

SELEKSI PROSES PRA-RANCANGAN PABRIK KIMIA PEMBUATAN KARBON AKTIF DARI AMPAS TEH

Ronald Kagen Simarmata, Ernia Novika Dewi, Listiyana Candra Dewi

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia

Ronalkagen30@gmail.com ; [ernianovika@polinema.ac.id]

ABSTRAK

Industri karbon aktif di Indonesia menunjukkan prospek pertumbuhan yang sangat menjanjikan seiring meningkatnya kebutuhan adsorben pada berbagai sektor, seperti pengolahan air, makanan dan minuman, farmasi, serta industri kimia. Data Badan Pusat Statistik mencatat bahwa volume impor karbon aktif meningkat signifikan, dari sekitar 4.846 ton pada tahun 2010 menjadi lebih dari 21.000 ton pada tahun 2022, yang mencerminkan tingginya permintaan domestik. Namun, sebagian besar kebutuhan tersebut masih dipenuhi melalui impor, dengan sekitar 47% berasal dari luar negeri menurut Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Kondisi ini menjadi peluang sekaligus tantangan bagi industri nasional untuk meningkatkan kapasitas produksi secara mandiri. Salah satu solusi yang diusulkan adalah pemanfaatan ampas teh sebagai bahan baku karbon aktif. Ampas teh memiliki keunggulan berupa ketersediaan melimpah sebagai limbah, biaya rendah, serta kandungan selulosa dan lignin yang tinggi, sehingga potensial dikonversi menjadi karbon aktif. Selain itu, pemanfaatannya dapat meningkatkan nilai tambah limbah sekaligus mengurangi dampak lingkungan. Kajian ini bertujuan menentukan proses terbaik dalam produksi karbon aktif berbasis ampas teh dengan metode *factor-rating*, yang mempertimbangkan efisiensi proses dan kualitas produk. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa proses aktivasi hidrotermal merupakan alternatif paling optimal, ditinjau dari luas permukaan yang tinggi dan nilai adsorpsi iodin yang memenuhi standar industri. Dengan demikian, pengembangan pabrik berbasis proses ini diharapkan mampu memenuhi kebutuhan karbon aktif dalam negeri secara berkelanjutan, sekaligus menjadi solusi pengelolaan limbah dan meningkatkan nilai tambah sektor agroindustri di Indonesia.

Kata kunci : ampas teh, aktivasi hidrotermal, karbon aktif, seleksi proses.

ABSTRACT

The activated carbon industry in Indonesia shows very promising growth prospects as demand for adsorbents rises across various sectors, such as water treatment, food and beverages, pharmaceuticals, and the chemical industry. Data from the Central Statistics Agency shows that the volume of activated carbon imports has risen significantly, from around 4,846 tons in 2010 to over 21,000 tons in 2022, reflecting high domestic demand. However, the majority of this demand is still met through imports, with around 47% sourced from abroad according to the Ministry of Energy and Mineral Resources. This situation presents both an opportunity and a challenge for the national industry to increase its production capacity independently. One proposed solution is the use of tea waste as a raw material for activated carbon. Tea waste has the advantage of being abundantly available as waste, having low costs, and containing high levels of cellulose and lignin, making it a potential candidate for conversion into activated carbon. Furthermore, its utilisation can enhance the value of the waste whilst reducing environmental impact. The evaluation results indicate that the hydrothermal activation process is the most optimal alternative, given its high surface area and iodine adsorption values that meet industry standards. Consequently, the development of a plant based on this process is expected to meet domestic demand for activated carbon in a sustainable manner, whilst also providing a waste management solution and enhancing the value added of the agro-industrial sector in Indonesia.

Keywords: activated carbon, hydrothermal activation, process selection, tea waste

Corresponding author: Ernia Novika Dewi

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang

Jl. Soekarno-Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia

E-mail: ernianovika@polinema.ac.id



1. PENDAHULUAN

Indonesia sedang mengalami pertumbuhan pesat di sektor industri yang disertai dengan meningkatnya permintaan terhadap karbon aktif. Perkembangan sektor industri menimbulkan berbagai masalah seperti bau pada industri gas, warna dan bau pada industri obat dan makanan, serta zat warna dalam pengolahan air [1]. Untuk mencegah hal tersebut, salah satu metode yang dapat diterapkan adalah proses adsorpsi. Adsorpsi adalah proses di mana fluida melekat pada permukaan padatan dan akhirnya membentuk lapisan tipis [2]. Proses ini berfokus pada adsorben yang akan digunakan. Adsorben yang banyak digunakan pada industri di Indonesia adalah karbon aktif [3].

Karbon aktif merupakan karbon yang nilai adsorpsinya ditingkatkan melalui proses pembakaran dan aktivasi [4]. Adsorpsi adalah proses yang digunakan untuk menghilangkan zat pencemar atau limbah dari air, dengan cara molekul tersebut menempel pada permukaan adsorben [5]. Adsorben karbon aktif biasanya digunakan untuk menghilangkan berbagai jenis logam berat beracun, polusi dari zat organik, dan zat warna yang mencemari lingkungan dari limbah industri [5]. Biasanya, karbon aktif terbuat dari batu bara, lignin, bahan lignoselulosa, polimer sintesis, serta limbah karbon [6].

Data dari Badan Pusat Statistik menunjukkan bahwa kebutuhan karbon aktif pada tahun 2017 adalah sebanyak 20.076 ton per tahun. Pada tahun 2022, kebutuhan karbon aktif meningkat menjadi 28.708 ton per tahun, menunjukkan tren kenaikan dari tahun sebelumnya. [7]. Kenaikan signifikan pada permintaan karbon aktif di Indonesia mengakibatkan pada perkembangan industri pembuatan karbon aktif yang semakin pesat. Faktor utama dari melonjaknya permintaan karbon aktif yaitu pengaplikasian karbon aktif yang semakin meningkat pada kehidupan sehari-hari maupun pada industri [8].

Karbon aktif juga dapat diproduksi menggunakan bahan limbah seperti ampas teh [9]. Ampas teh sering dimanfaatkan sebagai bahan pakan ternak [10]. Ampas teh jika dikeringkan akan mengalami tingkat penyerapan ion logam yang sangat tinggi, yang diakibatkan dari tingginya kandungan selulosa, tanin, dan lignin didalamnya [11]. Kandungan dari 90% ampas teh memiliki komposisi lignoselulosa dengan kadar cukup tinggi, yaitu sekitar 48% dari berat keringnya terkandung selulosa pada ampas teh, sehingga menjadikan ampas teh memiliki potensi untuk dijadikan sebagai adsorben [12].

Seleksi proses berperan krusial dalam perancangan pabrik. Seleksi proses dilakukan untuk menghasilkan produk berkualitas tinggi, sesuai permintaan pasar, dan menguntungkan bagi perusahaan. Dengan melakukan seleksi proses, perusahaan dapat mempertimbangkan proses yang paling baik agar pengaplikasiannya dapat dilakukan secara maksimal pada pabrik. Metode *factor-rating* dapat digunakan dalam melakukan seleksi proses karena metode ini merupakan pendekatan yang sistematis dan objektif untuk mengevaluasi berbagai alternatif proses berdasarkan kriteria yang relevan, seperti efisiensi waktu, biaya produksi, dan kualitas produk. Kriteria evaluasi ini didasarkan pada prinsip-prinsip ilmiah dan metodologi yang teruji untuk memastikan pemilihan alternatif proses yang tepat. Alternatif terbaik kemudian dipilih dan diterapkan sehingga Pendirian pabrik berbasis proses ini diharapkan dapat memenuhi kebutuhan karbon aktif dalam negeri secara berkelanjutan, serta memberikan solusi pengelolaan limbah ampas teh yang ramah lingkungan serta meningkatkan nilai tambah bagi sektor agroindustri di Indonesia

2. METODOLOGI PENELITIAN

Pada kajian ini, peneliti menerapkan metode *factor-rating* sebagai pendekatan utama dalam proses penetapan seleksi. Dalam metode *factor-rating*, hasil terbaik diperoleh berdasarkan studi literatur yang telah dibandingkan, dengan mempertimbangkan aspek proses dan kualitas, sehingga alternatif dengan nilai tertinggi dipilih sebagai opsi paling optimal [13].

Pengembangan proses seleksi melibatkan serangkaian keputusan yang menentukan jenis proses produksi yang akan digunakan untuk mengubah bahan baku menjadi produk akhir. Cara kerja proses seleksi melibatkan analisis beberapa proses seperti aktivasi hidrotermal, fisika, kimia, dan fisika-kimia kemudian pemilihan proses terbaik berdasarkan penilaian metode *factor-rating*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Alternatif Pembuatan Karbon Aktif

Penggunaan aktivasi hidrotermal, fisika, kimia, dan fisika-kimia dalam pembuatan karbon aktif digunakan sehingga proses yang dilakukan mempertimbangkan faktor kualitas dan efektifitas karbon aktif tersebut.

a) Aktivasi Hidrotermal

Aktivasi hidrotermal menggunakan proses karbonisasi basah dengan air subkritik sebagai medium reaksi pada suhu relatif rendah (180-275°C) dan tekanan tinggi. Proses ini mengubah biomassa menjadi *hydrochar* yang kaya karbon dengan struktur pori yang sudah terbentuk secara alami [14]. Keunggulan utama metode ini adalah proses yang ramah lingkungan dan efisiensi energi yang lebih baik dibandingkan pirolisis kering, serta kemampuan memecah ikatan lignoselulosa secara efektif sehingga menghasilkan karbon dengan struktur pori yang optimal.

Menurut kajian literatur terbaru pada limbah kulit durian, aktivasi hidrotermal pada suhu 275°C proses ini memakan waktu selama 1 jam dan menghasilkan luas permukaan spesifik tinggi. *Yield* yang dihasilkan cukup baik, sekitar 70%, dan *hydrochar* yang dihasilkan memiliki potensi daya serap yang tinggi yaitu sebesar 885 mg/g [14]. Selain itu, pada kajian literatur menggunakan kulit batang sagu terdapat kualitas karbon aktif yaitu pada kadar air 5,6% dan kadar abu 3,26% [15]. karbon aktif hasil hidrotermal juga menunjukkan hasil luas permukaan sebesar 767 mg/g [16]. Dimana hal itu sudah cukup besar dan lebih baik dibandingkan karbon aktif hasil pirolisis konvensional.

b) Aktivasi Fisika

Aktivasi fisika dilakukan dengan pemanasan karbonisasi pada suhu tinggi (700-1100°C) menggunakan gas aktifator seperti CO_2 , uap air, atau N_2 dalam kondisi inert. Proses ini bertujuan menghilangkan zat pengotor dan memperbesar pori karbon aktif secara fisik tanpa menggunakan bahan kimia tambahan.

Penelitian pada tempurung kelapa menggunakan aktivasi fisika dengan *microwave* menunjukkan *yield* yang sangat tinggi, sekitar 70%, lalu pada hasil angka iodin karbon aktif ini mencapai 755 mg/g [17]. Pada literatur menggunakan ampas tebu juga terdapat hasil kualitas karbon aktif dengan kadar air sebesar 9,3% dan kadar abu sebesar 3,75% [18]. Aktivasi fisika unggul dalam hal kemudahan proses dan *yield* tinggi, namun kurang optimal

dalam menghasilkan porositas mikro yang sangat besar dan luas permukaan yang maksimal.

c) Aktivasi Kimia

Aktivasi kimia menggunakan bahan kimia seperti KOH , H_3PO_4 , atau $ZnCl_2$ sebagai aktivator yang pada Struktur pori yang terbuka dan luas permukaan karbon aktif ditingkatkan secara efisien pada suhu karbonisasi yang lebih rendah melalui fungsi ini. (450-800°C).

Aktivasi kimia dengan H_3PO_4 pada pelepah aren menghasilkan daya serap iodin sangat tinggi mencapai 767 mg/g, meskipun *yield*nya relatif rendah, hanya sekitar 55% [19]. Pada literatur lain menggunakan bahan kulit jagung terdapat kualitas karbon aktif untuk kadar air sebesar 6% dan kadar abu sebesar 4.5% [20]. Kelebihan aktivasi kimia adalah kemampuannya menghasilkan porositas mikro yang tinggi dan struktur karbon aktif yang sangat berpori, menjadikannya unggul dalam aplikasi adsorpsi dan elektrokimia. Namun, proses ini menggunakan bahan kimia yang memerlukan penanganan khusus dan dapat berdampak lingkungan jika tidak dikelola dengan baik.

d) Aktivasi Fisika-Kimia (Kombinasi)

Metode kombinasi aktivasi fisika dan kimia menggabungkan keunggulan kedua metode tersebut. Proses ini biasanya dimulai dengan karbonisasi pirolisis, dilanjutkan dengan aktivasi kimia dan pemanasan fisika untuk meningkatkan porositas dan luas permukaan karbon aktif secara optimal.

Hasil dari kombinasi ini adalah karbon aktif dengan luas permukaan yang lebih tinggi dari aktivasi fisika saja dengan menggunakan bahan serutan rotan mendapatkan luas permukaan sebesar 903 m²/g [21]. Kemudian terdapat *yield* yang lebih baik dibanding aktivasi kimia tunggal, biasanya berkisar 60%, daya serap iodin karbon aktif hasil kombinasi ini juga sangat baik, lebih dari 700 mg/g [22]. Serta terdapat kajian literatur menggunakan Kulit kakao menghasilkan kualitas karbon aktif dengan kadar air sebesar 4,7% dan kadar abu sebesar 5% [23]. Meski demikian, prosesnya lebih kompleks dan biaya produksinya relatif lebih tinggi.

3.2. Seleksi Proses

Seleksi proses karbon aktif dilakukan menggunakan data hasil penelitian 4 kajian terdahulu. Kajian terdahulu ini dipilih berdasarkan %*yield*, kadar air, kadar abu, luas permukaan, dan hasil iodine karbon aktif. Untuk dapat memilih proses yang paling baik dan optimal sebagai acuan dalam perancangan pembuatan karbon aktif skala pabrik, dilakukan *rating* atau pemberian nilai terhadap parameter yang tertera dalam 4 kajian literatur tersebut.

Berdasarkan kajian literatur yang disajikan, perbandingan dilakukan terhadap empat metode aktivasi yang berbeda yaitu hidrotermal, fisika, kimia, dan fisika-kimia untuk mengevaluasi hasil dari serangkaian parameter kunci meliputi aspek teknis, aspek kualitas dan aspek dampak terhadap lingkungan. Dari evaluasi tersebut, metode hidrotermal secara meyakinkan menunjukkan performa terbaik dengan meraih jumlah nilai tertinggi. Berikut tabel seleksi proses pembuatan karbon aktif dengan metode *factor-rating*

Tabel 1. Seleksi proses karbon aktif dengan metode *factor rating*

No	Parameter	Hidrotermal	Nilai	Fisika	Nilai	Kimia	Nilai	Fisika-kimia	Nilai
1	Aspek teknis								
	Kondisi proses								
	-Yield (%)	70%	7	80%	8	55%	5	60%	6
	Kondisi operasi								
	-Suhu (°C)	275°C	9	700°C	6	400°C	8	550°C	7
	-Waktu (jam)	1 jam	9	2 jam	9	16 jam	5	4 jam	8
2	Aspek kualitas								
	-Kadar air	5,6%	8	9,3%	7	6%	8	4,7%	9
	-Kadar abu	3,26%	9	3,75%	9	4,5%	7	5%	8
	-Luas permukaan (m ² /g)	767 m ² /g	7	674 m ² /g	6	874 m ² /g	8	903 m ² /g	9
	-Daya serap iodine (mg/g)	885	9	755	7	767	7	770	8
3	Aspek dampak lingkungan								
	-Polutan	Ada, tidak berbahaya	10	Ada, berbahaya	0	Ada, berbahaya	0	Ada, berbahaya	0
Total			68		52		48		55

*Keterangan rentang nilai :

10 = Sangat optimal

8 – 9 = Optimal

6 – 7 = Cukup optimal

< 6 = Cukup

Keunggulan metode hidrotermal tidak hanya terletak pada nilai totalnya, tetapi juga pada berbagai parameter kualitas dan efisiensi. Dari segi kualitas produk, metode ini menghasilkan daya serap iodine yang paling unggul, serta kadar abu terendah, yang mengindikasikan tingkat kemurnian produk yang tinggi. Keunggulan paling signifikan juga terlihat pada kondisi operasinya; metode ini hanya memerlukan suhu rendah dan waktu yang cepat serta lebih ramah lingkungan tanpa penggunaan bahan kimia berbahaya. Kondisi ini jauh lebih efisien dari segi energi dan waktu jika dibandingkan dengan metode lainnya. Sebagai perbandingan, metode lain menunjukkan adanya kekurangan pada parameter-parameter krusial. Meskipun metode fisika mampu menghasilkan *yield* tertinggi, hal ini dicapai dengan suhu operasi yang sangat tinggi. Di sisi lain, metode kimia menjadi pilihan yang paling tidak efisien karena memerlukan waktu proses terlalu lama dan menghasilkan *yield* terendah dan kadar abu tertinggi. Metode fisika-kimia menawarkan hasil yang cukup baik, terutama dengan kadar air terendah. Perlu dicatat bahwa semua

metode berhasil menghasilkan luas permukaan mesopori ($650 - 900 \text{ m}^2/\text{g}$), sehingga parameter ini tidak menjadi faktor pembeda yang signifikan.

Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa metode hidrotermal menawarkan keseimbangan yang paling optimal antara efisiensi proses dan kualitas produk akhir. Kombinasi dari kondisi operasi yang hemat energi, waktu proses yang singkat, serta hasil produk dengan daya serap dan kemurnian tertinggi menjadikannya sebagai metode yang paling efektif berdasarkan literatur yang tersedia.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Metode aktivasi hidrotermal unggul dalam memproduksi karbon aktif untuk nilai luas permukaan spesifik tertinggi dan *yield* cukup tinggi serta proses produksi yang ramah lingkungan. Secara keseluruhan, hidrotermal menjadi pilihan untuk proses produksi karbon aktif berbasis ampas teh dan proses berkelanjutan.

Penentuan seleksi proses selanjutnya, disarankan agar diperluas kajian literatur lain yang membahas kualitas parameter seperti Kadar *fixed carbon*, *volatile matter*, pH karbon aktif untuk mengoptimalkan parameter-parameter lain guna meningkatkan kualitas karbon aktif.

REFERENSI

- [1] H. Purnamawati dan B. Utami, "Pemanfaatan Limbah Kulit Buah Kakao (*Theobroma cocoa* L.) Sebagai Adsorben Zat Warna Rhodamin B," *Prosiding Seminar Nasional Fisika Dan Pendidikan Fisika (SNFPF) Ke-5*, vol. 5, no. 1, hal. 12–18, 2014.
- [2] G. G. R. Maulana, L. Agustina, dan S. Susi, "Proses Aktivasi Arang Aktif Dari Cangkang Kemiri (*Aleurites moluccana*) dengan variasi jenis dan konsentrasi aktivator kimia," *Ziraa'ah Majalah Ilmiah Pertanian*, vol. 2, no. 1, hal. 247–256, 2017.
- [3] A. R. Permatasari, L. U. Khasanah, dan E. Widowati, "Karakterisasi Karbon Aktif Kulit Singkong (*Manihot Utilissima*) dengan Variasi Jenis Aktivator," *Jurnal Teknologi Hasil Pertanian*, vol. 7, no. 3, hal. 70–75, 2014.
- [4] S. Gunawan, H. Hasan, dan R. D. W. Lubis, "Pemanfaatan Adsorben dari Tongkol Jagung sebagai Karbon Aktif untuk Mengurangi Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor," *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, vol. 3, no. 1, hal. 38–47, Mar 2020.
- [5] E. Erawati dan A. Fernando, "Pengaruh Jenis Aktivator Dan Ukuran Karbon Aktif Terhadap Pembuatan Adsorbent Dari Serbuk Gergaji Kayu Sengon (*Paraserianthes Falcataria*)," *Jurnal Integrasi Proses*, vol. 7, no. 2, hal. 58, Des 2018.
- [6] B. Y. Winata, K. Erliyanti, R. Yogaswara, dan A. Saputro, "Pra Perancangan Pabrik Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa dengan Proses Aktivasi Kimia pada Kapasitas 20.000 ton/tahun," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 9, hal. 399–404, 2020.
- [7] Badan Pusat Statistik, *Statistik Teh Indonesia 2022*, vol. 16, 2022.
- [8] M. Manurung, S. Sahara, dan P. Sihombing, "Pembuatan dan Karakterisasi Arang aktif dari Batang Bambu Apus (*Gigantochloa apus*) dengan Aktivator H_3PO_4 ," *Jurnal Kimia (Journal of Chemistry)*, vol. 13, no. 3, hal. 16–21, 2019.
- [9] R. F. Azzahra dan M. Taufik, "Bioadsorben Berbahan Dasar Limbah Ampas Teh (*Camellia Sinensis*) sebagai Agent Penyerap Logam Berat Fe dan Pb Pada Air Sungai," *Jurnal Kinetika*, vol. 11, no. 1, hal. 15-20, 2020.

- [10] D. Fernianti, "Karbonisasi Ampas Teh yang Sudah di Seduh dan Aktivasi Menggunakan Asam Sulfat (H_2SO_4)," *Jurnal Distilasi Universitas Muhammadiyah Palembang*, vol. 3, no. 1, hal. 10–15, 2018.
- [11] F. Panjaitan, "Pemanfaatan Karbon Aktif dari Ampas Teh sebagai Adsorben pada Proses Adsorpsi β -Karoten yang Terkandung dalam Minyak Kelapa Sawit Mentah (Crude Palm Oil)," Skripsi, Universitas Sumatera Utara, Medan, 2017.
- [12] D. A. Pratama, A. M. A. Nooe, dan A. S. Sanjaya, "Efektivitas Ampas Teh sebagai Adsorben Alternatif Logam Fe dan Cu pada Air Sungai Mahakam," *Jurnal Integrasi Proses*, vol. 6, no. 4, hal. 131–138, 2017.
- [13] D. R. Zalsabitha dan A. Susanti, "Seleksi Proses Dan Penentuan Kapasitas Pabrik Karbon Aktif Dari Serbuk Gergaji Kayu," *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 9, no. 2, hal. 251–257, 2023.
- [14] Sutisna, "Sintesis Satu Langkah Komposit TiO_2 -Karbon Aktif Menggunakan Metode Hidrotermal," *Jurnal Positron*, vol. 2, no. 1, hal. 10–12, 2023.
- [15] H. Siruru, W. Syafii, dan N. J. Wistara, "Sifat-Sifat Arang Aktif Kulit Batang Sagu Hasil Karbonisasi Hidrotermal," *Jurnal Ilmu Teknologi Kayu Tropis*, vol. 2, no. 1, hal. 11–15, 2020.
- [16] Utomo dan A. Setiawan, "Sintesis karbon aktif dari kulit salak dengan aktivasi hidrotermal," Thesis, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung, 2018.
- [17] N. Amalia, "Sintesis dan Karakterisasi Karbon Aktif dari Limbah Cangkang Kelapa Sawit dengan Aktivasi Fisika," *Repository Universitas Ar-Raniry*, vol. 2, no. 3, hal. 17–20 2019.
- [18] M. Manurung, O. Ratnayani, dan Y. Ciawi, "Karbon dari Bahan Alam sebagai Adsorben Ramah Lingkungan: Potensi, Tantangan, dan Aplikasinya," *Journal of Environmental Engineering Innovations*, vol. 5, no. 1, hal. 12–18 2025.
- [19] I. F. Anggraini, E. Kusniawati, dan M. Mayangsari, "Pemanfaatan Tongkol Jagung Pada Pembuatan Karbon Aktif Dengan Menggunakan Aktivator (Na_2CO_3) Serta Pengaruhnya Terhadap Sampel Air Sumur Gali Menggunakan Parameter Ph, Turbidity, Total Suspended Solid (TSS) & Total Disolved Solid (TDS)," *Jurnal Cakrawala Ilmiah*, vol. 2, no. 4, hal. 9–12, Jan 2023.
- [20] F. E. Pujiono dan T. A. Mulyati, "Potential Of Activated Carbon Produced From Agriculture Waste For Water Treatment Material," *Jurnal Wiyata*, vol. 4, no. 2, hal. 11–15, Jun 2018.
- [21] C. H. Sembiring, M. Husna, dan R. Sirait, "Preparasi Karbon Aktif Limbah Kulit Ubi Kayu Menggunakan Aktivasi NaOH Berbantuan Gelombang Mikro," *Journal Online Physics*, vol. 8, no. 1, hal. 33–38, 2023.
- [22] Muflihatun, "Pemanfaatan Karbon Aktif Berbasis Biomassa Lokal sebagai Material Elektroda Superkapasitor: Review Muflihatun," *Journal of Physics*, vol. 6, no. 1, hal. 20–23, 2025.
- [23] R. Budiman, "Analisis Efektifitas Aktivasi Fisika-Kimia Zat H_3PO_4 Dan Zat $ZnCl_2$ Terhadap Daya Adsorpsi Karbon Aktif Kulit Buah Kakao Pada Pengolahan Limbah Air Terproduksi Lapangan X," Skripsi, Universitas Islam Riau, Pekanbaru, 2021.