

A study of structural and elemental properties characterization of *hydrochar* derived from empty fruit bunches through *hydrothermal carbonization*

Moahamed Abubakar Abdelrahman¹, Akhmad Faruq Alhikami², Ena Marlina³

^{1,2,3}Universitas Islam Malang

mhmdabubker@gmail.com, alhikami@unisma.ac.id, ena.marlina@unisma.ac.id

Abstract

This research examines the hydrothermal carbonization (HTC) of empty fruit bunches (EFB), a lignocellulosic byproduct of palm oil production, utilizing tofu wastewater as the reaction medium. It responds to the growing need for innovative waste management strategies and sustainable carbon material development. The novelty of this work lies in the integrated use of two underutilized waste streams: EFB and tofu wastewater, a combination rarely investigated. HTC was performed at 180 °C and 210 °C for 8 hours with a biomass to solvent ratio of 1:10. The resulting hydrochars were analyzed using SEM, EDX, and FTIR. Results revealed a significant rise in carbon content (from 68.88 to 75.62 %) at higher temperature, alongside reduced oxygen and enhanced porosity. FTIR spectra confirmed increased aromaticity and oxygen containing functional groups, indicating greater carbonization. The findings suggest tofu wastewater not only acts as a solvent but also improves the structural and chemical properties of hydrochar. This approach offers a promising route for sustainable waste valorization and environmental applications.

Keywords—Hydrochar, Empty Fruit Bunches, Tofu Wastewater, HTC, SEM, FTIR

Abstraksi

Penelitian ini mengkaji proses karbonisasi hidrotermal (HTC) terhadap tandan kosong kelapa sawit (EFB), yang merupakan limbah lignoselulosa dari produksi minyak sawit, dengan menggunakan air limbah tahu sebagai media reaksi. Studi ini merespons kebutuhan akan strategi pengelolaan limbah yang inovatif serta pengembangan material karbon berkelanjutan. Keunikan penelitian ini terletak pada pemanfaatan gabungan dua jenis limbah agroindustri yang kurang dimanfaatkan, yaitu EFB dan air limbah tahu, yang jarang diteliti secara bersamaan. Proses HTC dilakukan pada suhu 180 °C dan 210 °C selama 8 jam dengan rasio biomassa terhadap pelarut 1:10. Hidrokar yang dihasilkan dikarakterisasi menggunakan SEM, EDX, dan FTIR. Hasil menunjukkan peningkatan signifikan kadar karbon (dari 68,88 menjadi 75,62 %) pada suhu yang lebih tinggi, disertai penurunan kadar oksigen dan peningkatan porositas. Spektrum FTIR menunjukkan peningkatan gugus aromatik dan gugus fungsi yang mengandung oksigen, menandakan tingkat karbonisasi yang lebih tinggi. Temuan ini menunjukkan bahwa air limbah tahu tidak hanya berfungsi sebagai pelarut, tetapi juga meningkatkan sifat struktural dan kimia dari hidrokar. Pendekatan ini menawarkan jalur yang menjanjikan untuk valorisasi limbah secara berkelanjutan dan aplikasi lingkungan.

Kata Kunci—Hidrokar, Tandan Kosong Sawit, Air Limbah Tahu, HTC, SEM, FTIR

Pendahuluan

Peningkatan pesat dalam aktivitas pertanian dan industri telah menimbulkan tantangan lingkungan yang signifikan, terutama dalam pengelolaan limbah biomassa dan limbah industri. Produksi kelapa sawit, sebagai salah satu komoditas pertanian utama secara global, menghasilkan limbah biomassa dalam jumlah besar seperti *empty fruit bunches* (EFB), cangkang sawit, dan serat. Pembuangan limbah-limbah tersebut secara tidak tepat dapat menyebabkan dampak ekologis serius, termasuk emisi gas rumah kaca, degradasi tanah, dan pencemaran air [1]. [2].

Sementara itu, industri tahu menghasilkan limbah cair dengan volume besar dan rasio karbon terhadap nitrogen (C/N) yang tinggi. Pengelolaan limbah ini secara terpisah sangat mahal, namun kandungan nutrisinya yang tinggi menjadikannya kandidat ideal untuk integrasi ke dalam proses biokonversi, sehingga dapat mengurangi emisi gas rumah kaca serta menurunkan biaya pengolahan [3].

Salah satu metode yang menjanjikan untuk menghadapi tantangan pengelolaan limbah tersebut adalah *Hydrothermal Carbonization* (HTC), yaitu proses konversi biomassa dan air limbah menjadi hidrokar dalam kondisi suhu tinggi berbasis air. Dengan mengintegrasikan HTC ke dalam strategi pengelolaan biomassa dan limbah cair, industri dapat menerapkan pendekatan ekonomi sirkular sambil meminimalkan dampak lingkungan yang merugikan dari metode pembuangan konvensional.

HTC merupakan teknologi yang relatif baru yang memanfaatkan kondisi air subkritis (180°C – 250°C) untuk mengkonversi biomassa basah menjadi hidrokar tanpa memerlukan pengeringan awal, sehingga lebih hemat energi. Hidrokar yang dihasilkan merupakan material kaya karbon dengan karakteristik porositas tinggi, keberadaan gugus fungsi aktif, serta kapasitas adsorpsi yang tinggi. Karakteristik ini memberikan potensi besar untuk aplikasi lingkungan seperti remediasi polutan, perbaikan tanah, serta bahan dasar material karbon lanjutan [4]. [5]. Selain mengurangi

volume limbah, proses ini juga meningkatkan nilai tambah biomassa secara signifikan.

Penelitian sebelumnya telah menunjukkan potensi besar dari EFB sebagai bahan baku HTC. [2] mengeksplorasi konversi EFB, terutama cangkang sawit, menjadi hidrokar dan menyoroti peningkatan sifat fisikokimia material. [1] juga meneliti dampak HTC terhadap EFB dan melaporkan perubahan struktural serta kimiawi yang signifikan. Penggunaan air limbah tahu sebagai pelarut atau reaktan pendamping dalam HTC juga telah menunjukkan kemampuannya dalam meningkatkan kualitas hidrokar sekaligus menyelesaikan permasalahan pembuangan air limbah tahu [6].

Karakterisasi hidrokar merupakan langkah penting dalam menentukan potensi aplikasinya. Teknik analisis seperti Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Scanning Electron Microscopy (SEM), dan Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) digunakan untuk menilai gugus fungsi, morfologi permukaan, dan komposisi unsur dari hidrokar. Informasi ini memungkinkan manipulasi sifat hidrokar agar sesuai dengan kebutuhan aplikasi tertentu [2]. [8]. [9].

Dengan menggabungkan EFB, air limbah tahu, dan teknologi HTC, para peneliti sedang membangun pendekatan inovatif dalam pengelolaan limbah yang tidak hanya mengurangi dampak negatif terhadap ekosistem, tetapi juga menciptakan nilai tambah dari produk limbah secara berkelanjutan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kelayakan pemanfaatan limbah tahu sebagai pelarut dalam proses HTC terhadap EFB, serta mengidentifikasi karakteristik struktural dan elemental dari hidrokar yang dihasilkan. Kandungan organik dan nutrisi dalam air limbah tahu seperti karbohidrat, protein, dan lipid dapat berperan sebagai agen pereduksi atau mempercepat hidrolisis selama proses HTC, sehingga meningkatkan efisiensi reaksi, mutu hidrokar, dan potensi aplikasinya.

Bahan dan Metode

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental untuk menghasilkan dan menganalisis hidrokar yang berasal dari *empty fruit bunches* (EFB) menggunakan air limbah tahu sebagai pelarut dalam proses *Hydrothermal Carbonization* (HTC). Proses penelitian melibatkan tiga tahapan utama, yaitu persiapan material, pelaksanaan proses HTC, dan karakterisasi hidrokar untuk mengevaluasi morfologi struktur, komposisi unsur, dan gugus fungsi. Pendekatan ini dipilih untuk memastikan bahwa tujuan penelitian dapat tercapai secara sistematis dan objektif melalui pengamatan langsung terhadap perubahan yang terjadi selama proses.

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Terpadu Universitas Islam Malang (UNISMA) pada bulan November hingga Desember 2024. Analisis karakterisasi menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) dan Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) dilakukan di laboratorium Universitas Brawijaya untuk mendapatkan hasil analisis mikrostruktur dan gugus fungsi yang lebih akurat.

Dalam penelitian ini, variabel bebas yang digunakan adalah suhu reaksi, yang diatur pada dua tingkat, yaitu 180°C dan 210°C. Pemilihan suhu ini didasarkan pada temuan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa suhu reaksi memiliki pengaruh besar terhadap efisiensi karbonisasi dan modifikasi struktur biomassa lignoselulosa. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah karakteristik hidrokar yang dihasilkan, meliputi morfologi struktur, komposisi unsur, dan gugus fungsi. Untuk memastikan hasil yang diperoleh hanya disebabkan oleh perubahan suhu, beberapa variabel lain dikontrol secara ketat, seperti rasio massa antara biomassa dan pelarut yang ditetapkan 1:10 (3 gram EFB dicampur dengan 30 mL air limbah tahu) serta waktu reaksi yang ditetapkan selama 8 jam.

Persiapan bahan baku dimulai dengan pemisahan dan pembersihan serat EFB secara manual untuk menghilangkan kotoran dan sisa minyak. Setelah itu, serat dibersihkan menggunakan air bersih dan dikeringkan dalam oven selama 24 jam pada suhu 105°C untuk mengurangi kadar air. Serat kering kemudian digiling menggunakan blender berkecepatan tinggi

hingga menjadi bubuk halus yang digunakan sebagai bahan utama dalam proses HTC.

Proses HTC dilakukan dengan mencampurkan 3 gram bubuk EFB dengan 30 mL air limbah tahu dan mengaduknya selama 7 hingga 10 menit hingga membentuk campuran homogen. Campuran ini kemudian dimasukkan ke dalam reaktor autoklaf yang tertutup rapat untuk menjaga tekanan. Reaksi dilakukan pada suhu 180°C dan 210°C selama 8 jam. Kondisi ini dipilih untuk mengkaji pengaruh suhu terhadap hasil karbonisasi serta karakteristik hidrokar yang dihasilkan.

Setelah reaksi selesai, hidrokar yang terbentuk dipisahkan dari fase cair menggunakan proses filtrasi, kemudian dicuci dengan air suling hingga mencapai pH netral untuk menghilangkan sisa asam dan pengotor lainnya. Hidrokar yang sudah bersih kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 100°C selama 24 jam untuk mendapatkan produk padat yang stabil dan siap dianalisis. Gambar 1 menunjukkan tahapan proses *Hydrothermal Carbonization*



Gambar 1. Instalasi HTC

Data dikumpulkan secara sistematis selama seluruh proses eksperimen. Pada tahap persiapan material, data yang dicatat meliputi berat, volume, dan waktu pengolahan bahan. Selama proses HTC, parameter reaksi seperti suhu, tekanan, dan durasi reaksi didokumentasikan. Sementara itu, hasil karakterisasi dikumpulkan dalam bentuk spektrum dari FTIR, citra mikroskop dari SEM, dan data komposisi unsur dari analisis EDX.

Data hasil karakterisasi kemudian dianalisis untuk memperoleh informasi bermakna mengenai sifat hidrokar yang dihasilkan. Spektrum FTIR digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang mungkin mendukung aplikasi adsorpsi atau remediasi. Citra SEM dianalisis untuk mengevaluasi morfologi permukaan dan porositas, sedangkan data EDX digunakan untuk menentukan kandungan unsur utama.

Hasil dan Pembahasan

Morfologi struktur hidrocar dianalisis menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM). Gambar SEM memperlihatkan karakteristik struktur yang berbeda pada masing-masing sampel, tergantung pada suhu reaksi yang digunakan. SEM dari EFB mentah menunjukkan struktur serat yang teratur dan saling terhubung, dengan dinding sel tanaman yang masih utuh. Permukaan EFB mentah tampak relatif halus dengan struktur memanjang yang menunjukkan keberadaan komponen selulosa dan hemiselulosa yang belum terdegradasi.

Setelah menjalani proses HTC pada suhu 180°C, struktur material berubah drastis. Hidrocar EFB180 menunjukkan morfologi yang padat dan tidak beraturan, dengan terbentuknya aglomerasi partikel serta munculnya mikroretakan dan pori-pori halus. Hal ini merupakan akibat dari degradasi hemiselulosa dan dekomposisi parsial selulosa, yang menghasilkan material yang lebih karbonatif. Permukaan hidrocar pada suhu ini tampak lebih kasar, menunjukkan hilangnya senyawa volatil dan komponen organik, yang berkontribusi terhadap peningkatan kerapatan hidrocar. Meskipun struktur ini menjanjikan untuk aplikasi adsorpsi, karbonisasi yang belum sempurna pada 180°C kemungkinan masih menyisakan residu organik.

Sebaliknya, analisis SEM terhadap hidrocar yang dihasilkan pada 210°C menunjukkan transformasi struktural yang lebih kuat. Permukaan EFB210 tampak lebih padat dengan pengurangan fitur serat yang terlihat, menandakan tingkat karbonisasi yang lebih tinggi dibandingkan EFB180. Tingkat fragmentasi meningkat, porositas lebih menonjol, dan morfologi permukaan lebih tidak beraturan. Proses degradasi termal terhadap hemiselulosa dan selulosa telah lebih lanjut menghancurkan kerangka lignoselulosa asli, menghasilkan struktur karbonatif yang lebih stabil. Permukaan yang lebih kasar kemungkinan besar

disebabkan oleh peningkatan reaksi kondensasi karbon dan hilangnya senyawa volatil.

Jika dibandingkan dengan EFB mentah, perbedaan antara kedua produk HTC sangat mencolok. EFB mentah masih mempertahankan jaringan serat yang terorganisasi dan dinding sel utuh, sedangkan EFB210 telah berubah menjadi material yang sangat fragmentatif dan berpori. Transformasi morfologi ini mengindikasikan bahwa peningkatan suhu dalam HTC memperkuat karbonisasi dan menghasilkan material yang lebih cocok untuk aplikasi seperti adsorpsi, penyimpanan energi, atau amandemen tanah karena luas permukaan dan porositasnya yang meningkat. Temuan ini sejalan dengan penelitian oleh [1], yang juga mencatat perubahan struktural serupa pada hidrocar dari EFB, serta laporan dari [4], yang menunjukkan bahwa suhu tinggi mempercepat degradasi komponen lignoselulosa dan meningkatkan kekasaran permukaan serta porositas.

Selain perubahan morfologi, distribusi muatan permukaan hidrocar dianalisis menggunakan perangkat lunak ImageJ, yang membaca intensitas kecerahan pada gambar SEM. Warna cerah (kuning hingga merah) menunjukkan area bermuatan positif, sedangkan warna gelap (biru keunguan) menunjukkan muatan negatif [9]. Sampel EFB mentah didominasi warna biru gelap, mengindikasikan permukaan bermuatan negatif akibat penyerapan elektron SEM. Titik terang yang jarang menunjukkan adanya daerah lokal dengan muatan positif.

Pada EFB180, permukaan memperlihatkan campuran daerah terang dan gelap, mencerminkan distribusi muatan positif dan negatif secara bersamaan. Hal ini disebabkan oleh keberadaan gugus fenolik (-OH) yang mulai muncul. Sedangkan pada EFB210, permukaan tampak lebih terang secara keseluruhan dibandingkan EFB mentah, menunjukkan bahwa sebagian besar

permukaan kini bermuatan positif, dengan hanya sedikit daerah gelap tersisa. Peningkatan kecerahan dari 180°C ke 210°C menandakan konsentrasi gugus hidroksil (-OH) yang lebih tinggi, yang memperkuat kerapatan muatan positif.

Komposisi unsur hidrocar dianalisis menggunakan EDX. Tabel 1 menyajikan perbandingan antara ketiga sampel. EFB mentah mengandung karbon sebesar 68,88%, yang meningkat menjadi 70,26% pada EFB180 dan 75,62% pada EFB210. Peningkatan ini menunjukkan bahwa karbonisasi semakin kuat pada suhu tinggi, sebagai hasil dari degradasi hemiselulosa dan selulosa serta pembentukan struktur aromatik yang terkondensasi. Hasil ini sejalan dengan laporan [4], yang mencatat peningkatan kadar karbon dalam hidrocar akibat pembentukan kluster aromatik berbasis lignin pada suhu tinggi. Kandungan oksigen menunjukkan tren non-linier. Pada EFB mentah sebesar 19,65%, meningkat menjadi 27,38% pada EFB180, yang kemungkinan disebabkan oleh masuknya gugus fungsional beroksigen dari limbah tahu, seperti karboksil. Namun, pada EFB210 kadar oksigen menurun menjadi 23,58%, menunjukkan bahwa reaksi dehidrasi dan dekarboksilasi telah terjadi, mengurangi kandungan air dan gugus fungsional beroksigen. Pola ini konsisten dengan temuan [1] dan [2], yang menunjukkan peningkatan karbon dan penurunan oksigen pada suhu HTC yang lebih tinggi.

Unsur mineral seperti kalium (K), kalsium (Ca), besi (Fe), aluminium (Al), dan silikon (Si) menunjukkan perilaku pelindian yang jelas. Kadar K dan Ca menurun tajam seiring kenaikan suhu, dari 0,17% dan 0,23% pada EFB mentah menjadi hanya 0,01% dan 0,02% pada EFB210. Hal ini menunjukkan pelarutan ion dalam kondisi hidrotermal asam. Fe dan Al juga menunjukkan tren menurun serupa, sedangkan Si mengalami penurunan non-linier: meningkat pada EFB180 (0,74%) lalu turun drastis pada EFB210 (0,10%).

Fenomena ini menunjukkan adanya reorganisasi struktur silika-aluminat seperti yang dijelaskan oleh [9]. Magnesium (Mg) hampir sepenuhnya hilang dari hidrocar, menegaskan efektivitas proses HTC dalam menghilangkan mineral dari biomassa.

Tabel 1. Komposisi Unsur Hidrocar

Element	Raw	EFB180	EFB210
	Weight%	Weight%	Weight%
C	68.88	70.26	75.62
O	19.65	27.38	23.58
K	0.17	0.11	0.01
Ca	0.23	0.10	0.02
Fe	0.39	0.31	0.05
Al	0.11	0.66	0.13
Si	0.48	0.74	0.10
Mg	0.09	-	-

Transformasi gugus fungsi selama HTC dianalisis menggunakan FTIR. Penurunan intensitas peregangan O-H (pada 3300 cm^{-1}) pada EFB180 dibandingkan bahan mentah menunjukkan terjadinya dehidrasi, eterifikasi, atau penghilangan air terikat. Namun, kembalinya intensitas pita ini pada EFB210 menunjukkan kemungkinan terbentuknya gugus karboksilat akibat reaksi oksidatif pada suhu tinggi. Sementara itu, peningkatan bertahap pada pita vibrasi C-H (2900 cm^{-1}) dan C=C (1650 cm^{-1}) menunjukkan transisi dari struktur alifatik ke aromatik, yang menandakan terjadinya reaksi kondensasi khas karbonisasi lanjut.

Pita serapan Si-O-Si yang konsisten pada 1031 cm^{-1} di seluruh sampel menunjukkan stabilitas termal struktur silika. [8] mencatat bahwa keberadaan gugus ini bisa memainkan peran katalitik dalam reaksi karbonisasi, meskipun perannya perlu diteliti lebih lanjut. Spektrum FTIR dari EFB210 menunjukkan profil khas dengan intensifikasi pita C=C dan O-H, menandakan terjadinya kombinasi antara proses karbonisasi dan oksidasi. Hal ini mencerminkan dinamika

kompleks dalam transformasi gugus fungsi selama perlakuan hidrotermal.

Kesimpulan

Penelitian ini telah mengkaji proses *Hydrothermal Carbonization* (HTC) terhadap *empty fruit bunches* (EFB) dengan menggunakan air limbah tahu sebagai pelarut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu reaksi memiliki pengaruh signifikan terhadap kualitas dan struktur hidrokar yang dihasilkan. Pada suhu 210°C, hidrokar menunjukkan tingkat karbonisasi yang lebih tinggi, struktur yang lebih terfragmentasi, serta porositas yang lebih berkembang dibandingkan dengan suhu 180°C. Analisis SEM mengungkapkan transformasi morfologi dari struktur serat tanaman mentah menjadi permukaan hidrokar yang kasar dan berpori. Densitas muatan permukaan dan kekasaran juga meningkat seiring kenaikan suhu, yang diasosiasikan dengan konsentrasi gugus hidroksil (-OH) yang lebih tinggi.

Komposisi unsur menunjukkan peningkatan kandungan karbon dari 68,88% pada EFB mentah menjadi 75,62% pada EFB210, sedangkan kandungan oksigen menurun. Unsur mineral seperti kalium, kalsium, dan magnesium mengalami pelindian signifikan selama proses HTC. Hasil analisis FTIR menunjukkan peningkatan struktur aromatik dan stabilitas gugus fungsi, dengan keberadaan pita Si-O-Si yang konsisten pada semua sampel, menandakan kestabilan termal dari jaringan silika dalam struktur hidrokar.

Hidrokar yang dihasilkan dari EFB pada suhu 210°C memiliki potensi tinggi untuk berbagai aplikasi. Dalam konteks lingkungan, hidrokar ini dapat digunakan untuk adsorpsi logam berat atau polutan organik, perbaikan tanah, serta sekuester

karbon karena porositas tinggi dan stabilitas strukturnya. Dalam bidang energi, peningkatan kandungan karbon tetap menunjukkan bahwa hidrokar berpotensi sebagai bahan bakar padat atau prekursor karbon aktif untuk sistem energi karena densitas energi dan kemampuan pembakaran yang meningkat.

Meski demikian, terdapat beberapa keterbatasan dalam studi ini. Komposisi kimia air limbah tahu diasumsikan homogen tanpa dilakukan karakterisasi rinci terhadap variasi aktualnya. Selain itu, penelitian ini hanya menggunakan dua titik suhu reaksi, sehingga belum memberikan profil optimasi yang menyeluruh. Produk cair hasil HTC juga belum dianalisis, padahal kemungkinan mengandung senyawa organik atau komponen bernilai industri yang penting.

Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, perlu diperluas rentang suhu dan waktu tinggal dalam proses HTC untuk mendapatkan pemahaman lebih dalam terhadap pengaruhnya terhadap sifat hidrokar. Produk cair HTC sebaiknya dianalisis lebih lanjut, terutama untuk mengidentifikasi kandungan nutrisi yang dapat dimanfaatkan kembali dalam aplikasi pertanian atau energi. Analisis pembakaran juga perlu dilakukan untuk menilai kelayakan hidrokar sebagai biofuel, dengan fokus pada nilai kalor (HHV), kandungan abu, dan emisi. Selain itu, pengujian kinerja hidrokar dalam aplikasi nyata seperti pengolahan air limbah dan perbaikan tanah perlu dilaksanakan untuk membuktikan efektivitasnya di lapangan.

Daftar Pustaka

- [1] S. S. Jamari and J. R. Howse, "The effect of the hydrothermal carbonization process on palm oil empty fruit bunch," *Biomass and Bioenergy*, vol. 47, pp. 82–90, 2012, doi: 10.1016/j.biombioe.2012.09.061.
- [2] S. Nizamuddin, N. S. Jayakumar, J. N. Sahu, P. Ganesan, A. W. Bhutto, and N. M. Mubarak, "Hydrothermal carbonization of oil palm shell," *Korean J. Chem. Eng.*, vol. 32, no. 9, pp. 1789–1797, 2015, doi: 10.1007/s11814-014-0376-9.
- [3] H. Feng *et al.*, "Tofu wastewater as a carbon source flowing into municipal wastewater treatment plants for reductions of costs and greenhouse gas emissions," *J. Environ. Manage.*, vol. 370, no. May, p. 122550, 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.122550.
- [4] W. Sisuthog, L. Attanatho, and C. Chaiya, "Conversion of empty fruit bunches (EFBs) by hydrothermal carbonization towards hydrochar production," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 242–248, 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.10.183.
- [5] T. Wang, Y. Zhai, Y. Zhu, C. Li, and G. Zeng, "A review of the hydrothermal carbonization of biomass waste for hydrochar formation: Process conditions, fundamentals, and physicochemical properties," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 90, no. March, pp. 223–247, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.071.
- [6] U. Choe, A. M. Mustafa, X. Zhang, K. Sheng, X. Zhou, and K. Wang, "Effects of hydrothermal pretreatment and bamboo hydrochar addition on anaerobic digestion of tofu residue for biogas production," *Bioresour. Technol.*, vol. 336, no. March, p. 125279, 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2021.125279.
- [7] W. Wang, W. H. Chen, and M. F. Jang, "Characterization of hydrochar produced by hydrothermal carbonization of organic sludge," *Futur. Cities Environ.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–10, 2020, doi: 10.5334/fce.102.
- [8] R. Mohadi *et al.*, "Low-Cost Yet High-Performance Hydrochar Derived from Hydrothermal Carbonization of Duku Peel (*Lansium domesticum*) for Cr(VI) Removal from Aqueous Solution," *Indones. J. Chem.*, vol. 22, no. 6, pp. 1523–1533, 2022, doi: 10.22146/ijc.73353.
- [9] W. Sisuthog, N. Prasongthum, A. Suemanotham, and Y. Thanmongkhon, "Indonesian Journal of Science & Technology High-Porosity Hydrochar From Oil Palm Empty Fruit Bunches Via Single-Step Hydrolytic Agent-Assisted Hydrothermal Carbonization," vol. 9, pp. 709–720, 2024.
- [10] D. Irawan, W. Wijayanti, S. Wahyudi, and I. N. G. Wardana, "Modification effects of Na-bentonite catalyst with organic compounds increasing hydrogen production from biomass pyrolysis," *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, vol. 11, no. March, p. 101206, 2025, doi: 10.1016/j.cscee.2025.101206.
- [11] M. Jalilian, R. Bissessur, M. Ahmed, A. Hsiao, Q. S. He, and Y. Hu, "A review: Hydrochar as potential adsorbents for wastewater treatment and CO₂ adsorption," *Sci. Total Environ.*, vol. 914, no. December 2023, p. 169823, 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.169823.