

PENGARUH VARIASI CO-SOLVENT HYDROTHERMAL CARBONIZATION LIMBAH BATOK KELAPA TERHADAP KARAKTERISTIK TERMODINAMIKA PEMBAKARAN

Muhamad Aldi¹, Erna Marlina^{1,2}, Akhmad Faruq Alhikami^{1,2}

¹ program Studi Teknik Mesin, Universitas Islam Malang,

²Agro-Renew Center for Energy and Environment, Universitas Islam Malang

Jl. MT. Haryono 193 Malang 65114, Indonesia

e-mail: aldimuhammad870@gmail.com

e-mail: ena.marlina@unisma.ac.id

e-mail: alhikami@unisma.ac.id

ABSTRAK

Sektor kelistrikan Indonesia masih sangat bergantung pada batubara sub-bituminus yang memiliki kadar air tinggi dan nilai kalor rendah, sehingga menurunkan efisiensi pembakaran. Pemanfaatan *hydrochar* dari limbah batok kelapa hasil *Hydrothermal Carbonization* (HTC) dengan penambahan *co-solvent* berpotensi menjadi solusi *co-firing* yang ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi *co-solvent* citric acid 0,5 M dan NaOH 0,5 M pada *hydrochar* batok kelapa yang dicampur batubara sub-bituminous (rasio 20:80) terhadap karakteristik termodinamika pembakaran. Metode eksperimental dilakukan menggunakan *Thermogravimetric Analysis* (TGA) dan *Derivative Thermogravimetric* (DTG), dengan parameter energi bebas Gibbs (ΔG), entalpi (ΔH), dan entropi (ΔS) dihitung menggunakan metode *Coats-Redfern* pada stage II dan stage III, dibandingkan dengan batubara 100% sebagai kontrol. Hasil menunjukkan *hydrochar* dengan *co-solvent* citric acid memiliki residu pembakaran terendah (3,79%) dibandingkan NaOH-BK 20% (5,00%) dan batubara murni (4,43%). Stage II *hydrochar* citric acid memiliki ΔG , ΔH , dan ΔS yang lebih rendah (136,66 kJ/mol; 26,78 kJ/mol; -0,1540 kJ/mol·K) dibandingkan *hydrochar* NaOH, sedangkan pada stage III *hydrochar* NaOH menunjukkan kebutuhan energi lebih rendah (ΔG 146,95 kJ/mol; ΔH 61,02 kJ/mol). Secara keseluruhan *co-solvent* citric acid 0,5 M memberikan karakteristik pembakaran yang lebih stabil dan berpotensi lebih baik digunakan sebagai bahan campuran *co-firing* dengan batubara sub-bituminous.

Kata kunci: Batok Kelapa, Batubara Sub-bituminous, Co-solvent, Hydrothermal Carbonization, Termodinamika Pembakaran.

ABSTRACT

Indonesia's electricity sector remains heavily reliant on sub-bituminous coal, which has high moisture content and low calorific value, thereby reducing combustion efficiency. The use of *hydrochar* derived from coconut shell waste through hydrothermal carbonization (HTC) with the addition of a *co-solvent* has the potential to serve as an environmentally friendly *co-firing* solution. This study aims to analyze the effect of varying *co-solvents*—0.5 M citric acid and 0.5 M NaOH—on coconut shell *hydrochar* mixed with sub-bituminous coal (ratio 20:80) on combustion thermodynamic characteristics. Experimental methods were conducted using *Thermogravimetric Analysis* (TGA) and *Derivative Thermogravimetric Analysis* (DTG), with Gibbs free energy (ΔG), enthalpy (ΔH), and entropy (ΔS) calculated using the *Coats-Redfern* method in stages II and III, compared to 100% coal as a control. The results showed that *hydrochar* with citric acid as a *co-solvent* had the lowest combustion residue (3.79%) compared to 20% NaOH-BK (5.00%) and pure coal (4.43%). In Stage II, citric acid *hydrochar* exhibited lower values of ΔG , ΔH , and ΔS (136.66 kJ/mol; 26.78 kJ/mol; -0.1540 kJ/mol·K) compared to NaOH *hydrochar*, whereas in Stage III, NaOH *hydrochar* demonstrated lower energy requirements (ΔG 146.95 kJ/mol; ΔH 61.02 kJ/mol). Overall, 0.5 M citric acid as a *co-solvent* provides more stable combustion characteristics and has greater potential for use as a *co-firing* blend with sub-bituminous coal.

Keywords: , Coconut Shell, Co-solvent, Hydrothermal Carbonization, Hydrothermal Carbonization, Sub-bituminous Coal.

PENDAHULUAN

Sektor kelistrikan di Indonesia masih sangat bergantung pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbasis batu bara, yang menyumbang sekitar 68% dari total kebutuhan energi nasional. Ketersediaan cadangan batu bara yang melimpah menjadikan komoditas ini pilihan strategis dalam menjaga stabilitas pasokan energi dalam negeri [1]. Berdasarkan data Badan Geologi ESDM tahun 2020, Indonesia memiliki sumber daya batubara sebesar 143,73 miliar ton dengan cadangan 38,80 miliar ton, dan produksi tertinggi tercatat pada 2024 sebesar 836 juta ton. Sebagian besar batubara Indonesia berupa batubara sub-bituminus berkadar air tinggi dan bernilai kalor rendah, sehingga menurunkan efisiensi pembakaran dan meningkatkan intensitas emisi gas rumah kaca [2]. Pemanfaatan biomassa melalui teknik *co-firing* bersama batu bara dinilai efektif menekan emisi berbahaya; penambahan biomassa batok kelapa terbukti mampu mengurangi emisi CO dan SO₂ meski terjadi sedikit kenaikan CO₂ yang masih berada dalam batas aman [3],[4]. Peningkatan fraksi biomassa pada sistem *co-firing* juga dilaporkan mampu menaikkan efisiensi neto pembangkit sekitar 3–8% serta menurunkan emisi CO₂ hingga 10–16% dibandingkan pembakaran batu bara murni [5].

Batok kelapa merupakan limbah lignoselulosa yang tersusun dari lignin 27%, selulosa 34%, dan hemiselulosa 21% dengan kandungan karbon cukup tinggi sehingga berpotensi sebagai bahan bakar alternatif [6], serta memiliki nilai kalor tinggi sekitar 5780 kal/gram [7]. Karakterisasi lain menunjukkan bahwa biochar maupun *hydrochar* berbasis batok dan sabut kelapa memiliki potensi besar sebagai bahan bakar padat apabila diproses melalui teknik aktivasi yang tepat, mengingat ketersediaannya yang melimpah sebagai limbah agroindustri [8],[9].

Batok kelapa dapat diproses melalui Hydrothermal Carbonization (HTC), yaitu konversi biomassa menjadi bahan bakar padat (*hydrochar*) melalui reaksi termokimia dengan air pada suhu 180–260°C dan tekanan tinggi tanpa memerlukan pengeringan awal [10],[11]. Proses ini menghasilkan produk padat berkadar karbon tinggi dengan neraca energi yang lebih positif dibandingkan biomassa mentah, sehingga *hydrochar* dinilai lebih efisien digunakan sebagai bahan bakar padat maupun sebagai media penyimpan energi [12], [13].

Penambahan *co-solvent* pada proses HTC bertujuan mempercepat penguraian biomassa, meningkatkan kelarutan senyawa organik, serta memperbaiki karakteristik *hydrochar* yang dihasilkan melalui reaksi hidrolisis, dehidrasi, dan pembentukan struktur karbon [14]. Prinsip kerja *co-solvent* didasarkan

pada kemampuannya memodifikasi polaritas medium reaksi sehingga kelarutan senyawa target meningkat dan proses konversi berlangsung lebih efektif [15].

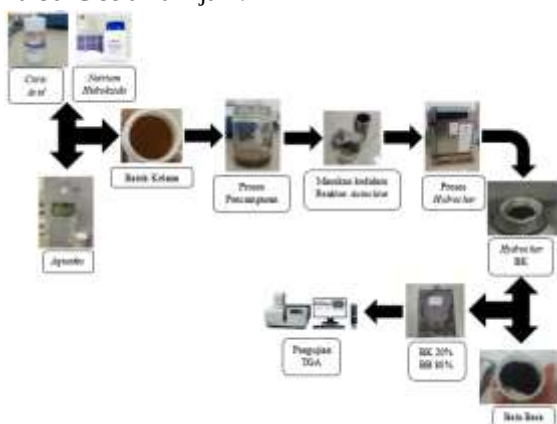
Penelitian terdahulu mengenai penggunaan *co-solvent* asam dan basa pada proses HTC menunjukkan pengaruh yang berbeda terhadap karakteristik *hydrochar* yang dihasilkan. Penggunaan larutan NaOH dan CH₃COOH pada HTC ampas kopi terbukti meningkatkan kadar fixed carbon dan nilai kalor biobriket seiring naiknya konsentrasi pelarut dan lama waktu proses [16]. Pada HTC lumpur tinja, kondisi asam meningkatkan pelarutan fosfor ke phase cair sehingga menurunkan retensinya pada *hydrochar*, sedangkan penggunaan basa memberikan pengaruh yang relatif terbatas; kedua kondisi tersebut juga dilaporkan menurunkan kandungan fixed carbon dan nilai kalor *hydrochar* [17]. Kondisi asam pada HTC turut dilaporkan meningkatkan pembentukan *hydrochar* melalui senyawa antara 5-hydroxymethylfurfural (HMF), sedangkan kondisi basa lebih mendorong reaksi fragmentasi biomassa yang meningkatkan pembentukan bio-oil [18].

Kajian mengenai termodinamika pembakaran *hydrochar* masih terbatas. Penelitian pada *hydrochar* berbasis jamur menganalisis parameter ΔH , ΔG , dan ΔS menggunakan TGA, namun belum mengkaji pengaruh perlakuan kimia selama HTC terhadap performa energi pembakarannya [19]. Studi kinetika termal batok kelapa dengan metode *Coats-Redfern* memperoleh ΔH , ΔG , dan ΔS masing-masing sebesar 65,2 kJ/mol, 193,1 kJ/mol, dan 0,281 kJ/mol·K, namun dilakukan tanpa proses HTC [20]. Penelitian *hydrochar* berbasis kulit jeruk bali dengan penambahan citric acid melaporkan kandungan karbon 71,2% dan nilai kalor 27,7 MJ/kg, tetapi belum menganalisis parameter termodinamika pembakarannya [21]. Ketiga studi tersebut menunjukkan bahwa pengaruh variasi *co-solvent* pada HTC batok kelapa terhadap karakteristik termodinamika pembakaran, khususnya pada campuran dengan batubara sub-bituminous, masih belum banyak dikaji secara menyeluruh.

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi *co-solvent* citric acid 0,5 M dan NaOH 0,5 M dalam proses aktivasi *hydrochar* batok kelapa terhadap karakteristik termodinamika pembakaran pada campuran dengan batubara sub-bituminous rasio 20:80, menggunakan metode eksperimental berbasis *Thermogravimetric Analysis* (TGA). Penelitian ini diharapkan memberikan data empiris bagi pengembangan teknologi *co-firing* berbasis biomassa lokal di Indonesia

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan membandingkan *hydrochar* batok kelapa hasil HTC menggunakan *co-solvent* citric acid 0,5 M dan NaOH 0,5 M, yang masing-masing dicampurkan dengan batubara sub-bituminous pada rasio 20:80. Batubara sub-bituminous 100% tanpa campuran digunakan sebagai kontrol. Persiapan sampel dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Islam Malang, sedangkan pengujian TGA dilaksanakan di Laboratorium Terpadu Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Brawijaya, pada November 2025 - April 2026. Proses karbonisasi *hydrochar* dilakukan pada suhu 210°C selama 8 jam, dan pengeringan sampel menggunakan oven pada suhu 80°C selama 2 jam.



Gambar 1 Skema Pembuatan *Hydrochar* Batok Kelapa dengan *Co-solvent* Citric Acid dan NaOH

Variabel bebas penelitian adalah jenis *co-solvent* (citric acid dan NaOH), variabel terikat meliputi laju degradasi massa serta parameter termodinamika (ΔG , ΔH , ΔS) yang dihitung menggunakan metode *Coats-Redfern*, sedangkan variabel terkontrol meliputi suhu dan durasi karbonisasi serta pengeringan sampel.

Analisis Termodinamika

Analisis termodinamika pembakaran digunakan untuk mengevaluasi efisiensi proses pembakaran, karakteristik energi yang dihasilkan, serta emisi yang terbentuk selama reaksi pembakaran berlangsung [22]. Pendekatan yang meliputi entalpi, entropi, dan energi bebas Gibbs digunakan agar pengaruh variasi kondisi operasi terhadap efisiensi pembakaran serta pembentukan polutan dapat dipahami dan dievaluasi secara lebih mendalam [23].

Energi bebas Gibbs (ΔG) menggambarkan besarnya energi yang diperlukan agar reaksi pembakaran berlangsung spontan pada tekanan dan temperatur konstan, sekaligus menjadi parameter utama dalam menilai tingkat kestabilan suatu sistem termodinamika [24]:

$$\Delta G = Ea + R \times Tm \times \ln \left(\frac{kB \times T}{hA} \right) \quad [25]$$

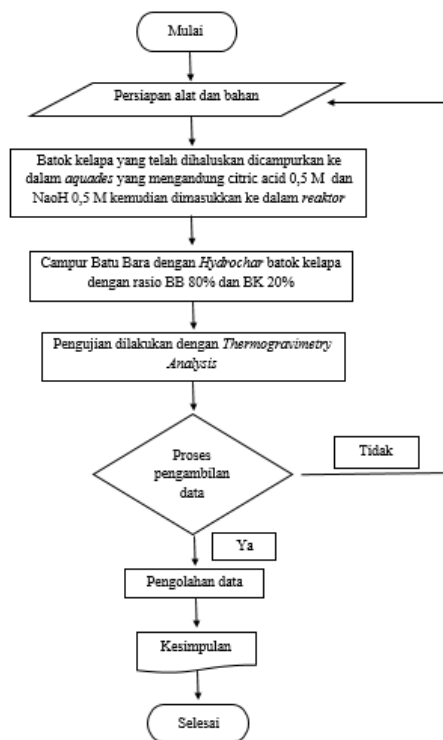
Entalpi (ΔH) menyatakan jumlah energi panas yang diterima atau dilepaskan sistem pada tekanan tetap, digunakan untuk mengidentifikasi sifat reaksi endoterm atau eksoterm [26]:

$$\Delta H = Ea - R \times T \quad [25]$$

Entropi (ΔS) menggambarkan tingkat ketidakteraturan sistem selama reaksi pembakaran berlangsung [27]:

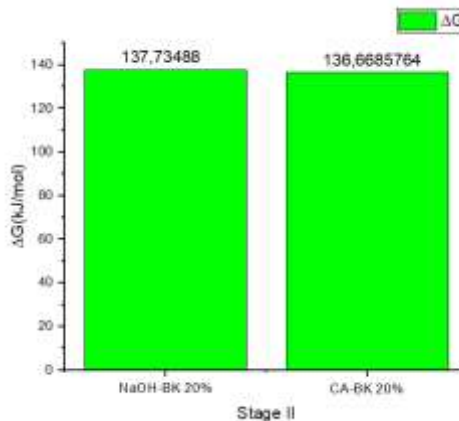
$$\Delta S = (\Delta H - \Delta G) / Tm \quad [25]$$

DIAGRAM ALIR PENELITIAN

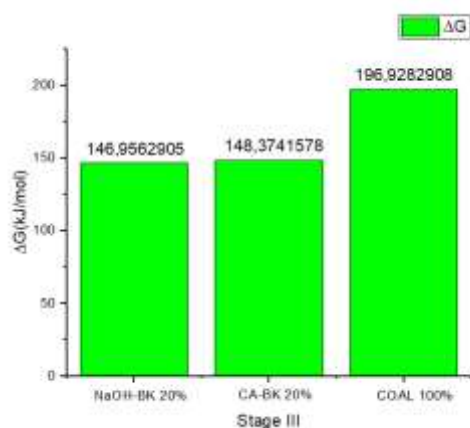


HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Analisis Gibbs Free Energy



Gambar 2 Gibbs Free Energy Stage II



Gambar 3 Gibbs Free Energy Stage III

Energi bebas Gibbs (ΔG) pada dasarnya menggambarkan besarnya energi yang diperlukan agar reaksi pembakaran dapat berlangsung secara spontan pada tekanan dan temperatur konstan. Semakin rendah nilai ΔG , semakin kecil energi yang dibutuhkan untuk memulai reaksi pembakaran, sehingga proses pembakaran cenderung berlangsung lebih mudah, nilai ΔG yang lebih tinggi menunjukkan bahwa reaksi memerlukan energi yang lebih besar agar dapat berlangsung.

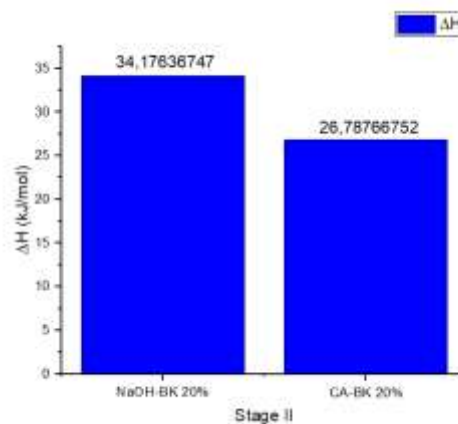
Stage II, nilai ΔG *hydrochar* NaOH-BK 20% sebesar 137,73 kJ/mol, sedikit lebih tinggi dibandingkan CA-BK 20% sebesar 136,66 kJ/mol. Selisih yang relatif kecil ini tetap mencerminkan perbedaan mekanisme reaksi yang mendasarinya: citric acid mempercepat reaksi dehidrasi, dekarboksilasi, dan kondensasi selama proses HTC sehingga menghasilkan struktur karbon yang lebih stabil, dan struktur yang lebih stabil inilah yang membuat proses dekomposisi awal hanya membutuhkan energi yang sedikit lebih rendah dibandingkan *hydrochar* NaOH.

Stage III, nilai ΔG meningkat pada seluruh sampel karena tahap ini didominasi oleh oksidasi *fixed carbon* yang secara inheren membutuhkan energi lebih besar dibandingkan tahap dekomposisi: NaOH-BK 20% sebesar 146,95 kJ/mol, CA-BK 20% sebesar 148,37 kJ/mol, dan Coal 100% tertinggi sebesar 196,93 kJ/mol. Nilai ΔG yang jauh lebih rendah pada kedua *hydrochar* dibandingkan batubara murni menunjukkan bahwa penggunaan *co-solvent* pada HTC menurunkan kebutuhan energi reaksi pembakaran secara keseluruhan. Pada tahap ini, struktur berpori hasil aktivasi NaOH mempermudah kontak antara oksigen dan *fixed carbon*, sehingga reaksi oksidasi berlangsung lebih optimal dan ΔG -nya menjadi lebih rendah dibandingkan *hydrochar* citric acid yang strukturnya lebih padat.

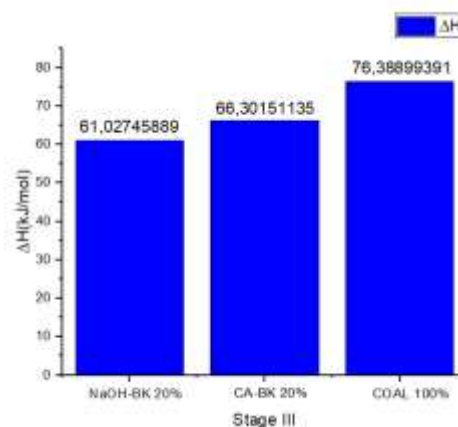
Nilai ΔG yang diperoleh juga dapat dikaitkan dengan konsep energi aktivasi dalam kinetika reaksi

pembakaran. Secara termodinamika, ΔG merupakan gabungan kontribusi entalpi (ΔH) dan entropi (ΔS), sehingga nilai ΔG yang lebih rendah pada kedua *hydrochar* dibandingkan batubara pada stage III tidak hanya mengindikasikan kebutuhan energi yang lebih kecil untuk memulai reaksi oksidasi, tetapi juga mencerminkan lintasan reaksi yang secara termodinamika lebih menguntungkan (*feasible*) untuk berlangsung spontan pada temperatur pembakaran. Kondisi ini berpotensi menurunkan kebutuhan energi eksternal atau bahan bakar penyalan (*pilot fuel*) apabila *hydrochar* batok kelapa diterapkan dalam sistem *co-firing*, sekaligus mendukung efisiensi pembakaran secara keseluruhan.

2. Analisis Entalpy



Gambar 4 Entalpy Stage II



Gambar 5 Entalpy Stage III

Entalpi (ΔH) menggambarkan besarnya energi panas yang terlibat selama proses pembakaran berlangsung, yaitu jumlah energi panas yang dibutuhkan atau dilepaskan sistem pada tekanan tetap. Semakin rendah nilai ΔH , semakin kecil energi panas yang diperlukan untuk mempertahankan reaksi pembakaran, sedangkan nilai ΔH yang lebih tinggi menunjukkan bahwa proses

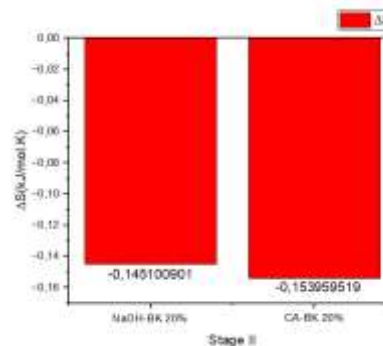
pembakaran memerlukan energi panas yang lebih besar agar reaksi dapat berlangsung.

Stage II, nilai ΔH *hydrochar* NaOH-BK 20% sebesar 34,17 kJ/mol, sedangkan CA-BK 20% sebesar 26,78 kJ/mol. Nilai yang lebih rendah pada CA-BK 20% sejalan dengan peran citric acid dalam mempercepat reaksi dehidrasi, dekarboksilasi, dan kondensasi selama HTC, yang menghasilkan struktur karbon lebih padat dengan kandungan komponen mudah terurai yang lebih sedikit; akibatnya, dekomposisi awal *hydrochar* citric acid dapat berlangsung dengan kebutuhan energi panas yang lebih kecil dibandingkan *hydrochar* NaOH.

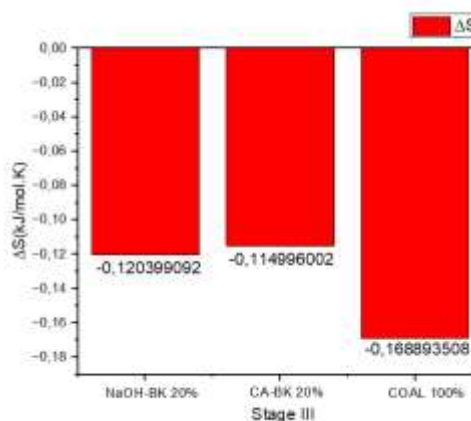
Stage III, nilai ΔH meningkat pada seluruh sampel: NaOH-BK 20% sebesar 61,02 kJ/mol, CA-BK 20% sebesar 66,30 kJ/mol, dan Coal 100% tertinggi sebesar 76,38 kJ/mol, mengindikasikan proses pembakaran karbon batubara murni memerlukan energi panas paling besar. Nilai ΔH yang lebih rendah pada *hydrochar* NaOH dibandingkan citric acid pada tahap ini berkaitan dengan meningkatnya porositas dan luas permukaan *hydrochar* akibat aktivasi NaOH, yang mempermudah kontak oksigen dengan *fixed carbon* sehingga reaksi oksidasi berlangsung lebih efektif dan tidak memerlukan suplai panas sebesar *hydrochar* citric acid yang strukturnya lebih padat.

Nilai ΔH yang positif pada seluruh sampel dan tahap menunjukkan bahwa pada awal reaksi tetap diperlukan suplai panas dari lingkungan sebelum oksidasi utama berlangsung secara eksotermis. Perbedaan ΔH antara *hydrochar* citric acid dan NaOH mencerminkan perbedaan karakteristik struktur kimia akibat mekanisme *co-solvent* yang berbeda, konsisten dengan pola perubahan pada profil degradasi massa dan nilai ΔG : struktur padat citric acid unggul pada tahap dekomposisi awal, sedangkan struktur berpori hasil aktivasi NaOH lebih unggul pada tahap pembakaran utama. Penurunan kebutuhan energi panas pada kedua *hydrochar* dibandingkan batubara murni berpotensi menghemat energi penyalan dan mengurangi penggunaan bahan bakar pendukung (auxiliary fuel) pada sistem *co-firing*.

3. Analisis Entropy



Gambar 6 Entropy Stage II



Gambar 7 Entropy Stage III

Gambar 5. Diagram Entropi Stage II dan Stage III

Nilai entropi (ΔS) pada dasarnya tidak sekadar menunjukkan besaran angka, melainkan menggambarkan tingkat keteraturan atau ketidakteraturan struktur molekul sistem selama reaksi pembakaran berlangsung, sekaligus mencerminkan perubahan susunan struktur dan distribusi energi yang terjadi seiring berlangsungnya reaksi termal. Semakin negatif nilai ΔS , semakin tinggi tingkat keteraturan atau kestabilan struktur yang terbentuk, sedangkan nilai ΔS yang kurang negatif menunjukkan bahwa perubahan keteraturan sistem yang terjadi relatif lebih kecil.

Stage II, nilai ΔS *hydrochar* NaOH-BK 20% tercatat sebesar -0,1451 kJ/mol·K, sedangkan CA-BK 20% sebesar -0,1540 kJ/mol·K. Nilai ΔS yang lebih negatif pada CA-BK 20% bukan sekadar angka yang lebih rendah, melainkan indikasi bahwa sistem hasil dekomposisi awal memiliki tingkat keteraturan struktur yang lebih tinggi. Fenomena ini berkaitan langsung dengan reaksi kimia yang berlangsung selama proses HTC: citric acid berperan sebagai katalis asam yang mempercepat reaksi dehidrasi, dekarboksilasi, dan kondensasi pada permukaan biomassa batok kelapa. Ketiga reaksi tersebut secara berurutan

melepaskan gugus hidroksil dan karboksil dari struktur lignoselulosa, membentuk ikatan silang antar-rantai karbon, dan menghasilkan inti aromatik yang lebih padat serta teratur. Struktur karbon yang lebih rapat inilah yang membuat susunan atomnya lebih tertata, sehingga pada saat mengalami dekomposisi termal di stage II, perubahan tingkat keteraturannya berlangsung lebih terkendali dan tidak drastis, tercermin dari nilai ΔS yang lebih negatif.

Kondisi berbeda terjadi pada stage III, yaitu tahap pembakaran utama yang didominasi oleh oksidasi karbon tetap (*fixed carbon*). Nilai ΔS pada tahap ini berubah menjadi $-0,1204 \text{ kJ/mol}\cdot\text{K}$ (NaOH-BK 20%), $-0,1150 \text{ kJ/mol}\cdot\text{K}$ (CA-BK 20%), dan $-0,16889 \text{ kJ/mol}\cdot\text{K}$ (Coal 100%) sebagai yang paling negatif. Nilai ΔS batubara murni yang paling negatif mengindikasikan bahwa selama pembakaran utama terjadi perubahan tingkat keteraturan sistem yang jauh lebih besar dibandingkan kedua sampel *hydrochar*; fenomena ini sejalan dengan sifat batubara sub-bituminous yang strukturnya heterogen dan banyak mengandung fraksi karbon amorf, sehingga oksidasinya berlangsung tidak merata dan menimbulkan perubahan susunan struktur yang lebih tajam. Nilai ΔS kedua *hydrochar* yang kurang negatif menandakan proses pembakarannya berlangsung lebih stabil dan bertahap. Pada perbandingan antar *hydrochar*, sampel NaOH-BK 20% memiliki nilai ΔS yang lebih rendah dibandingkan CA-BK 20%, fenomena yang berkaitan dengan peran NaOH sebagai aktivator basa yang membuka pori dan memperluas permukaan *hydrochar* selama proses HTC. Struktur yang lebih berpori tersebut mempermudah difusi oksigen menuju *fixed carbon*, sehingga reaksi oksidasi pada tahap pembakaran utama berlangsung lebih mudah dan lebih merata di seluruh permukaan partikel, yang pada akhirnya menghasilkan perubahan keteraturan sistem yang relatif lebih kecil dibandingkan *hydrochar* citric acid.

Analisis terpadu antara energi bebas Gibbs (ΔG), entalpi (ΔH), dan entropi (ΔS) menunjukkan bahwa variasi *co-solvent* memberi pengaruh berbeda terhadap karakteristik termodinamika pembakaran *hydrochar* batok kelapa melalui mekanisme reaksi yang berbeda pula. *Hydrochar* dengan citric acid 0,5 M unggul pada tahap dekomposisi (stage II) karena reaksi dehidrasi, dekarboksilasi, dan kondensasi menghasilkan struktur karbon yang lebih padat dan stabil, ditandai nilai ΔG , ΔH , dan ΔS yang lebih rendah. *hydrochar* dengan NaOH 0,5 M unggul pada tahap pembakaran utama (stage III) karena struktur yang lebih berpori mempermudah difusi oksigen menuju *fixed carbon*, sehingga kebutuhan energinya (ΔG dan ΔH) pada tahap tersebut menjadi lebih rendah. Citric acid meningkatkan karakteristik pembakaran melalui pembentukan struktur karbon yang lebih stabil, sedangkan

NaOH melalui pengembangan porositas yang mempercepat kontak oksigen. Kedua *co-solvent* tersebut tetap menghasilkan kebutuhan energi pembakaran yang lebih rendah dibandingkan batubara sub-bituminous 100%, sehingga *hydrochar* batok kelapa berpotensi digunakan sebagai bahan bakar substitusi parsial dalam sistem *co-firing*.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh variasi *co-solvent* *Hydrothermal Carbonization* (HTC) limbah batok kelapa terhadap karakteristik termodinamika pembakaran, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. *Hydrochar* dengan *co-solvent* citric acid 0,5 M menunjukkan karakteristik pembakaran lebih baik, ditandai residu terendah sebesar 3,79%, sedangkan *hydrochar* dengan *co-solvent* NaOH 0,5 M mengalami kehilangan massa terbesar pada phase dekomposisi.
2. *Co-solvent* citric acid 0,5 M memberikan performa lebih baik sebagai *co-solvent* dalam proses HTC untuk menghasilkan *hydrochar* campuran dengan batubara sub-bituminous rasio 20:80, karena menghasilkan pembakaran yang lebih stabil dan residu pembakaran yang lebih rendah dibandingkan *co-solvent* NaOH.

SARAN

1. Penelitian selanjutnya diharapkan menggunakan variasi konsentrasi *co-solvent* NaOH dan citric acid yang lebih beragam untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai pengaruh konsentrasi terhadap karakteristik termodinamika pembakaran *hydrochar*.
2. Penelitian selanjutnya disarankan mengkaji variasi rasio pencampuran *hydrochar* dengan batubara sub-bituminous, misalnya 10:90, 30:70, dan 40:60, guna menentukan komposisi campuran dengan karakteristik pembakaran paling optimal.
3. *Hydrochar* hasil *co-solvent* citric acid 0,5 M berpotensi dikembangkan sebagai bahan bakar campuran dengan batubara sub-bituminous pada skala yang lebih besar untuk mengkaji performa pembakarannya pada kondisi operasi mendekati kondisi nyata di industri.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. M. Bisri, S. I. Maharani, and A. S. F. S. Billa, "Evaluasi Kebijakan Pensiun Dini Pltu Batubara Dalam Konteks Transisi Energi: Implikasi Terhadap Ketahanan Energi Dan Pembangunan Sosial-Ekonomi Indonesia," *J. Mhs.*, vol. 16, no. 2, pp. 1–13, 2024, doi: 10.20885/khazanah.vol16.iss2.art1.

- [2] L. Ifa, F. F. F. Faisal, and D. Sarmanto, "Pengaruh Ukuran Partikel Pada Analisis Moisture Batubara Jenis Low Rank Coal," *J. Geomine*, vol. 7, no. 2, pp. 87–91, 2019, doi: 10.33536/jg.v7i2.329.
- [3] M. W. Azizi, E. Marlina, and N. Robbi, "PENGARUH CO-FIRING TONGKOL JAGUNG PADA BATUBARA TERHADAP EFISIENSI BOILER," pp. 6–11, 2025.
- [4] R. H. Suarga, M. S. . T. S. Utomo, and Muchammad, "Analisis CFD Co-firing Biomassa Batok Kelapa Pada Stoker Boiler," *J. Tek. Mesin S-1*, vol. 11, no. 4, pp. 159–168, 2023, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm>
- [5] E. Danso-Boateng, A. B. Ross, T. Mariner, J. Hammerton, and M. Fitzsimmons, "Hydrochars produced by hydrothermal carbonisation of seaweed, coconut shell and oak: effect of processing temperature on physicochemical adsorbent characteristics," *SN Appl. Sci.*, vol. 4, no. 8, 2022, doi: 10.1007/s42452-022-05085-x.
- [6] A. P. Gobel and A. T. Arief, "Pengaruh Karbonisasi Terhadap Karakteristik Tempurung Kelapa Berdasarkan Uji proksimat dan nilai kalor," *energi Miner. energi dan Lingkung.*, vol. 5, no. 1, pp. 48–54, 2021.
- [7] M. S. Firmansyah and Siti Fatimah Nurhayati, "Pemanfaatan Briket Arang Tempurung Kelapa sebagai Energi Alternatif," *Determ. J. Penelit. Ekon. Manaj. dan Akunt.*, vol. 2, no. 2, pp. 118–123, 2024, doi: 10.23917/determinasi.v2i2.227.
- [8] A. B. L. Putra, E. Marlina, and A. F. Alhikami, "EFEKTIVITAS KENAIKAN KONSENTRASI NaOH AKTIVASI HYDROCHAR BATOK KELAPA TERHADAP THERMODINAMIKA PEMBAKARAN CO-FIRING BATU BARA SUB-BITUMINOUS," *Tek. Mesin*, pp. 29–33, 2025.
- [9] A. Ajien, J. Idris, N. Md Sofwan, R. Husen, and H. Seli, "Coconut shell and husk biochar: A review of production and activation technology, economic, financial aspect and application," *Waste Manag. Res.*, vol. 41, no. 1, pp. 37–51, 2023, doi: 10.1177/0734242X221127167.
- [10] Y. Shen, "A review on hydrothermal carbonization of biomass and plastic wastes to energy products," *Biomass and Bioenergy*, vol. 134, no. August 2019, p. 105479, 2020, doi: 10.1016/j.biombioe.2020.105479.
- [11] M. A. Qodir, A. F. Alhikami, and Margianto, "Analisis profil degradasi massa pada hydrochar menggunakan teknik Hydrothermal Carbonization dari limbah tandan kosong sawit," *Tek. Mesin*, vol. 22, pp. 14–20, 2025.
- [12] J. Wang *et al.*, "Hydrothermal Carbonization of Heavy Metal-Contaminated Biomass: Migration, Transformation, and Ecological Stability Changes of Metals," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 26, no. 6, pp. 1–14, 2025, doi: 10.3390/ijms26062551.
- [13] M. Prieto, H. Yue, N. Brun, G. J. Ellis, M. Naffakh, and P. S. Shuttleworth, "Hydrothermal Carbonization of Biomass for Electrochemical Energy Storage: Parameters, Mechanisms, Electrochemical Performance, and the Incorporation of Transition Metal Dichalcogenide Nanoparticles," *Polymers (Basel)*, vol. 16, no. 18, 2024, doi: 10.3390/polym16182633.
- [14] 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, doi: 10.1007/s12649-020-01255-3.
- [15] M. A. El Hamd, R. H. Obaydo, D. Nashed, M. El-Maghrabey, and H. M. Lotfy, "Hydrotropy and co-solvency: Sustainable strategies for enhancing solubility of poorly soluble pharmaceutical active ingredients," *Talanta Open*, vol. 11, no. November 2024, 2025, doi: 10.1016/j.talo.2024.100391.
- [16] M. A. A. Retwan, Z. Ginting, Muhammad, S. Bahri, and Faisal, "PENGARUH PENGGUNAAN LARUTAN NaOH DAN CH₃COOH TERHADAP KARAKTERISTIK BIOBRIKET DARI AMPAS KOPI DENGAN PROSES HYDROTHERMAL," vol. 5, no. Oktober, pp. 719–728, 2024, [Online]. Available: <https://doi.org/10.29103/cejs.v4i5.18057> 1.
- [17] V. S. Ekanthalu, S. Narra, J. Sprafke, and M. Nelles, "Influence of acids and alkali as additives on hydrothermally treating sewage sludge: Influence on phosphorus recovery, yield, and energy value of hydrochar," *Processes*, vol. 9, no. 4, 2021, doi: 10.3390/pr9040618.
- [18] M. J. Alhnidi, P. Körner, D. Wüst, J. Pfersich, and A. Kruse, "Nitrogen-Containing Hydrochar: The Influence of Nitrogen-Containing Compounds on the Hydrochar Formation," *ChemistryOpen*, vol. 9, no. 8, pp. 864–873, 2020, doi: 10.1002/open.202000148.
- [19] M. M. Koji, J. T. Petrovi, M. S. Petrovi, S. M. Stankovi, and M. T. Marinovi, "Journal of Analytical and Applied Pyrolysis Hydrothermal carbonization of spent mushroom substrate : Physicochemical characterization , combustion behavior , kinetic and thermodynamic study," vol. 155, no. November 2020, 2021, doi: 10.1016/j.jaap.2021.105028.

- [20] M. Uddin Monir *et al.*, “Comprehensive characterization and kinetic analysis of coconut shell thermal degradation: Energy potential evaluated via the Coats-Redfern method,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 55, no. February, p. 104186, 2024, doi: 10.1016/j.csite.2024.104186.
- [21] R. Ma, S. Fakudze, and J. Chen, “Combustion performance of hydrochars produced via citricacid-assisted hydrothermal carbonization of pomelo peel at various temperatures Combustion performance of hydrochars produced via citric-acid-assisted hydrothermal carbonization of pomelo peel at va,” 2021, doi: 10.1088/1755-1315/766/1/012052.
- [22] H. Riyanto, T. Hardianto, W. Adriansyah, and G. Y. Jeffry, “Studi Termodinamika Pembakaran Kombinasi Batu Bara dan Biomassa Limbah,” *JMPM (Jurnal Mater. dan Proses Manufaktur)*, vol. 5, no. 2, pp. 82–90, 2022, doi: 10.18196/jmpm.v5i2.13903.
- [23] M. A. Mashkour and A. Y. Ahmed, “Thermodynamic Modeling for Analysing the Performance and Emissions of Spark-Ignition Engines,” *J. Eng. Sustain. Dev.*, vol. 24, no. 2, pp. 57–79, 2020, doi: 10.31272/jeasd.24.2.5.
- [24] C. J. Bartel *et al.*, “Physical descriptor for the Gibbs energy of inorganic crystalline solids and temperature-dependent materials chemistry,” *Nat. Commun.*, vol. 9, no. 1, 2018, doi: 10.1038/s41467-018-06682-4.
- [25] D. R. A. Sukma, A. F. Alhikami, and C. Yazirin, “Analisis Termodinamika Pembakaran Pada Campuran Bahan Bakar Batubara Sub-Bituminous Dengan Limbah Tandan Kosong Sawit,” 2023.
- [26] M. D’Anna, P. Lubini, H. U. Fuchs, and F. Corni, “A Direct Entropic Approach to the Thermal Balance of Spontaneous Chemical Reactions,” *Entropy*, vol. 26, no. 6, 2024, doi: 10.3390/e26060450.
- [27] H. Struchtrup, “Entropy and the second law of thermodynamics-The nonequilibrium perspective,” *Entropy*, vol. 22, no. 7, 2020, doi: 10.3390/e22070793.