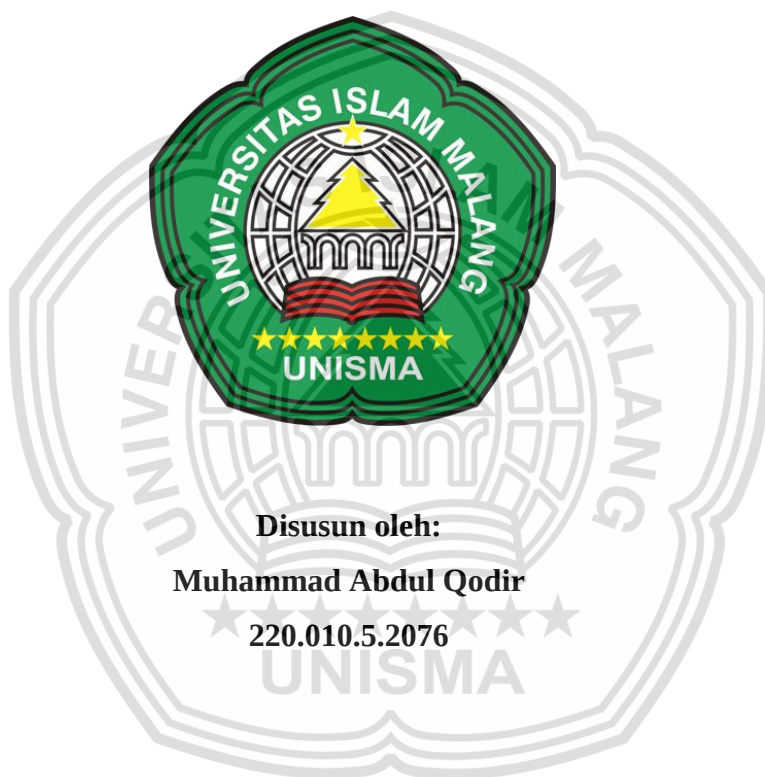


**Analisis kinetika reaksi dan karakteristik pembakaran pada *hydrochar*
menggunakan teknik *hydrothermal carbonization* dari limbah
tandan kosong sawit**

SKRIPSI

*Diajukan sebagai salah satu persyaratan memperoleh gelar sarjana strata satu
(S-1) Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Islam Malang*



Disusun oleh:
Muhammad Abdul Qodir
220.010.5.2076

PROGRAM STUDI S-1 TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS ISLAM MALANG

2025

ABSTRAK

Limbah tandan kosong sawit (TKS) memiliki potensi sebagai sumber energi terbarukan melalui proses *Hydrothermal Carbonization* (HTC). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi suhu (180°C dan 210°C) dalam proses HTC dengan menggunakan solven air perasan belimbing wuluh terhadap karakteristik *hydrochar* yang dihasilkan. Analisis yang dilakukan meliputi profil degradasi massa, karakteristik pembakaran, dan kinetika reaksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan suhu dalam HTC meningkatkan stabilitas termal dan kandungan karbon tetap dalam *hydrochar*. Profil degradasi massa menunjukkan bahwa *hydrochar* dari HTC 210°C memiliki residu karbon tertinggi (4,7%), menandakan stabilitas termal yang lebih baik dibandingkan HTC 180°C dan bahan mentah. Analisis karakteristik pembakaran menunjukkan bahwa *hydrochar* dari HTC 210°C memiliki efisiensi pembakaran yang lebih baik, dengan nilai *Combustion Index* (S) tertinggi sebesar $24,684 \times 10^{-12}$. Sementara itu, analisis kinetika reaksi menggunakan metode *Coats-Redfern* menunjukkan bahwa energi aktivasi (E_a) meningkat seiring dengan kenaikan suhu pada HTC, dengan nilai tertinggi sebesar 73,41 kJ/mol pada tahap utama dekomposisi. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa proses HTC dengan suhu lebih tinggi menghasilkan *hydrochar* dengan karakteristik pembakaran dan stabilitas termal yang lebih baik, sehingga berpotensi untuk diaplikasikan sebagai bahan bakar padat atau bahan baku karbon aktif.

Kata kunci: *Hydrothermal Carbonization*, tandan kosong sawit, *hydrochar*, kinetika reaksi, karakteristik pembakaran, pelarut organik.

ABSTRACT

Empty fruit bunches (EFB) have the potential as a renewable energy source through the Hydrothermal Carbonization (HTC) process. This study aims to analyze the effect of temperature variations (180°C and 210°C) in the HTC process using starfruit juice as a solvent on the characteristics of the resulting hydrochar. The analysis includes mass degradation profiles, combustion characteristics, and reaction kinetics. The results showed that increasing temperature in HTC increased thermal stability and fixed carbon content in hydrochar. The mass degradation profile showed that hydrochar from HTC 210°C had the highest carbon residue (4.7%), indicating better thermal stability compared to HTC 180°C and raw materials. Combustion characteristic analysis showed that hydrochar from HTC 210°C had better combustion efficiency, with the highest Combustion Index (S) value of 24.684×10^{-12} . Meanwhile, the reaction kinetics analysis using the Coats-Redfern method showed that the activation energy (E_a) increased with increasing temperature at HTC, with the highest value of 73.41 kJ/mol at the main stage of decomposition. Overall, the results of this study indicate that the HTC process with higher temperatures produces hydrochar with better combustion characteristics and thermal stability, so it has the potential to be applied as a solid fuel or activated carbon raw material.

Keywords: Carbonization, empty fruit bunches, hydrochar, reaction kinetics, combustion properties, organic solvent.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu biomassa yang memiliki potensai besar untuk dikembangkan menjadi energi terbarukan adalah kelapa sawit, industri kelapa sawit menghasilkan sejumlah besar residu sebagai limbah padat. Limbah padat ini terdiri dari tandan kosong sawit (*Empty Fruit Bunches/EFB*), serat mesokarp (*mesocarp fibers/MF*), dan cangkang inti sawit (*Palm Kernel Shells/PKS*) dari pabrik pengolahan kelapa sawit. Residu kelapa sawit biasanya tidak lagi dimanfaatkan untuk keperluan lain, dan metode pembuangannya saat ini dapat menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan. Karena residu kelapa sawit merupakan limbah biomassa yang mudah didapat, residu ini memiliki potensi besar untuk diubah menjadi produk energi yang bermanfaat. *Hydrothermal Carbonization* (HTC), yang merupakan proses termokimia, adalah metode yang digunakan untuk mengolah biomassa guna menghasilkan hidrokarbon di bawah tekanan air panas (Ameen *et al.*, 2022).

Dalam proses pengembangan energi terbarukan dan seiring dengan meningkatnya perhatian terhadap dampak negatif lingkungan yang disebabkan limbah dari hasil pengolahan kelapa sawit, penting bagi masyarakat khususnya di Indonesia untuk memahami manfaat pengolahan dan penanganan limbah yang efisien dan ramah lingkungan. Tandan kosong sawit (TKS) adalah limbah yang dihasilkan dari proses produksi minyak kelapa sawit. Limbah ini memiliki potensi tinggi sebagai sumber karbon terbarukan. Namun, TKS biasanya mengandung kadar air yang tinggi, oleh karena itu memerlukan langkah penghilangan kadar air sebelum dapat diubah menjadi produk yang lebih bermanfaat melalui proses termokimia. *Hydrothermal Carbonization* (HTC) merupakan metode yang efektif untuk mengonversi biomassa yang kaya akan kadar air menjadi produk berbasis karbon (Sisuthog *et al.*, 2022).

Salah satu metode yang menawarkan solusi inovatif dalam pengolahan limbah biomassa dengan menghasilkan produk yang bermanfaat dan berkelanjutan, dengan keunggulan efisiensi energi dan dampak lingkungan yang minimal, *Hydrothermal Carbonization* (HTC) berpotensi menjadi salah satu metode kunci

dalam transisi menuju sumber energi yang lebih bersih dan terbarukan. *Hydrothermal Carbonization* (HTC) adalah proses termokimia yang melibatkan pemanasan bahan baku dalam reaktor autoklaf dengan penambahan pelarut cair, pada suhu antara 180 hingga 350 °C dibawah tekanan autogenous (2–6 MPa). Proses ini bertujuan untuk mengubah biomassa menjadi produk yang lebih stabil seperti *hydrochar* (Fakudze *et al.*, 2022). *Hydrothermal Carbonization* (HTC) merupakan metode yang menjanjikan untuk mengubah biomassa yang mengandung air menjadi produk dengan berbagai kegunaan, terutama dalam sektor lingkungan dan energi. Proses ini terdiri dari serangkaian reaksi yang terjadi secara bersamaan dalam bentuk padat dan cair, seperti hidrolisis, penghilangan air (dehidrasi), penghilangan kelompok karboksil (dekarboksilasi), penggabungan (kondensasi), pembentukan polimer (polimerisasi), dan pembentukan senyawa aromatik (aromatisasi). Salah satu keunggulan HTC adalah dampak lingkungan yang lebih minimal dibandingkan teknik konversi termokimia lainnya karena proses ini berlangsung pada suhu yang lebih rendah (Periyavaram *et al.*, 2023).

Salah satu organic solvet yang berpotensi untuk digunakan dalam proses HTC adalah air perasan belimbing wuluh karena dapat meningkatkan efisiensi reaksi dan memengaruhi karakteristik produk akhir yang disebabkan oleh kandungan asam organik yang tinggi terutama asam oksalat (Dominic C D *et al.*, 2023). Selain sebagai katalis alami, penggunaan air perasan belimbing wuluh juga memiliki nilai ekonomi dan lingkungan. Pembuatan arang aktif umumnya menggunakan bahan kimia seperti KOH, NaOH, H_3PO_4 , H_2SO_4 , dan HCl sebagai aktivator. Namun, penggunaan bahan kimia ini berisiko menimbulkan masalah pencemaran lingkungan. (Kurniasih *et al.*, 2021).

Berdasarkan latar belakang tersebut, peneliti akan melakukan penelitian *Hydrothermal Carbonization* dari limbah tandan kosong sawit dengan solven dari air perasan belimbing wuluh karena dapat membantu mengurangi kandungan air dan meningkatkan konsentrasi karbon tetap pada produk akhir dan mengurangi elemen yang tidak diinginkan seperti potasium. Penggunaan solven ini juga mempengaruhi karakteristik fisik produk, seperti porositas dan luas permukaan. Produk akhir dari proses ini, dengan penggunaan solven belimbing wuluh, berpotensi digunakan sebagai bahan bakar padat atau sebagai bahan baku untuk

pembuatan karbon aktif yang dapat dimanfaatkan dalam aplikasi seperti superkapasitor. Penelitian ini diharapkan dapat memberi manfaat bagi ilmu pengetahuan tentang pemanfaatan limbah dan energi terbarukan, yaitu pemanfaatan limbah tandan kosong kelapa sawit sebagai produk alternatif.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana pengaruh variasi suhu pada proses *Hydrothermal Carbonization* biomassa tandan kosong sawit dengan penggunaan solven dari air perasan belimbing wuluh terhadap:

1. Profil degradasi massa (*Theoretical Thermogravimetric Mass Loss Profile*)
2. Karakteristik pembakaran (*Ignition temperature, Peak temperature, Burnout temperature, Ignition indeks dan Combustion indeks*) dan
3. Kinetika reaksi

1.3 Batasan Masalah

Batasan pembahasan pada penelitian ini diperlukan supaya pembahasannya tidak melebar dan terarah, yaitu sebagai berikut:

- a. Tidak membahas liquid dan gas yang dihasilkan setelah proses HTC.
- b. Reaktor yang diunakan berkapasitas 100 mL
- c. Hanya membahas pengujian dari *thermogravimetric analysis*.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi suhu pada proses HTC biomassa tandan kosong kelapa sawit dengan penggunaan solven dari air perasan belimbing wuluh terhadap:

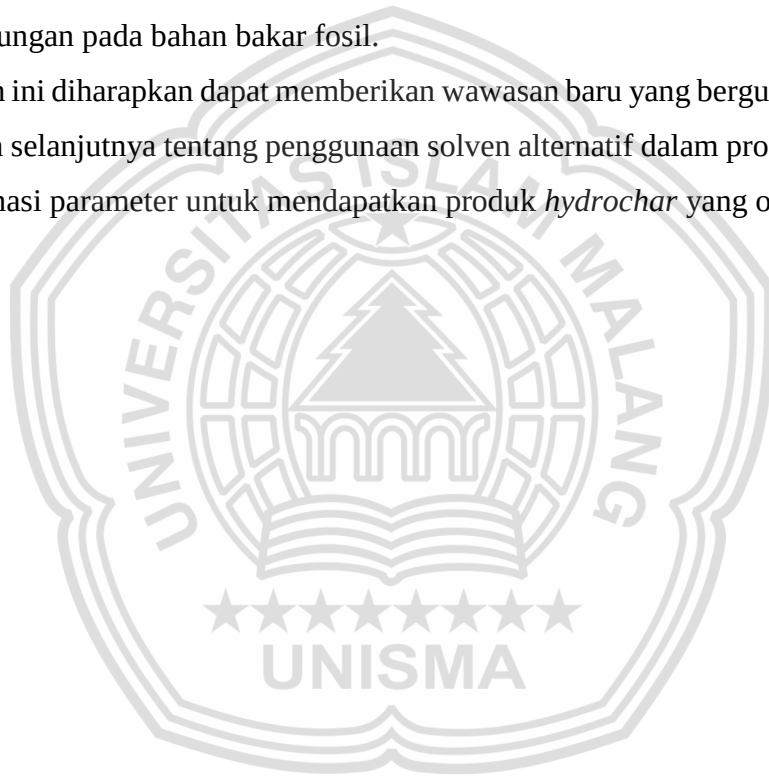
1. Profil degradasi massa (*Theoretical Thermogravimetric Mass Loss Profile*),
2. Karakteristik pembakaran (*Combustion Properties*), yang mencakup suhu awal pembakaran, T_i (*Temperature Ignition*), suhu puncak pembakaran T_p (*Peak Temperature*), suhu akhir pembakaran (*Burnout Temperature*), *Ignition Index* (Di), dan *Combustion Index* (S), serta
3. Reaksi kinetik, meliputi Energi aktivasi (E_a) dan pre-eksponensial faktor (A) dari *hydrochar* yang dihasilkan.

Tujuan ini memberikan fokus pada pengaruh suhu terhadap karakteristik termal dan kinetika reaksi *hydrochar* dari hasil HTC.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

- a. Penggunaan biomassa limbah tandan kosong kelapa sawit secara efisien dapat membantu reduksi sampah organik dan meningkatkan ketersediaan sumber energi terbarukan.
- b. Dengan menghasilkan *hydrochar* dari limbah pertanian, penelitian ini berkontribusi pada diversifikasi sumber energi terbarukan, mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil.
- c. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan baru yang berguna untuk penelitian selanjutnya tentang penggunaan solven alternatif dalam proses HTC dan optimasi parameter untuk mendapatkan produk *hydrochar* yang optimal



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Penelitian ini mengkaji pengaruh variasi suhu pada proses Hydrothermal Carbonization (HTC) dari biomassa limbah tandan kosong sawit (TKS) dengan menggunakan air perasan belimbing wuluh sebagai solven. Berdasarkan analisa data yang telah dilakukan, dapat disimpulkan hal-hal berikut:

1. Profil degradasi massa

Hasil analisis TGA menunjukkan bahwa proses HTC meningkatkan stabilitas termal *hydrochar*, proses HTC pada suhu 210°C menghasilkan residu karbon tertinggi (4.7%) dengan tingkat volatilitas yang lebih rendah, menandakan kandungan karbon tetap yang lebih tinggi. RAW material TKS memiliki tingkat kehilangan massa terbesar pada suhu rendah, hal ini disebabkan oleh pelepasan air dan volatili.

2. Karakteristik pembakaran

Suhu penyalaan pada karakteristik pembakaran (T_i , T_p , T_b) menunjukkan bahwa *hydrochar* hasil HTC memiliki sifat pembakaran yang lebih baik dibandingkan dengan RAW material. *Hydrochar* yang dihasilkan dari proses HTC 210 memiliki efisiensi pembakaran terbaik, dibuktikan dari nilai Combustion Indeks (S) tertinggi sebesar 2.468×10^{-12} , menunjukkan potensi yang lebih baik sebagai bahan bakar padat.

3. Analisis kinetika reaksi

Energi aktivasi meningkat seiring dengan kenaikan suhu pada proses HTC, hal ini menandakan peningkatan stabilitas termal. Pada stage II sampel HTC 210 menunjukkan nilai E_a sebesar 73.41 kJ/mol. Menunjukkan nilai yang lebih besar untuk memulai reaksi pembakaran, namun stage III HTC 210 menunjukkan energi aktivasi yang lebih rendah menunjukkan E_a yang lebih rendah yaitu 34.26 kJ/mol, ini menandakan peningkatan efisiensi pembakaran pada residu material.

Secara keseluruhan, peningkatan suhu proses HTC meningkatkan kualitas *hydrochar* dari segi stabilitas termal, kandungan karbon tetap, dan sifat pembakaran. *Hydrochar* yang dihasilkan pada proses HTC 210 memiliki potensi

yang lebih baik untuk aplikasi bahan bakar padat, dengan efisiensi pembakaran dan kestabilan termal yang lebih optimal.

5.2 Saran

1. Penggunaan solven alternatif lain, solven dari perasan air belimbing wuluh memberikan hasil yang positif namun, penggunaan organik solven yang lain dapat diteliti untuk membandingkan efisiensi dan dampaknya terhadap lingkungan,
2. Penelitian yang lebih lanjut dapat dilakukan dengan memvariasikan konsentrasi solven untuk memahami pengaruh terhadap karakteristik *hydrochar*. Diperlukan evaluasi terhadap sistem keamanan reaktor seperti *pressure relief valve* untuk mencegah risiko kegagalan reaktor pada tekanan tinggi.



DAFTAR PUSTAKA

- Ameen, M., Zamri, N. M., May, S. T., Azizan, M. T., Aqsha, A., Sabzoi, N., & Sher, F. (2022). Effect of acid catalysts on hydrothermal carbonization of Malaysian oil palm residues (leaves, fronds, and shells) for hydrochar production. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12, 103–114. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01201-2>/Published
- Dang, H., Xu, R., Zhang, J., Wang, M., & Li, J. (2024). Cross-upgrading of biomass hydrothermal carbonization and pyrolysis for high quality blast furnace injection fuel production: Physicochemical characteristics and gasification kinetics analysis. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 31(2), 268–281. <https://doi.org/10.1007/s12613-023-2728-0>
- Dominic C D, M., K V, N., Begum, P. M. S., Joseph, R., Rosa, D. dos S., Duan, Y., Balan, A., Ajithkumar, T. G., Soumya, M., Shelke, A., Parameswaranpillai, J., & Badawi, M. (2023). Nanosilica from Averrhoa bilimbi juice pre-treated rice husk: Preparation and characterization. *Journal of Cleaner Production*, 413. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137476>
- Fakudze, S., Wei, Y., Zhou, P., Han, J., & Chen, J. (2022). Synergistic effects of process-generated organic acids during co-hydrothermal carbonization of watermelon peel and high-sulfur coal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107519>
- Ferreira, J. N., Pinheiro-Sant'ana, H. M., Lucia, C. M. Della, Teixeira, R. D. B. L., & Cardoso, L. de M. (2022). Chemical composition, vitamins, and minerals of family farming biribiri (Averrhoa bilimbi L.) in the middle doce river region, minas gerais, brazil. *Ciencia Rural*, 52(3). <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200816>
- Garcia, E., Ejim, I. F., & Liu, H. (2022). Thermogravimetric analysis of co-combustion of a bituminous coal and coffee industry by-products. *Thermochimica Acta*, 715. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2022.179296>
- He, C., Giannis, A., & Wang, J. Y. (2013). Conversion of sewage sludge to clean solid fuel using hydrothermal carbonization: Hydrochar fuel characteristics and combustion behavior. *Applied Energy*, 111, 257–266. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.084>
- Indriati, L., Elyani, N., & Dina, S. F. (2020). Empty fruit bunches, potential fiber source for Indonesian pulp and paper industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 980(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/980/1/012045>

- Jahada Haluti, I., Mahani, S., Astuti, E., Dahlan, A., Studi Teknik Kimia, P., & Ahmad Dahlan, U. (n.d.). *Analisis TGA dan DTA pada Liquid Smoke dari Daun Angsana dengan Metode Pirolisis*.
- Kurniasih, A., Pratiwi, D. A., & Amin, M. (2021). PEMANFAATAN AMPAS TEBU SEBAGAI ARANG AKTIF DENGAN AKTIVATOR LARUTAN BELIMBING WULUH (*Averrhoa bilimbi* L.). *Ruwa Jurai: Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 14(2), 56. <https://doi.org/10.26630/rj.v14i2.2287>
- Nizamuddin, S., Jaya Kumar, N. S., Sahu, J. N., Ganesan, P., Mubarak, N. M., & Mazari, S. A. (2015). Synthesis and characterization of hydrochars produced by hydrothermal carbonization of oil palm shell. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 93(11), 1916–1921. <https://doi.org/10.1002/cjce.22293>
- Pansawati, I., Agustin, Y., & Ahda, Y. (2024). KINETIC AND COMBUSTION CHARACTERISTICS OF OIL PALM EMPTY FRUIT BUNCH BIOCHAR USING THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS. In *VOLUME* (Vol. 13, Issue 2).
- Paredes, R., Amez, I., León, D., & Castells, B. (2024). Biomass minimum ignition temperature prediction through differential study of thermogravimetric analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 92, 105486. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105486>
- Parshetti, G. K., Kent Hoekman, S., & Balasubramanian, R. (2013). Chemical, structural and combustion characteristics of carbonaceous products obtained by hydrothermal carbonization of palm empty fruit bunches. *Bioresource Technology*, 135, 683–689. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.042>
- Pérez, J. M., & Fernández, A. (2012). Thermal stability and pyrolysis kinetics of lignin-phenol-formaldehyde resins. *Journal of Applied Polymer Science*, 123(5), 3036–3045. <https://doi.org/10.1002/app.34817>
- Periyavaram, S. R., Uppala, L., Sivaprakash, S., & Reddy, P. H. P. (2023). Thermal behaviour of hydrochar derived from hydrothermal carbonization of food waste using leachate as moisture source: Kinetic and thermodynamic analysis. *Bioresource Technology*, 373. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128734>
- Postawa, K., Fałtynowicz, H., Sczygieł, J., Beran, E., & Kułażski, M. (2022). Analyzing the kinetics of waste plant biomass pyrolysis via thermogravimetry modeling and semi-statistical methods. *Bioresource Technology*, 344. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126181>
- Putra, H. E., Wresta, A., Permana, D., Djaenudin, Dara, F., Indriati, L., Muchlis, Sintawardani, N., Fitria, N., Hamidah, U., & Purwanta, W.

- (2024). Hydrothermal treatment of empty fruit bunches for enhanced solid fuel production using palm oil mill effluent as a liquid stream. *Bioresource Technology Reports*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101761>
- Raza, M., Abu-Jdayil, B., Al-Marzouqi, A. H., & Inayat, A. (2022). Kinetic and thermodynamic analyses of date palm surface fibers pyrolysis using Coats-Redfern method. *Renewable Energy*, 183, 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.065>
- Ren, B., Guo, H., Liu, Y., Peng, L., Hui, Y., Xu, J., & Yang, W. (2024). Carbon dots for efficient detection of water content in organic solvents. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 323. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.124932>
- Sisuthog, W., Attanatho, L., & Chaiya, C. (2022a). Conversion of empty fruit bunches (EFBs) by hydrothermal carbonization towards hydrochar production. *Energy Reports*, 8, 242–248. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.183>
- Sisuthog, W., Attanatho, L., & Chaiya, C. (2022b). Conversion of empty fruit bunches (EFBs) by hydrothermal carbonization towards hydrochar production. *Energy Reports*, 8, 242–248. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.183>
- Sisuthog, W., Prasongthum, N., Suemanotham, A., Thanmongkhon, Y., Attanatho, L., Jantasee, S., Mens, W., & Chaiya, C. (2024). *High-Porosity Hydrochar From Oil Palm Empty Fruit Bunches Via Single-Step Hydrolytic Agent-Assisted Hydrothermal Carbonization*. <https://doi.org/10.17509/ijost.v9i3.74551>
- Śliz, M., & Wilk, M. (2020). A comprehensive investigation of hydrothermal carbonization: Energy potential of hydrochar derived from Virginia mallow. *Renewable Energy*, 156, 942–950. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.124>
- Tee, M. Y., Woon, K. S., Wong, S. L., Nyakuma, B. B., Tan, J. P., Chong, W. W. F., & Mong, G. R. (2024). Unveiling the dynamics of solid waste co-pyrolysis through thermogravimetric analysis and kinetic analysis for technological upscaling (2001–2022). In *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* (Vol. 183). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106806>
- Wang, L., Lei, H., Liu, J., & Bu, Q. (2018). Thermal decomposition behavior and kinetics for pyrolysis and catalytic pyrolysis of Douglas fir. *RSC Advances*, 8(4), 2196–2202. <https://doi.org/10.1039/c7ra12187c>
- Xu, S., Bi, G., Zou, J., Li, H., Chen, M., Tang, Z., Yu, Q., Xie, J., & Chen, Y. (2024). Effect of hydrochar from biogas slurry co-hydrothermal

carbonization with biomass on anaerobic digestion performance of food waste. *Industrial Crops and Products*, 221. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119361>

Yao, Z., & Ma, X. (2019). Hydrothermal carbonization of Chinese fan palm. *Bioresource Technology*, 282, 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.130>

Zhang, Y., Guo, Y., Cheng, F., Yan, K., & Cao, Y. (2015). Investigation of combustion characteristics and kinetics of coal gangue with different feedstock properties by thermogravimetric analysis. *Thermochimica Acta*, 614, 137–148. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2015.06.018>

