

Evaluasi Teknis Pencegahan Swabakar Berdasarkan Temperatur, Geometri, dan Manajemen Penimbunan pada Rom *Stockpile* PT Putra Muba Coal

Muhammad Faisal Seprizal*, Yudi Arista Yulanda, Yosa Megasukma, Zella Navtalia, Andy Yanottama, Dimas Agung Permadi

Fakultas Sains dan Teknologi, Program Studi Teknik Pertambangan, Universitas Jambi, Jambi, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 09 September 2026
Revisi Akhir: 22 September 2026
Diterbitkan Online: 10 Oktober 2026

KATA KUNCI

Batubara
FIFO
Geometri Timbunan
Stockpile
Swabakar
Temperatur

KORESPONDENSI (*)

Phone: +62 823-7258-7788
E-mail: mfaisalseprizal@unja.ac.id

A B S T R A K

Swabakar merupakan salah satu risiko dalam penyimpanan batubara karena dapat menurunkan kualitas, menyebabkan kehilangan material, serta meningkatkan risiko keselamatan di area *stockpile*. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi upaya pencegahan swabakar melalui aspek temperatur, geometri, dan manajemen penimbunan pada ROM *stockpile* PT Putra Muba Coal. Penelitian menggunakan pendekatan deskriptif-kuantitatif berbasis observasi lapangan. Temperatur diukur menggunakan *thermogun* pada 12 titik selama 30 hari, disertai pengamatan terhadap tinggi dan sudut kemiringan timbunan, pola *windrow-layering*, pemadatan, sistem pembongkaran FIFO/LIFO, lama penimbunan, serta kondisi lantai dan drainase. Hasil penelitian menunjukkan tinggi timbunan berkisar 6–7 m dengan sudut rata-rata 33,58°. Sistem pembongkaran belum sepenuhnya menerapkan FIFO secara konsisten karena pada kondisi tertentu masih terjadi LIFO, sementara sebagian batubara tersimpan lebih dari satu bulan. Pemantauan temperatur selama Mei 2022 menunjukkan adanya beberapa titik dengan temperatur maksimum ≥ 50 °C, dengan nilai tertinggi 63,3 °C. Selain itu, masih ditemukan genangan air pada beberapa bagian lantai *stockpile*. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa pencegahan swabakar perlu dilakukan melalui penerapan FIFO dan pengendalian lama penimbunan secara konsisten, pemadatan berlapis, pengendalian geometri timbunan, perbaikan lantai dan drainase, serta pemantauan temperatur secara rutin yang disertai tindakan dini ketika terjadi peningkatan temperatur. Penelitian ini menghasilkan rekomendasi teknis spesifik lokasi dengan menggabungkan aspek temperatur, geometri, dan manajemen penimbunan sebagai dasar penentuan prioritas pencegahan swabakar pada ROM *stockpile* PT Putra Muba Coal.

PENDAHULUAN

Batubara masih menjadi salah satu sumber energi dan bahan baku industri yang penting. Secara geologi, batubara terbentuk melalui proses penggabungan dan pembatubaraan yang menghasilkan karakteristik fisik dan kimia yang berbeda. Perbedaan tersebut dapat dilihat dari peringkat batubara, kandungan air, zat terbang, abu, sulfur, dan nilai kalor [1,2,3]. Setelah proses *coal getting*, batubara umumnya tidak langsung dikirim kepada konsumen, tetapi disimpan sementara di *Run of Mine* (ROM) *stockpile*. Penyimpanan ini bertujuan untuk menjaga kelancaran produksi, pengangkutan, pencampuran kualitas, dan kegiatan pengiriman. Oleh karena itu, *stockpile* tidak hanya berfungsi sebagai tempat penyimpanan sementara, tetapi juga sebagai bagian penting dalam pengendalian kualitas, kuantitas, dan keselamatan operasi.

Pengelolaan *stockpile* yang kurang baik dapat menimbulkan berbagai permasalahan, seperti kontaminasi batubara, penurunan kualitas, genangan air, perubahan ukuran material, kehilangan kuantitas, serta peningkatan temperatur timbunan. Salah satu masalah yang perlu mendapat perhatian adalah *self-heating* yang dapat berkembang menjadi

spontaneous combustion atau swabakar. Proses ini terjadi akibat reaksi oksidasi batubara pada temperatur rendah yang menghasilkan panas. Apabila panas yang terbentuk di dalam timbunan lebih besar daripada panas yang dapat dilepaskan ke lingkungan, temperatur batubara akan terus meningkat. Kondisi tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain ketersediaan oksigen, porositas timbunan, ukuran partikel, kadar air, bentuk dan ukuran timbunan, serta kondisi angin [4,5,6,7].

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pencegahan swabakar memerlukan pengelolaan *stockpile* secara menyeluruh. Nursanto dkk. [8] menjelaskan bahwa pola penimbunan, tinggi timbunan, sudut lereng, arah angin, pemadatan, drainase, dan pemantauan temperatur merupakan bagian penting dalam pengendalian *self-heating*. Maulana dan Solihin [9] menunjukkan bahwa semakin lama batubara disimpan di *stockpile*, semakin besar peluang terjadinya swabakar karena waktu kontak batubara dengan udara menjadi lebih panjang. Sementara itu, Kautsar dkk. [10] menyatakan bahwa temperatur sekitar 50°C dapat digunakan sebagai salah satu indikator operasional untuk meningkatkan kewaspadaan terhadap gejala awal swabakar, khususnya pada batubara berperingkat rendah.

Geometri dan kondisi rongga di dalam timbunan juga berpengaruh terhadap perkembangan panas. Zhou dkk. [4] menunjukkan bahwa ukuran partikel, sudut lereng, dan tinggi timbunan memengaruhi perkembangan *self-heating* pada kondisi konveksi alami. Zhang dkk. [5] menjelaskan bahwa pengurangan porositas, tinggi timbunan, dan sudut lereng dapat membantu menciptakan kondisi penyimpanan yang lebih aman pada konveksi paksa. Penelitian Zhang dkk. [6] terhadap lignit juga menunjukkan bahwa kadar air dan ukuran partikel berpengaruh terhadap proses pemanasan dan temperatur kritis penyalaan. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa potensi swabakar tidak cukup dinilai hanya berdasarkan temperatur, tetapi perlu dikaji bersama dengan geometri, tingkat pemadatan, dan lama penyimpanan batubara.

Aspek operasional juga menjadi bagian penting dalam pencegahan swabakar. Adiwikarta dkk. [11] menyebutkan bahwa desain *stockpile*, paparan angin, kualitas batubara, waktu penimbunan, keseragaman ukuran butir, dan metode pembongkaran perlu dikendalikan untuk mengurangi risiko swabakar. Sarmidi dkk. [12] menempatkan pengurangan tinggi timbunan, pemadatan, pemantauan temperatur, dan penerapan *First in, First Out* (FIFO) sebagai beberapa tindakan utama dalam pengelolaan *temporary stockpile*. Noprasedi dkk. [13] juga menjelaskan bahwa penerapan FIFO, desain timbunan, dan pengaturan lantai *stockpile* merupakan bagian penting dari manajemen penimbunan. Pada lokasi yang sama dengan penelitian ini, Navtalia dkk. [14] menunjukkan bahwa kapasitas optimum *stockpile* PT Putra Muba Coal perlu mempertimbangkan daya dukung lantai, tinggi timbunan, sudut *angle of repose*, serta kebutuhan ruang untuk pergerakan alat mekanis. Sejalan dengan hal tersebut, Nata et al. [15] menunjukkan bahwa daya dukung tanah dapat bervariasi secara signifikan antarlokasi akibat heterogenitas kondisi tanah bawah permukaan. Temuan ini menegaskan pentingnya mempertimbangkan karakteristik geoteknik setempat dalam mengevaluasi daya dukung lantai *stockpile*. Dengan demikian, evaluasi geoteknik lantai perlu menjadi bagian dari perencanaan *stockpile*, terutama dalam kaitannya dengan beban timbunan dan kondisi tanah dasar.

PT Putra Muba Coal merupakan perusahaan pertambangan batubara yang beroperasi di Kecamatan Sungai Lilin, Kabupaten Musi Banyuasin, Provinsi Sumatera Selatan. Batubara hasil penambangan dari *front* terlebih dahulu disimpan sementara di ROM *stockpile* sebelum dikirim kepada konsumen. Dalam pengelolaannya, sistem penimbunan dan pembongkaran perlu diatur agar batubara tidak tersimpan terlalu lama, temperatur timbunan tetap terkendali, dan proses pengiriman dapat dilakukan sesuai kebutuhan. Hasil pengamatan di lapangan menunjukkan masih terdapat beberapa kondisi yang perlu diperhatikan, terutama pada penerapan sistem FIFO, pemantauan temperatur, kondisi lantai dan drainase *stockpile*, serta adanya kejadian swabakar pada beberapa bagian timbunan.

Penelitian ini memiliki keterbaruan berupa evaluasi beberapa faktor penyebab swabakar secara bersamaan, yaitu temperatur, geometri timbunan, dan manajemen penimbunan. Manajemen penimbunan yang dikaji meliputi pola *windrow-layering*, pemadatan, lama penyimpanan, penerapan sistem FIFO dan LIFO, serta kondisi lantai dan drainase. Berbeda dengan penelitian yang hanya menilai satu atau beberapa parameter secara terpisah, penelitian ini menggabungkan ketiga aspek tersebut dalam satu evaluasi teknis berdasarkan kondisi operasional ROM *stockpile* PT Putra Muba Coal. Hasil evaluasi tersebut digunakan untuk menentukan faktor yang perlu menjadi prioritas dalam upaya pencegahan swabakar serta menyusun rekomendasi teknis yang sesuai dengan kondisi lapangan.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pola penimbunan dan sistem pembongkaran batubara pada ROM *stockpile*, menganalisis temperatur, tinggi, dan sudut kemiringan timbunan dalam

kaitannya dengan potensi swabakar, mengevaluasi lama penyimpanan, pemadatan, serta kondisi lantai dan drainase, serta merumuskan rekomendasi teknis untuk mencegah terjadinya swabakar berdasarkan hasil evaluasi temperatur, geometri, dan manajemen penimbunan.

TINJAUAN PUSTAKA

Swabakar dan Mekanisme Self-Heating

Swabakar batubara merupakan proses pembakaran yang terjadi tanpa adanya sumber penyalaan langsung dari luar. Proses ini diawali oleh reaksi oksidasi antara batubara dan oksigen yang menghasilkan panas. Pada tahap awal, panas yang terbentuk masih dapat dilepaskan ke lingkungan sehingga temperatur timbunan relatif stabil. Namun, apabila panas terakumulasi dan tidak dapat dilepaskan dengan baik, temperatur timbunan akan meningkat. Kondisi tersebut dapat mempercepat laju oksidasi dan berkembang menjadi *self-heating* hingga akhirnya menyebabkan swabakar [7].

Risiko swabakar dipengaruhi oleh karakteristik batubara dan kondisi timbunan. Kadar air dan ukuran partikel dapat memengaruhi proses pemanasan, terutama pada batubara berperingkat rendah seperti lignit [6]. Selain itu, kondisi *stockpile* seperti pola penimbunan, tinggi dan sudut kemiringan timbunan, porositas, pemadatan, arah angin, drainase, lama penyimpanan, dan sistem pembongkaran juga berpengaruh terhadap masuknya oksigen serta kemampuan timbunan melepaskan panas [8].

Peningkatan temperatur pada *coal stockpile* dapat digunakan sebagai salah satu indikator awal terjadinya *self-heating* dan potensi swabakar [16]. Namun, pemantauan temperatur sebaiknya tidak dilakukan secara terpisah dari faktor lainnya. Oleh karena itu, pencegahan swabakar perlu dilakukan melalui pemantauan temperatur secara rutin yang didukung oleh pengendalian geometri, pemadatan, lama penimbunan, dan sistem pengelolaan *stockpile* secara menyeluruh.

Manajemen Stockpile

Manajemen *stockpile* merupakan kegiatan perencanaan, pengaturan, pengendalian, dan pemantauan batubara selama berada di tempat penyimpanan. Tujuannya adalah menjaga kelancaran aliran material, kualitas dan kuantitas batubara, keselamatan operasi, serta kesiapan material untuk dikirim. Beberapa aspek yang perlu diperhatikan dalam pengelolaan *stockpile* meliputi kondisi lantai dan drainase, pemisahan kualitas batubara, pola penimbunan, tinggi dan kemiringan timbunan, pemadatan, akses alat, sistem pembongkaran, serta pemantauan temperatur [8,13].

Pola Penimbunan Batubara

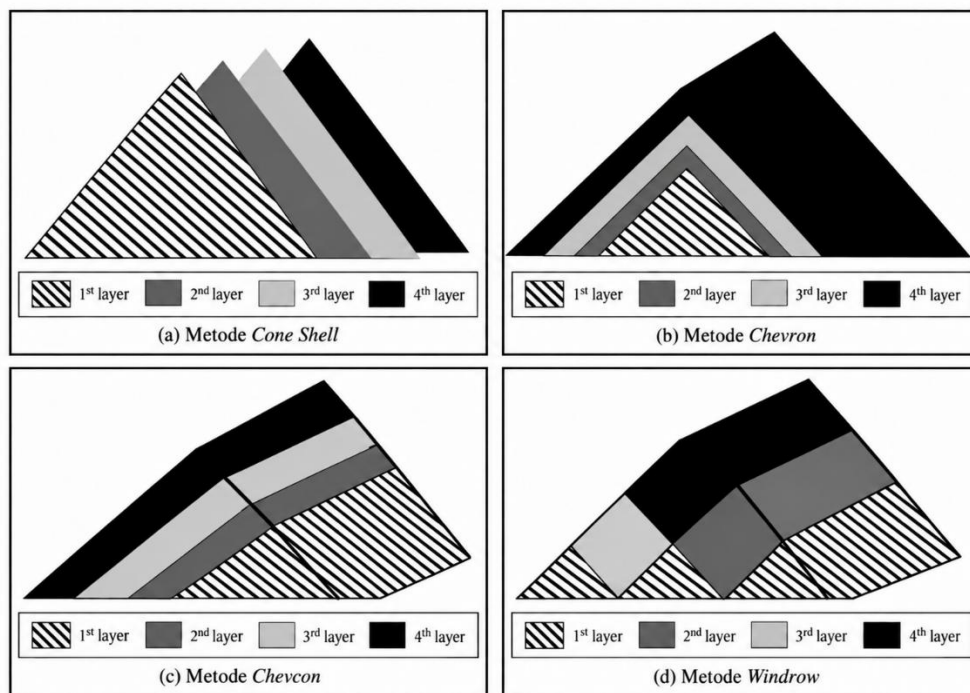
Pola penimbunan batubara merupakan metode yang digunakan untuk mengatur penempatan material di area *stockpile*. Pemilihan pola penimbunan perlu disesuaikan dengan kondisi lahan, kapasitas penyimpanan, karakteristik batubara, jenis alat yang digunakan, kebutuhan pencampuran (*blending*), serta sistem pembongkaran. Pola penimbunan yang baik bertujuan untuk menjaga kestabilan timbunan, memudahkan proses pemadatan dan pembongkaran, mengurangi segregasi ukuran butir, serta membantu mengendalikan risiko penurunan kualitas dan swabakar.

Beberapa pola penimbunan yang umum digunakan pada *stockpile* batubara adalah *cone shell*, *chevron*, *chevcon* dan *windrow* [17]. Metode *cone shell* dilakukan dengan menumpahkan batubara pada satu titik hingga membentuk timbunan berbentuk kerucut, kemudian titik penumpahan dipindahkan untuk membentuk timbunan berikutnya. Metode ini relatif sederhana, tetapi dapat menyebabkan segregasi ukuran material karena partikel yang lebih besar cenderung menggelinding ke bagian luar atau bawah timbunan. Kondisi tersebut dapat menghasilkan distribusi ukuran butir yang tidak seragam dan membentuk rongga yang lebih besar pada bagian tertentu [17].

Metode *chevron* dilakukan dengan menumpahkan batubara secara berulang pada jalur yang relatif sama sehingga timbunan terbentuk dalam beberapa lapisan menyerupai atap atau punggung. Pola ini dapat membantu proses pencampuran material karena batubara dari beberapa sumber atau waktu penimbunan ditempatkan dalam lapisan yang saling bertumpuk. Namun, pengendalian tinggi timbunan dan proses pemadatan tetap diperlukan agar rongga udara di dalam timbunan tidak terlalu besar [17].

Metode *chevcon* merupakan kombinasi antara metode *cone shell* dan *chevron*. Berbeda dengan pola *stockpile* memanjang, metode ini umumnya menggunakan area penimbunan berbentuk melingkar. Batubara ditumpuk secara berlapis pada salah satu bagian timbunan, sedangkan proses pembongkaran dapat dilakukan dari bagian lainnya [17].

Metode *windrow* dilakukan dengan menempatkan batubara dalam beberapa jalur atau baris memanjang. Batubara ditumpahkan secara bertahap sepanjang area *stockpile* sehingga terbentuk beberapa timbunan kecil yang kemudian dapat digabungkan menjadi timbunan yang lebih besar. Pola ini memberikan kemudahan dalam mengatur distribusi material, pemadatan, dan pembentukan geometri timbunan. Metode *windrow* juga dapat diterapkan bersama sistem *layering*, yaitu penimbunan dan pemadatan material secara lapis demi lapis [17]. Ilustrasi masing-masing pola penimbunan batubara dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Pola Penimbunan Batubara (Sumber: Carpenter, 1999 [17])

Penerapan *layering* pada penimbunan batubara dilakukan dengan membentuk timbunan secara bertahap dari lapisan bawah menuju lapisan atas. Setiap lapisan dapat diratakan dan dipadatkan sebelum lapisan berikutnya ditambahkan. Pemadatan berlapis dapat mengurangi rongga antarbutir sehingga masuknya udara ke bagian dalam timbunan dapat dibatasi. Kondisi tersebut penting dalam pengendalian swabakar karena oksigen merupakan salah satu faktor utama yang mendukung proses oksidasi batubara dan pembentukan panas di dalam *stockpile*.

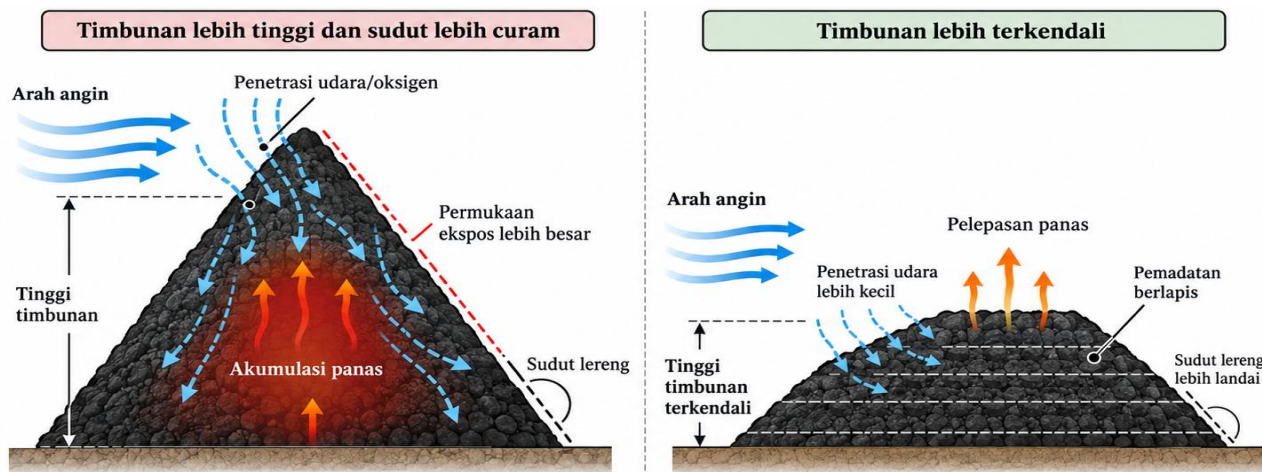
Pola penimbunan juga perlu memperhatikan arah angin, tinggi timbunan, sudut lereng, serta akses alat mekanis. Timbunan yang terlalu tinggi atau memiliki bagian yang tidak terpadatkan dengan baik dapat meningkatkan kemungkinan terbentuknya jalur masuk udara. Sebaliknya, timbunan yang dibentuk secara teratur dan dipadatkan dengan baik dapat membantu mengurangi penetrasi oksigen serta mempermudah pelepasan dan pengendalian panas. Oleh karena itu, pola penimbunan tidak hanya berkaitan dengan kapasitas penyimpanan, tetapi juga menjadi bagian penting dalam pengendalian kualitas dan pencegahan swabakar.

Dalam penerapannya, pemilihan pola penimbunan perlu diintegrasikan dengan sistem pembongkaran batubara. Pola timbunan sebaiknya memungkinkan penerapan *First in, First Out* (FIFO). Prinsip *First in, First Out* (FIFO) berarti batubara yang lebih dahulu masuk ke *stockpile* harus diprioritaskan untuk dibongkar lebih dahulu. Penerapan FIFO bertujuan untuk mengurangi lama penyimpanan batubara sehingga tidak ada material lama yang terus tertinggal di bagian bawah atau belakang timbunan. Maulana dan Solihin [9] menunjukkan bahwa lama penimbunan dapat memengaruhi terjadinya swabakar dan perubahan kualitas batubara. Adiwikarta dkk. [11] juga menjelaskan bahwa penerapan sistem LIFO yang kurang tepat dapat meningkatkan risiko pada *stockpile*. Oleh karena itu, FIFO perlu didukung oleh penataan

timbunan dan akses alat yang memungkinkan batubara lama dapat dibongkar lebih dahulu, sehingga penerapannya tidak hanya terbatas pada prosedur kerja.

Geometri, Porositas, dan Pemadatan Timbunan

Tinggi dan sudut kemiringan timbunan dapat memengaruhi masuknya udara ke dalam *stockpile* serta kemampuan timbunan melepaskan panas. Semakin besar tinggi dan sudut kemiringan timbunan, kondisi aliran udara dan penyebaran panas di dalam timbunan juga dapat berubah. Zhou dkk. [4] menunjukkan bahwa ukuran partikel, sudut lereng, dan tinggi timbunan merupakan faktor yang berpengaruh terhadap proses pemanasan pada *stockpile*. Pada kondisi konveksi paksa, Zhang dkk. [5] juga menunjukkan bahwa pengurangan porositas, ukuran partikel, tinggi timbunan, dan sudut lereng dapat membantu menciptakan kondisi penyimpanan yang lebih aman. Ilustrasi pengaruh tinggi dan sudut kemiringan timbunan terhadap risiko swabakar dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Ilustrasi Pengaruh Tinggi dan Sudut Kemiringan Timbunan terhadap Potensi Swabakar
(Sumber: ilustrasi penulis berdasarkan [4], [5], dan [8])

Pemadatan dilakukan untuk mengurangi rongga antarbutir batubara sehingga jumlah udara yang dapat masuk ke dalam timbunan menjadi lebih kecil. Dalam kegiatan operasional, pemadatan yang dilakukan secara bertahap pada setiap lapisan lebih baik dibandingkan pemadatan yang hanya dilakukan setelah timbunan mencapai tinggi maksimum. Metode *layering* juga membantu membentuk geometri *stockpile* yang lebih seragam dan lebih mudah dikendalikan. Nursanto dkk. [8] merekomendasikan pengaturan kemiringan timbunan yang dapat mendukung proses pemadatan dan mengurangi masuknya angin ke dalam timbunan. Oleh karena itu, geometri timbunan dan kualitas pemadatan perlu dievaluasi secara bersamaan dalam pengelolaan *stockpile*.

Pemantauan Temperatur pada Stockpile

Pemantauan temperatur merupakan salah satu cara penting untuk mengetahui perkembangan awal *self-heating* pada timbunan batubara. Namun, hasil pengukuran temperatur sebaiknya tidak hanya dilihat dari satu nilai pengukuran, tetapi juga berdasarkan perubahan temperatur dari waktu ke waktu dan lokasi titik pengukuran. Kautsar dkk. [10] menggunakan temperatur sekitar 50°C sebagai batas untuk meningkatkan kewaspadaan terhadap gejala swabakar. Yolanda dkk. [16] juga menunjukkan bahwa lama penimbunan, arah angin, dan dimensi timbunan dapat memengaruhi kenaikan temperatur. Oleh karena itu, pemantauan temperatur sebaiknya dilakukan pada titik yang telah ditentukan, dengan jadwal yang teratur dan hasil pengukuran dicatat secara berkala. Apabila temperatur menunjukkan kecenderungan meningkat, perlu segera dilakukan pemeriksaan dan tindakan pengendalian.

METODOLOGI

Penelitian ini dilaksanakan pada ROM *stockpile* PT Putra Muba Coal yang berada di Kecamatan Sungai Lilin, Kabupaten Musi Banyuasin, Provinsi Sumatera Selatan. Penelitian menggunakan data pengamatan lapangan yang diperoleh pada Mei 2022. Data tersebut dianalisis kembali sebagai studi evaluatif terhadap kondisi penimbunan, geometri timbunan,

temperatur, dan praktik pengelolaan stockpile pada periode pengamatan tersebut. Penelitian menggunakan pendekatan deskriptif-kuantitatif berbasis observasi lapangan. Kondisi aktual *stockpile* diamati dan diukur, kemudian hasilnya dibandingkan dengan prinsip pengelolaan *stockpile* dan hasil penelitian terdahulu.

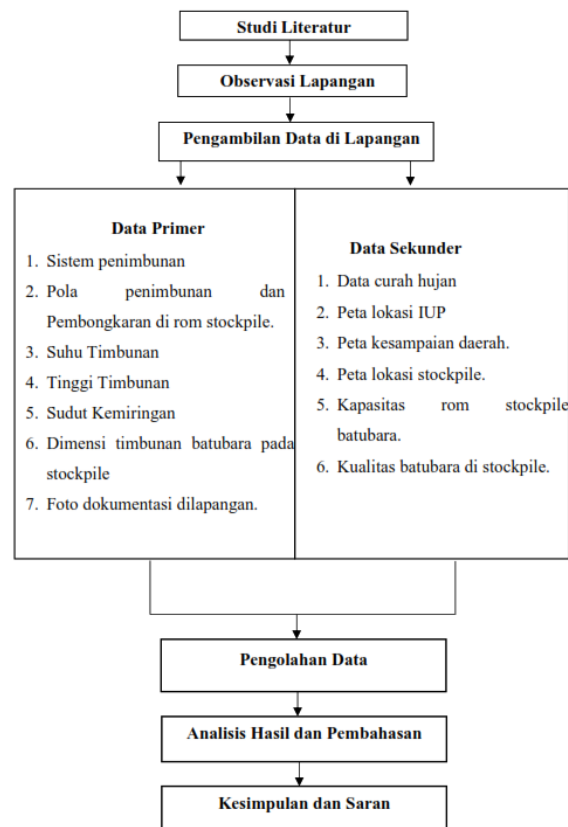
Tahapan penelitian meliputi studi literatur, observasi lapangan, pengumpulan data primer dan data sekunder, pengolahan dan analisis data, serta penyusunan rekomendasi. Data primer yang dikumpulkan meliputi sistem penimbunan, pola penimbunan dan pembongkaran, temperatur timbunan, tinggi dan sudut kemiringan timbunan, lama penimbunan, dimensi timbunan, serta dokumentasi kondisi lapangan. Sementara itu, data sekunder meliputi kapasitas dan luas area *stockpile*, kualitas batubara, curah hujan, serta peta pendukung.

Pengamatan kondisi fisik dilakukan pada beberapa bagian *stockpile*, meliputi kondisi lantai, keberadaan cekungan dan genangan air, arah aliran air, kondisi drainase, bentuk timbunan, proses *trimming*, pola *layering*, metode pemadatan, serta proses pembongkaran batubara. Pengamatan ini bertujuan untuk mengetahui kondisi yang dapat meningkatkan masuknya udara ke dalam timbunan, memperpanjang waktu penyimpanan batubara, atau menghambat pelepasan panas dari timbunan.

Pemantauan temperatur dilakukan menggunakan *thermogun* pada 12 titik yang ditempatkan di sekeliling timbunan. Pengukuran dilakukan selama 30 hari pada waktu pagi, siang, dan sore. Data temperatur selanjutnya dibandingkan dengan kondisi visual di lapangan, terutama munculnya asap, serta dikaitkan dengan pola pembongkaran dan lama penyimpanan batubara. Temperatur sekitar 50°C digunakan sebagai tingkat kewaspadaan operasional terhadap kemungkinan terjadinya swabakar berdasarkan penelitian terdahulu [10].

Evaluasi geometri dilakukan dengan mengukur tinggi dan sudut kemiringan timbunan. Tinggi timbunan diukur menggunakan *total station* berdasarkan perbedaan elevasi antara titik kaki dan bagian atas timbunan, sedangkan sudut kemiringan timbunan diukur menggunakan clinometer pada beberapa titik di sisi timbunan. Tinggi timbunan dievaluasi berdasarkan kondisi operasional yang mendukung proses pemadatan dan mengurangi paparan angin. Sementara itu, sudut kemiringan timbunan dibandingkan dengan rekomendasi pengelolaan *stockpile* dan karakteristik *angle of repose* batubara. Sistem pembongkaran juga dievaluasi dengan mengidentifikasi penerapan metode FIFO dan LIFO serta pengaruhnya terhadap kemungkinan adanya batubara yang tersimpan lebih lama di dalam *stockpile*.

Analisis data dilakukan secara deskriptif-komparatif dengan mengelompokkan parameter penelitian menjadi tujuh bagian, yaitu kondisi lantai dan drainase, pola penimbunan, metode pembongkaran, temperatur, tinggi dan sudut kemiringan timbunan, lama penimbunan, serta tindakan penanganan ketika gejala swabakar muncul. Setiap parameter dianalisis dan dibandingkan secara bersamaan untuk mengetahui kondisi yang paling berpengaruh terhadap risiko swabakar. Berdasarkan hasil analisis tersebut kemudian disusun rekomendasi teknis yang mencakup pengaturan aliran material, kondisi fisik timbunan, pemantauan temperatur, dan tindakan awal ketika terjadi peningkatan temperatur. Penelitian ini bersifat evaluatif-deskriptif dan tidak digunakan untuk membangun model prediksi statistik. Bagan alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi Lantai dan Drainase ROM Stockpile

ROM *stockpile* PT Putra Muba Coal merupakan *open stockpile* dengan kapasitas sekitar 30.000 MT. Berdasarkan hasil pengamatan, kondisi lantai *stockpile* secara umum cukup bersih dari material pengotor seperti potongan kayu, logam, dan plastik. Namun, permukaan lantai belum rata akibat aktivitas alat berat selama proses *dumping* dan *loading*. Pada beberapa bagian terdapat cekungan yang menyebabkan air hujan maupun air dari penyiraman debu menggenang dan tidak seluruhnya mengalir menuju saluran terbuka.

Adanya genangan air menunjukkan bahwa kondisi permukaan lantai belum optimal dalam mengalirkan air keluar dari area *stockpile*. Berdasarkan kondisi aktual, kemiringan lantai *stockpile* kurang dari 2%. Oleh karena itu, kemiringan lantai direkomendasikan sekitar 2% agar air dapat mengalir dengan lebih baik menuju saluran terbuka. Perbaikan kemiringan lantai diperlukan untuk mengurangi genangan air, menjaga kelancaran pergerakan alat, serta mengurangi kontak antara batubara dengan air yang tertahan di area *stockpile*.

Pengelolaan lantai *stockpile* juga perlu memperhatikan kekuatan dan kestabilan permukaan karena area tersebut digunakan untuk menahan beban timbunan batubara sekaligus aktivitas alat berat. Dengan demikian, kondisi lantai perlu mampu mendukung sistem drainase yang baik serta kegiatan operasional secara aman dan efektif. Kondisi aktual lantai ROM *stockpile* PT Putra Muba Coal dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Kondisi Lantai *Stockpile* dan Genangan pada Area Penelitian

Pola Penimbunan dan Pemadatan

Pola penimbunan batubara yang diterapkan di lokasi penelitian adalah *windrow* dengan metode *layering*. Pada setiap tahap penimbunan, bagian atas timbunan diratakan menggunakan *wheel loader*, kemudian batubara dipadatkan secara bertahap dari lapisan bawah hingga lapisan atas. Tinggi timbunan yang umum digunakan berkisar antara 6–7 m. Pola penimbunan ini cukup baik karena proses pemadatan dapat dilakukan selama pembentukan *stockpile*, sehingga tidak hanya dilakukan pada permukaan akhir timbunan.

Pemadatan secara berlapis bertujuan untuk mengurangi rongga udara di dalam timbunan yang dapat menjadi jalur masuknya oksigen. Semakin sedikit rongga udara, semakin kecil peluang oksigen masuk ke dalam *stockpile* dan mendukung proses oksidasi batubara. Berdasarkan kondisi di lokasi penelitian, pemadatan membantu menjaga perubahan temperatur timbunan agar lebih terkendali. Oleh karena itu, pola *windrow-layering* masih dapat dipertahankan, tetapi pelaksanaan pemadatan perlu dilakukan secara konsisten dengan urutan kerja yang jelas serta didukung oleh akses alat yang memadai.

Ketinggian timbunan sebesar 6–7 m juga relatif lebih mudah dikendalikan dibandingkan timbunan yang lebih tinggi. Meskipun demikian, ketinggian tersebut tidak sepenuhnya menghilangkan risiko swabakar. Risiko masih dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor lain, seperti lama penimbunan, kemiringan timbunan, arah angin, dan tingkat pemadatan. Oleh karena itu, pengendalian tinggi *stockpile* perlu dilakukan bersamaan dengan pengendalian faktor-faktor lainnya. Bentuk pola penimbunan pada area penelitian dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Bentuk Timbunan Batubara pada ROM *Stockpile*

Evaluasi Sistem Pembongkaran FIFO (First in, First Out) dan LIFO (Last in, First Out)

Pembongkaran batubara dari *stockpile* dilakukan sesuai dengan kebutuhan pengiriman. Dalam kegiatan operasional, *excavator* digunakan untuk mengambil batubara dari timbunan, sedangkan *dump truck* mengangkut batubara menuju lokasi pengiriman. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa sistem *First in, First Out* (FIFO) belum diterapkan secara konsisten. Pada kondisi tertentu, terutama saat terdapat kegiatan pemuatan ke tongkang, batubara yang baru datang dari area tambang dapat langsung digunakan untuk pengiriman. Kondisi tersebut menyebabkan pola pembongkaran sementara berubah menjadi *Last in, First Out* (LIFO). Setelah kegiatan tersebut selesai, pola pembongkaran kembali mengikuti sistem FIFO.

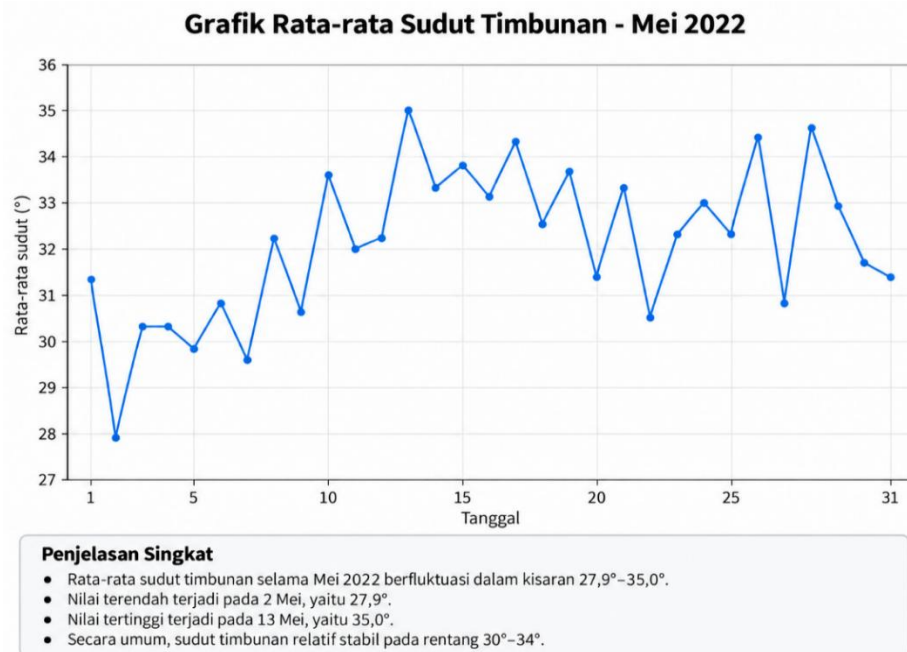
Penerapan metode *Last in, First Out* (LIFO) secara berulang dapat menyebabkan batubara yang lebih lama tertimbun tetap berada di dalam *stockpile*. Kondisi ini membuat waktu penyimpanan batubara menjadi lebih panjang sehingga kontak dengan udara juga berlangsung lebih lama. Semakin lama batubara tersimpan, semakin besar kemungkinan terjadinya peningkatan temperatur dan akumulasi panas di dalam timbunan. Lama waktu penimbunan juga dapat memengaruhi risiko terjadinya swabakar serta perubahan kualitas batubara. Oleh karena itu, penerapan metode LIFO yang kurang tepat dapat menjadi salah satu faktor yang meningkatkan potensi terjadinya swabakar pada *stockpile*.

Dalam penerapannya, sistem *First in, First Out* (FIFO) sebaiknya tidak hanya diterapkan sebagai prosedur kerja, tetapi juga didukung oleh kondisi operasional di *stockpile*. Tata letak tumpukan, jalur pergerakan alat, pencatatan waktu masuk batubara, dan urutan pengambilan material perlu diatur agar batubara yang lebih dahulu masuk dapat lebih dahulu digunakan. Penerapan FIFO dapat dilakukan dengan memisahkan tumpukan berdasarkan periode penimbunan, memberikan penanda atau *stock card* pada setiap tumpukan, serta menghindari penumpukan batubara baru di atas batubara yang sudah lebih lama tersimpan. Dengan pengaturan tersebut, batubara lama tetap mudah diakses dan tidak tertutup oleh material baru, sehingga proses pengambilan batubara dapat dilakukan sesuai urutan waktu penimbunan.

Pengaruh Sudut dan Tinggi Timbunan

Pemantauan sudut kemiringan timbunan ROM *stockpile* PT Putra Muba Coal dilakukan sepanjang bulan Mei 2022 (Gambar 6). Hasil pengukuran menunjukkan bahwa rata-rata sudut kemiringan timbunan sebesar $33,58^\circ$, dengan nilai sudut terendah pada tanggal 2 Mei, yaitu $27,9^\circ$ dan nilai sudut tertinggi pada tanggal 13 Mei, yaitu 35° . Berdasarkan penelitian sebelumnya, nilai *angle of repose* sekitar 38° digunakan sebagai batas pembanding untuk batubara berperingkat rendah. Meskipun rata-rata sudut kemiringan timbunan di lokasi penelitian masih berada di bawah nilai tersebut, kondisi ini tidak berarti bahwa risiko swabakar dapat diabaikan. Pada awal Mei, gejala swabakar masih ditemukan pada bagian timbunan yang memiliki sudut sekitar $28\text{--}32^\circ$.

Temuan tersebut menunjukkan bahwa sudut kemiringan timbunan bukan satu-satunya faktor yang menentukan terjadinya *self-heating*. Risiko swabakar juga dipengaruhi oleh porositas timbunan, arah angin, lama penyimpanan, karakteristik batubara, dan tingkat pemadatan. Nursanto dkk. [8] merekomendasikan penggunaan sudut kemiringan timbunan yang lebih landai karena dapat memudahkan proses pemadatan dan mengurangi masuknya udara ke dalam timbunan. Oleh karena itu, sudut sekitar 30° dapat digunakan sebagai target operasional yang lebih aman dibandingkan hanya mempertahankan sudut kemiringan timbunan di bawah batas *angle of repose* 38° .



Gambar 6. Grafik Pemantauan Sudut kemiringan timbunan ROM *Stockpile*

Tinggi timbunan aktual yang berkisar antara 6–7 m masih dapat dipertahankan selama kapasitas *stockpile* mencukupi dan proses pemadatan dilakukan secara konsisten. Penambahan tinggi timbunan tanpa memperluas area *stockpile* dapat meningkatkan jumlah batubara yang tertimbun, memperpanjang bidang lereng, dan menghasilkan bagian timbunan yang lebih sulit dipadatkan. Kondisi tersebut dapat meningkatkan terbentuknya rongga udara dan memengaruhi proses pelepasan panas dari dalam timbunan.

Lama Penimbunan

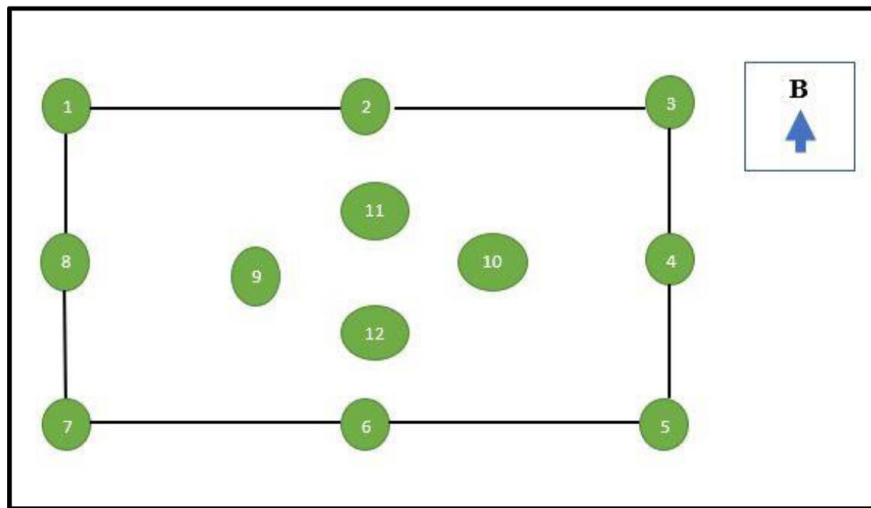
Hasil pengamatan menunjukkan bahwa terdapat bagian timbunan batubara yang telah berada di *stockpile* selama lebih dari satu bulan. Kondisi ini terjadi ketika proses pembongkaran belum sepenuhnya mengikuti sistem *First in, First Out* (FIFO) atau ketika perubahan kebutuhan pengiriman menyebabkan batubara yang lebih lama tersimpan tidak segera dibongkar. Semakin lama batubara berada di *stockpile*, semakin lama pula kontak batubara dengan udara. Kondisi tersebut dapat meningkatkan proses oksidasi dan menyebabkan panas lebih mudah terakumulasi di dalam timbunan.

Umur timbunan lebih dari satu bulan berkaitan dengan peningkatan temperatur pada produk *coal stockpile*. Berdasarkan kondisi tersebut, lama penyimpanan sekitar satu bulan dapat digunakan sebagai batas pengendalian operasional di ROM *stockpile* PT Putra Muba Coal. Batas ini bukan menunjukkan bahwa swabakar pasti terjadi setelah satu bulan, tetapi digunakan sebagai waktu untuk meningkatkan kewaspadaan. Batubara yang mendekati batas tersebut perlu diprioritaskan untuk dibongkar, dipantau temperturnya lebih sering, dan tidak ditutup oleh timbunan batubara baru.

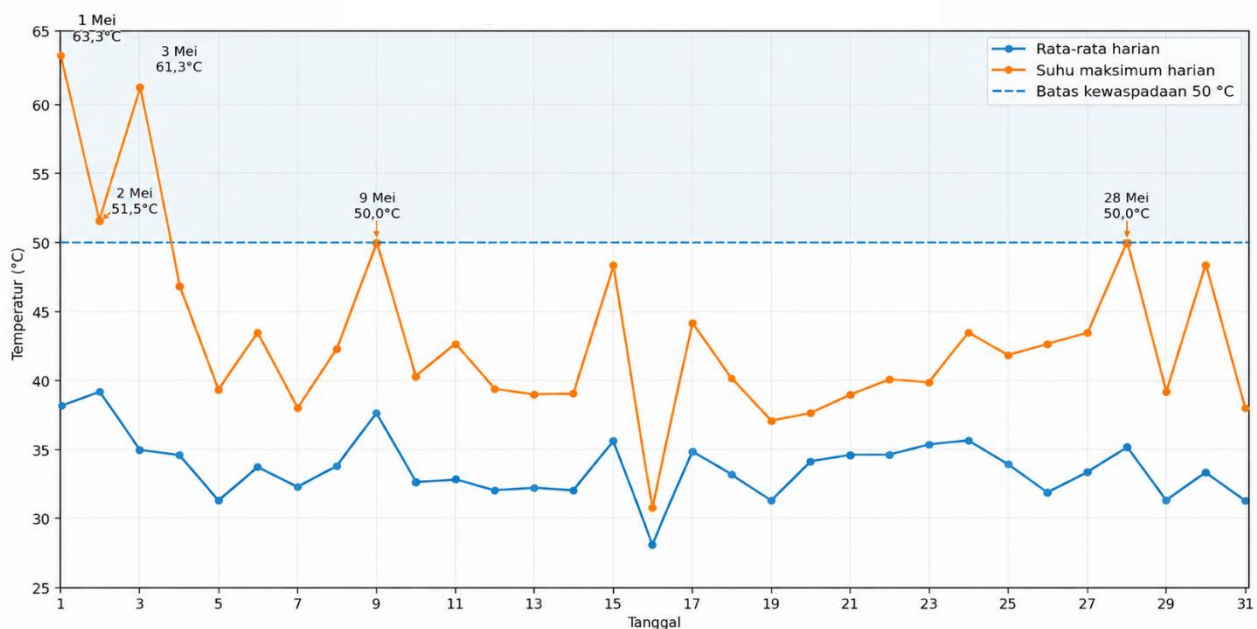
Pengendalian lama penimbunan dapat dilakukan dengan mencatat tanggal masuk batubara pada setiap tumpukan serta memperkirakan waktu pembongkarannya. Data tersebut kemudian dapat dikombinasikan dengan hasil pemantauan temperatur untuk menentukan prioritas pembongkaran. Dengan cara ini, penerapan FIFO tidak hanya bergantung pada pengamatan atau ingatan operator, tetapi juga didukung oleh data umur timbunan yang tercatat dengan baik.

Distribusi Temperatur dan Kejadian Swabakar

Pemantauan temperatur dilakukan selama 30 hari pada 12 titik yang berada di sekeliling timbunan (Gambar 7). Pengukuran dilakukan pada pagi, siang, dan sore hari. Hasil pemantauan menunjukkan adanya perbedaan temperatur pada setiap waktu pengukuran yang dapat dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan paparan panas. Namun, kondisi yang perlu mendapat perhatian adalah peningkatan temperatur yang disertai munculnya asap pada awal periode pengamatan. Grafik pemantauan suhu timbunan dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 7. Titik Pengambilan Suhu



Gambar 8. Grafik Pemantauan Suhu Timbunan ROM *Stockpile*

Berdasarkan grafik di atas, ada beberapa titik pengukuran dengan temperatur tinggi selama Mei 2022. Temperatur maksimum ≥ 50 °C teridentifikasi pada tanggal 1, 2, 3, 9, dan 28 Mei, dengan temperatur tertinggi sebesar 63,3 °C pada 1 Mei. Meskipun rata-rata temperatur harian pada periode pengamatan hanya berkisar 28,03–39,20 °C, keberadaan temperatur tinggi pada titik tertentu menunjukkan bahwa penggunaan nilai rata-rata saja dapat menutupi *hotspot* lokal pada timbunan. Oleh karena itu, evaluasi potensi swabakar perlu mempertimbangkan temperatur maksimum pada masing-masing titik pengukuran selain nilai rata-rata harian.

Temperatur 50–63 °C menunjukkan kondisi yang perlu mendapat perhatian dalam kegiatan operasional. Temperatur sekitar 50 °C dapat digunakan sebagai tingkat kewaspadaan terhadap gejala swabakar. Meskipun demikian, tindakan pengendalian sebaiknya tidak menunggu hingga temperatur mencapai 50 °C. Apabila hasil pemantauan menunjukkan kenaikan temperatur secara terus-menerus menuju batas tersebut, perlu segera dilakukan pemeriksaan lapangan dan tindakan pengendalian, seperti pemadatan, pembongkaran pada bagian yang mengalami peningkatan temperatur, atau penyebaran (*spreading*) material panas agar panas lebih cepat dilepaskan.

Pemantauan temperatur juga perlu memperhatikan pola kenaikan dari waktu ke waktu, bukan hanya temperatur tertinggi yang tercatat. Sebagai contoh, titik dengan temperatur 40–45 °C yang terus mengalami peningkatan dapat memerlukan

perhatian lebih dibandingkan titik dengan temperatur yang sama tetapi relatif stabil. Oleh karena itu, pencatatan temperatur secara berkala penting untuk mengetahui kecenderungan perubahan temperatur pada setiap titik pengamatan. Secara teknis, panas dari zona internal timbunan dapat mencapai permukaan apabila tersedia jalur perpindahan panas melalui rongga antarbutir. Pada bagian kaki timbunan, distribusi ukuran material yang tidak merata (segregasi material), terutama akibat terkumpulnya material berukuran lebih kasar, dapat meningkatkan porositas lokal dan membentuk jalur sirkulasi udara. Pergerakan udara melalui rongga tersebut dapat membawa panas dari bagian dalam menuju permukaan. Selain itu, panas juga dapat berpindah melalui kontak antarpartikel batubara sehingga turut meningkatkan temperatur permukaan timbunan. Kondisi ini memungkinkan *thermogun* mendeteksi peningkatan temperatur pada permukaan yang berkaitan dengan adanya akumulasi panas di bagian dalam timbunan.

Pengukuran dalam penelitian ini menggunakan *thermogun*, sehingga temperatur yang diperoleh hanya menggambarkan kondisi permukaan atau bagian timbunan yang dapat dijangkau oleh alat. Kondisi panas atau *hotspot* yang berada di bagian dalam timbunan belum tentu dapat terdeteksi, terutama pada tahap awal atau apabila tidak terdapat jalur perpindahan panas yang memadai menuju permukaan. Keterbatasan ini perlu diperhatikan dalam menilai kondisi *stockpile* dan menginterpretasikan hasil pengukuran temperatur. Untuk penelitian selanjutnya, pemantauan dapat dikembangkan dengan menggunakan sensor temperatur pada beberapa kedalaman timbunan dan/atau pemantauan gas CO sebagai indikator tambahan untuk mendeteksi perkembangan *self-heating* di bagian dalam timbunan.

Lokasi Swabakar dan Peran Pemadatan

Hasil pengamatan lapangan menunjukkan bahwa gejala swabakar cenderung ditemukan pada bagian sisi dan kaki timbunan, terutama pada area yang membentuk sudut tertentu. Pada bagian tersebut dapat terbentuk rongga antarbutir yang menjadi jalur masuknya udara ke dalam timbunan. Masuknya udara menyediakan oksigen yang mendukung proses oksidasi batubara, sedangkan bentuk timbunan tertentu dapat menyebabkan panas lebih sulit dilepaskan ke lingkungan.

Sisi barat timbunan juga memiliki paparan sinar matahari yang relatif lebih besar. Paparan sinar matahari bukan merupakan penyebab utama swabakar, tetapi dapat menambah panas pada permukaan timbunan yang telah mengalami proses oksidasi. Oleh karena itu, kondisi paparan matahari perlu dipertimbangkan bersama dengan faktor lain seperti arah angin, porositas, lama penimbunan, dan tingkat pemadatan.

Bagian kaki timbunan perlu mendapatkan perhatian khusus dalam proses pemadatan. Distribusi ukuran batubara yang tidak seragam dapat menyebabkan material berukuran lebih besar terkumpul pada bagian kaki timbunan dan membentuk rongga yang lebih besar. Rongga tersebut dapat menjadi jalur masuk udara ke bagian dalam *stockpile*. Porositas dan ukuran partikel sangat berpengaruh terhadap proses pemanasan di dalam timbunan. Oleh karena itu, pembentukan tumpukan perlu dilakukan dengan mengurangi segregasi material berukuran besar pada kaki timbunan serta memastikan pemadatan dilakukan secara merata, terutama pada bagian yang berhadapan langsung dengan arah angin.



Gambar 9. Gejala Swabakar pada Area *Stockpile* PT Putra Muba Coal

Evaluasi dan Rekomendasi Teknis Pencegahan Swabakar

Berdasarkan hasil evaluasi, risiko swabakar pada ROM *stockpile* PT Putra Muba Coal dipengaruhi oleh beberapa faktor yang saling berkaitan, meliputi kondisi lantai dan drainase, pola penimbunan, sistem pembongkaran, geometri timbunan, lama penyimpanan, serta temperatur. Oleh karena itu, tindakan pencegahan perlu dilakukan secara terpadu dan tidak hanya berfokus pada satu parameter. Ringkasan kondisi aktual, dampak teknis, dan rekomendasi pengelolaan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan Evaluasi dan Rekomendasi Teknis Pencegahan Swabakar pada ROM Stockpile PT Putra Muba Coal

No.	Parameter	Kondisi Aktual	Dampak Teknis	Rekomendasi
1	Lantai dan drainase	Masih terdapat cekungan dan genangan air pada beberapa bagian lantai <i>stockpile</i>	Aliran air menuju saluran drainase belum optimal	Meratakan kembali lantai dan membuat kemiringan sekitar 2% menuju saluran drainase
2	Pola penimbunan	Menggunakan pola <i>windrow</i> dengan metode <i>layering</i>	Mendukung pemadatan secara bertahap pada setiap lapisan	Mempertahankan pola <i>windrow-layering</i> dan memastikan pemadatan dilakukan secara konsisten
3	Sistem pembongkaran	FIFO telah diterapkan, tetapi pada kondisi tertentu masih terjadi LIFO	Batubara yang lebih lama dapat tertahan sehingga waktu penyimpanan meningkat	Menerapkan FIFO secara konsisten dan memprioritaskan pembongkaran batubara yang lebih dahulu masuk
4	Sudut kemiringan timbunan	Rata-rata sudut kemiringan timbunan sebesar 33,58°	Masuknya udara ke dalam timbunan masih perlu dikendalikan	Mengarahkan sudut kemiringan timbunan mendekati 30° untuk membantu pemadatan dan mengurangi penetrasi udara
5	Tinggi timbunan	Tinggi timbunan berkisar 6–7 m	Masih relatif mudah dikendalikan dan dipadatkan	Mempertahankan tinggi timbunan 6–7 m serta menghindari peningkatan tinggi secara berlebihan
6	Lama penimbunan	Sebagian batubara tersimpan lebih dari 1 bulan	Waktu kontak dengan udara meningkat sehingga risiko oksidasi dan akumulasi panas bertambah	Membatasi lama penyimpanan, mencatat umur setiap <i>pile</i> , dan memprioritaskan pembongkaran material yang lebih lama
7	Pemantauan temperatur	Belum dilakukan secara rutin sebelum penelitian	Kenaikan temperatur dan titik panas berpotensi terlambat diketahui	Melakukan pemantauan temperatur secara rutin dan meningkatkan frekuensi inspeksi apabila temperatur menunjukkan tren meningkat atau mendekati 50 °C

No.	Parameter	Kondisi Aktual	Dampak Teknis	Rekomendasi
8	Penanganan titik panas	Material panas atau berasap dibongkar menggunakan <i>excavator</i> , dipisahkan, kemudian dilakukan <i>spreading</i>	Dapat mengurangi akumulasi panas, tetapi penanganannya bersifat reaktif	Tetap digunakan sebagai tindakan saat kondisi kritis, sedangkan pencegahan difokuskan pada FIFO, pemadatan, geometri, umur timbunan, dan monitoring

Berdasarkan hasil evaluasi, penerapan FIFO perlu menjadi prioritas untuk mengurangi lama penyimpanan batubara. Batubara yang lebih dahulu masuk harus diprioritaskan untuk dibongkar dan tidak ditutup oleh material baru. Pengendalian ini perlu didukung dengan pencatatan umur setiap tumpukan sehingga material yang telah tersimpan lebih lama dapat segera diidentifikasi dan dibongkar.

Dari sisi kondisi fisik, pola *windrow* dengan metode *layering* masih dapat dipertahankan karena mendukung pemadatan secara bertahap. Tinggi timbunan 6–7 m juga masih relatif terkendali, sedangkan sudut kemiringan timbunan dapat diarahkan mendekati 30° untuk mempermudah pemadatan dan mengurangi masuknya udara. Selain itu, lantai *stockpile* perlu diperbaiki dengan kemiringan sekitar 2% menuju saluran drainase untuk mengurangi genangan air.

Pemantauan temperatur perlu dilakukan secara rutin dengan memperhatikan perubahan temperatur dari waktu ke waktu. Apabila temperatur menunjukkan kecenderungan meningkat atau mendekati 50 °C, frekuensi inspeksi perlu ditingkatkan. Jika ditemukan material panas atau mengeluarkan asap, material dibongkar menggunakan *excavator*, dipisahkan dari timbunan utama, kemudian dilakukan *spreading* untuk mempercepat pelepasan panas. Setelah temperatur menurun, material dapat dipadatkan kembali.

Dengan demikian, tindakan pencegahan swabakar dapat dikelompokkan menjadi pengendalian aliran material, pengendalian kondisi fisik timbunan, dan pengendalian temperatur. Ketiga kelompok tersebut perlu diterapkan secara bersamaan agar penanganan tidak hanya dilakukan setelah swabakar terjadi, tetapi lebih diarahkan pada pencegahan sejak awal.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil dari penelitian, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

Penerapan pola *windrow* dengan metode *layering* dan tinggi 6–7 m pada ROM *stockpile* PT Putra Muba Coal telah mendukung proses pemadatan bertahap dengan geometri yang relatif terkendali (rata-rata sudut kemiringan 33,58°), meski penyesuaian sudut mendekati 30° disarankan untuk mengoptimalkan pemadatan dan meminimalkan masuknya udara. Namun, penerapan sistem pembongkaran yang belum konsisten menerapkan *First in, First Out* (FIFO) memicu penumpukan batubara hingga lebih dari satu bulan, memperpanjang waktu kontak dengan udara yang meningkatkan risiko oksidasi serta akumulasi panas. Hal ini terbukti dari pemantauan 30 hari di 12 titik yang mengidentifikasi gejala swabakar pada tanggal 1, 2, 3, 9, dan 28 Mei dengan kisaran suhu 50–63 °C, di mana temperatur 50 °C perlu dijadikan batas kewaspadaan operasional di samping pengawasan terhadap tren kenaikan suhu yang terjadi. Oleh karena itu, pencegahan swabakar harus dilakukan secara terpadu melalui konsistensi FIFO, pembatasan durasi penyimpanan, pemadatan tiap lapisan, pengawasan geometri dan drainase, serta pemantauan suhu rutin; yang diimbangi dengan tindakan korektif berupa pembongkaran material panas, pemisahan, *spreading*, dan pemadatan ulang saat indikasi swabakar terdeteksi.

PT Putra Muba Coal disarankan menerapkan sistem FIFO secara konsisten dengan memberikan identifikasi umur pada setiap tumpukan. Batubara yang mendekati waktu penyimpanan satu bulan perlu diprioritaskan untuk dibongkar dan tidak ditutup oleh material baru. Pemantauan temperatur juga perlu dilakukan secara rutin, minimal satu kali setiap hari, dan frekuensinya ditingkatkan apabila temperatur menunjukkan tren meningkat atau mendekati 50 °C.

Geometri timbunan disarankan dipertahankan pada tinggi sekitar 6–7 m selama masih sesuai dengan kapasitas *stockpile*, sedangkan sudut kemiringan timbunan diarahkan mendekati 30°. Pemadatan perlu dilakukan secara konsisten pada setiap

layer, terutama pada kaki timbunan dan sisi yang lebih banyak terpapar angin. Lantai *stockpile* juga perlu diratakan kembali dengan kemiringan sekitar 2% menuju saluran drainase agar genangan air dapat dikurangi.

Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan sensor temperatur pada beberapa kedalaman serta menambahkan pengukuran gas CO/CO₂, kecepatan dan arah angin, ukuran partikel, kadar air, serta parameter proksimat batubara. Data tersebut dapat digunakan untuk mengembangkan sistem peringatan dini yang lebih kuantitatif sehingga peningkatan temperatur dan lokasi *hotspot* dapat diketahui sebelum muncul gejala asap.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Thomas, *Coal Geology*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2020.
- [2] J. G. Speight, *Handbook of Coal Analysis*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2015.
- [3] J. G. Speight, *The Chemistry and Technology of Coal*, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2013.
- [4] A. Zhou, J. An, K. Wang, J. Zhang, Y. Liu, J. Wang, G. Si, and W. Wang, "Modeling and parametric analysis of low-temperature oxidative self-heating in coal *stockpiles* driven by natural convection," *Fuel*, vol. 361, Art. no. 130670, 2024, doi: 10.1016/j.fuel.2023.130670.
- [5] J. Zhang, J. An, A. Zhou, K. Wang, G. Si, and B. Xu, "Development and parameterization of a model for low-temperature oxidative self-heating of coal *stockpiles* under forced convection," *Fuel*, vol. 339, Art. no. 127349, 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2022.127349.
- [6] H. Zhang, P. Wang, Y. Wang, H. Vo Thanh, I. Ngo, X. Lu, X. Yang, X. Zhang, and K. Sasaki, "Investigate on spontaneous combustion characteristics of lignite *stockpiles* considering moisture and particle size effects," *Energy*, vol. 309, Art. no. 133193, 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.133193.
- [7] X. Lu, J. Deng, Y. Xiao, X. Zhai, C. Wang, and X. Yi, "Recent progress and perspective on thermal-kinetic, heat and mass transportation of coal spontaneous combustion hazard," *Fuel*, vol. 308, Art. no. 121234, 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121234.
- [8] E. Nursanto, R. Fadhillah, and Nurkhamim, "Review of *stockpile* management to reduce the risk of coal self-heating, which can cause spontaneous combustion," *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 470-476, 2024, doi: 10.25299/jgeet.2024.9.04.17132.
- [9] D. Maulana and Solihin, "Analisis Lamanya Penimbunan Terhadap Swabakar pada *Stockpile* Produk Batubara PT. XYZ," *Jurnal Riset Teknik Pertambangan*, vol. 2, no. 2, pp. 99-106, 2022, doi: 10.29313/jrtp.v2i2.1191.
- [10] M. R. Kautsar, Sriyanti, and E. Moralista, "Monitoring Temperature Batubara untuk Prediksi Swabakar pada *Stockpile* Inpit TAL RL Utara," *Jurnal Riset Teknik Pertambangan*, vol. 5, no. 1, pp. 21-28, 2025, doi: 10.29313/jrtp.v5i1.6606.
- [11] R. Q. F. Adiwikarta, Sriyanti, and L. Pulungan, "Studi Pencegahan Swabakar Batubara di Muara Tiga Besar, PT XYZ," *Jurnal Riset Teknik Pertambangan*, vol. 4, no. 1, pp. 57-64, 2024, doi: 10.29313/jrtp.v4i1.3881.
- [12] Sarmidi, A. Zulatama, and R. Widodo, "Analisis Timbunan Sementara untuk Pencegahan Pembakaran Spontan Batubara di PIT 2 Banko Barat, PT Bukit Asam Tbk, Tanjung Enim, Sumatera Selatan," *Jurnal Ilmiah Teknik dan Sains*, vol. 1, no. 3, pp. 118-125, 2024, doi: 10.62278/jits.v1i3.22.
- [13] R. Noprayedi, Juventa, and Y. A. Yulanda, "Kajian Teknis Penimbunan Batubara di ROM *Stockpile* pada PT Caritas Energi Indonesia Provinsi Jambi," *Journal Applied Geo-Mining and Metallurgy*, vol. 1, no. 2, pp. 64-72, 2024, doi: 10.65706/gm.v1i2.38.
- [14] Z. Navtalia, H. Rahmi, M. F. Seprizal, D. W. Agustine, D. A. Permadi, and A. Yanottama, "Kajian Teknis Daya Dukung Tanah untuk Menentukan Kapasitas Optimum *Stockpile* Utama PT Putra Muba Coal," *Jurnal Riset Rumpun Ilmu Teknik*, vol. 4, no. 1, pp. 196-211, 2025, doi: 10.55606/jurritek.v4i1.4777.
- [15] R. A. Nata, G. Ren, J. Andas, Y. A. Yulanda, H. Rahmi, and V. Syahmer, "Geotechnical zonation and bearing capacity assessment for risk-informed foundation design in the heterogeneous soils of Girsang Sipangan Bolon, Indonesia," *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, vol. 13, no. 1, pp. 9567-9585, 2026, doi: 10.15243/jdmlm.2026.131.9567.
- [16] A. Yolanda, W. Nugroho, A. J. Pontus, A. Winarno, and T. Trides, "Analisis Pengaruh Kenaikan Temperatur Batubara Sebagai Indikator Awal Terjadinya Swabakar (Spontaneous Combustion) di Product Coal *Stockpile* pada PT Mahakam Sumber Jaya," *Jurnal Teknologi Mineral FT UNMUL*, vol. 12, no. 2, 2024, doi: 10.30872/jtm.v12i2.17815.
- [17] A. M. Carpenter, *Management of Coal Stockpiles*, IEA Coal Research, London, U.K., Rep. CCC/23, 1999.