

Optimasi komposisi briket ramah lingkungan dari limbah batubara sub-bituminus dan karbon rumput laut untuk mengurangi emisi

Optimizing the composition of eco-friendly briquettes from sub-bituminous coal waste and Gracilaria seaweed carbon for emission reduction

Maxie Djonny¹, Reinaldy Octavian Dominggus¹, Rosalia Sira Sarungallo^{1*}, Lyse Bulo¹, Secwin Sello Manukrante¹.

¹Program Studi Teknik Kimia Universitas Kristen Indonesia Paulus
Jalan Perintis Kemerdekaan Km. 13 Daya Makassar

*Email: rosalia_sira@ukipaulus.ac.id

Disubmit: 14 September 2024, direvisi: 02 Desember 2024, diterima: 10 Januari 2025

Doi : 10.30862/cassowary.cs.v8.1.341

ABSTRACT: *This study aims to evaluate the potential of sub-bituminous coal waste and seaweed-derived carbon as raw materials for the development of briquettes through a carbonization process as an alternative fuel. The carbonization of seaweed biomass was conducted at temperatures of 300°C, 400°C, and 500°C, with variations in coal-to-seaweed carbon mixing ratios of 1:1, 5:3, and 6:2, as well as a control sample consisting of 100% coal. The optimal briquette (3B2, a 5:3 ratio at 300°C) achieved a calorific value of 4834 cal/g, a density of 0.6 g/cm³, and a burning time of 50 minutes, with reductions in SO_x, NO_x, and CO_x emissions by 11.11%, 25.00%, and 3.17%, respectively, compared to the control sample. Proximate analysis of the 3B2 briquette indicated a fixed carbon content of 41.03%, volatile matter content of 18%, and ash content of 36.77%. Although the proximate analysis did not meet all SNI parameters, the 3B2 briquette has potential as a low-emission alternative fuel. The results of this study suggest that utilizing sub-bituminous coal waste and seaweed biomass offers potential as a low-emission fuel to mitigate the environmental impacts of fossil fuel usage.*

Keywords: *Briquette, sub-bituminous coal, seaweed carbon, emissions.*

PENDAHULUAN

Emisi karbon dari pembakaran bahan bakar fosil telah mencapai tingkat yang mengkhawatirkan. Pada tahun 2021, emisi karbon dioksida mencapai 36,6 gigaton, dengan sektor energi menyumbang lebih dari 70% dari total emisi tersebut (International Energy Agency (IEA), 2022). Batubara teridentifikasi sekitar 40% dari emisi tersebut. Peningkatan emisi CO₂ akibat aktivitas manusia, terutama dari sektor industri, telah menyebabkan peningkatan suhu yang berkorelasi

dengan pertumbuhan ekonomi (Fan *et al.*, 2023). Pemanasan berdampak pada kerusakan lingkungan, dan meningkatkan risiko bencana alam yang mengganggu keseimbangan ekosistem dan stabilitas ekonomi (Fawzy *et al.*, 2020; Li, 2023). Laporan IPCC, (2019) menjelaskan peran besar bahan bakar fosil dalam perubahan iklim.

Indonesia adalah salah satu negara dengan tingkat ketergantungan yang tinggi pada batubara sebagai sumber energi utama. Bauran energi nasional didominasi oleh bahan bakar

fosil, terutama batubara, yang menyumbang proporsi besar terhadap emisi karbon (Climate, 2021; Hasnanto and Setiawan, 2024). Ketergantungan Indonesia pada batubara sebagai sumber energi utama menimbulkan situasi sulit di mana pemenuhan kebutuhan energi harus diselaraskan dengan upaya pelestarian lingkungan. Meskipun ada upaya peningkatan pemanfaatan energi hijau, kebijakan energi di Indonesia masih berfokus pada batubara untuk memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat (Mulyono, 2021). Selain itu, tekanan untuk mempertahankan ketergantungan pada batubara masih tinggi karena dipengaruhi oleh kepentingan politik dan ekonomi, meskipun dampak lingkungan diabaikan (Ordonez *et al.*, 2021). Intervensi pemerintah, seperti pembatasan produksi batubara, diperlukan untuk menjaga cadangan energi dan memenuhi permintaan domestik hingga tahun 2050 (Hudaya *et al.*, 2019). Untuk mengatasi permasalahan ini, diperlukan pergeseran bertahap menuju penggunaan energi terbarukan yang sejalan dengan kebijakan energi berkelanjutan (Yudiartono *et al.*, 2023).

Salah satu pendekatan yang dapat diterapkan adalah memanfaatkan sumber daya yang tersedia, seperti limbah batubara dan biomassa rumput laut, untuk mendukung perubahan energi dan mengurangi emisi karbon.

Indonesia memiliki peluang dalam memanfaatkan limbah batubara sebagai sumber energi alternatif. Sebagai salah satu produsen batubara terbesar di dunia, Indonesia memproduksi 616 juta ton pada tahun 2019 dan 563 juta ton pada tahun 2020 (Ministry of Energy and Mineral Resources - Republic of Indonesia, 2021).

Limbah batubara, khususnya residu laboratorium, selama ini menjadi masalah lingkungan. Residu tersebut memiliki kandungan karbon yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif (Nurhalim *et al.*, 2018; Nikiforov *et al.*, 2023). Di sisi lain, rumput laut merupakan salah satu jenis biomassa yang melimpah di Indonesia dan memiliki potensi besar sebagai bahan bakar alternatif (Stiger-Pouvreau *et al.*, 2016; Monteiro and Ferreira, 2022; Kalak, 2023). Pemanfaatan limbah rumput laut dalam pem-

buatan briket diharapkan dapat mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh residu dari laboratorium. Khan *et al.*, 2022 melaporkan bahwa limbah rumput laut merupakan bahan baku potensial untuk produksi briket. Biomassa rumput laut memiliki beberapa kelebihan, seperti ketersediaannya yang melimpah di wilayah pesisir, laju pertumbuhan yang cepat, serta karakteristiknya sebagai sumber daya terbarukan yang ramah lingkungan. Studi terdahulu menunjukkan bahwa karbon dari rumput laut memiliki nilai kalor tinggi dan struktur pori yang dapat meningkatkan kinerja pembakaran (Zhao *et al.*, 2022). Yong *et al.*, (2022) menambahkan bahwa struktur pori karbon rumput laut mendukung optimalisasi pembakaran. Pada tahun 2019, Indonesia menghasilkan sekitar 9,66 juta ton biomassa rumput laut, yang menempatkannya sebagai produsen terbesar kedua di dunia setelah China, dengan kontribusi sebesar 38% dari pasar global. Selain itu, Indonesia memiliki potensi area budidaya rumput laut seluas 12,3 juta hektar, meskipun baru 102 hektar atau sekitar 0,8% yang telah dimanfaatkan untuk budidaya (Basyuni *et al.*, 2024).

Oleh karena itu, studi ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi pemanfaatan limbah padat batubara sub-bituminus dan biomassa rumput laut sebagai bahan baku dalam pembuatan briket. Kadar karbon yang tinggi pada kedua material tersebut memberikan peluang besar dalam menghasilkan bahan bakar alternatif berupa briket.

Proses pembuatan briket dari limbah padat berkontribusi pada pengurangan volume limbah dan meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan. Pemanfaatan briket ramah lingkungan diharapkan dapat berperan dalam penurunan emisi gas rumah kaca.

MATERI DAN METODE

1. Waktu dan Tempat

Penelitian dilakukan dari Juli hingga September 2024 di Laboratorium OTK UKI Paulus dan Laboratorium PT Geoservice Cabang Pangkep, yang menyediakan limbah batubara sub-bituminus sebagai bahan baku penelitian.

Pengujian emisi briket dilakukan di Balai Besar Hasil Industri Pertanian Makassar.

2. Bahan dan Alat

Limbah rumput laut kering diperoleh dari petani rumput laut di Kabupaten Pangkep, sedangkan limbah batubara subbituminous diperoleh dari PT Geoservice Cabang Pangkep. Bahan tambahan yang digunakan meliputi aquadest sebagai pelarut dalam proses pencampuran, dan tepung tapioka sebagai bahan perekat briket.

Alat utama yang digunakan yaitu neraca analitik merek Sartorius digunakan untuk menimbang bahan dengan tingkat presisi 0,0001 gram. Cetakan briket, dibuat khusus 4 cm x 4 cm x 4 cm di PT Karya Baru Timumbu. *Furnace* merek Carbolite digunakan dalam proses karbonisasi untuk memanaskan bahan dengan kontrol suhu yang presisi. Gelas beker merek Pyrex, spatula dan nampan plastik digunakan untuk menangani bahan selama proses pencampuran, plate aluminium, tray aluminium, sedangkan *jaw crusher* merek Dingbo berfungsi untuk menghancurkan limbah batubara subbituminous. Oven merek Memmert digunakan untuk mengeringkan bahan. Desikator digunakan untuk menyimpan bahan kering dan mencegah penyerapan kelembapan dari udara, dan menjaga stabilitas bahan selama penyimpanan. Hot plate digunakan untuk memanaskan larutan campuran tepung tapioka dengan air sebagai perekat.

3. Metode Percobaan

Proses pembuatan briket batubara dalam penelitian ini mengacu pada prosedur dasar briкетting batubara, dengan penambahan rumput laut sebagai bahan baku.

Rasio Campuran Bahan

Briket dibuat dengan tiga variasi rasio campuran antara batubara sub-bituminus dan karbon hasil karbonisasi rumput laut, yaitu 1:1, 5:3, dan 6:2 (w/w). Pemilihan rasio bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh komposisi karbon rumput laut terhadap sifat fisik, kimia, dan emisi dari briket yang dihasilkan. Rasio 1:0 digunakan sebagai kontrol.

Tahap karbonisasi rumput laut

Karbonisasi rumput laut diawali dengan persiapan bahan baku. Limbah rumput laut kering dihaluskan menggunakan *jaw crusher* hingga mencapai ukuran partikel seragam (< 1 mm). Kadar air, kadar abu, zat volatil, dan nilai kalor bahan baku ditentukan melalui karakterisasi awal. Serbuk rumput laut kemudian dikarbonisasi dalam *furnace* pada tiga suhu berbeda, yaitu 300°C, 400°C, dan 500°C, masing-masing selama 2 jam. Pemilihan suhu karbonisasi didasarkan pada literatur yang menunjukkan pengaruh suhu terhadap struktur dan kinerja karbon. Suhu 300°C mempertahankan kandungan volatil yang lebih tinggi, yang berfungsi sebagai perekat alami dalam briket. Suhu 400°C menghasilkan karbon dengan kandungan volatil dan struktur lebih stabil, tanpa kehilangan massa karbon. Pada suhu 500°C untuk memaksimalkan degradasi senyawa volatil dan pembentukan karbon berpori, yang dapat meningkatkan kinerja pembakaran. Karbonisasi bertujuan untuk menghilangkan komponen volatil dan menghasilkan karbon padat (arang). Arang yang dihasilkan digiling hingga mencapai ukuran partikel sekitar 0,35 mm menggunakan *jaw crusher* untuk meningkatkan luas permukaan dan homogenitas campuran.

Tahap pencampuran bahan baku dan pembentukan briket

Batubara sub-bituminus dan karbon rumput laut dicampur sesuai rasio yang telah ditentukan (1:0, 1:1, 5:3, dan 6:2), dengan tepung tapioka sebagai bahan perekat (20% dari total berat). Campuran diaduk hingga homogen menggunakan mixer. Briket dicetak berbentuk kotak (4 cm x 4 cm x 4 cm) menggunakan alat pencetak hidrolik. Briket yang dihasilkan dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama 1 jam untuk mengurangi kadar air, kemudian dikeringkan pada suhu ruang selama 8 hari.

4. Analisa Proximate

Analisa proximate merupakan suatu metode analisis untuk mengidentifikasi kadar air (*Moisture Content*), kadar abu (*Ash Content*), kadar zat terbang (*volatile matter*), dan

kadar karbon tetap (*fixed carbon*) dalam sampel.

Kadar air (*Moisture Content*)

Kadar air sampel ditentukan berdasarkan metode ASTM D3173 – 11, (2011). Sampel briket ±1 g dipanaskan dalam oven pada suhu 104-107 °C hingga mencapai berat konstan (selama ± 4 jam dalam desikator). Persentase kadar air dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\% \text{ Kadar Air} = \left[\frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \right] \times 100 \quad (1)$$

di mana m_1 , m_2 , dan m_3 masing-masing mewakili massa wadah kosong (gram), massa wadah berisi sampel sebelum pengeringan (gram), dan massa wadah berisi sampel setelah pengeringan hingga mencapai berat konstan (gram).

Kadar abu (*Ash Content*)

Analisis kadar abu dilakukan mengikuti metode standar ASTM D3174–12, (2018). Sampel briket batubara dengan massa sekitar 1 gram ditempatkan dalam wadah yang telah diketahui massanya, kemudian dipanaskan dalam *furnace* pada suhu 750 °C selama 4 jam. Sisa pembakaran (abu) yang tertinggal dalam wadah kemudian ditimbang. Persentase kadar abu dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\% \text{ Kadar Abu} = \left[\frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \right] \times 100\% \quad (2)$$

di mana m_1 , m_2 , dan m_3 masing-masing mewakili massa wadah kosong (gram), massa wadah berisi sampel (gram), dan massa wadah berisi sampel setelah pemanasan (gram).

Kadar zat terbang (*Volatile Matter*)

Analisis kadar zat terbang dilakukan mengikuti metode standar ASTM D3175–11, (2011). Sampel dengan massa sekitar 1 gram ditempatkan dalam wadah tertutup yang telah diketahui massanya, kemudian dipanaskan dalam *furnace* pada suhu 950°C selama 7 menit dalam kondisi tanpa aliran udara (oksigen terbatas). Massa wadah beserta sisa arang setelah pemanasan kemudian ditimbang. Persentase kadar zat terbang dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\% \text{ Kadar zat terbang} = \left[\frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \right] \times 100\% \quad (3)$$

di mana m_1 , m_2 , dan m_3 masing-masing mewakili massa wadah kosong (gram), massa wadah berisi sampel (gram), dan massa wadah berisi sampel setelah pemanasan (gram).

Kadar karbon tetap (*Fixed Carbon*)

Kadar karbon tetap dalam sampel ditentukan secara tidak langsung melalui perhitungan berdasarkan hasil analisis proksimat. Perhitungan berdasarkan pada prinsip pengurangan komponen-komponen volatil dan mineral dari total massa sampel. Persamaan yang digunakan adalah:

$$\% \text{ Fixed Carbon} = 100\% - \% \text{ Kadar air} - \% \text{ Kadar abu} - \% \text{ VM} \quad (4)$$

Nilai kalor

Pengujian nilai kalori dilakukan mengikuti metode ASTM D5865–12, (2012). Sampel dengan massa sekitar 1 gram ditempatkan dalam cawan dan dibakar dalam bom kalorimeter yang diisi dengan oksigen bertekanan 2-3 MPa. Setelah sampel dibakar, panas yang dihasilkan akan meningkatkan suhu air di dalam kalorimeter. Perubahan suhu ini kemudian diukur dan digunakan untuk menghitung nilai kalori sampel. Sebelum pengujian, kalorimeter dikalibrasi menggunakan standar yang telah diketahui nilai kalorinya. Data pengujian, seperti massa sampel, nomor sampel, dan nomor bom kalorimeter, dimasukkan ke dalam mikroprosesor untuk perhitungan otomatis. Hasil akhir berupa nilai kalori sampel akan ditampilkan dan dicetak.

Uji kepadatan briket

Kepadatan briket merupakan perbandingan massa terhadap volume briket yang diperoleh dari hasil pembagian massa briket dengan volume yang dihitung berdasarkan pengukuran panjang, lebar, dan tinggi briket menggunakan venier caliper.

Uji nyala briket

Uji nyala briket atau waktu pembakaran dilakukan untuk menentukan durasi yang diperlukan briket untuk terbakar sempurna hingga hanya menyisakan abu.

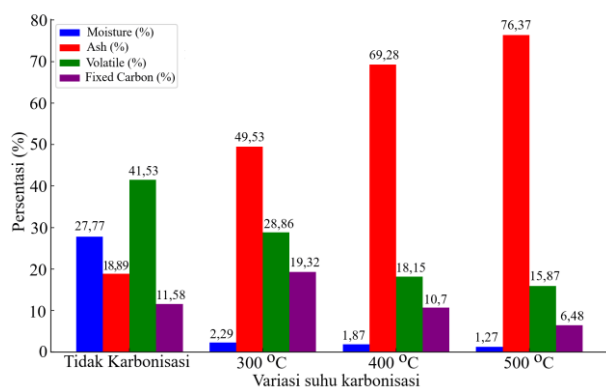
Uji emisi briket

Analisis emisi dilakukan untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari pembakaran briket, dengan mengukur konsentrasi gas SO_x, NO_x, dan CO_x yang dihasilkan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis proksimat rumput laut sebelum dan setelah karbonisasi menunjukkan perubahan pada komposisi bahan. Karbonisasi pada berbagai suhu (300°C, 400°C, dan 500°C) menghasilkan perubahan pada kadar air (*Moisture Content*), kadar abu (*Ash Content*), kadar zat terbang (*volatile matter*), dan kadar karbon tetap (*fixed carbon*) dalam sampel.

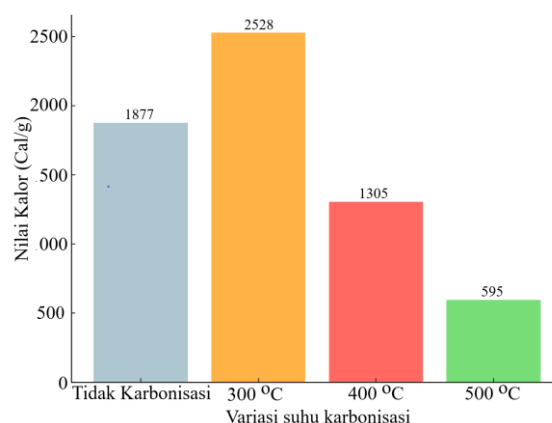
Gambar 1 dan 2 menunjukkan pengaruh suhu karbonisasi terhadap komposisi proksimat dan nilai kalor rumput laut. Terjadi penurunan kadar air dan zat volatil seiring dengan peningkatan suhu karbonisasi. Penurunan kadar air ini disebabkan oleh penguapan air bebas dan dekomposisi termal air terikat dalam biomassa (Sorouh *et al.*, 2023, 2024; Lu *et al.*, 2024). Sedangkan, penurunan zat volatil mengindikasikan pelepasan senyawa organik volatil selama proses karbonisasi (Zhao *et al.*, 2022).



Gambar 1. Perubahan komposisi proksimat rumput laut sebelum dan setelah karbonisasi

Di sisi lain, kadar abu meningkat dengan peningkatan suhu karbonisasi, menunjukkan akumulasi residu mineral (Haykiri-Acma *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2017). Sementara dalam penelitian sebelumnya pada rumput laut melalui karbonisasi, di mana kadar abu meningkat akibat konsentrasi residu anorganik setelah penghilangan komponen organik (Haykiri-Acma *et al.*, 2013).

Kadar karbon tetap, yang merupakan parameter dalam menentukan kualitas bahan bakar, meningkat setelah karbonisasi pada 300°C, dari 11,58% menjadi 19,32%. Peningkatan suhu karbonisasi lebih lanjut menyebabkan penurunan kadar karbon tetap menjadi 10,7% dan 6,48% pada 400°C dan 500°C, masing-masing. Penurunan disebabkan oleh dekomposisi karbon pada suhu tinggi (Liu *et al.*, 2019; Hung *et al.*, 2021; Patel *et al.*, 2021). Perubahan-perubahan ini berkontribusi pada peningkatan nilai kalor rumput laut pada suhu karbonisasi 300°C. Pada suhu karbonisasi 400°C dan 500°C, nilai kalor menurun, disebabkan oleh dekomposisi karbon dan peningkatan kadar abu. Hasil tersebut menunjukkan bahwa suhu karbonisasi 300°C merupakan suhu optimal untuk menghasilkan karbon rumput laut dengan nilai kalor tertinggi.



Gambar 2. Perubahan nilai kalor rumput laut sebelum dan setelah karbonisasi

Proksimat briket

Briket komposit batubara-rumput laut dibuat dengan memvariasikan rasio campuran (1:1, 5:3, dan 6:2) dan suhu karbonisasi rumput laut (300°C, 400°C, dan 500°C). Berdasarkan hasil analisis proksimat pada Gambar 3, campuran rumput laut dengan batubara menunjukkan peningkatan kualitas briket dibandingkan dengan batubara, terutama kadar air dan abu. Kadar air briket batubara (A) adalah 9,48%, sedangkan briket campuran menunjukkan kadar air yang lebih rendah, berkisar antara 4,16% hingga 9,36%. Penurunan kadar air disebabkan oleh proses karbonisasi rumput laut yang menghilangkan sebagian besar air dalam biomassa. Selain itu, penambahan kar-

bon rumput laut meningkatkan porositas briket, sehingga mempercepat penguapan air selama proses pengeringan. Kadar abu briket campuran juga lebih rendah dibandingkan dengan briket batubara. Kadar abu briket batubara adalah 34,05%, sementara briket campuran memiliki kadar abu berkisar antara 21,22%-29,46%. Pencampuran batubara dengan karbon rumput laut, yang memiliki Kadar abu lebih rendah, menghasilkan briket dengan kadar abu yang lebih rendah pula. Meskipun karbonisasi meningkatkan kadar abu pada rumput laut, pencampuran dengan batubara pada rasio tertentu dapat menghasilkan briket dengan kadar abu yang lebih rendah.

Selama proses karbonisasi pada suhu tinggi (500°C), terjadi pengurangan kadar zat volatil dan peningkatan Kadar karbon tetap. Meskipun ada peningkatan pada beberapa parameter, sebagian besar sampel masih belum memenuhi standar SNI, terutama kadar karbon tetap yang hanya mencapai sekitar 24% dari 77% yang dipersyaratkan. Peningkatan suhu karbonisasi berpengaruh terhadap pengu-

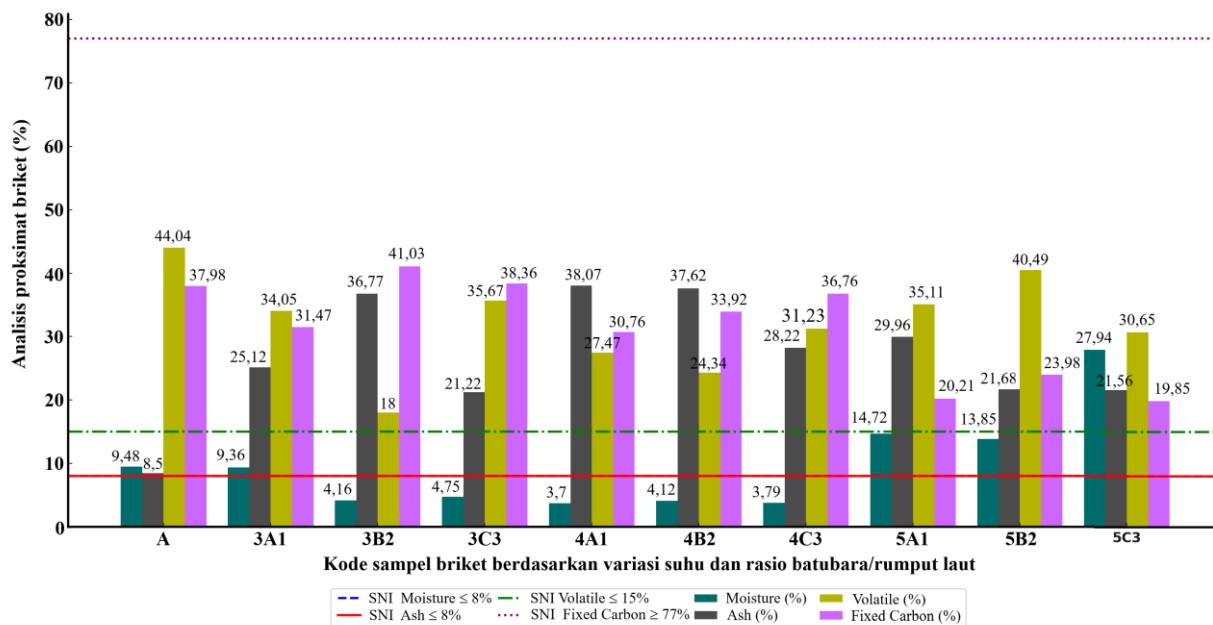
rangan zat volatil dan kelembapan, dan meningkatkan kadar abu yang dapat menurunkan kualitas briket (Moloeznik Paniagua *et al.*, 2024).

Kadar karbon tetap yang tidak memenuhi standar juga menunjukkan bahwa meskipun karbonisasi dapat memperbaiki beberapa kualitas briket, masih diperlukan optimasi suhu karbonisasi dan rasio campuran untuk mencapai hasil yang sesuai dengan standar SNI.

Nilai kalor briket

Nilai kalor briket merupakan salah satu parameter yang menentukan kualitas bahan bakar. Gambar 4 menampilkan nilai kalor (kal/g) dari sampel briket yang dihasilkan dari variasi suhu karbonisasi rumput laut dan rasio campuran batubara.

Dampak karbonisasi rumput laut pada suhu 300°C dan 400°C menunjukkan peningkatan nilai kalor. Hal ini disebabkan oleh degradasi termal senyawa organik pada suhu tersebut, sehingga menghasilkan biochar dengan nilai kalor yang lebih tinggi (Hung *et al.*, 2021).



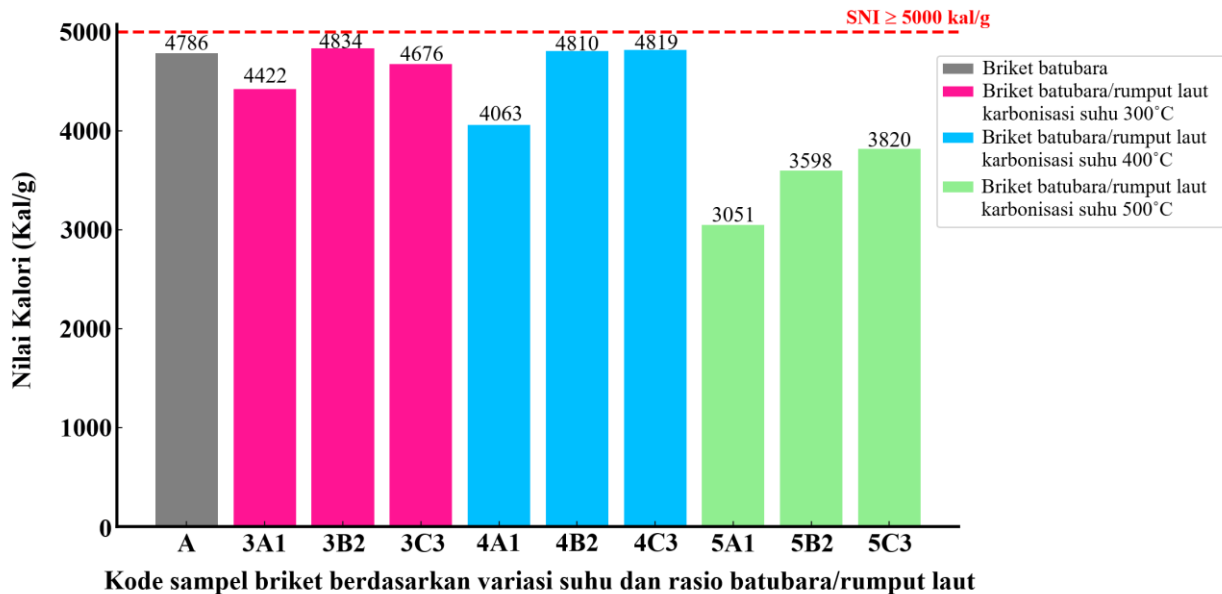
Gambar 3. Perbandingan komposisi proksimat briket batubara/rumput laut terhadap standar SNI

Keterangan: A (Briket batubara), 3A1 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 300°C, rasio 1:1); 3B2 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 300°C, rasio 5:3); 3C3 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 300°C, rasio 6:2); 4A1 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 400°C, rasio 1:1); 4B2 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 400°C, rasio 5:3); 4C3 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 400°C, rasio 6:2); 5A1 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 500°C, rasio 1:1); 5B2 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 500°C, rasio 5:3); 5C3 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 500°C, rasio 6:2);

Peningkatan suhu karbonisasi hingga 500°C menyebabkan dekomposisi senyawa organik dan peningkatan kadar abu, sehingga menurunkan nilai kalor. Najib *et al.*, (2021) dan Patel *et al.*, (2021) juga melaporkan hal serupa pada biomassa lain, di mana nilai kalor menurun setelah karbonisasi pada suhu di atas 400°C.

Rasio pencampuran batubara dan rumput laut yang telah dikarbonisasi juga berpengaruh

terhadap nilai kalor yang dihasilkan. Briket dengan rasio batubara dan karbon rumput laut 5:3 yang dikarbonisasi pada suhu 300°C (3B2) menunjukkan nilai kalor tertinggi (4834 kal/g). Sampel briket yang diuji menunjukkan nilai kalor di bawah standar SNI (5000 kal/g), meskipun beberapa diantaranya mendekati nilai tersebut.



Gambar 4. Perbandingan nilai kalori briket dengan standar SNI berdasarkan suhu karbonisasi rumput laut dan briket rasio batubara/rumput laut

Keterangan: A (Briket batubara), 3A1 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 300°C, rasio 1:1); 3B2 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 300°C, rasio 5:3); 3C3 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 300°C, rasio 6:2); 4A1 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 400°C, rasio 1:1); 4B2 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 400°C, rasio 5:3); 4C3 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 400°C, rasio 6:2); 5A1 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 500°C, rasio 1:1); 5B2 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 500°C, rasio 5:3); 5C3 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 500°C, rasio 6:2);

Kepadatan briket

Kepadatan briket merupakan parameter yang mempengaruhi kinerja pembakaran, stabilitas, serta kemudahan penanganan selama penyimpanan dan transportasi (Wilczyński *et al.*, 2021; Obi *et al.*, 2022). Gambar 5 menyajikan kepadatan briket yang dihasilkan dari variasi suhu karbonisasi rumput laut dan rasio campuran batubara.

Pengujian kepadatan briket pada berbagai kondisi suhu karbonisasi dan rasio campuran antara karbon batubara dengan karbon rumput laut. Berdasarkan hasil pengujian, kepadatan

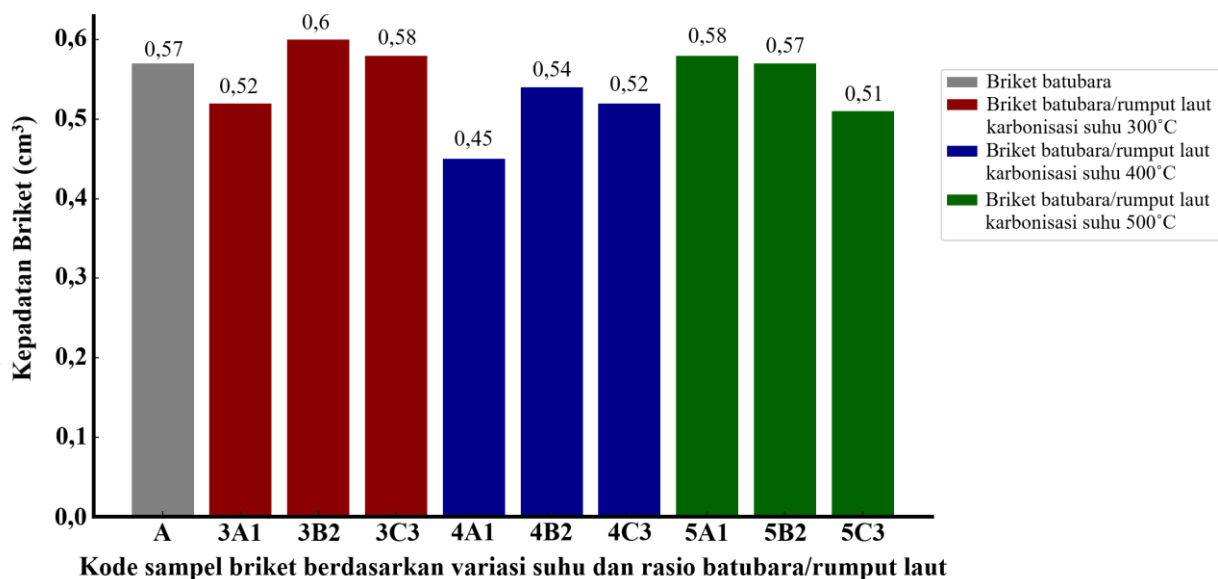
briket bervariasi dari 0,45-0,60 cm³, tergantung pada kondisi proses yang diterapkan. Hasil ini menunjukkan adanya hubungan antara kondisi suhu karbonisasi dan rasio pencampuran terhadap kepadatan dari briket yang dihasilkan.

Briket dengan suhu karbonisasi lebih tinggi (500°C) menunjukkan kepadatan yang relatif tinggi, sedangkan pada suhu karbonisasi yang lebih rendah (400°C), kepadatan briket cenderung lebih rendah. Hal ini menandakan bahwa suhu karbonisasi berperan mempengaruhi sifat fisik dari bahan baku, khususnya

pada proses dekomposisi termal dan penghilangan komponen volatil, yang memengaruhi kepadatan briket. Pada suhu 300°C, pelepasan awal komponen volatil menyebabkan peningkatan kepadatan bahan. Peningkatan terjadi karena partikel-partikel penyusun briket berikatan setelah sebagian zat volatil dilepaskan. Namun, pada suhu 400°C, redistribusi bahan mulai terjadi, dengan penghilangan komponen volatil yang lebih lanjut tetapi tanpa peningkatan kepadatan. Di suhu 500°C, struktur bahan menjadi lebih stabil dan terkompresi, karena penghilangan hampir seluruh komponen volatil yang tersisa, menghasilkan kepadatan yang lebih tinggi lagi. Dalam penelitian De Girolamo *et al.*, 2018 melaporkan volatil yang dilepaskan pada suhu rendah meningkatkan kerapatan material, sementara redistribusi material terjadi pada suhu yang lebih tinggi. Lebih lanjut Liu *et al.*, 2018 membahas perubahan kepadatan briket saat suhu meningkat dari 300°C hingga 500°C. Pelepasan komponen volatil pada suhu rendah

meningkatkan kepadatan, sedangkan stabilisasi struktur terjadi pada suhu yang lebih tinggi.

Sementara itu, pengaruh rasio campuran juga menentukan kualitas briket. Rasio pencampuran batubara:rumput laut yang lebih tinggi, pada sampel 3B2 (5:3), menghasilkan briket dengan kepadatan lebih tinggi dibandingkan dengan rasio yang lebih rendah. Hal ini disebabkan oleh peningkatan jumlah bahan batubara, yang memiliki kepadatan lebih tinggi dibandingkan dengan karbon rumput laut (Narzary and Das, 2022), sehingga menghasilkan briket dengan porositas lebih rendah dan kepadatan lebih tinggi. Sebaliknya, pada rasio pencampuran yang lebih rendah (1:1), briket menunjukkan kepadatan yang lebih rendah, seperti pada sampel 4A1. Sifat karbon rumput laut yang cenderung lebih porous dan ringan dibandingkan dengan batubara, sehingga menghasilkan briket dengan densitas yang lebih rendah (Narzary and Das, 2022; Obi *et al.*, 2022).



Gambar 5. Pengaruh variasi suhu karbonisasi rumput laut dan briket rasio batubara/rumput laut terhadap kepadatan briket

Keterangan: A (Briket batubara), 3A1 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 300°C, rasio 1:1); 3B2 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 300°C, rasio 5:3); 3C3 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 300°C, rasio 6:2); 4A1 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 400°C, rasio 1:1); 4B2 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 400°C, rasio 5:3); 4C3 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 400°C, rasio 6:2); 5A1 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 500°C, rasio 1:1); 5B2 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 500°C, rasio 5:3); 5C3 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 500°C, rasio 6:2);

Uji Nyala Briket

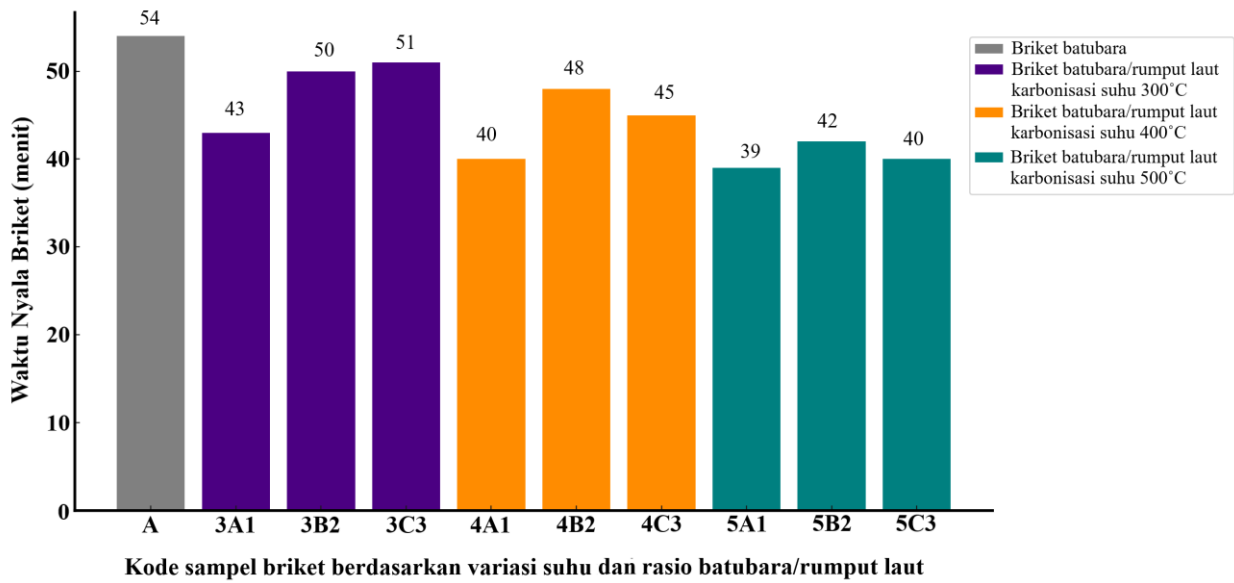
Uji nyala briket dilakukan untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan briket untuk ter-

bakar sempurna hingga menyisakan abu (Osei Bonsu *et al.*, 2020). Gambar 6 menyajikan waktu nyala (menit) dari sampel briket yang

dihasilkan dari variasi suhu karbonisasi rumput laut dan rasio campuran batubara.

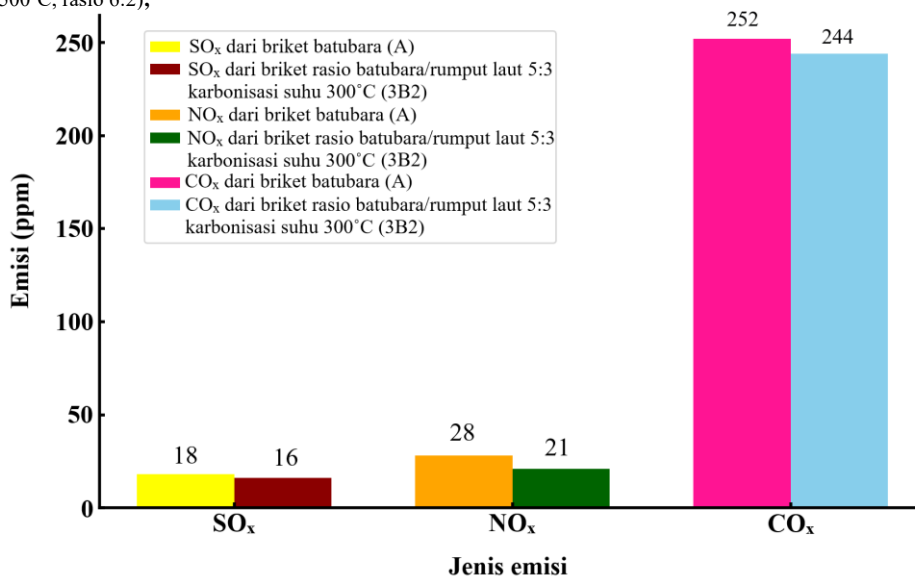
Hasil uji nyala menunjukkan bahwa baik suhu karbonisasi maupun rasio pencampuran batubara dan rumput laut mempengaruhi lama waktu pembakaran briket. Briket batubara (kontrol) memiliki durasi nyala terlama (54 menit), diikuti oleh campuran dengan proporsi batubara yang lebih tinggi. Untuk briket

dengan campuran karbon rumput laut pada suhu karbonisasi 300°C (kode 3A1, 3B2, 3C3), terdapat penurunan waktu nyala hingga kisaran 43-51 menit. Pada suhu 400°C (kode 4A1, 4B2, 4C3) menunjukkan waktu nyala yang lebih rendah di kisaran 40-48 menit. Sedangkan pada suhu 500°C (kode 5A1, 5B2, 5C3) memiliki waktu nyala di kisaran 39-42 menit.



Gambar 6. Pengaruh variasi suhu karbonisasi rumput laut dan briket rasio batubara/rumput laut terhadap waktu nyala briket

Keterangan: A (Briket batubara), 3A1 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 300°C, rasio 1:1); 3B2 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 300°C, rasio 5:3); 3C3 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 300°C, rasio 6:2); 4A1 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 400°C, rasio 1:1); 4B2 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 400°C, rasio 5:3); 4C3 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 400°C, rasio 6:2); 5A1 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 500°C, rasio 1:1); 5B2 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 500°C, rasio 5:3); 5C3 (Briket batubara/rumput laut karbonisasi suhu 500°C, rasio 6:2);



Gambar 7. Perbandingan emisi gas SO_x, NO_x, dan CO_x dari briket batubara (A) dan briket rasio batubara/rumput laut 5:3 (3B2)

Briket campuran menunjukkan waktu nyala yang lebih singkat dibandingkan dengan briket A. Karbonisasi pada suhu 300°C umumnya menghasilkan waktu nyala yang lebih baik dibandingkan dengan suhu yang lebih tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan degradasi material organik sehingga mengurangi jumlah zat volatile (Guo *et al.*, 2020; Waheed and Akogun, 2021; Kipngetch *et al.*, 2023). Rasio campuran batubara dan karbon rumput laut juga mempengaruhi waktu nyala briket. Briket dengan rasio batubara yang lebih tinggi cenderung memiliki waktu nyala yang lebih lama. Hal ini disebabkan oleh Kadar energi yang lebih tinggi pada batubara dibandingkan dengan karbon rumput laut Amrullah *et al.*, (2020).

Uji Emisi Briket

Uji emisi briket dilakukan untuk mengukur tingkat pelepasan gas-gas polutan seperti sulfur oksida (SO_x), nitrogen oksida (NO_x), dan karbon oksida (CO_x) yang dihasilkan selama pembakaran briket. Hasil pengujian (Gambar 7) menunjukkan bahwa emisi SO_x dari briket A (briket batubara) dan Sampel 3B2 (briket campuran batubara dan rumput laut yang telah dikarbonisasi pada suhu 300°C dengan rasio 5:3) masing-masing sebesar 18 ppm dan 16 ppm. Hal ini menunjukkan penurunan emisi SO_x sebesar 11,11% pada briket campuran dibandingkan dengan briket batubara murni. Penurunan ini disebabkan oleh kandungan sulfur yang lebih rendah pada rumput laut dibandingkan dengan batubara (Olsson *et al.*, 2020).

Emisi NO_x dari briket A menghasilkan 28 ppm, sedangkan briket B menghasilkan 21 ppm. Penurunan emisi NO_x sebesar 25% pada briket campuran dibandingkan dengan briket batubara. Perbedaan ini menunjukkan adanya pengaruh suhu karbonisasi dan rasio campuran bahan baku terhadap proses pembakaran. Nitrogen oksida terbentuk pada suhu tinggi selama pembakaran, sehingga briket yang dihasilkan pada suhu karbonisasi lebih rendah cenderung menghasilkan emisi NO_x yang lebih rendah (Gálvez *et al.*, 2010; Riaza *et al.*, 2019; Guo *et al.*, 2020). Hal ini menunjukkan bahwa

optimasi suhu karbonisasi berperan dalam menekan pembentukan gas NO_x yang berbahaya. Selain itu, Kadar nitrogen dalam biomassa relatif lebih rendah dibandingkan batubara, yang juga berkontribusi terhadap penurunan emisi NO_x (Mladenović *et al.*, 2016).

Sementara itu, emisi CO_x menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan SO_x dan NO_x, dengan briket A menghasilkan 252 ppm dan briket 3B2 244 ppm. Tingginya emisi CO_x pada kedua jenis briket dapat disebabkan oleh proses pembakaran yang belum sempurna, menghasilkan karbon monoksida (CO) dalam jumlah signifikan (Martens *et al.*, 2021; Liang and Liu, 2023). Meskipun perbedaan antara kedua briket kecil, yang menunjukkan penurunan emisi sebesar 3,17%. Hasil yang diperoleh mengindikasikan bahwa peningkatan rasio campuran atau suhu karbonisasi yang lebih tinggi dapat membantu meningkatkan efisiensi pembakaran dan mengurangi emisi CO_x.

KESIMPULAN

Pemanfaatan limbah batubara sub-bituminus dan karbonisasi rumput laut berpotensi dalam menghasilkan bahan bakar alternatif yang lebih ramah lingkungan. Briket dengan suhu karbonisasi 300°C dan rasio batubara terhadap karbon rumput laut 5:3 (kode 3B2) memiliki nilai kalor sebesar 4834 cal/g, kepadatan 0,6 g/cm³, dan waktu nyala selama 50 menit. Kombinasi briket 3B2 menunjukkan penurunan emisi SO_x sebesar 11,11%, NO_x sebesar 25%, dan CO_x sebesar 3,17% dibandingkan dengan briket batubara (A), sehingga berkontribusi dalam mitigasi dampak lingkungan akibat penggunaan bahan bakar fosil. Kadar karbon tetap yang dihasilkan masih berada di bawah standar yang disyaratkan, sehingga diperlukan optimasi rasio campuran dan proses karbonisasi untuk meningkatkan kualitas briket agar dapat memenuhi standar baku sebagai sumber energi alternatif yang berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

(IPCC), I. P. on C. C. (2019). Covariance Structure Analysis Of Health-Related

- Indicators In Home-Dwelling Elderly, Focusing On Subjective Health Perception. Pertama. Edited by IP on CC (IPCC). Geneva, Switzerland. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Amrullah, A., Syarief, A. and Saifudin, M. (2020). Combustion Behavior of Fuel Briquettes Made from Ulin Wood and Gelam Wood Residues. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 33(11): 2365–2371. <https://doi.org/10.5829/ije.2020.33.11b.27>.
- ASTM D3173 – 11. (2011). Standard Test Method For Moisture In The Analysis Sample Of Coal And Coke. *ASTM International*, West Conshohocken, PA. . <https://doi.org/10.1520/D3173-11.2>.
- ASTMD3174–12. (2018). Standard Test Method For Ash In The Analysis Sample Of Coal And Coke From Coal *ASTM International*, West Conshohocken, PA. . <https://doi.org/10.1520/D3174-12.10.1520/D3174-12R18.2>.
- ASTMD3175–11. (2011). Standard Test Method For Volatile Matter In The Analysis Sample Of Coal And Coke *West Conshohocken, PA: ASTM International*. . <https://doi.org/10.1520/C1709-18>.
- ASTMD5865–12. (2012). Standard Test Method For Gross Calorific Value Of Coal And Coke *ASTM International*, West Conshohocken, PA. . <https://doi.org/10.1520/C1709-18>.
- Basyuni, M., Puspita, M., Rahmania, R., Albasri, H., Pratama, I., Purbani, D., Aznawi, A. A., Mubaraq, A., Al Mustaniroh, S. S., Menne, F., Rahmila, Y. I., Salmo, S. G., Susilowati, A., Larekeng, S. H., Ardli, E. and Kajita, T. (2024). Current biodiversity status, distribution, and prospects of seaweed in Indonesia: A systematic review. *Heliyon*. 10(10): e31073. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31073>.
- Climate, T. (2021). Laporan Climate Transparency : Indonesia-Comparing G20 Climate Action. *Climate Transparency Report*. 1–20.
- Fan, Y., Xia, W. and Zhang, L. (2023). The Change of Global Temperature Affected by Global Economy. *Highlights in Science, Engineering and Technology*. 48: 17–36. <https://doi.org/10.54097/hset.v48i.8228>.
- Fawzy, S., Osman, A. I., Doran, J. and Rooney, D. W. (2020). Strategies for mitigation of climate change: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 18(6): 2069–2094. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01059-w>.
- Gálvez, M. E., Boyano, A., Moliner, R. and Lázaro, M. J. (2010). Low-cost carbon-based briquettes for the reduction of NO emissions: Optimal preparation procedure and influence in operating conditions. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 88(1): 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2010.02.01>.
- De Girolamo, A., Tan, V., Liu, Z. and Zhang, L. (2018). Pyrolysis of a lignite briquette – Experimental investigation and 1-dimensional modelling approach. *Fuel*. 212(April 2017): 533–545. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.02>.
- Guo, Z., Wu, J., Zhang, Y., Wang, F., Guo, Y., Chen, K. and Liu, H. (2020). Characteristics of biomass charcoal briquettes and pollutant emission reduction for sulfur and nitrogen during combustion. *Fuel*. 272(March): 117632. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117632>.
- Hasnanto, H. and Setiawan, H. (2024). Analisis Perhitungan Emisi Karbon Dalam Perdagangan listrik Listrik di PLTU 2×300 MW. *JURNAL ILMIAH SUTET*. 14(1): 65–75. Available at: <https://doi.org/10.33322/sutet.v14i1.2287>.
- Haykiri-Acma, H., Yaman, S. and Kucukbayrak, S. (2013). Production of biobriquettes from carbonized brown seaweed. *Fuel Processing Technology*. 106: 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.06.014>.
- Hudaya, G. K. and Madiutomo, N. (2019). The availability of Indonesian coal to meet the 2050 demand. *Indonesian Mining Journal*. 22(2): 107–128. <https://doi.org/10.30556/imj.vol22.no2.2019.689>.
- Hung, C. M., Huang, C. P., Cheng, J. W., Chen, C. W. and Dong, C. Di. (2021).

- Production and characterization of a high value-added seaweed-derived biochar: Optimization of pyrolysis conditions and evaluation for sediment treatment. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 155(105071): 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105071>.
- International Energy Agency (IEA). (2022). Global CO₂ emissions rebounded to their highest level in history in 2021. *Global Energy Review: CO₂ Emissions in 2021*. 1–3. Available at: <https://www.iea.org/news/global-co2-emissions-rebounded-to-their-highest-level-in-history-in-2021>.
- Kalak, T. (2023). Potential Use of Industrial Biomass Waste as a Sustainable. *Energies*. 16(1783): 1–25.
- Khan, N., Sudhakar, K. and Mamat, R. (2022). Thermogravimetric Analysis of Marine Macroalgae Waste Biomass as Bio-Renewable Fuel. *Journal of Chemistry*. 2022: 1–9. <https://doi.org/10.1155/2022/6417326>.
- Kipngetich, P., Kiplimo, R., Tanui, J. K. and Chisale, P. (2023). Effects of carbonization on the combustion of rice husks briquettes in a fixed bed. *Cleaner Engineering and Technology*. 13(December 2022). <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100608>.
- Li, Y. (2023). The impact of global warming on polar marine life. *Theoretical and Natural Science*. 20(1): 251–256. <https://doi.org/10.54254/2753-8818/20/20230782>.
- Liang, B. and Liu, X. (2023). Decoupling combustion characteristics of biomass pellets and their mixture with bituminous briquettes. *Environmental Technology and Innovation*. 32: 103275. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103275>.
- Liu, Z., Adewuyi, Y. G., Shi, S., Chen, H., Li, Y., Liu, D. and Liu, Y. (2019). Removal of gaseous Hg⁰ using novel seaweed biomass-based activated carbon. *Chemical Engineering Journal*. 366: 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.025>.
- Lu, J., Li, Y., Wang, B. and Si, H. (2024). The development of hydrothermal carbonization process using seaweed-contained water as the reaction environment and analysis of its impact on adsorption. *Energy*. 313(May). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133916>.
- Martens, P., Czech, H., Tissari, J., Ihalainen, M., Suhonen, H., Sklorz, M., Jokiniemi, J., Sippula, O. and Zimmermann, R. (2021). Emissions of Gases and Volatile Organic Compounds from Residential Heating: A Comparison of Brown Coal Briquettes and Logwood Combustion. *Energy and Fuels*. 35(17): 14010–14022. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c01667>.
- Milica R. Mladenović, Dragoljub V. Dakić, Stevan Đ. Nemoda, Milijana J. Paprika, M. S. K. and Branislav S. Repić, A. M. E. (2016). The combustion of biomass – The impact of its types and combustion technologies on the emission of nitrogen oxide. *Hemijska industrija*. 70(3): 287–298. <https://doi.org/10.2298/HEMIND150409033M>.
- Ministry of Energy and Mineral Resources - Republic of Indonesia. (2021). Report Of EITI Indonesia 2019-2020. Available at: [https://eiti.org/sites/default/files/2022-07/Report of EITI Indonesia 2019 - 2020.pdf](https://eiti.org/sites/default/files/2022-07/Report%20of%20EITI%20Indonesia%202019%20-%202020.pdf).
- Moloeznik Paniagua, D., Krenz, L. M. M., Libra, J. A., Korf, N. and Rotter, V. S. (2024). Towards a high-quality fertilizer based on algae residues treated via hydrothermal carbonization. Trends on how process parameters influence inorganics. *Biochar*. 6(1): 1–25. <https://doi.org/10.1007/s42773-024-00357-8>.
- Monteiro, E. and Ferreira, S. (2022). Biomass Waste for Energy Production. *Energies*. 15(16): 1–5. <https://doi.org/10.3390/en15165943>.
- Najib, S. S. A. M., Ganesan, M. A., Rashid, M. N., Sokri, M. N. M., Zaini, N. and Nasri, N. (2021). Effect of Temperature on Calorific Value of Pyrolyzed Empty Fruit Bunch (Efb) Derived Biochar. *Journal of Earth and Environmental Sciences Research*. 3(1): 1–6. [https://doi.org/10.47363/jeesr/2021\(3\)13](https://doi.org/10.47363/jeesr/2021(3)13).

- Narzary, A. and Das, A. K. (2022). Study of effects of addition of charcoal and binder derived from taro on physiochemical properties of briquettes made from tree leaves. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 52(PB): 102119. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102119>.
- Nikiforov, A., Kinzhibekova, A., Prikhodko, E., Karmanov, A. and Nurkina, S. (2023). Analysis of the Characteristics of Bio-Coal Briquettes from Agricultural and Coal Industry Waste. *Energies*. 16(8). <https://doi.org/10.3390/en16083527>.
- Nurhalim, N., Cahyono, R. B. and Hidayat, M. (2018). Karakteristik Bio-Briket Berbahan Baku Batu Bara dan Batang/Ampas Tebu terhadap Kualitas dan Laju Pembakaran. *Jurnal Rekayasa Proses*. 12(1): 51. <https://doi.org/10.22146/jrekpros.35278>.
- Obi, O. F., Pecenka, R. and Clifford, M. J. (2022). A Review of Biomass Briquette Binders and Quality Parameters. *Energies*. 15(7): 1–22. <https://doi.org/10.3390/en15072426>.
- Olsson, J., Toth, G. B. and Albers, E. (2020). Biochemical composition of red, green and brown seaweeds on the Swedish west coast. *Journal of Applied Phycology*. 32(5): 3305–3317. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02145-w>.
- Ordonez, J. A., Jakob, M., Steckel, J. C. and Fünfgeld, A. (2021). Coal, power and coal-powered politics in Indonesia. *Environmental Science and Policy*. 123(May): 44–57. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.05.007>.
- Osei Bonsu, B., Takase, M. and Mantey, J. (2020). Preparation of charcoal briquette from palm kernel shells: case study in Ghana. *Heliyon*. 6(10): e05266. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05266>.
- Patel, N., Acharya, B. and Basu, P. (2021). Hydrothermal carbonization (Htc) of seaweed (macroalgae) for producing hydrochar. *Energies*. 14(7): 1–16. <https://doi.org/10.3390/en14071805>.
- Riaza, J., Mason, P., Jones, J. M., Gibbins, J. and Chalmers, H. (2019). High temperature volatile yield and nitrogen partitioning during pyrolysis of coal and biomass fuels. *Fuel*. 248: 215–220. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.07>.
- Soroush, S., Ronsse, F., Park, J. and Heynderickx, P. M. (2023). Comparison Study on the Water-to-Biomass Ratio in Hydrothermal Carbonization of Fresh Seaweed. *Processes*. 11(4). <https://doi.org/10.3390/pr11041123>.
- Soroush, S., Ronsse, F., Verberckmoes, A., Verpoort, F., Park, J., Wu, D. and Heynderickx, P. M. (2024). Production of solid hydrochar from waste seaweed by hydrothermal carbonization: effect of process variables. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 14(1): 183–197. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02365-9>.
- Stiger-Pouvreau, V., Bourgougnon, N. and Deslandes, E. (2016). Carbohydrates From Seaweeds *Seaweed in Health and Disease Prevention*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802772-1.00008-7>.
- Waheed, M. A. and Akogun, O. A. (2021). Quality enhancement of fuel briquette from cornhusk and cassava peel blends for co-firing in coal thermal plant. *International Journal of Energy Research*. 45(2): 1867–1878. <https://doi.org/10.1002/er.5865>.
- Wang, S., Hu, Y., He, Z., Wang, Q. and Xu, S. (2017). Study of pyrolytic mechanisms of seaweed based on different components (soluble polysaccharides, proteins, and ash). *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 9(2). <https://doi.org/10.1063/1.4978345>.
- Wilczyński, D., Berdychowski, M., Talaśka, K. and Wojtkowiak, D. (2021). Experimental and numerical analysis of the effect of compaction conditions on briquette properties. *Fuel*. 288(May 2020). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119613>.
- Yong, W. T. L., Thien, V. Y., Rupert, R. and Rodrigues, K. F. (2022). Seaweed: A potential climate change solution. *Renewable and Sustainable Energy*

Reviews. 159(September 2021): 1–13.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.11222>
2.

Yudiarsono, Y., Windarta, J. and Adiarso, A.
(2023). Sustainable Long-Term Energy
Supply and Demand: The Gradual
Transition to a New and Renewable
Energy System in Indonesia by 2050.
International Journal of Renewable

Energy Development. 12(2): 419–429.
<https://doi.org/10.14710/ijred.2023.5036>.

Zhao, Y., Bourgougnon, N., Lanoisellé, J. L.
and Lendormi, T. (2022). Biofuel
Production from Seaweeds: A
Comprehensive Review. *Energies*.
15(24): 1–34. <https://doi.org/10.3390/en15249395>.