

Pembuatan Baterai Kering Menggunakan Karbon Aktif dari Cangkang Kelapa Sawit dan Asam Nitrat (HNO_3) sebagai Aktivator

Dry Battery Manufacturing using Activated Carbon from Palm Kernel Shells and Nitric Acid (HNO_3) as Activator

Berlian Tiara*, Tri Larasati, Ida Febriana, Iriani Reka Septiana, Nurul Kholidah

Program Studi Teknik Energi, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya, Jl. Sriwijaya Negara, Palembang, 30139, Indonesia.

*Email: ida.febriana@polsri.ac.id

Article history:

Diterima : 19 Agustus 2025
Direvisi : 21 Januari 2026
Disetujui : 24 Januari 2026
Mulai online : 27 Maret 2026

E-ISSN: 2337-4888

How to cite:

Berlian Tiara, Tri Larasati, Ida Febriana, Iriani Reka Septiana, Nurul Kholidah. (2026). Pembuatan Baterai Kering Menggunakan Karbon Aktif dari Cangkang Kelapa Sawit dan Asam Nitrat (HNO_3) sebagai Aktivator. Jurnal Teknik Kimia USU, 15(1), 57-66.

ABSTRAK

Karbon aktif dari cangkang kelapa sawit berpotensi sebagai material ramah lingkungan pengganti logam berat dalam baterai kering. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis pengaruh variasi konsentrasi HNO_3 (0,5 M; 1 M; 1,5 M; 2 M; dan 2,5 M) serta mengevaluasi kinerjanya sebagai material elektroda baterai kering menggunakan elektrolit NaOH 1 M dan H_3PO_4 1 M. Proses melibatkan karbonisasi dan aktivasi kimia menggunakan HNO_3 , kemudian dilakukan pengujian proksimat, bilangan iodin, dan morfologi permukaan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Hasil penelitian menunjukkan kinerja terbaik diperoleh pada konsentrasi HNO_3 1 M dengan tegangan 3,66 V, arus 5,55 mA, dan daya 20,31 mW saat menggunakan elektrolit NaOH. Sebaliknya, pada konsentrasi HNO_3 2,5 M dengan elektrolit H_3PO_4 menghasilkan kinerja terendah tegangan 1,94 V, arus 0,79 mA, dan daya 1,53 mW akibat kerusakan pori. Penelitian ini membuktikan potensi cangkang kelapa sawit sebagai bahan baku baterai ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Kata kunci: baterai kering, cangkang kelapa sawit, HNO_3 , karbon aktif, kinerja baterai

ABSTRACT

Activated carbon from palm kernel shells has the potential to be an environmentally friendly material to replace heavy metals in dry batteries. The objective of this study is to analyze the effect of variations in HNO_3 concentration (0.5 M; 1 M; 1.5 M; 2 M; and 2.5 M) and to evaluate its performance as a dry battery electrode material using 1 M NaOH and 1 M H_3PO_4 electrolytes. The process involved carbonisation and chemical activation using HNO_3 , followed by proximate analysis, iodine number testing, and surface morphology analysis using a *Scanning Electron Microscope* (SEM). The results showed the best performance was achieved at an HNO_3 concentration of 1 M with a voltage of 3.66 V, current of 5.55 mA, and power of 20.31 mW when using NaOH electrolyte. Conversely, at an HNO_3 concentration of 2.5 M with H_3PO_4 electrolyte, the lowest performance was achieved at a voltage of 1.94 V, current of 0.79 mA, and power of 1.53 mW due to pore damage. This study demonstrates the potential of oil palm shells as a raw material for environmentally friendly and sustainable batteries.

Keyword: dry battery, palm kernel shells, HNO_3 , activated carbon, battery performance



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International.
<https://doi.org/10.32734/jtk.v15i1.22502>

1. Pendahuluan

Baterai merupakan perangkat elektrokimia yang mengubah energi kimia menjadi energi listrik melalui reaksi reduksi dan oksidasi pada elektroda, dengan elektrolit sebagai media penghantar ion antara anoda dan katoda [1]. Berdasarkan jenis elektrolitnya, baterai terbagi menjadi baterai basah dan baterai kering. Baterai kering yang menggunakan elektrolit dalam bentuk pasta atau gel memiliki keunggulan berupa tingkat penguapan rendah, daya tahan lama, dan lebih aman digunakan [2]. Baterai kering merupakan rangkaian dari beberapa sel volta yang saling terhubung secara seri, di mana tiap sel terdiri dari setengah reaksi elektrokimia yang berlangsung dalam media elektrolit [1]. Seiring berkembangnya teknologi baterai, sebagian besar baterai konvensional masih bergantung pada material logam berat seperti mangan, kadmium, timbal, dan nikel. Material ini bersifat tidak terbarukan dan berpotensi mencemari lingkungan [3]. Permasalahan ini mendorong perlunya pengembangan material alternatif yang lebih ramah lingkungan, salah satunya melalui pemanfaatan biomassa sebagai alternatif matriks penyimpan elektrolit.

Biomassa dipandang sebagai material alternatif yang menjanjikan karena ketersediaannya melimpah, dapat diperbarui, serta memiliki potensi untuk diolah menjadi karbon aktif berpori tinggi. Salah satu biomassa yang potensial adalah cangkang kelapa sawit, yaitu limbah padat dari industri kelapa sawit. Indonesia sebagai produsen kelapa sawit terbesar dengan produksi mencapai 3,36 juta ton per tahun [4] menghasilkan limbah cangkang dalam jumlah besar, sehingga berpeluang dimanfaatkan sebagai bahan baku karbon aktif bernilai tambah. Cangkang kelapa sawit mengandung lignin 44–50,7%, selulosa 21,6–22,7%, dan hemiselulosa 20,8–27,7% [5]. Kandungan lignin yang tinggi berperan penting dalam pembentukan struktur karbon selama proses karbonisasi, sehingga menjadikannya bahan baku yang sesuai untuk pembuatan karbon aktif [6].

Karbon aktif adalah material berpori dengan luas permukaan besar, konduktivitas listrik yang baik, dan sifat adsorpsi tinggi. Untuk memperoleh karakteristik tersebut, proses pembuatannya melibatkan dua tahap utama, yaitu karbonisasi untuk membentuk struktur karbon dan aktivasi untuk membuka pori serta meningkatkan luas permukaan. Aktivasi kimia menggunakan asam nitrat (HNO_3) banyak digunakan karena kemampuannya menghilangkan pengotor, memperluas pori mikro dan meso, serta menambahkan gugus fungsi oksigen di permukaan karbon, yang dapat meningkatkan sifat hidrofilik dan daya ikat elektrolit [7]. Namun, efektivitas aktivasi sangat dipengaruhi oleh konsentrasi aktivator yang digunakan. Penelitian oleh Inal et al. (2020) pada karbon aktif berbasis limbah teh menunjukkan bahwa aktivasi dengan konsentrasi HNO_3 rendah (3,33%) menghasilkan struktur pori yang terjaga dan resistansi internal rendah, sehingga transfer muatan lebih efisien. Sebaliknya, konsentrasi HNO_3 tinggi ($\geq 20\%$) menyebabkan penyempitan bahkan kerusakan pori, sehingga menurunkan daya simpan muatan. Temuan ini menunjukkan pentingnya optimasi konsentrasi aktivator untuk mencapai kinerja elektroda karbon aktif yang optimal, termasuk pada pemanfaatan biomassa cangkang kelapa sawit [8].

Di samping faktor aktivasi, performa baterai juga sangat dipengaruhi oleh jenis elektrolit yang digunakan. Elektrolit berfungsi sebagai media transportasi ion dari anoda ke katoda selama reaksi elektrokimia. Dalam penelitian Pahlevi et al. (2020) menunjukkan bahwa karbon aktif dari bambu betung yang diaktivasi dengan larutan KOH menghasilkan daya tertinggi saat dikombinasikan dengan elektrolit NaOH, mencapai 103,03 mW. Hal ini menegaskan bahwa kecocokan antara karakteristik pori karbon aktif dan jenis elektrolit berperan penting dalam efisiensi transfer muatan [9]. Elektrolit natrium hidroksida (NaOH) dipilih karena ion Na^+ memiliki koefisien difusi yang relatif tinggi, sehingga mampu mempercepat perpindahan ion di dalam elektrolit. Mobilitas ion yang lebih cepat ini berkontribusi terhadap peningkatan konduktivitas ionik serta menghasilkan performa elektrokimia yang lebih baik [10]. Sebagai perbandingan, asam fosfat (H_3PO_4) juga digunakan sebagai elektrolit karena memiliki kestabilan kimia yang baik dan relatif kurang korosif, sehingga berpotensi mendukung stabilitas siklus baterai dalam pengujian jangka panjang [11]. Perbedaan sifat kimia dan mekanisme transport ion antara NaOH dan H_3PO_4 menjadi dasar dilakukannya kajian perbandingan untuk mengevaluasi pengaruh jenis elektrolit terhadap kinerja baterai kering.

Penelitian karbon aktif berbasis biomassa telah banyak dilaporkan, akan tetapi studi yang mengkaji pengaruh variasi konsentrasi HNO_3 dan perbandingan dua jenis elektrolit terhadap kinerja baterai kering masih terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis pengaruh variasi konsentrasi asam nitrat (HNO_3) terhadap karakteristik fisik dan kimia karbon aktif dari cangkang kelapa sawit melalui uji proksimat, bilangan iodin, dan *scanning electron microscope* (SEM); serta (2) mengevaluasi performa baterai kering berbasis karbon aktif dengan elektrolit NaOH 1 M dan H_3PO_4 1 M berdasarkan parameter arus, tegangan, dan daya. Hasil penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi pada pengembangan baterai ramah lingkungan berbasis biomassa serta meningkatkan nilai tambah limbah cangkang kelapa sawit sebagai sumber energi berkelanjutan.

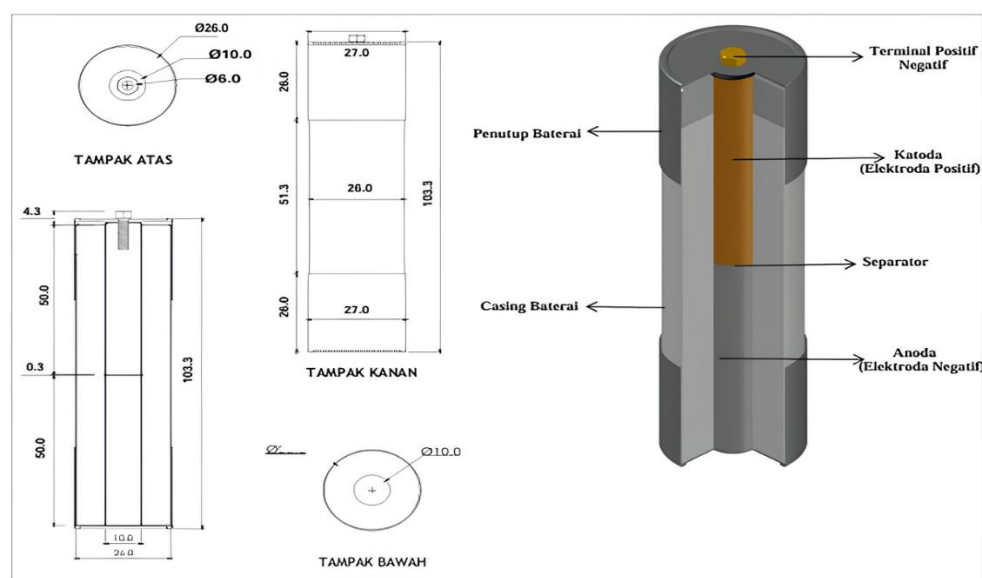
2. Metode

Bahan

Bahan yang digunakan meliputi cangkang kelapa sawit sebagai bahan baku karbon aktif, asam nitrat (HNO_3) sebagai aktivator, natrium hidroksida (NaOH) dan asam fosfat (H_3PO_4) sebagai elektrolit, PVC (pipa paralon dan dop pipa) sebagai *casing* dan penutup baterai, kain viselin sebagai separator, tembaga (katoda), aluminium (anoda), baut logam sebagai terminal positif dan negatif, dan lampu LED 2 V. Bahan kimia tambahan yang digunakan antara lain iodine, kalium iodida (KI), natrium tiosulfat ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$), natrium bikarbonat (NaHCO_3), kalium iodat (KIO_3), dan asam klorida (HCl) yang digunakan untuk analisis bilangan iodine.

Peralatan

Peralatan yang digunakan meliputi *furnace*, oven, neraca analitik, *shieve shaker*, mortar dan alu, pensil, gergaji pipa, bor, obeng, multimeter digital, kabel jepit buaya, serta peralatan laboratorium seperti labu ukur, erlenmeyer, gelas kimia, corong, pipet, kertas saring. Desain komponen baterai kering dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Komponen Baterai

Pembuatan Karbon Aktif

Cangkang kelapa sawit diperoleh, dibersihkan dari kotoran, dan dijemur di bawah sinar matahari selama 1 hari untuk menurunkan kadar air. Selanjutnya, cangkang dihancurkan menjadi ukuran kecil, lalu disimpan dalam wadah tertutup untuk menghindari kontaminasi dari udara [12]. Karbonisasi dilakukan dengan memasukkan cangkang kering ke dalam kendi tanah liat tertutup rapat dan dipanaskan pada suhu $500\text{ }^\circ\text{C}$ selama 2 jam menggunakan *furnace*. *Char* yang dihasilkan dikeluarkan dan disimpan dalam wadah tertutup untuk tahap berikutnya [13]. *Char* yang diperoleh kemudian dihaluskan secara manual menggunakan mortar dan alu, lalu diayak dengan *shieve shaker* hingga diperoleh partikel yang seragam. Proses pengayakan dilakukan menggunakan ayakan 60 mesh selama $\pm 2\text{--}5$ menit. Partikel yang lolos ayakan dikategorikan sebagai serbuk berukuran sesuai standar, sementara partikel yang tertahan dihaluskan kembali dan diayak ulang [14].

Aktivasi kimia dilakukan dengan metode perendaman menggunakan larutan asam nitrat (HNO_3) dengan variasi konsentrasi, yaitu 0,5 M; 1 M; 1,5 M; 2 M; dan 2,5 M. Rasio massa karbon terhadap volume larutan aktivator adalah 1:2 yaitu sebanyak 300 gr karbon direndam dalam 600 mL larutan HNO_3 . Proses perendaman dilakukan selama 24 jam pada suhu ruang [15]. Setelah proses aktivasi, sampel disaring dan dicuci menggunakan akuades hingga pH filtrat mendekati netral ($\text{pH} \sim 7$). Karbon aktif yang dihasilkan kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu $100\text{ }^\circ\text{C}$ selama 1–2 jam.

Analisis Proksimat

Karakteristik dasar *char* dan karbon aktif dianalisis melalui uji proksimat untuk menentukan kandungan kadar air (*moisture*), zat terbang (*volatile matter*), abu (*ash*), dan karbon tetap (*fixed carbon*). Pengujian ini dilakukan berdasarkan prosedur standar ASTM D7582-10 dengan menggunakan instrumen

Thermogravimetric Analyzer (TGA), sehingga diperoleh gambaran komposisi utama dan kualitas bahan baku karbon aktif.

Analisis Bilangan Iodin Karbon Aktif

Uji bilangan iodin dilakukan untuk menentukan kapasitas adsorpsi karbon aktif terhadap senyawa iodin sebagai indikator luas permukaan dan aktivitas adsorptif material, dengan mengacu pada standar ASTM D4607. Sebelum analisis, larutan natrium tiosulfat distandarisasi menggunakan larutan kalium iodat (KIO_3) 0,1 N, kalium iodida (KI), dan HCl 2 N dengan indikator amilum. Sampel karbon aktif sebanyak 0,5 gr dicampurkan dengan larutan iodin 0,1 N, kemudian diaduk selama 10 menit dan dibiarkan hingga mengendap. Sebanyak 10 mL filtrat diambil dan dititrasi menggunakan larutan natrium tiosulfat 0,1 N dengan indikator amilum hingga terjadi perubahan warna biru menjadi bening. Nilai bilangan iodin dihitung berdasarkan selisih volume titran terhadap blanko sesuai dengan persamaan standar ASTM D4607, sehingga diperoleh kapasitas adsorpsi iodin (mg/g) dari karbon aktif yang diuji dengan menggunakan Persamaan 1.

$$\text{Bilangan Iodin (mg/g)} = \frac{\left(A - \frac{B \times N(N_2S_2O_3)}{N(I_2)}\right) \times BE \ I_2 \times FP}{a} \quad (1)$$

Pengujian Scanning Electron Microscope (SEM)

Morfologi karbon aktif dianalisis menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dengan mengacu pada standar ASTM E986 dan ASTM E1508. Pengujian ini bertujuan untuk mengamati struktur mikro, distribusi pori, serta tekstur permukaan sampel. Melalui analisis SEM dengan pembesaran hingga ribuan kali, dapat diamati keberadaan pori, retakan, maupun perubahan struktur akibat proses karbonisasi dan aktivasi.

Proses Perakitan Baterai

Proses perakitan baterai dilakukan dengan menyiapkan dan menggabungkan komponen utama, yaitu anoda, katoda, separator, serta wadah baterai, sehingga terbentuk suatu sistem yang mampu menghasilkan energi listrik melalui reaksi elektrokimia. Wadah baterai dibuat dari pipa PVC berdiameter $\frac{3}{4}$ inci yang dipotong sepanjang ± 100 mm. Terminal positif dipasang pada tutup pipa dengan melubangi bagian tengah, kemudian dipasang baut dan ring sebagai jalur konduksi eksternal. Elektroda yang digunakan berupa batang tembaga (katoda) dan aluminium (anoda) dengan dimensi seragam (diameter 10 mm dan panjang 50 mm). Elektroda tersebut dipotong menggunakan gerinda dan dilengkapi ulir pada salah satu ujungnya untuk memudahkan pemasangan pada terminal. Separator berupa kain viselin dipotong sesuai ukuran elektroda. Selanjutnya, elektroda dan separator dimasukkan ke dalam pipa casing dan dihubungkan dengan terminal melalui sistem baut, sehingga diperoleh satu unit sel baterai kering yang siap digunakan untuk tahap pengujian performa.

Pembuatan Sel Baterai dengan Elektrolit

Baterai berbasis karbon aktif dibuat dengan memanfaatkan karbon aktif hasil aktivasi sebagai material utama sekaligus matriks penyimpan muatan. Untuk meningkatkan konduktivitas ionik, digunakan elektrolit berupa larutan natrium hidroksida (NaOH) 1 M dan asam fosfat (H_3PO_4) 1 M. Sebanyak 35 gr karbon aktif ditimbang menggunakan neraca analitik, kemudian dicampurkan dengan larutan elektrolit pada perbandingan massa karbon aktif terhadap volume larutan sebesar 2:1. Campuran selanjutnya dimasukkan secara bertahap ke dalam casing baterai dari pipa PVC yang telah dirakit sebelumnya. Pengisian dilakukan dengan pemadatan perlahan untuk menghindari terbentuknya rongga udara di dalam sel. Setelah casing terisi penuh, bagian atas ditutup rapat menggunakan dop pipa yang telah dilengkapi terminal, sehingga diperoleh baterai sel kering berbasis karbon aktif yang siap digunakan pada tahap pengujian performa.

Pengujian Performa Baterai

Pengujian performa baterai diawali dengan pengukuran tegangan tanpa beban untuk mengevaluasi kinerja awal sel baterai dan memastikan terjadinya reaksi elektrokimia. Pengukuran dilakukan menggunakan multimeter digital pada mode DC volt (0–20 V) dengan menghubungkan probe positif dan negatif ke masing-masing terminal baterai. Nilai tegangan yang diperoleh dicatat sebagai tegangan awal. Selanjutnya, dilakukan pengujian berbeban untuk mengevaluasi kemampuan baterai dalam mengalirkan arus dan menyalakan beban. Tiga sel baterai dirangkai secara seri dan dihubungkan ke lampu LED 2 V. Tegangan berbeban diukur menggunakan multimeter pada mode DC volt, sedangkan arus diukur pada mode DC ampere dengan rangkaian seri. Nilai tegangan (V) dan arus (I) dicatat untuk perhitungan daya keluaran (P) baterai dengan menggunakan Persamaan 2.

$$P = V \times I \quad (2)$$

3. Hasil

Analisis Proksimat Arang (*char*) Cangkang Kelapa Sawit dan Karbon Aktif

Analisis ini meliputi kadar air (*moisture content*), kadar abu (*ash content*), kadar zat mudah menguap (*volatile matter*), dan kadar karbon tetap (*fixed carbon*) yang digunakan untuk mengevaluasi kualitas material sebelum dan sesudah proses aktivasi. Hasil analisis pengujian proksimat dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Analisis Proksimat Arang (*char*) Cangkang Kelapa Sawit dan Karbon Aktif

Parameter Analisa Proksimat (%)	Metode Uji	Arang (<i>Char</i>) Cangkang Kelapa Sawit	Karbon Aktif 0,5 M	Karbon Aktif 2 M	SNI.06-3730-1995
Kadar Air	ASTM D7582-10	6,33	3,29	8,23	Max 15%
<i>Fixed Carbon</i>		50,67	53,53	22,92	Min 65%
<i>Volatile Matter</i>		34,07	34,85	46,52	Max 25%
Kadar Abu		8,93	8,33	22,33	Max 10%

Kadar air pada *char* awal tercatat 6,33% dan menurun menjadi 3,29% setelah aktivasi dengan HNO₃ konsentrasi 0,5 M mengindikasikan bahwa aktivator efektif mengeluarkan molekul air dari permukaan karbon sehingga membuka mikropori dan meningkatkan luas permukaan spesifik, yang berkontribusi pada kapasitas adsorpsi karbon aktif [16]. Namun, pada konsentrasi 2 M, kadar air meningkat hingga 8,23%, sejalan dengan laporan Hydhat et al. (2022) bahwa kadar air mengalami peningkatan seiring bertambahnya konsentrasi [17]. Konsentrasi tinggi memperpanjang waktu kontak dengan udara sehingga karbon aktif lebih higroskopis [18]. Nilai ini masih memenuhi standar SNI 06-3730-1995 (<15%).

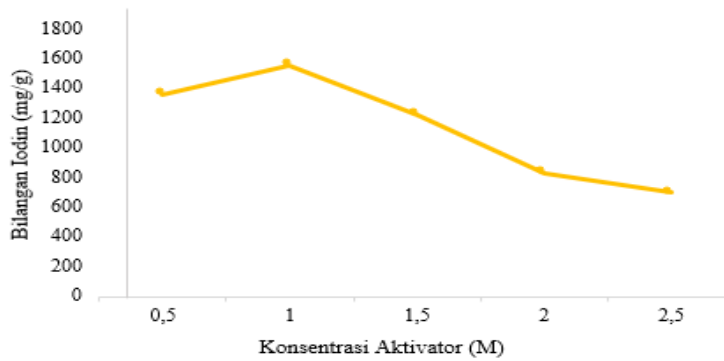
Fixed carbon meningkat dari 50,67% menjadi 53,53% pada aktivasi 0,5 M, tetapi menurun drastis hingga 22,92% pada aktivasi 2 M. Penurunan kandungan karbon tersebut diduga berkaitan dengan proses karbonisasi awal yang tidak optimal, seperti penggunaan suhu yang terlalu rendah atau laju pemanasan yang tidak sesuai, sehingga menghasilkan *char* dengan tingkat aromatisasi rendah dan struktur karbon yang kurang stabil. Struktur karbon yang belum berkembang sempurna ini menjadi lebih rentan terhadap degradasi selama proses aktivasi kimia, yang pada akhirnya menyebabkan berkurangnya fraksi *fixed carbon* pada karbon aktif yang dihasilkan [19]. *Fixed carbon* yang diperoleh belum memenuhi batas mutu yang ditetapkan oleh SNI 06-3730-1995, yaitu minimum 65%, sehingga menunjukkan bahwa kualitas karbon aktif masih perlu ditingkatkan pada kondisi aktivasi tersebut.

Volatile matter meningkat dari 34,07% (*char*) menjadi 34,85% (0,5 M) dan 46,52% (2 M). Kadar *volatil* tinggi menunjukkan adanya senyawa non-karbon yang belum terdegradasi, sehingga menurunkan kapasitas adsorpsi [17]. Konsentrasi aktivator yang tinggi dapat menyebabkan permukaan karbon terkikis, dan sebagian material aktif hilang saat pencucian, yang berdampak pada tingginya sisa senyawa *volatil* dalam struktur karbon [20].

Kadar abu pada *char* sebesar 8,93%, menurun menjadi 8,33% pada 0,5 M akibat pelarutan mineral oleh HNO₃ [21]. Namun, pada konsentrasi 2 M meningkat menjadi 23,33% karena mineral-mineral dalam karbon aktif tersebut tidak sepenuhnya terdekomposisi selama proses pembakaran, sehingga meningkatkan jumlah residu abu yang tersisa [22]. Nilai kadar abu masih memenuhi standar SNI (≤10%) pada konsentrasi rendah, tetapi melebihi batas pada konsentrasi tinggi. Secara keseluruhan, hasil menunjukkan bahwa aktivasi dengan HNO₃ berkonsentrasi rendah (0,5–1 M) menghasilkan karbon aktif dengan kualitas lebih baik dibandingkan dengan konsentrasi tinggi yang menyebabkan overaktivasi.

Pengaruh Konsentrasi Aktivator HNO₃ Terhadap Bilangan Iodin Karbon Aktif

Bilangan iodin merupakan parameter penting untuk menilai kualitas karbon aktif, karena berhubungan langsung dengan kemampuan adsorpsi terhadap molekul berukuran kecil. Semakin tinggi nilai bilangan iodin, semakin besar pula kapasitas karbon aktif dalam menyerap zat adsorbat [23]. Hasil pengujian bilangan iodin pada karbon aktif cangkang kelapa sawit ditunjukkan pada Gambar 2.



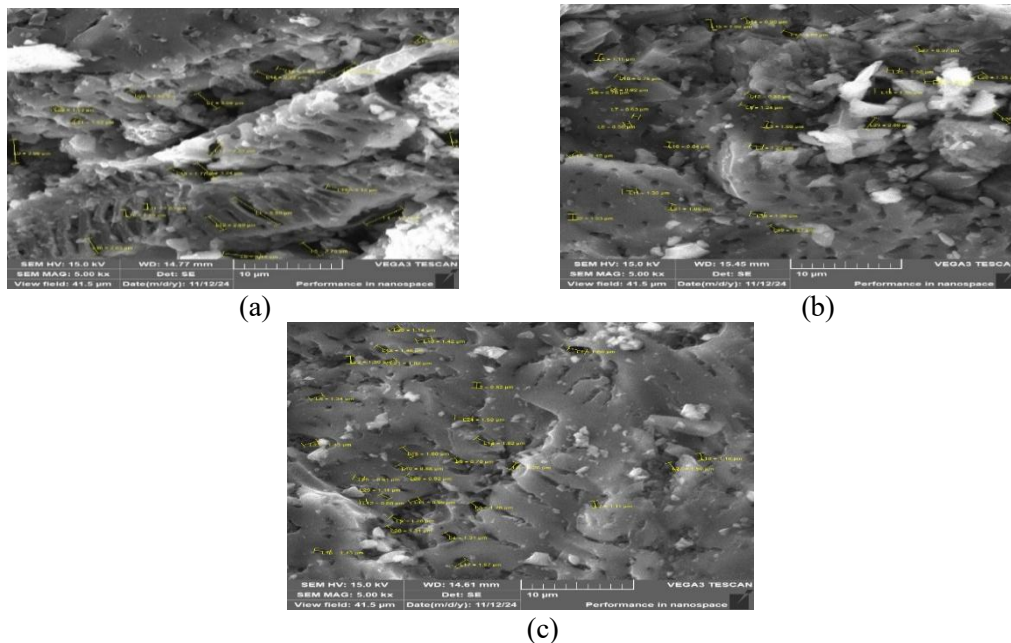
Gambar 2. Pengaruh Konsentrasi Aktivator HNO₃ Terhadap Bilangan Iodin Karbon Aktif

Bilangan iodin meningkat dari 1353,39 mg/g menjadi 1550,49 mg/g seiring kenaikan konsentrasi HNO₃ dari 0,5 M ke 1 M. Peningkatan ini menunjukkan bahwa aktivasi pada konsentrasi 1 M merupakan kondisi optimal, karena HNO₃ mampu melarutkan senyawa non-karbon (misalnya lignin, selulosa, dan tar), serta membuka pori-pori tertutup tanpa merusak struktur karbon [24]. Kondisi tersebut menyebabkan peningkatan luas permukaan aktif sehingga daya adsorpsi terhadap iodin lebih tinggi.

Peningkatan konsentrasi HNO₃ hingga 1,5 M menyebabkan bilangan iodin menurun menjadi 1221,97 mg/g, kemudian semakin berkurang pada konsentrasi 2 M (827,80 mg/g) dan 2,5 M (696,41 mg/g). Penurunan tersebut menunjukkan bahwa penggunaan aktivator pada konsentrasi yang terlalu tinggi dapat memicu *over*-aktivasi, yaitu kondisi oksidasi berlebihan pada permukaan karbon. Proses ini menyebabkan kerusakan struktur mikropori, penggabungan pori menjadi makropori yang kurang efektif, serta kerusakan pada dinding pori karbon aktif sehingga luas permukaan spesifik berkurang dan kapasitas adsorpsi menurun secara signifikan [25]. Selain itu, residu aktivator yang terperangkap di dalam pori-pori karbon serta kerusakan struktur pori akibat penggunaan aktivator berlebih dapat menyebabkan penyumbatan dan penyempitan volume pori, sehingga mengurangi luas permukaan efektif dan menurunkan kemampuan adsorpsi karbon aktif [18]

Pengaruh Konsentrasi Aktivator Terhadap Struktur Morfologi Karbon Aktif dengan Pengujian SEM

Analisis SEM dilakukan untuk mengamati morfologi permukaan karbon aktif, khususnya perubahan struktur pori setelah proses aktivasi. Analisis SEM dilakukan pada tiga sampel terpilih yang mewakili kondisi aktivasi pada konsentrasi rendah, menengah, dan tinggi untuk memperoleh gambaran morfologi permukaan karbon aktif yang representatif terhadap pengaruh variasi konsentrasi aktivator. Hasil analisa SEM dapat dilihat pada Gambar 3.



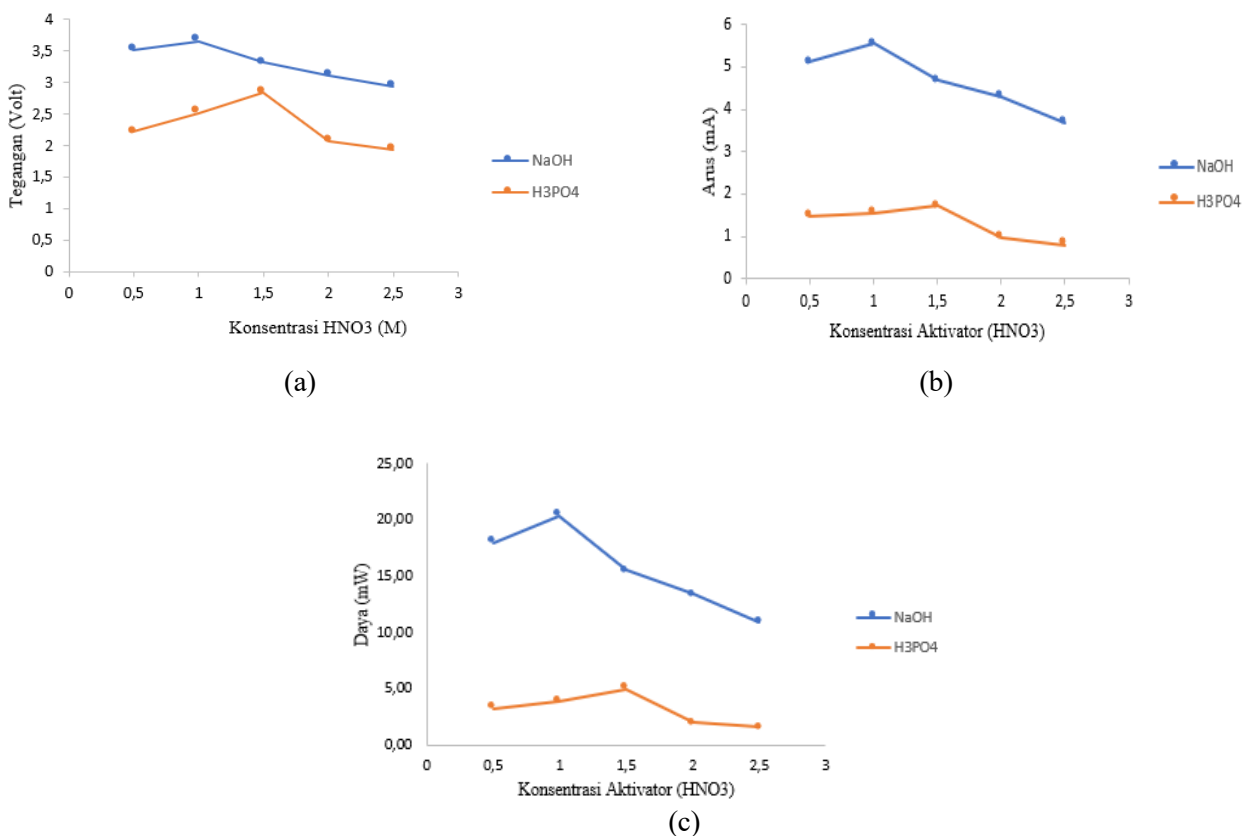
Gambar 3. Mikrograf SEM karbon aktif hasil aktivasi HNO₃ (a) 1M; (b) 1,5 M; (c) 2,5 M, dengan perbesaran 5000X

Mikrograf SEM karbon aktif hasil aktivasi dengan HNO_3 1 M menunjukkan morfologi permukaan berupa struktur berlapis dengan *crack* yang memanjang, yang menandakan terjadinya pengelupasan dan pelepasan sebagian struktur karbon. Kondisi ini berkontribusi pada pembukaan pori-pori baru. Permukaan karbon tampak lebih berserat dan terbuka, dengan ukuran pori dominan sebesar $5,98 \mu\text{m}$. Ukuran pori yang relatif besar tersebut menunjukkan bahwa proses aktivasi berlangsung secara efektif tanpa menyebabkan kerusakan struktur karbon yang signifikan, sehingga berpotensi meningkatkan luas permukaan spesifik. Pada karbon aktif hasil aktivasi HNO_3 1,5 M, permukaan terlihat lebih padat dan ditandai dengan adanya endapan berwarna putih yang mengindikasikan keberadaan residu reaksi atau material yang tidak larut sempurna. Ukuran pori menurun menjadi sekitar $2,08 \mu\text{m}$ dengan distribusi yang kurang merata. Kondisi ini menunjukkan adanya kecenderungan aktivasi berlebih yang menyebabkan sebagian pori tertutup atau tidak terbentuk secara optimal.

Karbon aktif yang diaktivasi dengan HNO_3 2,5 M memperlihatkan permukaan yang kasar dan tidak rata dengan karakteristik struktur amorf, disertai banyak retakan serta lubang. Distribusi pori tidak seragam, baik dari ukuran maupun bentuk (bulat, lonjong, dan memanjang), dengan kisaran ukuran $0,58 \mu\text{m}$ hingga $1,82 \mu\text{m}$. Hasil ini sejalan dengan temuan Cahyani et al. (2025), bahwa peningkatan konsentrasi aktivator menyebabkan penurunan volume dan jumlah pori. Aktivator berlebih berpotensi terperangkap di dalam pori, sehingga menurunkan kualitas struktur pori dan kualitas karbon aktif [26].

Pengaruh Aktivator HNO_3 dan Jenis Elektrolit Terhadap Arus, Tegangan, Dan Daya Yang Dihasilkan Oleh Baterai

Pengaruh konsentrasi aktivator dan jenis elektrolit terhadap arus, tegangan, dan daya baterai dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Pengaruh Konsentrasi Aktivator dan Jenis Elektrolit Terhadap (a) Tegangan Baterai (b) Arus Baterai (c) Daya Baterai

Tegangan, arus, dan daya baterai yang dibuat dari karbon aktif biomassa cangkang kelapa sawit dipengaruhi oleh konsentrasi aktivator dan jenis elektrolit yang digunakan. Pada Gambar 4, tegangan sel dihasilkan dari perbedaan potensial elektroda yang timbul akibat reaksi redoks antara Al sebagai anoda dan Cu sebagai katoda. Pada sistem dengan menggunakan NaOH sebagai elektrolit, tegangan baterai mencapai 3,66 V diperoleh pada penggunaan karbon hasil aktivasi HNO_3 1 M. Tegangan baterai meningkat dari 3,52 V menjadi 3,66 V pada penggunaan karbon aktif hasil aktivasi HNO_3 0,5 M dan 1 M. Selanjutnya, tegangan baterai mengalami

penurunan secara bertahap dari 3,32 V, 3,11 V, dan 2,94 V pada penggunaan karbon aktif hasil aktivasi HNO₃ 1,5 M, 2 M, dan 2,5 M. Pola serupa terjadi pada elektrolit H₃PO₄ dengan tegangan optimum 2,85 V diperoleh pada aktivasi HNO₃ 1 M dan mengalami penurunan pada konsentrasi aktivator yang lebih tinggi. Penurunan tegangan ini menunjukkan bahwa konsentrasi aktivator yang terlalu tinggi menyebabkan *over*-aktivasi yang merusak struktur pori karbon aktif sehingga menurunkan kemampuan penyimpanan elektrolit dan efisiensi transfer ion [27].

Arus tertinggi diperoleh pada baterai yang menggunakan karbon aktif hasil aktivasi HNO₃ 1 M dengan nilai 5,55 mA dan 1,72 mA berturut-turut menggunakan elektrolit NaOH dan H₃PO₄. Secara keseluruhan, baterai yang menggunakan elektrolit NaOH menghasilkan arus lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan elektrolit H₃PO₄ pada seluruh variasi konsentrasi. Hal ini disebabkan oleh sifat NaOH sebagai basa kuat yang terdisosiasi sempurna, sehingga meningkatkan mobilitas ion Na⁺ dan konduktivitas larutan. Hasil ini sejalan dengan laporan Ni et al. (2025) yang menunjukkan bahwa difusi ion Na⁺ dalam larutan NaOH jauh lebih tinggi dibandingkan elektrolit lain, sehingga mempercepat proses transfer muatan [10].

Daya keluaran baterai dihitung berdasarkan hasil pengukuran arus dan tegangan. Daya maksimum mencapai 20,31 mW pada baterai yang menggunakan karbon aktif hasil aktivasi HNO₃ 1 M dan menggunakan elektrolit NaOH, diikuti oleh baterai yang menggunakan elektrolit H₃PO₄ sebesar 4,90 mW. Setelah melewati kondisi optimum, daya keluaran menurun seiring dengan peningkatan konsentrasi aktivator, dengan nilai terendah pada karbon aktif hasil aktivasi HNO₃ konsentrasi 2,5 M sebesar 10,85 mW untuk elektrolit NaOH dan 1,53 mW untuk elektrolit H₃PO₄. Penurunan daya ini berkaitan dengan degradasi struktur pori karbon akibat *overaktivasi*, yang mengurangi kapasitas adsorpsi ion dan secara langsung menurunkan efisiensi reaksi elektrokimia [28].

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, variasi konsentrasi asam nitrat (HNO₃) terbukti berpengaruh signifikan terhadap karakteristik fisik dan kimia karbon aktif yang dihasilkan dari cangkang kelapa sawit. Berdasarkan hasil uji proksimat, bilangan iodin, dan analisis SEM, karbon aktif dengan aktivasi HNO₃ pada konsentrasi 0,5 M–1 M menunjukkan karakteristik terbaik, yang ditandai oleh kadar air dan abu yang sesuai standar, nilai bilangan iodin yang tinggi sebesar 1550,49 mg/g, serta morfologi pori yang lebih terbuka dan terdistribusi merata dengan ukuran hingga 5,98 µm. Evaluasi kinerja baterai kering menunjukkan bahwa karbon aktif hasil aktivasi HNO₃ pada konsentrasi 1 M memberikan performa elektrokimia tertinggi. Pada penggunaan elektrolit NaOH 1 M, baterai menghasilkan tegangan sebesar 3,66 V, arus 5,55 mA, dan daya 20,31 mW, dibandingkan dengan sistem yang menggunakan elektrolit H₃PO₄ 1 M, yang hanya menghasilkan tegangan sebesar 1,94 V, arus 0,79 mA, dan daya 1,53 mW. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini membuktikan karbon aktif berbasis biomassa cangkang kelapa sawit memiliki potensi yang kuat sebagai material elektroda baterai kering yang ramah lingkungan, sekaligus meningkatkan nilai tambah limbah biomassa sebagai sumber energi berkelanjutan

5. Konflik Kepentingan

Semua penulis tidak memiliki konflik kepentingan (*conflict of interest*) pada publikasi artikel ini.

Daftar Pustaka

- [1] F. Salafa, L. Hayat, dan A. Ma'ruf. "Analisis kulit buah jeruk (*Citrus sinensis*) sebagai bahan pembuatan elektrolit pada bio-baterai," *J. Riset Rekayasa Elektro*, vol. 2, no. 1, pp. 1-9, 2020.
- [2] A. F. Tanjung, Masthura, dan A. H. Daulay. "Pembuatan bio-baterai dengan memvariasikan elektroda berbahan dasar sari buah tomat (*Solanum lycopersicum*)," *J. Einstein*, vol. 10, no.1, pp. 59-64, 2022.
- [3] D. Ernawati, M. Arifudin, dan S. B. Husodo. "Baterai ramah lingkungan dari limbah serbuk kayu merbau (*Intsia bijuga*) dan matoa (*Pometia sp.*) (Eco-friendly battery from Merbau (*Intsia bijuga*) and Matoa (*Pometia sp.*) sawdust)" *J. of Tropical Wood Science and Technology*, vol. 17, no. 1, pp. 83-89, 2022.
- [4] Badan Pusat Statistik Indonesia, "Statistik Kelapa Sawit Indonesia 2023," *bps.go.id*, 2023. <https://www.bps.go.id/id/publication/2024/11/29/d5dcb42ab730df1be4339c34/statistik-kelapa-sawit-indonesia-2023.html>.
- [5] K. F. Muhammad, W. D. R. Putri, dan M. Nur, "The potency of palm kernel shell as an adsorbent," *Adv. Food Sci. Sustain. Agric. Agroindustrial Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 159–165, 2023.
- [6] C. Guizani, O. Sorsa, V. Siipola, dan T. Ohra-aho, "The effects of lignin structure on the multiscale properties and electrochemical performance of activated carbons," *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 14, no. 17, pp. 21149–21163, 2024.
- [7] I. F. Anggraini, E. Kusniawati, dan M. Mayangsari. "Pemanfaatan tongkol jagung pada pembuatan karbon aktif dengan menggunakan aktivator (Na₂CO₃) serta pengaruhnya terhadap sampel air sumur gali

- menggunakan parameter pH, turbidity, Total Suspended Solid (TSS) & Total Dissolved Solid (TDS).” *J. Cakrawala Ilmiah*, vol. 2, no. 5, pp. 2261-2272, 2023.
- [8] I. G. Inal, Y. Gokce, E. Yagmur, dan Z. Aktas. “Investigation of supercapacitor performance of the biomass based activated carbon modified with nitric acid.” *J. of the Faculty and Architecture of Gazi University*, vol. 35, no. 3, pp.1243-1255, 2020.
- [9] M. A. Pahlevi, R. Junaidi, dan Fadarina. “Prototipe baterai berbasis karbon aktif dari bambu betung (Tinjauan pengaruh karbon aktif dan elektrolit dalam meningkatkan daya baterai.” *J. Kinetika*, vol. 11, no. 1, pp. 55-60, 2020.
- [10] L. Ni dan J. Yu, “NaOH as an aqueous electrolyte to improve the performance of electric double-layer capacitors a molecular dynamics study.” *Nanomaterials*, vol. 15, no. 9, 2025.
- [11] Y. Xu, X. Wu, H. Jiang, L. Tang, K. Y. Koga, C. Fang, J. Lu, dan X. Ji. “A non-aqueous H₃PO₄ electrolyte enables stable cycling of proton electrodes.” *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 59, no. 49, pp. 22007–22011, 2020.
- [12] A. R. Evahelda, S. N. Aini, dan Nurhadini. “Pemanfaatan limbah tempurung kelapa untuk pembuatan asap cair menggunakan metode pirolisis.” *J. Agromix*, vol. 14, no 2, pp. 175-181. 2023.
- [13] A.F. Nicolas, M. Z. Hussein, Z. Zainal, dan T. Khadiran. “Palm kernel shell activated carbon as an inorganic framework for shape-stabilized phase change material.” *Nanomaterials*, vol. 8, no. 689, pp. 1-14, 2018.
- [14] E. A. Fauzia dan H. Purnama. “The effect of particle size on the characterization of activated carbon from tropical black bamboo (*Gigantochloa atrovioleacea*).” *Techno*, vol. 22, no. 2, pp. 99-106, 2021.
- [15] S. Bhunghthong, D. Aussawasathien, K. Hrimchum, dan S. Sriphalang. “Preparation and properties of activated carbon from palm shell by potassium hydroxide impregnation: effects of processing parameters.” *Chiang Mai J.Sci*, vol. 45, no. 1, pp. 462-473. 2018.
- [16] A. Priambudi, dan A. Susanti. “Proses pembuatan karbon aktif dari serbuk gergaji kayu dari daerah Malang, menggunakan aktivator NaOH.” *Distilat dari Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 10, no. 1, pp. 257-265. 2024.
- [17] Y.W. Hydhayat, M. A. S. A. Rifai, dan Sani. “Karbon aktif dari limbah daun jati menggunakan aktivator larutan KOH.” *J. Teknik Kimia*, vol 16, no. 2, pp. 87-92. 2022.
- [18] A. Husin dan A. Hasibuan. “Studi pengaruh variasi konsentrasi asam fosfat (H₃PO₄) dan waktu perendaman karbon terhadap karakteristik karbon aktif dari kulit durian.” *J. Teknik Kimia USU*, vol. 9, no. 2, pp.80-86. 2022.
- [19] X. Yang, K. Kang, L. Qiu, L. Zhao, dan R. Sun, “Effect of carbonization conditions on the yield and fixed carbon content of biochar from pruned apple tree branches”. *Renewable Energy*, vol. 146, pp. 1691-1699, 2020.
- [20] Susilawati, “Karbon aktif dari batang pisang (*Musa paradisiaca*) dengan aktivator H₃PO₄ dan K₂CO₃ untuk menurunkan FFA pada minyak goreng bekas,” Tesis. Universitas Brawijaya, 2016.
- [21] D. Ambarwati, E. D. Hastuti, dan N. Fitriyani. “Pengaruh aktivator HNO₃ terhadap karakteristik karbon aktif dari limbah tempurung kelapa.” *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*, vol. 11, no. 1, pp. 47-55, 2019.
- [22] L. Novianty, Gani, Rahmiani, Akbar, dan A. Nurahma. “Analisis proksimat karbon aktif bunga lontar (*Borassus flabellifer l*) teraktivasi asam fosfat.” *CHEMVIRO: Jurnal Kimia dan Ilmu Lingkungan*, vol. 3, no. 1, pp. 202-207, 2025.
- [23] C. Du, B. Liu, J. Hu, dan H. Li. “Determination of iodine number of activated carbon by the method of ultraviolet-visible spectroscopy.” *Material Letter*, vol, 285, 2021.
- [24] M. R. A. Kadang, M. Anas, dan R. Mongkito. “Efek variasi konsentrasi zat aktivator H₃PO₄ terhadap daya serap iodin dan metilen blue pada karbon aktif cangkang kemiri.” *Jurnal Ilmu Pendidikan Fisika Indonesia (JIPFi)*, vol. 42, no. 3, pp. 247–256, 2020.
- [25] A. Sabitov, M. Atamanov, O. Doszhanov, dan K. Saurykova. “Surface characteristics of activated carbon sorbents obtained from biomass for cleaning oil-contaminated soils.” *Molecules*, vol 29. no.16, 2024.
- [26] R. F. Cahyani, N. Nasution, dan R.Y. Lubis. “Karakteristik dan kapasitansi elektroda karbon aktif tempurung kemiri dengan variasi aktivator asam fosfat (H₃PO₄).” *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur, dan Energi*, vol. 8, no. 1, pp. 32-39, 2025.
- [27] E. M. Hutapea, Iwantono, dan R. Farma. “Pembuatan dan karakterisasi karbon aktif dari bambu betung (*Dendrocalamus asper*) dengan aktivasi KOH berbantuan gelombang mikro.” *Jurnal Komunikasi Fisika Indonesia*, vol. 14, no. 2, pp. 976–980, 2017.

- [28] S. Li, T. Xing, Y. Wang, P. Lu, W. Kong, X. Su, dan X. Wei. “Pore structure regulation and electrochemical performance characterization of activated carbon for supercapacitors.” *Frontiers in Energy Research*, vol 9, no. 2, pp. 1-12, 2021.