

Analisis Mutu Batubara sebagai Bahan Bakar Berdasarkan Karakteristik Abu, Densitas Relatif dan Logam Berat

Syamsul Alam*, Ismail Marzuki*, Andi Irsyam Mansyur

Program Studi Teknik Kimia, Universitas Fajar, Makassar

*Koresponden email: syamsulalam6925@gmail.com, ismailmz@unifa.ac.id

Diterima: 17 April 2026

Disetujui: 22 April 2026

Abstract

Coal is one of the main energy sources widely used in the industrial and power generation sectors due to its high calorific value and abundant availability. The problem in this study is how the quality of coal as a fuel is based on the characteristics of ash, relative density, and heavy metal content. This study aims to analyze coal quality based on these parameters. The research method was carried out by taking coal samples from four different locations, then conducting sample preparation in the form of drying, crushing, and sieving. The analysis included testing the relative density, ash characteristics and Ash Fusion Temperature (AFT), and heavy metal content using the Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) method. The results showed that the relative density of coal was in the range of 1.28–1.42 which still met the standards as a fuel. The characteristics of the ash showed variations in composition, where Location B had the best quality with a high SiO₂ content (45.60%) and good resistance to slagging, while Location C had the lowest quality with a low AFT value (1140°C) and high alkali and SO₃ content. Heavy metal content, including arsenic (1.51–1.76 ppm) and mercury (0.02–0.03 ppm), remained below environmental quality standards. Overall, all coal samples were suitable for use as fuel, but differences in ash characteristics affected combustion performance and potential environmental impacts.

Keywords: coal quality, ash characteristics, relative density, heavy metals

Abstrak

Batubara merupakan salah satu sumber energi utama yang banyak digunakan pada sektor industri dan pembangkit listrik karena memiliki nilai kalor tinggi dan ketersediaan yang melimpah. Permasalahan dalam penelitian ini adalah bagaimana mutu batubara sebagai bahan bakar berdasarkan karakteristik abu, densitas relatif, dan kandungan logam berat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis mutu batubara berdasarkan parameter tersebut. Metode penelitian dilakukan melalui pengambilan sampel batubara dari empat lokasi berbeda, kemudian dilakukan preparasi sampel berupa pengeringan, penghancuran, dan pengayakan. Analisis meliputi pengujian densitas relatif, karakteristik abu dan *Ash Fusion Temperature* (AFT) serta kandungan logam berat menggunakan metode *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS). Hasil penelitian menunjukkan bahwa densitas relatif batubara berada pada kisaran 1,28–1,42 yang masih memenuhi standar sebagai bahan bakar. Karakteristik abu menunjukkan variasi komposisi, di mana Lokasi B memiliki kualitas terbaik dengan kandungan SiO₂ tinggi (45,60%) dan ketahanan terhadap slagging yang baik, sedangkan Lokasi C memiliki kualitas terendah dengan nilai AFT rendah (1140°C) serta kandungan alkali dan SO₃ yang tinggi. Kandungan logam berat berupa arsenik (1,51–1,76 ppm) dan merkuri (0,02–0,03 ppm) masih berada di bawah baku mutu lingkungan. Secara keseluruhan, seluruh sampel batubara layak digunakan sebagai bahan bakar namun perbedaan karakteristik abu mempengaruhi performa pembakaran dan potensi dampak lingkungan.

Kata Kunci: kualitas batubara, karakteristik abu, densitas relatif, logam berat

1. Pendahuluan

Batubara merupakan salah satu sumber energi utama yang banyak digunakan pada berbagai sektor industri, terutama pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), industri semen, serta berbagai proses industri berbasis panas [1]. Pemanfaatan batubara sebagai bahan bakar didasarkan pada kandungan energi yang tinggi serta ketersediaannya yang relatif melimpah. Namun demikian, kualitas batubara sangat bervariasi tergantung pada kondisi geologi, proses pembentukan, serta kandungan mineral yang terdapat di dalamnya. Variasi kualitas tersebut dapat mempengaruhi kinerja proses pembakaran, efisiensi energi, serta potensi dampak lingkungan yang dihasilkan [2].

Salah satu parameter penting dalam penentuan mutu batubara adalah karakteristik abu yang merupakan residu anorganik tersisa setelah proses pembakaran batubara. Kandungan dan komposisi abu

dapat mempengaruhi efisiensi pembakaran serta potensi terbentuknya kerak (*slagging*) dan pengendapan (*fouling*) pada peralatan pembakaran seperti *boiler* [3]. Kandungan abu yang tinggi umumnya dapat menurunkan nilai kalor batubara dan meningkatkan potensi gangguan operasional pada sistem pembakaran. Selain itu, komposisi mineral pada abu juga dapat menjadi indikator keberadaan unsur logam tertentu yang berpotensi mencemari lingkungan [4].

Parameter lain yang sering digunakan dalam evaluasi mutu batubara adalah densitas relatif. Densitas relatif atau berat jenis batubara berkaitan dengan komposisi mineral serta kandungan bahan organik di dalamnya [5]. Batubara dengan densitas relatif yang lebih tinggi umumnya memiliki kandungan mineral anorganik yang lebih besar, sehingga dapat mempengaruhi kualitas pembakaran dan jumlah residu abu yang dihasilkan. Analisis densitas relatif juga penting dalam proses pemisahan batubara pada tahap pengolahan (*coal preparation*), karena dapat membantu mengidentifikasi fraksi batubara dengan kualitas yang lebih baik [6].

Selain karakteristik abu dan densitas relatif, keberadaan logam berat dalam batubara juga menjadi perhatian penting dalam analisis mutu batubara [7]. Logam berat seperti besi (Fe), timbal (Pb), kadmium (Cd), dan merkuri (Hg) dapat terkandung secara alami dalam batubara akibat proses geokimia selama pembentukannya. Ketika batubara dibakar, sebagian logam berat tersebut dapat terlepas ke lingkungan melalui emisi gas buang atau terakumulasi pada residu abu. Oleh karena itu, analisis kandungan logam berat pada batubara diperlukan untuk mengetahui potensi dampak lingkungan yang mungkin timbul dari proses pembakaran [8].

Berdasarkan hal tersebut, analisis mutu batubara berdasarkan karakteristik abu, densitas relatif, dan kandungan logam berat menjadi penting untuk dilakukan [9]. Analisis ini tidak hanya bertujuan untuk menentukan kualitas batubara sebagai bahan bakar, tetapi juga untuk memahami potensi pengaruhnya terhadap efisiensi proses pembakaran serta dampak lingkungan yang mungkin terjadi. Hasil analisis tersebut diharapkan dapat menjadi dasar dalam pemilihan dan pengelolaan batubara yang lebih efisien serta ramah lingkungan dalam berbagai aplikasi industri.

2. Metode Penelitian

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini direncanakan akan dilakukan kurang lebih selama 2 bulan dari bulan Maret – April 2026, di Laboratorium Geoservices Berau, Kalimantan Timur.

Bahan dan Alat

1. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sampel batubara yang. Selain itu digunakan pula bahan pendukung berupa air suling atau *aquades* untuk proses pembersihan alat, serta bahan kimia yang diperlukan dalam proses analisis logam berat apabila dilakukan pengujian laboratorium. Sampel batubara terlebih dahulu dipreparasi melalui proses pengeringan dan penghalusan hingga mencapai ukuran partikel tertentu agar diperoleh hasil analisis yang lebih akurat dan homogen.

2. Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi seperangkat alat preparasi sampel seperti alat penghancur (*crusher*), penggiling (*grinder*), ayakan (*sieve*) dan oven pengering untuk mengurangi kadar air pada sampel. Selain itu digunakan timbangan analitik untuk pengukuran massa sampel, piknometer atau alat pengukur berat jenis untuk menentukan *densitas relatif*, serta tanur (*furnace*) untuk menentukan karakteristik abu batubara melalui proses pembakaran pada suhu tertentu. Untuk analisis kandungan logam berat digunakan alat analisis laboratorium seperti *Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)* atau metode analisis lain yang sesuai.

Proses Penelitian

Proses penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan sebagai berikut:

1. Pengambilan Sampel Batubara

Sampel batubara diambil dari beberapa lokasi yang berbeda sebagai variasi variabel bebas dalam penelitian. Setiap sampel dari lokasi yang berbeda (lokasi A (2°10'40.9"N 117°34'43.8"E), lokasi B (2°11'03.8"N 117°26'50.5"E), lokasi C (2°02'27.8"N 117°40'57.2"E), lokasi D (2°13'01.5"N 117°36'16.1"E)) kemudian diberi label untuk memudahkan proses identifikasi selama analisis.

2. Preparasi Sampel

Sampel batubara yang telah diperoleh kemudian dibersihkan dari kotoran yang menempel, selanjutnya dikeringkan menggunakan oven untuk mengurangi kadar air. Setelah proses pengeringan, sampel dihancurkan menggunakan alat penghancur dan digiling hingga diperoleh ukuran partikel yang lebih seragam.

3. Penimbangan Sampel

Sampel batubara yang telah dipreparasi kemudian ditimbang menggunakan timbangan analitik dengan massa yang sama untuk setiap pengujian. Massa sampel dijaga tetap agar hasil analisis dari setiap lokasi dapat dibandingkan secara konsisten.

4. Analisis Karakteristik Abu

Sampel batubara yang telah ditimbang kemudian dibakar menggunakan tanur (*furnace*) pada suhu tinggi hingga seluruh komponen organik terbakar dan menyisakan residu berupa abu. Massa abu yang dihasilkan kemudian ditimbang untuk menentukan persentase kandungan abu pada masing-masing sampel batubara.

5. Pengujian *Densitas Relatif*

Sampel batubara selanjutnya dianalisis untuk menentukan nilai *densitas relatif* menggunakan metode pengukuran berat jenis seperti piknometer. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui hubungan antara massa dan volume batubara dari setiap lokasi sampel.

6. Analisis Kandungan Logam Berat

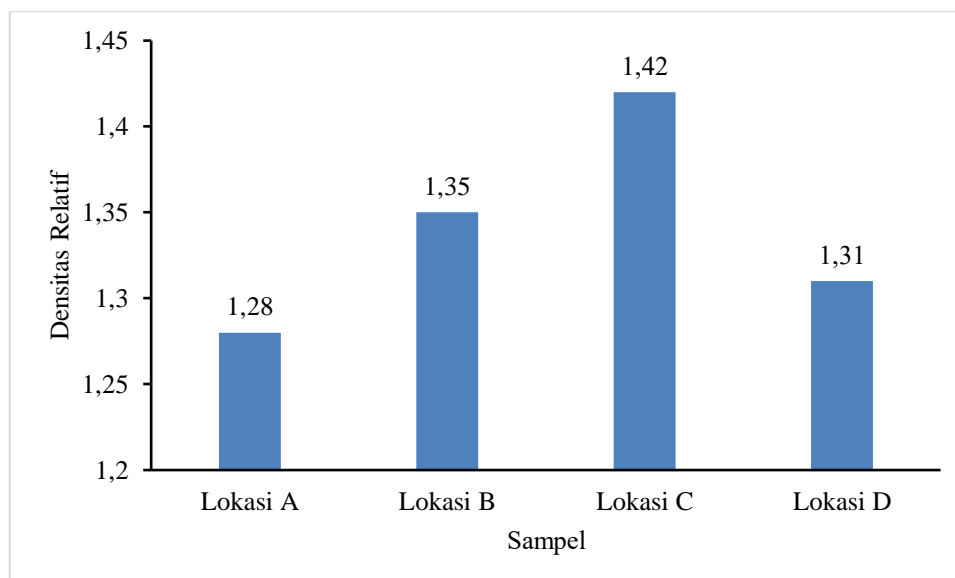
Sampel batubara kemudian dianalisis kandungan logam beratnya melalui proses preparasi kimia, seperti destruksi sampel menggunakan larutan kimia tertentu. Larutan hasil preparasi kemudian dianalisis menggunakan alat untuk menentukan konsentrasi logam berat yang terkandung dalam sampel.

7. Pengolahan dan Analisis Data

Data hasil pengujian karakteristik abu, nilai *densitas relatif*, dan kandungan logam berat dari setiap lokasi sampel kemudian dikumpulkan dan dianalisis. Hasil analisis digunakan untuk mengetahui perbedaan mutu batubara berdasarkan lokasi pengambilan sampel serta hubungannya dengan kualitas batubara sebagai bahan bakar.

3. Hasil dan Pembahasan

Evaluasi mutu batubara sebagai bahan bakar merupakan langkah penting dalam menjamin efisiensi energi dan pengendalian dampak lingkungan. Penilaian ini dilakukan melalui analisis beberapa parameter utama yang mencerminkan karakteristik batubara. Berikut adalah hasil analisisnya.



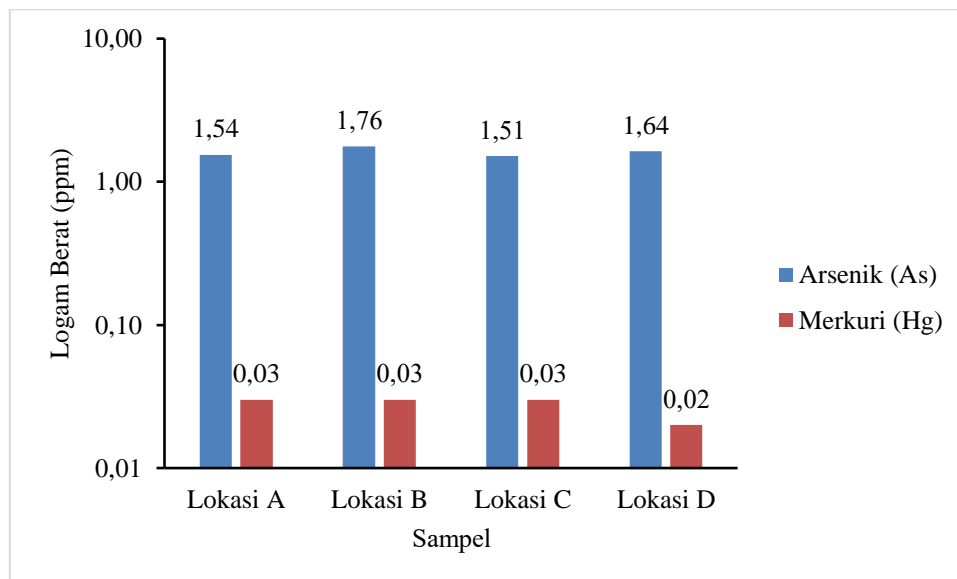
Gambar 1. Hasil Analisis Densitas Relatif

Berdasarkan grafik densitas relatif batubara pada Lokasi A, B, C, dan D, terlihat adanya variasi nilai densitas pada masing-masing sampel. Lokasi C menunjukkan nilai densitas relatif tertinggi yaitu sebesar 1,42, diikuti oleh Lokasi B (1,35), Lokasi D (1,31), dan yang terendah berada pada Lokasi A yaitu 1,28. Tingginya densitas relatif pada Lokasi C mengindikasikan bahwa batubara pada lokasi tersebut memiliki kandungan mineral anorganik atau abu yang lebih tinggi dibandingkan lokasi lainnya. Hal ini dapat

mempengaruhi kualitas batubara sebagai bahan bakar, karena semakin tinggi densitas relatif umumnya berkorelasi dengan meningkatnya kandungan pengotor yang dapat menurunkan efisiensi pembakaran [10].

Sebaliknya, batubara dari Lokasi A dengan densitas relatif paling rendah cenderung memiliki kandungan bahan organik yang lebih dominan dan kandungan mineral yang lebih sedikit. Kondisi ini biasanya lebih menguntungkan dalam proses pembakaran karena menghasilkan energi yang lebih efisien dan residu abu yang lebih rendah [11].

Perbedaan densitas relatif ini juga dapat dipengaruhi oleh faktor geologi, seperti tingkat pemadatan, umur pembentukan batubara, serta kondisi lingkungan pengendapan. Variasi tersebut menunjukkan bahwa karakteristik batubara pada setiap lokasi tidak seragam, sehingga diperlukan analisis lebih lanjut terhadap parameter lain seperti kandungan abu dan logam berat untuk mendapatkan gambaran mutu batubara secara menyeluruh [12]. Dengan demikian, densitas relatif dapat dijadikan sebagai salah satu indikator awal dalam menilai kualitas batubara, terutama dalam kaitannya dengan efisiensi penggunaan sebagai bahan bakar dan potensi dampak lingkungan yang ditimbulkan.



Gambar 2. Hasil Analisis Logam Berat

Berdasarkan grafik kandungan logam berat pada sampel batubara di Lokasi A, B, C, dan D, terlihat bahwa unsur Arsenik (As) memiliki konsentrasi yang lebih tinggi dibandingkan Merkuri (Hg) pada seluruh lokasi. Nilai Arsenik tertinggi terdapat pada Lokasi B sebesar 1,76 ppm, diikuti oleh Lokasi D (1,64 ppm), Lokasi A (1,54 ppm), dan Lokasi C (1,51 ppm). Sementara itu, kandungan Merkuri relatif rendah dan cenderung seragam, yaitu sebesar 0,03 ppm pada Lokasi A, B, dan C, serta sedikit lebih rendah pada Lokasi D yaitu 0,02 ppm [13].

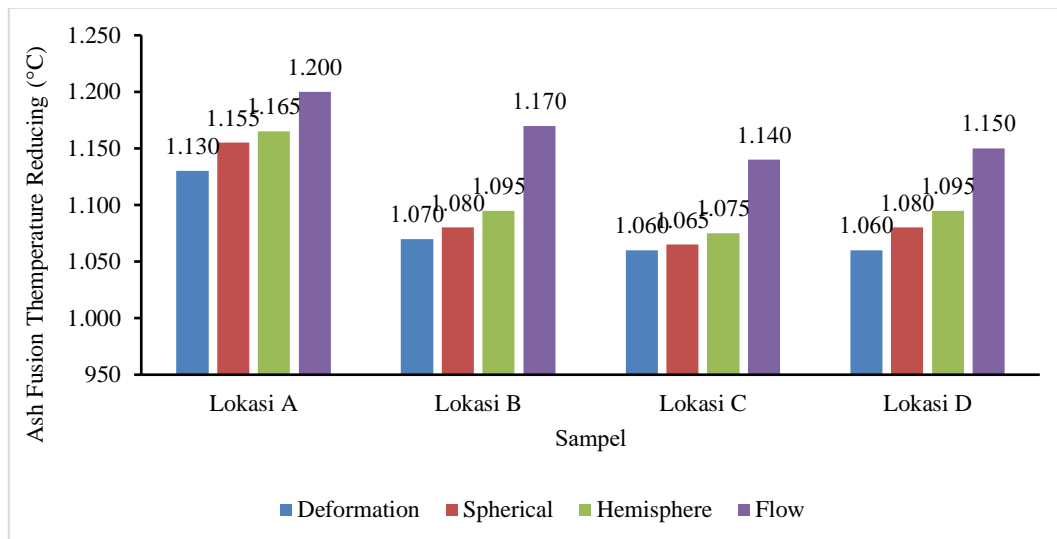
Tingginya kandungan Arsenik pada Lokasi B menunjukkan adanya potensi pencemaran yang lebih besar apabila batubara tersebut digunakan sebagai bahan bakar tanpa pengolahan yang memadai. Arsenik merupakan unsur beracun yang dapat terlepas ke lingkungan melalui proses pembakaran dan berpotensi mencemari udara, tanah, maupun air. Oleh karena itu, batubara dengan kandungan Arsenik tinggi perlu mendapat perhatian khusus dalam pengelolaannya.

Di sisi lain, kandungan Merkuri yang relatif rendah pada semua lokasi menunjukkan bahwa risiko pencemaran dari unsur ini lebih kecil dibandingkan Arsenik. Namun demikian, Merkuri tetap merupakan logam berat yang berbahaya karena bersifat toksik dan dapat terakumulasi dalam rantai makanan, sehingga keberadaannya tetap perlu diawasi [14]. Variasi kandungan logam berat ini dapat dipengaruhi oleh kondisi geologi daerah asal batubara, termasuk jenis batuan induk dan proses pembentukan batubara. Perbedaan ini menunjukkan bahwa setiap lokasi memiliki karakteristik kimia yang berbeda, yang dapat mempengaruhi mutu batubara serta dampak lingkungannya [6].

Dengan demikian, analisis kandungan logam berat menjadi parameter penting dalam evaluasi mutu batubara, tidak hanya dari segi kualitas pembakaran tetapi juga dari aspek lingkungan dan kesehatan. Penggunaan batubara dengan kandungan logam berat yang tinggi sebaiknya disertai dengan teknologi pengendalian emisi untuk meminimalkan dampak negatif yang ditimbulkan. Berdasarkan grafik *Ash Fusion Temperature* (AFT) pada empat lokasi sampel batubara, terlihat bahwa setiap sampel memiliki pola kenaikan suhu dari tahap deformasi (deformation), sferis (spherical), hemisfer (hemisphere), hingga alir

(flow). Hal ini menunjukkan bahwa abu batubara mengalami perubahan bentuk secara bertahap seiring dengan peningkatan suhu.

Lokasi A menunjukkan nilai AFT tertinggi dibandingkan lokasi lainnya, dengan suhu flow mencapai sekitar 1200°C. Nilai ini menunjukkan bahwa abu batubara pada lokasi tersebut memiliki titik leleh yang relatif tinggi, sehingga lebih tahan terhadap pembentukan slag (terak) selama proses pembakaran. Kondisi ini mengindikasikan kualitas batubara yang lebih baik dari segi operasional, karena risiko fouling dan slagging pada peralatan pembakaran lebih rendah [15].

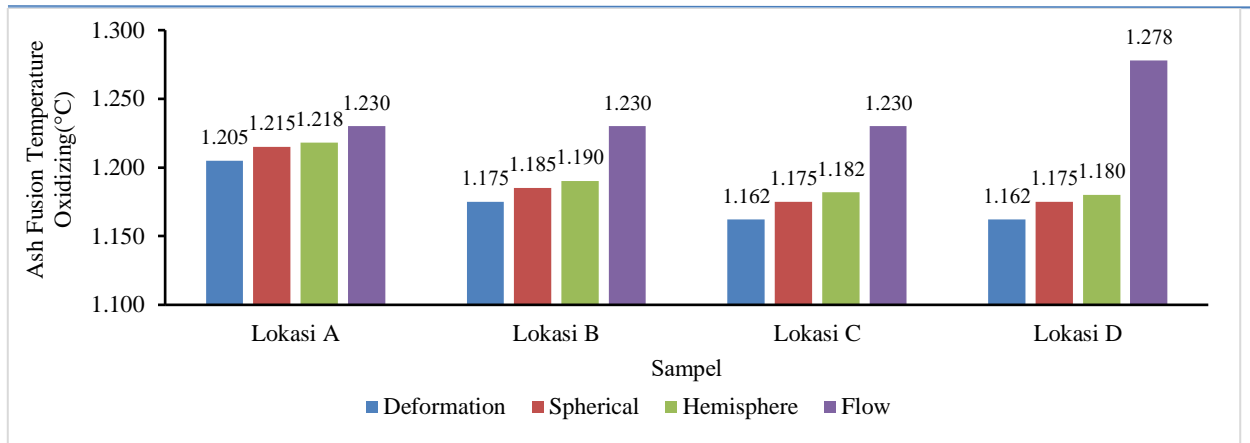


Gambar 3. Hasil Analisis *Ash Fusion Temperature Reducing*

Sebaliknya, Lokasi C memiliki nilai AFT terendah, dengan suhu flow sekitar 1140°C. Nilai ini menunjukkan bahwa abu batubara lebih mudah meleleh pada suhu yang lebih rendah, sehingga berpotensi lebih besar menyebabkan pembentukan slag selama proses pembakaran. Hal ini dapat menurunkan efisiensi sistem pembakaran dan meningkatkan kebutuhan perawatan peralatan. Lokasi B dan D menunjukkan nilai AFT yang berada di antara keduanya, dengan suhu flow masing-masing sekitar 1170°C dan 1150°C. Nilai ini menunjukkan karakteristik abu yang sedang, di mana potensi slagging masih ada tetapi tidak sebesar pada Lokasi C. Perbedaan nilai AFT ini dipengaruhi oleh komposisi kimia abu, terutama kandungan oksida seperti silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), serta oksida besi (Fe_2O_3) dan kalsium (CaO). Abu dengan kandungan silika dan alumina yang tinggi cenderung memiliki titik leleh lebih tinggi, sedangkan kandungan besi dan alkali dapat menurunkan titik leleh abu. Dengan demikian, analisis AFT sangat penting dalam evaluasi mutu batubara sebagai bahan bakar, khususnya dalam kaitannya dengan performa pembakaran dan potensi pembentukan slag. Batubara dengan nilai AFT tinggi lebih diinginkan karena memberikan kestabilan operasional yang lebih baik dan mengurangi risiko gangguan pada sistem pembakaran.

Berdasarkan grafik *Ash Fusion Temperature* (AFT) **Gambar 4** pada kondisi oksidasi, terlihat bahwa seluruh sampel batubara menunjukkan pola peningkatan suhu dari tahap deformasi hingga flow, yang menandakan proses pelelehan abu berlangsung secara bertahap seiring kenaikan suhu. Lokasi D menunjukkan nilai AFT tertinggi, khususnya pada tahap flow yang mencapai sekitar 1278°C. Nilai ini mengindikasikan bahwa abu batubara pada lokasi tersebut memiliki ketahanan yang tinggi terhadap pelelehan dalam kondisi oksidatif, sehingga lebih kecil kemungkinannya untuk mengalami slagging selama proses pembakaran. Hal ini menjadi indikator mutu batubara yang baik dari sisi performa operasional.

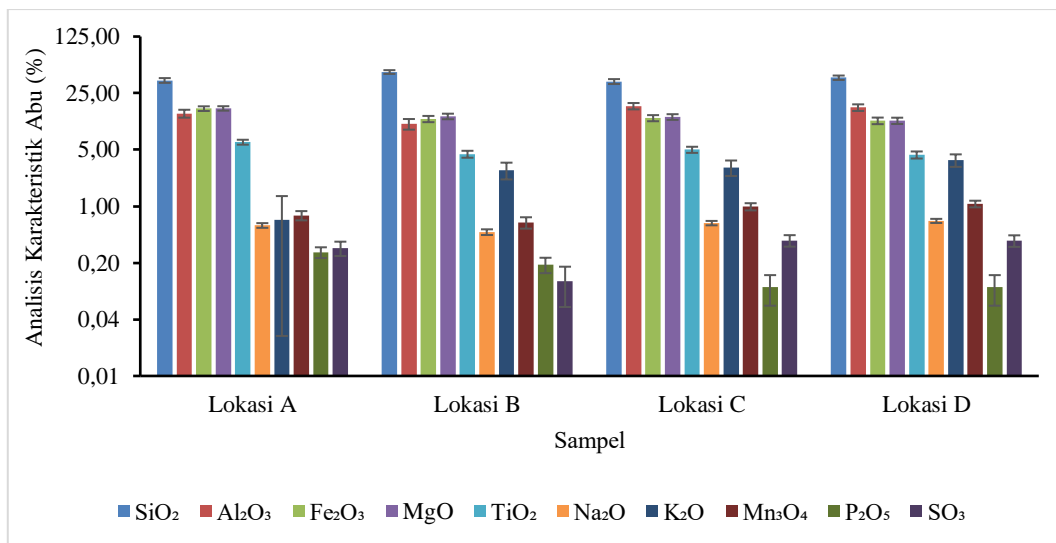
Lokasi A, B, dan C menunjukkan nilai AFT yang relatif lebih rendah dibandingkan Lokasi D. Lokasi A memiliki nilai flow sekitar 1230°C, sedangkan Lokasi B dan C juga berada pada kisaran yang sama yaitu sekitar 1230°C. Meskipun demikian, nilai deformasi pada Lokasi C merupakan yang terendah (sekitar 1162°C), yang menunjukkan bahwa proses awal pelelehan abu dimulai pada suhu yang lebih rendah dibandingkan lokasi lainnya.



Gambar 4. Hasil Analisis Ash Fusion Temperature Oxidizing

Perbedaan nilai AFT pada kondisi oksidasi ini dipengaruhi oleh komposisi mineral dalam abu batubara. Kandungan oksida seperti silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) cenderung meningkatkan titik leleh abu, sedangkan kandungan oksida besi (Fe_2O_3), kalsium (CaO), dan alkali dapat menurunkannya. Oleh karena itu, variasi komposisi kimia antar lokasi menyebabkan perbedaan karakteristik peleburan abu. Jika dibandingkan dengan kondisi reduksi, nilai AFT pada kondisi oksidasi umumnya lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa lingkungan oksidatif dapat meningkatkan stabilitas termal abu batubara, sehingga mengurangi potensi pembentukan slag dan fouling pada peralatan pembakaran.

Dengan demikian, analisis AFT pada kondisi oksidasi memberikan informasi penting dalam evaluasi mutu batubara, terutama dalam menentukan kesesuaian batubara untuk digunakan pada sistem pembakaran tertentu. Batubara dengan nilai AFT tinggi pada kondisi oksidasi lebih diinginkan karena memberikan efisiensi operasional yang lebih baik dan risiko gangguan yang lebih rendah.



Gambar 5. Hasil Analisis Karakteristik Abu

Berdasarkan hasil analisis karakteristik abu batubara dari Lokasi A, B, C, dan D, terlihat adanya variasi komposisi oksida utama yang mempengaruhi sifat peleburan abu serta kualitas batubara sebagai bahan bakar. Komponen utama abu didominasi oleh SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 . Lokasi B memiliki kandungan SiO_2 tertinggi yaitu sebesar 45,60%, yang menunjukkan dominasi mineral silikat. Kandungan SiO_2 yang tinggi umumnya berkontribusi pada peningkatan titik leleh abu, sehingga dapat mengurangi potensi slagging selama pembakaran. Sebaliknya, Lokasi C memiliki kandungan SiO_2 terendah (34,80%), yang berpotensi menyebabkan abu lebih mudah meleleh.

Kandungan Al_2O_3 tertinggi terdapat pada Lokasi C (17,30%) dan Lokasi D (16,60%). Al_2O_3 berperan dalam meningkatkan stabilitas termal abu, sehingga kombinasi SiO_2 dan Al_2O_3 yang tinggi umumnya menghasilkan abu dengan titik leleh yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa Lokasi C dan D memiliki potensi ketahanan abu yang cukup baik terhadap suhu tinggi.

Kandungan Fe_2O_3 dan CaO , yang tergolong sebagai oksida basa, cenderung menurunkan titik leleh abu. Lokasi A memiliki kandungan Fe_2O_3 (16,10%) dan CaO (16,20%) tertinggi, yang menunjukkan potensi pembentukan slag lebih besar dibandingkan lokasi lainnya. Sementara itu, Lokasi D memiliki kandungan Fe_2O_3 dan CaO yang relatif lebih rendah, sehingga lebih stabil terhadap pelelehan.

Oksida alkali seperti Na_2O dan K_2O juga berperan penting dalam menurunkan titik leleh abu. Lokasi D menunjukkan kandungan Na_2O (3,72%) dan K_2O (1,07%) tertinggi, diikuti oleh Lokasi C. Tingginya kandungan alkali ini dapat meningkatkan kecenderungan fouling dan slagging pada peralatan pembakaran, meskipun didukung oleh kandungan Al_2O_3 yang cukup tinggi. Kandungan SO_3 tertinggi terdapat pada Lokasi C (12,70%) dan Lokasi D (11,50%), yang menunjukkan adanya potensi pembentukan senyawa sulfat selama pembakaran. Hal ini dapat berkontribusi terhadap korosi pada peralatan jika tidak dikendalikan dengan baik.

Secara keseluruhan, karakteristik abu dari masing-masing lokasi menunjukkan perbedaan yang signifikan. Lokasi B cenderung memiliki abu dengan titik leleh tinggi karena dominasi SiO_2 , sedangkan Lokasi A berpotensi lebih tinggi mengalami slagging akibat kandungan Fe_2O_3 dan CaO yang tinggi. Lokasi C dan D memiliki karakteristik campuran, di mana kandungan Al_2O_3 yang tinggi meningkatkan stabilitas, namun tingginya alkali dan SO_3 dapat meningkatkan risiko fouling dan korosi.

Dengan demikian, analisis komposisi abu ini sangat penting dalam menentukan perilaku batubara selama pembakaran, khususnya dalam kaitannya dengan efisiensi operasional serta potensi permasalahan seperti slagging, fouling, dan korosi.

Perbandingan Hasil Analisis dengan Baku Mutu Batubara

Perbandingan hasil analisis mutu batubara dilakukan dengan mengacu pada beberapa standar dan literatur, antara lain SNI 13-6011-1999, ASTM D388, ASTM D1857/D4749, serta pedoman WHO dan US EPA terkait batas logam berat [16].

1. Densitas Relatif

Berdasarkan standar ASTM D388, densitas relatif batubara umumnya berada pada kisaran 1,2–1,5. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh sampel memiliki nilai densitas relatif antara 1,28 hingga 1,42. Nilai ini masih berada dalam rentang yang sesuai dengan karakteristik batubara pada umumnya. Lokasi C memiliki densitas relatif tertinggi (1,42) yang mengindikasikan kandungan mineral yang lebih tinggi, sedangkan Lokasi A memiliki nilai terendah (1,28) yang menunjukkan dominasi material organik. Dengan demikian, seluruh sampel memenuhi kriteria umum densitas batubara.

2. Kandungan Logam Berat

Kandungan logam berat dibandingkan dengan acuan WHO dan US EPA, di mana batas aman untuk arsenik (As) umumnya kurang dari 10 ppm dan merkuri (Hg) kurang dari 0,1 ppm. Hasil analisis menunjukkan bahwa kandungan arsenik berada pada kisaran 1,51–1,76 ppm, sedangkan merkuri berkisar antara 0,02–0,03 ppm. Nilai tersebut jauh di bawah ambang batas yang ditetapkan, sehingga dapat disimpulkan bahwa seluruh sampel memenuhi baku mutu lingkungan dan relatif aman digunakan sebagai bahan bakar dari aspek kandungan logam berat.

3. Ash Fusion Temperature (AFT)

Penilaian Ash Fusion Temperature mengacu pada ASTM D1857/D4749, di mana nilai di atas 1200°C menunjukkan karakteristik abu yang baik dengan risiko slagging rendah. Pada kondisi reduksi, Lokasi A menunjukkan nilai AFT sebesar 1200°C yang memenuhi kriteria baik. Lokasi B (1170°C) dan Lokasi D (1150°C) berada pada kategori sedang, sedangkan Lokasi C memiliki nilai terendah (1140°C) yang menunjukkan potensi slagging yang lebih tinggi.

Pada kondisi oksidasi, seluruh sampel menunjukkan nilai AFT di atas 1200°C (1230 – 1278°C), yang menunjukkan bahwa abu batubara memiliki ketahanan yang baik terhadap pelelehan dalam kondisi oksidatif. Dengan demikian, secara umum seluruh sampel memenuhi kriteria AFT pada kondisi oksidasi, namun pada kondisi reduksi, sampel dari Lokasi C menunjukkan karakteristik yang kurang optimal.

4. Komposisi Abu

Komposisi abu dianalisis berdasarkan peran masing-masing oksida terhadap sifat peleburan abu. Kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 yang tinggi cenderung meningkatkan titik leleh abu, sedangkan Fe_2O_3 , CaO , serta oksida alkali (Na_2O dan K_2O) dapat menurunkan titik leleh dan meningkatkan potensi slagging dan fouling. Lokasi B memiliki kandungan SiO_2 tertinggi (45,60%), yang menunjukkan kecenderungan abu dengan titik leleh tinggi dan stabil. Lokasi C dan D memiliki kandungan Al_2O_3 yang relatif tinggi, yang juga berkontribusi terhadap peningkatan stabilitas termal abu.

Sebaliknya, Lokasi A memiliki kandungan Fe_2O_3 dan CaO tertinggi, yang berpotensi menurunkan titik leleh abu dan meningkatkan risiko slagging. Selain itu, kandungan alkali (Na_2O dan K_2O) pada Lokasi

C dan D relatif tinggi, yang dapat meningkatkan kecenderungan fouling pada sistem pembakaran. Kandungan SO_3 pada Lokasi C (12,70%) dan Lokasi D (11,50%) melebihi kisaran umum yang diharapkan (<10%), sehingga berpotensi menyebabkan korosi pada peralatan pembakaran.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh sampel batubara memenuhi kriteria baku mutu umum berdasarkan standar ASTM, SNI, serta pedoman lingkungan, khususnya pada parameter densitas relatif dan kandungan logam berat. Nilai Ash Fusion Temperature pada kondisi oksidasi juga menunjukkan karakteristik yang baik pada seluruh sampel.

Namun demikian, terdapat beberapa parameter yang perlu diperhatikan, terutama pada kondisi reduksi dan komposisi abu. Sampel dari Lokasi B menunjukkan karakteristik paling stabil dan sesuai untuk penggunaan sebagai bahan bakar. Lokasi A memiliki potensi slagging yang lebih tinggi, sedangkan Lokasi C menunjukkan kecenderungan paling rendah dalam hal ketahanan terhadap pelelehan abu serta memiliki kandungan SO_3 dan alkali yang tinggi. Lokasi D secara umum cukup baik, namun tetap memerlukan perhatian terhadap kandungan alkali dan sulfur.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa nilai densitas relatif dari batubara berkisar antara 1,28–1,42, masih dalam kisaran normal (1,2–1,5), sehingga seluruh sampel layak sebagai bahan bakar. Dari karakteristik abu, Lokasi B memiliki mutu terbaik dengan SiO_2 tinggi (45,60%) dan AFT oksidasi $\pm 1230^\circ\text{C}$, sehingga lebih tahan terhadap slagging. Lokasi A berpotensi slagging karena Fe_2O_3 (16,10%) dan CaO (16,20%) tinggi, sedangkan Lokasi C memiliki mutu terendah dengan AFT reduksi 1140°C , serta kandungan alkali (Na_2O 3,02%) dan SO_3 (12,70%) yang tinggi. Kandungan arsenik (As) berkisar 1,51–1,76 ppm dan merkuri (Hg) 0,02–0,03 ppm, masih di bawah batas aman (As <10 ppm; Hg <0,1 ppm). Hal ini menunjukkan batubara aman dari aspek logam berat dan tidak menurunkan kualitas energi secara langsung. Namun, keberadaan logam berat tetap berpotensi mencemari lingkungan saat pembakaran sehingga memerlukan pengendalian emisi.

5. Referensi

- [1] A. Lolo, C. F. Patandean, and E. Ruslan, "Karakterisasi Air Daerah Panas Bumi Pencong Dengan Metode Aas (Atomic Absorption Spectrophotometer) Di Kecamatan Biringbulu, Kabupaten Gowa Propinsi Sulawesi Selatan," *J. Geoelebes*, vol. 4, no. 2, pp. 102–110, 2020, doi: 10.20956/geoelebes.v4i2.8928.
- [2] R. Mayasari, M. Hastarina, and E. Apriyani, "Analisis Turbidity terhadap Dosis Koagulan dengan Metode Regresi Linear (Studi Kasus di PDAM Tirta Musi Palembang)," *J. Integr. Sist. Ind.*, vol. 6, no. 2, pp. 117–125, 2019, doi: 10.24853/jisi.6.2.117-125.
- [3] Nurhalim, Nurhalim, Rochim Bakti Cahyono, and Muslikhin Hidayat. "Karakteristik bio-briket berbahan baku batu bara dan batang/ampas tebu terhadap kualitas dan laju pembakaran." *Jurnal Rekayasa Proses* 12.1 (2018): 51-58.
- [4] R. Z. Putri and Fadhillah, "Peningkatan kualitas batubara low calorie menggunakan minyak pelumas bekas melalui proses Upgrading Brown Coal," *J. Bina Tambang*, vol. 5, no. 2, pp. 208–217, 2020, [Online]. Available: <http://ejournal.unp.ac.id/index.php/mining/article/view/108004>
- [5] Z. Nur, M. Oktavia, and Desmawita, "Analisis Kualitas Batubara Di Pit dan Stockpile Dengan Metoda Analisis Proksimat Di PT. Surya Anugrah Sejahtera Kecamatan Rantau Pandan Kabupaten Bungo Provinsi Jambi," *Mine Mag.*, vol. 7, no. 1, p. 283, 2019.
- [6] A. Kusnadi, R. Djafar, and M. Mustofa, "Pemanfaatan Oli Bekas Sebagai Bahan Bakar Alternatif Kompompor Yang Ramah Lingkungan," *J. Teknol. Pertan. Gorontalo*, vol. 5, no. 2, pp. 49–55, 2020, doi: 10.30869/jtpg.v5i2.681.
- [7] Y. Malik, "Akurasi dan Presisi Analisis Kadar Nikel (Ni) pada Sampel Nikel Laterit menggunakan X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF)," *J. Kim. dan Pendidik. Kim.*, vol. 12, pp. 87–94, 2023, [Online]. Available: <http://sains.uho.ac.id/index.php/journal>
- [8] F. P. Istomo and A. Tristiasti, "Penetapan Nilai Kalori Dalam Batubara Dengan Kalorimeter Parr 6200," *J. Sains Nat.*, vol. 7, no. 2, p. 83, 2019, doi: 10.31938/jsn.v7i2.257.
- [9] Doli Jumat Rianto, "Analisis Pengaruh Kadar Air (Total Moisture) Batubara Terhadap Nilai Kalori Batubara di Front Penambangan," *Formosa J. Multidiscip. Res.*, vol. 1, no. 2, pp. 257–268, Jun. 2022, doi: 10.55927/fjmr.v1i2.582.
- [10] W. Zahar, "Parameter Correlation of Proximate Analysis and Ultimate Analysis of the Calorific Value of Coal," *J. Pertamb. dan Lingkung.*, vol. 2, no. 1, p. 21, Nov. 2021, doi: 10.31764/jpl.v2i1.4715.

- [11] H. Zakwan and H. Prabowo, "Pengendalian Kualitas Batubara Seam 300 Berdasarkan Parameter Kualitas Batubara dari Front Sampai ke Buyer di PT Kuansing Inti Makmu, Job Site Tanjung Belit, Bungo, Jambi," *J. Bina Tambang*, vol. 6, no. 5, pp. 68–76, 2021.
- [12] Fadhili, M. Agil, and Ansosry Ansosry. "Analisis Pengaruh Perubahan Nilai Total Moisture, Ash Content dan Total Sulphur Terhadap Nilai Kalori Batubara Bb-50 Di Tambang Banko Barat PT. Bukit Asam, Tbk. Tanjung Enim Sumatera Selatan." *Bukit Asam, Tbk. Tanjung Enim Sumatera Selatan. Bina Tambang* 4.3 (2019): 54-64.
- [13] A. R. Kadir, S. Widodo, and A. Anshariah, "Analisis Proksimat Terhadap Kualitas Batubara Di Kecamatan Tanah Grogot Kabupaten Paser Provinsi Kalimantan Timur," *J. Geomine*, vol. 5, no. 2, pp. 63–67, 2017, doi: 10.33536/jg.v5i2.128.
- [14] H. Poernomo, "Preliminary Study of the Utilization of the Fly Ash From Coal-Fired Power Plant for Immobilization of Radioactive Waste," *Indones. J. Chem.*, vol. 11, no. 3, p. 258, 2021, doi: 10.22146/ijc.21390.
- [15] E. Kusdarini, A. Budianto, and D. Ghafarunnisa, "Produksi Karbon Aktif Dari Batubara Bituminus Dengan Aktivasi Tunggal H_3PO_4 , Kombinasi $H_3PO_4-NH_4HCO_3$ dan Termal," *Reaktor*, vol. 17, no. 2, pp. 74–80, 2017, doi: 10.14710/reaktor.17.2.74-80.
- [16] Kementrian, E. S. D. M. "Road Map Pengembangan dan Pemanfaatan Batubara." *Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral, Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara* (2021).