JPII Vol 4(3) 257–266

JPII

Jurnal Profesi Insinyur Indonesia

http://ejournal.undip.ac.id/index.php/jpii

E-ISSN: 2985-8100

Evaluasi Dampak Kehadiran *Silicified coal Seam* A011 dan B012 Terhadap Parameter Kualitas Batu Bara: Studi Kasus Pengendalian Mutu Produksi di Tambang 1 PT Gorby Putra Utama, Musi Rawas Utara, Sumatera Selatan

Fandi Frananda[1*], Hadiyanto[1,2]

[1]*Program Studi Program Profesi Insinyur Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,*

[2]*Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,*

Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

[*)]Corresponding author: fandi.franandaa@gmail.com

(Received: May 30, 2026; Accepted: June 30, 2026)

Abstract

Evaluation of the Impact of the Presence of Silicified Coal Seam A011 and B012 on Coal Quality Parameters: A Case Study of Production Quality Control at Mine 1 PT Gorby Putra Utama, North Musi Rawas, South Sumatra. *The influence of silicified coal presence on coal quality and the effectiveness of quality control efforts at Mine 1 PT Gorby Putra Utama, North Musi Rawas, South Sumatra. Geologically, the research area belongs to the Muara Enim formation (Late Miocene–Early Pliocene) with a fluvial delta deposition environment containing several major coal layers. Sampling using the channel sampling method taken at 2 points from seam A011 and seam B012, showed different levels of silicification due to post-depositional hydrothermal alteration processes. Layer A011 has a silicified coal zone of 10–15 cm thick including a patchy silicification (spotting) pattern and layer B012 reaches 40–50 cm with a lenticular (lensed) pattern. Silication reduces the calorific value by 8–14% and increases the ash content by more than 2 times. The difference in the thickness of the alteration layer (silicified) is directly proportional to the level of quality degradation, while changes in sulfur content tend to be local and non-uniform. The use of excavator crushers is up to 70–90% effective in reducing the admixture of siliceous materials. Geologically based quality control plays a crucial role in maintaining consistent coal quality.*

Keywords*: Muara Enim formation, silicified coal, seam A011, seam B012, coal quality*

Abstrak

Pengaruh kehadiran *silicified coal* terhadap kualitas batu bara serta efektivitas upaya pengendalian mutu di Tambang 1 PT Gorby Putra Utama, Musi Rawas Utara, Sumatera Selatan. Secara geologi, area penelitian termasuk ke dalam Formasi Muara Enim (Miosen Akhir–Pliosen Awal) dengan lingkungan pengendapan *fluvial delta* yang mengandung beberapa lapisan batu bara utama. Pengambilan sampel menggunakan metode *chanel sampling* yang diambil 2 titik dari *seam* A011 dan *seam* B012, memperlihatkan tingkat silifikasi yang berbeda akibat proses alterasi hidrotermal pasca deposisi. Lapisan A011 memiliki zona *silicified coal* setebal 10–15 cm termasuk pola *patchy silicifition* (*spotting*) dan lapisan B012 mencapai 40–50 cm yang berpola *lenticular* (melensa). Silifikasi menurunkan nilai kalori hingga 8–14% dan meningkatkan kadar abu lebih dari 2 kali lipat. Perbedaan ketebalan lapisan alterasi (*silicified*) berbanding lurus dengan tingkat degradasi mutu, sedangkan perubahan kadar sulfur cenderung lokal dan tidak seragam. Penggunaan *excavator crusher* memiliki efektivitas hingga 70–90% dalam menekan ketercampuran

material yang tersilifikasi. Pengendalian mutu berbasis geologi berperan penting dalam menjaga konsistensi kualitas batu bara.

Kata kunci: *Formasi Muara Enim, silicified coal, seam A011, seam B012, kualitas batu bara*

***How to Cite This Article**:* Frananda, F., & Hadiyanto, H. (2026). Evaluasi Dampak Kehadiran Silicified coal Seam A011 dan B012 Terhadap Parameter Kualitas Batu Bara: Studi Kasus Pengendalian Mutu Produksi di Tambang 1 PT Gorby Putra Utama, Musi Rawas Utara, Sumatera Selatan. *JPII*, 4(3), 257–266. DOI: https://doi.org/10.14710/jpii.2026.32346

PENDAHULUAN

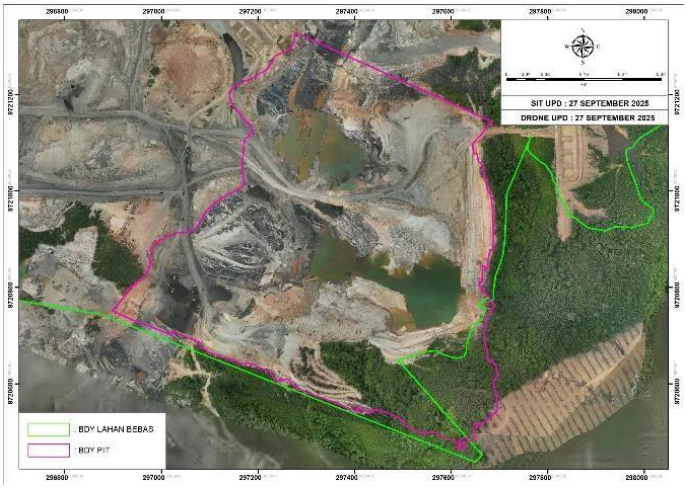
Sumber daya alam yang melimpah menimbulkan potensi yang besar bagi kehidupan di masa depan. Permintaan pasar yang semakin besar di era globalisasi seperti sekarang dalam memenuhi kebutuhan energi dan industri mempercepat laju produksi, salah satunya sektor pertambangan batu bara yang dinilai masih relevan digunakan hingga saat ini. Sebagai salah satu provinsi pemasok kebutuhan pasar batu bara terbesar di Indonesia, Sumatera Selatan yang memiliki cekungan Pra-Tersier dengan keterdapatan lapisan batu bara dari Formasi Muara Enim menyumbang 58,5 Juta ton/semester di tahun 2025 secara keseluruhan tambang di Sumatera Selatan.

Formasi Muara Enim dicirikan dengan keterdapatan beberapa lapisan batu bara. Lapisan batu bara pada Formasi Muara Enim memiliki tebal dan penyebaran yang cukup luas sehingga dinilai memiliki nilai ekonomi yang tinggi. Karakteristik litologi di Formasi Muara Enim dicirikan dengan keterdapatan lapisan batu pasir tufaan dan *silicified coal* pada beberapa lapisan batu baranya. *Silicified coal* merupakan proses terpenting yang terlibat dalam tumbuhan yang membatu karena melibatkan permineralisasi melalui ruang pori dan selanjutnya penggantian jaringan seluler organik oleh opal, kalsedon, moganite, atau kuarsa bahkan struktur histologis tanaman (Dietrich, 2013). Salah satu bentuk pengotor yang sering dijumpai adalah *silicified coal*, yaitu batu bara yang mengalami silifikasi akibat pengendapan mineral silika pada matriks batu bara. Keberadaan *silicified coal* yang bersifat melensa pada suatu *seam* batu bara menjadi faktor utama sulitnya melakukan pengendalian terhadap proses penambangan pada *front* galian tambang.

Dalam penambangan batu bara seringkali dijumpai kendala dalam pengendalian mutu batu bara tersebut. Adapun kendala yang muncul khususnya pada tambang terbuka PT Gorby Putra Utama adalah kehadiran pengotor geologi, salah satunya *silicified coal* sebagai pengotor (*impurities*) di dua lapisan *seam* batu bara, baik secara lateral berupa perlapisan (*keybed*) maupun fragmen-fragmen melensa (*lenses/spotty*). Kehadiran *silicified coal* menjadi tantangan dalam pengendalian kualitas batu bara karena dapat meningkatkan kandungan abu, menurunkan kalori, serta mempersulit proses pengolahan batu bara. Penelitian ini difokuskan pada analisis serta evaluasi perbandingan kualitas batu bara pada *unaltered seam* dan *seam* yang terpengaruh *silicified coal*. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran ilmiah sekaligus rekomendasi praktis bagi strategi pengendalian mutu produksi batu bara.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di area tambang PIT 1 PT Gorby Putra Utama yang berlokasi di Kabupaten Musi Rawas Utara, Provinsi Sumatera Selatan. Fokus penelitian diarahkan pada keberadaan lapisan *silicified coal seam* A011 dan B012 yang secara stratigrafi tersisip di dalam *seam* batu bara utama. Lapisan tersebut dipandang memiliki pengaruh langsung terhadap parameter kualitas batu bara, khususnya kandungan abu, konsentrasi silika, serta nilai kalor, sehingga perlu dilakukan evaluasi secara menyeluruh.



Gambar 1. Lokasi PIT 1 PT Gorby Putra Utama

Objek Penelitian

Objek penelitian berupa batu bara yang berasal dari *seam* A011 dan B012. Dua kelompok sampel diambil, yaitu:

1. Sampel *coal*, tanpa pengaruh lapisan *silicified coal* (*unaltered seam*) *seam* A011 dan B012.
2. Sampel *seam* dengan *silicified coal* (*silicified seam*), yang ditandai dengan perubahan tekstur

dan warna, serta meningkatnya densitas batu bara akibat silifikasi.

Tahapan Pelaksanaan

Tahap penelitian terdiri atas kegiatan lapangan dan laboratorium:

1. Survei geologi dan identifikasi lapangan, melakukan pemetaan lokal untuk menentukan distribusi lapisan *silicified coal*. Observasi visual meliputi ketebalan lapisan, keterdapatan lateral, serta hubungan dengan *seam* utama. Observasi visual meliputi ketebalan lapisan, keterdapatan lateral berupa dilusi *parting* maupun *silicified coal* (tebal, warna dan pola sebaran) yang dideskripsikan melalui form inspeksi *quality control*, serta hubungan dengan *seam* utama. Selanjutnya dilaporkan dalam form inspeksi beserta titik koordinat observasi geologi (X,Y dan Z). Hasil tersebut dilaporkan ke tim *engineering* dan pengawas produksi sebagai acuan saat melakukan kegiatan *coal getting* (*selective mining*).



Gambar 2. Kegiatan survei geologi pada tes PIT



Gambar 3. Pengukuran dilusi berupa lapisan *silicified coal* & lapisan *parting clay*

2. Pengambilan sampel, dilakukan dengan metode *chanel sampling*, sampel diambil pada dua kondisi aktual (*fresh*) dan *seam* dengan *silicified coal*. Setiap sampel diberi kode lokasi, *seam* dan kondisi untuk memudahkan analisis perbandingan.



Gambar 4. Pengambilan sampel batu bara dengan metode *chanel sampling seam* A011 & B012

3. Preparasi sampel, sampel yang telah diambil dari PIT selanjutnya akan dikirimkan ke laboratorium surveyor yang sudah ditentukan dan diuji sesuai prosedur ASTM yang berlaku.
4. Pengujian laboratorium, pengujian mutu batu bara dilakukan berdasarkan standar internasional (ASTM) meliputi: *proximate analysis* (ASTM D3176): kadar air, *volatil matter*, kadar abu, *fixed carbon*, nilai kalori (ASTM D5865): *gross calorific value* menggunakan *bomb calorimeter*, kadar sulfur total (ASTM D4239): menggunakan analisis pembakaran dengan deteksi infra merah.
5. Analisis data, data hasil laboratorium direkap pada tabel tabulasi berdasarkan *seam* dan tanggal *sampling*, dilakukan *avarage* dan *sum product* untuk keseluruhan *coal* dengan *seam* yang sama. Hasil dianalisis untuk menilai sejauh mana keberadaan *silicified coal* memengaruhi mutu produksi batu bara.

Batas Penelitian

Penelitian ini memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu dicatat, antara lain:

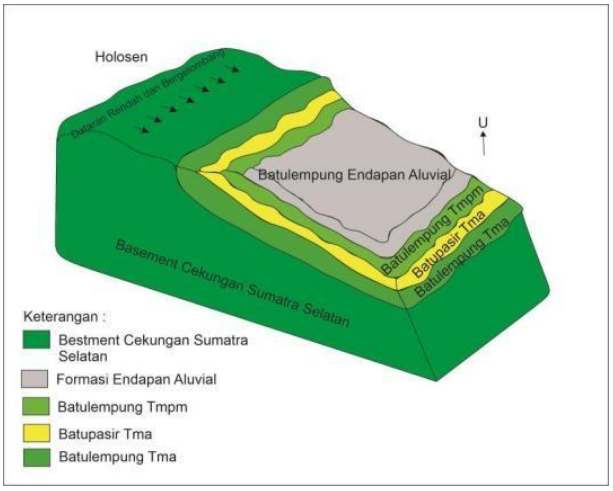
1. Jumlah titik *sampling* terbatas hanya pada *seam* A011 dan B012 yang representatif, sehingga hasil belum sepenuhnya mencerminkan keseluruhan sebaran *silicified coal* di area tambang.

2. Analisis laboratorium hanya mencangkup parameter mutu utama yaitu *total moisture* (%), *inherent moisture* (ar), *volatile matter* (adb), *fixed carbon* (adb), *ash* (adb), total sulfur (adb), *calorific value* (ar), *calorific value* (adb), *caloric value* (daf), sementara parameter analisis mineral detail (XRD/SEM) dan sayatan tipis *silicified coal* belum dilakukan.
3. Variabilitas lateral *seam* batu bara dapat menyebabkan perbedaan kualitas antar lokasi, yang tidak seluruhnya terwakili dalam penelitian ini.

HASIL DAN PEMBAHASAN

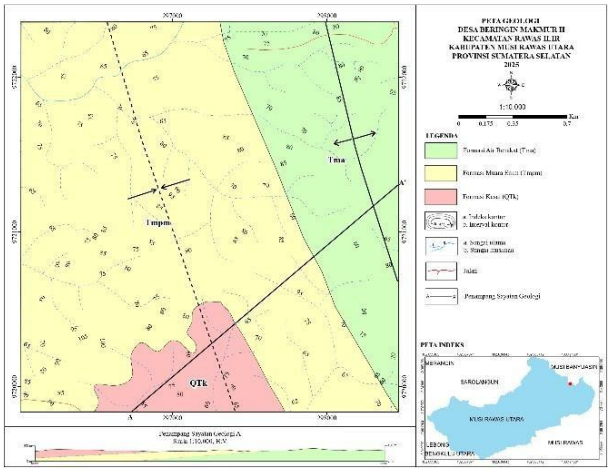
Kondisi Geologi dan Karakteristik *Seam*

Daerah penelitian termasuk dalam Peta Geologi Lembar Sarolangun yang mana daerah ini terletak pada cekungan Sumatra Selatan. Cekungan Sumatra Selatan yang dikenal sebagai salah satu penghasil batu bara utama di Indonesia, cekungan ini terbentuk pada periode tektonik ekstensional berumur Pra-Tersier sampai Tersier Awal yang berarah relatif Barat-Timur. Cekungan ini tersusun atas Formasi batuan sedimen yang mengandung lapisan batu bara dengan ketebalan bervariasi (Arifin et al., 2020). Selain proses tektonik, cekungan Sumatra Selatan dipengaruhi oleh proses sedimentasi, yang mana pada umumnya proses sedimentasi tersebut dibagi menjadi dua fase, yaitu fase transgresi dan fase regresi.



Gambar 5. Kenampakan secara 3D sejarah geologi daerah penelitian

Fase-fase tersebut nantinya akan berpengaruh pada proses pembentukan sedimentasi batuan pada daerah penelitian. Perkembangan struktur maupun evolusi cekungan Sumatra Selatan merupakan hasil interaksi dari tiga arah struktur utama yaitu, berarah Timurlaut-Baratdaya atau disebut pola Jambi, berarah Baratlaut-Tenggara atau disebut pola Sumatra dan berarah Utara Selatan atau disebut pola Sunda (Suta & Xiaoguang, 2005).



Gambar 6. Peta geologi daerah penelitian

Formasi Airbenakat (Tma)

Formasi Air Benakat berumur Miosen Tengah–Miosen Akhir dan secara stratigrafi terletak di bawah Formasi Muara Enim. Formasi ini merupakan hasil pengendapan awal sistem delta yang mulai berkembang di cekungan Sumatera Selatan. Batu pasir berbutir sedang hingga kasar, kadang mengandung konglomerat, batu lempung abu-abu, lanau dan batu pasir glaukonitan. Struktur sedimen seperti *cross bedding* dan *graded bedding* sering dijumpai, menandakan proses pengendapan berenergi tinggi. Ketebalan berkisar antara 400–800 meter, tersebar luas di bagian tengah cekungan Sumatera Selatan, termasuk di bawah lapisan batu bara Formasi Muara Enim. Formasi Air Benakat berperan sebagai lapisan dasar (*underlying formation*) dari Formasi Muara Enim, yang sering menjadi batas bawah zona batu bara di berbagai tambang batu bara Sumatera Selatan.

Formasi Muara Enim (Tmpm)

Formasi Muara Enim berumur Miosen Akhir hingga Pliosen Awal dan secara stratigrafi menindih selaras Formasi Air Benakat di bawahnya. Formasi ini merupakan formasi pembawa batu bara utama di cekungan Sumatera Selatan, termasuk di wilayah Musi Rawas Utara, tempat lokasi tambang PT Gorby Putra Utama. Tersusun atas batu lempung abu-abu kehitaman, batu pasir halus hingga sedang, batu lanau, serta lapisan batu bara tebal dengan sisipan *parting* berupa lempung karbonan, lanau dan material silisiklastik. Ketebalan total formasi berkisar antara 200–600 meter, dengan penyebaran luas hampir di seluruh wilayah cekungan, terutama di bagian tengah dan barat daya seperti Musi Rawas, Lahat dan Muara Enim (Harjanto & Kurniawan, 2021). Ciri khas formasi ini adalah keberadaan several *coal seam*s (lapisan batu bara berurutan) dengan

ketebalan dan kontinuitas lateral yang baik, seperti *seam* A011 dan B012 di lokasi penelitian. Formasi Muara Enim menjadi lapisan target utama eksploitasi batu bara di Sumatera Selatan. Kandungan batu baranya termasuk dalam peringkat sub-bituminous hingga bituminous rendah, dengan nilai kalor bervariasi antara 4.500–6.000 Kcal/kg (adb).

Formasi Kasai (QTk)

Berumur Kuarter (Holosen) dan merupakan satuan termuda dalam urutan stratigrafi di Cekungan Sumatera Selatan, termasuk wilayah Musi Rawas Utara. Formasi ini menindih tak selaras Formasi Muara Enim atau batuan yang lebih tua di bawahnya. Formasi Kasai tersusun atas endapan permukaan hasil proses sedimentasi modern. Litologi umumnya meliputi kerikil, pasir, lanau dan lempung berwarna coklat keabu-abuan. Terkadang mengandung sisa tumbuhan, fragmen organik dan oksida besi. Struktur sedimen seperti *cross-bedding*, *graded bedding* dan laminasi halus sering dijumpai. Formasi ini banyak berkembang di daerah dataran aluvial, lembah sungai dan dataran banjir, termasuk sepanjang Sungai Rawas dan anak-anak sungainya di wilayah Musi Rawas Utara (Harjanto & Kurniawan, 2021). Ketebalan bervariasi antara 2–20 m, tergantung topografi dan dinamika sungai. Sebaran luas di bagian dataran rendah Musi Rawas, Musi Banyuasin dan sekitarnya, terutama mengikuti jalur sungai besar. Formasi Kasai berperan penting sebagai lapisan penutup (*overburden*) di atas formasi pembawa batu bara (Muara Enim). Pada kegiatan tambang, lapisan ini sering dikategorikan sebagai *top soil* atau *overburden* (OB) yang harus dikupas terlebih dahulu.

Seam A011 dan B012 merupakan bagian dari sistem lapisan batu bara produktif yang umumnya terendapkan pada lingkungan rawa delta higga danau dangkal, dengan fasies yang didominasi oleh batu bara sub-bituminus hingga bituminus muda sebagai penciri dari Formasi Muara Enim. Hasil pengamatan lapangan di tambang 1 PT Gorby Putra Utama menunjukkan bahwa kedua *seam* tersebut tidak sepenuhnya homogen. Pada beberapa lokasi, terutama di bagian *body coal middle* hingga *lower seam*, ditemukan lapisan dengan ciri khas *silicified coal*. Lapisan ini hadir dalam bentuk sisipan (*banded*) dengan ketebalan antara 5–20 cm, kadang berasosiasi dengan zona rekahan atau kontak dengan lapisan batuan silisiklastik halus di sekitarnya. Distribusinya tidak menerus secara lateral, melainkan bersifat tidak seragam (*lensoid*) sehingga menimbulkan variasi kualitas di sepanjang bentang *seam*.



Gambar 7. Lapisan *silicified coal* A011 berpola *patchy silicifition*



Gambar 8. Lapisan *silicified coal* B012 berpola *lenticular* (melensa)

Secara fisik, *silicified coal* mudah dikenali karena memiliki tekstur yang lebih rapuh, warna relatif lebih terang keabu-abuan, serta kilap yang berbeda dibandingkan batu bara normal. Densitasnya juga lebih tinggi karena adanya pengendapan mineral silika (kuarsa, kalsedon) yang mengisi pori-pori batu bara (Ward, 2016). Kondisi ini mengindikasikan bahwa batu bara telah mengalami proses diagenetik lanjut berupa silifikasi, kemungkinan besar akibat pergerakan fluida hidrotermal atau air tanah kaya silika yang mengalir melalui zona rekahan (Burton & Ward, 2018). Karakteristik pola *patchy silicifition* pada *seam* A011 menunjukkan proses silifikasi tidak merata dalam matriks organik, membentuk bercak-bercak keras. Terbentuk di beberapa bagian *body coal* dalam bentuk *spotty*, *patchy* ataupun *irregularly distributed silica nodules*. Memiliki warna abu-abu terang hingga sedikit goresan putih dengan tebal 5–15 cm dengan lebar 15–20 cm, implikasi yang terjadi jika terdapat *silicified coal* jenis ini dapat meningkatkan kadar abu secara tidak homogen, sehingga variasi mutu dalam satu *seam* bisa tinggi.

Pola *lenticular* (melensa) paling sering dijumpai di lapangan, termasuk pada *seam* B012 yang memanjang sejajar dengan arah perlapisan batu bara. *Silicified coal*

dengan pola ini terbentuk saat fluida silika mengisi bagian lapisan batu bara yang permeabel secara lokal. Secara fisik, pola ini memiliki ketebalan yang tidak seragam, biasanya menipis ke arah lateral. Ketebalan *silicified* yang diukur di lapangan 20–50 cm dan terlihat berlapis dengan batu bara bisa 1–2 lapis seperti *waffel*, dengan warna cenderung abu tua hingga keperakan, kilap kusam dengan tekstur keras. Implikasi pola ini dengan silifikasi tinggi akan memperlihatkan kenaikan kadar abu (*ash*) dan menurunkan nilai kalori secara signifikan.

Dari sudut pandang teknis, keberadaan lapisan *silicified coal* pada *seam* A011 dan B012 menjadi salah satu faktor yang menyebabkan variasi kualitas batu bara. *Unaltered seam* cenderung memiliki karakteristik sesuai dengan spesifikasi pasar, sedangkan bagian yang terpengaruh silifikasi menunjukkan penurunan nilai kalori dan peningkatan kadar abu (*ash*) yang signifikan. Hal ini sejalan dengan laporan berbagai studi sebelumnya yang menekankan bahwa silifikasi pada batu bara berhubungan langsung dengan masuknya mineral *inert*, yang secara praktis akan menurunkan mutu dan membatasi penggunaannya pada sektor energi maupun industri.

Hasil Uji Laboratorium

Pengujian laboratorium dilakukan untuk mengetahui perbedaan kualitas batu bara antara *unaltered seam* dengan *seam* yang dipengaruhi oleh kehadiran *silicified coal*. Analisis dilakukan di laboratorium uji mutu batu bara dengan prosedur standar ASTM, meliputi *proximate analysis* serta penentuan nilai kalori. Hasil uji disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil analisis laboratorium batu bara *seam* A011 dan B012

Seam	CV (Kcal/kg) (ar)	*Ash* (%) (adb)	TS (%) (adb)	Keterangan
A011	4.094	2,94	1,1	Homogen, kandungan abu/*ash* dan nilai kalori tinggi.
A011sc	3.767	6,1	0,93	Mengandung *silicified coal*, penurunan nilai kalori dan kadar abu/*ash* naik.
B012	3.930	6,86	0,45	*Unaltered seam*, nilai kalori sedang dan kadar sulfur rendah.
B012sc	3.367	26,59	0,4	Terpengaruh silifikasi kuat, kadar *ash*/abu tinggi dan nilai kalori rendah/menurun.

Seam A011 dan B012 memiliki nilai kalori relatif tinggi, berkisar antara 3.930–4.094 Kcal/kg, sementara *seam* yang terindikasi *silicified coal* menunjukkan penurunan nilai kalor 8–15%. Penurunan paling signifikan terjadi pada B012 ke B012sc, dari 3.930 menjadi 3.367 Kcal/kg (turun sekitar 563 Kcal/kg atau 14,3%). Hal ini menunjukan bahwa kehadiran *silicified coal* menurunkan kandungan karbon reaktif akibat meningkatnya fraksi mineral silika (SiO_2) yang bersifat *inert* dalam pembakaran (Finkelman et al., 2019). Hal ini sejalan dengan penurunan nilai kalori (CV) ini memperkuat indikasi bahwa *silicified coal* berperan sebagai pengotor yang secara langsung mengurangi kapasitas energi batu bara. Semakin tebal dan luas lapisan silifikasi, semakin besar penurunan nilai kalorinya.

Perbandingan nilai kadar abu (*ash content*) *seam* A011 dan B012 memiliki kadar abu rendah (2,94% dan 6,86%), menandakan komposisi mineral yang relatif bersih. Namun pada *seam* yang terdapat material *silicified coal*, kadar abu meningkat tajam. Pada batu bara A011 ke A011sc, kadar abu naik lebih dari dua kali lipat (2,94% ke 6,10%). Sementara nilai *ash* dari batu bara B012 ke B012sc, lonjakan kadar abu sangat signifikan, dari 6,86% menjadi 26,59% atau hampir 4 kali lipatnya. Kadar abu yang tinggi mengindikasikan dominasi material anorganik seperti silika, alumina dan oksida logam yang berasal dari proses silifikasi. Pada *seam* B012, proses silifikasi tampaknya lebih intens, kemungkinan karena pengaruh rekahan atau zona fluida mineral yang lebih aktif.

Kadar sulfur (TS) pada *seam* A011 menunjukan kadar sulfur relatif tinggi (1,10%), sedangkan *seam* A011sc sedikit menurun (0,93%). Sedangkan pada *seam* B012 dan B012sc, nilai sulfur jauh lebih rendah (0,45% dan 0,40%). Secara umum, sulfur tidak menunjukan tren peningkatan signifikan akibat *silicified coal*. Hal ini menunjukkan bahwa proses silifikasi tidak selalu berkaitan langsung dengan peningkatan kandungan sulfur. Hal ini menunjukan mineral sulfur kemungkinan besar lebih dikontrol oleh kandungan mineral sulfida (misal pirit) yang tidak selalu hadir bersamaan dengan mineral silika. Dengan kata lain, material *silicified coal* lebih berpengaruh pada abu dan nilai kalori, bukan pada kandungan sulfur (Hower & Groppo, 2016).

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa *silicified coal* memiliki dampak paling signifikan terhadap penurunan nilai kalor (8–15%) dan peningkatan kadar abu (100–280%), sementara kadar sulfur relatif tidak terpengaruh. Fenomena ini menunjukkan bahwa proses silifikasi berperan dalam mengubah keseimbangan komposisi organik-anorganik pada batu bara, sehingga mutu energi menurun. Sehingga sangat penting dan diperlukan kegiatan pemisahan lapisan *silicified coal* selama proses produksi agar batu bara sesuai spesifikasi pasar.

Dengan demikian, secara geologi *seam* A011 dan B012 dapat dikategorikan sebagai *seam* produktif yang memiliki potensi ekonomi tinggi, tetapi keberadaan *silicified coal* di dalamnya perlu mendapatkan perhatian khusus. Identifikasi, pemetaan distribusi lateral, serta evaluasi ketebalan lapisan pengotor ini menjadi tahap penting dalam strategi pengendalian mutu produksi, agar batu bara yang dipasarkan tetap memenuhi standar spesifikasi.

Implikasi Terhadap Pengendalian Mutu Produksi

Hasil evalusi terhadap kehadiran *silicified coal* pada *seam* A011 dan B012 menunjukan bahwa lapisan ini memiliki pengaruh signifikan terhadap penurunan mutu batu bara, khususnya pada parameter nilai kalori dan kadar abu. Fenomena ini menegaskan adanya hubungan erat antara proses geologi alterasi silika dengan kestabilan mutu produksi. Secara umum, kehadiran *silicified coal* dapat dikategorikan sebagai pengotor geologi yang bersifat lokal namun berdampak besar terhadap hasil penambangan apabila tidak dikendalikan dengan baik (Suhendro, 2022).

Dari sisi karakter fisik, *silicified coal* memiliki densitas yang lebih tinggi, warna keabu-abuan, tekstur keras, serta kilap yang kusam. Kondisi ini sering menyulitkan proses identifikasi visual di lapangan, terutama saat kegiatan *coal getting* berlangsung cepat. Akibatnya, material tersilifikasi berpotensi tercampur dengan batu bara normal, menurunkan kualitas produk akhir. Untuk itu, pendekatan pengendalian mutu tidak hanya harus bersifat reaktif (melalui uji laboratorium), tetapi juga praktif dan berbasis identifikasi lapangan.

Untuk meminimalkan dampak *silicified coal* terhadap kualitas batu bara, beberapa stategi teknis dan manajerial dapat diterapkan secara terpadu, meliputi:

1. Pemetaan detail silifikasi

   Dilakukan melalui kombinasi *geological mapping* dan interpretasi *cross section* untuk menentukan persebaran lateral serta ketebalan lapisan *silicified coal* (Mulyadi & Rachman, 2023). Peta ini menjadi dasar penetuan zona selektif yang harus dihindari atau dipisahkan saat kegiatan penambangan berlangsung.
2. Identifikasi lapangan berbasis karakter fisik

   Operator dan pengawas lapangan perlu dibekali panduan visual dan taktil tentang ciri *silicified coal* seperti warna abu-abu kusam, tekstur keras, perbedaan kilap. Pelatihan singkat berbasis contoh secara aktual dapat meningkatkan akurasi identifikasi material di *front* loading.
3. Penerapan selektif *mining* dan *layer separation*

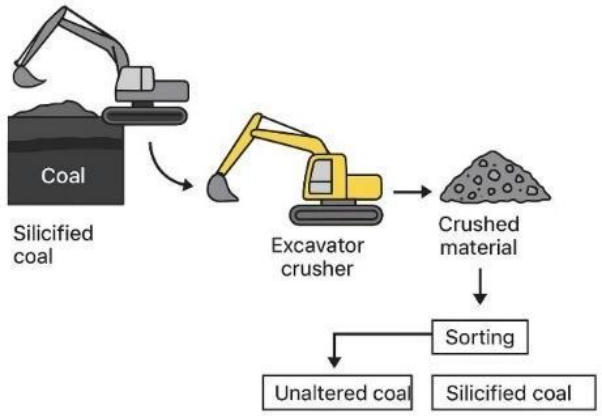
   Saat penggalian pada *seam* yang berpotensi tersilifikasi, disarankan penggunaan metode *selective digging* dengan pemisahan lapisan atas bawah secara hati-hati menggunakan alat *ripping* atau *dozing* tipis (Kusuma et al., 2022). Material hasil galian kemudian ditumpuk secara terpisah di ROM (*run of mine*) sesuai klasifikasi mutu batu bara.
4. Optimalisasi sistem *coal blending*

   Batu bara yang sedikit terkontaminasi *silicified coal* masih dapat dimanfaatkan melalui *controlled blending*. Dengan mencampur material tersebut dengan batu bara berkalori tinggi dan kadar abu rendah, variasi mutu dapat distabilkan agar tetap memenuhi spesifikasi kontrak tanpa kehilangan nilai ekonomi.
5. Optimalisasi penggunaan *excavator crusher*

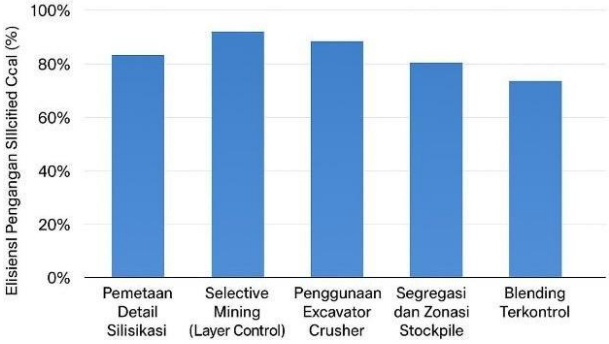
   Penggunaan *excavator crusher* di area PIT dan ROM merupakan pendekatan mekanisme yang efektif untuk meminimalkan ketercampuran material *silicified coal* ke dalam batu bara yang di produksi. Proses *in-Pit crushing* memungkinkan deteksi dini terhadap fragmen silifikasi berdasarkan perbedaan kekerasan dan tekstur, sehingga dapat dilakukan pemisahan langsung sebelum material memasuki alur pengangkutan ke ROM ataupun dari ROM ke *jetty* (*barging*).



Gambar 9. Penggunaan *excavator crusher* pada area penelitian



Gambar 10. Ilustrasi teknis kegiatan *excavator crusher* sampai pemisahan produk batu bara dan pengotor *silicified*



Gambar 11. Grafik efektivitas pengendalian *silicified coal*

Berdasarkan estimasi operasional, penggunaan *excavator crusher* dan pemisahan awal fragmen *silicified coal* diperkirakan dapat mengurangi potensi kontaminasi 70–80%, yang secara teoritis dapat menurunkan penurunan nilai kalori yang ditimbulkan oleh *silicified coal* dari sekitar 8–14% menjadi sekitar 2–5%, tergantung tingkat identifikasi dan seleksi material di lapangan. Pada area penelitian dari proses pemetaan detail silifikasi dan selektif *mining* sampai ke proses optimalisasi *excavator crusher* yang menjadi kegiatan akhir meminimalisir keterdapatan *silicified coal* dalam batu bara di PIT maupun di ROM, didapatkan persentase efiesiensi pemisahan lapangan (Ef) dari hasil pemetaan detail + *selective mining*. Rumus sederhana:

$$\text{Persentase pengurangan } silicified\ coal = \frac{t_{silicified}}{t_{seam}} \times E_f \times 100\% \quad (1)$$

Tabel 2. Persentase pengurangan *silicified coal*

Seam	Ketebalan *silicified* (cm)	Ketebalan *seam* (m)	Proporsi *silicified*	Efisiensi (perkiraan)
A011	10–15	3	0,033–0,05 (-4%)	±85–90%
B012	40–50	1,5	0,27–0,33 (-30%)	±67–75%

Seam A011, 4% × 0,90 = 3,6% artinya, sekitar 96% material batu bara dari *seam* A011 dapat dihindarkan dari kontaminasi *silicified coal* bila dilakukan pemetaan detail dan *selective mining* secara efektif. Karena ketebalan lapisan silifikasi relatif tipis (10–15 cm) dengan pola *patchy silicifition*, *selective mining* dengan bantuan pemetaan detail mampu menurunkan potensi ketercampuran *silicified coal* hingga 90–95% pada *seam* ini.

Seam B012, 30% × 0,70 = 21% artinya, masih terdapat sekitar 20–25% material tersilifikasi yang berpotensi tercampur pada proses produksi karena ketebalan alterasi lebih besar (40–50 cm) dan sering bersifat masif atau berpola melensa, sehingga sulit dipisahkan secara sempurna. Pada *seam* B012, meskipun pemetaan detail dapat mengidentifikasi zona silifikasi, ketebalan lapisan hingga 50 cm menyebabkan efektivitas pemisahan lapangan berkurang. Dengan pendekatan *selective mining*, potensi ketercampuran masih dapat dikurangi sekitar 65–75%, tergantung tingkat ketelitian penggalian dan kontrol elevasi alat. Secara umum, integrasi antara pemetaan detail silifikasi dan penambangan selektif berbasis elevasi lapisan dapat menurunkan potensi kontaminasi *silicified coal* sebesar 70–90%, dengan efektivitas tertinggi pada lapisan yang tipis, melensa dan mudah diidentifikasi secara visual.

Evaluasi Dampak *Silicified Coal* Terhadap Kualitas Batu bara

Hasil analisis laboratorium, pengamatan lapangan, serta evaluasi metode pengendalian menunjukkan bahwa kehadiran *silicified coal* memberikan pengaruh signifikan terhadap penurunan kualitas batu bara, terutama pada parameter nilai kalori (*calorific value*), kadar abu (*ash content*) dan kadar sulfur (total sulfur). Perubahan karakteristik ini berhubungan langsung dengan proses alterasi hidrotermal yang menyebabkan pengayaan silika pada matriks batu bara, sehingga menurunkan kandungan bahan orgamik yang menjadi sumber utama energi pembakaran (Pratama & Nugroho, 2021).

Pada *seam* A011, lapisan silifikasi tipis (10–15 cm) menunjukkan penurunan nilai kalori sekitar 8% dengan peningkatan kadar abu lebih dari dua kali lipat dibandingkan batu bara normal. Sementara pada *seam* B012, ketebalan lapisan *silicified* mencapai 40–50 cm dengan dampak penurunan nilai kalori hingga 14%. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa ketebalan dan kontinuitas lapisan silifikasi berbanding lurus dengan tingkat degradasi mutu batu bara. Lapisan yang lebih tebal dan masif memperlihatkan kecenderungan penurunan nilai kalori yang lebih besar serta peningkatan kadar abu yang lebih signifikan.

Secara mineralogi, material tersilifikasi memiliki kandungan kuarsa mikro dan mineral oksida dalam jumlah tinggi yang terdispersi pada matriks batu bara (Liu et al., 2020). Hal ini menurunkan rasio bahan organik

terhadap bahan anorganik, sehingga nilai kalori menurun dan kadar abu meningkat. Selain itu, struktur fisik yang keras dan rapuh akibat silifikasi menyebabkan proses penghancuran (*crushing*) menghasilkan fragmen halus (*fines*) dengan kadar abu tinggi, yang turut memperburuk kualitas batu bara di ROM maupun pada tahap penongkangan (*barging*). Evaluasi juga menunjukkan bahwa dampak *silicified coal* terhadap parameter sulfur relatif bervariasi. Pada *seam* A011, kadar sulfur meningkat ringan akibat adanya pengayaan mineral sulfida halus pada zona alterasi, sedangkan pada *seam* B012 kadar sulfur justru sedikit menurun, yang menunjukkan bahwa efek alterasi lebih dominan bersifat silika daripada sulfida. Hal ini menegaskan bahwa pengaruh *silicified coal* terhadap sulfur bersifat lokal dan bergantung pada kondisi fluida alterasi di lingkungan pembentuk *seam* tersebut (Hower & Groppo, 2016).

Dari sisi operasional, keberadaan *silicified coal* berdampak langsung terhadap stabilitas mutu produksi. Jika tidak dikendalikan, material tersilifikasi dapat tercampur dalam proses penambangan dan transportasi menuju ROM, menyebabkan fluktuasi mutu antar lot produksi. Kondisi ini menurunkan konsistensi mutu (*quality consitency*) dan meningkatkan risiko *rejection* atau penalti kualitas pada tahap penjualan. Oleh karena itu, pengendalian *silicified coal* tidak hanya bersifat geologis, tetapi juga menjadi aspek kritis dalam sistem manajemen mutu tambang batu bara.

Upaya mitigasi melalui pemetaan detail, *selective mining* dan penerapan *excavator crusher* terbukti mampu menurunkan potensi ketercampuran *silicified coal* hingga 70–90% tergantung karakteristik *seam*. *Seam* A011 yang memiliki ketebalan alterasi tipis dapat dikendalikan lebih efektif dibanding *seam* B012 yang lebih tebal dan masif. Hal ini memperkuat pemahaman bahwa strategi pengendalian harus disesuaikan dengan geometri dan tekstur alterasi tiap *seam*, bukan hanya diterapkan secara seragam.

Secara ilmiah, temuan menegaskan bahwa keberadaan *silicified coal* merupakan faktor geologi yang berpengaruh langsung terhadap parameter mutu batu bara, namun dapat diminimalkan melalui pendekatan terpadu antara analisis geologi, pengendalian teknis di lapangan dan sistem manajemen mutu yang disiplin. Pendekatan ini tidak hanya menjaga stabilitas mutu produksi, tetapi juga menjadi dasar untuk meningkatkan efisiensi proses penambangan secara berkelanjutan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis laboratorium, pengamatan geologi lapangan dan evaluasi pengendalian mutu, keberadaan *silicified coal* pada *seam* A011 dan B012 terbukti menurunkan kualitas batu bara melalui penurunan nilai kalori dan peningkatan kadar abu (*ash*). Pada *seam* A011, nilai kalori menurun sekitar 8% dan kadar abu meningkat hingga dua kali lipat, sedangkan pada *seam* B012, nilai kalori menurun sekitar 14% dan kadar abu meningkat hingga empat kali lipat. Penerapan pemetaan geologi detail, *selective mining* dan penggunaan *excavator* mampu mengurangi potensi ketercampuran material tersilifikasi sebesar 70–90%, terutama pada lapisan tipis, melensa dan mudah dikenali secara visual.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada PT Gorby Putra Utama atas dukungan data dan kesempatan untuk melakukan penelitian di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

Arifin, Y., Suryadi, M., & Prasetyo, A. (2020). Characterization of Silicified coal and It's Impact on Coal Quality in South Sumatra Basin, Indonesia. *Journal of earth resources*, *8*(2), 77-86.

Burton, C. A., & Ward, C. R. (2018). Minerological and Geochemical Effects of Silica Alteration in *Coal Seam*s. *International journal of a coal geology*, 195, 123-136.

Dietrich, D. Schreiber, U., & Rosler, H. (2013). A microstructure Study on Silicified Wood From the Permian Petrified Forest of Chemnitz, Gemany. *Springer Science+Business Media*, Berlin Heidelberg.

Finkelman, R. B., Dai, S., & French, D. (2019). The importance of minerals in coal for the formation of by-products and enviromental issues. *International Journal of Coal Geology*, 217, 103-118.

Harjanto, N., & Kurniawan, T. (2021). Geological Control and Quality Variation of Coal Seams in Musi Rawas Utara, South Sumatra. Indonesia. *Journal of Applied Geology*, *9*(3), 155-168.

Hower, J. C., & Groppo, J. G. (2016). Variation in Ash and Sulfur in Coal Due to Mineral Alteration and Depositional Processes. *Fuel*, 182, 567-579.

Kusuma, R., Sari, D. P. & Tanjung, H. (2022). Application of Selective Mining and Quality Control System for Maintaining Coal Quality in Open PIT Operations. *Mining Technology and Management Journal*, *14*(1), 45-58.

Liu, Y., Dai, S., & Ward, C, R. (2020). Petrological and Mineralogical Charateristics of Silicified coal From Hydrothermal Alteration Zones. *International Journal of Coal Geology*, 227, 103530.

Mulyadi, A., & Rachman, R. (2023). Effectiveness of Geological Mapping and Selective Mining in Reducing Coal Contamination in South Sumatra Coalfields. *Indonesian Journal of Mining and Energy, 5*(2), 88-100.

Pratama, F., & Nugroho, E. (2021). Hydrothermal Alteration and Silicified Process in Tanjung Enim

Coal Seams, South Sumatra. *Journal of Geological Science and Applications, 11*(4), 214-227.

Suhendro, B., & Wijaya, M. (2022). Operational Optimization of Coal Quality Control Through PIT Mapping and Real-time Monitoring System. *Journal of Mining Operations and Technology, 17*(3), 61-73.

Suta, I. N., & Xiaoguang, L. (2005). *Evolusi Tektonik dan Pola Struktur Cekungan Sumatra Selatan, Indonesia.* Bandung: Institut Teknologi Bandung.

Ward, C. R. (2016). Analysis, Origin, and Significance of Mineral Matter in *Coal*: An Update Review. *International Journal of Coal Geology*, 165, 1- 27.