

Artikel Penelitian

Pengaruh Oksidasi Hidrogen Peroksida Terhadap Nilai Kalor, Proksimat, dan Ultimat Batubara Formasi Wahau

The Effect Of Hydrogen Peroxide Oxidation On The Calorific Value, Proximate, and Ultimate Analysis Of Wahau Formation Coal

Malik Ardian^{1*}, Shofa Rijalul Haq², R.M. Basuki Rahmad³, Hakim Erlangga Bernado Sakti⁴, Oktarian W. Lusantonio⁵, Dwi Poetranto Waloejo Adji⁵

¹Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta
Jurusan Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Mineral dan Energi, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta,
JL. SWK 104 (Lingkar Utara), Yogyakarta, 55238, Indonesia
e-mail: 112210061@student.upnyk.ac.id

ABSTRAK

Batubara lignit dari Formasi Wahau, Kalimantan Timur, memiliki cadangan besar namun nilai kalor rendah sehingga kurang kompetitif di pasar internasional. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh perlakuan hidrogen peroksida (H_2O_2) 3% terhadap nilai kalor serta komposisi proksimat dan ultimat pada tiga ukuran partikel (40, 60, dan 100 mesh). Metode penelitian meliputi preparasi sampel, perlakuan oksidasi, serta pengujian nilai kalor menggunakan bom kalorimeter, analisis proksimat, dan analisis ultimat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan H_2O_2 tidak meningkatkan nilai kalor, bahkan cenderung menurunkannya. Penurunan terbesar terjadi pada 60 mesh, dari 5.627 menjadi 4.291 kkal/kg. Analisis proksimat memperlihatkan peningkatan volatile matter (misalnya pada 60 mesh dari 13,42% menjadi 19,54%), penurunan fixed carbon (pada 100 mesh dari 81,12% menjadi 76,29%), serta kecenderungan peningkatan kadar abu. Analisis ultimat menunjukkan penurunan karbon (C) dan peningkatan oksigen (O), sedangkan sulfur (S) tidak terdeteksi pada semua sampel. Kesimpulannya, H_2O_2 berperan sebagai agen oksidator yang mengubah komposisi kimia batubara dan meningkatkan reaktivitasnya, tetapi tidak efektif sebagai metode peningkatan mutu energi batubara Formasi Wahau.

Kata Kunci: batubara Formasi Wahau, hidrogen peroksida, nilai kalor, proksimat, ultimat

ABSTRACT

Lignite coal from the Wahau Formation, East Kalimantan, has large reserves but low calorific value, making it less competitive in international markets. This study aims to analyze the effect of 3% hydrogen peroxide (H_2O_2) treatment on the calorific value as well as the proximate and ultimate composition of Wahau Formation coal at three particle sizes (40, 60, and 100 mesh). The research methods included sample preparation, oxidation treatment, calorific value measurement using a bomb calorimeter, proximate analysis, and ultimate analysis. The results show that H_2O_2 treatment did not increase the calorific value and instead tended to reduce it. The greatest reduction occurred in the 60 mesh sample, from 5,627 to 4,291 kcal/kg. Proximate analysis revealed an increase in volatile matter (e.g., from 13.42% to 19.54% in 60 mesh), a decrease in fixed carbon (e.g., from 81.12% to 76.29% in 100 mesh), and a general tendency of increasing ash content. Ultimate analysis showed a decrease in carbon (C) and an increase in oxygen (O), while sulfur (S) was not detected in any sample. In conclusion, H_2O_2 acts as an oxidizing agent that modifies the chemical composition of coal and increases its reactivity, but it is not effective as a method to improve the energy quality of Wahau Formation coal.

Keywords: Wahau Formation coal, hydrogen peroxide, calorific value, proximate, ultimate

Naskah masuk	: 10 Februari 2025
Revisi pertama	: 10 Maret 2025
Naskah diterima	: 10 April 2025
Naskah dipublikasi online	: 28 Januari 2026

I. PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang

Batubara masih menjadi sumber energi utama di Indonesia, khususnya untuk pembangkitan listrik dan industri (ESDM, 2023). Namun, sekitar 70–75% cadangan batubara nasional tergolong *low rank coal* (LRC) dengan nilai kalor rendah sehingga kurang kompetitif di pasar internasional (Rahmad, Anggayana, & Haryanto, 2013). Salah satu contohnya adalah batubara Formasi Wahau di Cekungan Kutai, Kalimantan Timur, yang memiliki cadangan ±9 miliar ton, tetapi kualitasnya termasuk sub-bituminus dengan nilai kalor rata-rata hanya 4.087 kkal/kg (adb), kadar air tinggi (33–43%), dan *fixed carbon* rendah (Rahmad dkk., 2016). Kondisi ini membatasi pemanfaatannya pada pasar domestik dan menurunkan daya saing di industri.

Berbagai upaya telah dilakukan untuk memodifikasi karakteristik LRC, salah satunya melalui perlakuan kimia. Hidrogen peroksida (H_2O_2) dikenal sebagai agen oksidator yang mampu memutus ikatan jembatan dan rantai samping pada kerangka aromatik batubara, sehingga membentuk gugus oksigenat baru seperti –OH, C=O, dan –COOH (Huang dkk., 2021; Xiong dkk., 2020; Elbeyli & Pişkin, 2004; Rahayu dkk., 2017). Reaksi ini meningkatkan kandungan oksigen dan *volatile matter*, tetapi menurunkan *fixed carbon* serta nilai kalor, sehingga lebih berperan pada peningkatan reaktivitas daripada kualitas energi.

Sebaliknya, perlakuan berbasis hidrogen (misalnya hidrogenasi atau *hydropyrolysis*) dilaporkan dapat menurunkan kadar oksigen, meningkatkan rasio H/C, dan menjaga nilai kalor tetap tinggi (Speight, 2013; Mae dkk., 2001). Hal ini menegaskan bahwa mekanisme oksidasi dan reduksi memberikan pengaruh berbeda terhadap mutu batubara, sehingga kajian spesifik terhadap jenis batubara tertentu tetap diperlukan.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini difokuskan pada analisis pengaruh perlakuan H_2O_2 3% terhadap nilai kalor, komposisi proksimat, dan ultimat batubara Formasi Wahau dengan variasi ukuran partikel. Kajian ini penting untuk memahami sejauh mana oksidasi ringan memengaruhi karakteristik batubara peringkat rendah, sekaligus menilai keterbatasan dan potensi pemanfaatannya di masa depan.

I.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, permasalahan penelitian ini difokuskan pada bagaimana perlakuan oksidasi menggunakan larutan H_2O_2 3% memengaruhi karakteristik batubara lignit Formasi Wahau. Permasalahan tersebut mencakup tiga aspek utama, yaitu: bagaimana kondisi awal karakteristik batubara,

sejauh mana perubahan nilai kalor yang terjadi setelah perlakuan, serta bagaimana modifikasi parameter proksimat dan ultimat pada berbagai ukuran partikel (40, 60, dan 100 mesh).

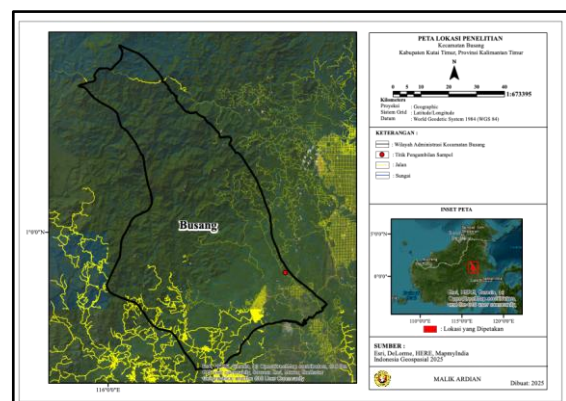
I.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis karakteristik awal batubara dari Formasi Wahau.
2. Menganalisis pengaruh perlakuan oksidasi menggunakan larutan H_2O_2 3% terhadap nilai kalor batubara.
3. Menganalisis perubahan parameter proksimat dan ultimat akibat perlakuan oksidasi.

I.4. Lokasi Penelitian

Penelitian ini menggunakan sampel batubara yang berasal dari Formasi Wahau, Kabupaten Kutai Timur, Kalimantan Timur. Lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar I.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

II. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen laboratorium dengan metode kuantitatif komparatif untuk menganalisis pengaruh perlakuan oksidasi menggunakan larutan hidrogen peroksida (H_2O_2) 3% terhadap batubara sub-bituminus dari Formasi Wahau. Data penelitian diperoleh melalui serangkaian uji laboratorium meliputi analisis nilai kalor menggunakan kalorimeter bom (berdasarkan standar ASTM D5865-13), analisis proksimat (kadar air, zat terbang, abu, dan karbon tetap), serta analisis ultimat (unsur C, H, N, S).

Langkah awal penelitian adalah studi literatur, yang dilakukan dengan menelaah hasil penelitian terdahulu terkait karakteristik batubara Formasi Wahau (Rahmad, 2016), estimasi cadangan (Anggayana &

Rahmad, 2009), serta kajian perlakuan hidrogen peroksida terhadap batubara (Huang dkk., 2021). Studi literatur juga mencakup standar uji nilai kalor (ASTM D5865-13), analisis proksimat, dan referensi kimia terkait reaksi oksidasi.

Tahap berikutnya adalah pengambilan dan preparasi sampel. Sampel batubara diperoleh dari Formasi Wahau, Kalimantan Timur. Sampel kemudian dikeringkan untuk mengurangi kadar air alami, digerus, dan diayak hingga lolos ayakan mesh 40, mesh 60, dan mesh 100. Preparasi ini bertujuan untuk memastikan ukuran partikel seragam sebelum perlakuan.

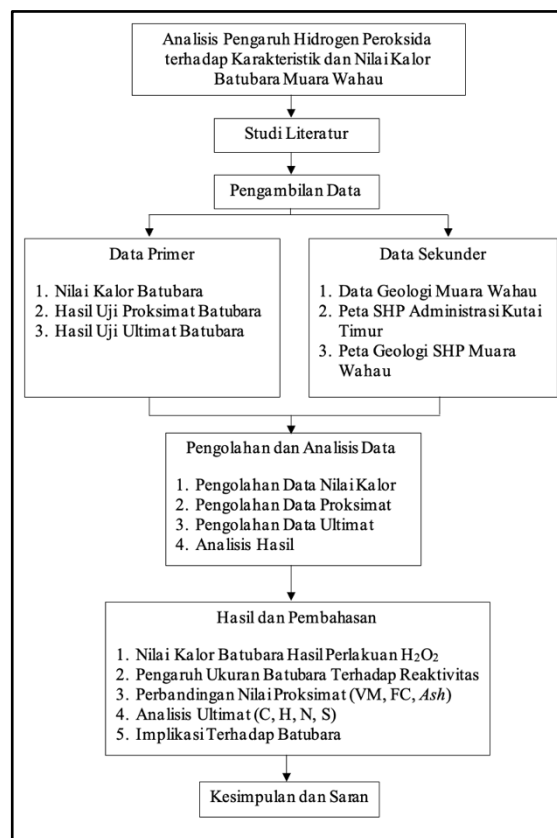
Setelah preparasi, dilakukan perlakuan oksidasi dengan merendam sampel ke dalam larutan H_2O_2 3% dan aquades (kontrol) selama periode 10 hari. Selama masa perendaman, sampel diambil setiap hari untuk diamati perubahan karakteristiknya. Setelah proses perendaman, sampel dikeringkan kembali sebelum dilakukan pengujian laboratorium.

Tahap selanjutnya adalah pengujian laboratorium, yang mencakup:

1. Uji nilai kalor menggunakan kalorimeter bom untuk memperoleh Gross Calorific Value (GCV), mengacu pada ASTM D5865-13 (*Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke*).
2. Analisis proksimat (*dry basis*) untuk menentukan zat terbang, abu, dan karbon tetap, mengacu pada ASTM D3172-13 (*Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke*).
3. Analisis ultimat (CHNSO) untuk menentukan kadar unsur karbon, hidrogen, nitrogen, dan sulfur, mengacu pada ASTM D3176-15 (*Practice for Ultimate Analysis of Coal and Coke*) dan ASTM D5373-16 (*Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen, and Nitrogen in Coal and Coke*).

Data yang diperoleh kemudian diolah menggunakan metode analisis deskriptif kuantitatif. Hasil uji perlakuan dibandingkan dengan kontrol untuk mengetahui sejauh mana perlakuan oksidasi berpengaruh terhadap nilai kalor serta karakteristik proksimat dan ultimat. Hasil ditampilkan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan interpretasi.

Alur penelitian ini secara umum meliputi studi literatur, persiapan sampel, perlakuan oksidasi, analisis laboratorium, serta pengolahan data hingga penarikan kesimpulan. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Metode Penelitian

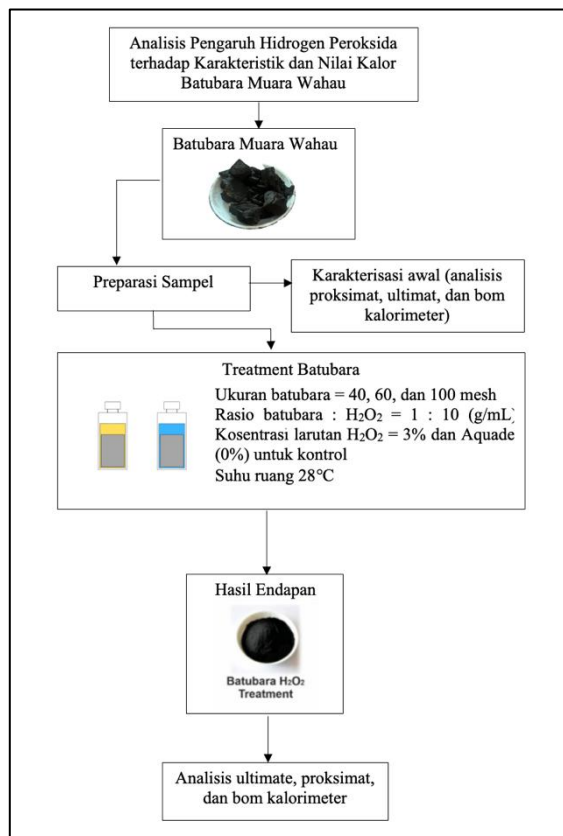
Metode eksperimen laboratorium dirancang secara rinci untuk menjelaskan tahapan perlakuan sampel. Proses dimulai dari pengeringan awal (*air drying*), penghalusan, dan pengayakan hingga lolos 40 mesh, 60 mesh, dan 100 mesh. Selanjutnya, sampel dibagi menjadi dua kelompok: kontrol (tanpa perlakuan) dan perlakuan dengan larutan H_2O_2 3%. Setelah melalui tahap perendaman, sampel dikeringkan kembali dan diuji menggunakan *bomb calorimeter*, analisis proksimat, serta analisis ultimat. Diagram alir eksperimen ditunjukkan pada Gambar 3.

I. HASIL DAN PEMBAHASAN

I.1. Nilai Kalor Batubara

Rekapitulasi nilai kalor batubara hasil pengujian bomb kalorimeter disajikan pada Tabel 1. Secara umum, nilai kalor batubara yang diberi perlakuan larutan H_2O_2 3% menunjukkan kecenderungan menurun dibandingkan sampel kontrol. Hasil uji-T independen pada Tabel 2 menunjukkan bahwa perbedaan nilai kalor antara sampel kontrol dan perlakuan tidak signifikan secara statistik pada semua ukuran partikel ($p > 0,05$). Rata-rata nilai kalor sampel kontrol tercatat 3.708,8 kkal/kg (mesh 40), 3.551,9 kkal/kg (mesh 60), dan 3.475,6 kkal/kg (mesh 100), sementara sampel perlakuan masing-masing sebesar 3.587,3; 3.511,9; dan 3.410,2 kkal/kg.

Nilai kalor awal (hari ke-0) relatif rendah, yaitu 2.950–3.330 kkal/kg, yang sesuai dengan karakter lignit. Setelah perendaman tanpa H₂O₂ (kontrol), nilai kalor meningkat pada hari-hari awal, misalnya mesh 40 mencapai 4.341 kkal/kg, yang mengindikasikan efek pencucian terhadap komponen non-kalorifik. Pada kontrol, tren nilai kalor relatif stabil dengan fluktuasi moderat hingga hari ke-10, sedangkan pada perlakuan H₂O₂ terlihat penurunan yang lebih tajam. Sebagai contoh, mesh 100 sempat naik hingga 4.625 kkal/kg pada hari ke-9, namun menurun kembali pada akhir pengujian. Visualisasi perbandingan nilai kalor ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Metode Eksperimen

Penurunan nilai kalor ini dapat dijelaskan melalui proses oksidasi yang terjadi selama perlakuan. Hidrogen peroksida bersifat sebagai oksidator kuat yang dapat menyerang gugus fungsional pada batubara, khususnya komponen karbon organik. Hal ini menyebabkan berkurangnya fraksi karbon tetap (*fixed carbon*) yang berperan besar dalam menyumbang nilai kalor (Huang dkk., 2021). Selain itu, peningkatan kadar oksigen relatif dalam struktur batubara juga menurunkan densitas energi yang dilepaskan pada saat pembakaran. Dengan demikian, meskipun perlakuan H₂O₂ efektif menurunkan kadar sulfur, konsekuensinya adalah penurunan nilai kalor batubara.

Tabel 1. Nilai kalor Batubara

Hari	Nilai Kalor Kontrol (kkal/kg)			Nilai Kalor Perlakuan Hidrogen Peroksida (kkal/kg)		
	Mesh 40	Mesh 60	Mesh 100	Mesh 40	Mesh 60	Mesh 100
0	2.950	3.052	3.330	2.950	3.052	3.330
1	4.341	4.184	3.037	4.240	4.463	2.934
2	3.645	3.781	3.042	3.659	2.873	4.302
3	3.953	2.942	3.587	4.373	3.914	3.415
4	3.196	3.686	3.775	3.231	3.573	3.651
5	3.633	3.233	3.647	3.563	3.486	3.613
6	3.742	3.457	3.478	3.356	3.283	3.162
7	3.325	3.388	3.573	3.543	3.339	3.647
8	3.314	3.372	3.663	3.573	3.433	3.569
9	3.829	3.520	3.575	3.031	3.738	4.625
10	4.110	3.956	3.609	3.304	3.017	2.936

Tabel 2. Nilai kalor Batubara

Mesh	Rata – rata kontrol	Rata – rata perlakuan	SD Kontrol	SD Perlakuan	Sig. (p-value)
40	3.708,8	3.587,3	554,2	625,1	0,502
60	3.551,9	3.511,9	454,8	564,6	0,830
100	3.475,6	3.410,2	378,4	497,3	0,694

I.2. Analisis Proksimat

Analisis proksimat dilakukan untuk menilai kandungan *volatile matter* (VM), *fixed carbon* (FC), *ash content* (AC), dan *moisture* pada batubara kontrol dan perlakuan H₂O₂ 3% (*dry basis*). Semua hasil proksimat disajikan dalam Tabel 3.

Pengaruh Oksidasi Hidrogen Peroksida Terhadap ..., Malik Ardian, dkk.

Tabel 3. Hasil Uji Proksimat Batubara Original (*Dry Basis*)

Parameter	Asli (%)
<i>Volatile Matter</i> (VM)	25,81
<i>Ash Content</i> (AC)	2,37
<i>Fixed Carbon</i> (FC)	71,82

Tabel 4. Hasil Uji Proksimat Batubara (*Dry Basis*) – Ukuran 40 Mesh

Parameter	Kontrol (%)	H ₂ O ₂ % (%)
<i>Volatile Matter</i> (VM)	14,12	14,24
<i>Ash Content</i> (AC)	1,21	2,67
<i>Fixed Carbon</i> (FC)	84,66	83,09

Tabel 5. Hasil Uji Proksimat Batubara (*Dry Basis*) – Ukuran 60 Mesh

Parameter	Kontrol (%)	H ₂ O ₂ 3% (%)
<i>Volatile Matter</i> (VM)	13,42	19,54
<i>Ash Content</i> (AC)	3,80	2,36
<i>Fixed Carbon</i> (FC)	82,78	78,10

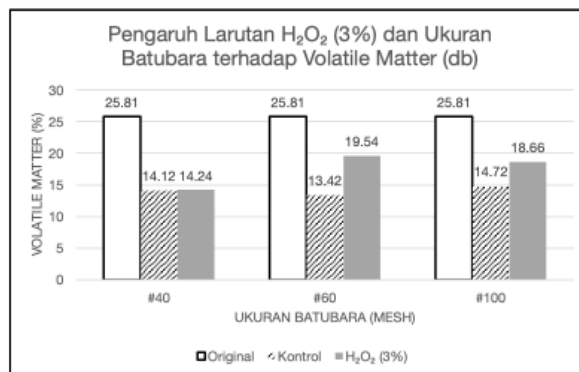
Tabel 6. Hasil Uji Proksimat Batubara (*Dry Basis*) – Ukuran 100 Mesh

Parameter	Kontrol (%)	H ₂ O ₂ 3% (%)
<i>Volatile Matter</i> (VM)	14,72	18,66
<i>Ash Content</i> (AC)	4,16	5,05
<i>Fixed Carbon</i> (FC)	81,12	76,29

I.2.1. *Volatile Matter* (VM)

Kandungan VM menurun saat terendam air dan kembali meningkat pada semua variasi ukuran partikel setelah perlakuan H₂O₂. Misalnya, pada mesh 40 naik

dari 14,12% menjadi 14,24%; 60 mesh dari 13,42% menjadi 19,54%; dan 100 mesh dari 14,72% menjadi 18,66% (lihat Tabel 2). Tren peningkatan ini divisualisasikan pada Gambar 4, memperlihatkan peningkatan fraksi volatil secara konsisten pada seluruh ukuran mesh.



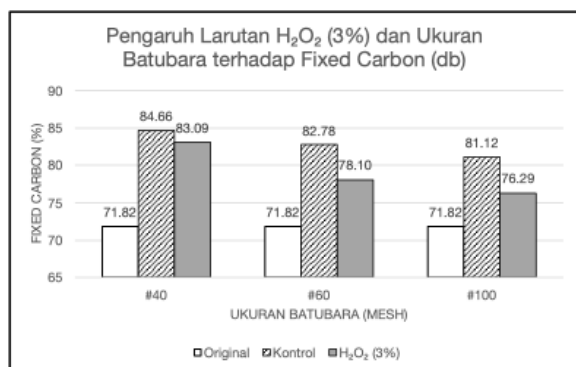
Gambar 4. Hasil Uji Proksimat (VM)

Peningkatan VM menandakan terbentuknya senyawa volatil tambahan akibat oksidasi, termasuk gugus oksigenat yang lebih mudah menguap (Huang dkk., 2021). Hal ini meningkatkan reaktivitas batubara dalam proses pembakaran, meskipun secara bersamaan berimplikasi pada penurunan proporsi fixed carbon dan mutu energi total.

I.2.2. *Fixed Carbon* (FC)

Fixed carbon mengalami penurunan setelah perlakuan H₂O₂ pada semua ukuran mesh. Nilai FC menurun dari 84,66% menjadi 83,09% pada mesh 40; dari 82,78% menjadi 78,10% pada mesh 60; dan dari 81,12% menjadi 76,29% pada mesh 100 (lihat Tabel 2). Tren ini divisualisasikan pada Gambar 5, memperlihatkan penurunan yang semakin signifikan pada partikel halus (60 dan 100 mesh).

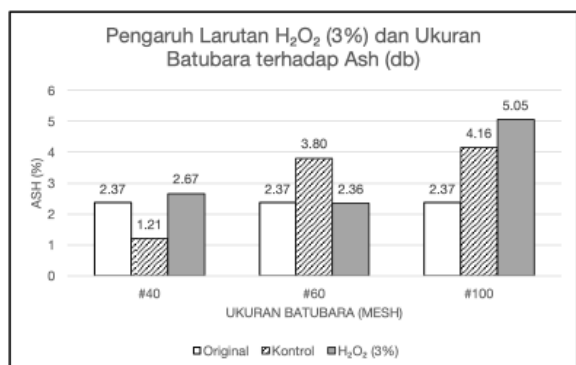
Penurunan FC mencerminkan degradasi karbon padat akibat reaksi oksidatif, di mana sebagian karbon terkonversi menjadi senyawa volatil maupun gugus oksigenat (Xiong dkk., 2020). Mekanisme ini sesuai dengan temuan Huang dkk. (2021), bahwa perlakuan H₂O₂ menambahkan gugus karbonil (C=O) dan karboksilat (–COOH) pada kerangka aromatik batubara. Akibatnya, meskipun reaktivitas meningkat, densitas energi menurun karena fraksi karbon efektif yang menjadi kontributor utama nilai kalor semakin berkurang. Fenomena dominan pada mesh 60 dan 100 menunjukkan bahwa luas permukaan partikel halus mempercepat laju oksidasi (Gouricharan & Subba Rao, 2016).



Gambar 5. Hasil Uji Proksimat (FC)

1.2.3. Ash Content (AC)

Kadar abu (*Ash Content* (AC)) menunjukkan variasi antar ukuran partikel setelah perlakuan. Mesh 40 meningkat dari 1,21% menjadi 2,67%; mesh 60 menurun dari 3,80% menjadi 2,36%; sedangkan mesh 100 naik dari 4,16% menjadi 5,05% (lihat Tabel 2). Hasil ini divisualisasikan pada Gambar 6, memperlihatkan pola fluktuatif yang tidak seragam.



Gambar 6. Hasil Uji Proksimat (AC)

Peningkatan kadar abu pada ukuran 40 dan 100 mesh dapat dijelaskan melalui akumulasi mineral anorganik yang relatif lebih dominan setelah sebagian fraksi organik teroksidasi (Ahnonkitpanit dkk., 1989). Sebaliknya, penurunan kadar abu pada mesh 60 kemungkinan berkaitan dengan pelarutan sebagian senyawa mineral (misalnya pirit) selama proses oksidasi dan pencucian sampel dengan H₂O₂. Hal ini konsisten dengan mekanisme desulfurisasi parsial yang dilaporkan Xiong dkk. (2020), di mana oksidasi H₂O₂ mampu melarutkan mineral tertentu, namun bersamaan dengan itu juga menurunkan fraksi organik yang menyumbang energi. Dengan demikian, perubahan kadar abu pada penelitian ini lebih mencerminkan redistribusi mineral akibat perlakuan kimia, bukan tren peningkatan atau penurunan yang konsisten.

1.3. Analisis Ultimat

Hasil analisis ultimat ditampilkan pada Tabel 5-7, yang memuat komposisi unsur C, H, N, S, dan O untuk sampel kontrol dan perlakuan H₂O₂. Berdasarkan data dari Tabel 5 – 7 kadar karbon (C) mengalami penurunan setelah perlakuan, sedangkan oksigen (O) menunjukkan peningkatan. Perubahan ini menandakan terjadinya proses oksidasi, di mana gugus oksigen fungsional semakin banyak terbentuk pada batubara hasil perlakuan. Temuan ini konsisten dengan penelitian Xiong dkk. (2014) serta Huang dkk. (2021) yang melaporkan peningkatan kandungan oksigen pada batubara teroksidasi.

Tabel 5. Hasil Uji Ultimat Batubara – 40 Mesh

Parameter	Kontrol (%)	H ₂ O ₂ 3% (%)
C	60,06	58,97
H	4,69	4,61
N	0,46	2,25
S	0	0
O	16,99	18,54

Kadar sulfur (S) tidak terdeteksi baik pada sampel kontrol maupun perlakuan, sehingga dapat dipastikan bahwa batubara Formasi Wahau tergolong *low-sulfur coal*. Hasil ini juga memperkuat karakteristik awal sampel yang sejak awal memang tidak mengandung sulfur dalam jumlah signifikan.

Selain itu, kandungan nitrogen (N) menunjukkan kecenderungan relatif meningkat meskipun dalam jumlah kecil. Peningkatan ini lebih disebabkan oleh efek perbandingan, yaitu menurunnya proporsi karbon sehingga fraksi nitrogen secara persentase tampak lebih besar, meskipun secara absolut perubahannya relatif kecil (Gouricharan & Subba Rao, 2016; Huang dkk., 2021). Secara keseluruhan, perubahan komposisi unsur ultimat ini mengonfirmasi bahwa perlakuan H₂O₂ menghasilkan batubara yang lebih teroksidasi dengan kandungan karbon berkurang dan oksigen meningkat (Mae dkk., 2001; Huang dkk., 2021).

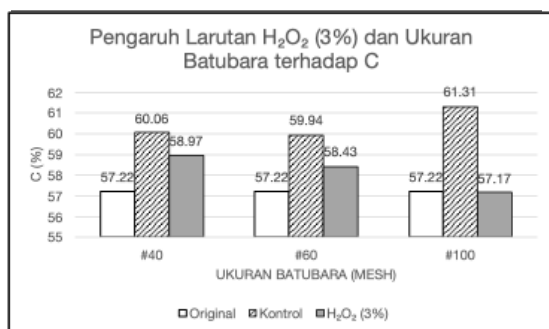
Pengaruh Oksidasi Hidrogen Peroksida Terhadap ..., Malik Ardian, dkk.

Tabel 6. Hasil Uji Ultimat Batubara – 60 Mesh

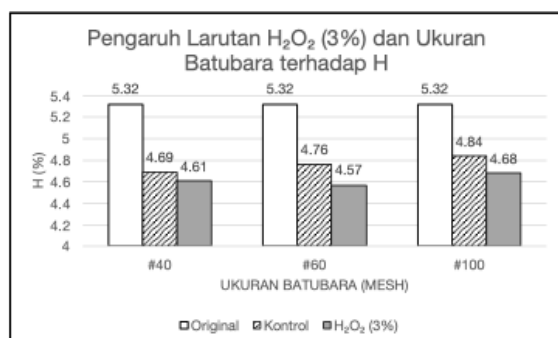
Parameter	Kontrol (%)	H ₂ O ₂ 3% (%)
C	59,94	58,43
H	4,76	4,57
N	0,26	2,07
S	0	0
O	16,14	18,1

Tabel 7. Hasil Uji Ultimat Batubara – 100 Mesh

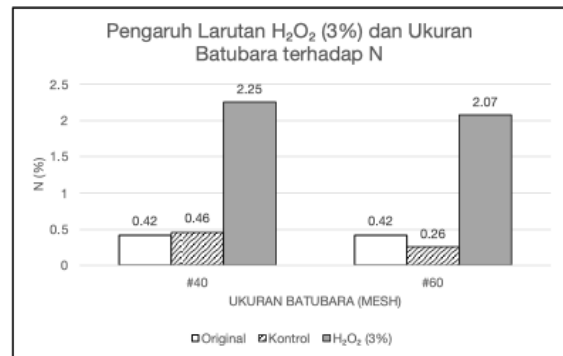
Parameter	Kontrol (%)	H ₂ O ₂ 3% (%)
C	61,31	57,17
H	4,84	4,68
N	4,16	-0,69
S	0	0
O	16,37	18,33



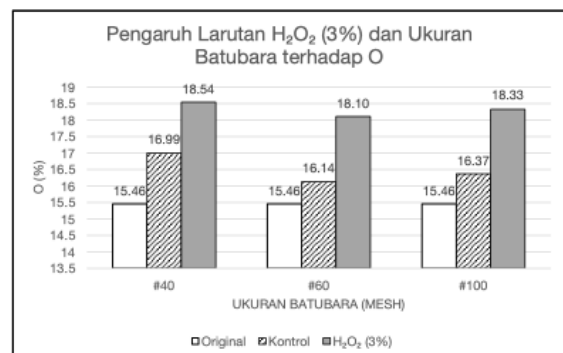
Gambar 7. Hasil Uji Ultimat (C)



Gambar 8. Hasil Uji Ultimat (H)



Gambar 9. Hasil Uji Ultimat (N)



Gambar 10. Hasil Uji Ultimat (O)

II. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh perlakuan hidrogen peroksida (H₂O₂) terhadap batubara Formasi Wahau, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Karakteristik Awal Batubara Formasi Wahau

Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik asli batubara Formasi Wahau tergolong lignit dengan kualitas energi rendah. Nilai kalor awal berada pada kisaran 2.950–3.330 kkal/kg, dengan *fixed carbon* sekitar 71,82% (db) dan kandungan karbon total 57,22% (db). Data ini menegaskan bahwa batubara Formasi Wahau memiliki keterbatasan dalam mutu energi sejak awal sebelum perlakuan.

2. Pengaruh Perlakuan H₂O₂ terhadap Nilai Kalor

Perlakuan oksidasi menggunakan H₂O₂ 3% tidak memberikan peningkatan mutu energi, bahkan cenderung menurunkan nilai kalor. Penurunan lebih jelas terjadi pada ukuran partikel halus, khususnya mesh 60 dan mesh 100, yang mengindikasikan bahwa semakin besar luas permukaan kontak dengan larutan, semakin intensif reaksi oksidasi yang mengurangi fraksi karbon efektif penyumbang energi.

3. Analisis Ultimat

pengaruh oksidasi terhadap parameter proksimat dan ultimat ditandai dengan menurunnya *fixed carbon* serta karbon total, meningkatnya *volatile matter* dan oksigen, serta variasi pada kadar abu. Misalnya, *fixed carbon* pada mesh 100 turun dari 81,12% menjadi 76,29%, sementara oksigen meningkat dari 16,37% menjadi 18,33%. Sulfur tetap tidak terdeteksi pada semua sampel, sesuai dengan karakteristik low-sulfur coal. Secara keseluruhan, hasil ini mengonfirmasi bahwa H₂O₂ lebih berperan sebagai agen oksidator yang meningkatkan reaktivitas batubara, tetapi tidak efektif untuk peningkatan mutu energi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Saya mengucapkan terima kasih kepada Ir. Shofa Rijalul Haq, S.T., M.Eng., Ph.D. selaku pembimbing dan penanggung jawab penelitian yang telah memberi kesempatan, arahan, serta bimbingan selama proses penelitian hingga penyusunan skripsi ini. Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada rekan-rekan penelitian yang turut membantu dalam pengambilan data dan diskusi, serta kepada keluarga saya atas doa dan dukungan yang tiada henti sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahnonkitpanit, E., & Prasassarakich, P. (1989). Coal desulphurization in aqueous hydrogen peroxide. *Fuel*, 68(5), 635–639.
- Rahmad, B., Anggayana, K., & Harjanto. (2013). Komposisi mikroskopis batubara tebal Formasi Wahau, daerah Muara Wahau, Kalimantan Timur. *Jurnal Teknologi Mineral Indonesia*, 9(1), 15–26.
- Arif, Irwandy. (2022). *Era Baru Batubara Indonesia*. Jakarta. Penerbit Gramedia Pustaka Utama.
- ASTM D121. (2013). *Standard terminology of coal and coke*. ASTM International.
- ASTM D3172. (2013). *Standard practice for proximate analysis of coal and coke*. ASTM International.
- ASTM D3176. (2015). *Standard practice for ultimate analysis of coal and coke*. ASTM International.
- ASTM D388-1999. (1999). *Standard classification of coals by rank*. ASTM International.
- ASTM D388-19a. (2019). *Standard classification of coals by rank*. ASTM International.
- Cai, S., Zhang, S., Wei, Y., Sher, F., Wen, L., Xu, J., Dang, J., & Hu, L. (2021). A novel method for removing organic sulfur from high-sulfur coal: Migration of organic sulfur during microwave treatment with NaOH–H₂O₂.
- Gouricharan, T., & Subba Rao, D. (2016). Coal and its characterization. In D. Subba Rao (Ed.), *Coal processing and utilization* (pp. 1–28). CRC Press.
- Huang, J., Li, Y., Xu, J., Liu, S., & Wang, J. (2021). Biogenic methane generation from Vietnamese coal after pretreatment with hydrogen peroxide. *Fuel Processing Technology*, 215, 106732.
- Kentucky Geological Survey. (n.d.). *Coal formation process*. University of Kentucky. Retrieved from <https://www.uky.edu/KGS>
- Mae, K., Shindo, H., & Miura, K. (2001). A new two-step oxidative degradation method for producing valuable chemicals from low rank coals under mild conditions. *Fuel*, 80(5), 559–563.
- Parr Instrument Company. (2016). *Operating instruction manual: Parr oxygen bomb calorimeter*. Moline, IL: Parr Instrument Company.
- Rahmad, B. (2016). *Geology And Geoheritage Of Muara Wahau Coal Field, East Kalimantan, Indonesia – Concern Of: Geology, Microscopy, Organic Geochemistry And Coalbed Methane Potential*. *Jurnal Teknologi Mineral*, 12(1), 25–34.
- Smakowski, T., Malon, A., & Tyminski, M. (2011). Hard coal. In T. Smakowski (Ed.), *Minerals yearbook of Poland* (pp. 45–55). Warsaw: Mineral and Energy Economy Research Institute.
- Speight, J. G. (2013). *The chemistry and technology of coal* (3rd ed.). CRC Press.
- SNI 13-6011-1999. (1999). *Klasifikasi sumber daya batubara Indonesia*. Badan Standardisasi Nasional.
- Xiong, Y., Jin, L., Li, Y., Zhu, J., & Hu, H. (2020). Hydrogen peroxide oxidation degradation of a low-rank Naomaohu coal. *Fuel Processing Technology*, 206, 106484.
- Xiong, Y., Li, Z., Xu, H., & Zhang, Y. (2020). Oxidative degradation of coal by hydrogen

peroxide: Structural transformation and
mechanism. *Fuel*, 263, 116722.