

ANALISIS MORFOLOGI PERMUKAAN DAN KOMPOSISI ELEMEN HYDROCHAR DARI LIMBAH TANDAN KOSONG SAWIT MENGGUNAKAN TEKNIK *HYDROTHERMAL CARBONIZATION*

Ainun Nadjil Naiem¹, Akhmad Faruq Alhikami², Ena Marlina³

¹Universitas Islam Malang,
email: 21901052028@unisma.ac.id

²Universitas Islam Malang,
email: alhikami@unisma.ac.id

³Universitas Islam Malang ,
email: ena.marlina@unisma.ac.id

ABSTRAK

Limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) merupakan salah satu biomassa yang dihasilkan dalam jumlah besar oleh industri kelapa sawit di Indonesia dan berpotensi menimbulkan permasalahan lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik. Salah satu metode yang efektif untuk mengonversi biomassa basah menjadi material berkarbon adalah *Hydrothermal Carbonization* (HTC). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi suhu pada proses HTC terhadap karakteristik hydrochar yang dihasilkan dari TKKS dengan menggunakan pelarut asam organik alami dari air perasan blimbing wuluh (*Averrhoa bilimbi*). Proses HTC dilakukan pada suhu 180°C dan 210°C selama 8 jam dengan rasio biomassa terhadap solvent sebesar 1:10. Karakterisasi hydrochar dilakukan melalui pengujian morfologi permukaan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan analisis komposisi unsur menggunakan *Energy Dispersive X-ray* (EDX). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan suhu HTC menyebabkan terbentuknya struktur permukaan hydrochar yang lebih berpori dan homogen. Kandungan karbon meningkat dari 62,88% pada TKKS mentah menjadi 73,23% pada suhu 180°C dan 75,42% pada suhu 210°C, sedangkan kandungan oksigen mengalami penurunan yang signifikan. Perubahan tersebut mengindikasikan terjadinya reaksi dehidrasi dan dekarboksilasi yang lebih intensif pada suhu yang lebih tinggi. Hydrochar yang dihasilkan memiliki potensi untuk diaplikasikan sebagai material berpori, adsorben, dan bahan bakar padat ramah lingkungan.

Kata Kunci: Hydrothermal Carbonization, Tandan Kosong Kelapa Sawit, Hydrochar, SEM, EDX

ABSTRACT

Oil palm empty fruit bunches (OPEFB) are one of the major biomass wastes generated by the palm oil industry in Indonesia and may cause environmental problems if not properly managed. Hydrothermal carbonization (HTC) is an effective method for converting wet biomass into carbon-rich materials without the need for a drying process. This study aims to investigate the effect of temperature variation in the HTC process on the characteristics of hydrochar produced from OPEFB using a natural organic acid solvent derived from bilimbi fruit (Averrhoa bilimbi) extract. The HTC process was conducted at temperatures of 180°C and 210°C for 8 hours with a biomass-to-solvent ratio of 1:10. Hydrochar characterization was performed by analyzing surface morphology using Scanning Electron Microscopy (SEM) and elemental composition using Energy Dispersive X-ray (EDX). The results indicate that increasing the HTC temperature promotes the formation of a more porous and homogeneous hydrochar surface structure. The carbon content increased from 62.88% in raw OPEFB to 73.23% at 180°C and 75.42% at 210°C, while the oxygen content decreased significantly. These results confirm that higher HTC temperatures enhance dehydration and decarboxylation reactions during the carbonization process. The produced hydrochar demonstrates strong potential for application as a porous material, adsorbent, and environmentally friendly solid fuel.

Keywords: Hydrothermal Carbonization, Oil Palm Empty Fruit Bunch, Hydrochar, SEM, EDX

PENDAHULUAN

Industri kelapa sawit merupakan salah satu sektor strategis di Indonesia yang berkontribusi besar terhadap perekonomian nasional. Namun demikian, pesatnya perkembangan industri ini juga diikuti dengan peningkatan jumlah limbah biomassa yang dihasilkan, salah satunya adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS)[1]. Setiap satu ton tandan buah segar yang diolah dapat menghasilkan sekitar satu ton TKKS, sehingga akumulasi limbah ini menjadi permasalahan lingkungan apabila tidak dikelola secara optimal[2]. Penanganan TKKS yang kurang tepat, seperti penumpukan terbuka atau pembakaran, dapat menyebabkan pencemaran lingkungan, emisi gas rumah kaca, serta degradasi ekosistem di sekitar area perkebunan dan pabrik kelapa sawit[3].

TKKS pada dasarnya merupakan biomassa lignoselulosa yang kaya akan kandungan selulosa, hemiselulosa, dan lignin, sehingga memiliki potensi besar untuk dikonversi menjadi produk bernilai tambah. Salah satu pendekatan yang saat ini banyak dikembangkan adalah pemanfaatan TKKS sebagai bahan baku energi terbarukan dan material berkarbon melalui proses konversi termokimia[4]. Di antara berbagai metode konversi biomassa, *Hydrothermal Carbonization* (HTC) menjadi salah satu teknologi yang menjanjikan karena mampu mengolah biomassa basah tanpa memerlukan proses pengeringan awal. Hal ini menjadikan HTC lebih efisien secara energi dibandingkan metode pirolisis konvensional[5].

Proses HTC berlangsung pada suhu relatif rendah, umumnya berkisar antara 180–250°C, dan tekanan tinggi dalam kondisi air subkritis. Melalui proses ini, biomassa akan mengalami reaksi dehidrasi, dekarboksilasi, dan polimerisasi, sehingga menghasilkan produk padat berkarbon yang dikenal sebagai hydrochar. Hydrochar memiliki karakteristik berupa kandungan karbon yang tinggi, stabilitas kimia yang baik, serta struktur permukaan berpori, yang menjadikannya potensial untuk diaplikasikan sebagai bahan bakar padat, adsorben, media perbaikan tanah, serta material pendukung dalam aplikasi lingkungan dan energi[6].

Karakteristik hydrochar yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh kondisi proses HTC, khususnya suhu reaksi[7]. Variasi suhu akan memengaruhi tingkat dekomposisi biomassa, pembentukan struktur pori, serta perubahan komposisi unsur penyusunnya[8]. Oleh karena itu, kajian terhadap pengaruh suhu HTC menjadi penting untuk memahami mekanisme pembentukan hydrochar serta menentukan kondisi proses yang optimal sesuai dengan aplikasi yang diinginkan. Selain suhu, penggunaan pelarut atau media reaksi juga berperan penting dalam menentukan kualitas hydrochar yang dihasilkan[9].

Dalam beberapa penelitian, penggunaan asam sebagai aktivator selama proses karbonisasi terbukti mampu meningkatkan pembentukan pori dan memperbaiki karakteristik permukaan material berkarbon[10]. Namun, penggunaan asam anorganik konvensional memiliki

keterbatasan karena bersifat korosif, berbahaya bagi lingkungan, serta meningkatkan biaya operasional. Oleh karena itu, pemanfaatan asam organik alami sebagai alternatif pelarut ramah lingkungan menjadi pendekatan yang menarik untuk dikembangkan[11]. Blimbing wuluh (*Averrhoa bilimbi*) merupakan salah satu sumber asam organik alami yang memiliki pH rendah dan kandungan asam oksalat, asam sitrat, serta asam organik lainnya yang berpotensi berperan sebagai aktivator selama proses HTC[12].

Penggunaan air perasan blimbing wuluh sebagai *organic acid solvent* diharapkan mampu meningkatkan efektivitas proses HTC melalui percepatan reaksi dekomposisi biomassa dan pembentukan struktur pori pada hydrochar, sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap bahan kimia sintetis. Pendekatan ini sejalan dengan konsep teknologi hijau dan pengolahan limbah berkelanjutan yang semakin banyak diterapkan dalam bidang teknik dan energi.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh variasi suhu pada proses *Hydrothermal Carbonization* terhadap karakteristik hydrochar yang dihasilkan dari limbah tandan kosong kelapa sawit dengan menggunakan pelarut asam organik alami dari blimbing wuluh. Karakteristik yang dikaji meliputi morfologi permukaan dan komposisi unsur hydrochar melalui pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *Energy Dispersive X-ray* (EDX). Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan teknologi konversi biomassa serta mendukung pemanfaatan limbah kelapa sawit secara lebih berkelanjutan dan bernilai guna tinggi.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental laboratorium yang bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi suhu pada proses *Hydrothermal Carbonization* (HTC) terhadap karakteristik hydrochar yang dihasilkan dari limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS). Fokus utama penelitian ini adalah pada analisis morfologi permukaan dan komposisi unsur hydrochar dengan memanfaatkan teknik karakterisasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *Energy Dispersive X-ray* (EDX).

1. Bahan Penelitian

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yang diperoleh dari pabrik pengolahan kelapa sawit. TKKS dipilih karena ketersediaannya yang melimpah dan kandungan lignoselulosanya yang tinggi. Sebelum digunakan, TKKS dikeringkan untuk menurunkan kadar air, kemudian digiling dan diayak hingga diperoleh ukuran partikel kurang dari 200 mesh guna memperbesar luas permukaan kontak selama proses HTC.

Pelarut yang digunakan dalam proses HTC adalah *organic acid solvent* berupa air perasan blimbing wuluh (*Averrhoa bilimbi*). Blimbing wuluh dipilih karena

memiliki kandungan asam organik alami dengan tingkat keasaman yang cukup tinggi, sehingga diharapkan dapat berperan sebagai aktivator alami dalam proses karbonisasi hidrotermal. Selain itu, aquadest digunakan dalam proses pencucian hydrochar untuk menetralkan sisa keasaman setelah proses HTC.

2. Alat Penelitian

Peralatan utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi reaktor *Hydrothermal Carbonization* tipe autoclave dengan kapasitas 100 mL, oven pengering dengan pengatur suhu, mesin penggiling biomassa, ayakan berukuran 200 mesh, serta peralatan gelas laboratorium seperti gelas ukur, pipet, dan gelas beaker. Untuk tahap karakterisasi, digunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk pengamatan morfologi permukaan dan *Energy Dispersive X-ray* (EDX) untuk analisis komposisi unsur hydrochar.

3. Prosedur Persiapan Sampel

Tahap awal penelitian diawali dengan persiapan bahan baku TKKS. TKKS dikeringkan di bawah sinar matahari dan dilanjutkan dengan pengeringan menggunakan oven untuk memastikan kadar air berkurang secara signifikan. Setelah kering, TKKS digiling menggunakan mesin penggiling hingga berukuran kecil, kemudian diayak menggunakan ayakan 200 mesh untuk memperoleh ukuran partikel yang seragam.

Blimbing wuluh segar dicuci untuk menghilangkan kotoran, kemudian diperas untuk memperoleh air perasan yang digunakan sebagai *organic acid solvent*. Air perasan tersebut disaring untuk menghilangkan ampas padat sehingga diperoleh larutan yang homogen sebelum digunakan dalam proses HTC.

4. Proses Hydrothermal Carbonization

Proses HTC dilakukan dengan mencampurkan TKKS yang telah dipersiapkan dengan *organic acid solvent* ke dalam reaktor autoclave. Rasio massa biomassa terhadap volume solvent yang digunakan adalah 1:10, yaitu sebanyak 3 gram TKKS dan 30 mL pelarut asam organik. Reaktor kemudian ditutup rapat dan dipanaskan hingga mencapai suhu reaksi yang telah ditentukan, yaitu 180°C dan 210°C.

Proses karbonisasi hidrotermal dilakukan selama 8 jam pada tekanan autogenik yang terbentuk secara alami di dalam reaktor akibat pemanasan. Selama proses berlangsung, biomassa mengalami reaksi dehidrasi, dekarboksilasi, dan degradasi struktur lignoselulosa yang menghasilkan hydrochar. Setelah waktu reaksi tercapai, reaktor didinginkan hingga suhu ruang sebelum dibuka untuk mencegah perubahan struktur material akibat pendinginan mendadak.

5. Proses Pencucian dan Pengeringan Hydrochar

Hydrochar yang diperoleh dari reaktor dipisahkan dari larutan sisa reaksi dan selanjutnya dicuci menggunakan aquadest. Proses pencucian dilakukan secara berulang hingga pH hydrochar mendekati netral, yang dikontrol menggunakan kertas indikator pH. Tahap ini bertujuan untuk menghilangkan sisa asam organik yang masih melekat pada permukaan hydrochar.

Setelah proses pencucian selesai, hydrochar dikeringkan menggunakan oven pada suhu yang terkendali hingga diperoleh material kering dengan kadar air minimum. Hydrochar kering kemudian disimpan dalam wadah tertutup untuk mencegah kontaminasi sebelum dilakukan proses karakterisasi.

6. Karakterisasi Morfologi Permukaan

Analisis morfologi permukaan hydrochar dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Sampel hydrochar ditempatkan padaudukan sampel dan dianalisis pada kondisi *low vacuum* dengan pembesaran hingga 3000×. Pengujian SEM bertujuan untuk mengamati perubahan struktur permukaan, pembentukan pori, serta homogenitas morfologi hydrochar akibat variasi suhu proses HTC.

7. Analisis Komposisi Unsur

Analisis komposisi unsur hydrochar dilakukan menggunakan teknik *Energy Dispersive X-ray* (EDX) yang terintegrasi dengan SEM. Pengujian EDX dilakukan untuk mengetahui persentase kandungan unsur utama seperti karbon dan oksigen, serta unsur mineral lainnya yang terdapat pada hydrochar. Data hasil EDX digunakan untuk mengevaluasi pengaruh variasi suhu HTC terhadap peningkatan kandungan karbon dan perubahan komposisi unsur hydrochar.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi suhu pada proses *Hydrothermal Carbonization* (HTC) terhadap karakteristik hydrochar yang dihasilkan dari limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dengan menggunakan pelarut asam organik alami dari blimbing wuluh. Karakteristik yang dianalisis meliputi morfologi permukaan, kepadatan muatan permukaan, serta komposisi unsur hydrochar. Variasi suhu yang digunakan dalam penelitian ini adalah 180°C dan 210°C dengan waktu reaksi selama 8 jam.

1. Analisis Morfologi Permukaan Hydrochar

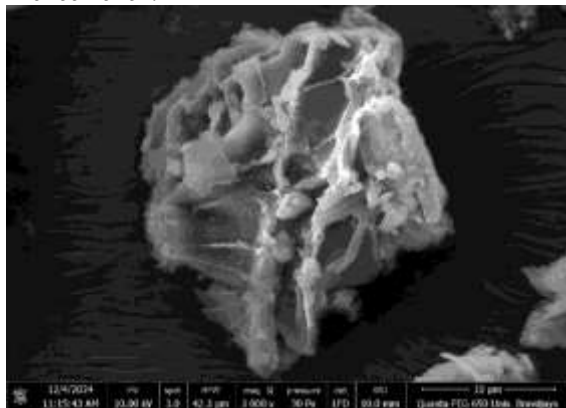
Karakterisasi morfologi permukaan hydrochar dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dengan pembesaran 3000×. Hasil pengamatan SEM menunjukkan perbedaan yang signifikan antara struktur permukaan TKKS mentah (*raw*) dan hydrochar hasil proses HTC pada suhu 180°C dan 210°C.

Permukaan TKKS mentah memperlihatkan struktur yang tidak beraturan dengan permukaan relatif kasar dan pori-

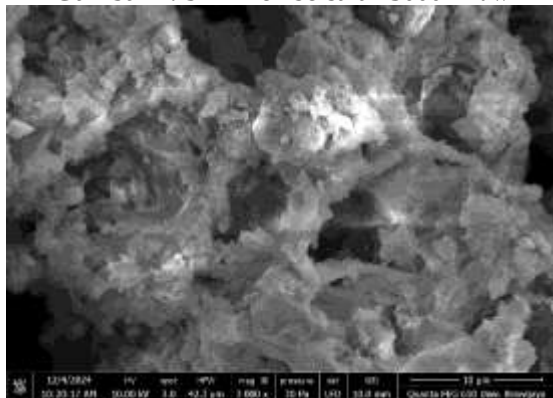
pori yang masih tertutup oleh matriks lignoselulosa. Struktur ini menunjukkan bahwa komponen selulosa, hemiselulosa, dan lignin masih terikat kuat dan belum mengalami degradasi termokimia secara signifikan. Kondisi tersebut menyebabkan luas permukaan aktif TKKS mentah masih terbatas.

Setelah mengalami proses HTC pada suhu 180°C, struktur permukaan hydrochar mulai menunjukkan perubahan yang nyata. Terbentuknya lapisan-lapisan karbon serta pori-pori awal mengindikasikan terjadinya dekomposisi senyawa organik dan pelepasan komponen volatil selama proses karbonisasi hidrotermal. Aktivasi menggunakan pelarut asam organik dari blimbing wuluh berperan dalam mempercepat pemutusan ikatan lignoselulosa, sehingga permukaan hydrochar menjadi lebih terbuka dibandingkan dengan bahan mentah.

Pada suhu HTC 210°C, perubahan morfologi permukaan terlihat lebih signifikan. Struktur pori hydrochar tampak lebih berkembang, terbuka, dan tersebar secara lebih merata. Peningkatan suhu menyebabkan reaksi dehidrasi dan dekarboksilasi berlangsung lebih intensif, sehingga menghasilkan struktur karbon yang lebih stabil dan berpori. Kondisi ini menunjukkan bahwa suhu reaksi memiliki pengaruh langsung terhadap tingkat karbonisasi dan pembentukan pori pada hydrochar. Struktur pori yang lebih terbuka ini sangat menguntungkan untuk aplikasi hydrochar sebagai adsorben maupun material berpori lainnya karena meningkatkan luas permukaan aktif.



Gambar 1. SEM Pembersaran 3000x Raw



Gambar 2. SEM Pembersaran 3000x HTC 180°C

2. Analisis Kepadatan Muatan Permukaan (*Surface Charge Density*)

Kepadatan muatan permukaan hydrochar dianalisis berdasarkan distribusi intensitas sinyal pada citra SEM yang diolah menggunakan perangkat lunak *ImageJ*. Analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi distribusi muatan pada permukaan hydrochar yang berpotensi memengaruhi kemampuan adsorpsi material.

Hasil analisis menunjukkan bahwa hydrochar yang diproses pada suhu 180°C memiliki kepadatan muatan permukaan yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan hydrochar pada suhu 210°C. Hal ini diduga disebabkan oleh tingkat dekomposisi biomassa yang belum optimal pada suhu yang lebih rendah, sehingga jumlah gugus fungsi bermuatan pada permukaan hydrochar masih terbatas.

Sebaliknya, peningkatan suhu HTC hingga 210°C menghasilkan peningkatan kepadatan muatan permukaan yang cukup signifikan. Pada suhu ini, proses degradasi biomassa berlangsung lebih intensif dan mendorong pembentukan gugus fungsi permukaan seperti gugus karboksil dan hidroksil yang berkontribusi terhadap muatan permukaan. Selain itu, struktur pori yang lebih terbuka pada suhu tinggi juga meningkatkan luas permukaan efektif, sehingga distribusi muatan menjadi lebih merata. Peningkatan kepadatan muatan permukaan ini mengindikasikan potensi hydrochar untuk berinteraksi lebih baik dengan ion atau molekul lain, khususnya dalam aplikasi adsorpsi.

3. Implikasi Hasil terhadap Aplikasi Hydrochar

Berdasarkan hasil analisis morfologi, kepadatan muatan permukaan, dan komposisi unsur, dapat disimpulkan bahwa peningkatan suhu HTC memberikan pengaruh positif terhadap kualitas hydrochar yang dihasilkan. Hydrochar dengan struktur pori yang lebih terbuka, kandungan karbon yang lebih tinggi, serta kepadatan muatan permukaan yang meningkat memiliki potensi besar untuk diaplikasikan sebagai adsorben, bahan bakar padat, dan material pendukung dalam aplikasi lingkungan.

Selain itu, penggunaan pelarut asam organik alami dari blimbing wuluh menunjukkan potensi sebagai alternatif ramah lingkungan pengganti asam sintetis dalam proses HTC. Pendekatan ini mendukung konsep pengolahan limbah berkelanjutan dan teknologi hijau dalam bidang teknik dan energi.

KESIMPULAN

Hasil Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan mengenai pengaruh variasi suhu pada proses *Hydrothermal Carbonization* (HTC) terhadap karakteristik hydrochar dari limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dengan menggunakan pelarut asam organik alami dari blimbing wuluh, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama sebagai berikut.

Proses HTC terbukti efektif dalam mengonversi biomassa TKKS menjadi material berkarbon berupa

hydrochar dengan karakteristik fisik dan kimia yang lebih baik dibandingkan bahan mentah. Pemanfaatan metode HTC memungkinkan pengolahan biomassa basah tanpa memerlukan tahap pengeringan awal, sehingga proses ini lebih efisien dari sisi energi dan berpotensi diaplikasikan secara luas dalam pengolahan limbah biomassa kelapa sawit.

Variasi suhu proses HTC memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perubahan morfologi permukaan hydrochar. Hasil pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menunjukkan bahwa TKKS mentah memiliki struktur permukaan yang tidak beraturan dan pori-pori yang masih tertutup oleh matriks lignoselulosa. Setelah melalui proses HTC pada suhu 180°C, mulai terbentuk lapisan karbon dan pori-pori awal pada permukaan hydrochar sebagai akibat dari dekomposisi senyawa organik. Peningkatan suhu HTC hingga 210°C menghasilkan struktur permukaan yang lebih berpori, terbuka, dan homogen, yang menunjukkan tingkat karbonisasi dan reorganisasi struktur karbon yang lebih tinggi. Kondisi ini mengindikasikan bahwa peningkatan suhu reaksi mempercepat proses dehidrasi dan dekarboksilasi biomassa, sehingga meningkatkan luas permukaan aktif hydrochar.

Selain perubahan morfologi, kepadatan muatan permukaan hydrochar juga dipengaruhi oleh variasi suhu HTC. Hydrochar yang dihasilkan pada suhu 210°C menunjukkan kepadatan muatan permukaan yang lebih tinggi dibandingkan dengan hydrochar pada suhu 180°C. Peningkatan kepadatan muatan ini diduga berkaitan dengan terbentuknya lebih banyak gugus fungsi bermuatan pada permukaan hydrochar serta meningkatnya luas permukaan akibat struktur pori yang lebih berkembang. Karakteristik ini sangat penting dalam menentukan potensi hydrochar untuk berinteraksi dengan ion atau molekul lain, khususnya dalam aplikasi adsorpsi dan remediasi lingkungan.

Hasil analisis komposisi unsur menggunakan *Energy Dispersive X-ray* (EDX) menunjukkan bahwa proses HTC secara signifikan meningkatkan kandungan karbon hydrochar. Kandungan karbon meningkat dari 62,88% pada TKKS mentah menjadi 73,23% pada suhu 180°C dan mencapai 75,42% pada suhu 210°C. Peningkatan kandungan karbon ini disertai dengan penurunan kandungan oksigen, yang mengindikasikan terjadinya reaksi dehidrasi dan dekarboksilasi selama proses HTC. Penurunan rasio oksigen terhadap karbon mencerminkan peningkatan tingkat aromatisasi dan kestabilan struktur karbon hydrochar, yang berkontribusi terhadap kualitas material sebagai bahan bakar padat dan material berkarbon fungsional.

Keberadaan unsur mineral seperti kalsium, besi, silikon, dan magnesium dalam jumlah relatif kecil menunjukkan bahwa sebagian mineral dalam biomassa TKKS masih terikat pada struktur hydrochar, meskipun sebagian lainnya terlarut selama proses HTC akibat penggunaan pelarut asam organik. Penggunaan air perasan blimbing wuluh sebagai *organic acid solvent* terbukti mampu berperan sebagai aktivator alami yang mendukung proses karbonisasi sekaligus berpotensi mengurangi penggunaan bahan kimia sintetis yang bersifat korosif dan kurang ramah lingkungan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi proses HTC dan penggunaan pelarut asam organik alami dari blimbing wuluh merupakan pendekatan yang efektif dan berkelanjutan dalam pemanfaatan limbah tandan kosong kelapa sawit. Hydrochar yang dihasilkan memiliki karakteristik morfologi berpori, kandungan karbon yang tinggi, serta sifat permukaan yang mendukung potensi aplikasinya sebagai adsorben, bahan bakar padat, dan material pendukung dalam bidang lingkungan dan energi. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan teknologi konversi biomassa serta menjadi dasar bagi penelitian lanjutan terkait optimasi kondisi proses dan pengembangan aplikasi hydrochar dalam skala yang lebih luas.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. De Francesco, T. Gasperini, D. Duca, and G. Toscano, "Hydrothermal Carbonization of Residual Biomass from Agricultural and Agro-Industrial Sector," 2024.
- [2] G. Liu, Q. Xu, S. F. Abou-elwafa, M. A. Alshehri, and T. Zhang, "Hydrothermal Carbonization Technology for Wastewater Treatment under the 'Dual Carbon' Goals : Current Status , Trends , and Challenges," 2024.
- [3] 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.
- [4] L. Ansone-bertina, L. Arbidans, V. Ozols, and M. Klavins, "Hydrothermal Carbonisation of Biomass Wastes as a Tool for Carbon Capture," vol. 26, no. 1, pp. 415–427, 2022.
- [5] G. Ischia and L. Fiori, "Hydrothermal Carbonization of Organic Waste and Biomass : A Review on Process , Reactor , and Plant Modeling," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 12, no. 6, pp. 2797–2824, 2021.
- [6] I. Pavkov, M. Radojčin, Z. Stamenković, S. Bikić, and M. Tomić, "Hydrothermal Carbonization of Agricultural Biomass : Characterization of Hydrochar for Energy Production," vol. 56, no. 3, pp. 225–235, 2022.
- [7] D. S. Pratiwi and W. Udaibah, "Synthesis of

- Hydrochar Cassava peels with hydrothermal carbonization method and applications as hard water softener,” vol. 7, no. 1, pp. 34–43, 2021.
- [8] K. Nabor, P. Canencio, M. Edith, A. Montaña, R. M. Giona, and A. Bail, “Impact of key parameters on the hydrothermal carbonization process of sewage sludge : A systematic review,” vol. 30, no. 1, pp. 0–2, 2025.
- [9] A. Abidin, M. Z. Ridlo, F. D. Rizkina, L. M. Alrosyid, and F. F. Iswanto, “Studi Eksperimental Hydrothermal Carbonization (HTC) Batang Tembakau untuk Optimasi Nilai Kalor : Pengaruh Temperatur dan Residence Time,” vol. 14, no. 01, 2025.
- [10] R. Sarwono, S. Tursiloadi, and K. C. Sembiring, “Carbonization of Palm Oil Empty Fruit Bunch (EFB) in Hydrothermal Processes to Produce Biochar,” vol. 18, no. December, pp. 116–123, 2016.
- [11] A. F. Alhikami and E. Marlina, “KELAPA SAWIT DAN LIMBAH AIR TAHU DARI PROSES HYDROTHERMAL CARBONIZATION,” pp. 19–22.
- [12] H. E. Putra, D. Djaenudin, E. Damanhuri, K. Dewi, and A. D. Pasek, “Hydrothermal Carbonization Kinetics of Lignocellulosic Municipal Solid Waste,” vol. 22, no. 3, pp. 188–198, 2021.