

ANALISIS ENERGI AKTIVASI *HYDROCHAR* TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT HASIL *HYDROTHERMAL CARBONIZATION* DENGAN SOLVEN LIMBAH AIR TAHU

Moh Fahrrezi Dimas A¹, Akhmad Faruq Alhikami² Ena Marlina³

¹ Teknik Mesin, Universitas Islam Malang
e-mail : 22101052038@unisma.ac.id

² Teknik Mesin, Universitas Islam Malang
e-mail : alhikami@unisma.ac.id

³ Teknik Mesin, Universitas Islam Malang
e-mail : ena.marlina@unisma.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji energi aktivasi pada *hydrochar* yang diperoleh melalui proses *Hydrothermal Carbonization* (HTC) tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dengan memanfaatkan limbah air tahu sebagai pelarut yang ramah lingkungan. Proses HTC dilaksanakan pada suhu 180°C dan 210°C selama 8 jam dengan perbandingan biomassa terhadap pelarut sebesar 1:10. Penentuan nilai energi aktivasi (E_a) dilakukan menggunakan analisis termogravimetri analisis (TGA) dan metode *Coats-Redfern*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada suhu 180°C, energi aktivasi mencapai 63,561 kJ/mol, sedangkan pada suhu 210°C menurun menjadi 21,754 kJ/mol. Penurunan tersebut mengindikasikan bahwa peningkatan suhu mempercepat proses dekomposisi serta menghasilkan material dengan stabilitas termal yang lebih baik. Secara umum, pemanfaatan limbah air tahu sebagai pelarut mampu meningkatkan efisiensi proses karbonisasi dan menghasilkan *hydrochar* dengan karakteristik termal yang lebih stabil.

Kata Kunci: *Hydrothermal Carbonization*, Tandan Kosong Kelapa Sawit, Limbah Air Tahu, Energi Aktivasi, TGA, *Coats-Redfern*

ABSTRACT

This study aims to examine the activation energy in hydrochar obtained through the Hydrothermal Carbonization (HTC) process of empty palm fruit bunches (TKKS) by utilizing tofu water waste as an environmentally friendly solvent. The HTC process was carried out at temperatures of 180°C and 210°C for 8 hours with a biomass to solvent ratio of 1:10. The activation energy (E_a) value was determined using thermogravimetric analysis (TGA) and the Coats-Redfern method. The results showed that at 180°C, the activation energy reached 63.561 kJ/mol, while at 210°C it decreased to 21.754 kJ/mol. This decrease indicates that increasing the temperature accelerates the decomposition process and produces material with better thermal stability. In general, the use of soybean milk waste as a solvent can increase the efficiency of the carbonization process and produce hydrochar with more stable thermal characteristics.

Keywords: *Hydrothermal Carbonization*, Empty Palm Fruit Bunches, Soybean Wastewater, Activation Energy, TGA, *Coats-Redfern*

PENDAHULUAN

Indonesia dikenal sebagai negara penghasil minyak kelapa sawit terbesar di dunia dengan total luas perkebunan mencapai 10,956,231,000 hektar pada tahun 2013 (data Direktorat Jenderal Perkebunan). Di Pulau Sulawesi, Sulawesi Tengah memiliki area perkebunan kelapa sawit terluas dengan 147,757,000 hektar dan produksi tahunan sebesar 259,361,000 ton. Dalam proses pengolahan kelapa

sawit, limbah padat yang paling banyak dihasilkan adalah tandan kosong kelapa sawit, menyumbang sekitar 23% dari total limbah. Artinya, setiap ton yang diolah akan menghasilkan 220 hingga 230 kg tandan kosong. [1]

Proses pengolahan kelapa sawit ini tidak hanya menghasilkan minyak, tetapi juga limbah cair dan beragam limbah padat seperti tandan kosong kelapa sawit, cangkang, serabut, lumpur, dan bungkil,

yang jumlahnya berbanding lurus dengan hasil panen. Produksi kelapa sawit setiap tahunnya mengalami peningkatan, yang menyebabkan adanya penambahan limbah kelapa sawit yang dihasilkan berupa sisa tanaman kelapa sawit dari proses pengolahan kelapa sawit yang berupa cangkang, sabut dan tandan kosong [2][3]. Salah satu pendekatan inovatif dalam pengelolaan limbah biomassa yang mampu menghasilkan produk bernilai guna tinggi secara berkelanjutan, serta menawarkan efisiensi energi dan dampak lingkungan yang rendah, adalah **Hydrothermal Carbonization (HTC)**. Metode ini berpotensi menjadi teknologi utama dalam peralihan menuju sumber energi yang lebih ramah lingkungan dan terbarukan. HTC merupakan proses termokimia yang dilakukan dengan memanaskan bahan biomassa dalam reaktor tertutup (autoklaf) yang berisi pelarut cair, umumnya air, pada suhu antara **180 hingga 350 °C** dan tekanan autogen sekitar **2 hingga 6 MPa**. Tujuan dari proses ini adalah mengkonversi biomassa menjadi senyawa karbon yang lebih stabil, seperti **hydrochar** [3][4][5].

Dengan ini, pelarut atau *solvents* menjadi salah satu tantangan terbesar dalam mewujudkan prinsip-prinsip Kimia Hijau. Untuk mengatasi masalah ini, para peneliti terus berupaya mencari alternatif yang lebih ramah lingkungan, bahkan hingga ke tahap menghilangkan penggunaan pelarut sepenuhnya, DES (*Deep Eutectic Solvents*) telah terbukti sangat efektif dalam berbagai aplikasi, mulai dari ekstraksi senyawa alami hingga proses industri seperti metalurgi. Potensi DES sebagai alternatif pelarut ramah lingkungan yang dapat menggantikan pelarut organik volatil [6][7][8].

Proses *Hydrothermal Carbonization* (HTC) dilakukan dalam reaktor batch bertekanan tinggi berkapasitas 4,5 liter, pemanas listrik yang dapat dikontrol secara presisi. Dua jenis larutan hidrolitik dengan konsentrasi 0,1 M H₂SO₄ dan 0,1 M H₃PO₄ dipersiapkan terlebih dahulu. Dalam reaktor, 100 gram tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dicampur dengan 1.000 gram larutan hidrolitik, sehingga menghasilkan rasio massa 1:10. Selanjutnya, reaktor diisi dengan gas nitrogen (N₂) hingga tekanan mencapai 20 bar, lalu gas dilepaskan untuk mengeluarkan udara. Proses ini diulang beberapa kali hingga udara dalam reaktor sepenuhnya tergantikan oleh nitrogen. Reaksi dilakukan pada berbagai suhu (160, 200, 240, dan 280 °C) dengan waktu reaksi konstan selama 2 jam, semuanya berlangsung dalam atmosfer nitrogen. Setelah reaksi selesai, reaktor didinginkan hingga mencapai suhu ruang, dan produk reaksi Selanjutnya, fase padat dan cair dari hasil reaksi dipisahkan menggunakan penyaringan vakum. Produk padat yang diperoleh kemudian dikeringkan dalam oven pada

suhu 105 °C selama 24 jam, sebelum disimpan di dalam wadah yang bebas dari kelembapan [9][10].

Berdasarkan latar belakang diatas, penulis berupaya untuk mengkaji dan menganalisis TKKS dan limbah air tahu sebagai bahan baku pada proses **Hydrothermal Carbonization** yang terlebih dahulu mengubah karakteristik kimia dan fisik yang berbeda dibandingkan bahan mentahnya. Kemudian penulis menganalisis dengan TGA yang menunjukkan pada tahapan pembakaran. Penelitian ini juga menggunakan metode *Coats-Redfern* pada data TGA, sehingga memperoleh nilai energi aktivasi dalam berlangsungnya proses pembakaran dan konstanta pada sebuah grafik yang menunjukkan laju reaksi proses pembakaran.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang dimana pengamatan secara langsung. Penelitian ini menggunakan variasi perbedaan suhu sebesar 180°C dan 210 °C dengan rasio campuran limbah air tahu dan TKKS Sebesar 1:10 (1 gram Biomassa dan 10 ml Solven). Proses pengujian HTC selama 8 jam. Variabel yang diamati adalah energi aktivasinya.

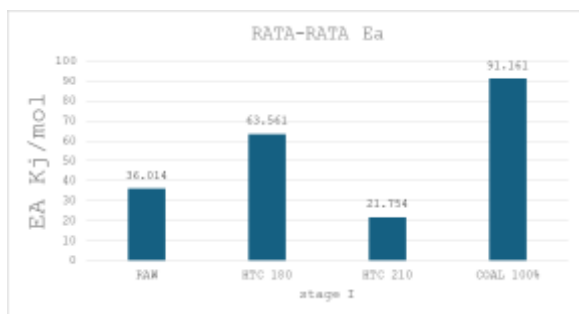
SKEMA INSTALASI PENELITIAN



Gambar 1. Skema Instalasi Proses HTC

Skema ini menunjukkan proses Hydrothermal Carbonization (HTC) untuk mengolah biomassa seperti ampas tahu dan tandan kosong kelapa sawit (TKKS) menjadi hydrochar. Bahan baku yang digunakan yakni ampas tahu sebagai solven dan TKKS sebagai biomassa. Proses HTC, Biomassa dipanaskan dalam air (180–210°C), tekanan tinggi untuk karbonisasi. Produk yang dihasilkan yakni *hydrochar* (padatan karbon), filtrasi, dan pengeringan sebelum digunakan.

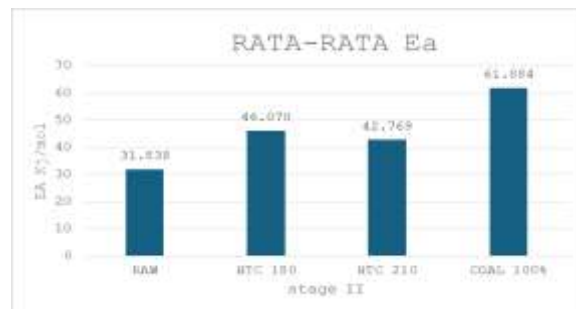
HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 2. Rata-rata energi aktivasi stage I

Analisis kinetika rekasi digunakan untuk menghitung energi aktivasi (E_a) dari dekomposisi termal *hydrochar*. Untuk menentukan nilai kintika berdasarkan data TGA untuk menghitung nilai (E_a) dan nilai koefisien determinasi (R^2) untuk mengvaluasi kinetika degradasi dari biomasa menggunakan rumus *Coats-Redfern*. Analisis ini menggunakan salah satu bentuk pendekatan model kinetika non-isothermal dengan persamaan $g(a)$ untuk menampilkan mekanisme nilai termal tersebut. Untuk mencari nilai energi aktivasi yaitu dengan cara menghitung dari data plot grafik TGA dengan persamaan $\ln g(a)$ dan $1/T$ pada aplikasi Origin. Energi aktivasi adalah energi minimum yang diperlukan untuk memulai suatu reaksi, reaktan akan sulit bereaksi jika mempunyai energi aktivasi yang kecil [10] [11]

Energi aktivasi (E_a) pada Stage I material RAW memiliki E_a sebesar 36.014 kJ/mol. Setelah proses HTC 180, E_a meningkat menjadi 63.561 kJ/mol, mengindikasikan bahwa produk HTC 180 membutuhkan energi yang lebih besar untuk memulai dekomposisi stage I dibandingkan RAW. Peningkatan E_a ini umumnya disebabkan oleh hilangnya senyawa-senyawa yang kurang stabil (seperti hemiselulosa) selama proses HTC. Namun, peningkatan suhu HTC menjadi 210 menghasilkan produk HTC 210 dengan E_a yang sangat rendah, yaitu 21.754 kJ/mol. Nilai yang rendah ini mungkin mengindikasikan bahwa pada suhu 210 C, terjadi karena sudah melewati proses HTC dengan suhu yang lebih tinggi membuat material rentan terhadap dekomposisi yang terjadi pada stage I mengalami penguapan air dan volatil ringan. Secara keseluruhan, COAL 100% menunjukkan stabilitas termal tertinggi, dibuktikan dengan nilai E_a dekomposisi stage I mencapai puncaknya pada 91.161 kJ/mol. Nilai E_a yang paling tinggi ini konsisten dengan struktur batubara yang sangat terkondensasi dan stabil, yang memerlukan energi aktivasi terbesar untuk memutus ikatan kimianya.



Gambar 3. Rata-rata energi aktivasi stage II

Pada stage II COAL 100% menunjukkan termal tertinggi, dengan E_a mencapai 61.884 kJ/mol, memiliki ikatan karbon yang kuat (memiliki struktur ikatan aromatik *double* pada coal). Di antara sampel yang berasal dari biomassa, HTC 180 menunjukkan E_a tertinggi kedua (46.070 kJ/mol), yang berarti proses HTC 180 menghasilkan energi yang besar dan menggeser degradasi massa (puncak temperatur) yang hampir sama dengan coal 100% dikarenakan material yang sudah melewati proses HTC dengan campuran limbah air tahu memiliki struktur ikatan aromatik karbon *single*. Sampel HTC 210 memiliki E_a sedikit lebih rendah (42.769 kJ/mol), dan RAW memiliki E_a terendah (31.838 kJ/mol) di stage II. ini menegaskan bahwa proses HTC secara keseluruhan berhasil meningkatkan stabilitas termal material pada Tahap II (dibandingkan RAW), menunjukkan keberhasilan penghilangan komponen yang kurang stabil dan peningkatan pada proses pembakaran, meskipun peningkatannya tidak setinggi batubara.

KESIMPULAN

Nilai energi aktivasi (E_a) rata-rata untuk material HTC 180°C adalah 63,561 kJ/mol, sedangkan untuk material HTC 210°C adalah 21,754 kJ/mol. Peningkatan suhu HTC dari 180°C ke 210°C secara signifikan meningkatkan energi aktivasi, yang mengindikasikan bahwa material hasil HTC 210°C memiliki stabilitas termal yang lebih tinggi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada keluarga tercinta atas segala dukungan dan motivasi yang diberikan. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Bapak Akhmad Faruq Alhikami, S.T., M.Sc. dan Ibu Dr. Ena Marlina, S.T., M.T. atas bimbingan, bantuan materi, serta penjelasan teoritis yang diberikan. Selain itu, penulis juga berterima kasih kepada rekan-rekan penelitian yang senantiasa memberikan semangat dan dukungan selama proses penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] 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.
- [2] N. Rohmah, "Pemanfaatan air limbah tahu menurunkan kadar kalium pada tandan kosong kelapa sawit (tkks) dengan," 2019.
- [3] J. Fakudze, S., Wei, Y., Zhou, P., Han, J., & Chen, "Synergistic effects of process-generated organic acids during co-hydrothermal carbonization of watermelon peel and high-sulfur coal," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 10(3), 2022.
- [4] M. F. Praevia, "Analisis Pemanfaatan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Cofiring pada PLTU Batubara," vol. 3, no. 1, pp. 28–37, 2022, doi: 10.14710/jebt.2022.13367.
- [5] S. S. M. Yosi Prasetyo, Muhammad Hendri *, "Analisis termogravimetri dan sifat mekanis edible film rumput laut *Gracillaria* sp. sebagai bahan alternatif bioplastik," *J. Penelit. Sains J.*, vol. 26, no. 2, pp. 147–155, 2024.
- [6] F. Gabriele, M. Chiarini, R. Germani, and N. Spreti, "Understanding the role of temperature in structural changes of choline chloride / glycols deep eutectic solvents," *J. Mol. Liq.*, vol. 385, no. March, p. 122332, 2023, doi: 10.1016/j.molliq.2023.122332.
- [7] M. Omichi, H. Hoshina, H. Morishima, and K. Ohshima, "Accurate measurement of the localized degree of grafting using thermogravimetric analysis," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 231, no. November 2024, p. 111087, 2025, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2024.111087.
- [8] A. Thukral, A. Venkatachalapati, N. Gupta, R. Saha, A. Pal, and P. Saini, "Hybrid kinetic analysis of FR-2 and FR-4 type printed circuit boards: A thermogravimetric analysis," *Circ. Econ.*, vol. 4, no. 1, p. 100125, 2025, doi: 10.1016/j.cec.2024.100125.
- [9] S. Saelor, P. Kongjan, P. Prasertsan, and C. Mamimin, "Heliyon Enhancing thermophilic methane production from oil palm empty fruit bunches through various pretreatment methods: A comparative study," *Heliyon*, vol. 10, no. 20, p. e39668, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e39668.
- [10] W. Chaeruni, Hadiyanto, and Cahyadi, "Karakteristik Pembakaran Campuran Batubara dan Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) Menggunakan Analisis Termogravimetri Deferensial Temperatur (TG-DTA)," vol. 8, no. 3, pp. 1629–1638, 2024.
- [11] M. A. Qodir, A. F. Alhikami and Margianto, "Analisis profil degradasi massa pada hydrochar menggunakan teknik Hydrothermal," *Jurnal Teknik Mesin*, pp. 14-20, 2025.

