CV dari prekursor pada variasi scan rates, (c) CV dari PAC-700 pada variasi scan rates, (d) CV dari PAC-800 pada variasi scan rates, (e) CV dari PAC-900 pada variasi scan rates, and (f) Kapasitansi spesifik pada variasi scan rates.

Selanjutnya, sampel prekursor menunjukkan kurva CV dengan bentuk persegi panjang yang relatif ideal yang menunjukkan perilaku normal kapasitor listrik lapisan ganda. Sampel PAC700, PAC800, dan PAC900 digunakan untuk melakukan kurva persegi panjang dengan puncak yang lebar, yang mengkonfirmasi kapasitas semu faradaik yang terkait dengan keberadaan gugus fungsi dalam distribusi elemen sampel [55]. Selain itu, puncak pada kurva CV melemah secara signifikan dengan peningkatan suhu aktivasi fisika dari $700 \text{ }^\circ\text{C}$ menjadi $900 \text{ }^\circ\text{C}$, karena pengurangan konten heteroatom, sehingga menyebabkan penurunan sifat

pseudo-kapasitansi. Data EDS yang dijelaskan sebelumnya telah mengkonfirmasi analisis ini. Selain itu, area loop persegi panjang menunjukkan sifat kapasitansi spesifik gravimetri dari PAC monolitik, di mana area tertutup kurva PAC-800 adalah yang terbesar, diikuti oleh PAC700, PAC900, dan prekursor. Kapasitansi spesifik dievaluasi berdasarkan kurva CV dengan persamaan standar 58 F g^{-1} , 196 F g^{-1} , 225 F g^{-1} , dan 175 F g^{-1} . Impregnasi KOH pada suhu pirolisis konstan dalam limbah biomassa daun pisang meningkatkan kapasitansi spesifik secara signifikan $56\text{-}225 \text{ F g}^{-1}$. Hal ini disebabkan adanya perubahan sifat fisika sampel terhadap impregnasi KOH, seperti yang disajikan pada analisis struktur morfologi dan komposisi unsur. Studi sebelumnya mengkonfirmasi bahwa impregnasi KOH membuat struktur morfologi permukaan berpori dan terhubung secara hierarkis satu sama lain untuk meningkatkan status elemen karbon dan dekomposisi heteroatom. Karakteristik ini membantu menyediakan lebih banyak area kontak ionik dan elektroda, sehingga meningkatkan kinerja bahan elektroda menjadi 196 F g^{-1} . Artinya, aktivasi kimia menggunakan KOH berhasil meningkatkan kinerja bahan elektroda dari limbah biomassa, seperti yang dinyatakan dalam penelitian sebelumnya [2,56]. Selanjutnya, peningkatan suhu aktivasi fisika dari $700 \text{ }^\circ \text{C}$ menjadi $800 \text{ }^\circ \text{C}$ secara dramatis meningkatkan kapasitansi spesifik dari 196 menjadi 225 F g^{-1} . Hal ini menunjukkan bahwa suhu aktivasi fisika juga mempengaruhi sifat elektrokimia superkapasitor. Peningkatan suhu aktivasi fisika sampel PAC-700 ke PAC-800 secara signifikan menunjukkan perubahan struktur pori dengan kombinasi tiga dimensi meso-, dan makropori yang berkontribusi untuk menyediakan jalur transfer ion pendek dan laju aliran yang sangat cepat [41,57,58]. Ini menghasilkan sifat elektrokimia yang tinggi di superkapasitor. Selain itu, reduksi heteroatom pada PAC-800 juga berperan dalam meningkatkan kapasitansi spesifik. Peningkatan suhu hingga $900 \text{ }^\circ \text{C}$ sebenarnya menurunkan nilai kapasitansi spesifik hingga 175 F g^{-1} . Artinya pada suhu $900 \text{ }^\circ \text{C}$, karbon aktif merusak struktur fisika, sehingga menurunkan kinerja elektroda, yang analisisnya mirip dengan analisis SEM.

Keempat sampel karbon ini juga dievaluasi pada kecepatan pemindaian yang berbeda dari 1 mV s^{-1} , 2 mV s^{-1} , dan 5 mV s^{-1} , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.6b-e. Kurva CV untuk semua sampel cenderung mempertahankan profil persegi panjang pada laju pemindaian di atas 5 mV s^{-1} , yang menunjukkan sifat kapasitif EDLC yang relatif baik. Selanjutnya, peningkatan suhu aktivasi yang lebih tinggi, dari $700 \text{ }^\circ \text{C}$ ke $900 \text{ }^\circ \text{C}$, menunjukkan bentuk persegi panjang dengan penyimpangan karena kontribusi pseudo-kapasitif kandungan oksigen sampel PAC. Gambar 4.6f menunjukkan bahwa laju pemindaian mempengaruhi kapasitansi spesifik dari elektroda karbon. Oleh karena itu, peningkatan laju pemindaian yang lebih tinggi dari 1 hingga 10 mV s^{-1} mengurangi kapasitansi spesifik semua sampel. Namun,

PAC-800 masih mempertahankan 77,2% dari kapasitansi spesifik awalnya pada kerapatan arus 10 mV s^{-1} , diikuti oleh sampel PAC700 (61,68%), PAC900 (54,05%), dan prekursor (16,07%).

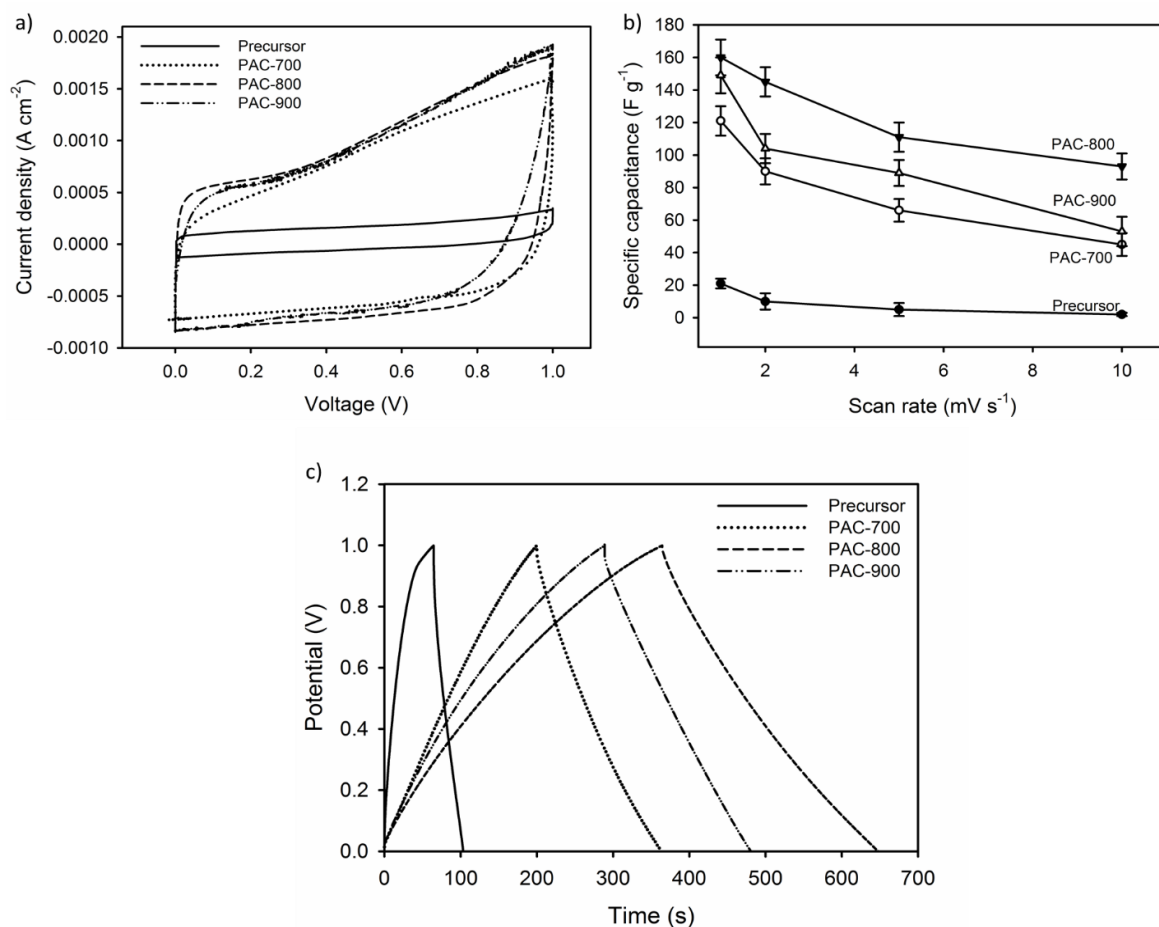


Gambar 4.7. Profil GCD pada rapat arus 1 A g^{-1} dalam $1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$

Selanjutnya, profil *Galvanostatic Charge Discharge* (GCD) dievaluasi untuk lebih mengkonfirmasi sifat elektrokimia elektroda karbon aktif. Gambar 4.7 menunjukkan profil *galvanostatic charge-discharge* (GCD) dari sampel PAC-700, PAC-800, dan PAC-900 pada rapat arus 1 A g^{-1} dengan laju pemindaian 2 mV s^{-1} . Profil GCD menunjukkan bentuk segitiga simetris tidak sempurna dengan karakteristik non-linier yang menunjukkan perilaku EDLC yang menjanjikan dari sampel diikuti oleh reaksi faradaik karena distribusi elemen yang mengandung heteroatom. Kurva CV juga mendukung analisis ini, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.6a. Selain itu, penurunan iR pada profil pelepasan awal bervariasi untuk setiap sampel PAC-700, PAC-800, dan PAC-900 karena hambatan migrasi ion ke dalam pori-pori dan elektroda konduktivitas listrik karbon. Berdasarkan persamaan standar [59], profil GCD menampilkan kapasitansi spesifik elektroda karbon tertinggi sebesar 245 F g^{-1} dengan energi spesifik sebesar $34,67 \text{ Wh kg}^{-1}$ dengan daya maksimum $97,68 \text{ Wh kg}^{-1}$ untuk sampel PAC-800, diikuti oleh PAC-700 dan PAC-900 dengan nilai tinggi masing-masing 211 F g^{-1} dan 192 F g^{-1} . Hasil ini mengkonfirmasi analisis voltametri siklik yang sebelumnya disajikan pada Gambar 4.6a. Anehnya, kinerja elektrokimia tinggi PAC-800 lebih unggul dari sampel lain dan sebanding dengan yang dilaporkan sebelumnya oleh bahan karbon berbasis biomassa, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.4. Sifat fisika yang terkait dengan struktur morfologi menyerupai struktur seperti keju dengan kombinasi 3D mikro, meso-, dan makropori yang terhubung secara hierarkis. Selanjutnya, pori-pori ini secara signifikan berkontribusi untuk

meningkatkan sifat elektrokimia superkapasitor, termasuk kapasitansi, energi, dan daya spesifik.

Selain itu, penurunan ohmik/iR ditinjau secara tiba-tiba pada awal kurva pelepasan, yang terkait dengan resistansi material, konduktivitas listrik, dan difusi ion pori-pori. PAC-700 dan PAC-800 menunjukkan penurunan iR terendah dan tertinggi masing-masing $36 \cdot 10^{-3}$ dan $15 \cdot 10^{-3}$. Perbedaan ini disebabkan oleh struktur pori elektroda. PAC-700 memiliki tingkat mikroporositas tinggi dengan mesopori 41%, sedangkan PAC-800 memiliki tingkat mesopori di atas 46%. Hasil ini menunjukkan penurunan resistansi elektroda karena peningkatan mesoporositas yang mendukung aksesibilitas ion yang tinggi pada permukaan elektrolit/elektroda [60].



Gambar 4.8. Performansi elektrokimia karbon berpori hirarkis dalam 6 M KOH (a) CV pada scan rate 1 mV s^{-1} , (b) Kapasitansi spesifik scan rates yang berbeda, dan (c) Profil GCD pada rapat arus 1 A g^{-1}

Kinerja elektrokimia sel superkapasitor simetris diuji dalam elektrolit alkalin KOH 6 M untuk mengkonfirmasi kelayakan elektroda karbon aktif berbasis daun pisang untuk aplikasi praktis. Proses ini dilakukan dengan menggunakan kurva CV untuk prekursor, PAC-700, PAC-

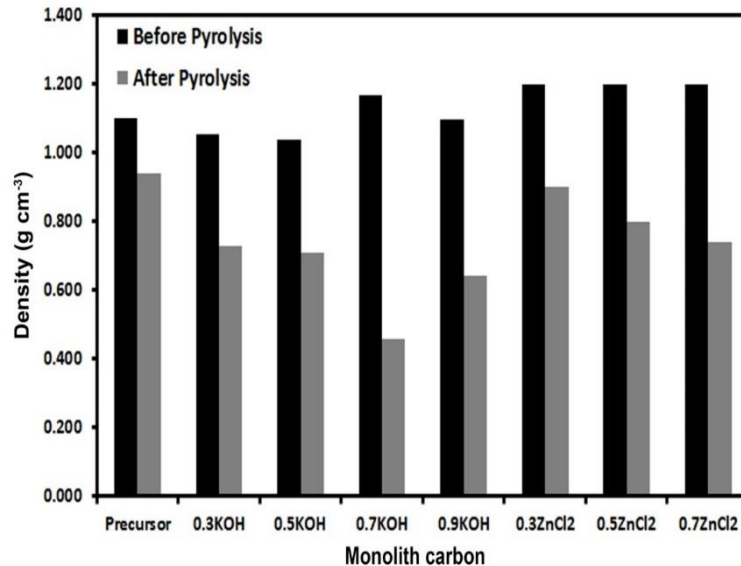
800, dan PAC-900 dalam elektrolit KOH 6 M pada 1 mV s^{-1} untuk mempertahankan bentuk kuasi-persegi panjang dengan adsorpsi/desorpsi ion elektrostatik, sebagai ditunjukkan pada Gambar 4.8a. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada potensial window yang relatif rendah yaitu 0-0,01 V, sampel PACs memiliki adsorpsi ion elektrolit yang berbeda. Selanjutnya, sampel PAC-700 menunjukkan kurva yang relatif kecil dan peningkatan penyerapan ion yang lebih rendah, yang diikuti oleh sampel PAC-900. Sedangkan PAC-800 memiliki daya serap ion tertinggi pada potensial window 0-0,01 V. Hal ini karena degradasi ion pada elektrolit basa lebih besar daripada pada elektrolit asam. Selanjutnya kurva CV pada elektrolit alkalin KOH 6 M menunjukkan bentuk persegi yang lebih kecil dibandingkan dengan elektrolit asam H_2SO_4 1 M dengan kapasitansi spesifik untuk sampel prekursor, PAC-700, PAC-800, dan PAC-900, yaitu 21, 121, 160, dan 149 F g^{-1} , masing-masing. Demikian pula, tingkat pemindaian spesifik yang berbeda mengurangi retensi sampel individu, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8b. Retensi tertinggi dari elektrolit alkalin memiliki kemampuan untuk mempertahankan kapasitansi spesifik 54% dalam sampel PAC-800. Pengamatan ini sesuai dengan percobaan GCD, yang juga menampilkan bentuk segitiga linier dan simetris pada 1 A g^{-1} dalam elektrolit alkali KOH 6 M, yang relatif lebih kecil daripada elektrolit asam H_2SO_4 1 M seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8c. Kapasitansi spesifik dari pengujian ini masing-masing adalah 20, 93, 189, 122 F g^{-1} . Oleh karena itu, sifat kapasitif elektroda karbon berbasis daun pisang pada elektrolit asam H_2SO_4 1 M lebih baik daripada elektrolit alkalin KOH 6 M. Hal ini disebabkan konduktivitas ionik H^+ $350,1 \text{ cm}^2 \Omega^{-1} \text{ mol}^{-1}$ lima kali lipat lebih tinggi dibandingkan dengan K^+ $73,5 \text{ cm}^2 \Omega^{-1} \text{ mol}^{-1}$, sehingga ion H^+ memiliki kemampuan mobilitas tertinggi yang berkontribusi terhadap peningkatan kinerja bahan elektroda [61,62]. Sifat ini juga mempengaruhi ketahanan sel, dimana elektrolit alkalin relatif lebih tinggi $26 \cdot 10^{-3}$ daripada elektrolit garam $15 \cdot 10^{-3}$ di PAC-800. Namun, sampel PAC-800 secara keseluruhan menunjukkan sifat elektrokimia terbaik dengan kapasitansi, energi, daya, dan resistansi spesifik masing-masing 245 F g^{-1} , $34,67 \text{ Wh kg}^{-1}$, $122,74 \text{ W kg}^{-1}$, dan $15 \cdot 10^{-3}$ dalam 1 M elektrolit H_2SO_4 .

4.2 Elektroda Karbon Berbasis Limbah Kulit Jengkol dengan Struktur Nanofiber/Nanosheet Karbon Berpori Berongga untuk Superkapasitor Berkinerja Tinggi

4.2.1 Densitas, sifat kristalinitas, fitur morfologis

Analisis densitas adalah tinjauan awal dari sifat fisika, yang populer dilakukan untuk menyelidiki bahan karbon monolitik berpori, seperti yang dinyatakan sebelumnya. [22,29,63]

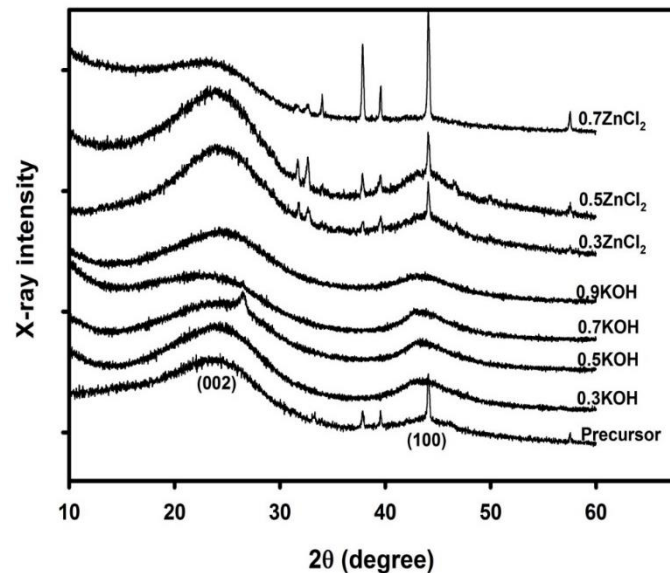
Ini termasuk pengukuran massa, diameter, dan ketebalan sebelum dan sesudah proses pirolisis. Nilai yang diperoleh untuk semua sampel sesuai dengan variasi konsentrasi agen aktivator KOH dan ZnCl₂ menurun pada akhir proses, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9. Densitas karbon monolitik selama pirolisis

Selanjutnya, degradasi utama bahan lignoselulosa terjadi pada suhu antara 200-350 °C, sebagai H₂O, CO, CO₂, CH₄, aldehida, dan gas lainnya berkembang, sedangkan distilasi hidrokarbon yang lebih berat (tar) efektif dalam 350-500 °C serta di atas 500 °C [64,65]. Sebaliknya, penurunan berat badan yang terdeteksi menegaskan pembentukan lengkap struktur pori dasar pada karbon [66]. Proses karbonisasi diasumsikan menghasilkan pori-pori karbon, meskipun kemampuan yang buruk untuk potensi ini dimaksimalkan dalam bahan. Ini ditingkatkan dengan menggunakan aktivasi fisika dengan gasifikasi karbon dioksida, dan reaksi dengan karbon padat menghasilkan beberapa produk gas. Sebaliknya, pengenalan suhu reaksi yang lebih rendah (600 °C) yang dikendalikan oleh oksigen molekuler mendukung pembentukan karbon dioksida, sedangkan karbon monoksida didorong pada nilai yang lebih tinggi (>900 °C) [67]. Pelepasan karbon monoksida pada permukaan karbon padat telah berafiliasi dengan pembentukan pori-pori baru, dan peningkatan volume, meskipun pembentukan dan pengembangan ini menyebabkan pengurangan densitas karbon monolit pasca-pirolisis. Ini juga dipengaruhi secara signifikan oleh konsentrasi agen, dan penurunan yang luar biasa diamati dengan impregnasi reagen lebih lanjut, selain penggabungan 0,9 M KOH. Fenomena ini berlaku untuk aktivator KOH dan ZnCl₂, pada kisaran konsentrasi 0,3 mol L⁻¹ hingga 0,7 mol L⁻¹. Terlepas dari kenyataan bahwa 0,9M KOH menunjukkan densitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan 0,7KOH, nilai yang diperoleh relatif lebih rendah (0,7KOH

setara dengan $0,460 \text{ m}^3 \text{ g}^{-1}$) dibandingkan konsentrasi aktivator ZnCl_2 apa pun. Hal ini menunjukkan adanya distribusi pori dan luas permukaan yang lebih baik pada KOH, berdasarkan analisis, divalidasi dan diperkuat dengan karakterisasi analisis adsorpsi-desorpsi isoterm N_2 pada subbab berikutnya.



Gambar 4.10. Pola XRD untuk semua sampel

Sifat kristalinitas elektroda karbon PJs dievaluasi menggunakan metode difraksi sinar-X, dan Gambar 4.10 menunjukkan pola XRD yang khas yang diperoleh dengan perlakuan KOH/ ZnCl_2 yang berbeda. Semua sampel jelas terbentuk dalam keadaan amorf [64]. Puncak pelebaran diamati pada sudut hamburan 22° - 24° , yang sesuai dengan bidang (002), menunjukkan adanya struktur karbon terganggu turbostratik dan mengarah ke sifat amorf bahan karbon di elektroda. Puncak luas lainnya diidentifikasi pada sekitar 43° - 45° , dan dikaitkan dengan bidang difraksi (100), menyiratkan adanya struktur grafit dalam jumlah kecil [68]. Sementara itu, pergeseran puncak yang melebar pada bidang refleksi (002) diamati pada prekursor, aktivator ZnCl_2 , dan KOH, yang menunjukkan peningkatan struktur turbostratik. Hal ini mungkin disebabkan oleh adanya mikrokristal seperti grafit dan struktur pseudo-kristal yang terorientasi dan terdistribusi secara acak yang mempengaruhi morfologi struktur pori [35]. Sifat ini menguntungkan dalam memperluas area kontak ion elektrolit pada permukaan bahan elektroda. Selain itu, pola XRD juga menunjukkan beberapa puncak yang tajam untuk aktivator ZnCl_2 tetapi tidak ditemukan pada aktivator KOH. Fenomena ini membuktikan pengaruh masing-masing aktivator, karena KOH bereaksi ke seluruh elektroda karbon untuk membentuk lebih banyak pori-pori, yang mengarah ke pameran karakteristik amorf yang lebih besar, sementara ZnCl_2 hanya berinteraksi dengan permukaan. Selanjutnya, puncak tajam

terbentuk, yang merupakan ciri kristalinitas, seperti yang diamati pada pola XRD, membuktikan adanya unsur kristal lainnya, termasuk magnesium oksida (MgO_2) (kartu JCPDS No.89-7746) dan kalium karbonat (K_2CO_3) (JCPDS No. 82-1690) pada puncak 37° dan 46° , masing-masing [69]. Keberadaan senyawa tersebut diekstraksi dari unsur-unsur dasar bahan berbasis biomassa, khususnya *Pithecellobium jiringa*. Analisis ini didukung oleh karakterisasi EDS.

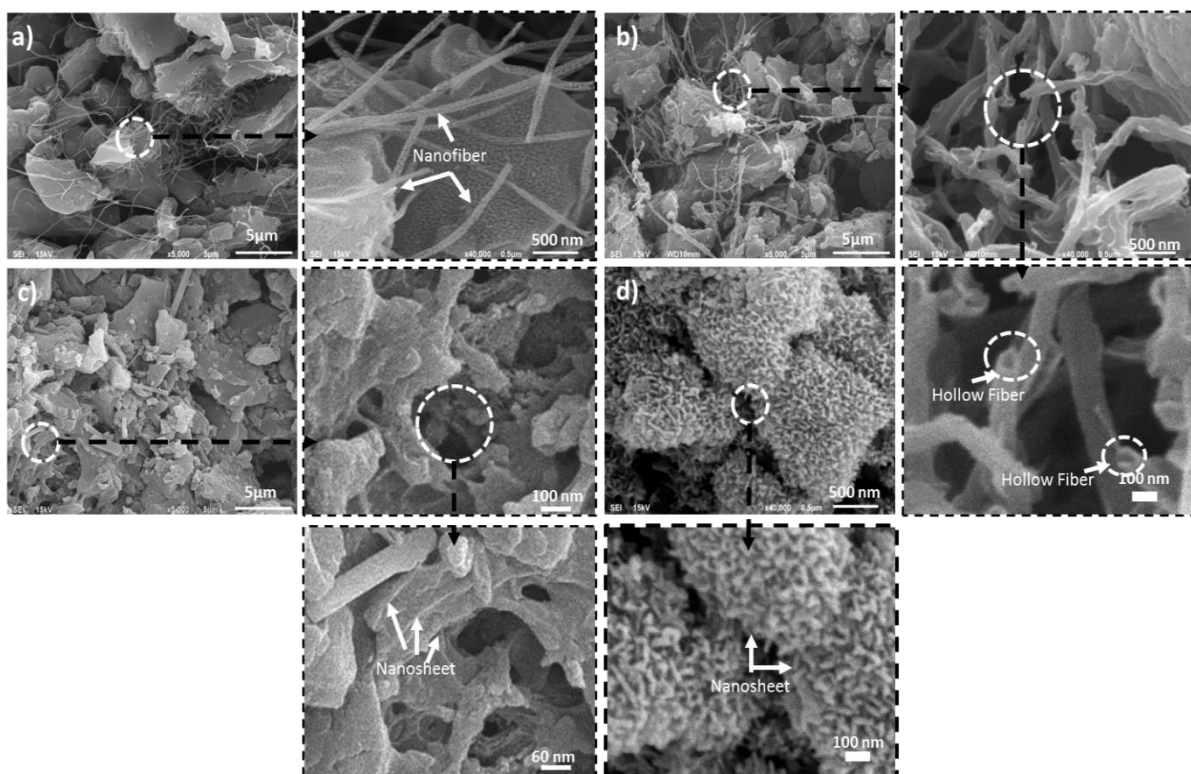
Tabel 4.4 menunjukkan jarak antar lapisan (d_{002} dan d_{100}), tinggi tumpukan (L_c), dan lebar (L_a) untuk elektroda karbon yang dihasilkan dari PJ. Data yang diperoleh tetap dalam kisaran bahan karbon khas, yang dikumpulkan melalui pemasangan, dengan perangkat lunak asal mikrokal. Jarak antarlapisan (d_{002} dan d_{100}) dipastikan merupakan struktur tak beraturan dari bahan berbasis biomassa karbon, sedangkan tinggi tumpukan (L_c) dan lebar (L_a) dievaluasi dengan persamaan Debye-Scherrer menunjukkan hubungan proporsional terbalik antara L_c dan L_a . Selanjutnya, pereaksi impregnasi menunjukkan penurunan nilai L_c yang diawali dengan penambahan $0-0,7 \text{ mol L}^{-1} \text{ KOH}$ dan $0-0,5 \text{ mol L}^{-1} \text{ ZnCl}_2$. Aktivator ini cenderung mengurangi struktur karbon PJs. Namun, penambahan lebih lanjut pada sampel $0,9\text{KOH}$ dan $0,7\text{ZnCl}_2$ menunjukkan tren data yang berbeda. Secara khusus, L_c memiliki hubungan proporsional terbalik dengan luas permukaan spesifik dalam rumus empiris $SSA = 2/\rho L_c$ [15,16], maka L_c yang lebih kecil menghasilkan SSA yang besar. Rumus ini menunjukkan luas permukaan spesifik dalam sampel $0,7\text{KOH}$, yang menunjukkan L_c terendah. Analisis ini konsisten dengan laporan densitas sebelumnya, yang menyatakan densitas lebih rendah (porositas tinggi) pada $0,7\text{KOH}$, diikuti dengan analisis adsorpsi-desorpsi isoterm N_2 .

Tabel 4.4. Jarak antar lapisan (d_{002} dan d_{100}), tinggi tumpukan (L_c) dan lebar tumpukan (L_a) untuk elektroda karbon PJ

Sampel	$2\theta_{002}$ ($^\circ$)	$2\theta_{100}$ ($^\circ$)	d_{002} (\AA)	d_{100} (\AA)	L_c (\AA)	L_a (\AA)
Prekursor	24,429	44,198	3,737	2,096	17,556	28,515
0.3KOH	24,059	44,133	3,695	2,050	12,229	45,874
0.5KOH	24,554	44,198	3,622	2,047	10,493	46,904
0.7KOH	23,329	43,932	3,809	2,059	9,463	48,084
0.9KOH	24,325	44,046	3,656	2,054	11,138	46,003
0.3ZnCl ₂	23,643	45,265	3,760	2,002	16,541	30,077
0.5ZnCl ₂	23,761	45,655	3,742	1,945	14,521	36,358
0.7ZnCl ₂	22,682	43,109	3,917	2,096	14,949	39,283

Gambar SEM karbon aktif PJs ditunjukkan pada Gambar 4.11. Secara umum, semua gambar SEM untuk semua sampel ditinjau agregasi besar dengan struktur pori yang berbeda

termasuk nanofiber, struktur seperti butir, berpori hierarkis, dan struktur seperti nanosheet. Selanjutnya, impregnasi KOH berhasil memodifikasi struktur prekursor dari agregat besar menjadi nanofiber, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.11(a). Senyawa kompleks lignoselulosa digores dan didekomposisi dalam proses aktivasi KOH suhu tinggi. Hemiselulosa diekstraksi dan diuapkan dari selulosa, sedangkan lignin tergores dari selulosa dan membentuk struktur serat. Seperti diketahui, senyawa selulosa berkontribusi terhadap munculnya serat mikro dalam bahan berbasis biomassa [40,70]. Dengan konsentrasi aktivasi kimia tertentu, serat mikro dapat direduksi dan menghasilkan struktur serat nano yang dikonfirmasi dalam mikrograf SEM, Gambar 4.11(a). Selain itu, serat nano bercabang diamati dengan diameter mulai dari 78 nm hingga 102 nm. Penambahan impregnasi KOH pada 0,7 M meningkatkan jumlah serat dan juga menghasilkan serat berlubang pada permukaan sampel, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.11(b). Formasi ini menyediakan situs yang lebih aktif untuk adsorpsi ion, sehingga meningkatkan kemampuan penyimpanan energi [45,71].



Gambar 4.11. Gambar SEM pada perbesaran 40000 untuk (a) 0,5KOH; (b) 0,7KOH; (c) 0,5ZnCl₂; dan (d) 0,7ZnCl₂.

Selain itu, ZnCl₂ yang diimpregnasi memiliki struktur yang relatif berbeda dari sampel sebelumnya. 0.5ZnCl₂ menunjukkan struktur nanopori hirarkis terhubung ke struktur seperti butir, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.11(c). Selain itu, struktur seperti batang juga

ditemukan pada perbesaran mikrograf SEM 0,5ZnCl₂. Hal ini disebabkan proses aktivasi kimia menggunakan ZnCl₂ telah bereaksi pada suhu pirolisis yang relatif rendah dibandingkan dengan KOH, yaitu pada kisaran 500-600 °C. Hal ini memungkinkan terjadinya reduksi dan penguapan senyawa yang lebih kompleks dari hemiselulosa dan selulosa serta mempertahankan lignin yang telah membentuk hierarki nanopori. Selanjutnya, sampel 0,7ZnCl₂ menunjukkan struktur morfologi seperti lembaran seperti yang ditegaskan pada Gambar 4.11(d). Hal ini dikaitkan dengan aktivasi kimia ZnCl₂ pada konsentrasi yang relatif tinggi 0,7 mol L⁻¹ yang memungkinkan ekstraksi lignin dan melepaskan lebih banyak selulosa dan hemiselulosa. Lignin inilah yang berkontribusi terhadap munculnya nano-like-sheet pada porous [26,39,40]. Struktur ini memberikan sifat kapasitif tinggi dari bahan elektroda. Oleh karena itu penggunaan aktivator yang berbeda (KOH dan ZnCl₂) pada karbon aktif PJs dikonfirmasi untuk menghasilkan berbagai morfologi permukaan skala nano, termasuk agregat karbon, serat nano/serat berongga, struktur pori hierarkis, dan lembaran mirip nano. Struktur ini memberikan kontribusi besar untuk menyediakan situs aktif untuk adsorpsi ion dan laju aliran yang stabil.

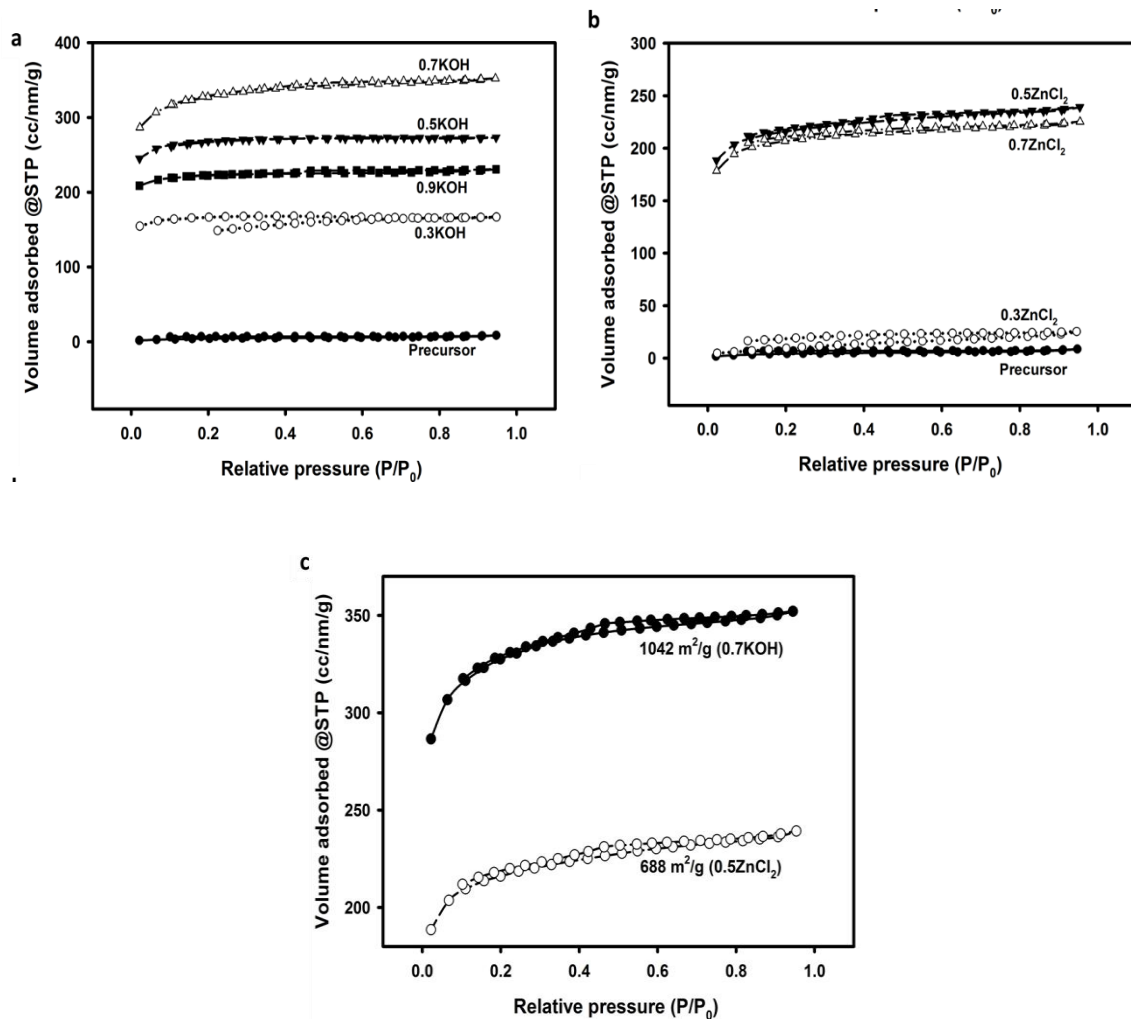
4.2.2 Kandungan kimia dan sifat porositas

Spektroskopi dispersi energi (EDS) adalah teknik umum untuk mengevaluasi kandungan unsur bahan berbasis biomassa karbon. Data yang diperoleh untuk elektroda karbon yang dihasilkan dari PJs, menurut agen aktivator yang berbeda (KOH dan ZnCl₂) ditunjukkan pada Tabel 4.5. Perbedaan konsentrasi aktivator kimia menyebabkan keberhasilan peningkatan kandungan karbon dari 87,77% menjadi 96,90%, yang mendominasi kandungan setiap sampel dengan persentase kemurnian yang tinggi. Katalis yang digunakan untuk menguapkan pengotor yang ada termasuk KOH dan ZnCl₂.

Tabel 4.5. Kandungan kimia untuk elektroda karbon yang terbuat dari PJs

Sampel	C (%)	O (%)	K (%)	Mg (%)	Na (%)	Si (%)	Ca (%)	Cl (%)
Prekursor	87,77	3,99	5,78	0,35	0,00	0,00	0,00	2,11
0.3KOH	95,73	4,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0.5KOH	95,81	3,90	0,00	0,08	0,02	0,01	0,17	0,00
0.7KOH	93,64	6,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0.9KOH	95,77	4,00	0,02	0,00	0,00	0,04	0,17	0,00
0.3ZnCl ₂	95,19	2,13	1,04	0,00	0,53	0,00	0,00	1,10
0.5ZnCl ₂	96,90	3,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0.7ZnCl ₂	93,67	6,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Pada konsentrasi yang lebih tinggi ($>0,5 \text{ mol L}^{-1}$) KOH dan ZnCl_2 menyebabkan penurunan persentase unsur karbon, seperti yang ditunjukkan pada sampel 0,7KOH, 0,9KOH, dan 0,7 ZnCl_2 . Selain itu, kandungan karbon yang diamati dalam penelitian ini mirip dengan hasil penelitian sebelumnya yang menggunakan limbah biomassa sebagai bahan baku [72,73]. Selain itu, beberapa unsur lain juga terdeteksi, termasuk oksigen, magnesium, natrium, klorida, kalium, dan besi, yang dihasilkan dari kandungan PJs yang tidak sepenuhnya berkurang selama pirolisis.



Gambar 4.12. Isotherm N_2 adsorpsi-desorpsi sampel elektroda karbon untuk (a) aktivator KOH; (b) aktivator ZnCl_2 ; dan (c) 0,7KOH dan 0,5 ZnCl_2 .

Luas permukaan spesifik dan distribusi ukuran pori adalah dua parameter yang sangat penting dalam menentukan efisiensi bahan berbasis biomassa karbon aktif. Lebih lanjut, keberadaan luas permukaan spesifik yang tinggi telah dikaitkan dengan penyediaan banyak situs aktif untuk penyimpanan energi, sementara distribusi pori yang sesuai meningkatkan difusi elektrolit pada permukaan elektroda berpori. Adsorpsi-desorpsi isotherm N_2 dari karbon aktif berbasis limbah PJs ditunjukkan pada Gambar 4.12. Dari Gambar 4.12, jelas bahwa

menurut klasifikasi IUPAC semua sampel menunjukkan tipe IV/H2 yang khas dengan peningkatan tajam, pada $P/P_0 < 0,1$ mengkonfirmasi keberadaan jumlah mikropori [46,74] dan lingkaran histeresis yang signifikan dalam rentang tekanan relatif dari 0,39 hingga 0,94, menunjukkan mesopori yang melimpah [46,75]. Hal ini menegaskan bahwa karbon aktif PJs menghasilkan struktur pori yang beragam baik.

Selanjutnya, aktivasi KOH pada konsentrasi yang lebih tinggi dapat meningkatkan volume penyerapan gas N_2 seperti yang ditegaskan pada Gambar 12(a). KOH dapat mengetsa kandungan karbon lebih intensif dan menghasilkan lebih banyak pori-pori, yang menguntungkan untuk difusi ion yang lebih tinggi dan menghasilkan kapasitas yang lebih besar dan rapat energi yang lebih tinggi. Impregnasi KOH (dari 0 menjadi $0,7 \text{ mol L}^{-1}$) berhasil memperbesar luas permukaan spesifik dari $15,163 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ menjadi $1041,900 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, dengan nilai tertinggi 0,7KOH. Hal ini terkait dengan karakteristik reaksi KOH/karbon, yang terjadi pada $700 \text{ }^\circ\text{C}$ [76]. Produk reaksi akhir adalah karbon monoksida (CO), dan peningkatan konsentrasi KOH berimplikasi pada peningkatan jumlah K_2CO_3 , sementara dekomposisi CO berkontribusi pada luas permukaan spesifik yang lebih tinggi, serta pertumbuhan distribusi ukuran pori [76]. Namun, penambahan konsentrasi lebih sulit untuk mempertahankan semua pori-pori besar ini. Beberapa dari mereka mungkin runtuh, mengakibatkan penurunan luas permukaan spesifik dan distribusi ukuran pori yang dikonfirmasi pada Gambar 4.12 (a). Hal ini dibuktikan dengan profil penyerapan gas N_2 dan diameter pori rata-rata sampel 0,9KOH dengan luas permukaan spesifik $697 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$.

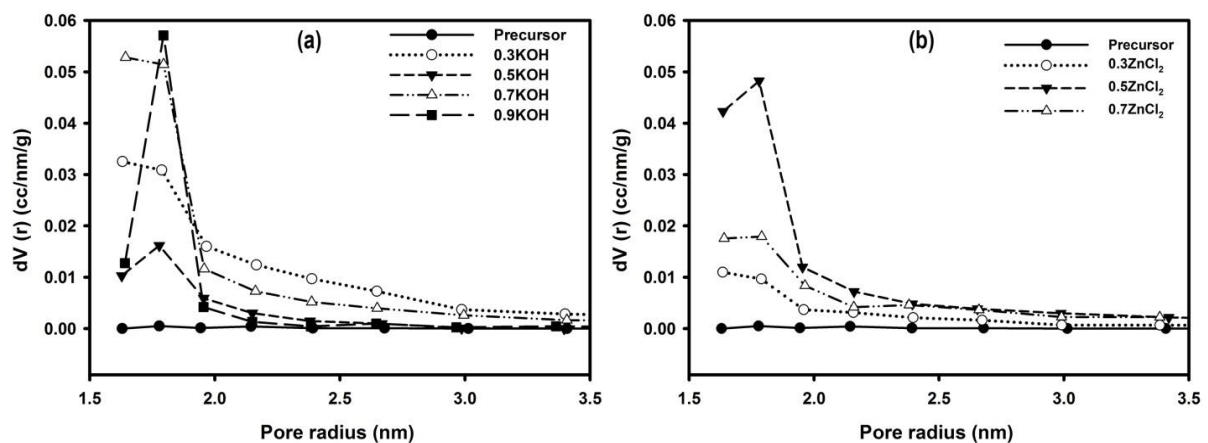
Rupanya, adsorpsi-desorpsi isoterm N_2 dalam aktivator $ZnCl_2$ menunjukkan fenomena yang sama (Gambar 4.12(b)). Peningkatan konsentrasi selanjutnya menyebabkan peningkatan luas permukaan spesifik, dan diameter pori rata-rata. Aktivasi $ZnCl_2$ berhasil meningkatkan luas permukaan spesifik dari $15,163 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ menjadi $688,298 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ serta diameter pori rata-rata dari $1,99 \text{ nm}$ menjadi $2,160 \text{ nm}$. Peningkatan hasil porositas dari ruang yang diisolasi oleh $ZnCl_2$ setelah bereaksi dengan karbon pada suhu yang lebih tinggi, awalnya dipamerkan seng oksida. Selama proses termal, seng oksida terurai menjadi oksiklorida, mengikuti etsa atom karbon, dan selanjutnya menghasilkan mikropori. Sementara itu, penambahan konsentrasi $ZnCl_2$ meningkatkan produk ZnO serta dekomposisi CO_2 yang menghasilkan luas permukaan spesifik yang tinggi dan juga mengubah distribusi ukuran pori (Gambar 4.13(b)). Hal ini dikonfirmasi oleh sampel prekursor $0,3ZnCl_2$ dan $0,5ZnCl_2$ yang menunjukkan peningkatan luas permukaan spesifik. Selanjutnya, di mana peningkatan menjadi $0,7ZnCl_2$ sulit untuk mempertahankan perkembangan meso- dan makropori sehingga dapat runtuh, mengakibatkan

pengurangan luas permukaan spesifik [77]. Secara rinci, luas permukaan spesifik dan diameter pori rata-rata untuk $ZnCl_2$ ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6. Luas permukaan spesifik dan pori diameter rata-rata untuk elektroda karbon PJs

Karbon aktif PJs	S_{BET} ($m^2 g^{-1}$)	S_{mic} ($m^2 g^{-1}$)	S_{mes} ($m^2 g^{-1}$)	V_{tot} ($cm^3 g^{-1}$)	V_{mic} ($cm^3 g^{-1}$)	V_{mes} ($cm^3 g^{-1}$)	D_{ave} (nm)
Prekursor	15,163	14,517	0,646	0,0132	0,0114	0,0018	3,490
0.3KOH	519,754	495,989	23,765	0,2587	0,2322	0,0265	1,990
0.5KOH	840,991	833,972	7,019	0,4236	0,4169	0,0067	2,015
0.7KOH	1.041,9	1015,054	26,849	0,5459	0,5170	0,0289	2,095
0.9KOH	697,074	683,011	14,063	0,3579	0,3438	0,0141	2,054
0.3 $ZnCl_2$	37,637	30,947	6,690	0,0391	0,0313	0,0078	1,991
0.5 $ZnCl_2$	688,298	663,836	24,462	0,3709	0,3425	0,0284	2,160
0.7 $ZnCl_2$	656,589	643,033	13,556	0,3492	0,3311	0,0181	2,131

Seperti ditunjukkan pada Tabel 4.6, tampak bahwa peningkatan konsentrasi reagen aktivator secara signifikan memperbesar luas permukaan spesifik dan diameter pori rata-rata. Namun, aktivator KOH berhasil menunjukkan luas permukaan tertinggi 1041,900 $m^2 g^{-1}$, yaitu 688,298 $m^2 g^{-1}$ untuk $ZnCl_2$ (Gambar 4.12(c)), yang dihasilkan dari pengembangan distribusi pori pada karbon aktif. Aktivator KOH menunjukkan pori-pori yang lebih kecil (mesopori sempit) dibandingkan dengan $ZnCl_2$, yang pada akhirnya meningkatkan luas permukaan spesifik.

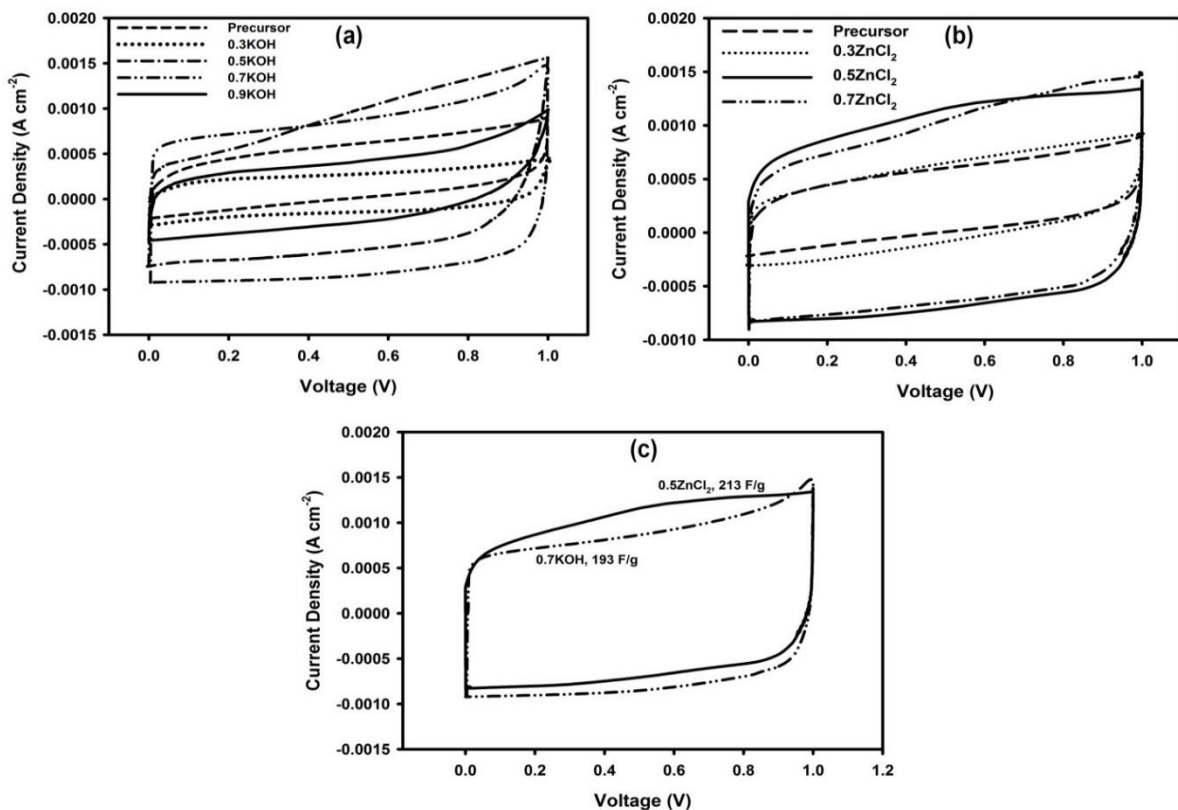


Gambar 4.13. Distribusi ukuran pori sampel elektroda karbon untuk (a) aktivator KOH; dan (b) aktivator $ZnCl_2$.

Selain itu, kurva distribusi ukuran pori (Gambar 13(a) dan (b)) juga membuktikan bahwa sampel perlakuan KOH/ $ZnCl_2$ mengamati struktur pori hierarkis dengan peningkatan struktur mikro dan mesopori. Seperti yang diharapkan, setelah perlakuan KOH, rasio volume mikro/meso yang rendah hingga 10%, meskipun dapat meningkatkan luas permukaan spesifik dan volume total jelas meningkat menjadi 1041.900 $m^2 g^{-1}$ dan 0,5459 $cm^3 g^{-1}$. Namun,

perlakuan ZnCl_2 menunjukkan pembesaran luas permukaan dan volume total yang relatif lebih rendah menjadi $688,298 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ dan $0,3709 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$, tetapi rasio volume mikro/meso tiga kali lipat daripada perlakuan KOH. Interaksi antara karbon dan KOH/ ZnCl_2 selama satu tahap proses pirolisis terpadu menghasilkan pelepasan $\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4$, volatil, dan unsur non-karbon lainnya yang dapat membuka struktur pori baru untuk membentuk mikro dan mesopori, seperti yang ditunjukkan pada mikrograf SEM (Gambar 12c). Perlakuan KOH/ ZnCl_2 dapat menghasilkan struktur nano berpori termasuk hollow/nanofiber dan nanosheet, serta memperbesar kombinasi mikro-mesopori dengan terhubung secara hierarkis. Ini adalah karakteristik utama untuk meningkatkan kapasitif tinggi dan laju difusi ion. Hasil ini memvalidasi analisis densitas dan kristalinitas dari monolit karbon yang dinyatakan sebelumnya dan juga konsisten dengan penelitian sebelumnya (lihat Tabel 4.6).

4.2.3 Kinerja elektrokimia



Gambar 4.14. Kurva voltametri siklik untuk sampel elektroda karbon PJ dari (a) aktivator KOH; (b) aktivator ZnCl_2 ; dan (c) 0,7KOH dan 0,5 ZnCl_2

Kinerja elektrokimia elektroda PJs dilakukan secara sistematis dalam sistem dua elektroda dengan menggunakan teknik cyclic voltametry (CV). Oleh karena itu, perlakuan KOH/ ZnCl_2 diterapkan untuk memahami kemungkinan penerapan elektroda karbon berbasis PJs dalam superkapasitor. Kapasitansi spesifik dari prekursor, 0.3KOH, 0.5KOH, 0.7KOH,

0.9KOH, 0.3ZnCl₂, 0.5ZnCl₂, dan 0.7ZnCl₂ diselidiki menggunakan voltametri siklik pada laju pemindaian 1 mV s⁻¹ (Gambar 4.14). Sifat kapasitif diukur dalam elektrolit berair untuk perlakuan KOH/ZnCl₂ elektroda PJs, dan diamati kurva CV berbentuk kuasi-persegi panjang dengan menunjukkan kapasitansi lapisan ganda yang khas dari bahan karbon [5,78]. Proses ini memfasilitasi peningkatan kapasitansi spesifik, yang dihasilkan dari kemampuan proses aktivasi untuk secara signifikan meningkatkan luas permukaan spesifik, nanofiber berpori hierarkis dengan mikro dan mesopori yang melimpah. Sebaliknya, sampel prekursor menunjukkan bentuk kuasi-persegi panjang yang relatif kecil, yang menunjukkan kapasitansi spesifik yang lebih rendah dari 38 F g⁻¹.

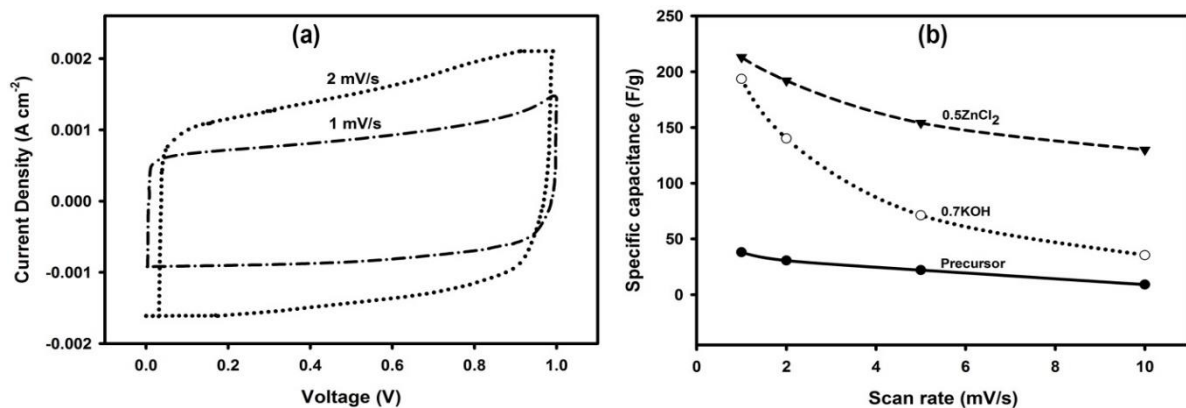
Kapasitansi spesifik ini lebih besar dengan penambahan perlakuan KOH (dari 0,3 mol L⁻¹ menjadi 0,7 mol L⁻¹) yang dikonfirmasi pada Gambar 4.14(a), dengan kapasitansi spesifik masing-masing sebesar 48 F g⁻¹, 181 F g⁻¹, dan 193 F g⁻¹. Hal ini sesuai dengan morfologi permukaan yang berpengaruh signifikan dari agregat besar hingga nanofiber/hollow-fiber, distribusi pori rata-rata (1,99-2,16 nm), dan luas permukaan spesifik yang tinggi (15,163-1041,900 m² g⁻¹), yang memungkinkan terjadinya situs yang lebih aktif diperlukan untuk pembentukan lapisan ion pada permukaan elektroda/elektrolit. Selain itu, sampel disiapkan dengan 0,9 mol L⁻¹ KOH menunjukkan bentuk kuasi-persegi panjang yang lebih kecil dengan kapasitansi spesifik berkurang 84 F g⁻¹. Secara rinci, kapasitansi spesifik, rapat energi dan rapat daya dari semua superkapasitor elektroda ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 7. Kapasitansi spesifik, energi dan rapat daya elektroda karbon aktif PJs

Elektroda	C _{sp} (F g ⁻¹)	E (Wh kg ⁻¹)	P (W kg ⁻¹)
Prekursor	38	5,3	19,1
0.3KOH	45	6,2	22,5
0.5KOH	181	25,2	90,6
0.7KOH	193	26,8	96,6
0.9KOH	84	11,7	42,2
0.3ZnCl ₂	70	9,7	34,9
0.5ZnCl ₂	213	29,6	106,6
0.7ZnCl ₂	209	29,1	104,8

Fenomena yang sama juga ditemukan pada perlakuan ZnCl₂, karena penambahan 0,3 mol L⁻¹ ke 0,5 mol L⁻¹ mengarah pada pembentukan bentuk kuasi-persegi panjang yang relatif lebih besar (Gambar 4.15(b)), dengan kapasitansi spesifik yang ditingkatkan secara berurutan dari 70 F g⁻¹ menjadi 213 F g⁻¹, sedangkan penambahan 0,7 mol L⁻¹ ZnCl₂ menyebabkan penurunan kapasitansi spesifik menjadi 209 F g⁻¹. Meskipun 0,5ZnCl₂ tidak memiliki luas

permukaan spesifik tertinggi ($688,298 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$), ia memiliki sifat kapasitif tertinggi dibandingkan dengan 0,7KOH. Hal ini disebabkan struktur nanopori yang terhubung secara hierarkis dengan rasio volume mikro/meso yang relatif tiga kali lebih besar dapat secara signifikan meningkatkan jalur transpor ion yang relatif lebih baik dengan kemungkinan terbentuknya lapisan ganda listrik yang lebih efektif, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.14 (c) [41,79]. Selain itu, penambahan diameter pori memungkinkan transfer dan difusi ion yang lebih baik, yang menghasilkan kinerja kapasitas tinggi. Kapasitansi spesifik yang tinggi tidak hanya bergantung pada luas permukaan yang tinggi dan volume mikropori yang tinggi tetapi kombinasi yang baik dari mikro, dan mesopori pada elektroda karbon adalah poin penting untuk meningkatkan kapasitansi spesifik [80]. Mikropori memungkinkan lebih banyak ion elektrolit untuk membentuk lapisan muatan pada permukaan elektroda/elektrolit dan menghasilkan rapat energi yang tinggi sedangkan mesopori memberikan ruang yang cukup untuk transfer dan difusi ion yang lebih baik pada elektroda berpori karbon untuk menghasilkan rapat daya yang tinggi [81]. Fenomena ini tentunya menghasilkan kapasitansi spesifik yang tinggi pada elektroda karbon. Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa kinerja superkapasitor tidak serta merta dipengaruhi secara mutlak oleh luas permukaan yang tinggi. Namun, perkembangan diameter pori yang semakin besar mengurangi luas permukaan spesifik dan mengikis struktur morfologi sehingga menghasilkan kapasitansi spesifik yang lebih rendah. Analisis ini terbukti pada sampel 0,9M KOH dan 0,7M ZnCl_2 .



Gambar 4.15. (a) Kurva CV berdasarkan laju pindai yang berbeda dari elektroda karbon PJs; dan (b) kapasitansi spesifik vs. laju pindai elektroda karbon PJ.

Perbedaan laju pemindaian juga ditunjukkan pada Gambar 4.15(a), Sampel 0,5 ZnCl_2 masih mempertahankan tipe kuasi-persegi panjang tanpa gangguan pada laju pemindaian yang berbeda, yang menunjukkan kinerja laju yang baik [82]. Lebih lanjut, Gambar 4.15(b) menunjukkan kapasitansi spesifik vs. laju pemindaian yang berbeda dari 1 mV s^{-1} hingga 10

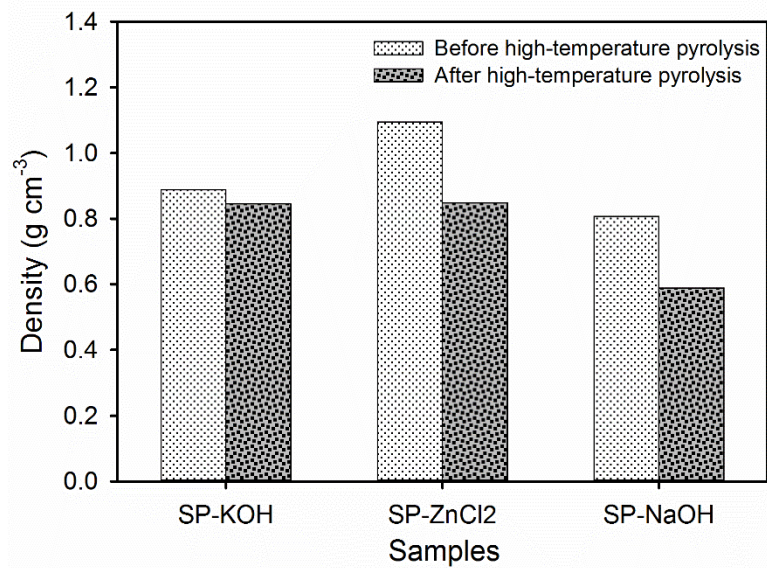
mV s⁻¹ untuk prekursor, 0,7KOH, dan 0,5ZnCl₂. Sampel 0,5ZnCl₂ masih mempertahankan kapasitansi spesifik 80,28% dari 213 menjadi ~70 F g⁻¹ ketika laju pemindaian ditingkatkan dari 1 mV s⁻¹ menjadi 10 mV s⁻¹. Namun, 0,7KOH dan sampel prekursor mengalami degradasi yang relatif tinggi dan hanya dapat dipertahankan masing-masing pada 46,64% dan 28,12%. Ini diverifikasi bahwa sampel 0,5ZnCl₂ adalah kinerja tingkat yang sangat baik.

4.3 Karbon Aktif *Nanosphere* dari Limbah Kulit Bawang Merah untuk Meningkatkan Kinerja Superkapasitor

4.3.1 Analisis sifat bahan

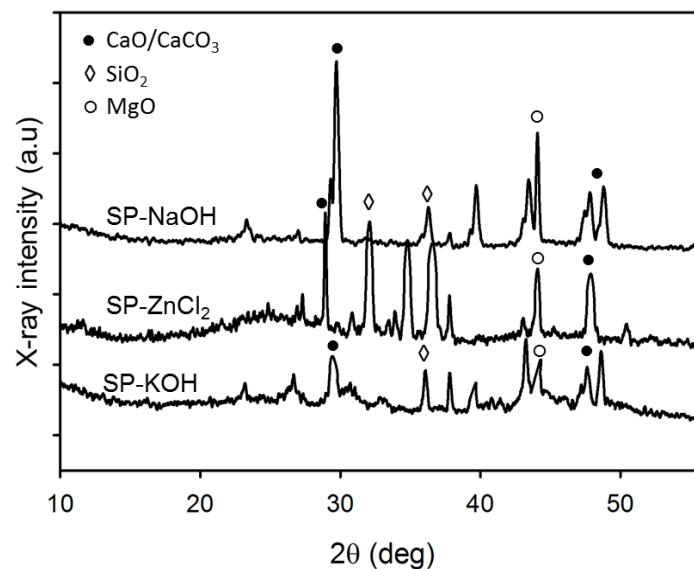
Perubahan densitas merupakan analisis awal yang dilakukan untuk mengevaluasi sifat material karbon aktif yang didesain menyerupai koin padat tanpa bahan perekat. Proses impregnasi kimia menggunakan perlakuan KOH, ZnCl₂, dan NaOH pada pirolisis suhu tinggi secara langsung mempengaruhi densitas koin melalui pengurangan massa, ketebalan, dan diameter. Pirolisis suhu tinggi dan kenaikan suhu tertentu menyebabkan penguapan kadar air, elemen volatil, dan senyawa ringan lainnya [83]. Umumnya kulit bawang merah sebagai bahan baku mengandung senyawa hemiselulosa, selulosa, serta lignin yang tergabung dalam komponen lignoselulosa, dan mengalami dekomposisi, serta reduksi pada suhu yang berbeda. Selanjutnya, proses karbonisasi dalam lingkungan gas N₂ pada suhu ruang maksimum 600 °C mampu menghasilkan karbon tetap dari sampel prekursor melalui penguapan kadar air dan pengurangan komponen lignoselulosa, akibatnya mengurangi densitas sampel [84]. Namun, kandungan residu tar sebagai produk sampingan dari karbonisasi dianggap menghambat ekspansi kerangka pori karbon yang optimal, oleh karena itu, proses aktivasi fisika lebih lanjut diperlukan dalam lingkungan gas CO₂ [85]. Berdasarkan Gambar 4.16, proses aktivasi fisika dilakukan pada suhu 600 °C hingga 900 °C untuk mereduksi serta mendegradasi senyawa selulosa dan lignin, memaksimalkan ekspansi pori, sekaligus membuka pori-pori sempit pada permukaan karbon aktif, akibatnya mengurangi densitas karbon [86]. Ketiga sampel karbon aktif berbahan dasar kulit bawang merah mengalami penurunan densitas setelah proses pirolisis suhu tinggi, termasuk karbonisasi dan aktivasi fisika yang terintegrasi menjadi satu tahap. Sebelum pirolisis, densitas karbon aktif sampel SP-KOH, SP-ZnCl₂, dan SP-NaOH berturut-turut adalah 0,8890, 1,0946, serta 0,8075 g cm⁻³, dan setelah pirolisis, densitas masing-masing adalah 0,8455, 0,8489, dan 0,5889 g cm⁻³. Penurunan densitas terbesar sebesar 27,07% diperoleh pada sampel SP-NaOH, diikuti sampel SP-ZnCl₂ dan SP-KOH masing-masing sebesar 22,44% dan 4,89%. Oleh karena itu, aktivasi kimia juga secara signifikan mempengaruhi densitas sampel, karena fitur reagen pengaktif dan reaksi dengan karbon pada

suhu yang berbeda. Analisis densitas penelitian ini sesuai dengan penelitian yang dilaporkan sebelumnya menggunakan prekursor yang berbeda, salah satunya limbah kulit durian [29].



Gambar 4.16. Perubahan densitas karbon berpori nanosfer seperti koin

Gambar 4.17 menunjukkan analisis difraksi sinar-X pada fase mikrokristalin dari tiga karbon aktif yang diperoleh. Pola XRD untuk sampel SP-KOH, SP-ZnCl₂, dan SP-NaOH dievaluasi pada rentang sudut 10° sampai 60°.



Gambar 4.17. Pola XRD dari nanosfer karbon berpori seperti koin

Secara umum, semua sampel menunjukkan dua puncak lebar pada $2\theta = 24^\circ$ dan 45° , diikuti oleh beberapa puncak tajam pada sudut yang berbeda. Puncak lebar pada $2\theta = 24^\circ$ dan 45° berkorelasi dengan bidang hamburan 002 dan 100, mengkonfirmasi struktur karbon terganggu turbostratik dan mengarah ke sifat amorf yang diinginkan [87]. Properti ini

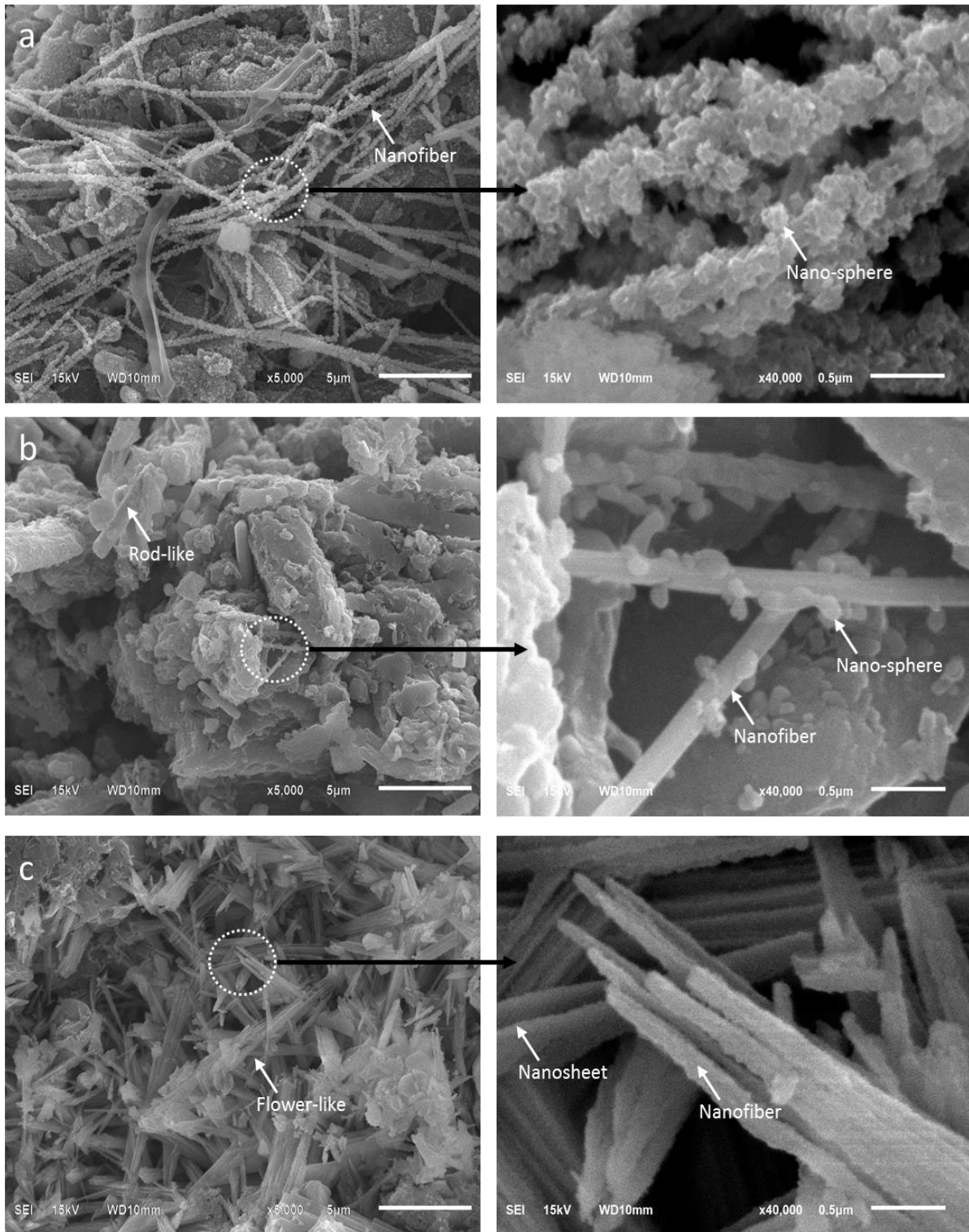
membantu bahan elektroda untuk menyediakan area kontak muatan ionik dalam mengoptimalkan kinerja tinggi superkapasitor. Selain itu, sampel SP-KOH menunjukkan dua puncak lebar yang lebih besar, dibandingkan sampel SP-ZnCl₂ dan SP-NaOH, terutama pada bidang refleksi 002. Hal ini mungkin disebabkan oleh struktur permukaan karbon yang semakin tidak beraturan, mengawali pembentukan berbagai ukuran pori [50]. Hal ini sesuai dengan beberapa studi kasus, di mana kasus serupa juga dilaporkan [36]. Juga, puncak tajam ditemukan pada sudut yang berbeda, termasuk 28,1-29,4°, 33,1°, 37,6°, 45,8-46,3°, dan 48,8°, mengkonfirmasi adanya senyawa kristal di hampir semua sampel, terutama CaO/CaCO₃, MgO, dan senyawa SiO₂. Senyawa CaO/CaCO₃ ditemukan pada 28,1-29,4°, dan 48,8° (JCPDS No. 82-1690), sedangkan senyawa MgO terkonfirmasi pada 45,8-46,3°, dan senyawa SiO₂ pada 33,1° dan 37,6° (JCPDS No. 89-1668). Kehadiran senyawa ini sebagian karena konstituen dasar dari prekursor biomassa mengalami stres oksidatif selama pirolisis. Hasil ini juga dikonfirmasi melalui analisis unsur menggunakan EDS.

Tabel 4.8. Jarak antarlapisan, dimensi mikrokristalin, dan luas permukaan spesifik nanosfer karbon berpori seperti koin

Sampel	2θ ₀₀₂ (°)	2θ ₁₀₀ (°)	d ₀₀₂ (Å)	d ₁₀₀ (Å)	L _c (Å)	L _a (Å)	SSA _{XRD}
SP-KOH	25,453	44,260	3,596	2,044	8,042	49,177	118,23
SP-ZnCl ₂	24,241	43,499	3,668	2,078	9,161	16,707	1058,58
SP-NaOH	23,431	42,037	3,499	2,147	15,482	39,858	597,78

Tabel 4.8 memberikan ringkasan rinci tentang jarak antarlapisan d₀₀₂-d₁₀₀ dan dimensi mikrokristalin L_c-L_a untuk karbon aktif yang diresapi secara kimia. Nilai d₀₀₂ dan d₀₀₁ SP-KOH, SP-ZnCl₂, dan SP-NaOH masuk akal untuk karbon amorf berbasis limbah hayati. Selanjutnya, d₀₀₂ memiliki nilai yang relatif lebih tinggi yaitu 9,09%, dibandingkan dengan d₀₀₂ untuk grafit normal, menegaskan struktur karbon tidak beraturan (turbostratik). Sementara itu, dimensi mikrokristalin, khususnya L_c, terkait erat dengan prediksi luas permukaan spesifik material karbon melalui persamaan empiris $SSA_{xrd} = 2/\rho_{xrd}L_c$, seperti yang dilaporkan sebelumnya [37,38]. L_c adalah parameter yang berbanding terbalik dengan luas permukaan spesifik, oleh karena itu, L_c yang rendah menyiratkan luas permukaan yang tinggi. Nilai L_c terkecil diperoleh pada sampel SP-KOH, menunjukkan luas permukaan spesifik diprediksi mencapai 1182,23 m² g⁻¹, sedangkan padanan SP-ZnCl₂ dan SP-NaOH masing-masing adalah 1058,58 m² g⁻¹ dan 597,78 m² g⁻¹. Tabel 4.8 menyajikan ringkasan rinci dari properti SSA_{xrd} untuk tiga sampel. Sifat-sifat ini diperlukan untuk meningkatkan sifat elektrokimia bahan elektroda untuk aplikasi penyimpanan energi elektrokimia.

Struktur morfologi karbon aktif seperti koin dievaluasi menggunakan pemindaian mikroskop elektron. Gambar 4.18 menunjukkan gambar SEM untuk sampel karbon aktif berbasis bawang merah hijau yang diimpregnasi secara kimia KOH, ZnCl₂, dan NaOH. Menurut diagram, sampel mempertahankan struktur dasar dari prekursor berbasis biomassa, dan menunjukkan morfologi serta struktur nanospheres dan nanofibers, dengan ukuran yang relatif bervariasi, terutama karena perbedaan agen kimia pengaktif. Dalam proses karbonisasi dan aktivasi suhu tinggi, reagen kimia mendehidrasi dan mendegradasi senyawa lignoselulosa kompleks dengan kemampuan untuk mengungkapkan struktur dan morfologi unik pada sampel [88]. Komponen Lignin memberikan kontribusi untuk penampilan struktur tubular dan berspekulasi untuk menyajikan nanospheres pada biomassa berbasis karbon berpori [88]. Sementara itu, selulosa yang terdegradasi karena suhu tinggi berkontribusi pada struktur nanofiber [89]. Gambar 4.18a menunjukkan sampel diresapi KOH ditampilkan morfologi permukaan yang berbeda kaya nanospheres dihiasi dengan nanofibers. Diameter nanosfer berkisar dari 102 nm hingga 124 nm, sedangkan diameter serat berkisar antara 135-370 nm. Di area pembesaran yang dipilih, nanosfer terlihat menempel pada hampir semua permukaan serat, dan saling terkait erat, memulai saluran pori yang terhubung secara hierarkis sambil meminimalkan aglomerasi, dan akibatnya, memastikan situs kontak ion yang lebih efektif dan jalur transportasi muatan untuk penyimpanan energi elektrokimia. [90]. Gambar 4.18b menunjukkan sampel yang diresapi ZnCl₂, mengkonfirmasi struktur morfologi seperti batang dengan diameter 362-882 nm dan gumpalan blok karbon yang dominan. Nanofibers dengan diameter 168-196 nm juga dipastikan jernih dalam jumlah yang relatif kecil, dibandingkan dengan sampel SP-KOH, sedangkan nanospheres dengan diameter 161-128nm, dipastikan menempel pada permukaan serat, meskipun dalam jumlah yang relatif kecil. Selain itu, aktivasi ZnCl₂ diduga dapat mereduksi struktur nanosfer dan serat nano. Pada suhu pirolisis >500 °C, ZnCl₂ bereaksi dengan kerangka matriks karbon menghasilkan senyawa oksidatif [91]. Banyak gugus fungsi yang mengandung oksigen dalam struktur nano-spherical diuapkan oleh ZnCl₂ dalam bentuk H₂O dan CO, akibatnya, mengurangi jumlah nanospheres pada morfologi permukaan sampel [92]. Selanjutnya, produk sampingan dari reaksi kimia dalam bentuk ZnO secara bersamaan mengikis bola karbon, menghasilkan sebagian besar mikropori dalam struktur nano-spherical. Namun, hal ini secara bersamaan mampu menyebabkan runtuhnya nanosfer karbon besar membentuk blok karbon, dan menyebabkan diameter struktur nanofiber lebih kecil, dibandingkan sampel SP-KOH. Struktur ini memiliki kapasitas untuk meningkatkan konduktivitas bahan elektroda dan meningkatkan sifat kapasitif superkapasitor [26].



Gambar 4.18. Citra SEM (a) SP-KOH, (b) SP-ZnCl₂, dan (c) SP-NaOH

Gambar 4.18c menunjukkan morfologi sampel SP-NaOH dengan struktur nanofiber pendek yang relatif dikonfirmasi dengan diameter 78-250nm, serta struktur seperti bunga yang unik. Pada area pembesaran yang dipilih, sampel SP-NaOH menunjukkan struktur lembaran dengan ketebalan 26-56nm. Reaksi NaOH pada pirolisis suhu tinggi mampu mempertahankan

struktur dasar prekursor selulosa, Na_2CO_3 sebagai produk pertama reaksi, untuk menginisiasi pembentukan senyawa oksidatif NaO_2 dengan menguapkan senyawa CO dan H_2O [34]. Ini mampu menguraikan kerangka karbon bahan lignoselulosa dan mempertahankan struktur serat dan lembaran dalam sampel [93]. Juga, kombinasi struktur ini telah memberikan kontribusi besar untuk menemukan bahan ideal untuk elektroda superkapasitor kinerja tinggi [94].

Tabel 4.9. Analisis unsur nanosfer karbon berpori berbentuk koin

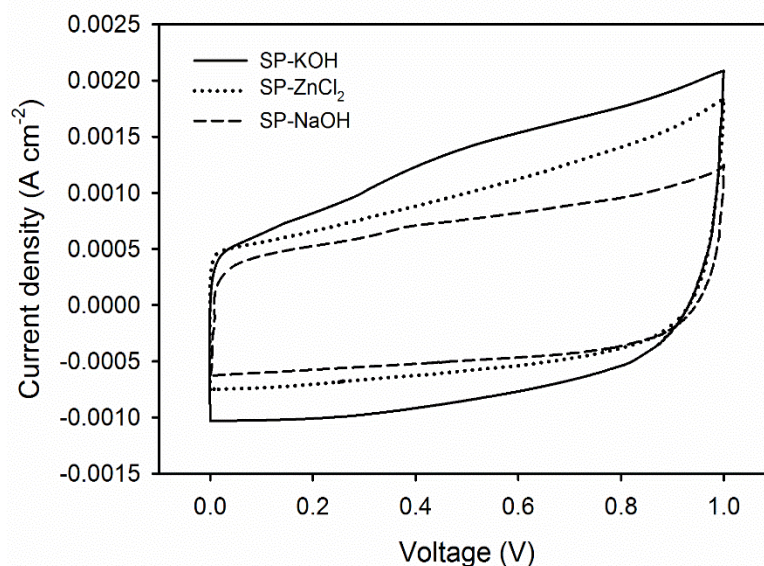
Sampel	Elemen					
	C (%)	O (%)	Mg (%)	Ca (%)	Si (%)	K (%)
SP-KOH	77,71	18,60	1,04	1,91	0,51	0,23
SP-ZnCl ₂	69,18	24,74	0,91	4,83	0,29	0,05
SP-NaOH	90,11	8,57	0,41	0,62	0,26	0,03

Tabel 4.9 menyajikan ringkasan rinci status unsur karbon aktif berbasis kulit bawang merah dengan impregnasi kimia yang berbeda. Secara umum, ketiga sampel karbon terkonfirmasi memiliki persentase unsur tertinggi sekitar 77,71% hingga 90,11%. Hal ini menunjukkan impregnasi kimia pada pirolisis suhu tinggi di lingkungan N_2 dan CO_2 berhasil mengubah prekursor biomassa menjadi karbon dengan kemurnian tinggi. Sampel SP-NaOH menghasilkan karbon tertinggi yaitu 90,11% diikuti sampel SP-KOH, dan SP-ZnCl₂ masing-masing 77,71% dan 69,11%. Oleh karena itu, penyediaan situs permukaan aktif muatan elektron dan ion untuk membentuk lapisan ganda elektrokimia yang tinggi sangat bermanfaat. Sedangkan oksigen memiliki persentase unsur tertinggi kedua berkisar antara 18,60% hingga 24,74%. Hal ini menunjukkan adanya senyawa oksidatif, misalnya CaO/CaCO_3 , MgO , dan SiO_2 pada semua sampel. Hasil ini dipastikan sama dengan analisis pola XRD yang telah dibahas sebelumnya. Oksigen unsur ini cenderung memberikan sifat keterbasahan bagi ion untuk berdifusi pada permukaan elektroda/elektrolit [95]. Juga, kontaminan lain termasuk Mg, Ca, Si, dan K hadir dalam senyawa oksidatif dalam jumlah yang relatif kecil, karena komponen biomassa dasar sebagian terurai selama proses pirolisis suhu tinggi [72].

4.3.1 Analisis perilaku elektrokimia

Sifat elektrokimia sel superkapasitor dikonfirmasi melalui voltametri siklik dan teknik pelepasan muatan galvanostatik dalam sistem konfigurasi dua elektroda. Sel superkapasitor disiapkan dalam bentuk lapisan sandwich dengan karbon aktif dalam desain seperti koin, tanpa penambahan perekat, termasuk PVP atau PFDV. Elektrolit yang dipilih adalah elektrolit encer 1M H_2SO_4 , sedangkan separator organik yang digunakan berasal dari membran cangkang telur bebek. Gambar 4.19 menunjukkan profil voltametri siklik untuk ketiga sampel yang dievaluasi pada laju pemindaian 1 mVs^{-1} . Gambar 4.19 menunjukkan bentuk persegi terdistorsi yang

menunjukkan sifat elektrokimia lapisan ganda yang relatif ideal dari biomassa berbasis karbon berpori [96]. Selanjutnya, kandungan oksigen yang tinggi sebesar 24,70% berkontribusi pada keterbasahan sampel, dan ini mungkin memberikan efek pseudokapasitansi pada sampel [55]. Profil ini belum sepenuhnya dikonfirmasi, namun ini terlihat samar-samar pada sampel SP-KOH, di mana kerapatan arus lonjakan kecil pada rentang tegangan 0,2-0,6V terjadi. Sapuan area loop histeresis tertutup juga mengkonfirmasi perilaku kapasitif bahan elektroda, di mana loop histeresis terbesar ditemukan pada sampel SP-KOH dan menunjukkan properti kapasitif tertinggi, diikuti oleh SP-ZnCl₂ dan SP-NaOH. Berdasarkan persamaan standar, sampel SP-KOH, SP-ZnCl₂, dan SP-NaOH memiliki kapasitansi spesifik masing-masing sebesar 151, 116, dan 91 F g⁻¹.

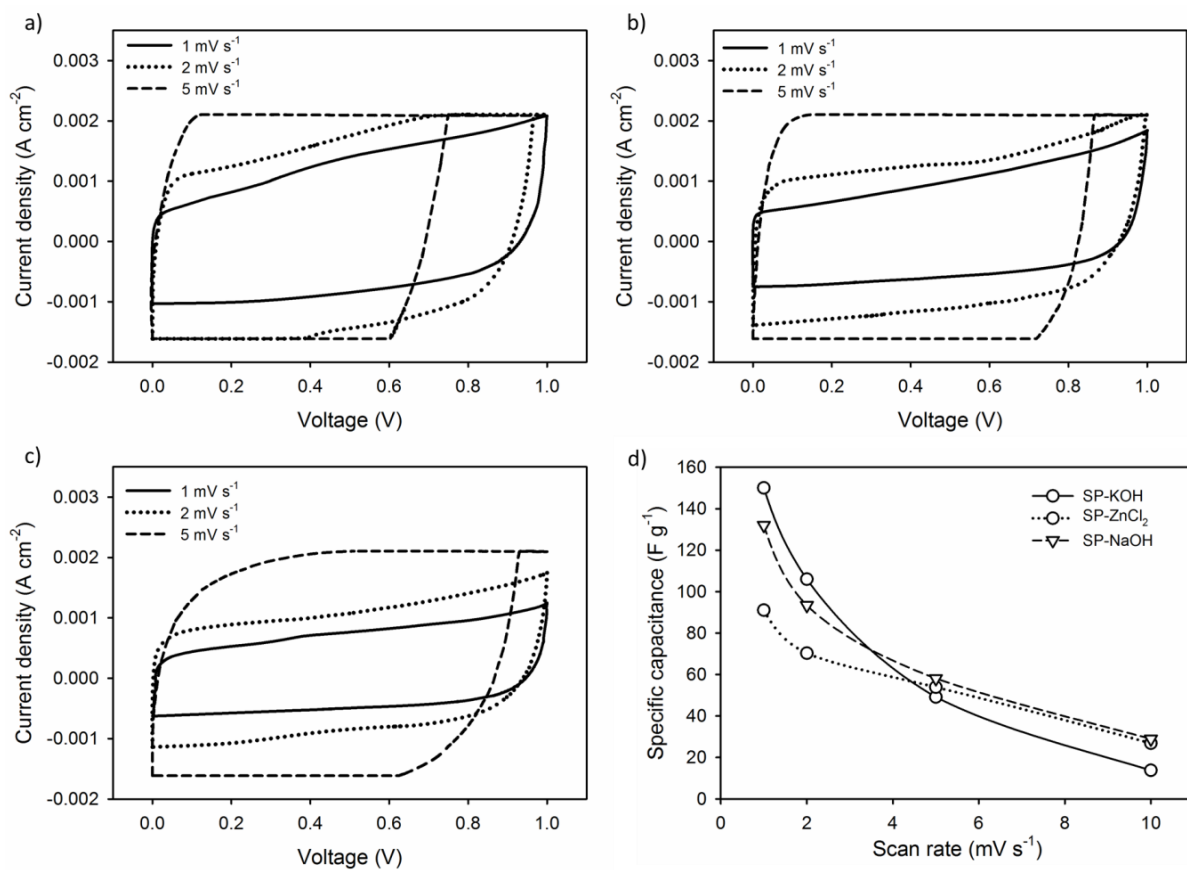


Gambar 4.19. Voltammogram CV SP-KOH, SP-ZnCl₂, dan SP-NaOH pada scan rate 1 mV s⁻¹

1

Struktur nano-spherical berdiameter tipis memungkinkan kerangka matriks karbon untuk menunjukkan luas permukaan spesifik yang tinggi 1182,23 m² g⁻¹ dan berbagai struktur pori dalam kisaran ukuran <50nm, oleh karena itu, memungkinkan mikropori dan mesopori yang kaya dalam karbon aktif [90]. Luas permukaan yang tinggi yang diprakarsai oleh struktur mikropori berkontribusi pada penyediaan situs aktif untuk difusi muatan ion elektrolit pada permukaan elektroda [52]. Selain itu, mesopori mengkonfirmasi saluran pembawa muatan yang lebih besar dan akibatnya, resistansi internal rendah. Kombinasi ini secara signifikan meningkatkan kapasitansi spesifik bahan elektroda seperti yang ditunjukkan pada sampel SP-KOH, sedangkan struktur nanofibers bertanggung jawab atas konduktivitas yang tinggi [97]. Performa elektroda juga dievaluasi melalui perbedaan kecepatan pemindaian. Gambar 4.20a-c

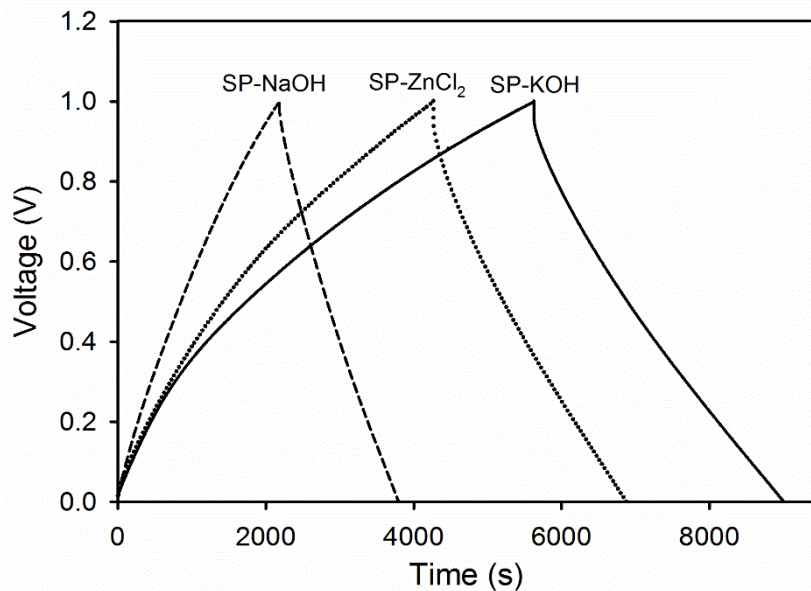
menunjukkan sampel SP-KOH, SP-ZnCl₂, dan SP-NaOH menampilkan kurva CV pada laju pemindaian 1, 2, dan 5 mV s⁻¹. Profil CV juga membentuk kurva persegi panjang terdistorsi yang menunjukkan perilaku EDLC normal, dan tingkat kejenuhan yang lebih cepat. Penerapan laju pemindaian juga secara signifikan mempengaruhi sifat kapasitif elektroda karbon. Menurut Gambar 4.20d kapasitansi spesifik berkurang pada tingkat pemindaian yang lebih rendah menjadi 10 mV s⁻¹, mengkonfirmasi struktur pori yang tidak terkontrol yang menghambat pengangkutan ion elektrolit pada permukaan elektroda. SP-ZnCl₂ tidak memiliki sifat kapasitif tertinggi serta luas permukaan spesifik, namun sampel mampu mempertahankan kapasitansi spesifik tertinggi sekitar 67,4% pada tingkat pemindaian tinggi 10 mV s⁻¹. Hal ini disebabkan adanya struktur nanofiber yang berkontribusi terhadap peningkatan konduktivitas, dan akibatnya mempertahankan sifat elektrokimia [97].



Gambar 4.20. Voltammogram CV pada laju pemindaian yang berbeda dari (a) SP-KOH, (b) SP-ZnCl₂, (c) SP-NaOH, dan (d) kapasitansi spesifik vs laju pemindaian

Gambar 4.21 menunjukkan semua sampel menunjukkan profil GCD segitiga sama kaki yang terganggu pada kerapatan arus konstan 1,0 A g⁻¹, menegaskan sifat elektrokimia lapisan ganda normal, dan ini konsisten dengan kurva CV yang ditunjukkan pada Gambar 4.19. Juga, Penurunan iR ditemukan tidak signifikan menunjukkan resistensi yang relatif rendah dalam

bahan elektroda. Waktu pengisian dan pengosongan di profil GCD secara signifikan mengkonfirmasi kinerja sel superkapasitor, dengan waktu pengosongan terpanjang diperoleh pada sampel SP-KOH, menunjukkan sifat kapasitif tertinggi, diikuti oleh sampel SP-ZnCl₂ dan SP-NaOH. Berdasarkan rumus standar, kapasitansi spesifik yang diperoleh untuk sampel SP-KOH, SP-ZnCl₂, dan SP-NaOH berturut-turut adalah 170,12, 127,4, serta 79,2 F g⁻¹, dan nilai ini sesuai dengan data yang diperoleh dari teknik CV .



Gambar 4.21. Profil GCD SP-KOH, SP-ZnCl₂, dan SP-NaOH pada rapat arus 1,0 A g⁻¹

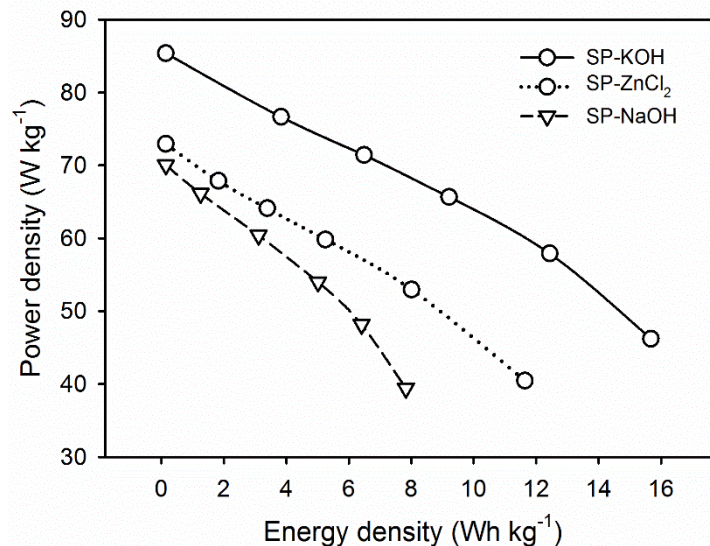
Selain itu, SP-KOH memiliki sifat material yang lebih unggul dibandingkan dengan dua sampel lainnya, terutama morfologi dan struktur nanosfer tipis diikuti oleh serat nano dengan luas permukaan spesifik yang lebih tinggi. Kombinasi struktur berukuran nano ini memungkinkan pembentukan pori-pori yang beragam, oleh karena itu, memberikan sifat mikroporositas yang tinggi serta sifat mesoporisitas dalam sampel, dan ini mengarah pada luas permukaan yang tinggi dan jalur difusi ion yang lebih besar, akibatnya, meningkatkan kinerja superkapasitor [41]. Dalam penelitian ini, adanya nanosfer berdiameter tipis dalam sampel SP-KOH menghasilkan resistansi internal yang relatif lebih tinggi yaitu 31mΩ, dibandingkan dengan SP-ZnCl₂ dan SP-NaOH masing-masing sebesar 22mΩ dan 10mΩ. Kehadiran nanosfer berdiameter tipis memungkinkan distribusi pori-pori kecil yang lebih dominan dan menyediakan lebih banyak situs aktif elektron/ion pada permukaan elektrolit/elektroda [98,99]. Namun, ini pada gilirannya sering secara signifikan mempersempit jalur migrasi muatan ionik, akibatnya, meningkatkan resistansi internal. Berbeda dengan sampel SP-NaOH, keberadaan struktur nanosheet mampu memperpendek jalur migrasi ion secara signifikan, oleh karena itu, memungkinkan difusi bebas tanpa gangguan pada permukaan elektrolit/elektroda, sekaligus

menghasilkan resistansi internal yang paling kecil, seperti yang dilaporkan dalam studi sebelumnya [94].

Tabel 4.10. Perbandingan sifat elektrokimia dari berbagai sumber bahan elektroda

Sumber	Struktur	SSA ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	C_{sp} (F g^{-1})	E (Wh kg^{-1})	P (W kg^{-1})	R (Ω)	Ref.
Batang alang-alang	<i>Nanosphere</i>	1792	198,6	3,5	20k	0,29	[99]
Glukosa	<i>Nanosphere</i>	1210	282	8,5	250	1,04	[100]
Berbasis pirol	<i>Nanosphere</i>	1347	395	-	-	0,77	[98]
Berasal dari Nikel dan Cobalt MOF	<i>Microsphere</i>	1135	1214	55,4	758,5	0,93	[101]
Polimer kuinon-amina	<i>Nanosphere</i>	2.671,2	273,9	8,0	80,3	-	[90]
Buah poplar Amerika	<i>Tubular-like</i>	942	58,71	7,99	372	1,97	[102]
Tangkai singkong	<i>Rod-like</i>	759,81	193,68	26,90	96,94	-	[36]
Kulit bawang mer	<i>Nanosphere</i>	1.182,2	170,12	16,67	86,40	0,031	This work

Energi spesifik dan daya spesifik karbon aktif berbahan dasar kulit bawang merah dievaluasi menggunakan persamaan standar (Gbr. 4.22).



Gambar 4.22. Plot Ragone energi spesifik dan daya spesifik karbon berpori nanosfer seperti koin

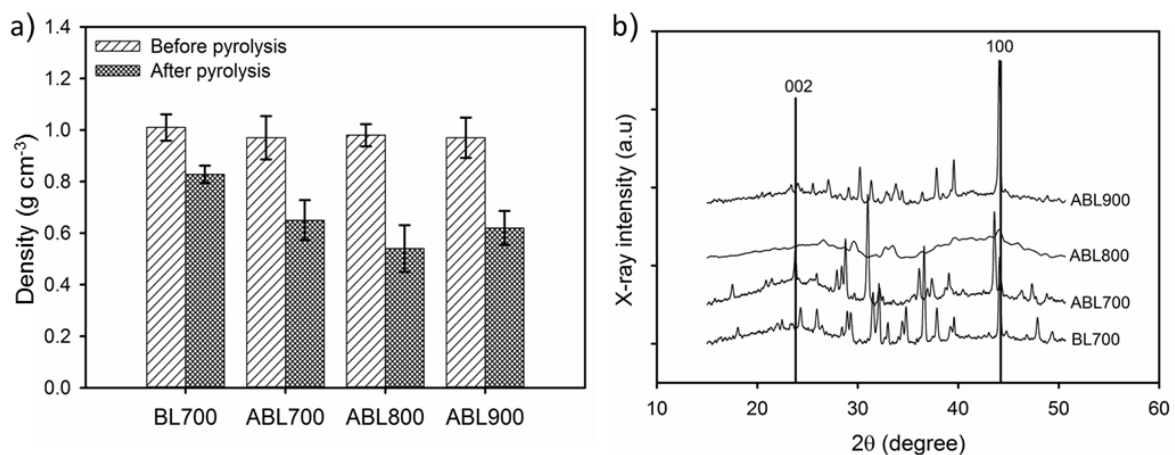
Plot Ragone menunjukkan energi spesifik tertinggi sebesar $16,67 \text{ Wh kg}^{-1}$ ditemukan pada sampel SP-KOH dengan daya spesifik maksimum $86,40 \text{ W kg}^{-1}$ pada rapat arus konstan

1,0 A g⁻¹, diikuti oleh SP-ZnCl₂ dan SP-NaOH sampel dengan energi spesifik 12,64 dan 8,82 Wh kg⁻¹ pada daya spesifik maksimum masing-masing 73,96 dan 71,07 W kg⁻¹. Berdasarkan Tabel 4.10, energi spesifik maksimum yang diperoleh dalam penelitian ini jauh lebih besar, dibandingkan dengan laporan lain di mana metode yang relatif kompleks yang membutuhkan bahan dasar sintesis digunakan.

4.4 Superkapasitor Dengan Kapasitif Sangat Tinggi dari Sumber Karbon Berpori 3d Berbasis Biomassa Melalui *Self-Oxygen Doped*

4.4.1 Analisis sifat fisis

Gambar 4.23(a) menunjukkan densitas bahan berbasis karbon berpori, karena impregnasi ZnCl₂ dan pirolisis langsung dengan adanya N₂/CO₂. Densitas sampel BL700, ABL700, ABL800, dan ABL900 sebelum pirolisis masing-masing berada pada 1,0100, 0,9700, 0,9800, dan 0,9700 g cm⁻³, dengan standar deviasi rata-rata 0,0627. Laporan sebelumnya mengkonfirmasi nilai-nilai ini dalam spesifikasi untuk sumber pengikat bebas karbon aktif. Namun, variabel menurun drastis setelah proses pirolisis sebesar 0,8280, 0,6500, 0,5400, dan 0,6200 g cm⁻³, dengan deviasi standar rata-rata 0,0662.



Gambar 4.23. (a) Densitas elektroda sebelum dan setelah pirolisis dan (b) Pola XRD karbon berpori dari daun pisang

Hasilnya diyakini memvalidasi impregnasi ZnCl₂ dalam pirolisis suhu sangat tinggi yang bertanggung jawab atas pengurangan kadar air, volatilitas, dan pemecahan senyawa karbon kompleks. Selanjutnya, ZnCl₂ berfungsi sebagai agen dehidrasi untuk menghancurkan rantai H dan O pada gugus fungsi pada suhu kurang dari 700 °C [103]. Ini menghasilkan penurunan densitas dari BL700 ke ABL700 sekitar 32,8%. Namun, ZnCl₂ dianggap sangat efektif pada suhu di bawah 500 °C, dan dalam reaksi selanjutnya dengan karbon, seng klorida terhidrasi (ZnCl₂·nH₂O) terbentuk [104]. Peningkatan efek panas cenderung menghidrolisis

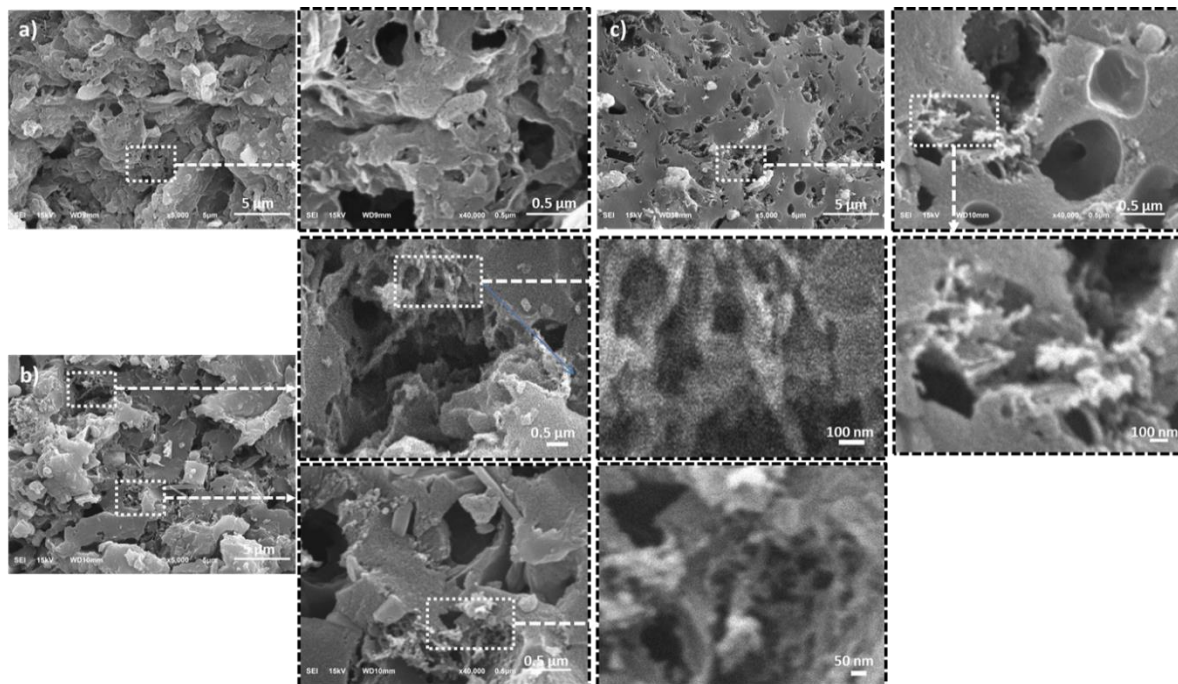
$ZnCl_2 \cdot nH_2O$ dan menghasilkan oksiklorida. Kenaikan suhu aktivasi fisika dari 700-800 °C secara signifikan menurunkan densitas sebesar 44,6%, seperti yang dikonfirmasi dalam ABL800. Penambahan suhu pirolisis yang lebih tinggi mempengaruhi porositas, dan memicu terbukanya pori-pori baru, memperbesar pori-pori yang sempit, serta memperbesar ukuran pori yang ada sehingga menyebabkan penurunan ABL800 maksimum sebesar 44,6%. Menariknya, ABL900 menunjukkan densitas yang sedikit lebih besar setelah pirolisis, dibandingkan dengan ABL800, karena perluasan pori karbon. Akibatnya, dinding pori tampak tidak mampu menahan bukaan baru, yang menyebabkan runtuhnya struktur pori, dan terjadinya densitas yang sedikit lebih tinggi pada ABL900, dibandingkan dengan ABL800.

Struktur kristal karbon berpori berbasis daun pisang dievaluasi menggunakan teknik difraksi sinar-X (XRD). Gambar 4.23(b) menunjukkan dua puncak lebar dalam profil XRD masing-masing pada $2\theta = 23-25^\circ$ dan $43-45^\circ$ (JCPDS: 00-041-1487), yang berkorelasi dengan bidang refleksi 002 dan 100. Selain itu, BL700 juga terlihat dua puncak lebar pada $2\theta=25,99^\circ$ (002) dan $2\theta=44,56^\circ$ (100), disertai dengan beberapa puncak tajam. Selain susunan karbon yang tidak teratur, berbagai struktur kristal unsur/senyawa, antara lain atom K pada $2\theta=35^\circ$ dan $2\theta=37^\circ$ [105], CaO/CaCO₃ pada $2\theta=29^\circ$, dan $2\theta=32^\circ$, serta SiO₂ pada $2\theta=39^\circ$ dan $2\theta=42^\circ$ (JCPDS 89-1668, 82-1690), juga ditemukan. Kejadian ini cenderung meningkatkan resistansi internal bahan karbon berpori dan menghambat sifat listrik elektroda superkapasitor. Selanjutnya, inklusi ZnCl₂ pada berbagai rentang suhu antara 700-900 °C di ABL700, ABL800, dan ABL900 menghasilkan profil yang sedikit terpisah dari jenis prekursor dengan dua puncak yang lebar, terutama pada bidang refleksi 002 menuju sudut yang lebih kecil $2\theta=23^\circ$. Keadaan ini disebabkan suhu pirolisis yang ekstensif diasumsikan mengganggu susunan karbon grafit dan membentuk pergeseran acak pada lapisan yang berdekatan, menghasilkan struktur karbon turbo-statis [34,35]. Karakteristik tersebut di atas berguna dalam memperkaya pori-pori karbon. Selain itu, pengaplikasian panas yang lebih tinggi dari 700-800 °C pada sampel ABL700 dan ABL800 mengurangi puncak tajam pada profil XRD, serta elemen/senyawa K, CaO/CaCO₃, dan SiO₂ dalam zat berkarbon. Hasil ini tentu saja dianggap sebagai sifat listrik yang cocok untuk elektroda karbon berpori. Namun, suhu ekstrim hingga 900 °C diasumsikan untuk meningkatkan derajat kristalinitas, meskipun jarak dari orientasi kristalinitas grafit semu [39]. Ini cenderung mengembalikan puncak tajam pada intensitas rendah, seperti yang dikonfirmasi dalam AL900. Sampel yang diresapi ZnCl₂ dari 700-900 °C dengan perubahan jarak antarlapisan (d_{002} , d_{100}) dan dimensi pseudo-kristal (L_c , L_a). Nilai d_{002}/d_{100} yang diamati lebih tinggi dalam kisaran 3.415-3.693 /2.032-2.127, dibandingkan dengan bahan berbasis grafit [34,94]. Ini menyarankan pembentukan struktur karbon amorf,

dengan nilai yang sangat mirip, seperti yang dilaporkan dalam beberapa penelitian sebelumnya. Dalam mengamati sifat fisis bahan berbasis karbon untuk superkapasitor dengan kinerja tinggi, dimensi pseudo-kristal L_c/L_a sering dikaitkan dengan luas permukaan spesifik, berdasarkan beberapa laporan sebelumnya [37]. Luas permukaan yang tinggi dikonfirmasi oleh rasio L_c/L_a yang relatif lebih besar. Tabel 4.11 menunjukkan sampel ABL800 dengan rasio L_c/L_a tertinggi, dan memprediksi kemungkinan luas permukaan spesifik maksimum. Hasil ini sesuai dengan karakterisasi isoterm adsorpsi/desorpsi N_2 .

Tabel 4.11. Jarak antar lapisan d_{002}, d_{100} dan dimensi pseudo-kristal L_c, L_a karbon berpori dari daun pisang

Sampel	$2\theta_{002}$ ($^\circ$)	$2\theta_{100}$ ($^\circ$)	d_{002} (\AA)	d_{100} (\AA)	L_c (\AA)	L_a (\AA)	L_c/L_a
BL700	25,232	44,111	3,509	2,073	9,263	37,478	0,247
ABL700	25,112	42,508	3,415	2,127	7,972	30,644	0,260
ABL800	24,077	43,616	3,693	2,032	6,401	21,752	0,294
ABL900	24,885	42,612	3,575	2,120	7,152	26,962	0,265



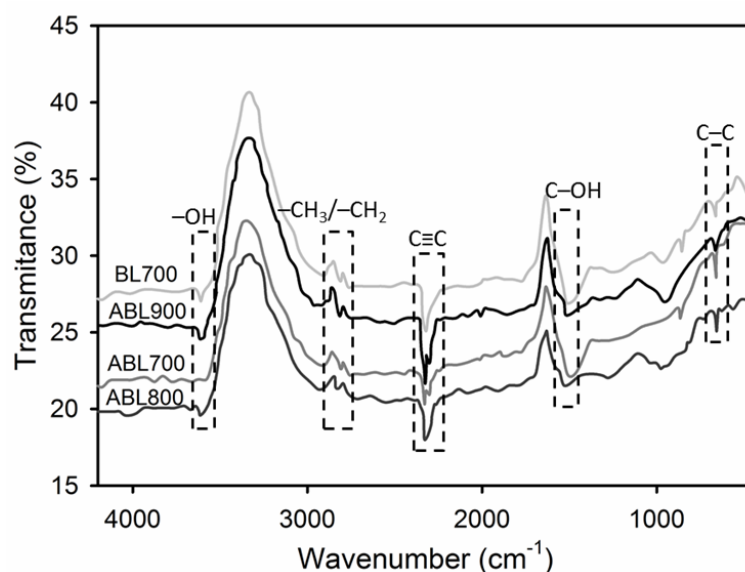
Gambar 4.24. Gambar SEM untuk (a) ABL700; (b) ABL800; dan (c) ABL900

Teknik SEM dengan beberapa perbesaran diterapkan untuk mengevaluasi struktur morfologi karbon aktif daun pisang teraktivasi $ZnCl_2$ pada berbagai suhu pirolisis. Sampel memiliki komponen kompleks lignoselulosa yang terdiri dari polimer selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Komponen impregnasi $ZnCl_2$ berfungsi sebagai agen dehidrasi/dehidrogenasi untuk menghilangkan ikatan matriks kompleks antara elemen lignoselulosa, untuk membentuk

kerangka karbon berpori yang sepenuhnya terdislokasi. Gambar 4.24(a) menjelaskan proses ini untuk secara simultan menghasilkan kombinasi pori dalam ukuran tertentu, seperti yang dikonfirmasi dalam morfologi permukaan sampel ABL700. Selain itu, mikrograf SEM ABL700 mengamati adanya pori makro pada kisaran 54-392 nm, dimana pembesaran ditandai dengan bagian putih. Juga, sejumlah kecil meso-pori terjadi antara perkiraan 27-38 nm, tetapi dengan permukaan yang relatif datar/halus. Selama pirolisis pada 700 °C, seng klorida bereaksi langsung dengan seluruh matriks karbon. Oksiklorida terbentuk sebagai produk sampingan pada suhu rendah, karena gas inert dibuang, meninggalkan kerangka karbon berpori yang diselingi dengan seng oksida [106]. Selain itu, meningkatkan suhu hingga 800 °C secara bersamaan menguapkan seng oksida dan pengotor lainnya [104]. Situasi ini secara tak terduga mengkonfirmasi kombinasi pori-pori makro dan mesopori yang terkait secara hierarkis, seperti yang ditunjukkan pada mikrograf SEM ABL800 (Gbr. 4.24(b)), dengan berbagai perbesaran. Pori-pori makro dan mesopori yang dihasilkan bervariasi dalam ukuran masing-masing dalam kisaran 57-288 nm dan 14-27 nm. Di bawah intensitas yang lebih tinggi, sampel ABL800 memvalidasi keberadaan makro/mesopori 3D, dengan distribusi permukaan yang seragam. Selain itu, pirolisis suhu tinggi dalam gas CO₂ memungkinkan pemurnian karbon dengan permukaan aktif. Karakteristik ini sangat diperlukan, dalam hal meningkatkan tingginya kinerja elektroda dalam sistem penyimpanan energi terbarukan [107,108]. Akibatnya, struktur morfologi dipertahankan sebagai struktur pori-pori makro/meso 3D yang stabil tanpa keruntuhan yang jelas (Gbr. 4.24(c)), setelah karbonisasi dan pirolisis suhu tinggi masing-masing pada 600 °C dan 900 °C. Namun, ukuran pori makro dan pori meso bergeser ke kisaran yang lebih besar antara 101-773 nm dan 36-46 nm. Konfigurasi ini memberikan kontak aktif ion tinggi dan stabilitas struktural dalam mendukung fungsionalitas yang luas dalam sistem penyimpanan energi [50].

Gugus fungsi permukaan memicu migrasi ion yang intens pada lapisan elektroda, karena impregnasi ZnCl₂ pada suhu pirolisis tinggi cenderung menghasilkan gugus polar tambahan pada bahan karbon aktif berbasis biomassa. Gambar 4.25 menunjukkan teknik FTIR untuk mengevaluasi komponen ini, berdasarkan sampel BL700, ABL700, ABL800, dan ABL900. Secara umum, seluruh bahan baku dipirolisis pada suhu tinggi, untuk mengurangi puncak serapan. Selanjutnya, absorbansi optimal sekitar 3612-3596 cm⁻¹ dan 1503-1477 cm⁻¹ sesuai dengan vibrasi ulur gugus hidroksil -OH dan C-OH [95]. Jelas, ABL800 dan ABL900 menunjukkan absorbansi yang kuat, dibandingkan dengan BL700 dan ABL700, sebagai akibat dari impregnasi ZnCl₂ suhu tinggi >800 °C. Namun, C-OH didominasi oleh ABL700, sementara absorbansi tinggi dari regangan -OH mungkin mempengaruhi sifat pseudo-kapasitif

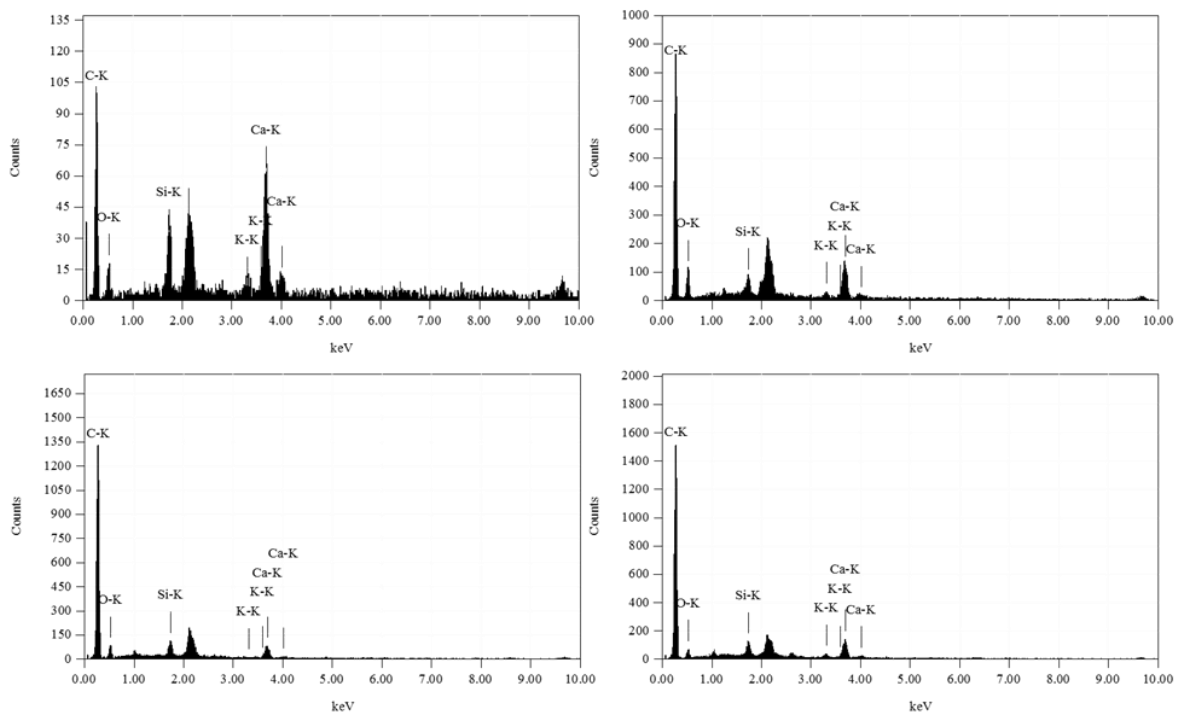
perangkat. Puncak $-\text{CH}_3/-\text{CH}_2$ pada bilangan gelombang 2828-2751 cm^{-1} jelas berkurang dengan meningkatnya suhu pirolisis, karena karbonisasi dan aktivasi yang tidak lengkap, di mana butil ester disubstitusi dengan gugus hidroksil [109]. Reaksi kimia ZnCl_2 dengan karbon prekursor pada pirolisis suhu tinggi dapat menghidrolisis $\text{ZnCl}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ dan menghasilkan oksiklorida (ZnOCl). Peningkatan suhu pirolisis dari 700 °C menjadi 900 °C memungkinkan produksi lebih banyak ZnOCl karena interaksinya dengan gas CO_2 . Penguapan Zn karena suhu tinggi dapat mengetsa rantai matriks karbon sehingga memulai pembentukan struktur pori 3D, seperti yang dikonfirmasi oleh mikrograf SEM. Kaya oksigen bebas tertinggal untuk mengikat karbon aktif dalam matriks. Dengan demikian, sampel dipengaruhi secara signifikan oleh efek heteroatom, sebagaimana dikonfirmasi dalam spektrum FTIR (gugus hidroksil $-\text{OH}$ dan $\text{C}-\text{OH}$). Selain itu, gugus fungsi CC , dan $\text{C}-\text{C}$ terjadi pada puncak 2330 cm^{-1} dan 702 cm^{-1} , dan sangat mengkonfirmasi sampel terimpregnasi ZnCl_2 pada suhu tinggi, karena seluruh bahan didominasi dengan kandungan karbon tinggi [110]. Analisis ini juga relevan dengan karakterisasi EDS yang dibahas lebih lanjut.



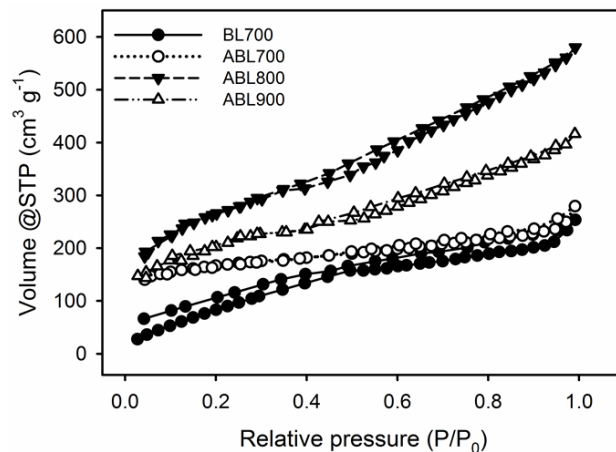
Gambar 4.25. Spektrum FTIR untuk BL700, ABL700, ABL800, dan ABL900.

Analisis EDS bertujuan untuk menguatkan kandungan unsur individu dari sampel daun pisang. Selain itu, spektrum mengamati lokasi dua puncak awal pada 0,277 dan 0,525 eV, di mana karbon berlimpah dengan dikonfirmasi adanya oksigen (Gbr. 4.26). Namun, BL700 menunjukkan jumlah puncak spektrum yang relatif tinggi dengan karbon dominan sebesar 57,59%, diikuti oleh pengotor lainnya, termasuk kalsium, oksigen, silika, dan komposisi kalium sebesar 18,98, 17,50, 4,60, dan 1,33%, dengan puncak energi masing-masing sebesar 3,690, 0,525, 1,739, dan 3,312 eV. Impregnasi ZnCl_2 pada berbagai suhu pirolisis cenderung

mempengaruhi konsentrasi karbon dan elemen lain dalam sampel ABL. Di bawah suhu aktivasi 700 °C, karbon secara drastis cenderung sebesar 70,09% dan oksigen sebesar 20,54%, sedangkan kalsium, silika, dan kalium menunjukkan penurunan bertahap (Gbr. 4.26(b)), karena kemungkinan oksidasi bahan prekursor dan penurunan unsur dasar biomassa [36,43]. Meningkatkan suhu aktivasi fisika masing-masing ke 800 dan 900 °C di ABL800 dan ABL900, cenderung sangat meningkatkan spektrum karbon antara 82,54-82,79%, (Gbr. 4.26c, d)). Selain itu, puncak spektrum pengotor, termasuk oksigen, silika, dan kalium mengalami penurunan yang sesuai sebesar 12,45-9,47%, 5,36-3,22%, 1,79-1,73%, dan 0,76-0,00%. Persentase karbon yang tinggi di ABLs memberikan jumlah yang relatif besar dari area kontak aktif dengan meningkatkan kinerja elektroda [27,111]. Selain itu, oksigen, sebagai elemen tertinggi kedua, berkontribusi dengan cara yang berbeda. Impregnasi $ZnCl_2$ pada suhu tinggi 700 °C hingga 900 °C secara signifikan memperkaya unsur oksigen. Hal ini disebabkan terbentuknya senyawa oksiklorida yang tinggi disertai dengan penguapan Zn akibat suhu tinggi, yang mengakibatkan tingginya kontribusi oksigen terhadap senyawa oksida. Prekursor karbon juga akan mendapat manfaat dari peningkatan keterbasahan serta hidrofilitas permukaan dan sifat pseudo-kapasitif [112,113]. Keadaan ini juga dikonfirmasi dalam voltametri siklik dan analisis pelepasan muatan galvanostatik. Oleh karena itu, keterbasahan dan perilaku hidrofilik dari permukaan elektroda juga memberikan kontribusi yang signifikan dalam mempromosikan adsorpsi elektrostatis superkapasitor.



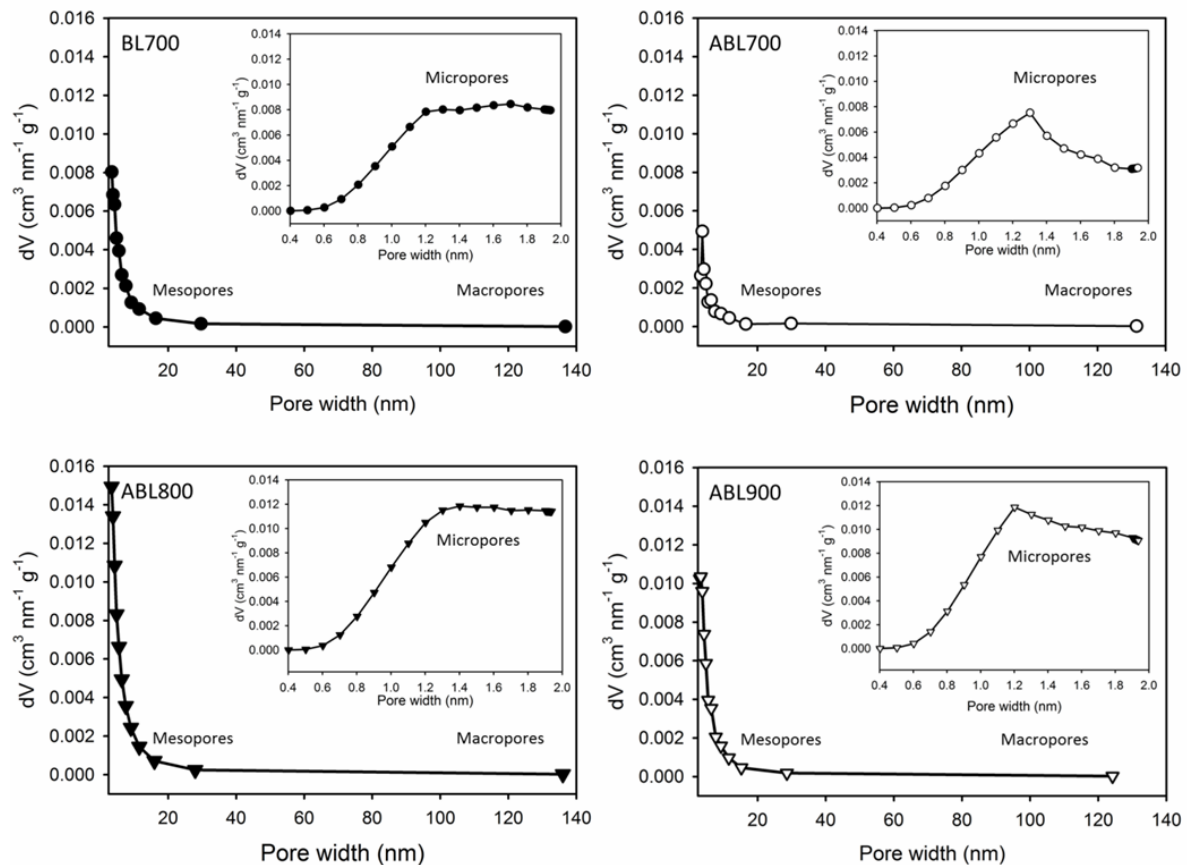
Gambar 4.26. EDS spectrum for (a) BL700; (b) ABL700; (c) ABL800; (d) and ABL900.



Gambar 4.27. Adsorpsi/desorpsi gas N₂ untuk BL700, ABL700, ABL800, dan ABL900

Perilaku porositas, luas permukaan, dan berbagai struktur ukuran pori digambarkan sebagai karakteristik utama dalam mengevaluasi potensi karbon aktif berpori hierarki. Selain itu, adsorpsi/desorpsi gas N₂ menyediakan metode yang tepat/akurat untuk menentukan luas permukaan spesifik dan distribusi ukuran pori. Gambar 4.27 menunjukkan isotherm adsorpsi/desorpsi N₂ yang terkait dengan khas tipe IV untuk semua sampel [46]. Namun, BL700 menghasilkan serapan linier yang terus-menerus rendah pada tekanan relatif $P/P_0 < 0,4$, diikuti oleh histeresis loop pada $0,4 < P/P_0 < 0,95$. Ini mengasumsikan kemunculan mikro dan mesopori yang konsisten dengan volume pori yang relatif rendah sebesar $0,4322 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ dan luas permukaan spesifik sebesar $429.590 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$. Menariknya, pembentukan loop histeresis tidak sepenuhnya tertutup karena perkembangan struktur mesopori dalam bentuk tutup botol, dengan rongga leher yang sempit untuk kondensasi kapiler yang tidak sempurna [47]. Selama injeksi ZnCl₂ pada suhu tinggi, sumber karbon berpori yang disiapkan menunjukkan kombinasi ideal karakteristik tipe IV dan loop histeresis H4, seperti yang diamati pada profil ABL700, ABL800, dan ABL900. Kedekatan garis adsorpsi-desorpsi horizontal bervariasi pada $P/P_0 < 0,35$, menunjukkan pori-pori mikro yang relatif luas dan loop histeresis yang sepenuhnya terkunci pada $0,45 < P/P_0 < 0,95$, dengan struktur mesopori normal acak dalam matriks karbon [114]. Selanjutnya, lonjakan adsorpsi pada $0,95 < P/P_0 < 1,0$ mengungkapkan adanya makropori kecil [58]. Ini memvalidasi pembentukan struktur mikro/meso/makro-pori yang terhubung secara hierarkis selama impregnasi. Selanjutnya, unsur karbon bereaksi dengan seng klorida pada $< 600 \text{ }^\circ\text{C}$ dengan adanya gas inert untuk menghasilkan seng oksiklorida. Selanjutnya, pada suhu pirolisis tinggi $< 800 \text{ }^\circ\text{C}$, seng oksida terurai membentuk mikro/mesopori [2,115]. Hal ini cenderung meningkatkan luas permukaan spesifik sebesar $860.410 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ dengan volume total $0,8974 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$. Temperatur aktivasi yang lebih tinggi $> 900 \text{ }^\circ\text{C}$ menguapkan unsur/senyawa Zn/CO₂ sebagai pengotor, menyebabkan ekspansi ukuran pori dan keberadaan meso/makropori

3D yang terkait secara hierarkis. Hasil ini mengkonfirmasi gambar SEM yang dilaporkan sebelumnya. Selain itu, perluasan ukuran pori menunjukkan penurunan luas permukaan spesifik menjadi $626.844 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, dengan total volume $0,6436 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$. Gambar 28 menunjukkan distribusi ukuran pori, menggunakan metode BJH. Semua sampel menunjukkan keberadaan pori mikro, meso, dan makro yang bertanggung jawab atas struktur pori hierarkis 3D.



Gambar 4.28. Distribusi ukuran pori untuk BL700, ABL700, ABL800, dan ABL900.

Akibatnya, distribusi ukuran pori dengan jelas menunjukkan pori-pori sub-mikro dengan peningkatan volume penyerapan, dan digambarkan sebagai karakteristik yang sangat penting dalam pengurangan nilai kapasitansi. Selain itu, adanya mesopori yang bervariasi memicu migrasi ion elektrolit yang seragam, tanpa hambatan yang besar [36,102]. Jumlah makroporositas yang lebih rendah menyediakan jalur transportasi ion ke semua arah. Impregnasi ZnCl_2 pada suhu pirolisis yang sama ($700 \text{ }^\circ\text{C}$) cenderung meningkatkan volume penyerapan pori mikro dari $0,1344$ menjadi $0,158 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$, dengan kemungkinan pengurangan diameter pori rata-rata $3,34 \text{ nm}$, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.12. Selain itu, suhu pirolisis yang lebih tinggi secara drastis meningkatkan keberadaan mikro dan mesopori serta volume penyerapan, diikuti oleh peningkatan mesopori sebesar 44%, berdasarkan ABL800. Karakteristik ini berguna dalam mengurangi resistansi sel elektroda [51,116]. Juga, suhu yang

lebih tinggi sedikit menurunkan diameter pori rata-rata menjadi 4,10 nm, seperti yang dikonfirmasi dalam ABL900. Tabel 4.12 menunjukkan sifat porositas sampel.

Tabel 4.12. Sifat porositas bahan karbon berpori dari daun pisang

Sampel	S_{BET} ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	S_{micro} ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	S_{meso} ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	V_{tot} (cm^3 g^{-1})	V_{micro} (cm^3 g^{-1})	V_{meso} (cm^3 g^{-1})	D_{aver} (nm)	Mesoporositas (%)
AC700	429,590	222,013	207,577	0,4323	0,1330	0,253	4,52	48
ACZ700	516,963	300,51	216,402	0,4864	0,1580	0,2742	3,34	41
ACZ800	860,410	480,163	380,163	0,8974	0,2994	0,598	4,17	44
ACZ900	626,844	339,259	287,585	0,6436	0,2096	0,434	4,10	45

4.4.2 Analisis perilaku elektrokimia

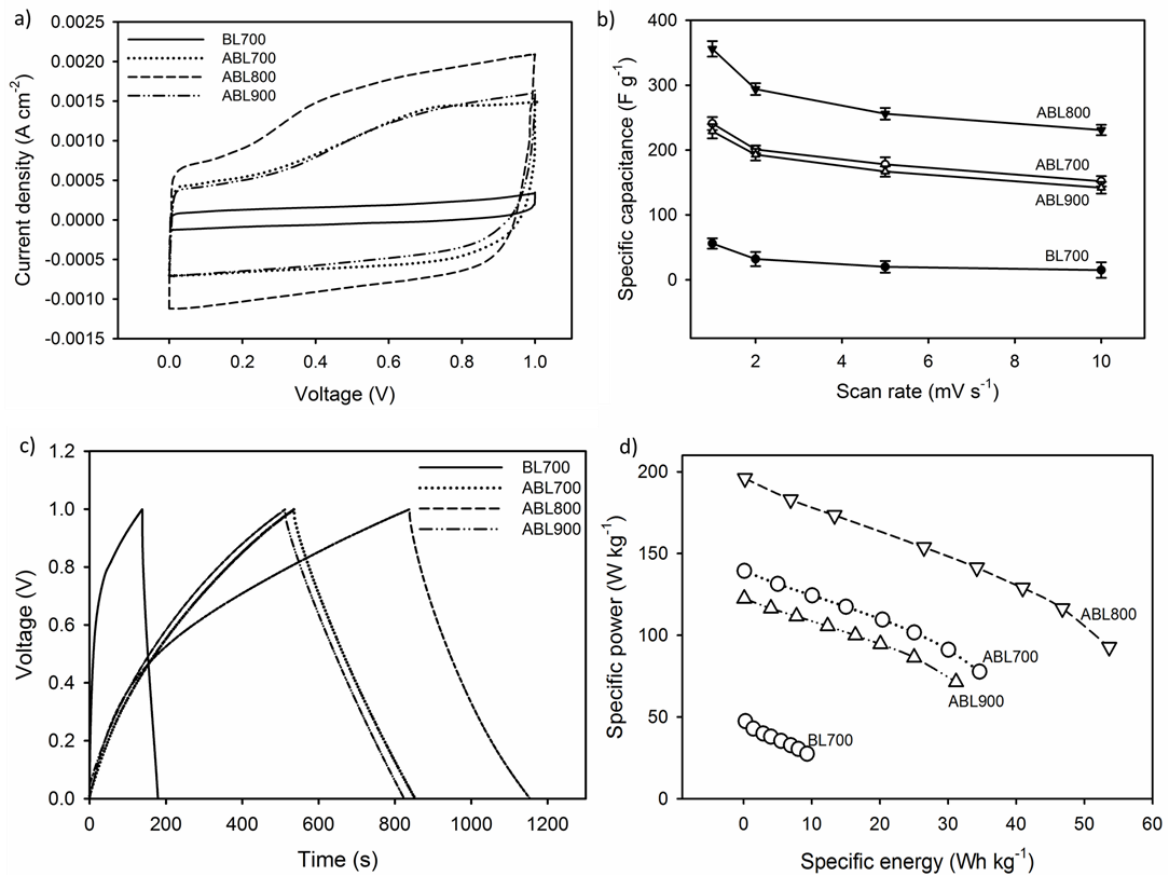
Karakteristik elektrokimia elektroda superkapasitor berbasis daun pisang dievaluasi menggunakan metode voltametri siklik dan galvanostatik *charge-discharge* dengan elektrolit berair 1 M H_2SO_4 dan 6 M KOH. Gambar 4.29(a) menunjukkan profil CV yang dipindai pada 1 mV s^{-1} , menggunakan larutan 1 M H_2SO_4 . Profil menyerupai bentuk persegi panjang terdistorsi khas disertai dengan puncak miring pada rentang potensial. Ini menegaskan sifat umum elektrokimia lapisan ganda (EDLC), diikuti oleh reaksi redoks sebagai perilaku kapasitansi semu berasal dari doping O-heteroatom sendiri [117,118]. Selanjutnya, jenis prekursor menunjukkan bentuk persegi panjang yang paling teratur, dibandingkan dengan yang lain. Namun, kapasitansi spesifik yang dihasilkan relatif lebih rendah, yaitu 56 F g^{-1} , dengan energi spesifik 8,05 Wh kg^{-1} . Pirolisis suhu tinggi sampel teraktivasi ZnCl_2 pada ABL700, ABL-800, dan ABL-900 menghasilkan lekukan puncak pada potensial dalam kisaran 0,2-0,8V. Hal ini menunjukkan perilaku timbal balik dari EDLC dan sifat pseudo-kapasitif yang disebabkan oleh dopan heteroatom oksigen sendiri [119]. Selain itu, kandungan karbon yang lebih tinggi, luas permukaan spesifik yang superior, dan keberadaan pori-pori yang terhubung secara hierarki diketahui secara signifikan memperpanjang sifat kapasitif masing-masing sebesar 238, 365, dan 219 F g^{-1} di ABL700, ABL800, dan ABL900. Gambar 4.29(a) menegaskan peningkatan oksigen di ABL700 jelas menunjukkan peningkatan sifat pseudo-kapasitif dan energi spesifik sebesar 33,05 Wh kg^{-1} . Peningkatan ini juga memicu pengembangan lebih lanjut dari pori-pori kaya mikro/meso hierarkis 3D dan kapasitansi maksimum dengan mempertahankan perilaku pseudo-kapasitif. Pori-pori yang tersebar bermanfaat bagi ion elektrolit untuk menghasilkan lapisan elektrostatik tambahan, menyediakan ruang difusi ke segala arah [79], mempertahankan jarak difusi yang relatif pendek untuk mendapatkan sifat kapasitif yang tinggi sebesar 365 F g^{-1} serta meningkatkan energi dan daya spesifik masing-masing ke 49,44 Wh kg^{-1} dan 178,18 W kg^{-1} . Namun, peningkatan suhu

pirolisis di atas 900 ° C diharapkan untuk mengurangi O-heteroatom, sambil mempertahankan fitur kapasitansi semu ABL900. Selain itu, keberadaan berbagai pori makro juga menunjukkan kapasitif unggul dengan energi spesifik dan daya spesifik masing-masing diperkirakan 30,41 Wh kg⁻¹ dan 109,61 W kg⁻¹.

Gambar 4.29(b) menunjukkan perubahan kapasitansi spesifik dengan laju pemindaian yang lebih tinggi 10 mV s⁻¹. Setiap sampel yang diaktifkan oleh ZnCl₂ selama pirolisis diyakini mempertahankan sifat kapasitif yang relatif luas dalam kisaran 60-80%. Namun, BL700 menunjukkan pengurangan kapasitansi spesifik yang cukup besar pada 45,3%. Sampel ABL800 melaporkan sifat kapasitif maksimum 308 F g⁻¹ dan mempertahankan kapasitansi spesifik sebesar 84,2% pada laju pemindaian 10 mV s⁻¹. Kehadiran pori-pori hierarkis 3D dan efek doping O-heteroatom terbukti efektif dalam mempertahankan transfer ion dan pembentukan listrik lapisan ganda pada bahan elektroda. Lebih lanjut, ABL700 dan ABL900 menunjukkan kapasitansi spesifik masing-masing sebesar 175 dan 154 F g⁻¹ pada laju pemindaian 10 mV s⁻¹.

Gambar 4.29(c) menunjukkan teknik GCD yang digunakan untuk mengevaluasi superkapasitor simetris dengan elektrolit 1 M H₂SO₄. Profil ini menggambarkan bentuk kuasi-segitiga, yang menunjukkan kombinasi sifat EDLC dan pseudo-kapasitif. Tabel 4.13 mengamati penurunan iR yang relatif. BL700 menghasilkan profil GCD yang jauh lebih rendah dengan kapasitansi spesifik 61 F g⁻¹. Selanjutnya, injeksi ZnCl₂ pada 700 °C secara tak terduga meningkatkan sifat kapasitif sel menjadi 258 F g⁻¹. Ini berkontribusi pada luas permukaan spesifik yang tinggi dengan kombinasi pori yang sesuai untuk meningkatkan kinerja elektroda. Namun, ABL800 menunjukkan durasi waktu pengisian dan pengosongan yang lebih tinggi, dibandingkan dengan sampel lain dengan kapasitansi spesifik tertinggi 401 F g⁻¹. Perpaduan mikro/meso/makropori yang terhubung secara hierarki, luas permukaan yang tinggi dengan mesoporositas besar sebesar 44%, dan kontribusi doping O-heteroatom sendiri diyakini berhasil meningkatkan kapasitansi spesifik sebesar 401 F g⁻¹ dan energi spesifik hingga 55,69 Wh kg⁻¹ dengan daya spesifik 200,09 W kg⁻¹. Energi spesifik yang diperoleh ini relatif 5 kali di atas kisaran pada plot Ragone [28]. Selanjutnya, suhu 900 ° C yang lebih tinggi menunjukkan profil segitiga parsial dengan sifat umum dan EDLC/pseudo-kapasitif yang terbukti, meskipun kandungan oksigennya berkurang. Kapasitansi spesifik dalam sampel ABL900 diperkirakan sebesar 241 F g⁻¹ dengan energi spesifik dan daya spesifik masing-masing 33,47 Wh kg⁻¹ dan 120,74 W kg⁻¹. Sebagai perbandingan, sifat elektrokimia menunjukkan peningkatan kinerja, dibandingkan dengan beberapa penelitian sebelumnya (Tabel 4.14). Sebagai tambahan, Gambar 29(d) menampilkan plot Ragone dari sampel BL700, ABL700, ABL-800, dan ABL-

900. Seperti ditunjukkan pada Gambar 29(d), energi spesifik tertinggi ditemukan setinggi 55,69 Wh kg⁻¹ pada daya spesifik optimum 200,90 W kg⁻¹ pada sampel ABL800.



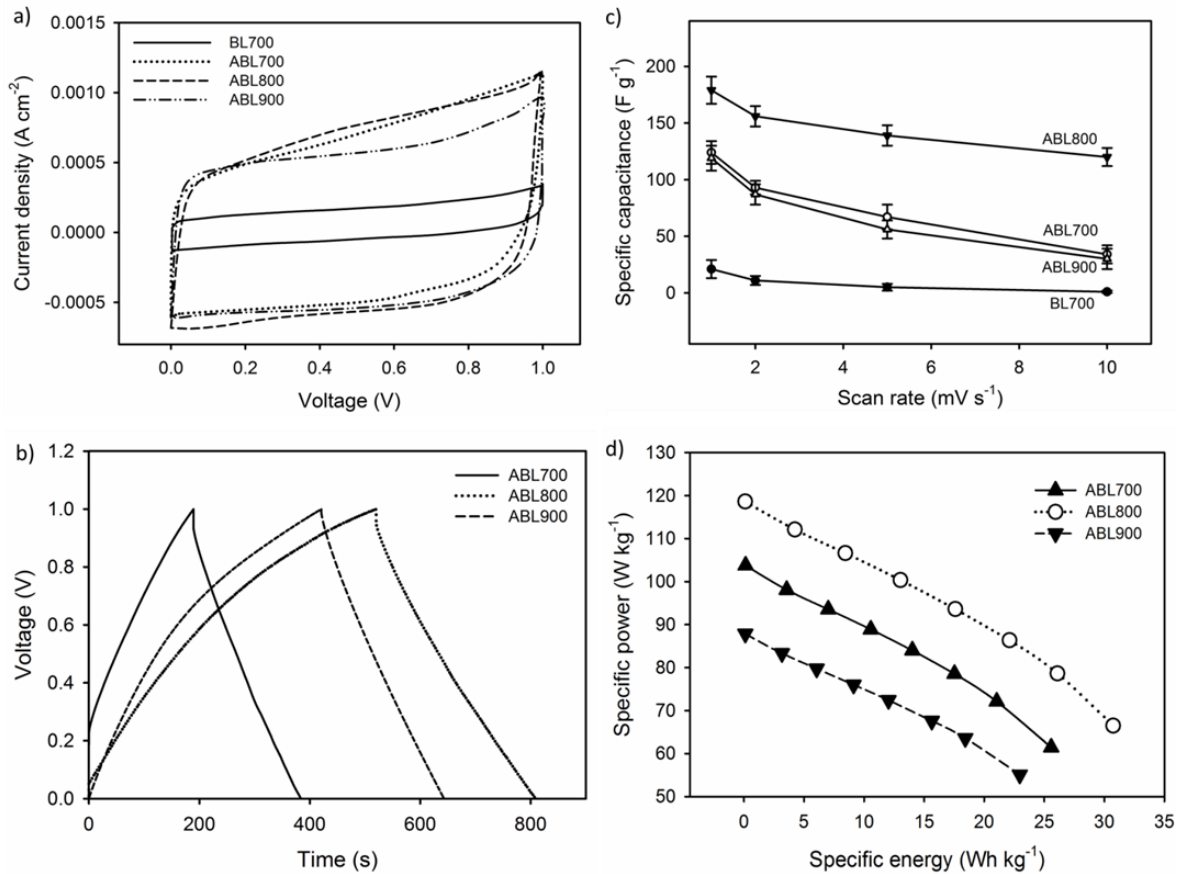
Gambar 4.29 (a) Profil CV untuk semua sampel; (b) Kurva C_{sp} vs. laju pemindaian; (c) Profil GCD untuk semua sampel; dan (d) Ragone plot dalam 1 M H₂SO₄.

Table 4.13. Performa elektrokimia elektroda superkapasitor berbasis *self-oxygen-doped* pori 3D berbasis limbah daun pisang

Sampel	CV						GCD							
	1 M H ₂ SO ₄			6 M KOH			1 M H ₂ SO ₄			6 M KOH				
	C _{sp}	E _{sp}	P _{sp}	C _{sp}	E _{sp}	P _{sp}	C _{sp}	E _{sp}	P _{sp}	R	C _{sp}	E _{sp}	P _{sp}	R
BL700	56	8,05	29,03	31	2,92	10,51	61	9,16	33,09	8	-	-	-	-
ABL700	238	33,05	119,12	124	17,22	62,06	258	35,83	129,25	22	198	27,50	99,19	41
ABL800	365	49,44	178,18	179	24,86	89,58	401	55,69	200,90	10	235	32,63	117,62	35
ABL900	219	30,41	109,61	119	16,53	59,55	241	33,47	120,74	9	181	25,14	90,68	12

Gambar 4.30(a) menyoroti evaluasi sel superkapasitor dalam elektrolit KOH 6 M untuk sistem dua elektroda, yang bertujuan untuk memberikan analisis komprehensif tentang sifat kapasitif. Kurva CV berbentuk persegi panjang terdistorsi, menunjukkan fitur normal dari lapisan ganda listrik. Selain itu, efek heteroatom oksigen sendiri dikonfirmasi, tetapi tidak terlalu jelas. Kapasitansi spesifik untuk BL700, ABL700, ABL800, dan ABL900 dihasilkan masing-masing pada 31, 124, 179, dan 119 F g⁻¹. Gambar 4.30(b) secara konsisten

menunjukkan bentuk kuasi-segitiga yang meningkatkan sifat EDLC normal, diikuti oleh pseudo-kapasitif dalam elektrolit alkali 6 M KOH. Berdasarkan profil GCD, kapasitansi spesifik BL700, ABL700, ABL800, dan ABL900 diperkirakan sebesar 46, 198, 235, dan 181 F g⁻¹. Nilai tersebut relatif lebih rendah dibandingkan dengan elektrolit asam 1 M H₂SO₄. Umumnya, elektrolit asam dan basa diketahui mempengaruhi sifat elektrokimia dengan ukuran anionik dan kationik, mobilitas, serta konduktivitas tergantung pada distribusi ukuran pori bahan dasar. Dalam penelitian ini, kationik H⁺ diperoleh ukuran ion yang lebih kecil dari K⁺, dengan kemampuan menembus pori-pori yang sangat kecil dan meluas ke bukaan elektroda secara keseluruhan. Sebaliknya, K⁺ dengan ukuran ion yang relatif lebih besar cenderung mengurangi mobilitas ion dan kapasitansi spesifik elektroda [62]. Selain itu, kation H⁺ dengan konduktivitas ionik optimal 350,1 cm² Ω⁻¹ mol⁻¹, mewakili hampir lima kali kation K⁺ sebesar 73,5 cm² Ω⁻¹ mol⁻¹, dan oleh karena itu, lebih mudah untuk bermigrasi menuju permukaan elektroda/elektrolit [120]. Selanjutnya, profil GCD dari elektrolit KOH 6 M jelas menunjukkan penurunan iR relatif. Sampel ABL700 menghasilkan resistansi sel sebesar 41 mΩ, sedangkan suhu pirolisis yang lebih tinggi pada ABL800 dan ABL900 cenderung menurunkan resistansi sel masing-masing menjadi 35 dan 12 mΩ. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya struktur pori dan mesoporositas yang disajikan pada elektroda. ZnCl₂ dan kenaikan suhu aktivasi fisika mungkin memperpanjang distribusi ukuran pori, dalam upaya untuk mempromosikan aksesibilitas ion yang halus pada permukaan elektroda/elektrolit, tanpa bentuk resistensi apa pun. Selain itu, Semua sampel juga dipindai pada kecepatan lebih tinggi 10 mV s⁻¹ dalam elektrolit KOH 6 M untuk mempertahankan kapasitas perangkat antara 50-70%. Selain itu, ABL800 menunjukkan retensi maksimum 69,98% (Gbr. 4.30(c)), dan juga mampu menghasilkan sifat kapasitif yang optimal pada elektrolit KOH 6 M. Ini mengkonfirmasi adanya pori-pori hierarkis 3D dan dopan heteroatom oksigen-sendiri dengan kecenderungan untuk meningkatkan sifat elektrokimia elektroda superkapasitor. Selain itu, energi dan daya spesifik juga dievaluasi dalam elektrolit KOH 6 M, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.30(d). Plot Ragone pada Gambar 4.30(d) menegaskan bahwa sampel ABL800 memiliki energi spesifik tertinggi 32,63 Wh kg⁻¹ pada daya spesifik optimum 117,62 W kg⁻¹.



Gambar 4.30. (a) Profil CV untuk semua sampel; (b) Kurva C_{sp} vs. laju pemindaian; (c) Profil GCD untuk semua sampel (d) Ragone plot dalam 6 M KOH

Umumnya, berbagai teknik digunakan dalam mengukur sifat elektrokimia, termasuk CV dan GCD. Namun, metode yang dipilih tidak diharapkan menunjukkan hasil yang bertentangan. Dalam penelitian ini, dua prosedur yang disebutkan di atas digunakan untuk menunjukkan kontribusi masing-masing, dalam hal mengevaluasi kinerja sifat elektrokimia, khususnya dalam sistem konfigurasi dua elektroda. Selanjutnya, pendekatan CV memanfaatkan data rapat arus, berdasarkan jendela tegangan tetap pada laju pemindaian tertentu, sedangkan GCD menunjukkan data waktu yang diukur terhadap tegangan dengan rapat arus konstan [121]. Hasil kumulatif mengkonfirmasi sifat-sifat superkapasitor sampel. Studi ini, bagaimanapun, mengungkapkan sedikit variasi dalam sifat kapasitif antara CV dan GCD. Kapasitansi spesifik yang dihasilkan oleh GCD menunjukkan nilai yang cukup tinggi, dibandingkan dengan CV, karena parameter GCD yang cukup kompleks [122]. Selain itu, pengukuran GCD mungkin memvalidasi drop tegangan, resistansi internal, dan reaktansi, untuk memperoleh kapasitansi spesifik yang melimpah antara 5-10%, dibandingkan dengan CV [123,124]. Hasil ini sesuai dengan ketentuan yang diuraikan pada Tabel 4.14. Secara

keseluruhan, analisis juga disampaikan oleh beberapa peneliti yang berpengalaman dalam penerapan kedua teknik yang diterapkan.

Tabel 4.14. Bahan dan sifat elektrokimia karbon berpori yang didoping heteroatom dibandingkan dengan sumber yang berbeda dalam superkapasitor simetris.

Material	Struktur pori	Elektrolit	C_{sp} ($F g^{-1}$)	E_{sp} ($Wh kg^{-1}$)	P_{sp} ($W kg^{-1}$)	Ref.
Selulosa mikrokristalin	<i>Interconnected pores</i>	6 M KOH	160	17,81	180,11	[125]
Lubang jujube liar	<i>Interconnected micro-, meso-, macropores</i>	1 M Na_2SO_4	260	13,33	16,000	[126]
Daun indikalamus	<i>3D Hierarchical porous</i>	6 M KOH	326	23,70	224.5	[127]
Makanan dari kacang kedelai	<i>Interconnected Honeycomb structure</i>	1 M H_2SO_4	360	10,00	-	[128]
<i>Pollen-cone</i>	<i>Hierarchical porous</i>	ILGPE	146	21	190	[91]
Kulit pohon cemara	<i>Sphere-like</i>	6 M KOH	91	9,33	400	[129]
Kulit kacang	<i>Hierarchical porous</i>	6 M KOH	306	40,92	990	[130]
Air seni	<i>Hierarchical porous</i>	6 M KOH	166	12,7	337,84	[131]
Polimer kuinon-amina	<i>Nano-sphere</i>	6 M KOH	273,9	8,0	-	[90]
Kulit jeruk bali	<i>Hierarchical porous</i>	6 M KOH	144	-	-	[132]
serbuk gergaji kayu cemara Cina	<i>Hierarchical porous</i>	6 M KOH	324	-	-	[133]
Daun pisang	<i>3D porous</i>	1 M H_2SO_4	401	55,69	200,90	This work

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari serangkaian penelitian yang telah dilakukan, Dapat disimpulkan bahwa:

1. Untuk sampel dari limbah daun pisang yang disintesis dengan menggunakan variasi suhu aktivasi fisika (700, 800, dan 900 °C), diperoleh karbon dengan struktur pori hirarkis 3D dengan perilaku elektrokimia pada rapat arus 1 A g⁻¹ dalam elektrolit asam dan basa dengan sifat kapasitif sebesar 245 F g⁻¹ dan 211 F g⁻¹ serta dengan energi spesifik yang sangat baik untuk 34,67 Wh kg⁻¹.
2. Elektroda karbon superkapasitor dengan struktur nanofiber/nanosheet karbon berpori berongga yang berasal dari limbah kulit jengkol disintesis melalui aktivasi kimia dan aktivasi fisik dalam pirolisis langsung. Dua agen aktivator yang berbeda, KOH dan ZnCl₂ digunakan untuk meningkatkan keunggulan kinerja elektroda untuk piranti superkapasitor. Lebih lanjut lagi, aktivator KOH menghasilkan morfologi unik dari nanofiber berongga, serta peningkatan sifat porositas yang berhasil dengan peningkatan SSA secara signifikan dari 15 m² g⁻¹, 163 m² g⁻¹ menjadi 1041,900 m² g⁻¹. Sebaliknya, aktivator ZnCl₂ menunjukkan struktur nanosheet yang unik, yang ditingkatkan oleh mikro dan mesopori. Sifat elektrokimia diuji dengan sistem dua elektroda menunjukkan kapasitansi spesifik yang tinggi yaitu 213 F g⁻¹ dengan energi, dan rapat daya masing-masing sebesar 29,6 Wh kg⁻¹, dan 106,6 W kg⁻¹.
3. Untuk sampel elektroda karbon dari kulit bawang merah yang disintesis dengan menggunakan variasi bahan pengaktif (KOH, ZnCl₂ dan NaOH) secara signifikan menghasilkan struktur nano yang berbeda yaitu nanospheres, diikuti oleh nanofibers dan nanosheets. Kombinasi sifat nanostruktur ini mampu meningkatkan kapasitansi spesifik material sebesar 170 F g⁻¹ dalam elektrolit 1 M H₂SO₄.

5.2 Saran

Untuk meningkatkan hasil penelitian terkait optimalisasi proses penyediaan elektroda agar diperoleh superkapasitor dengan rapat energi dan daya tinggi, ada beberapa hal yang perlu dilakukan seperti (i) untuk mengkonfirmasi struktur nano pada permukaan elektroda, perlu dilakukan pengujian menggunakan TEM (ii) pengujian sifat elektrokimia elektroda dengan menggunakan metode *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. Raza, F. Ali, N. Raza, Y. Luo, K.H. Kim, J. Yang, S. Kumar, A. Mehmood, E.E. Kwon, Recent advancements in supercapacitor technology, *Nano Energy*. 52 (2018) 441–473. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.08.013>.
- [2] A. González, E. Goikolea, J.A. Barrena, R. Mysyk, Review on supercapacitors: Technologies and materials, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 58 (2016) 1189–1206. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.249>.
- [3] A. Borenstein, O. Hanna, R. Attias, S. Luski, T. Brousse, D. Aurbach, Carbon-based composite materials for supercapacitor electrodes: A review, *J. Mater. Chem. A*. 5 (2017) 12653–12672. <https://doi.org/10.1039/c7ta00863e>.
- [4] H. Chen, Y.C. Guo, F. Wang, G. Wang, P.R. Qi, X.H. Guo, B. Dai, F. Yu, An activated carbon derived from tobacco waste for use as a supercapacitor electrode material, *New Carbon Mater.* 32 (2017) 592–599. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(17\)60140-9](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(17)60140-9).
- [5] Y. Zhang, X. Li, J. Huang, W. Xing, Z. Yan, Functionalization of Petroleum Coke-Derived Carbon for Synergistically Enhanced Capacitive Performance, *Nanoscale Res. Lett.* 11 (2016) 163–169. <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1382-0>.
- [6] M. Deraman, N.S.M. Nor, E. Taer, B. Yatim, Awitdrus. A., R. Farma, N.H. Basri, M.A.R. Othman, R. Omar, M.R.M. Jasni, R. Daik, S. Soltaninejad, M. Suleman, G. Hegde, A.A. Astimar, Review of energy and power of supercapacitor using carbon electrodes from fibers of oil palm fruit bunches, *Mater. Sci. Forum.* 846 (2016) 497–504. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.846.497>.
- [7] C. Wang, Y. Xiong, H. Wang, Q. Sun, All-round utilization of biomass derived all-solid-state asymmetric carbon-based supercapacitor, *J. Colloid Interface Sci.* 528 (2018) 349–359. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.05.103>.
- [8] E. Taer, M.A. Mardiah, A. Agustino, W.S. Mustika, A. Apriwandi, R. Taslim, A green and low-cost of mesoporous electrode based activated carbon monolith derived from fallen teak leaves for high electrochemical performance, *J. Appl. Eng. Sci.* 19 (2021) 162–171. <https://doi.org/10.5937/jaes0-27589>.
- [9] C. Lu, Y.H. Huang, Y.J. Wu, J. Li, J.P. Cheng, Camellia pollen-derived carbon for supercapacitor electrode material, *J. Power Sources.* 394 (2018) 9–16.

- <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.05.032>.
- [10] X. Zhu, S. Yu, K. Xu, Y. Zhang, L. Zhang, G. Lou, Y. Wu, E. Zhu, H. Chen, Z. Shen, B. Bao, S. Fu, Sustainable activated carbons from dead ginkgo leaves for supercapacitor electrode active materials, *Chem. Eng. Sci.* 181 (2018) 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.02.004>.
- [11] A.A. Mohammed, C. Chen, Z. Zhu, Low-cost, high-performance supercapacitor based on activated carbon electrode materials derived from baobab fruit shells, *J. Colloid Interface Sci.* 538 (2019) 308–319. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.11.103>.
- [12] E. Elaiyappillai, R. Srinivasan, Y. Johnbosco, P. Devakumar, K. Murugesan, K. Kesavan, P.M. Johnson, Low cost activated carbon derived from Cucumis melo fruit peel for electrochemical supercapacitor application, *Appl. Surf. Sci.* 486 (2019) 527–538. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.05.004>.
- [13] M. Song, Y. Zhou, X. Ren, J. Wan, Y. Du, G. Wu, F. Ma, Biowaste-based porous carbon for supercapacitor: The influence of preparation processes on structure and performance, *J. Colloid Interface Sci.* 535 (2019) 276–286. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.09.055>.
- [14] X. Song, X. Ma, Y. Li, L. Ding, R. Jiang, Tea waste derived microporous active carbon with enhanced double-layer supercapacitor behaviors, *Appl. Surf. Sci.* 487 (2019) 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.04.277>.
- [15] B. Karamanova, A. Stoyanova, M. Shipochka, C. Girginov, R. Stoyanova, On the cycling stability of biomass-derived carbons as electrodes in supercapacitors, *J. Alloys Compd.* 803 (2019) 882–890. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.334>.
- [16] W. Du, Z. Zhang, L. Du, X. Fan, Z. Shen, X. Ren, Y. Zhao, C. Wei, S. Wei, Designing synthesis of porous biomass carbon from wheat straw and the functionalizing application in flexible, all-solid-state supercapacitors, *J. Alloys Compd.* 797 (2019) 1031–1040. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.05.207>.
- [17] Y. Zhang, J. He, Z. Gao, X. Li, Converting eggs to flexible, all-solid supercapacitors, *Nano Energy.* 65 (2019) 104045. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104045>.
- [18] X. Bo, K. Xiang, Y. Zhang, Y. Shen, S. Chen, Y. Wang, M. Xie, X. Guo, Microwave-assisted conversion of biomass wastes to pseudocapacitive mesoporous carbon for high-performance supercapacitor, *J. Energy Chem.* 39 (2019) 1–7.

<https://doi.org/10.1016/j.jechem.2019.01.006>.

- [19] F. Guo, X. Jiang, X. Jia, S. Liang, L. Qian, Z. Rao, Synthesis of biomass carbon electrode materials by bimetallic activation for the application in supercapacitors, *J. Electroanal. Chem.* 844 (2019) 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.05.004>.
- [20] E. Taer, R. Taslim, W.S. Mustika, B. Kurniasih, Agustino, A. Afrianda, Apriwandi, Production of an activated carbon from a banana stem and its application as electrode materials for supercapacitors, *Int. J. Electrochem. Sci.* 13 (2018) 8428–8439. <https://doi.org/10.20964/2018.09.55>.
- [21] E. Taer, A. Afrianda, R. Taslim, K. Krisman, M. Minarni, A. Agustino, A. Apriwandi, U. Malik, The physical and electrochemical properties of activated carbon electrode made from Terminalia Catappa leaf (TCL) for supercapacitor cell application, *J. Phys. Conf. Ser.* 1120 (2018) 012007-1-012007–8. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1120/1/012007>.
- [22] E. Taer, A. Apriwandi, Y.S. Ningsih, R. Taslim, Agustino., Preparation of activated carbon electrode from pineapple crown waste for supercapacitor application, *Int. J. Electrochem. Sci.* 14 (2019) 2462–2475. <https://doi.org/10.20964/2019.03.17>.
- [23] S. Ahmed, M. Parvaz, R. Johari, M. Rafat, Studies on activated carbon derived from neem (*azadirachta indica*) bio-waste, and its application as supercapacitor electrode, *Mater. Res. Express.* 5 (2018) 045601-1-045601–12. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aab924>.
- [24] J.Y. Chen, L. Sun, I.I. Negulescu, B. Xu, Fabrication and evaluation of regenerated cellulose/nanoparticle fibers from lignocellulosic biomass, *Biomass and Bioenergy.* 101 (2017) 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.03.024>.
- [25] M.A. Yahya, Z. Al-Qodah, C.W.Z. Ngah, Agricultural bio-waste materials as potential sustainable precursors used for activated carbon production: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 46 (2015) 218–235. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.051>.
- [26] E. Azwar, W.A. Wan Mahari, J.H. Chuah, D.V.N. Vo, N.L. Ma, W.H. Lam, S.S. Lam, Transformation of biomass into carbon nanofiber for supercapacitor application – A review, *Int. J. Hydrogen Energy.* 43 (2018) 20811–20821. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.111>.

- [27] S.E.M. Pourhosseini, O. Norouzi, H.R. Naderi, Study of micro/macro ordered porous carbon with olive-shaped structure derived from *Cladophora glomerata* macroalgae as efficient working electrodes of supercapacitors, *Biomass and Bioenergy*. 107 (2017) 287–298. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.10.025>.
- [28] T. Ramesh, N. Rajalakshmi, K.S. Dhathathreyan, L.R.G. Reddy, Hierarchical Porous Carbon Microfibers Derived from Tamarind Seed Coat for High-Energy Supercapacitor Application, *ACS Omega*. 3 (2018) 12832–12840. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b01850>.
- [29] E. Taer, A. Apriwandi, R. Taslim, U. Malik, Z. Usman, Single step carbonization-activation of durian shells for producing activated carbon monolith electrodes, *Int. J. Electrochem. Sci.* 14 (2019) 1318–1330. <https://doi.org/10.20964/2019.02.67>.
- [30] F. Ma, S. Ding, H. Ren, Y. Liu, Sakura-based activated carbon preparation and its performance in supercapacitor applications, *RSC Adv.* 9 (2019) 2474–2483. <https://doi.org/10.1039/c8ra09685f>.
- [31] G. Sun, L. Qiu, M. Zhu, K. Kang, X. Guo, Activated carbons prepared by hydrothermal pretreatment and chemical activation of *Eucommia ulmoides* wood for supercapacitors application, *Ind. Crops Prod.* 125 (2018) 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.08.082>.
- [32] O. Boujibar, A. Ghosh, O. Achak, T. Chafik, F. Ghamouss, A high energy storage supercapacitor based on nanoporous activated carbon electrode made from Argan shells with excellent ion transport in aqueous and non-aqueous electrolytes, *J. Energy Storage*. 26 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100958>.
- [33] Y. Li, X. Wang, M. Cao, Three-dimensional porous carbon frameworks derived from mangosteen peel waste as promising materials for CO₂ capture and supercapacitors, *J. CO₂ Util.* 27 (2018) 204–216. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2018.07.019>.
- [34] J. Serafin, M. Baca, M. Biegun, E. Mijowska, R.J. Kaleńczuk, J. Sreńscek-Nazzal, B. Michalkiewicz, Direct conversion of biomass to nanoporous activated biocarbons for high CO₂ adsorption and supercapacitor applications, *Appl. Surf. Sci.* 497 (2019) 143722. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.143722>.
- [35] a. Yaya, B. Agyei-Tuffour, D. Dodoo-Arhin, E. Nyankson, E. Annan, D.S. Konadu, E.

- Sinayobye, E. a. Baryeh, C.P. Ewels, Layered Nanomaterials- A Review, *Glob. J. Eng. Des. Technol.* 1 (2012) 32–41. <http://www.gifre.org/admin/papers/gjedt/1222-32-41.pdf>.
- [36] E. Taer, Apriwandi, B.K.L. Dalimunthe, R. Taslim, A rod-like mesoporous carbon derived from agro-industrial cassava petiole waste for supercapacitor application, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 96 (2021). <https://doi.org/10.1002/jctb.6579>.
- [37] M. Deraman, R. Daik, S. Soltaninejad, N.S.M. Nor, Awitdrus, R. Farma, N.F. Mamat, N.H. Basri, M.A.R. Othman, A New Empirical Equation for Estimating Specific Surface Area of Supercapacitor Carbon Electrode from X-Ray Diffraction, *Adv. Mater. Res.* 1108 (2015) 1–7. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1108.1>.
- [38] K. Kumar, R.K. Saxena, R. Kothari, D.K. Suri, N.K. Kaushik, J.N. Bohra, Correlation between adsorption and x-ray diffraction studies on viscose rayon based activated carbon cloth, *Carbon N. Y.* 35 (1997) 1842–1844. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(97\)87258-2](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(97)87258-2).
- [39] X.L. Su, S.H. Li, S. Jiang, Z.K. Peng, X.X. Guan, X.C. Zheng, Superior capacitive behavior of porous activated carbon tubes derived from biomass waste-cotonier strobili fibers, *Adv. Powder Technol.* 29 (2018) 2097–2107. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2018.05.018>.
- [40] Y. Sun, S. Guo, W. Li, J. Pan, C. Fernandez, R.A. Senthil, X. Sun, A green and template-free synthesis process of superior carbon material with ellipsoidal structure as enhanced material for supercapacitors, *J. Power Sources.* 405 (2018) 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.10.034>.
- [41] Y. Fu, N. Zhang, Y. Shen, X. Ge, M. Chen, Micro-mesoporous carbons from original and pelletized rice husk via one-step catalytic pyrolysis, *Bioresour. Technol.* 269 (2018) 67–73. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.08.083>.
- [42] K. Surya, M.S. Michael, Novel interconnected hierarchical porous carbon electrodes derived from bio-waste of corn husk for supercapacitor applications, *J. Electroanal. Chem.* 878 (2020) 114674. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2020.114674>.
- [43] A.M. Abioye, F.N. Ani, Recent development in the production of activated carbon electrodes from agricultural waste biomass for supercapacitors: A review, *Renew.*

- Sustain. Energy Rev. 52 (2015) 1282–1293. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.129>.
- [44] N. Sellin, D.R. Krohl, C. Marangoni, O. Souza, Oxidative fast pyrolysis of banana leaves in fluidized bed reactor, *Renew. Energy*. 96 (2016) 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.032>.
- [45] E. Taer, K. Natalia, A. Apriwandi, R. Taslim, A. Agustino, R. Farma, The synthesis of activated carbon nanofiber electrode made from acacia leaves (*Acacia mangium wild*) as supercapacitors, *Adv. Nat. Sci. Nanosci. Nanotechnol.* 11 (2020) 25007-1-25007–7. <https://doi.org/10.1088/2043-6254/ab8b60>.
- [46] K.S.W. Sing, Reporting physisorption data for gas / solid systems with Special Reference to the Determination of S, *Pure Appl. Chem.* 54 (1982) 2201–2218.
- [47] R.T. Ayinla, J.O. Dennis, H.M. Zaid, Y.K. Sanusi, F. Usman, L.L. Adebayo, A review of technical advances of recent palm bio-waste conversion to activated carbon for energy storage, *J. Clean. Prod.* 229 (2019) 1427–1442. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.116>.
- [48] G. Zhang, Y. Chen, Y. Chen, H. Guo, Activated biomass carbon made from bamboo as electrode material for supercapacitors, *Mater. Res. Bull.* 102 (2018) 391–398. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2018.03.006>.
- [49] F. Cheng, X. Yang, S. Zhang, W. Lu, Boosting the supercapacitor performances of activated carbon with carbon nanomaterials, *J. Power Sources*. 450 (2020) 227678. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227678>.
- [50] Y. Wang, M. Qiao, X. Mamat, Nitrogen-doped macro-meso-micro hierarchical ordered porous carbon derived from ZIF-8 for boosting supercapacitor performance, *Appl. Surf. Sci.* 540 (2021) 148352. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148352>.
- [51] B. Chang, Y. Wang, K. Pei, S. Yang, X. Dong, ZnCl₂-activated porous carbon spheres with high surface area and superior mesoporous structure as an efficient supercapacitor electrode, *RSC Adv.* 4 (2014) 40546–40552. <https://doi.org/10.1039/c4ra06418f>.
- [52] A.R. Selvaraj, A. Muthusamy, Inho-Cho, H.J. Kim, K. Senthil, K. Prabakar, Ultrahigh surface area biomass derived 3D hierarchical porous carbon nanosheet electrodes for high energy density supercapacitors, *Carbon N. Y.* 174 (2021) 463–474. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.12.052>.

- [53] V. Climent, J.M. Feliu, *Cyclic voltammetry*, Elsevier Inc., 2018. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.10764-4>.
- [54] K. Mensah-Darkwa, C. Zequine, P.K. Kahol, R.K. Gupta, Supercapacitor energy storage device using biowastes: A sustainable approach to green energy, *Sustain.* 11 (2019). <https://doi.org/10.3390/su11020414>.
- [55] S. Ghosh, S. Barg, S.M. Jeong, K. Ostrikov, Heteroatom-Doped and Oxygen-Functionalized Nanocarbons for High-Performance Supercapacitors, *Adv. Energy Mater.* 10 (2020) 1–44. <https://doi.org/10.1002/aenm.202001239>.
- [56] D. Chinnadurai, H.J. Kim, S. Karupannan, K. Prabakar, Multiscale honeycomb-structured activated carbon obtained from nitrogen-containing mandarin peel: high-performance supercapacitors with significant cycling stability, *New J. Chem.* 43 (2019) 3486–3492. <https://doi.org/10.1039/C8NJ05895D>.
- [57] L. Yin, Y. Chen, D. Li, X. Zhao, B. Hou, B. Cao, 3-Dimensional hierarchical porous activated carbon derived from coconut fibers with high-rate performance for symmetric supercapacitors, *Mater. Des.* 111 (2016) 44–50. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.08.070>.
- [58] Y. Zhang, S. Yu, G. Lou, Y. Shen, H. Chen, Z. Shen, S. Zhao, J. Zhang, S. Chai, Q. Zou, Review of macroporous materials as electrochemical supercapacitor electrodes, *J. Mater. Sci.* 52 (2017) 11201–11228. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-0955-3>.
- [59] D.K. Kampouris, X. Ji, E.P. Randviir, C.E. Banks, A new approach for the improved interpretation of capacitance measurements for materials utilised in energy storage, *RSC Adv.* 5 (2015) 12782–12791. <https://doi.org/10.1039/c4ra17132b>.
- [60] F. Liu, Z. Wang, H. Zhang, L. Jin, X. Chu, B. Gu, H. Huang, W. Yang, Nitrogen, oxygen and sulfur co-doped hierarchical porous carbons toward high-performance supercapacitors by direct pyrolysis of kraft lignin, *Carbon N. Y.* 149 (2019) 105–116. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.04.023>.
- [61] C. Zhao, W. Zheng, A review for aqueous electrochemical supercapacitors, *Front. Energy Res.* 3 (2015) 1–11. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2015.00023>.
- [62] D. Momodu, N.F. Sylla, B. Mutuma, A. Bello, T. Masikhwa, S. Lindberg, A. Matic, N. Manyala, Stable ionic-liquid-based symmetric supercapacitors from Capsicum seed-

- porous carbons, *J. Electroanal. Chem.* 838 (2019) 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.02.045>.
- [63] E. Taer, A. Afrianda, Apriwandi, R. Taslim, A. Agustino, Awitdrus, R. Farma, Production of activated carbon electrodes from Sago waste and its application for an electrochemical double-layer capacitor, *Int. J. Electrochem. Sci.* 13 (2018) 10688–10699. <https://doi.org/10.20964/2018.11.27>.
- [64] J.F. González, S. Román, J.M. Encinar, G. Martínez, Pyrolysis of various biomass residues and char utilization for the production of activated carbons, *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* 85 (2009) 134–141. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.11.035>.
- [65] M. Yguatyara de Luna, P. Marcelo Rodrigues, G. Antônia Mabrysa Torres, da C.J. Antônio Eufrázio, M. Jackson Queiroz, M. Selma Elaine, R. Maria Alexsandra de Sousa, A thermogravimetric analysis of biomass wastes from the northeast region of Brazil as fuels for energy recovery, *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.* 41 (2019) 1557–1572. <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1549132>.
- [66] V. Strezov, B. Moghtaderi, J.A. Lucas, Computational calorimetric investigation of the reactions during thermal conversion of wood biomass, *Biomass and Bioenergy.* 27 (2004) 459–465. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.04.008>.
- [67] T.T. Chen, W.L. Song, L.Z. Fan, Engineering graphene aerogels with porous carbon of large surface area for flexible all-solid-state supercapacitors, *Electrochim. Acta.* 165 (2015) 92–97. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.02.008>.
- [68] C. Peng, X.B. Yan, R.T. Wang, J.W. Lang, Y.J. Ou, Q.J. Xue, Promising activated carbons derived from waste tea-leaves and their application in high performance supercapacitors electrodes, *Electrochim. Acta.* 87 (2013) 401–408. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.09.082>.
- [69] L. Wan, P. Song, J. Liu, D. Chen, R. Xiao, Y. Zhang, J. Chen, M. Xie, C. Du, Facile synthesis of nitrogen self-doped hierarchical porous carbon derived from pine pollen via MgCO₃ activation for high-performance supercapacitors, *J. Power Sources.* 438 (2019) 227013. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227013>.
- [70] W. Jiang, J. Pan, X. Liu, 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 (2019) 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.10.086>.
- [71] W. Yang, Z. Shi, H. Guo, J. Guo, X. Lei, L. Yue, Study on preparation of nanocarbon fibers from wheat-straw based on electrostatic spinning method and its application in supercapacitor, *Int. J. Electrochem. Sci.* 12 (2017) 5587–5597. <https://doi.org/10.20964/2017.06.122>.
- [72] C. Contescu, S. Adhikari, N. Gallego, N. Evans, B. Biss, Activated Carbons Derived from High-Temperature Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass, *C.* 4 (2018) 51. <https://doi.org/10.3390/c4030051>.
- [73] K. Scott, *Electrochemical Principles and Characterization of Bioelectrochemical Systems*, Elsevier Ltd., 2016. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-375-1.00002-2>.
- [74] O. Fasakin, J.K. Dangbegnon, D.Y. Momodu, M.J. Madito, K.O. Oyedotun, M.A. Eleruja, N. Manyala, Synthesis and characterization of porous carbon derived from activated banana peels with hierarchical porosity for improved electrochemical performance, *Electrochim. Acta.* 262 (2018) 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.01.028>.
- [75] S. Ahmed, A. Ahmed, M. Rafat, Supercapacitor performance of activated carbon derived from rotten carrot in aqueous, organic and ionic liquid based electrolytes, *J. Saudi Chem. Soc.* 22 (2018) 993–1002. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2018.03.002>.
- [76] L. Muniandy, F. Adam, A.R. Mohamed, E.P. Ng, The synthesis and characterization of high purity mixed microporous/mesoporous activated carbon from rice husk using chemical activation with NaOH and KOH, *Microporous Mesoporous Mater.* 197 (2014) 316–323. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.06.020>.
- [77] X. He, R. Li, J. Han, M. Yu, M. Wu, Facile preparation of mesoporous carbons for supercapacitors by one-step microwave-assisted ZnCl₂ activation, *Mater. Lett.* 94 (2013) 158–160. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.12.031>.
- [78] S. Faraji, F.N. Ani, The development supercapacitor from activated carbon by electroless plating - A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 42 (2015) 823–834. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.068>.
- [79] S. Yang, S. Wang, X. Liu, L. Li, Biomass derived interconnected hierarchical micro-

- meso-macro- porous carbon with ultrahigh capacitance for supercapacitor, *Carbon N. Y.* 147 (2019) 540–549. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.03.023>.
- [80] L. Ji, B. Wang, Y. Yu, N. Wang, J. Zhao, N. S co-doped biomass derived carbon with sheet-like microstructures for supercapacitors, *Electrochim. Acta.* 331 (2020) 135348. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.135348>.
- [81] W.L. Zhang, J.H. Xu, D.X. Hou, J. Yin, D.B. Liu, Y.P. He, H.B. Lin, Hierarchical porous carbon prepared from biomass through a facile method for supercapacitor applications, *J. Colloid Interface Sci.* 530 (2018) 338–344. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.06.076>.
- [82] P. Manasa, Z.J. Lei, F. Ran, Biomass Waste Derived Low Cost Activated Carbon from *Carchorus Olitorius* (Jute Fiber) as Sustainable and Novel Electrode Material, *J. Energy Storage.* 30 (2020) 101494. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101494>.
- [83] J. Yu, L. Sun, C. Ma, Y. Qiao, H. Yao, Thermal degradation of PVC: A review, *Waste Manag.* 48 (2016) 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.041>.
- [84] Q. Zhang, K. Han, S. Li, M. Li, J. Li, K. Ren, Synthesis of garlic skin-derived 3D hierarchical porous carbon for high-performance supercapacitors, *Nanoscale.* 10 (2018) 2427–2437. <https://doi.org/10.1039/c7nr07158b>.
- [85] E. Taer, R. Handayani, A. Apriwandi, R. Taslim, A. Awitdrus, A. Amun, A. Agustino, I. Iwantono, The Synthesis of Bridging Carbon Particles with Carbon Nanotubes from *Areca catechu* Husk Waste as Supercapacitor Electrodes, *Int. J. Electrochem. Sci.* 14 (2019) 9436–9448. <https://doi.org/10.20964/2019.10.34>.
- [86] I.K. Erabee, A. Ahsan, A.W. Zularisam, S. Idrus, N.N.N. Daud, T. Arunkumar, R. Sathyamurthy, A.E. Al-Rawajfeh, A new activated carbon prepared from sago palm bark through physiochemical activated process with zinc chloride, *Eng. J.* 21 (2017) 1–14. <https://doi.org/10.4186/ej.2017.21.5.1>.
- [87] B.S. Girgis, Y.M. Temerk, M.M. Gadelrab, I.D. Abdullah, X-ray Diffraction Patterns of Activated Carbons Prepared under Various Conditions, *Carbon Lett.* 8 (2007) 95–100. <https://doi.org/10.5714/cl.2007.8.2.095>.
- [88] C.K. Roy, S.S. Shah, A.H. Reaz, S. Sultana, A.N. Chowdhury, S.H. Firoz, M.H. Zahir, M.A. Ahmed Qasem, M.A. Aziz, Preparation of Hierarchical Porous Activated Carbon

- from Banana Leaves for High-performance Supercapacitor: Effect of Type of Electrolytes on Performance, *Chem. - An Asian J.* 16 (2021) 296–308. <https://doi.org/10.1002/asia.202001342>.
- [89] V. Kuzmenko, O. Naboka, M. Haque, H. Staaf, G. Göransson, P. Gatenholm, P. Enoksson, Sustainable carbon nanofibers/nanotubes composites from cellulose as electrodes for supercapacitors, *Energy*. 90 (2015) 1490–1496. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.102>.
- [90] L. Zheng, X. Dai, Y. Ouyang, Y. Chen, X. Wang, nHighly N/O co-doped carbon nanospheres for symmetric supercapacitors application with high specific energy, *J. Energy Storage*. 33 (2021) 102152. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102152>.
- [91] A.A. Hor, S.A. Hashmi, Optimization of hierarchical porous carbon derived from a biomass pollen-cone as high-performance electrodes for supercapacitors, *Electrochim. Acta*. 356 (2020) 136826. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.136826>.
- [92] Y. Boyjoo, Y. Cheng, H. Zhong, H. Tian, J. Pan, V.K. Pareek, S.P. Jiang, J.F. Lamonier, M. Jaroniec, J. Liu, From waste Coca Cola® to activated carbons with impressive capabilities for CO₂ adsorption and supercapacitors, *Carbon N. Y.* 116 (2017) 490–499. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.02.030>.
- [93] B. Duan, X. Gao, X. Yao, Y. Fang, L. Huang, J. Zhou, L. Zhang, Unique elastic N-doped carbon nanofibrous microspheres with hierarchical porosity derived from renewable chitin for high rate supercapacitors, *Nano Energy*. 27 (2016) 482–491. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.07.034>.
- [94] E. Taer, A. Apriwandi, R. Taslim, A. Agutino, D.A. Yusra, Conversion Syzygium oleana leaves biomass waste to porous activated carbon nanosheet for boosting supercapacitor performances, *J. Mater. Res. Technol.* 9 (2020) 13332–13340. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.049>.
- [95] Y. Chen, Y. Jiang, Z. Liu, L. Yang, Q. Du, K. Zhuo, Hierarchical porous N-doped graphene aerogel with good wettability for high-performance ionic liquid-based supercapacitors, *Electrochim. Acta*. 366 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.137414>.
- [96] V. Yang, R.A. Senthil, J. Pan, A. Khan, S. Osman, L. Wang, W. Jiang, Y. Sun, Highly

- ordered hierarchical porous carbon derived from biomass waste mangosteen peel as superior cathode material for high performance supercapacitor, *J. Electroanal. Chem.* 855 (2019) 113616. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.113616>.
- [97] T. Wang, X. He, W. Gong, K. Sun, W. Lu, Y. Yao, Z. Chen, T. Sun, M. Fan, Flexible carbon nanofibers for high-performance free-standing supercapacitor electrodes derived from Powder River Basin coal, *Fuel*. 278 (2020) 117985. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117985>.
- [98] T. Wang, Y. Xu, B. Shi, S. Gao, G. Meng, K. Huang, Novel activated N-doped hollow microporous carbon nanospheres from pyrrole-based hyper-crosslinking polystyrene for supercapacitors, *React. Funct. Polym.* 143 (2019) 104326. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2019.104326>.
- [99] D. He, Y. Gao, Z. Wang, Y. Yao, L. Wu, J. Zhang, Z.H. Huang, M.X. Wang, One-step green fabrication of hierarchically porous hollow carbon nanospheres (HCNSs) from raw biomass: Formation mechanisms and supercapacitor applications, *J. Colloid Interface Sci.* 581 (2021) 238–250. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.07.118>.
- [100] S. Liu, A. Li, Q. Han, C. Yang, H. Li, H. Xia, F. Ouyang, J. Zhou, X. Liu, Oxygen-directed porous activation of carbon nanospheres for enhanced capacitive energy storage, *J. Power Sources*. 483 (2021) 229223. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229223>.
- [101] P. Zhou, J. Wan, X. Wang, K. Xu, Y. Gong, L. Chen, Nickel and cobalt metal-organic-frameworks-derived hollow microspheres porous carbon assembled from nanorods and nanospheres for outstanding supercapacitors, *J. Colloid Interface Sci.* 575 (2020) 96–107. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.04.083>.
- [102] T.R. Kumar, R.A. Senthil, Z. Pan, J. Pan, Y. Sun, A tubular-like porous carbon derived from waste American poplar fruit as advanced electrode material for high-performance supercapacitor, *J. Energy Storage*. 32 (2020) 101903. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101903>.
- [103] H. Chen, H. Wei, N. Fu, W. Qian, Y. Liu, H. Lin, S. Han, Nitrogen-doped porous carbon using ZnCl₂ as activating agent for high-performance supercapacitor electrode materials, *J. Mater. Sci.* 53 (2018) 2669–2684. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1453-3>.

- [104] P. González-García, Activated carbon from lignocellulosics precursors: A review of the synthesis methods, characterization techniques and applications, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82 (2018) 1393–1414. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.117>.
- [105] Y. Xi, D. Yang, X. Qiu, H. Wang, J. Huang, Q. Li, Renewable lignin-based carbon with a remarkable electrochemical performance from potassium compound activation, *Ind. Crops Prod.* 124 (2018) 747–754. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.08.018>.
- [106] X. Liu, C. Ma, J. Li, B. Zielinska, R.J. Kalenczuk, X. Chen, P.K. Chu, T. Tang, E. Mijowska, Biomass-derived robust three-dimensional porous carbon for high volumetric performance supercapacitors, *J. Power Sources.* 412 (2019) 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.11.032>.
- [107] E. Taer, A. Apriwandi, Y. Yusriwandi, W.S. Mustika, Z. Zulkifli, R. Taslim, S. Sugianto, B. Kurniasih, A. Agustino, P. Dewi, Comparative study of CO₂ and H₂O activation in the synthesis of carbon electrode for supercapacitors, *AIP Conf. Proc.* 1927 (2018) 030036-1-030036–6. <https://doi.org/10.1063/1.5021229>.
- [108] M. Yu, Y. Han, J. Li, L. Wang, CO₂-activated porous carbon derived from cattail biomass for removal of malachite green dye and application as supercapacitors, *Chem. Eng. J.* 317 (2017) 493–502. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.02.105>.
- [109] Y. Liang, Y. Lu, G. Xiao, J. Zhang, H. Chi, Y. Dong, Hierarchical porous nitrogen-doped carbon microspheres after thermal rearrangement as high performance electrode materials for supercapacitors, *Appl. Surf. Sci.* 529 (2020) 147141. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147141>.
- [110] Z. Dai, P.G. Ren, W. He, X. Hou, F. Ren, Q. Zhang, Y.L. Jin, Boosting the electrochemical performance of nitrogen-oxygen co-doped carbon nanofibers based supercapacitors through esterification of lignin precursor, *Renew. Energy.* 162 (2020) 613–623. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.152>.
- [111] R. Taslim, T.R. Dewi, E. Taer, A. Apriwandi, A. Agustino, R.N. Setiadi, Effect of physical activation time on the preparation of carbon electrodes from pineapple crown waste for supercapacitor application, *J. Phys. Conf. Ser.* 1120 (2018) 012084-1-012084–7. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1120/1/012084>.
- [112] K. Wang, N. Zhao, S. Lei, R. Yan, X. Tian, J. Wang, Y. Song, D. Xu, Q. Guo, L. Liu,

- Promising biomass-based activated carbons derived from willow catkins for high performance supercapacitors, *Electrochim. Acta.* 166 (2015) 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.03.048>.
- [113] S. Liu, Y. Zhao, B. Zhang, H. Xia, J. Zhou, W. Xie, H. Li, Nano-micro carbon spheres anchored on porous carbon derived from dual-biomass as high rate performance supercapacitor electrodes, *J. Power Sources.* 381 (2018) 116–126. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.02.014>.
- [114] A.H. Jawad, M. Bardhan, M.A. Islam, M.A. Islam, S.S.A. Syed-Hassan, S.N. Surip, Z.A. ALOthman, M.R. Khan, Insights into the modeling, characterization and adsorption performance of mesoporous activated carbon from corn cob residue via microwave-assisted H₃PO₄ activation, *Surfaces and Interfaces.* 21 (2020) 100688. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100688>.
- [115] V.S. Bhat, P. Kanagavalli, G. Sriram, R.P. B, N.S. John, M. Veerapandian, M. Kurkuri, G. Hegde, Low cost, catalyst free, high performance supercapacitors based on porous nano carbon derived from agriculture waste, *J. Energy Storage.* 32 (2020) 101829. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101829>.
- [116] A. Elmouwahidi, E. Bailón-García, A.F. Pérez-Cadenas, F.J. Maldonado-Hódar, F. Carrasco-Marín, Activated carbons from KOH and H₃PO₄-activation of olive residues and its application as supercapacitor electrodes, *Electrochim. Acta.* 229 (2017) 219–228. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.01.152>.
- [117] A. Pina, A. Amaya, J. Marcuzzo, A. Rodrigues, M. Baldan, N. Tancredi, A. Cuña, Supercapacitor Electrode Based on Activated Carbon Wool Felt, *C.* 4 (2018) 24. <https://doi.org/10.3390/c4020024>.
- [118] H. Yang, J. Zhou, M. Wang, S. Wu, W. Yang, H. Wang, From basil seed to flexible supercapacitors: Green synthesis of heteroatom-enriched porous carbon by self-gelation strategy, *Int. J. Energy Res.* 44 (2020) 4449–4463. <https://doi.org/10.1002/er.5222>.
- [119] Y. Guo, T. Wang, D. Wu, Y. Tan, One-step synthesis of in-situ N, S self-doped carbon nanosheets with hierarchical porous structure for high performance supercapacitor and oxygen reduction reaction electrocatalyst, *Electrochim. Acta.* 366 (2021) 137404. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.137404>.

- [120] B. Pal, S. Yang, S. Ramesh, V. Thangadurai, R. Jose, Electrolyte selection for supercapacitive devices: A critical review, *Nanoscale Adv.* 1 (2019) 3807–3835. <https://doi.org/10.1039/c9na00374f>.
- [121] C. Lämmel, M. Schneider, M. Weiser, A. Michaelis, Investigations of electrochemical double layer capacitor (EDLC) materials - A comparison of test methods, *Materwiss. Werksttech.* 44 (2013) 641–649. <https://doi.org/10.1002/mawe.201300122>.
- [122] A. Balducci, D. Belanger, T. Brousse, J.W. Long, W. Sugimoto, Perspective—A Guideline for Reporting Performance Metrics with Electrochemical Capacitors: From Electrode Materials to Full Devices, *J. Electrochem. Soc.* 164 (2017) A1487–A1488. <https://doi.org/10.1149/2.0851707jes>.
- [123] L. Wu, Y. Cai, S. Wang, Z. Li, Doping of nitrogen into biomass-derived porous carbon with large surface area using N₂ non-thermal plasma technique for high-performance supercapacitor, *Int. J. Hydrogen Energy.* 46 (2021) 2432–2444. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.037>.
- [124] M.D. Stoller, R.S. Ruoff, Best practice methods for determining an electrode material's performance for ultracapacitors, *Energy Environ. Sci.* 3 (2010) 1294–1301. <https://doi.org/10.1039/c0ee00074d>.
- [125] X. Tian, S. Zhu, J. Peng, Y. Zuo, G. Wang, X. Guo, N. Zhao, Y. Ma, L. Ma, Synthesis of micro- and meso-porous carbon derived from cellulose as an electrode material for supercapacitors, *Electrochim. Acta.* 241 (2017) 170–178. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.04.038>.
- [126] K. Sun, S. Yu, Z. Hu, Z. Li, G. Lei, Q. Xiao, Y. Ding, Oxygen-containing hierarchically porous carbon materials derived from wild jujube pit for high-performance supercapacitor, *Electrochim. Acta.* 231 (2017) 417–428. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.02.078>.
- [127] J. Huang, L. Chen, H. Dong, Y. Zeng, H. Hu, M. Zheng, Y. Liu, Y. Xiao, Y. Liang, Hierarchical porous carbon with network morphology derived from natural leaf for superior aqueous symmetrical supercapacitors, *Electrochim. Acta.* 258 (2017) 504–511. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.11.092>.
- [128] Z. Guo, X. Kong, X. Wu, W. Xing, J. Zhou, Y. Zhao, S. Zhuo, Heteroatom-doped

- hierarchical porous carbon via molten-salt method for supercapacitors, *Electrochim. Acta.* 360 (2020) 137022. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.137022>.
- [129] L. Luo, Y. Zhou, W. Yan, X. Wu, S. Wang, W. Zhao, Two-step synthesis of B and N co-doped porous carbon composites by microwave-assisted hydrothermal and pyrolysis process for supercapacitor application, *Electrochim. Acta.* 360 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.137010>.
- [130] X. Jiang, F. Guo, X. Jia, Y. Zhan, H. Zhou, L. Qian, Synthesis of nitrogen-doped hierarchical porous carbons from peanut shell as a promising electrode material for high-performance supercapacitors, *J. Energy Storage.* 30 (2020) 101451. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101451>.
- [131] F. Razmjooei, K. Singh, T.H. Kang, N. Chaudhari, J. Yuan, J.S. Yu, Urine to highly porous heteroatom-doped carbons for supercapacitor: A value added journey for human waste, *Sci. Rep.* 7 (2017) 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11229-6>.
- [132] J. Han, Y. Ping, J. Li, Z. Liu, B. Xiong, P. Fang, C. He, One-step nitrogen, boron codoping of porous carbons derived from pomelo peels for supercapacitor electrode materials, *Diam. Relat. Mater.* 96 (2019) 176–181. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2019.05.014>.
- [133] S. Cao, J. Yang, J. Li, K. Shi, X. Li, Preparation of oxygen-rich hierarchical porous carbon for supercapacitors through the co-carbonization of pitch and biomass, *Diam. Relat. Mater.* 96 (2019) 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2019.04.036>.

LAMPIRAN 1
Status Luaran Penelitian

Jenis Luaran	Judul Artikel Ilmiah	Status Artikel Ilmiah
Luaran Wajib	Porous hollow carbon nanofiber/nanosheet biomass-based for high-performance supercapacitor	International Journal of Energy Research (Published, Wiley Q1) https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.7262
Luaran Tambahan	Solid coin-like design activated carbon nanospheres derived from shallot peel precursor for boosting supercapacitor performance	Journal of Materials Research and Technology (Published, Elsevier Q1) https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785421010061
Luaran Tambahan	A facile approach of micro-mesopores structure binder-free coin/monolith solid design activated carbon for electrode supercapacitor	Journal of Energy Storage (Published, Elsevier Q1) https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X21005491
Luaran Tambahan	Ultra-High Capacitive Supercapacitor Derived from Self-Oxygen Doped Biomass-Based 3D Porous Carbon Sources	ChemNanoMat (First Published, Wiley Q1) https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cnma.202100388
Luaran Tambahan	Less expensive and eco-friendly preparation of activated carbon derived from coffee leaf as an supercapacitors electrode	The 3 rd Universitas Riau International Conference on Science and Environment (URICSE-2021), sudah dilaksanakan (published) https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2049/1/012019/pdf
Luaran Tambahan	Longan leaves biomass-derived renewable activated carbon materials for electrochemical energy storage	The 3 rd Universitas Riau International Conference on Science and Environment (URICSE-2021), sudah dilaksanakan (published) https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2049/1/012009/pdf
Luaran Tambahan	Low cost activated carbon derived from Napier grass fibers as a promising electrode material for supercapacitor applications	The 3 rd International Conference on Science and Technology Application (ICoSTA 2021), sudah dilaksanakan

Luaran Tambahan	Effect of N ₂ carbonization temperature on porous activated carbon derived from jicama (<i>Pachyrhizus erosus L.</i>) peel as electrode material for supercapacitor	The 3 rd International Conference on Science and Technology Application (ICoSTA 2021), sudah dilaksanakan
--------------------	--	--



RESEARCH ARTICLE




Porous hollow biomass-based carbon nanofiber/nanosheet for high-performance supercapacitor

Erman Taer , Apriwandi Apriwandi, Agustino Agustino, Mega Ratna Dewi, Rika Taslim,

First published: 09 September 2021 | <https://doi.org/10.1002/er.7262>

Funding information: Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi, Republic of Indonesia, Grant/Award Number: WCR/ 1393/UN.19.5.1.3/PT.01.03/2021

[Read the full text >](#)

 PDF  TOOLS  SHARE

Available online at www.sciencedirect.com

jmr&t
Journal of Materials Research and Technology
journal homepage: www.elsevier.com/locate/jmrt



Original Article

Solid coin-like design activated carbon nanospheres derived from shallot peel precursor for boosting supercapacitor performance



Erman Taer^{a,*}, Apriwandi Apriwandi^a, Dhea Rama Andani^a,
Rika Taslim^{b,**}

^a Department of Physics, Faculty of Mathematic and Natural Sciences, University of Riau, Simpang Baru, Riau, 28293, Indonesia

^b Department of Industrial Engineering, State Islamic University of Sultan Syarif Kasim, Simpang Baru, Riau, 28293, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received 8 August 2021

Accepted 6 September 2021

Available online 14 September 2021

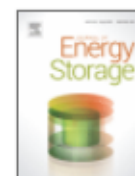
ABSTRACT

Thin porous carbon nanospheres based on natural materials, characterized by abundant availability, facile synthesis without templates, and heteroatom doping have confirmed the enhanced high performance of electrochemical energy storage devices. However, these potentials are difficult to obtain, and further poses a serious challenge. This work, activated carbon nanosphere was obtained from the biomass precursor shallot peel through a solid



Journal of Energy Storage

Volume 40, August 2021, 102823



A facile approach of micro-mesopores structure binder-free coin/monolith solid design activated carbon for electrode supercapacitor

Apriwandi Apriwandi, Erman Taer , Rakhmawati Farma, Rahmondia Nanda Setiadi, Erwin Amiruddin

Show more

+ Add to Mendeley Share Cite

<https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102823>

Get rights and content

Full Paper

Ultra-High Capacitive Supercapacitor Derived from Self-Oxygen Doped Biomass-Based 3D Porous Carbon Sources

Erman Taer ✉, Rika Taslim, Apriwandi Apriwandi

First published: 15 November 2021 | <https://doi.org/10.1002/cnma.202100388>

Abstract

This study, reported an ultra-high specific capacitance of supercapacitor applications, using self-oxygen doped 3D-porous carbon derivatives from dried banana leaves. The samples were synthesized by ZnCl₂ impregnation at different temperature pyrolysis of 700-900°C. Furthermore, the overall process significantly increased the specific surface area from 429.590 to 860.410 m² g⁻¹ followed by the formation of 3D-interconnected pores structures. Unexpectedly, the activated carbon was demonstrated high-level oxygen dopants between 9.47-12.45%. These valuable physical features showed ultra-high specific capacitance of 401 F g⁻¹ and 235 F g⁻¹ in a two-electrode configuration system, using electrolytes of 1 M H₂SO₄ and 6 M KOH, respectively. Also, electrochemical properties were evaluated in the form of pellets binder-free materials. Porous carbon sources were known to generate extensive specific energy of 55.69 Wh kg⁻¹ and specific power of 200.09 W kg⁻¹. Based on the technique and results, the use of hierarchical 3D-porous carbon derivatives is validated as robust electrode materials in developing high-performance electrochemical energy storage



No.B/1823/UN19.5.1.3/PT.01.06/2021

Certificate

Presented to:

ESTER STEFANI GULTOM

Universitas Riau
as a Presenter entitled

**"Less Expensive and Eco-Friendly Preparation of Activated Carbon
Derived from Coffee Leaf as an Supercapacitors Electrode"**
**in Universitas Riau International Conference
on Science and Environment- 2021 (URICSE-2021)**

Institute of Research and Community Services
Universitas Riau

Pekanbaru, 11 September 2021

Head of Institute of Research and Community Services
Universitas Riau



Prof. Dr. Almasdi Syahza, SE., MP
NIP.196008221990021002

Chairman of the Conference



Prof. Dr. Nur Islami, S.Si., MT
NIP.197403221999031002





CERTIFICATE

No. 02 /ICoSTA/III/2021

Presented to:

Apriwandi

as
Presenter
at

The 3rd International Conference on Science and Technology Applications
Theme :
"Science and Education Science Support for Sustainable Technology"

Keynote speakers :

1. Prof. Dr. Syawal Gultom, M. Pd. (Universitas Negeri Medan, Indonesia)
2. Prof. Dong-Hau Kuo (National Taiwan University of Science and Technology)
3. Assoc. Prof. Dr. Hjh. Norma Binti Alias (Universiti Teknologi Malaysia)
4. Dr. Geni Rina Sunaryo (National Nuclear Energy Agency of Indonesia)
5. Prof. Dr. Tosawat Seetawan (Center of Excellence on Alternative Energy Thailand)

02 November 2021
in Postgraduate School - Universitas Negeri Medan, Indonesia.



Dr. Syamsul Gultom, SKM., M.Kes.
NIP. 19760513 200012 1 003



Prof. Dr. Bismol Sinaga, M.Pd.
NIP. 19650910 199102 1 001



Dr. E. Elvis Napitupulu, M.S.
NIP. 19631225 198801 1 004





CERTIFICATE

No. 03 /ICoSTA/III/2021

Presented to :

Arnold Riccahd G

as

Presenter

at

The 3rd International Conference on Science and Technology Applications

Theme :

"Science and Education Science Support for Sustainable Technology"

Keynote speakers :

1. Prof. Dr. Syawal Gultom, M. Pd. (*Universitas Negeri Medan, Indonesia*)
2. Prof. Dong-Hau Kuo (*National Taiwan University of Science and Technology*)
3. Assoc. Prof. Dr. Hj. Norma Binti Alias (*Universiti Teknologi Malaysia*)
4. Dr. Geni Rina Sunaryo (*National Nuclear Energy Agency of Indonesia*)
5. Prof. Dr. Tosawat Seetawan (*Center of Excellence on Alternative Energy Thailand*)

02 November 2021

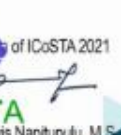
in Postgraduate School - Universitas Negeri Medan, Indonesia.




Universitas Negeri Medan
REKTOR
Dr. Syamsul Gultom, SKM., M.Kes.
NIP. 19760513 200012 1 003



Postgraduate School UNIMED
DIREKTUR
Prof. Dr. Bismol Sinaga, M.Pd.
NIP. 19650910 199102 1 001



Chairman of ICoSTA 2021
ICoSTA
Dr. E. Elvis Napitupulu, M.S.
NIP. 19631225 198806 1 004

LAMPIRAN 2

Dokumen Hasil Pengukuran TKT



KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
DIREKTORAT JENDERAL PENGUATAN RISET DAN PENGEMBANGAN

Jl. M. H. Thamrin No. 8 Jakarta Pusat 10340-Gedung II BPPT Lantai 19
Telepon 021 3169758 Faksimile 021 3102156/31023902
Homepage : www.ristekdikti.go.id

RINGKASAN HASIL PENGUKURAN TINGKAT KESIAPTERAPAN TEKNOLOGI (TKT)

No:

Nama/Judul Teknologi	Piranti Penyimpan Energi Superkapasitor
Bidang Teknologi	Material Maju
Pimpinan Program / Kegiatan	Prof. Dr. Erman Taer, M.Si
Lembaga / Unit Pelaksana	Universitas Riau
Alamat / Kontak	Jalan Bangau Sakti Ujung, Kec. Tampan, Kota Pekanbaru
Telp/Fax	081275214501
Email	erman.taer@lecturer.unri.ac.id

Tanggal Pengukuran TKT :

Level TKT yang dicapai :	2 (dari 9 level)	% Komplit Indikator = 80%
------------------------------------	-------------------------	----------------------------------

