

**Ranah Research**

E-ISSN: 2655-0865

Journal of Multidisciplinary Research and Development

082170743613

ranahresearch@gmail.com

<https://jurnal.ranahresearch.com>DOI: <https://doi.org/10.38035/rrj.v8i5><https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Analisis Pengaruh Fixed Carbon terhadap Kehilangan Massa Batubara pada Tambang Air Laya Menggunakan Model Tungku Pembakaran Sederhana di PT Bukit Asam Tbk

Debby Meiza Asridza¹, Maulana Yusuf², Restu Juniah³¹Program Studi Magister Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, Sumatera Selatan, Indonesia.²Program Studi Magister Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, Sumatera Selatan, Indonesia.³Program Studi Magister Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, Sumatera Selatan, Indonesia.Corresponding Author: meizadebby@gmail.com¹

Abstract: Coal storage in stockpiles is prone to spontaneous combustion, which can cause mass loss, declining energy quality, and potential fire hazards. This phenomenon not only poses occupational safety risks but also causes significant economic losses due to coal mass loss and reduced calorific value. This study used a quantitative descriptive method as an instrument to produce a systematic, evidence-based description of the coal spontaneous combustion phenomenon, and to evaluate the effect of fixed carbon on changes in coal mass before and after burning. The samples used had calorific values of ± 4.200 Kcal/Kg, ± 4.900 Kcal/Kg, ± 5.300 Kcal/Kg, and ± 7.100 Kcal/Kg, with kerosene used as an initial trigger in the combustion process, allowing the spontaneous combustion phenomenon to be simulated and observed under controlled conditions. The artificial spontaneous combustion process lasted 6 hours, with temperature measurements taken every 30 minutes. The results showed that coal with a low calorific value (± 4.200 Kcal/Kg) had the lowest average fixed carbon content, at 39,86%, and this value increased progressively with increasing calorific value. The higher the proportion of fixed carbon in the coal composition, the lower the mass loss, a pattern systematically confirmed across the entire research dataset. Regular temperature monitoring should be routinely conducted on coal stockpiles, particularly during the first 90 minutes of storage, as this period exhibits the most significant temperature increase.

Keyword: Coal Mass, Fixed Carbon, Spontaneous Combustion

Abstrak: Penyimpanan batubara di *stockpile* rentan mengalami swabakar yang dapat menyebabkan kehilangan massa batubara, penurunan kualitas energi, serta potensi bahaya kebakaran. Peristiwa ini bukan hanya menimbulkan risiko keselamatan kerja, namun juga menyebabkan kerugian ekonomi yang signifikan akibat hilangnya massa batubara dan penurunan nilai kalor. Penelitian ini menggunakan metode deskriptif kuantitatif sebagai instrumen untuk menghasilkan deskripsi yang sistematis dan berbasis bukti terhadap fenomena swabakar batubara, serta mengevaluasi pengaruh *fixed carbon* terhadap perubahan

massa batubara sebelum dan sesudah terbakar. Sampel yang digunakan memiliki nilai kalori ± 4.200 Kkal/Kg, ± 4.900 Kkal/Kg, ± 5.300 Kkal/Kg, dan ± 7.100 Kkal/Kg, dengan minyak tanah digunakan sebagai pemicu awal dalam proses pembakaran, sehingga fenomena swabakar dapat disimulasikan dan diamati secara terkontrol. Proses swabakar buatan berlangsung selama 6 jam dengan pengukuran suhu setiap 30 menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa batubara dengan nilai kalori rendah (± 4.200 Kkal/Kg) memiliki rata-rata kandungan *fixed carbon* terendah, yaitu 39,86%, dan nilai ini meningkat secara progresif seiring meningkatnya nilai kalori batubara. Semakin tinggi proporsi *fixed carbon* dalam komposisi batubara, semakin rendah kehilangan massanya, suatu pola yang secara sistematis terkonfirmasi pada seluruh rangkaian data penelitian. Pemantauan temperatur secara berkala perlu dilakukan secara rutin pada tumpukan batubara, khususnya pada 90 menit pertama penyimpanan, karena pada periode tersebut kenaikan temperatur terjadi paling signifikan.

Kata Kunci: Massa Batubara, *Fix Carbon*, Swabakar

PENDAHULUAN

Batubara adalah salah satu sumber energi fosil utama di banyak negara, termasuk Indonesia. Berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM), lebih dari 60% pembangkit listrik di Indonesia masih menggunakan batubara sebagai sumber energi utama. Tingginya ketergantungan terhadap batubara ini sejalan dengan meningkatnya volume produksi, penyimpanan, dan mobilisasi batubara di berbagai wilayah pertambangan. Namun demikian, aktivitas penyimpanan batubara dalam jumlah besar, khususnya di stockpile, menghadapi berbagai tantangan teknis dan keselamatan. Dalam penyimpanan batubara khususnya di stockpile rentan mengalami swabakar atau spontaneous combustion yang dapat menyebabkan kehilangan massa batubara, penurunan kualitas energi serta potensi bahaya kebakaran. Peristiwa ini bukan hanya menimbulkan risiko keselamatan kerja, namun juga menyebabkan kerugian ekonomi yang signifikan akibat hilangnya massa batubara dan penurunan nilai kalor.

Secara umum, kualitas batubara ditentukan oleh beberapa parameter utama, antara lain, *moisture*, sulfur, zat volatil, serta *fixed carbon*. Di antara parameter-parameter tersebut, *fixed carbon* merupakan salah satu indikator yang mencerminkan potensi energi batubara secara langsung. Batubara dengan kandungan *fixed carbon* yang tinggi umumnya memiliki titik nyala yang lebih tinggi dan ketahanan yang lebih baik terhadap proses oksidasi lambat (Lee dkk., 2020). Kondisi ini menjadikan *fixed carbon* sebagai salah satu parameter penting dalam memahami mekanisme swabakar serta dalam upaya mitigasi risiko kehilangan batubara di stockpile.

Model tungku telah banyak digunakan dengan pendekatan yang umumnya berfokus pada analisis termal, kinetika oksidasi, dan pengaruh ukuran partikel. Namun, penelitian yang secara kuantitatif mengevaluasi laju kehilangan massa yang dikorelasikan dengan variasi kandungan *fixed carbon* pada *stockpile* batubara komersial masih terbatas. Penelitian ini bertujuan mengisi kesenjangan tersebut dengan mengevaluasi karakteristik pembakaran dan laju kehilangan massa batubara melalui model tungku pembakaran sederhana menggunakan variasi sampel batubara dengan nilai kalori ± 4.200 Kkal/Kg, ± 4.900 Kkal/Kg, ± 5.300 Kkal/Kg, dan ± 7.100 Kkal/Kg. Model tungku sederhana ini memungkinkan simulasi proses pembakaran dalam skala laboratorium dengan kondisi yang relatif terkontrol, sehingga pengaruh parameter kualitas batubara khususnya kandungan *fixed carbon* terhadap kehilangan massa batubara dapat diamati secara langsung. Penelitian ini diharapkan mampu mengungkap korelasi kuantitatif antara kadar *fixed carbon* dengan persentase kehilangan massa batubara dari berbagai sampel di Stockpile 1, Tambang Air Laya, sehingga dapat

dimanfaatkan sebagai acuan dalam manajemen kualitas batubara dan peningkatan efisiensi operasional perusahaan.

METODE

Sampel yang digunakan terdiri dari beberapa nilai kalori ± 4.200 Kkal/Kg, ± 4.900 Kkal/Kg, ± 5.300 Kkal/Kg, ± 7.100 Kkal/Kg. Setelah sampel batubara dikumpulkan dari lapangan, langkah berikutnya adalah melakukan proses sizing untuk menyeragamkan ukuran partikel. Dalam penelitian ini digunakan ayakan tunggal berukuran mesh 1 inci. Batubara diayak hingga diperoleh sampel sebanyak 10 kg dengan ukuran seragam. Sampel yang telah diambil akan dianalisis menggunakan metode proksimat untuk mengukur kadar air, zat volatil, abu, dan karbon tetap.

Proses simulasi swabakar dilaksanakan pada di dalam drum besi yang telah dimodifikasi dengan diameter 290 mm dan tinggi 800mm yang berisi sampel batubara sebanyak 10 Kg, dengan menggunakan minyak tanah 1liter sebagai katalisator awal pembakaran. Pengukuran temperatur permukaan batubara menggunakan termometer inframerah yang dilakukan selama 6 jam, dengan interval pencatatan setiap 30 menit. Selama proses swabakar berlangsung, suhu dan massa sampel diukur setiap 30 menit untuk menentukan besaran kehilangan massa batubara.

Setelah data terkumpul, dilakukan analisis statistik terhadap sampel batubara dengan nilai kalori ± 4.200 Kkal/Kg, ± 4.900 Kkal/Kg, ± 5.300 Kkal/Kg, ± 7.100 Kkal/Kg untuk mengidentifikasi pola serta hubungan antara variabel seperti temperatur, massa batubara terbakar, dan durasi swabakar. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui perubahan massa batubara akibat peningkatan temperatur dan lamanya proses swabakar.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa batubara dengan nilai kalor rendah ± 4.200 Kkal/kg memiliki rata-rata kandungan *fixed carbon* terendah sebesar 39,86%, dan nilai ini meningkat secara progresif seiring dengan meningkatnya nilai kalori batubara.

Penelitian ini menunjukkan bahwa batubara dengan nilai kalor rendah ± 4.200 Kkal/kg memiliki rata-rata kandungan *fixed carbon* terendah sebesar 39,86%, dan nilai ini meningkat secara progresif seiring dengan meningkatnya nilai kalori batubara. Batubara berkalori ± 4.900 Kkal/kg mencatat rata-rata *fixed carbon* sebesar 42,26%, diikuti oleh batubara berkalori ± 5.300 Kkal/kg dengan rata-rata 45,58%, dan batubara berkalori tinggi ± 7.100 Kkal/kg menunjukkan kandungan *fixed carbon* tertinggi dengan rata-rata 54,82%.

Tabel 1. Hasil Analisis Proksimat Batubara Kalori 4.200 Kkal/Kg

Batubara Kalori 4.200 Kkal/Kg										
Sampel ke-	TM (%Ar)	IM (%Adb)	Ash (%Adb)	Ash (%Ar)	VM (%Adb)	VM (%Ar)	FC (%Adb)	FC (%Ar)	GCV (%Adb)	GCV (%Ar)
1	36,40	15,10	3,80	2,85	40,50	30,34	40,70	30,49	5,624	4,213
2	36,70	15,20	3,60	2,69	41,20	30,75	40,00	29,86	5,612	4,189
3	35,80	13,30	4,40	3,26	42,40	31,40	39,90	29,55	5,702	4,222
4	37,60	15,40	3,80	2,80	41,90	30,90	38,90	28,69	5,551	4,094
5	36,70	16,60	1,70	1,29	41,90	31,80	39,80	30,21	5,614	4,261
$\bar{x}$	36,64	15,12	3,46	2,58	41,58	31,04	39,86	29,76	5,621	4,196

Tabel 2. Hasil Analisis Proksimat Batubara Kalori 4.900 Kkal/Kg

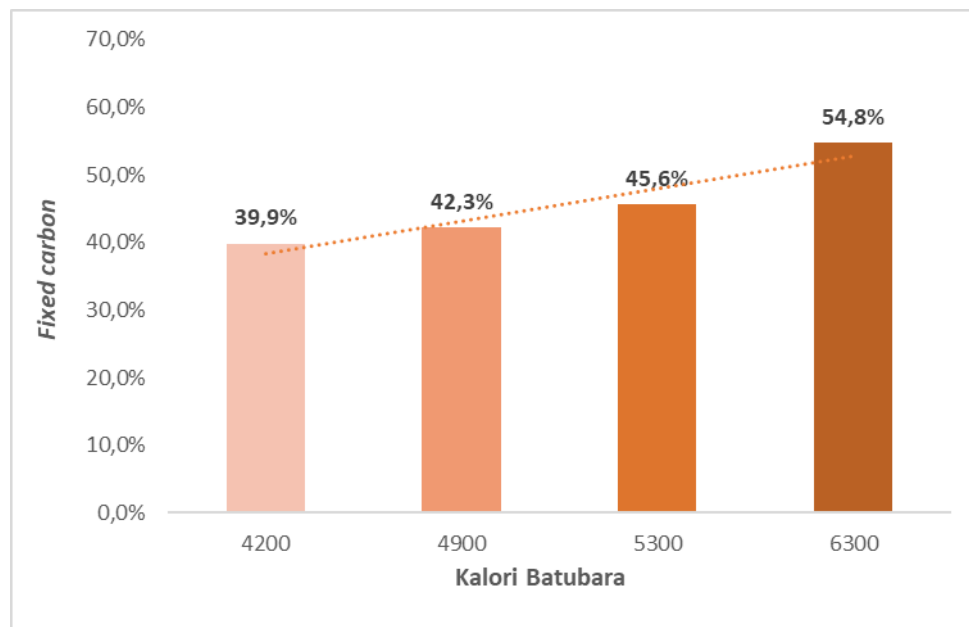
Batubara Kalori 4.900 Kkal/Kg										
Sampel ke-	TM (%Ar)	IM (%Adb)	Ash (%Adb)	Ash (%Ar)	VM (%Adb)	VM (%Ar)	FC (%Adb)	FC (%Ar)	GCV (%Adb)	GCV (%Ar)
1	28,70	15,20	3,00	2,52	40,40	33,97	41,40	34,81	5,791	4,869
2	29,10	15,20	2,10	1,76	40,60	33,95	42,10	35,20	5,822	4,868
3	31,00	16,70	1,00	0,83	39,70	32,88	42,60	35,29	5,876	4,867
4	28,90	15,00	1,60	1,34	40,30	33,71	43,10	36,05	5,892	4,928
5	29,50	14,60	7,70	6,36	41,60	34,34	42,10	34,75	5,963	4,923
$\bar{x}$	29,44	15,34	3,08	2,56	40,52	33,77	42,26	35,22	5,869	4,891

Tabel 3. Hasil Analisis Proksimat Batubara Kalori 5.300 Kkal/Kg

Batubara Kalori 5.300 Kkal/Kg										
Sampel ke-	TM (%Ar)	IM (%Adb)	Ash (%Adb)	Ash (%Ar)	VM (%Adb)	VM (%Ar)	FC (%Adb)	FC (%Ar)	GCV (%Adb)	GCV (%Ar)
1	25,40	9,90	1,40	1,16	42,30	35,02	46,40	38,42	6,342	5,251
2	25,50	10,40	1,50	1,25	42,10	35,01	46,00	38,25	6,353	5,282
3	24,90	10,60	1,50	1,26	42,40	35,62	45,50	38,22	6,339	5,325
4	26,80	11,90	1,60	1,33	41,80	34,73	44,70	37,14	6,402	5,319
5	26,80	12,40	1,10	0,92	41,20	34,43	45,30	37,85	6,395	5,344
$\bar{x}$	25,88	11,04	1,42	1,18	41,96	34,96	45,58	37,98	6,366	5,304

Tabel 4. Hasil Analisis Proksimat Batubara Kalori 7.100 Kkal/Kg

Batubara Kalori 7.100 Kkal/Kg										
Sampel ke-	TM (%Ar)	IM (%Adb)	Ash (%Adb)	Ash (%Ar)	VM (%Adb)	VM (%Ar)	FC (%Adb)	FC (%Ar)	GCV (%Adb)	GCV (%Ar)
1	6,90	4,20	5,20	5,05	40,40	39,26	50,20	48,79	7,371	7,163
2	6,10	0,80	8,30	7,86	32,30	30,57	58,60	55,47	7,556	7,152
3	8,40	2,10	4,50	4,21	38,50	36,02	54,90	51,37	7,639	7,147
4	6,40	1,40	6,30	5,98	36,90	35,03	55,40	52,59	7,534	7,152
5	6,20	1,40	6,90	6,56	36,70	34,91	55,00	52,32	7,533	7,166
$\bar{x}$	6,80	1,98	6,24	5,93	36,96	35,16	54,82	52,11	7,527	7,156



Gambar 1. Korelasi Nilai Kalor Batubara dan *Fixed Carbon*

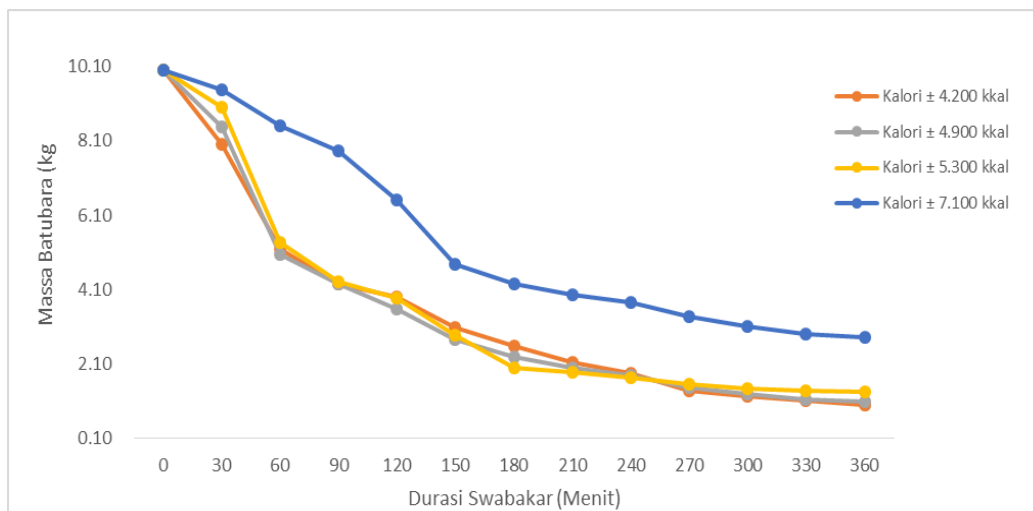
Pola kenaikan yang konsisten membuktikan bahwa nilai kalor berbanding lurus dengan kandungan *fixed carbon* batubara. Batubara berkalori rendah (± 4.200 Kkal/kg) secara konsisten memiliki kandungan *fixed carbon* di bawah 40%, sedangkan batubara berkalori tinggi (± 7.100 Kkal/kg) menunjukkan kandungan *fixed carbon* yang melampaui 50%. Hubungan linier ini menegaskan bahwa semakin tinggi nilai kalor suatu batubara, semakin besar pula kandungan *fixed carbon*, yang pada akhirnya berkontribusi pada peningkatan resistensi batubara terhadap proses oksidasi dan pembakaran spontan.

Hasil pengujian ini kemudian dilakukan penelitian lanjutan menggunakan model tungku sederhana sebagai simulasi swabakar, dengan memasukkan sample kedalam drum yang dipicu dengan minyak tanah pada proses pembakaran.

Kehilangan massa batubara mencerminkan secara langsung seberapa dampak kerusakan material yang terjadi akibat proses swabakar. Penelitian ini mensimulasikan swabakar selama 360 menit pada empat jenis batubara dengan nilai kalor berbeda, yakni ± 4.200 Kkal/Kg, ± 4.900 Kkal/Kg, ± 5.300 Kkal/Kg, dan ± 7.100 Kkal/Kg. Massa masing-masing sampel diukur setiap 30 menit guna memantau tren kehilangan massa sepanjang proses berlangsung.

Korelasi positif nilai kalor dan kandungan *fix carbon* terbukti memiliki pengaruh yang cukup besar terhadap besarnya kehilangan massa batubara, dengan dilakukan penelitian ini menggambarkan batubara berkalori rendah (± 4.200 Kkal/kg) mengalami penyusutan massa rata-rata sebesar 90,12%, sementara batubara berkalori tinggi (± 7.100 Kkal/Kg) hanya menyusut sekitar 71,82%. Hasil ini sejalan dengan Van Krevelen, 1993 yang berpendapat bahwa *fixed carbon* yang tinggi biasanya menghasilkan swabakar dengan porositas yang lebih rendah, sehingga mengurangi penetrasi gas yang tidak diinginkan selama pembakaran.

Pola kehilangan massa ini berkorelasi dengan hasil pengamatan suhu swabakar, di mana batubara yang mencapai suhu puncak tertinggi turut mengalami penyusutan massa terbesar. Selain itu, proses degradasi tidak berlangsung secara merata, melainkan berlangsung cepat pada 180 menit pertama, lalu melambat seiring menipisnya reaktivitas termal akibat material yang telah terurai.



Gambar 2. Korelasi Massa Batubara dan Durasi Swabakar

Analisis terhadap pengaruh kandungan *fixed carbon* terhadap kehilangan massa batubara akibat swabakar mengungkapkan adanya korelasi negatif yang konsisten di antara keempat sampel yang diuji. Semakin tinggi proporsi *fixed carbon* dalam komposisi batubara, semakin rendah kehilangan massa, suatu pola yang secara sistematis terkonfirmasi pada seluruh rangkaian data penelitian. Pada batubara ± 4.200 kkal dan ± 4.900 kkal, kandungan *fixed carbon* yang relatif rendah berbanding terbalik dengan tingginya kehilangan massa, masing-masing sebesar 90,12% dan 89,24%. Rendahnya proporsi *fixed carbon* pada kedua jenis ini mengimplikasikan bahwa struktur material didominasi oleh komponen yang lebih mudah teroksidasi.

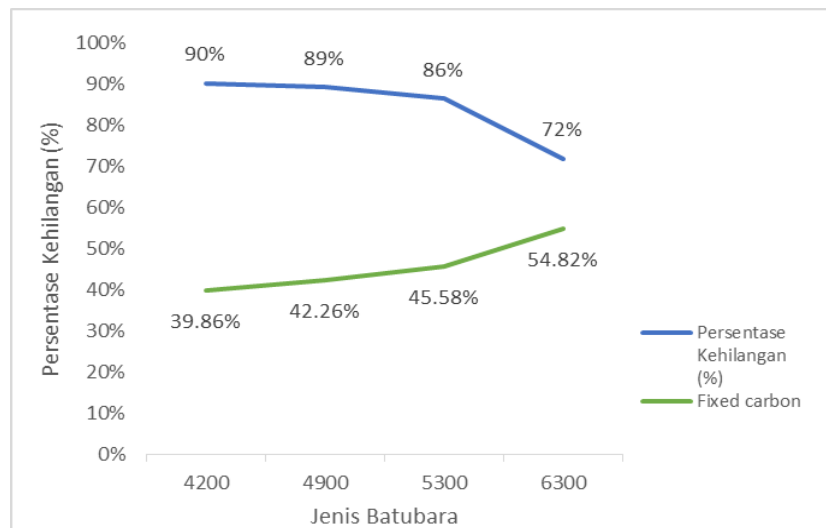
Memasuki batubara ± 5.300 Kkal/Kg, peningkatan kandungan *fixed carbon* mulai memberikan penurunan laju swabakar. Kehilangan massa sebesar 86,42% yang tercatat, meskipun masih tergolong tinggi, mencerminkan mulai berperannya *fixed carbon* sebagai stabilisator termal yang memperlambat akselerasi oksidasi.

Perubahan paling signifikan tampak pada batubara ± 7.100 Kkal/Kg, yang mencatat kehilangan massa hanya 71,82% — terendah dalam penelitian ini dan terpaut cukup jauh dari ketiga sampel lainnya. Dominasi *fixed carbon* pada jenis ini membentuk matriks karbon yang jauh lebih rapat dan stabil, sehingga penetrasi oksigen ke dalam struktur material lebih terbatas. Reaksi oksidasi yang terjadi pun berlangsung dengan intensitas yang jauh lebih rendah, tercermin pula dari suhu maksimum yang dicapai selama simulasi yang lebih rendah dibandingkan sampel lainnya.

Tabel 3. Fixed Carbon Terhadap Massa Batubara

Jenis Batubara	Sampel ke-	Temperatur Maksimum (°C)	Massa Hilang (kg) dari 10 kg	Persentase Kehilangan (%)	Fixed carbon
± 4.200 Kkal/Kg	1	655,30	8,90	89,00	39.86%
	2	658,86	8,98	89,80	
	3	725,30	9,13	91,30	
	4	687,71	9,07	90,70	
	5	693,19	8,98	89,80	
	Rata-rata	684,07	9,01	90,12	
± 4.900 Kkal/Kg	1	611,10	8,94	89,40	42.26%
	2	677,44	8,90	89,00	
	3	610,24	8,91	89,10	
	4	676,15	8,99	89,90	
	5	611,28	8,88	88,80	
	Rata-rata	637,24	8,92	89,24	
± 5.300 Kkal/Kg	1	635,50	8,68	86,80	45.58%
	2	700,15	8,50	85,00	

Jenis Batubara	Sampel ke-	Temperatur Maksimum (°C)	Massa Hilang (kg) dari 10 kg	Persentase Kehilangan (%)	Fixed carbon
	3	649,47	8,73	87,30	
	4	684,60	8,68	86,80	
	5	657,12	8,62	86,20	
	Rata-rata	665,37	8,64	86,42	
±7.100 Kkal/Kg	1	512,20	7,12	71,20	54.82%
	2	503,49	7,21	72,10	
	3	547,57	7,25	72,50	
	4	509,62	7,19	71,90	
	5	544,22	7,14	71,40	
	Rata-rata	523,42	7,18	71,82	



Gambar 4.2 Kehilangan Massa batubara dengan *Fixed carbon*

Terdapat beberapa keterbatasan dalam penelitian ini yang perlu diperhitungkan. Proses swabakar buatan disimulasikan menggunakan tungku terbuka sederhana berskala laboratorium, sehingga pasokan oksigen dan sirkulasi udaranya belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi tumpukan batubara di *stockpile* yang sebenarnya seperti di lapangan. Kondisi riil di lapangan jauh lebih kompleks, dipengaruhi oleh ukuran tumpukan, tingkat pemadatan, celah antar-partikel batubara, serta faktor lingkungan seperti kelembapan dan pergerakan udara, yang belum dapat sepenuhnya diakomodasi dalam desain eksperimen skala kecil ini. Oleh karena itu, temuan penelitian ini lebih tepat dipandang sebagai indikasi awal mekanisme swabakar, dan diperlukan validasi lebih lanjut pada skala yang lebih mendekati kondisi lapangan sesungguhnya.

KESIMPULAN

Nilai kalor dan kandungan *fixed carbon* terbukti berpengaruh signifikan terhadap kehilangan massa batubara akibat swabakar. Semakin tinggi kandungan *fixed carbon*, semakin kecil kehilangan massa yang terjadi. Hal ini dikarenakan kandungan *fixed carbon* yang tinggi membentuk matriks karbon yang lebih rapat dan stabil, sehingga batubara memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap proses oksidasi dan pembakaran spontan.

Swabakar menyebabkan kehilangan massa batubara yang cukup besar, yakni lebih dari 70% selama simulasi 6 jam. Batubara berkalori rendah ±4.200 Kkal/Kg mengalami penyusutan massa rata-rata sebesar 90,12%, sedangkan batubara berkalori tinggi ±7.100 Kkal/Kg hanya menyusut sekitar 71,82%. Hal ini membuktikan bahwa semakin rendah nilai kalor batubara, semakin besar kehilangan massa yang terjadi akibat swabakar.

Pemantauan temperatur secara berkala perlu dilakukan secara rutin pada tumpukan batubara, khususnya pada 90 menit pertama penyimpanan, karena pada periode tersebut

kenaikan temperatur terjadi paling signifikan sehingga dapat menyebabkan swabakar yang menyebabkan penurunan massa batubara.

Penelitian ini masih terbatas pada evaluasi parameter *fixed carbon*, sehingga untuk penelitian akademis di masa mendatang disarankan agar dilakukan pengujian yang lebih mendalam terhadap parameter proksimat lainnya, khususnya *volatile matter*, dengan menggunakan instrumen *Thermogravimetric Analysis/Derivative Thermogravimetry* (TGA/DTG), mengingat parameter tersebut berperan penting dalam menjelaskan laju pelepasan gas mudah terbakar yang berkontribusi terhadap proses swabakar batubara.

REFERENSI

- Andryanto, A., Yusuf, M., & Bahrin, D. (2025). Model kerugian finansial kehilangan batubara akibat swabakar di Stockpile 1, Tambang Air Laya, PT Bukit Asam Tbk. Repository Universitas Sriwijaya.
- ASTM International. (2017). *D3175-17: Standard test method for volatile matter in the analysis sample of coal and coke*. ASTM International.
- Banerjee, S. C., 1985. *Spontaneous Combustion of Coal and Mine Fires*. Wiley Eastern Ltd.
- Beamish, B. B., & Arisoy, A. (2008). Effect of mineral matter on coal self-heating rate. *Fuel*, 87(1), 125–130.
- Gao, F., Jia, Z., Qin, M., Mu, X., Teng, Y., Li, Y., & Bai, Q. (2022). Effects of organic sulfur on oxidation spontaneous combustion characteristics of coking coal. *Journal of Fire Sciences*.
- Kurniawan, I., Aryansyah, A., & Huda, A. (2020). Analisis Kualitas Batubara sebagai Penentu Faktor Swabakar. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian LPPM UMJ*.
- Lee, D.-G., Isworo, Y. Y., Park, K.-H., Kim, G.-M., Kim, S.-M., & Jeon, C.-H. (2020). Low-Temperature Oxidation Reactivity of Low-Rank Coals and Their Petrographic Properties. *ACS Omega*, 5(30), 18594–18601.
- Liu, H., Li, Z., Yang, Y., & Miao, G. (2023). Study on the thermal behavior of coal during the spontaneous combustion latency. *Energy*, 281, 128292.
- Liu, H., Li, Z., Yang, Y., Miao, G., Li, P., Wang, G., Zhang, Y., & Hou, Z. (2024). Role of moisture content in coal oxidation during the spontaneous combustion latency. *Energy*, 291, 130336.
- Onifade, M., & Genc, B. (2020). A review of research on spontaneous combustion of coal. *International Journal of Mining Science and Technology*.
- Qin, B., Zhang, X., Wang, D., Xin, H., Ma, L., & Dou, G. (2015). Effects of pyrite on the spontaneous combustion of coal. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2(4).
- Segara, R. B., Guskarnali, & Oktarianty, H., 2021. *Analisis Pengaruh Potensi Swabakar terhadap Penerapan Pola Penimbunan pada Stockpile Batubara PT Bukit Asam Tanjung Enim*. Proceedings of National Colloquium Research and Community Service.
- Singh, R., & Gupta, A. (2020). Relationship between proximate analysis parameters and combustion behaviour of high ash Indian coal. *International Journal of Coal Science & Technology*, 7(2), 345-356.
- Turns, S. R. (2012). *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*. McGraw-Hill, New York.
- Van Krevelen, D.W. (1993). *Coal: Typology - Physics - Chemistry - Constitution*. Elsevier.
- Yusuf, M. (2023). Pola Hubungan Temperatur terhadap Pembentukan Emisi Gas Metana pada Swabakar Batubara di Temporary Stockpile Banko Barat. *jurnal Pertambangan*, 7(4), 182–190.
- Zhang, Z. H., Li, Z., & Cai, N. (2016). Reduced-order model of char burning for CFD modeling. *Combustion and Flame*, 165, 83–96.