



Ranah Research
Journal of Multidisciplinary Research and Development

082170743613 ranahresearch@gmail.com <https://jurnal.ranahresearch.com>

E-ISSN: 2655-0865



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

Analisis Pengaruh *Total Moisture* terhadap Kehilangan Massa Batubara akibat Swabakar di *Stockpile 1*, Tambang Air Laya, PT Bukit Asam (Persero) Tbk

Denny Ramadi Halim¹, Maulana Yusuf², Restu Juniah³

¹Program 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: denny.rhalim@gmail.com¹

Abstract: *Spontaneous combustion can decrease the efficiency of the coal supply chain. One parameter affecting spontaneous combustion is total moisture. This research aims to improve coal handling efficiency and prevent losses caused by spontaneous combustion. This study used a quantitative descriptive method with a case study approach. The data used are proximate test data and spontaneous combustion simulation results from coal samples of 4,200 kcal/kg, 4,900 kcal/kg, 5,300 kcal/kg, and 7,100 kcal/kg. The analysis was conducted by comparing the relationship of total moisture to spontaneous combustion susceptibility and coal mass reduction, and providing technical recommendations for stockpile management. The results indicate a significant positive correlation between total moisture and the susceptibility level of coal to spontaneous combustion. Coal with high TM content (calorific value of 4,200 kcal/kg with an average TM of 36.64%) recorded the highest temperature of 725°C. Meanwhile, 7,100 kcal/kg coal with an average TM of 6.8% reached the lowest temperature of 547.6°C. The relationship between total moisture and coal mass loss is directly proportional, meaning higher total moisture results in greater coal mass lost to spontaneous combustion. Coal of 4,200 kcal/kg with a high TM of 36.64% experienced a mass reduction of 90.12%. In contrast, 7,100 kcal/kg coal with a lower TM of 6.80% proved more stable and experienced a mass loss of 71.82%. Technical recommendations to minimize spontaneous combustion include modifying stockpile geometry, layered compaction, storage segmentation, periodic stockpile clearing, and preparing proper base and drainage systems.*

Keyword: *stockpile, spontaneous combustion, total moisture, coal mass loss, stockpile management*

Abstrak: Swabakar dapat menurunkan efisiensi rantai pasok batubara. Salah satu parameter yang memengaruhi swabakar adalah total moisture. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi penanganan batubara dan mencegah kerugian akibat swabakar. Metode yang digunakan adalah deskriptif kuantitatif dengan pendekatan studi kasus. Data

yang digunakan adalah data uji proksimat dan hasil simulasi swabakar terhadap sampel batubara 4.200 Kkal/Kg, 4.900 Kkal/Kg, 5.300 Kkal/Kg, 7.100 Kkal/Kg. Analisis dilakukan melalui perbandingan hubungan total moisture terhadap kerentanan swabakar dan penurunan massa batubara, serta rekomendasi teknis stockpile management. Hasil menunjukkan adanya korelasi positif yang signifikan antara *total moisture* dengan tingkat kerentanan swabakar batubara. Batubara dengan kadar TM tinggi (nilai kalori 4.200 Kkal/Kg dengan rata-rata TM 36,64%) mencatat temperatur tertinggi 725°C. Sedangkan batubara kalori 7.100 Kkal/Kg dengan rata-rata TM 6,8% mencapai temperatur terendah, yaitu 547,6°C. Hubungan *total moisture* dengan kehilangan massa batubara berbanding lurus, artinya semakin tinggi *total moisture*, maka semakin besar jumlah massa batubara yang hilang akibat swabakar. Batubara 4.200 Kkal/Kg dengan TM tinggi 36,64% mengalami penyusutan massa 90,12%. Sebaliknya, batubara 7.100 Kkal/Kg dengan TM lebih rendah 6,80% terbukti lebih stabil dan kehilangan massa 71,82%. Rekomendasi teknis untuk meminimalisir swabakar batubara diantaranya modifikasi geometri tumpukan, pemadatan berlapis, segmentasi masa simpan dan pengosongan stockpile secara berkala, serta menyiapkan dasar stockpile dan sistem drainase yang baik.

Kata Kunci: *stockpile*, swabakar batubara, *total moisture*, kehilangan massa, *stockpile management*

PENDAHULUAN

Dalam proses penambangan dan penyimpanan batubara, fenomena swabakar (spontaneous combustion) pada batubara merupakan masalah umum yang sering kali terjadi dan berdampak serius. Swabakar dapat menurunkan efisiensi rantai pasok batubara dan berpotensi menimbulkan kerugian finansial bagi perusahaan tambang. Swabakar mengakibatkan kehilangan batubara yang seharusnya dapat dimanfaatkan justru terbuang atau mengalami kerusakan. Swabakar batubara disebabkan oleh terjadinya reaksi oksidasi batubara yang berlangsung secara spontan pada saat sejumlah besar batubara tersimpan di *stockpile*. Oksigen di udara diserap oleh batubara dan menginisiasi proses self-heating yang meningkatkan suhu internal hingga mencapai titik nyala dan memicu terjadinya proses pembakaran (Zhang dkk., 2022).

Dalam penyimpanan batubara di stockpile terbuka, kontak batubara dengan air (misalnya akibat hujan) dapat meningkatkan total moisture dan menurunkan kualitas batubara. Peningkatan kadar air diketahui menurunkan nilai kalori batubara secara signifikan, yang berarti energi yang dapat dihasilkan batubara menjadi berkurang. Selain penurunan kualitas, kadar air yang tinggi diduga berperan dalam memicu terjadinya swabakar.

Penelitian oleh Hu Wen (2015) bahkan menemukan bahwa batubara dengan kadar air tinggi lebih mudah mengalami reaksi pembakaran spontan dan mencapai temperatur swabakar yang lebih tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa kandungan air dapat mempercepat proses oksidasi internal batubara hingga memicu swabakar. Namun, hubungan antara total moisture dan swabakar tidak sepenuhnya konklusif karena masih terdapat inkonsistensi temuan dalam literatur. Studi oleh Wang dkk. (2018) serta Beamish dan Hamilton (2005) menunjukkan bahwa kadar air yang sangat tinggi justru dapat bertindak sebagai *heat sink* yang menyerap panas penguapan, sehingga menurunkan laju pemanasan dan menghasilkan suhu maksimum swabakar yang cenderung lebih rendah. Kontradiksi temuan ini menunjukkan perlunya penelitian lebih lanjut untuk memahami pengaruh sebenarnya dari total moisture terhadap tingkat kerentanan dan kehilangan massa batubara akibat swabakar.

Penelitian ini menganalisis secara menyeluruh terhadap data dan informasi terkait fenomena swabakar di Stockpile 1, Tambang Air Laya. Kebaruan utama dari penelitian ini

terletak pada pemodelan simulasi swabakar komparatif yang menggunakan sampel batubara berkalori bervariasi secara spesifik (4.200–7.100 Kkal/Kg). Pendekatan analitik ini dirancang untuk menyelesaikan ambiguitas terkait korelasi antara total moisture, tingkat kerentanan, dan besaran massa batubara yang hilang. Selanjutnya, penelitian ini juga menawarkan kebaruan praktis berupa perumusan formula rekomendasi teknis pengelolaan stockpile seperti modifikasi geometri flat-topped dan segmentasi masa simpan yang didasarkan langsung pada bukti empiris penyusutan massa aktual dari simulasi. Hasil analisis ini diharapkan dapat memberikan landasan yang preskriptif dan aplikatif untuk pengambilan keputusan serta pencegahan swabakar di masa depan

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dengan pendekatan studi kasus. Data yang digunakan merupakan data perusahaan periode Mei 2026 sampai Juni 2026, yang mencakup hasil analisis laboratorium uji proksimat, hasil pengukuran langsung, data desain stockpile, data inventory turnover, dan hasil simulasi swabakar.

Pada simulasinya, penilaian dilakukan terhadap 8 aspek teknis yang mencakup variabel bebas, variabel terikat, dan variabel tetap. Variabel bebas yaitu jenis batubara dan sifat fisik serta kimia batubara, dalam hal ini total moisture. Variabel terikat yaitu massa batubara yang hilang, temperatur batubara, dan pola stockpile management. Variabel tetap yaitu sampel batubara berukuran 1 inci, massa awal 10 kg, volume katalisator minyak tanah (1 Liter), tungku rakitan drum silinder, kelembaban/lingkungan pengujian, serta interval dan durasi pengukuran. Variabel tetap dijaga konsistensinya agar perubahan pada variabel terikat hanya dipengaruhi oleh variabel bebas.

Pengambilan sampel dilakukan di Stockpile 1 Tambang Air Laya PTBA pada rentang nilai kalori 4.200 Kkal/Kg, 4.900 Kkal/Kg, 5.300 Kkal/Kg, dan 7.100 Kkal/Kg. Sampel batubara diseragamkan ukurannya menggunakan ayakan 1 inci hingga diperoleh massa sampel 10 kg untuk setiap pengujian. Sampel yang telah diambil dianalisis menggunakan analisis proksimat di laboratorium untuk mengukur parameter total moisture dan fixed carbon.

Pada tahapan pengukuran lapangan, batubara dibakar pada tungku rakitan berbentuk drum silinder (tinggi 890 mm, jari-jari 290 mm, ventilasi 55 mm) untuk mensimulasikan proses swabakar. Guna mengatasi tinggi energi aktivasi awal dalam pengujian termal berskala dipercepat (accelerated testing), minyak tanah sebanyak 1 liter disemprotkan secara terukur sebagai pemicu titik awal (ignition spark). Minyak tanah ini terbakar habis pada fase awal pengujian, sehingga laju reaksi oksidasi dan dinamika pembakaran pada fase selanjutnya secara penuh didorong oleh sifat intrinsik batubara tanpa mempengaruhi kinetika pembakaran secara keseluruhan.

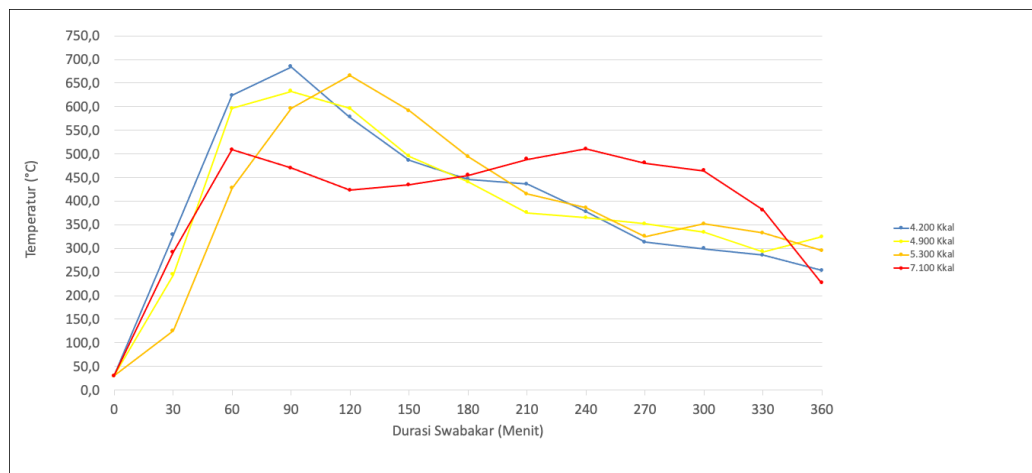
Pengukuran parameter uji dilakukan secara kontinyu selama 6 jam dengan interval pencatatan setiap 30 menit. Untuk menjamin presisi dan validitas data eksperimental, spesifikasi alat ukur yang digunakan merujuk pada instrumen terkalibrasi. Pengukuran temperatur permukaan batubara dilakukan secara non-kontak menggunakan Termometer Infra Merah Benetech GM900 yang memiliki tingkat akurasi $\pm 1.5\%$ atau $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$. Sementara itu, penimbangan massa awal sampel sebesar 10 kg dan selisih penyusutan massa batubara sebelum dan sesudah simulasi diukur secara akurat menggunakan Timbangan Digital Laboratorium tipe platform yang telah terkalibrasi dengan tingkat ketelitian hingga 1 gram (0,001 kg).

Analisis data dilakukan dengan membandingkan korelasi antara total moisture dengan temperatur dan massa batubara yang hilang pada tiap jenis batubara. Seluruh data yang diperoleh selanjutnya diolah menggunakan software SPSS dan Microsoft Excel melalui analisis regresi dan deskriptif untuk merumuskan rekomendasi teknis pengelolaan stockpile management.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis proksimat dilakukan di Laboratorium Pengujian Batubara PTBA (No. Registrasi KAN LP-073-IDN) dengan menguji seluruh sampel yang diambil dari lapangan. Secara umum, batubara dengan nilai kalori rendah (4.200 Kkal/Kg) memiliki kadar moisture total (TM) yang tinggi (lebih dari 35%), sedangkan batubara dengan nilai kalori tinggi (7.100 Kkal/Kg) memiliki kadar air yang sangat rendah (sekitar 6–8%).

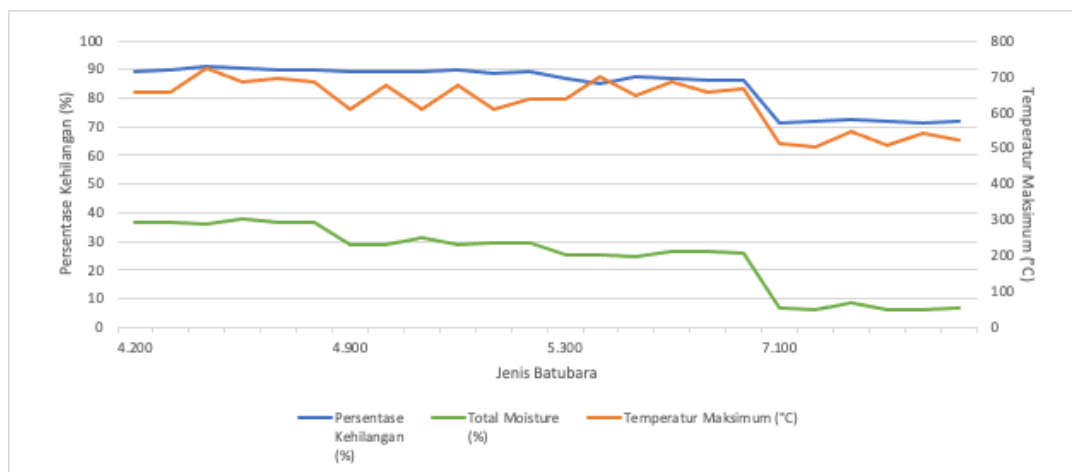
Pengamatan perubahan temperatur pada simulasi swabakar menggunakan termometer infra merah dilakukan selama 6 jam dengan pencatatan temperatur setiap 30 menit. Dari hasil pengamatan, semua sampel batubara dengan berbagai nilai total moisture mengalami peningkatan temperatur yang signifikan dalam 90 menit pertama. Batubara dengan nilai kalori 4.200 Kkal/Kg (rata-rata TM 36,64%) mencatat temperatur maksimum tertinggi, yakni mencapai 725°C. Sedangkan batubara dengan kalori lebih tinggi, seperti 7.100 Kkal/Kg (rata-rata TM 6,8%) mencapai temperatur maksimum yang lebih rendah, yakni sekitar 547,6°C. Perbedaan pola kenaikan dan penurunan temperatur pada rentang waktu yang sama mengindikasikan bahwa nilai kalori dan total moisture pada batubara sangat memengaruhi dinamika proses swabakar.



Sumber: Hasil simulasi swabakar pada sampel batubara

Gambar 1. Hubungan Temperatur dan Durasi Swabakar Batubara dengan Total Moisture

Terjadinya kehilangan massa pada sampel batubara menunjukkan dari tingkat kerusakan material sebagai dampak dari terjadinya fenomena swabakar. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa semua jenis batubara mengalami penurunan massa yang signifikan, namun dengan laju dan besaran kehilangan yang berbeda-beda



Sumber: Hasil simulasi swabakar pada sampel batubara

Gambar 2. Hubungan Kehilangan Massa dan Durasi Swabakar Batubara dengan Nilai Total Moisture

Hubungan antara total moisture dengan kehilangan massa batubara bersifat berbanding lurus, yang berarti semakin tinggi total moisture di dalam batubara, maka semakin besar pula jumlah massa batubara yang hilang akibat swabakar. Temuan dalam penelitian ini secara tegas mendukung hasil studi oleh Hu Wen (2015), di mana batubara dengan kadar air yang tinggi terbukti lebih mudah mengalami reaksi pembakaran spontan dan mencapai puncak temperatur swabakar yang lebih tinggi. Hal ini mengonfirmasi bahwa pada sampel batubara Tambang Air Laya, tinggi-rendahnya kandungan total moisture berbanding lurus dengan peningkatan laju oksidasi serta besarnya tingkat kehilangan massa batubara.

Perbedaan hasil penelitian ini dengan temuan Wang dkk. (2018) serta Beamish dan Hamilton (2005) yang menyatakan bahwa kadar air tinggi justru bertindak sebagai heat sink penyerap panas yang menurunkan temperatur puncak dapat dijelaskan melalui perbedaan mekanisme fisikokimia pada struktur batubara lokal. Pada jenis batubara berkalori rendah di lokasi penelitian (4.200 Kkal/Kg), tingginya kadar air awal memicu penguapan yang sangat cepat (rapid desiccation) pada fase awal pemanasan. Penguapan air yang masif ini menimbulkan retakan mikro (micro-cracking) dan membuka struktur pori-pori internal batubara secara signifikan. Pori-pori yang terbuka lebar ini memfasilitasi penetrasi molekul oksigen secara jauh lebih masif ke dalam matriks batubara, sehingga pemicuan reaksi oksidasi sekunder menjadi sangat intensif setelah fase penguapan melampaui titik jenuhnya.

Berdasarkan hasil simulasi swabakar dan analisis proksimat, terlihat korelasi positif yang signifikan antara tingginya parameter total moisture (TM) dengan persentase kehilangan massa (coal loss) dan kecepatan batubara dalam mencapai temperatur kritis. Mengacu pada temuan tersebut serta kondisi operasional aktual di lapangan, rumusan strategi dan rekomendasi teknis stockpile management yang dapat diterapkan di Stockpile 1, Tambang Air Laya, PT Bukit Asam (Persero) Tbk guna meminimalisir risiko terjadinya swabakar diantaranya modifikasi geometri tumpukan untuk menghindari bentuk kerucut, pemadatan berlapis (compaction) secara intensif, segmentasi area penumpukan batubara, manajemen masa simpan dan pengosongan stockpile secara berkala (inventory turnover), serta menyiapkan dasar stockpile dan sistem drainase yang baik.

Geometri stockpile sebaiknya dimodifikasi dari bentuk kerucut (conical) menjadi bentuk trapesium memanjang rata puncak (flat-topped). Permukaan yang datar dan lereng yang landai akan memungkinkan alat berat untuk beroperasi memadatkan seluruh area permukaan dan sisi lereng (pinggiran tumpukan) guna mencegah masuknya udara ke pori-pori timbunan batubara. Pembentukan geometri flat-topped dapat dilakukan dengan cara setelah batubara ditumpuk oleh stacker secara per layer maksimum 6 meter, kemudian alat bulldozer sekelas D85 melakukan pemotongan di bagian puncak kerucut, sehingga akan terbentuk landasan datar di bagian puncak.



Sumber: Dokumentasi Penulis

Gambar 3. Geometri Tumpukan Material Batubara secara Flat-Topped

Khusus untuk tumpukan batubara dengan kadar TM tinggi, pemadatan (compaction) menggunakan alat berat (sekelas bulldozer D85) wajib dilakukan pada setiap lapisan (layer) penumpukan dengan ketebalan maksimal 2 meter. Hal ini krusial untuk menekan tingkat porositas tumpukan dan memutus pasokan oksigen (oxygen supply) ke bagian dalam (inti) tumpukan.



Sumber: Dokumentasi Penulis

Gambar 4. Pemadatan Timbunan Batubara secara Berlapis

Setiap batubara yang masuk ke stockpile perlu dicatat berdasarkan asal batubara, tanggal penerimaan, tonase, dan nilai kalorinya. Batubara dengan nilai total moisture yang relatif tinggi sebaiknya ditempatkan di kompartemen yang tidak berdekatan dengan batubara dengan nilai kalori tinggi, selain itu dapat juga ditempatkan yang mudah dijangkau untuk mempersingkat waktu penyimpanan dan diprioritaskan untuk segera dilakukan pengiriman. Pemisahan ini dapat mencegah satu bagian batubara yang reaktif dan dapat menjadi sumber panas bagi keseluruhan timbunan dan mengakibatkan perambatan panas silang (thermal propagation) antar tumpukan.

[illegible]

Sumber: Dokumentasi Penulis

Gambar 5. Segmentasi Area Penumpukan Batubara Stockpile 1

Operasional stockpile untuk batubara TM tinggi harus dibatasi secara ketat sebagai short-term inventory dengan batas maksimal waktu timbun (storage time) tidak lebih dari 2 minggu. Selain itu, pengiriman batubara dari stockpile direkomendasikan untuk menerapkan metode FIFO (First In First Out), yaitu batubara yang pertama kali masuk ke stockpile harus menjadi batubara yang pertama dikeluarkan.

Pada Stockpile 1 ditemui genangan air yang mengindikasikan sistem drainase yang kurang baik. Maka perbaikan awal yang dapat dilakukan adalah perbaikan dasar stockpile, dimana dasar stockpile harus memiliki daya dukung yang stabil, relatif kedap, mempunyai kemiringan yang memadai, serta dilengkapi saluran drainase. Kondisi basah dan kering yang berubah-ubah dapat memengaruhi perpindahan moisture dan panas di dalam batubara. Area stockpile dapat juga dibagi menjadi beberapa blok dan setiap blok dilengkapi parit di bagian tepi. Air limpasan kemudian diarahkan menuju kolam pengendapan agar tidak tertahan di kaki timbunan.



Sumber: Dokumentasi Penulis

Gambar 6. Genangan Air pada Stockpile 1, Tambang Air Laya, PTBA

Di samping temuan yang diperoleh, penelitian ini memiliki keterbatasan studi (limitations) yang perlu dicermati secara obyektif. Penggunaan simulasi berskala kecil dengan massa sampel 10 kg di dalam tungku rakitan belum sepenuhnya menggambarkan kondisi termodinamika aktual pada tumpukan batubara skala riil (real-scale stockpile) yang berkapasitas ribuan ton. Pada kondisi lapangan yang sebenarnya, faktor insulasi termal dari tumpukan yang tebal, tingkat kompaksi batubara, variasi laju pasokan oksigen akibat terpaan angin alami, serta kelembaban atmosfer lingkungan dapat menyebabkan dinamika penyebaran panas dan laju pelepasan massa batubara yang sedikit berbeda. Meskipun demikian, hasil simulasi berskala 10 kg ini tetap valid dan reliabel untuk memberikan gambaran komparatif mengenai tingkat kerentanan relatif dan pola hubungan antara total moisture terhadap risiko kehilangan massa batubara secara terukur dan terkontrol.

KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa tingginya kadar total moisture pada batubara berkalori rendah menjadi pemicu utama yang mempercepat proses pembakaran spontan (swabakar). Secara mekanistik, saat batubara dipanaskan, air di dalamnya menguap secara cepat dan meninggalkan retakan-retakan mikro yang membuat struktur batubara menjadi sangat berpori. Pori-pori yang terbuka ini memudahkan oksigen masuk hingga ke bagian inti tumpukan, sehingga reaksi oksidasi eksotermis berlangsung lebih cepat, temperatur naik secara drastis, dan jumlah massa batubara yang hilang menjadi semakin besar. Sebaliknya, batubara berkalori tinggi dengan kadar air yang rendah memiliki struktur fisik yang lebih padat dan rapat, sehingga lebih stabil, tidak mudah menyerap oksigen, dan lebih tahan terhadap risiko swabakar.

Secara operasional, kunci utama dalam meminimalisir risiko swabakar di area stockpile terletak pada upaya membatasi ruang masuk bagi oksigen serta mencegah perambatan panas antar tumpukan. Strategi pencegahan teknis yang efektif dapat dilakukan melalui perubahan bentuk tumpukan menjadi datar (flat-topped) untuk menghindari bentuk kerucut, pemadatan berlapis (compaction) menggunakan alat berat untuk menutup rongga

udara, pemisahan tumpukan batubara berdasarkan tingkat kerentanannya, serta penerapan sistem rotasi stok First In First Out (FIFO) yang didukung oleh penataan sistem drainase yang baik di area stockpile.

Untuk memperluas daya guna dari hasil simulasi berskala kecil ini, penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pemodelan numerik 3D atau uji skala pilot tanpa bantuan bahan pemicu awal (ignition spark). Pendekatan ini penting untuk menggambarkan kondisi tumpukan aktual di lapangan secara lebih presisi dengan mempertimbangkan variabel luar yang lebih kompleks, seperti variasi distribusi ukuran partikel batubara, fluktuasi kelembaban udara lingkungan, serta laju penyerapan oksigen secara alami.

REFERENSI

- Angelescu, L., & Diaconu, B. M. (2024). Advances in detection and monitoring of coal spontaneous combustion: Techniques, challenges, and future directions. *Fire*, 7(10), 354.
- Badan Standardisasi Nasional. (2014). *Standar Nasional Indonesia (SNI) 7203:2014 tentang penumpukan batubara*. BSN.
- Beamish, B. B., & Hamilton, G. R. (2005). Effect of moisture on spontaneous combustion liability of coal. *International Journal of Coal Geology*, 64(1–2), 44–56.
- Bowes, P. C. (1984). *Self-heating: Evaluating and controlling the hazards*. Her Majesty's Stationery Office.
- Deng, J., Xiao, Y., Li, Q., Lu, J., & Wen, H. (2015). Experimental studies of spontaneous combustion and anaerobic cooling of coal. *Fuel*, 157(1), 261–269.
- Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara. (2022a). *Penegakan hukum terhadap pelanggaran ketentuan pencegahan dan penanggulangan swabakar batubara*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara. (2022b). *Peraturan daerah tentang pencegahan dan penanggulangan swabakar batubara di Indonesia*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara. (2022c). *Surat edaran Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara Nomor T-1500/Dirjen/Minerba/Set/D.O/2022 tentang pencegahan dan penanggulangan swabakar batubara*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Fajarwati, D. A., Lepong, P., & Wahidah, W. (2023). Analisis proksimat dan ultimat terhadap total sulfur dan nilai kalori pada batubara (PT Geoservices Samarinda). *Jurnal Geosains Kutai Basin*, 6(2), 126–136.
- Filah, M. N., Ibrahim, E., & Ningsih, Y. B. (2016). Analisis terjadinya swabakar dan pengaruhnya terhadap kualitas batubara pada area timbunan 100/200 pada stockpile Kelok S di PT. Kuansing Inti Makmur. *Jurnal Pertambangan Universitas Sriwijaya*, 1(1), 3817.
- Gong, X., Liu, Z., & Zhang, W. (2021). Monitoring of spontaneous combustion in coal stockpiles using infrared thermography and gas detection techniques. *Fuel*, 290(12), 120032.
- Han, B., Zhang, Y., Zou, Z., Wang, J., & Zhou, C. (2024). Study on controlling factors and developing a quantitative assessment model for spontaneous combustion hazard of coal gangue. *Case Studies in Thermal Engineering*, 54, 104039.
- Jolo, A. (2017). Manajemen stockpile untuk mencegah terjadinya swabakar di PT. PLN (Persero) Tidore. *Jurnal Teknik Dintek*, 10(2), 6–14.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2019). *Peraturan Menteri ESDM Nomor 18 Tahun 2019 tentang pengelolaan batubara*.
- Kurniawan, I., Aryansyah, A., & Huda, A. (2020). Analisis kualitas batubara sebagai penentu faktor swabakar. *Prosiding SEMNASLIT LPPM UMJ 2020*, 1(1), 1–10.

- Laryea, A. E. N., Wanxing, R., & Qing, G. (2024). Spontaneous coal combustion, direct and indirect impact on mining in China: A prospective review and proposal of a five-level comprehensive mine safety. *Combustion Science and Technology*, 196(5), 900–925.
- Li, Q. W., Xiao, Y., Zhong, K. Q., Shu, C. M., & Lu, H. F. (2020). Overview of commonly used materials for coal spontaneous combustion prevention. *Fuel*, 275(1), 117981.
- Liu, H., Pan, K., Xiang, C., Ye, D., Wang, H., & Gou, X. (2022). Mechanochemical effect of spontaneous combustion of sulfide ore. *Fuel*, 318(1), 123–139.
- Mohalik, N. K., Ray, S. K., Mishra, D., & Pandey, J. K. (2022). Prevention and control of spontaneous combustion/fire in coal stockpiles of power plants using firefighting chemicals. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 42(3), 487–502.
- Nursanto, E., Fadhillah, R., & Nurkhamim. (2024). Review of stockpile management to reduce the risk of coal self-heating, which can cause spontaneous combustion. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 9(4), 470–476.
- Onifade, M. (2022). Countermeasures against coal spontaneous combustion: A review. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 44(2), 330–350.
- Ören, Ö. (2025). Evaluation of spontaneous combustion behavior in coal stockpiles models: A case study in the Çan Opencast Mine, Çanakkale-Turkey. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 46(5), 1135–1159.
- Said, K. O., Onifade, M., Genc, B., & Lawal, A. I. (2021). On the dependence of predictive models on experimental dataset: A spontaneous combustion studies scenario. *International Journal of Mining*, 25(4), 275–290.
- Sardi, B., Ripky, M., Marhum, F. A., & Nomp, S. (2023). Analisis proksimat, ultimat, dan kadar sulfur dalam penentuan kualitas batubara pada formasi bobong Pulau Taliabu – Maluku. *Sultra Journal of Mechanical Engineering (SJME)*, 2(1), 45–53.
- Singh, A. K. (2013). Chemical and thermal aspects of underground coal mine fires. *International Journal of Coal Geology*, 59(1–2), 95–108.
- Sipilä, J., Auerkari, P., Heikkilä, A. M., Tuominen, R., Vela, I., Itkonen, J., & Aaltonen, K. (2012). Risk and mitigation of self-heating and spontaneous combustion in underground coal storage. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25(3), 617–622.
- Sloss, L. L. (2015). *Assessing and managing spontaneous combustion of coal*. IEA Clean Coal Centre.
- Wang, D., Zhang, Y., Liu, Y., Qi, X., & Chang, X. (2018). Experimental study on the dual effect of moisture content on coal spontaneous combustion. *Fuel*, 226, 682–689.
- Widodo, G. (2009). *Upaya menghindari kebakaran tumpukan batubara*. Berita PPTM.
- Yang, C., Li, S., & Ma, X. (2023). Intelligent management of coal stockpiles using improved grey spontaneous combustion forecasting models. *Energy Journal*, 266(12), 118587.
- Yolanda, A., Nugroho, W., Pontus, A. J., Winarno, A., & Trides, T. (2024). Analisis pengaruh kenaikan temperatur batubara sebagai indikator awal terjadinya swabakar (spontaneous combustion) di product coal stockpile pada PT Mahakam Sumber Jaya Kabupaten Kutai Kartanegara Provinsi Kalimantan Timur. *Jurnal Teknologi Mineral FT UNMUL*, 12(2), 11–23.
- Yusuf, M., & Rendana, M. (2024). Methane gas emission during the spontaneous combustion of sub-bituminous coal with different organic sulfur content in the temporary stockpile. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 6(1), 101–115.
- Zhang, H., Zhang, X., Wang, Y., Dong, W., & Fan, J. (2022). Application of aging effect model in numerical simulation for predicting spontaneous combustion of coal stockpiles. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147(5), 5431–5445.