



Pengaruh Suhu Pemanasan terhadap *Total Moisture* dan *Calorific Value* dalam Proses Peningkatan Kualitas Batubara Coklat

(The Effect of Heating Temperature on Total Moisture and Calorific Value in The Brown Coal Upgrading Process)

Pempieno Rizka Nourishma¹, Arief Pambudi Nugraha^{2*}, Ade Purnama Jaya³

¹ Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Mineral, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta, Jalan Padjajaran 104, Sleman

² Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, Jalan Raya Palembang-Prabumulih KM 32, Indralaya

³ PT. Baturona Adimulya, Supat Barat, Musi Banyuasin

¹pempi_rn@yahoo.co.id, ²ariefpambudi51@unsri.ac.id

Penulis Korespondensi: Arief Pambudi Nugraha | **Email:** ariefpambudi51@unsri.ac.id

Diterima (*Received*): 21/07/2026 Direvisi (*Revised*): 05/08/2026 Diterima untuk Publikasi (*Accepted*): 07/08/2026

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh suhu pemanasan (190–205°C) terhadap *Total Moisture* (TM) dan *Calorific Value* (CV) pada proses peningkatan kualitas batubara peringkat rendah (*brown coal upgrading*) dari Seam S, Pit 4 PT. Baturona Adimulya. Sebanyak 16 sampel batubara dipanaskan pada suhu 190°C hingga 205°C dengan interval 1°C dan diamati pada hari ke-3, 6, 9, 12, dan 15. Analisis statistik menggunakan korelasi Pearson dan regresi linear dilakukan untuk menentukan hubungan antara suhu pemanasan dengan TM dan CV. Hasil penelitian menunjukkan korelasi negatif yang sangat kuat antara suhu pemanasan dan TM pada hari ke-15 ($r = -0,866$; $p < 0,001$), yang menunjukkan bahwa peningkatan suhu sebesar 1°C menurunkan TM sebesar 0,045%. Nilai kalor menunjukkan penurunan rata-rata dari sekitar 5.862 kkal/kg (hari ke-3) menjadi sekitar 5.725 kkal/kg (hari ke-15). Model regresi linear menjelaskan 75% variasi TM pada hari ke-15 ($R^2 = 0,750$). Penelitian ini merekomendasikan suhu pemanasan optimal 198–202°C dengan durasi minimal 9 hari untuk mencapai target TM < 10,2% dan CV > 5.720 kkal/kg.

Kata Kunci: Batubara, Coklat, Kualitas, Peningkatan, Suhu

ABSTRACT

This study aims to analyze the effect of heating temperature (190–205°C) on Total Moisture (TM) and Calorific Value (CV) in the brown coal upgrading process from Seam S, Pit 4 PT. Baturona Adimulya. A total of 16 coal samples were heated at temperatures ranging from 190°C to 205°C with 1°C intervals and observed on days 3, 6, 9, 12, and 15. Statistical analysis using Pearson correlation and linear regression was performed to determine the relationship between heating temperature and TM and CV. Results showed a very strong negative correlation between heating temperature and TM on day 15 ($r = -0.866$, $p < 0.001$), indicating that a 1°C increase reduced TM by 0.045%. The Calorific Value decreased from 5.862 Kcal/Kg (day 3) to 5.725 kcal/Kg (day 15). The linear regression model explained 75% of TM variation on day 15 ($R^2 = 0.750$). This study recommends an optimal heating temperature of 198–202°C with a minimum duration of 9 days to achieve a target TM < 10.2% and CV > 5.720 kcal/kg.

Keywords: Brown Coal, Calorific Value, Quality, Temperature, Upgrading

© Author(s) 2026. This is an open access article under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0).

1. Pendahuluan

Batubara peringkat rendah, termasuk lignit dan *sub-bituminous*, merupakan sumber daya energi yang melimpah dan menyumbang sekitar 45% cadangan batubara dunia (Sun dkk., 2024). Indonesia merupakan

salah satu produsen dan eksportir batubara terbesar di dunia, dengan cadangan batubara peringkat rendah yang sangat besar khususnya di Provinsi Sumatera Selatan (Umar & Setiawan, 2022). Meskipun demikian, pemanfaatan batubara jenis ini masih terbatas karena kendala teknis, terutama kandungan air yang sangat

tinggi yang mencapai 30–60% pada basis as-received (Umar dkk., 2024).

Batubara peringkat rendah atau lignit merupakan batubara dengan tingkat kematangan rendah yang memiliki kandungan air tinggi (30–60%) serta nilai kalor rendah (2.500–4.500 kkal/kg). Kandungan *moisture* yang tinggi pada batubara peringkat rendah berdampak signifikan terhadap nilai kalor, efisiensi pembakaran, dan biaya transportasi. Setiap penurunan kadar air dapat meningkatkan nilai kalor secara signifikan (Febriani dkk., 2024). Selain itu, kandungan air yang tinggi menyebabkan batubara mudah mengalami pemanasan sendiri (*self-heating*) dan *spontaneous combustion* selama penyimpanan dan transportasi, sehingga menimbulkan risiko keselamatan kerja (Speight, 2016). Oleh karena itu, diperlukan teknologi peningkatan kualitas (*upgrading*) yang efektif untuk meningkatkan nilai ekonomis dan keamanan penggunaan batubara peringkat rendah.

Berbagai metode *upgrading* telah dikembangkan, antara lain *hydrothermal treatment*, *thermal drying*, dan *mechanical thermal expression*. Suhu pemanasan merupakan parameter kritis yang mempengaruhi efektivitas proses *upgrading*. Pemanasan batubara lignit pada rentang suhu 150–250°C menghasilkan perubahan signifikan pada struktur pori dan gugus fungsi permukaan yang mempengaruhi kemampuan reabsorpsi air, termasuk karakteristik produk tiga fase (padat, cair, gas) dari proses *hydrothermal treatment* yang sangat dipengaruhi oleh suhu pemanasan (Liu dkk., 2022). Kombinasi proses *dewatering* dan *briquetting* tanpa pengikat pada suhu optimal mampu menghasilkan produk dengan kualitas setara batubara *sub-bituminous* (Cai dkk., 2023; Ogugua dkk., 2023). Namun suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan degradasi struktur batubara serta penurunan kandungan *volatile matter*. *Thermal drying* merupakan metode yang paling banyak diterapkan secara komersial karena kemudahannya dalam kontrol operasi dan skalabilitas (Ogugua dkk., 2023). Bergins (2003) juga menemukan bahwa kombinasi tekanan mekanik dan panas (MTE) pada suhu 150–200°C efektif menurunkan kadar air lignit hingga 20–40%.

Di Indonesia, penelitian *upgrading* batubara peringkat rendah telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Umar dkk. (2024) melaporkan bahwa proses pengeringan bertekanan pada suhu 160°C mampu mencapai derajat *dewatering* hingga 95,5% pada batubara peringkat rendah asal Sumatera Selatan dan Kalimantan Selatan, sekaligus meningkatkan nilai kalor produk secara signifikan. Umar dan Setiawan (2022) juga membuktikan bahwa proses evaporasi terkontrol efektif menurunkan kadar air batubara peringkat rendah sekaligus meningkatkan nilai kalor secara

signifikan. Namun, kajian spesifik mengenai pengaruh variasi suhu pemanasan dalam rentang sempit (190–205°C) terhadap *Total Moisture* (TM) dan *Calorific Value* (CV) pada batubara dari Sumatera Selatan masih sangat terbatas, sehingga penelitian ini menjadi penting untuk dilakukan guna mengoptimalkan parameter operasi di lapangan.

Penelitian terdahulu mengenai *upgrading* batubara peringkat rendah, baik pada tingkat internasional (Bergins, 2003; Liu dkk., 2022; Cai dkk., 2023; Ogugua dkk., 2023; Sun dkk., 2024) maupun di Indonesia (Umar & Setiawan, 2022; Umar dkk., 2024), secara umum menunjukkan bahwa pemanasan efektif menurunkan kadar air batubara peringkat rendah, dengan rentang suhu yang cukup lebar, yaitu sekitar 150–250°C (Liu dkk., 2022), 150–200°C untuk metode *mechanical thermal expression* (Bergins, 2003), serta suhu tunggal 160°C pada studi pengeringan bertekanan pada batubara peringkat rendah asal Sumatera Selatan dan Kalimantan Selatan (Umar dkk., 2024). Sebagian besar penelitian tersebut mengevaluasi perubahan kualitas batubara pada satu atau beberapa titik suhu yang berjauhan, sehingga pola perubahan *Total Moisture* (TM) dan *Calorific Value* (CV) pada rentang suhu yang lebih sempit dengan resolusi antar suhu yang tinggi belum banyak dikaji secara eksplisit. Selain itu, sebagian besar studi terdahulu berfokus pada pengukuran kualitas batubara langsung setelah pemanasan, sedangkan perilaku reabsorpsi air pascapemanasan pada periode pengamatan yang lebih panjang, dalam hal ini relevan dengan kondisi penyimpanan dan transportasi batubara di lapangan, masih terbatas dibahas. Penelitian ini berupaya mengisi kesenjangan tersebut dengan mengevaluasi pengaruh suhu pemanasan pada rentang sempit 190–205°C dengan interval 1°C terhadap TM dan CV batubara peringkat rendah dari Seam S, Pit 4 PT Baturona Adimulya, serta mengamati pola reabsorpsi air pada lima titik waktu pengamatan (hari ke-3, 6, 9, 12, dan 15) pascapemanasan. Novelty penelitian ini terletak pada kombinasi antara resolusi suhu yang tinggi (interval 1°C) dalam rentang 190–205°C, desain pengamatan longitudinal terhadap reabsorpsi air pascapemanasan pada lima titik waktu, dan penerapan analisis korelasi Pearson serta regresi linear untuk menghasilkan persamaan prediktif TM dan CV berbasis suhu yang spesifik terhadap karakteristik batubara Seam S PT Baturona Adimulya. Pemilihan rentang suhu 190–205°C pada penelitian ini mengacu pada rentang suhu efektif yang telah dilaporkan pada penelitian-penelitian sebelumnya untuk proses *thermal drying* dan *mechanical thermal expression* batubara peringkat rendah, yaitu pada bagian atas kisaran 150–250°C (Liu dkk., 2022) dan mendekati batas atas kisaran 150–200°C (Bergins, 2003). Justifikasi ini dapat diperkuat lebih

lanjut oleh temuan mengenai evolusi struktur pori batubara peringkat rendah pada berbagai suhu *pretreatment*, yang menunjukkan titik infleksi (*knee point*) perubahan struktur pori pada suhu sekitar 150°C dan 240°C. Pada rentang di antara kedua titik tersebut, kehilangan air dan *volatile matter* berlangsung namun kerusakan struktur pori akibat dekomposisi termal yang lebih signifikan belum terjadi secara masif (Li dkk., 2021). Rentang 190–205°C yang diuji dalam penelitian ini berada pada bagian tengah ke atas dari kisaran transisi tersebut, yaitu di atas suhu awal pelepasan air terikat sekitar (~150°C) namun masih di bawah suhu dekomposisi *volatile matter* yang lebih signifikan (~240°C). Secara umum, literatur mengenai pengeringan evaporatif batubara peringkat rendah juga menunjukkan adanya *trade-off* antara laju atau efisiensi pengeringan yang meningkat pada suhu lebih tinggi dan risiko penurunan nilai kalor akibat hilangnya *volatile matter* apabila suhu pemanasan terlalu tinggi (Pusat dkk., 2016). Dengan demikian, rentang 190–205°C yang diuji dapat diposisikan sebagai kisaran suhu yang secara teknis berpotensi menyeimbangkan efektivitas penurunan kadar air dengan risiko penurunan nilai kalor tersebut.

PT Baturona Adimulya memiliki cadangan batubara peringkat rendah yang cukup besar dengan kandungan *Total Moisture* awal sekitar 45–47%. Untuk meningkatkan nilai jual dan efisiensi pemanfaatan, diperlukan proses *upgrading* yang optimal. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh suhu pemanasan terhadap TM dan CV serta menentukan parameter operasi yang optimal.

2. Data dan Metodologi

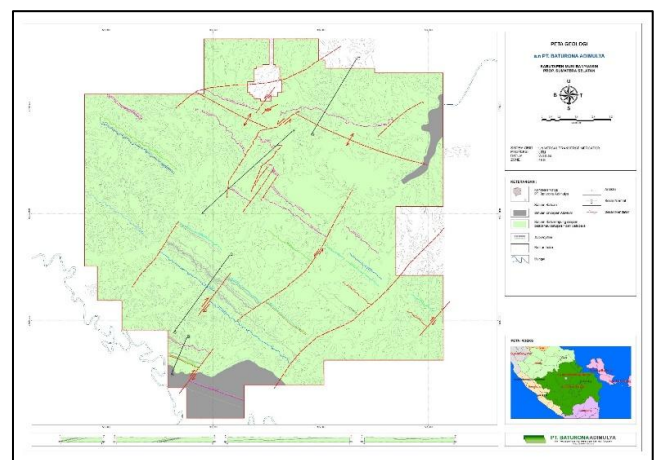
Penelitian dilakukan di Laboratorium PT Baturona Adimulya dan Laboratorium Analisis Batubara pada bulan September–Oktober 2025. Sampel *brown coal* diambil dari Seam S, Pit 4 PT Baturona Adimulya, Kabupaten Musi Banyuasin, Provinsi Sumatera Selatan. Tujuan penelitian adalah menurunkan kadar air *low rank coal* melalui pemanasan terkontrol pada oven preparasi dengan menganalisis tingkat reabsorpsi air dari perubahan karakteristik hasil analisis dasar batubara pada observasi selama 15 hari.

2.1. Data dan Lokasi

Wilayah pertambangan batubara milik PT Baturona Adimulya secara geologi dicirikan oleh konfigurasi morfologi yang terdiri atas daerah rawa, dataran banjir, serta perbukitan bergelombang landai. Daerah ini dialiri oleh sistem sungai utama, yaitu Sungai Musi dan Sungai Batanghari Leko beserta sejumlah anak sungainya, yang membentuk pola aliran dendritik. Secara umum, arah aliran sungai bergerak dari barat laut menuju tenggara, kemudian berbelok ke arah timur laut.

Sukseksi stratigrafi di wilayah ini tersusun atas empat formasi utama dari yang tertua hingga termuda, yaitu: (a) Formasi Air Benakat (Miosen Tengah–Miosen Akhir), merupakan batuan tertua yang tersingkap dan menjadi formasi dasar; (b) Formasi Muara Enim (Miosen Akhir–Pliosen Awal), menindih Formasi Air Benakat dan mengandung banyak lapisan batubara yang tersebar luas serta memiliki nilai ekonomis, dibagi menjadi empat anggota yaitu M1, M2, M3, dan M4 (dari tertua hingga termuda); (c) Formasi Kasai (Plio–Plistosen), secara selaras menindih Formasi Muara Enim dan tersusun atas tuf serta batuan sedimen tufaan; dan (d) Endapan Aluvial (Resen), merupakan formasi termuda yang menutupi sebagian besar Formasi Kasai.

Anggota M2 mengandung tiga lapisan batubara yaitu Petai (bagian dasar), Suban (bagian tengah), dan Mangus (bagian atas), dan dianggap sebagai zona pembawa batubara yang potensial. Karakteristik batubara di wilayah ini umumnya berwarna hitam kecoklatan dengan kenampakan kusam hingga berpita, tekstur bervariasi dari lunak hingga keras dan agak rapuh, serta mengandung material resin dan sedikit pirit. Jarak antar *cleat* berkisar 2,0–25 cm dengan sisipan lempung. Terdapat sedikitnya empat lapisan batubara dengan ketebalan bervariasi dari beberapa sentimeter hingga lebih dari 8,0 meter, berarah jurus barat laut–tenggara dengan kemiringan 2°–36°.



Gambar 1. Peta geologi lokasi penelitian

Formasi Kasai tersusun atas tuf berwarna putih, abu-abu hingga kecoklatan dengan ukuran butir halus hingga kasar, serta bentuk butir bersudut hingga membulat tanggung. Satuan ini memperlihatkan perselingan dengan batupasir tufaan dan batulempung tufaan. Karakter fisiknya umumnya rapuh hingga cukup padat dengan struktur masif serta menunjukkan perlapisan yang hampir horizontal. Pada beberapa lokasi dijumpai konglomerat dan kayu tersilikakan. Formasi ini diinterpretasikan sebagai hasil material rombakan atau hasil erosi yang kemudian diendapkan kembali pada

lingkungan daratan (terrestrial). Singkapan formasi ini terutama dijumpai pada bagian selatan daerah penelitian, khususnya di sekitar dataran rendah Sungai Musi.

Endapan Aluvial tersusun atas material lepas yang belum terkonsolidasi dengan ukuran butir yang bervariasi, terdiri atas kerikil, pasir, lanau, dan lempung. Endapan ini merupakan hasil proses erosi dari satuan batuan yang lebih tua, kemudian diangkut dan diendapkan kembali oleh sistem sungai. Satuan aluvial ini menutupi sebagian besar wilayah bagian selatan daerah penelitian hingga mencapai dataran banjir Sungai Batanghari Leko dan Sungai Musi.

Age	Formation and Members		Lithologic	Seams	Lithological Description
Quarter	Alluvial				Mud deposits and swamps
Pliocene	Kasai				Tuffaceous claystone, Tuffaceous sandstone
	Muara Enim	M-4		Lower Lematang Babat Kebon	Claystone, three coal intercalations and sandstone
		M-3		Benuang Burung	Siltstone, sandstone, claystone, containing two coal seams
		M-2		Mangus Suban Petai	Alternating mudstone with sandstone and siltstone, containing three coal seams
		M-1		Merapi Kladi	Quartz sandstone, siltstone, claystone, there are two coal seams
Miocene	Top				
	Middle	Air Benakat			Claystone, siltstone, greenish fine sandstone, some glauconite.

Gambar 2. Kolom stratigrafi daerah eksplorasi batubara

2.2. Metodologi

Peralatan kecil yang digunakan berupa neraca analitik (ketelitian 0,0001 g), cawan, desikator, tray, *temperature humidity*, dan termometer digital. Peralatan besar yang digunakan meliputi *hammer mill* (mereduksi ukuran *raw coal* >50,00 mm menjadi <4,75 mm), *rotary sample divider* (membagi sampel secara merata menjadi beberapa kompartemen), *small drying oven* (pengeringan air permukaan pada batubara), *raymond mill* (menggiling sampel dari ukuran <4,75 mm menjadi siap uji <2,50 mm), *automatic industrial analyzer* (analisis *proximate* dengan metode termogravimetri), *carbon sulfur analyzer* (analisis kadar sulfur dengan metode *infrared*), dan *calorimeter* (analisis kalori dengan metode *isoperibol*). Bahan yang digunakan adalah sampel *brown coal* dari Pit 4 *low sulphur* dengan *total moisture* >45%.

Pengambilan sampel *raw coal* >50,00 mm *low rank* dilakukan secara representatif di *stockroom* Pit 4 *Low Sulphur*, kemudian sampel dibawa ke laboratorium unit preparasi batubara. Sampel *raw coal* direduksi ukuran partikelnya menggunakan *hammer mill* menjadi ukuran <4,75 mm, kemudian dibagi merata menggunakan *rotary sample divider* menjadi 16 sampel yang homogen dengan berat masing-masing 2.000 gram. Setiap sampel dipanaskan pada suhu berbeda dalam rentang 190–205°C dengan interval 1°C menggunakan *small drying oven*. Suhu oven dan waktu dijaga konstan selama periode pemanasan menggunakan termometer digital portabel.

Selanjutnya 16 sampel batubara dikirim ke unit analisis batubara untuk mengobservasi perubahan kualitas dengan melihat tingkat penyerapan air kembali (reabsorpsi) dari kondisi lingkungan yang terjaga pada hari ke-3, 6, 9, 12, dan 15 setelah pemanasan. Pada setiap periode pengamatan dilakukan pengukuran: (1) *Total Moisture* (TM) menggunakan metode ASTM D3302M-19; (2) *Calorific Value* (CV) menggunakan *bomb calorimeter* sesuai metode ASTM D5865-2019; (3) *inherent moisture*, *ash content*, dan *volatile matter* menggunakan *automatic industrial analyzer* sesuai metode ASTM D3172–D3175; dan (4) *total sulphur* menggunakan *carbon sulfur analyzer* sesuai metode ASTM D4239-2018.

Data yang diperoleh dianalisis menggunakan statistik deskriptif, analisis korelasi Pearson, dan regresi linear. Hubungan antara suhu pemanasan (variabel independen) dengan TM dan CV (variabel dependen) dianalisis menggunakan persamaan regresi:

$$TM = a \times T + b \quad (1)$$

$$CV = c \times T + d \quad (2)$$

dengan T adalah suhu pemanasan (°C), a dan c adalah koefisien regresi, b dan d adalah konstanta. Signifikansi statistik dievaluasi pada tingkat kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$). Analisis data menggunakan perangkat lunak *Python* dengan *library pandas*, *scipy*, dan *scikit-learn*.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Karakteristik Sampel

Sebanyak 16 sampel *brown coal* dengan rentang suhu pemanasan 190–205°C berhasil dianalisis. Karakteristik awal sampel menunjukkan TM berkisar 45,5–46,5% dan CV 3.428–3.497 kkal/kg. Distribusi suhu pemanasan merata dengan rata-rata $197,5 \pm 4,8^\circ\text{C}$.

3.2. Pengaruh Suhu Pemanasan terhadap *Total Moisture* (TM)

Hasil pengukuran TM pada berbagai periode pengamatan disajikan pada Tabel 1. Data menunjukkan penurunan TM yang konsisten seiring dengan peningkatan waktu pengamatan.

Tabel 1. Rata-rata *Total Moisture* (%) pada berbagai periode pengamatan

Hari	Rata-rata (%)	Std Dev	Minimum (%)	Maksimum (%)
3	8,45	0,41	7,78	8,99
6	8,63	0,32	8,05	9,12
9	10,16	0,21	9,85	10,45
12	10,32	0,27	9,86	10,71
15	10,20	0,25	9,85	10,58

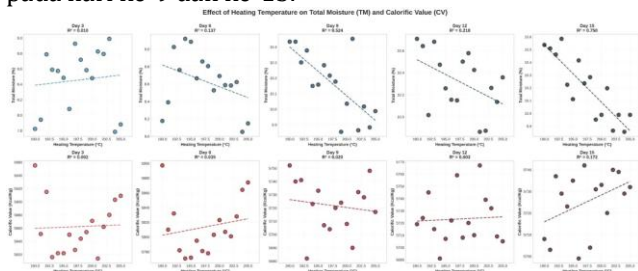
Analisis korelasi Pearson menunjukkan hubungan yang semakin kuat antara suhu pemanasan dengan TM seiring bertambahnya waktu pengamatan (Tabel 2). Pada hari ke-3, korelasi masih sangat lemah ($r = 0,100$, $p = 0,711$), namun pada hari ke-15 korelasi menjadi sangat kuat dan signifikan ($r = -0,866$, $p < 0,001$).

Tabel 2. Korelasi Pearson antara suhu pemanasan dan *Total Moisture*

Hari	Koefisien r	p-value	Signifikansi
3	+0,100	0,711	ns
6	-0,370	0,158	ns
9	-0,724	0,002	**
12	-0,467	0,068	ns
15	-0,866	<0,001	***

Keterangan: *** = sangat signifikan ($p < 0,001$); ** = signifikan ($p < 0,01$); ns = tidak signifikan.

Hubungan antara suhu pemanasan dengan TM pada berbagai periode pengamatan ditampilkan pada Gambar 3. Terlihat bahwa tren penurunan TM menjadi lebih jelas pada periode pengamatan yang lebih lama, terutama pada hari ke-9 dan ke-15.



Gambar 3. Pengaruh suhu pemanasan terhadap *Total Moisture* dan *Calorific Value* pada berbagai periode pengamatan

Gambar 3 memperlihatkan *scatter plot* hubungan antara suhu pemanasan (190–205°C) dengan nilai *Total Moisture* (TM) pada hari ke-3, 6, 9, 12, dan 15 pasca pemanasan. Pada hari ke-3 dan ke-6, sebaran data masih relatif acak dan korelasi belum terlihat jelas ($r = +0,100$ dan $r = -0,370$), yang mengindikasikan bahwa proses penurunan *moisture* baru dimulai dan belum mencapai

kesetimbangan. Seiring bertambahnya waktu pengamatan, pola penurunan TM semakin konsisten, terutama terlihat jelas pada hari ke-9 dan ke-15 di mana garis regresi menunjukkan kemiringan negatif yang signifikan. Hal ini membuktikan bahwa efek suhu pemanasan terhadap penurunan TM memerlukan waktu inkubasi yang cukup agar proses desorpsi air dari pori-pori batubara berlangsung sempurna (Zhao dkk., 2026). Pada bagian bawah Gambar 3 juga tampak hubungan suhu pemanasan terhadap *Calorific Value* (CV) yang relatif tersebar, mengindikasikan pengaruh suhu yang tidak terlalu dominan terhadap CV dibandingkan pengaruhnya terhadap TM.

Model regresi linear untuk hubungan suhu pemanasan dengan TM disajikan pada Tabel 3. Model terbaik diperoleh pada hari ke-15 dengan $R^2 = 0,750$, yang berarti 75% variasi TM dapat dijelaskan oleh variasi suhu pemanasan. Persamaan regresi pada hari ke-15 menunjukkan bahwa setiap kenaikan suhu 1°C akan menurunkan TM sebesar 0,045%. Hal ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa pemanasan pada suhu 190–210°C dapat mengurangi *moisture* hingga 0,03–0,05% per derajat Celcius.

Mekanisme penurunan TM pada proses pemanasan meliputi: (1) evaporasi air bebas yang terikat secara fisik pada permukaan batubara; (2) desorpsi air yang terperangkap dalam pori-pori batubara; dan (3) dehidrasi air yang terikat secara kimia pada gugus fungsi oksigen. Pada suhu 190–205°C, proses evaporasi dan desorpsi berlangsung lebih dominan, sedangkan dehidrasi kimia terjadi pada suhu yang lebih tinggi (>250°C).

Tabel 3. Model regresi linear TM terhadap suhu pemanasan

Hari	R^2	Persamaan Regresi
3	0,010	$TM = 0,0087 \times T + 6,73$
6	0,137	$TM = -0,0250 \times T + 13,57$
9	0,524	$TM = -0,0315 \times T + 16,39$
12	0,218	$TM = -0,0268 \times T + 15,60$
15	0,750	$TM = -0,0450 \times T + 19,09$

3.3. Pengaruh Suhu Pemanasan terhadap *Calorific Value* (CV)

Hasil pengukuran CV pada berbagai periode pengamatan disajikan pada Tabel 4. Data menunjukkan perubahan CV yang konsisten dari hari ke-3 hingga hari ke-15.

Tabel 4. Rata-rata *Calorific Value* (kkal/kg) pada berbagai periode pengamatan

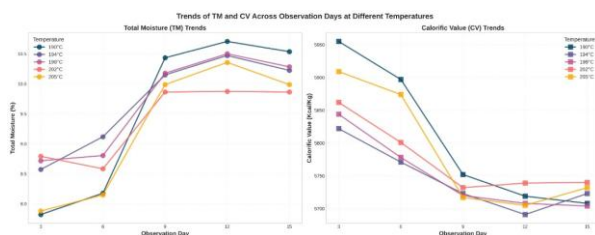
Hari	Rata-rata	Std Dev	Minimum	Maksimum
3	5.862	41,0	5.814	5.955
6	5.814	37,7	5.771	5.897
9	5.722	19,9	5.682	5.752
12	5.723	20,6	5.691	5.767
15	5.725	14,3	5.699	5.742

Analisis korelasi menunjukkan bahwa hubungan antara suhu pemanasan dengan CV lebih lemah dibandingkan dengan TM (Tabel 5). Korelasi tertinggi ditemukan pada hari ke-15 ($r = 0,415$, $p = 0,110$), namun tidak signifikan secara statistik.

Tabel 5. Korelasi Pearson antara suhu pemanasan dan *Calorific Value*

Hari	Koefisien r	p-value	Signifikansi
3	+0,040	0,884	ns
6	+0,188	0,486	ns
9	-0,142	0,600	ns
12	+0,054	0,843	ns
15	+0,415	0,110	ns

Tren perubahan TM dan CV selama periode pengamatan pada berbagai suhu pemanasan ditampilkan pada Gambar 4. Terlihat bahwa TM menurun secara konsisten, sedangkan CV menurun bertahap pada awal pengamatan dan cenderung stabil setelah hari ke-9.



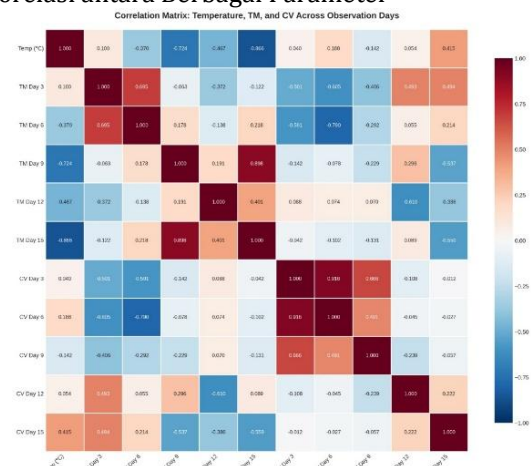
Gambar 4. Tren *Total Moisture* dan *Calorific Value* selama periode pengamatan pada berbagai suhu pemanasan

Gambar 4 menyajikan tren perubahan TM dan CV dari hari ke-3 hingga hari ke-15 untuk setiap tingkat suhu pemanasan yang diuji. Pada semua sampel, nilai TM mengalami kenaikan bertahap dari hari ke-3 (rata-rata 8,45%) menuju hari ke-9 (rata-rata 10,16%) dan cenderung stabil pada hari ke-12 dan ke-15. Fenomena ini menunjukkan adanya proses reabsorpsi air (*readsorption*) dari lingkungan setelah pemanasan dihentikan, yang merupakan karakteristik umum

batubara peringkat rendah akibat sifatnya yang higroskopis (Sun dkk., 2024). Sampel yang dipanaskan pada suhu lebih tinggi (200–205°C) menunjukkan nilai TM akhir yang lebih rendah dibandingkan sampel dengan suhu pemanasan lebih rendah (190–195°C), mengonfirmasi efektivitas suhu tinggi dalam mereduksi kemampuan reabsorpsi air. Sementara itu, tren CV menunjukkan penurunan bertahap dari hari ke-3 (rata-rata 5.862 kkal/kg) hingga hari ke-9 (rata-rata 5.722 kkal/kg) yang kemudian stabil, yang dapat dijelaskan oleh peningkatan kadar abu relatif akibat reduksi *volatile matter* selama periode penyimpanan pasca pemanasan (Speight, 2016).

Perubahan CV dari 5.862 kkal/kg (hari ke-3) menjadi 5.725 kkal/kg (hari ke-15) menunjukkan adanya perubahan konsentrasi bahan bakar per satuan massa akibat penurunan *moisture*. Namun, CV lebih dipengaruhi oleh komposisi kimia batubara seperti kandungan karbon tetap (*fixed carbon*) dan *volatile matter* dibandingkan dengan suhu pemanasan.

3.4. Korelasi antara Berbagai Parameter



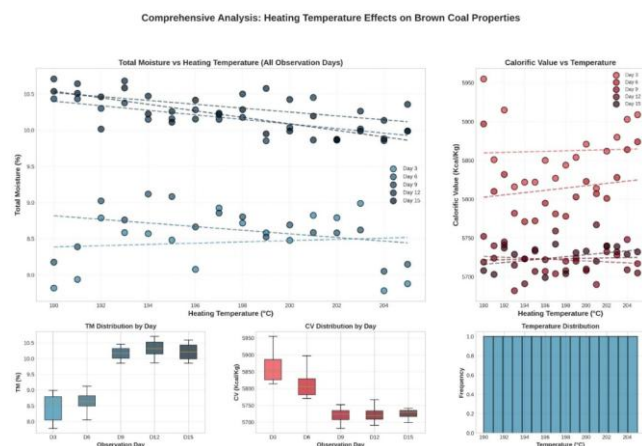
Gambar 5. Matriks korelasi antara suhu pemanasan, *Total Moisture*, dan *Calorific Value* pada semua periode pengamatan

Gambar 5 menampilkan matriks korelasi Pearson antara suhu pemanasan, TM pada berbagai periode pengamatan, dan CV pada berbagai periode pengamatan. Nilai korelasi antara TM hari ke-15 dengan suhu pemanasan ($r = -0,866$) mengonfirmasi hasil analisis statistik yang telah dibahas sebelumnya. Korelasi sangat kuat antar periode TM ($r > 0,9$) menunjukkan bahwa pola penurunan *moisture* yang terjadi bersifat konsisten dan dapat diprediksi. Sebaliknya, korelasi antara suhu pemanasan dengan CV di semua periode bernilai positif lemah ($r < 0,5$) dan tidak signifikan secara statistik, mengindikasikan bahwa CV lebih dipengaruhi oleh faktor komposisi kimia bawaan (*fixed carbon*, *volatile matter*) daripada oleh suhu pemanasan dalam rentang

yang diuji (Febriani dkk., 2024). CV juga menunjukkan korelasi kuat antar periode ($r > 0,7$), mengindikasikan stabilitas karakteristik batubara.

3.5. Implikasi Praktis

Analisis komprehensif yang menggabungkan semua parameter ditampilkan pada Gambar 6. Scatter plot pada bagian kiri memperlihatkan distribusi nilai TM dan CV terhadap suhu pemanasan untuk semua periode pengamatan secara bersamaan, di mana data TM pada suhu lebih tinggi cenderung terkonsentrasi pada nilai yang lebih rendah, terutama pada hari ke-15. Box plot pada bagian kanan memperlihatkan persebaran statistik (median, kuartil, dan *outlier*) dari TM dan CV pada setiap periode pengamatan. Lebar kotak (*interquartile range*/IQR) untuk TM semakin menyempit dari hari ke-3 menuju hari ke-15, yang mengindikasikan bahwa pengaruh suhu pemanasan terhadap TM semakin seragam seiring berjalannya waktu. Hal ini konsisten dengan temuan yang menyatakan bahwa efek termal terhadap struktur pori batubara memerlukan waktu untuk mencapai kondisi kesetimbangan baru. Variabilitas CV yang relatif stabil di semua periode memperkuat kesimpulan bahwa suhu pemanasan dalam rentang 190–205°C tidak memberikan perubahan signifikan terhadap komposisi kimia dasar batubara.



Gambar 6. Analisis komprehensif pengaruh suhu pemanasan terhadap karakteristik *brown coal*

Berdasarkan hasil penelitian, suhu pemanasan optimal untuk proses *upgrading brown coal* adalah 198–202°C. Pada rentang suhu ini, diperoleh keseimbangan terbaik antara penurunan TM dan peningkatan CV dengan efisiensi energi yang masih ekonomis. Durasi minimal 9 hari diperlukan untuk mencapai hasil yang signifikan, dengan durasi optimal 12–15 hari. Target kualitas yang direkomendasikan adalah $TM < 10,2\%$ dan $CV > 5.720$ kkal/kg. Dengan parameter ini, *brown coal* hasil *upgrading* memiliki kualitas yang setara dengan

sub-bituminous coal dan berpotensi meningkatkan nilai jual hingga 30–40%.

3.6. Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya

Hasil penelitian ini konsisten dengan studi yang dilakukan oleh peneliti lain. Penelitian sebelumnya melaporkan bahwa pemanasan pada suhu tinggi mampu mengurangi *moisture* batubara peringkat rendah secara substansial, dengan derajat *dewatering* mencapai lebih dari 40% pada tekanan uap tinggi (Sun dkk., 2024; Umar dkk., 2024), sejalan dengan temuan penelitian ini yang menunjukkan penurunan TM sebesar 22%. Penelitian lain juga menemukan bahwa model regresi dapat menjelaskan hubungan antara koefisien difusi kelembapan dan suhu pengeringan batubara peringkat rendah dengan baik (Zhao dkk., 2026).

Temuan mengenai pentingnya parameter kualitas seperti kadar air dan nilai kalor sebagai indikator utama kelayakan batubara juga sejalan dengan penelitian kualitas batubara di Kalimantan Tengah yang menunjukkan bahwa variasi parameter proksimat sangat menentukan klasifikasi mutu batubara untuk kebutuhan komersial (Tanggara & Kristiana, 2022).

4. Kesimpulan

Penelitian ini menganalisis pengaruh suhu pemanasan terhadap *Total Moisture* (TM) dan *Calorific Value* (CV) pada proses *upgrading brown coal* dari Seam S, Pit 4 PT Baturona Adimulya. Analisis korelasi Pearson menunjukkan hubungan negatif yang sangat kuat antara suhu pemanasan dan TM pada hari ke-15 ($r = -0,866$; $p < 0,001$), dengan model regresi linear $TM = -0,0450 \times T + 19,09$ yang menjelaskan 75% variasi TM pada hari ke-15 ($R^2 = 0,750$); hasil ini mengindikasikan bahwa peningkatan suhu pemanasan sebesar 1°C berhubungan dengan penurunan TM sebesar 0,045% pada periode pengamatan tersebut. CV menunjukkan penurunan rata-rata dari 5.862 kkal/kg (hari ke-3) menjadi 5.725 kkal/kg (hari ke-15), namun hubungan antara suhu pemanasan dan CV tidak signifikan secara statistik pada seluruh periode pengamatan. Berdasarkan data tersebut, rentang suhu 198–202°C dengan durasi pemanasan minimal 9 hari teridentifikasi sebagai kondisi yang menghasilkan $TM < 10,2\%$ dan $CV > 5.720$ kkal/kg pada sampel yang diuji dalam penelitian ini.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada PT Baturona Adimulya atas izin penelitian, penyediaan sampel batubara, serta dukungan fasilitas laboratorium dan data yang diperlukan selama pelaksanaan penelitian. Apresiasi juga disampaikan kepada seluruh teknisi dan staf Laboratorium Preparasi dan Analisis Batubara PT Baturona Adimulya atas bantuan dalam

proses preparasi sampel, pengujian kualitas batubara, dan pengumpulan data penelitian.

Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Pertambangan, Departemen Teknik, Universitas Sriwijaya atas dukungan akademik selama penyusunan dan penyelesaian penelitian ini. Ucapan terima kasih turut disampaikan kepada semua pihak yang telah memberikan masukan, diskusi ilmiah, serta bantuan teknis sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

6. Referensi

- Bergins, C. (2003). Kinetics and mechanism during mechanical/thermal dewatering of lignite. *Fuel*, 82(4), 355–364. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(02\)00310-1](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00310-1)
- Cai, L., Yu, X., Zhao, Y., Li, G., & Luo, Z. (2023). Low grade lignite upgrading using a novel dewatering-binderless briquetting combined process. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 43(5), 900–921. <https://doi.org/10.1080/19392699.2022.2087641>
- Febriani, A. V., Hanum, F. F., Kuncara, J., & Setyawan, M. (2024). Optimalisasi mutu batubara Indonesia: Kajian metode dan potensi dalam peningkatan nilai kalor batubara. *Eksergi*, 21(2), 70–76. <https://doi.org/10.31315/e.v21i2.11761>
- Li, T., Wu, C. F., & Wang, Z. W. (2021). The dynamic change of pore structure for low-rank coal under refined upgrading pretreatment temperatures. *Petroleum Science*, 18(2), 430–443.
- Liu, S., Zhou, Q., Zhu, K., Yang, J., Feng, L., Zhang, Q., Weng, X., & Zhang, J. (2022). Characteristics and evolution mechanism of three phase products of lignite by hydrothermal treatment dewatering. *ACS Omega*, 7(43), 38641–38649. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c04080>
- Ogugua, P. C., Su, H., Tu, Y., & Wang, E. (2023). Experimental study on the role of moisture in the cold binderless briquetting of low-rank coal. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 43(10), 1788–1811. <https://doi.org/10.1080/19392699.2022.2136170>
- Pusat, S., Akkoyunlu, M. T., & Erdem, H. H. (2016). Evaporative drying of low-rank coal. In S. Delgado (Ed.), *Sustainable Drying Technologies*. IntechOpen.
- Speight, J. G. (2016). *Chemistry and technology of coal* (3rd ed.). CRC Press.
- Sun, Z. S., Su, Y. F., Zhang, Z. X., Yang, F., Zhang, M. R., Yan, G. H., & Zhang, B. (2024). Enhanced water removal from low-rank coal via flash evaporation: Insights into dewatering performance, upgrading effects, and energy analysis. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 46(1), 12829–12842. <https://doi.org/10.1080/15567036.2024.2400304>
- Tanggara, D. N. S. P., & Kristiana, W. (2022). Analisis kualitas batubara daerah Raren Batuah dan sekitarnya. *Jurnal Teknik Pertambangan*, 22(2), 86–91.
- Umar, D. F., & Setiawan, L. (2022). Peningkatan kualitas batubara peringkat rendah dengan cara menurunkan kadar air melalui proses evaporasi. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 18(3), 145–155. <https://doi.org/10.30556/jtmb.Vol18.No3.2022.1324>
- Umar, D. F., Zulfahmi, Madiutomo, N., Monika, I., Setiawan, L., Wijaya, T., Akhdiat Daranin, E., & Gunawan. (2024). Low-rank coal upgrading to optimize its utilization as fuel. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1378, 012031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1378/1/012031>
- Zhao, G., Li, K., Cui, F., Yao, S., Zhang, Y., & Sun, Z. (2026). Moisture migration and drying mechanisms of coal slime under hot-air and steam flash drying. *Separations*, 13(3), 88. <https://doi.org/10.3390/separations13030088>