JURNAL | SAINS DAN TEKNOLOGI
KEILMUAN DAN APLIKASI TEKNOLOGI INDUSTRI
E-ISSN : 2615-2827 P-ISSN : 1412-5455
Volume 26, Nomor 1 Tahun 2026
https://ejurnalsttind.id/index.php/SainsdanTeknologi

Sliding pad Sebagai Solusi Pengelolaan Limbah Cair Pascatambang: Evaluasi Dampak Lingkungan dan Stabilitas Geoteknik di Bekas *Void* Tambang Batubara Kalimantan Timur

Beny Supriyanto[1,2)], Rizky Syaputra[1,3)*], Lanny Amatun Nafisah[1)]

[1] Institut Teknologi Sains Bandung, Bekasi, Indonesia
[2] PT Berau Coal, Tanjung Redeb, Kalimantan Timur, Indonesia
[3] Universitas Pakuan, Bogor, Indonesia

beny.bcberau@gmail.com; rizky.syaputra@itsb.ac.id*; lanny.nafisah@itsb.ac.id

ABSTRAK

Pengelolaan limbah cair pascatambang merupakan tantangan penting dalam mendukung praktik pertambangan berkelanjutan, terutama di area bekas *void* yang memiliki kompleksitas geoteknik tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas metode *sliding pad* dalam pengelolaan lumpur cair di bekas *Void* BBE Pit C2HU, Site Sambarata, Kalimantan Timur, melalui analisis kualitas air berupa pH dan *total suspended solids* (TSS), evaluasi stabilitas lereng, serta penilaian efisiensi operasional. Pendekatan kuantitatif digunakan dengan analisis kualitas air pada enam titik pemantauan di WMP 45 ST dan WMP 02 BBE, sedangkan stabilitas lereng dievaluasi menggunakan nilai faktor keamanan (FK). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan metode *sliding pad* mampu mengurangi luas genangan lumpur sebesar 97,1%, dari sekitar 34.570 m² menjadi sekitar 1.000 m². Hasil analisis stabilitas lereng menunjukkan nilai FK sebesar 1,645, yang berada di atas batas minimum 1,3 sebagaimana ditetapkan dalam SNI 8460:2017. Selain itu, nilai pH dan TSS pada *outlet* kedua WMP telah memenuhi baku mutu berdasarkan PP No. 22 Tahun 2021. Namun, nilai pH pada *inlet* WMP 02 BBE menunjukkan adanya potensi air asam tambang (AAT), sehingga diperlukan pemantauan secara berkelanjutan. Secara keseluruhan, metode *sliding pad* menunjukkan efektivitas yang tinggi dalam mereduksi genangan lumpur dan menjaga stabilitas lereng, serta berpotensi menjadi alternatif pengelolaan lumpur cair yang aman pada area bekas *void* tambang batu bara. Hasil ini mendukung penerapan metode berbasis gravitasi sebagai pendekatan teknis yang selaras dengan regulasi lingkungan pertambangan Indonesia.

Kata kunci: *Sliding Pad*, Limbah Cair, Pascatambang, Kualitas Air Tambang, Stabilitas Lereng, *Void*, WMP, Pertambangan Berkelanjutan.

ABSTRACT

Post-mining liquid waste management is an important challenge in supporting sustainable mining practices, particularly in former void areas with high geotechnical complexity. This study aims to evaluate the effectiveness of the sliding pad method in managing liquid sludge at the Former BBE Void, Pit C2HU, Sambarata Site, East Kalimantan. The evaluation was conducted through water quality analysis, including pH and total suspended solids (TSS), slope stability assessment, and operational efficiency evaluation. A quantitative approach was applied by analyzing water quality at six monitoring points in WMP 45 ST and WMP 02 BBE, while slope stability was evaluated using the safety factor (SF). The results show that the application of the sliding pad method reduced the sludge inundation area by 97.1%, from approximately 34,570 m² to approximately 1,000 m². The slope stability analysis produced an SF value of 1.645, which exceeds the minimum requirement of 1.3 as stipulated in SNI 8460:2017. In addition, the pH and TSS values at the outlets of both WMPs met the quality standards established under Government Regulation No. 22 of 2021. However, the pH value at the inlet of WMP 02 BBE indicated the potential occurrence of acid mine drainage (AMD), highlighting the need for continuous monitoring. Overall, the sliding pad method demonstrated high effectiveness in reducing sludge inundation and maintaining slope stability. Therefore, it has the potential to serve as a safe alternative for liquid sludge management in former coal mine void areas. These findings support the application of gravity-based methods as a technical approach aligned with Indonesian mining environmental regulations.

Keywords: *Sliding Pad, Liquid Waste, Post-mining, Mine Water Quality, Slope Stability, Void, WMP, Sustainable Mining.*

Copyright (c) 2026 Beny Supriyanto, Rizky Syaputra, Lanny Amatun Nafisah
DOI: https://doi.org/10.36275/1mdk2g38

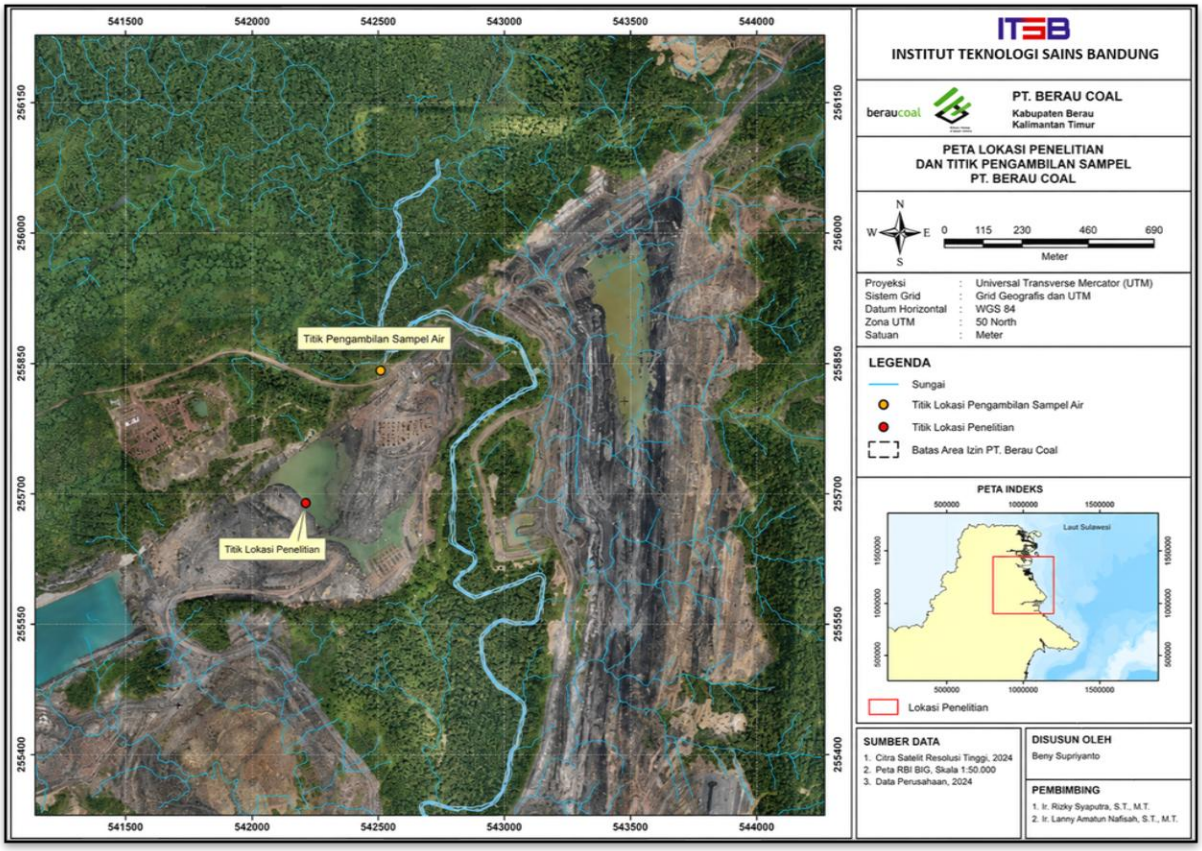
PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu produsen batu bara terbesar di dunia, dengan total produksi mencapai lebih dari 700 juta ton per tahun. Kalimantan Timur menjadi salah satu provinsi kontributor utama, dengan kontribusi sekitar 30–35% terhadap total produksi batu bara nasional (Suryaningsi et al., 2025). Besarnya skala kegiatan ekstraksi tersebut berbanding lurus dengan meningkatnya volume material sisa tambang yang harus dikelola (Santoso, 2024), termasuk lumpur cair yang berasal dari proses penggalian dan *dewatering* serta terakumulasi pada bekas lubang galian atau *void* tambang (Lestari et al., 2023). Pengelolaan pascatambang yang tidak memadai telah diidentifikasi sebagai salah satu faktor utama penyebab degradasi lingkungan di kawasan tambang batu bara Indonesia (Suryaningsi et al., 2025). Dampak tersebut mencakup penurunan kualitas air permukaan dan air tanah, perubahan serta destabilisasi morfologi lahan, hingga hilangnya keanekaragaman hayati pada ekosistem di sekitar area (Prihartini et al., 2022).

Kerangka hukum pengelolaan lingkungan pertambangan di Indonesia telah mengalami penguatan signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Undang-Undang No. 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup mewajibkan setiap kegiatan usaha yang berpotensi menimbulkan dampak lingkungan untuk melaksanakan kajian lingkungan secara komprehensif (Republik Indonesia, 2009). Selain itu, Peraturan Pemerintah No. 78 Tahun 2010 tentang Reklamasi dan Pascatambang mewajibkan pemegang Izin Usaha Pertambangan (IUP) untuk menyusun rencana reklamasi dan pascatambang secara terperinci sejak tahap perencanaan (Republik Indonesia, 2010). Lebih lanjut, Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan (PERMENLHK) No. 11 Tahun 2024 tentang Tata Cara Dumping Limbah B3 menetapkan persyaratan teknis yang lebih ketat terhadap pembuangan limbah cair tambang, termasuk kewajiban penerapan sistem pemantauan kualitas air yang terintegrasi serta pelaporan berkala kepada regulator (Republik Indonesia, 2024).

Bekas *void* atau lubang galian tambang yang telah selesai dieksploitasi merupakan tantangan pengelolaan lingkungan jangka panjang yang kompleks (Krzemień et al., 2026). Morfologi cekungan tertutup pada bekas *void* menciptakan kondisi yang memungkinkan terjadinya akumulasi air dan material tersuspensi dalam jumlah besar, sehingga sulit dikendalikan melalui metode pengelolaan konvensional (Kondolf et al., 2014). Soares et al. (2025) melaporkan bahwa sebagian besar bekas *void* tambang batu bara terbuka di kawasan Asia Tenggara mengalami permasalahan pengelolaan air dan lumpur secara berkepanjangan. Di Indonesia, permasalahan tersebut semakin kompleks akibat tingginya curah hujan, khususnya di sebagian besar wilayah Kalimantan, yang berkisar antara 1.800–3.500 mm/tahun. Kondisi ini meningkatkan *influx* air ke dalam *void* dan mempercepat pembentukan lumpur dari material lapukan (Zhang et al., 2024).

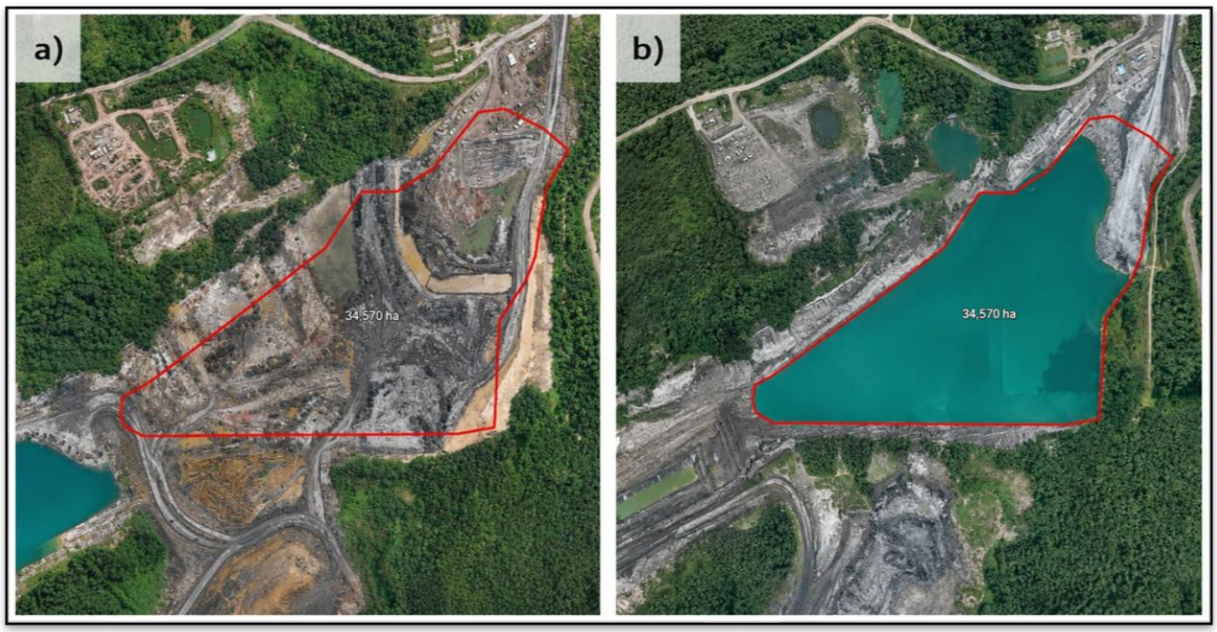
Foto udara pada Gambar 1 menunjukkan kondisi umum area tambang batu bara skala besar di kawasan penelitian. PT Berau Coal, sebagai salah satu produsen batu bara terbesar di Indonesia, mengoperasikan beberapa pit tambang di Kabupaten Berau, Kalimantan Timur, termasuk Site Sambarata yang menjadi lokasi penelitian ini. Site Sambarata dicirikan oleh kondisi geologi berupa lapisan batu pasir dan batu lempung dari Formasi Warukin yang memiliki permeabilitas rendah (Afrianto & Azmi, 2020). Karakteristik tersebut menyebabkan air dan lumpur cenderung terakumulasi di permukaan serta sulit meresap ke dalam tanah (Krisnabudhi et al., 2022).



Gambar 1. Lokasi penelitian bekas void BBE Pit C2HU

Secara spesifik, Bekas *Void* BBE Pit C2HU menghadapi permasalahan akumulasi lumpur cair dalam skala besar. Sebelum dilakukan intervensi teknis, luas area genangan lumpur tercatat mencapai ±34.570 m², tersebar secara tidak merata, dan sebagian berada di sekitar kaki lereng dinding *void* yang rentan mengalami keruntuhan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2a dan Gambar 2b. Kondisi tersebut menimbulkan risiko berlapis, yaitu risiko lingkungan berupa potensi limpasan lumpur ke badan air di sekitarnya, risiko geoteknik berupa penurunan faktor keamanan lereng di bawah ambang minimum, serta risiko operasional berupa bahaya bagi operator *dump truck* yang bermanuver di sekitar tepi *void* berlumpur (Afrianto & Azmi, 2020).

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengatasi permasalahan lumpur cair pada bekas void tambang, antara lain *open dumping* konvensional, kolam *tailing* (*tailings pond*), *subsurface injection*, dan teknik solidifikasi kimiawi. Namun, masing-masing metode tersebut memiliki keterbatasan ketika diterapkan pada kondisi operasional tambang di Kalimantan, terutama terkait kebutuhan infrastruktur, biaya operasional, keterbatasan lahan, serta risiko lingkungan jangka panjang (Parbhakar-Fox et al., 2018). Dalam konteks tersebut, metode *sliding pad* muncul sebagai alternatif yang potensial karena memanfaatkan prinsip gravitasi untuk mengarahkan aliran lumpur secara terkendali, tanpa memerlukan infrastruktur yang kompleks maupun penggunaan bahan kimia tambahan (Berger, 2017).



Gambar 2. Kondisi Area Bekas *Void* BBE Pit C2HU a) Sebelum Dan b) Sesudah Implementasi *Sliding Pad*

Meskipun metode *sliding pad* telah diterapkan secara terbatas pada beberapa operasi tambang, kajian ilmiah yang secara mendalam mengevaluasi efektivitasnya dalam pengelolaan lingkungan masih terbatas, khususnya dalam konteks literatur pertambangan di Indonesia. Keterbatasan kajian tersebut terutama berkaitan dengan dampak penerapan metode *sliding pad* terhadap kualitas air limpasan, pengurangan luas genangan lumpur, serta stabilitas geoteknik lereng bekas *void*. Dalam konteks penguatan regulasi lingkungan pertambangan melalui PERMENLHK No. 11 Tahun 2024 serta meningkatnya perhatian investor terhadap kinerja *Environmental, Social, and Governance* (ESG) perusahaan tambang, kebutuhan terhadap bukti ilmiah yang *valid* mengenai efektivitas metode ini menjadi semakin penting (Syaputra, 2026).

Dari perspektif pertambangan berkelanjutan, penelitian ini selaras dengan agenda nasional Indonesia dalam mewujudkan sektor pertambangan yang bertanggung jawab secara lingkungan, sosial, dan ekonomi. Syaputra et al. (2023), dalam analisis mengenai peran sektor pertambangan terhadap pembangunan regional berkelanjutan di Sumatera Selatan, menunjukkan bahwa investasi pada teknologi pengelolaan lingkungan tambang dapat memberikan *multiplier effect* positif terhadap perekonomian regional. Selain itu, kajian teoretis mengenai evaluasi pembangunan berkelanjutan sektor pertambangan di kawasan APEC (Soares et al., 2025) menegaskan bahwa adopsi praktik pengelolaan lingkungan terbaik merupakan prasyarat penting bagi daya saing industri pertambangan pada era transisi energi global, termasuk penanganan limbah pascatambang secara bertanggung jawab menjadi syarat penting bagi keberlanjutan industri pertambangan dalam jangka panjang (Quayson et al., 2023).

Meskipun penelitian terdahulu telah membahas aspek teknis operasional metode *sliding pad* secara deskriptif (Afrianto & Azmi, 2020), terdapat beberapa celah pengetahuan (*research gap*) yang belum terjawab. Pertama, belum ada penelitian yang mengevaluasi dampak penerapan *sliding pad* terhadap kualitas air limpasan secara kuantitatif menggunakan data pemantauan lapangan dari titik *inlet* dan *outlet*. Kedua, kajian mengenai hubungan antara pengendalian genangan lumpur melalui metode *sliding pad* dan peningkatan stabilitas lereng (nilai FK) secara skenario komparatif masih sangat terbatas dalam literatur pertambangan

Indonesia. Ketiga, evaluasi terintegrasi yang menghubungkan ketiga aspek tersebut, yaitu kualitas air, stabilitas geoteknik, dan efisiensi operasional, dalam satu studi kasus belum pernah dilaporkan untuk konteks bekas *void* tambang batu bara di Kalimantan. Pambudi et al. (2023) dalam kajian reklamasi tambang batu bara di Indonesia juga menekankan perlunya pendekatan berbasis data lapangan yang lebih terstruktur untuk mendukung manajemen lingkungan pascatambang yang efektif.

Dengan demikian, penelitian ini penting dilakukan untuk memberikan evaluasi berbasis data terhadap efektivitas metode *sliding pad* dalam pengelolaan lumpur cair pascatambang. Hasil penelitian diharapkan dapat memperkuat dasar ilmiah dalam pengambilan keputusan teknis, mendukung pemenuhan regulasi lingkungan, serta mendorong penerapan praktik terbaik dalam pengelolaan lingkungan pertambangan batu bara di Indonesia.

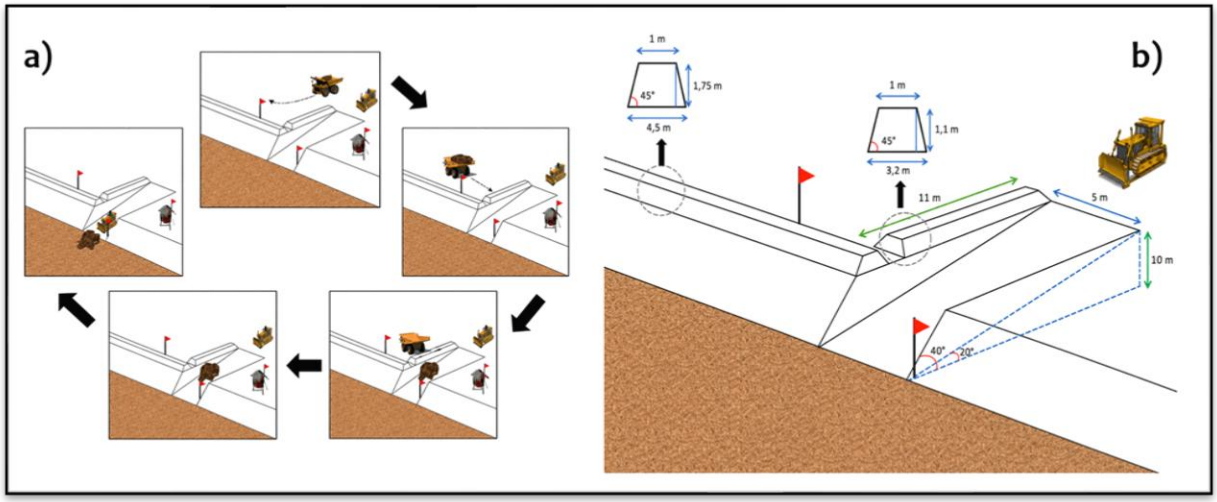
METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan analisis kualitas air, evaluasi geoteknik, dan pengukuran efektivitas operasional. Seluruh data yang digunakan bersifat kuantitatif, mencakup nilai kualitas air (pH & TSS), luas genangan, dan faktor keamanan (FK) lereng. Lokasi penelitian berada di Bekas *Void* BBE Pit C2HU, Site Sambarata, PT Berau Coal, Kabupaten Berau, Kalimantan Timur, pada koordinat 2°15'–2°20' LU dan 117°35'–117°40' BT (Gambar 1). Pengumpulan data dilaksanakan pada Februari 2024 hingga Mei 2025, yang mencakup satu siklus representatif peralihan musim hujan ke musim kering. Pengambilan sampel air dilakukan secara *grab sampling* pada enam titik pemantauan (*inlet* dan *outlet* dari masing-masing WMP) setiap dua minggu sekali selama periode pengamatan. Analisis parameter pH dilakukan menggunakan pH-meter lapangan yang dikalibrasi sebelum setiap sesi pengukuran, sedangkan TSS dianalisis di laboratorium menggunakan metode gravimetri berdasarkan SNI 6989.3:2019 tentang Cara Uji Padatan Tersuspensi Total secara gravimetri (BSN, 2019). Evaluasi stabilitas lereng dilakukan menggunakan metode Bishop yang disederhanakan (*Simplified Bishop*), berdasarkan parameter geoteknik yang diperoleh dari pengujian laboratorium geomekanik. Pengukuran luas genangan lumpur dilakukan melalui interpretasi citra drone multispektral dengan resolusi spasial 5 cm/piksel; perubahan luas dihitung berdasarkan perbandingan dua penerbangan drone (sebelum dan sesudah implementasi *sliding pad*). Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari penerapan metode *sliding pad* melalui analisis parameter kualitas air, yaitu pH dan TSS, pada enam titik pemantauan di WMP 45 ST dan WMP 02 BBE. Selain itu, penelitian ini juga menganalisis efektivitas metode *sliding pad* dalam mereduksi luas genangan lumpur serta menjaga stabilitas geoteknik lereng bekas *void*. Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, penelitian ini merumuskan rekomendasi teknis berbasis bukti untuk mendukung optimalisasi pengelolaan limbah cair pascatambang.

Secara akademis, penelitian ini berkontribusi dalam memperkaya literatur mengenai pengelolaan lumpur cair pada bekas *void* tambang batu bara, khususnya melalui evaluasi terpadu antara aspek kualitas air, stabilitas lereng, dan efisiensi operasional. Secara praktis, temuan penelitian ini dapat menjadi acuan bagi perusahaan tambang dalam mengembangkan strategi pengelolaan lingkungan yang lebih aman, efektif, dan ekonomis. Selain itu, hasil penelitian ini juga memiliki signifikansi regulatif dan strategis karena mendukung penerapan standar pengelolaan lingkungan pertambangan yang sejalan dengan PERMENLHK No. 11 Tahun 2024 dan kerangka ESG. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi terhadap pengembangan standar praktik terbaik (*best practices*) dalam manajemen lingkungan pertambangan batu bara di Indonesia (KESDM, 2018).

Penelitian ini memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam interpretasi hasil. Pertama, periode pengamatan mencakup 16 bulan (Februari 2024 hingga Mei 2025). Meskipun sudah mencakup satu siklus musiman penuh, variabilitas antar-tahun

belum dapat dikaji dari data yang ada. Kedua, analisis kualitas air hanya mencakup dua parameter (pH dan TSS), sedangkan parameter lain seperti logam terlarut, sulfat, dan konduktivitas listrik belum dievaluasi. Ketiga, penelitian ini dilaksanakan pada satu lokasi tambang, sehingga generalisasi hasil ke lokasi lain perlu dilakukan dengan kehati-hatian dan penyesuaian terhadap kondisi geoteknik dan hidrologi setempat (Vriens et al., 2020).



Gambar 3. a) Diagram Alur Dan b) Desain Geometri Proses Lumpur Cair Menggunakan Metode *Sliding Pad*

Metode *sliding pad* merupakan teknologi pengelolaan limbah yang memanfaatkan prinsip gravitasi untuk mengarahkan aliran material cair menuju titik pengendapan yang terkontrol. *Pad* dibangun dari material *overburden* padat yang dibentuk menjadi landasan miring dengan sudut kemiringan sekitar 15°–25°. Pada beberapa kondisi, permukaan pad dapat dilapisi menggunakan geomembran atau geotekstil untuk meningkatkan kestabilan dan mengurangi potensi infiltrasi material cair ke dalam tanah (Afrianto & Azmi, 2020). Corbett & Leach (2020) mengklasifikasikan *sliding pad* sebagai metode pengendalian limbah di sumbernya (*source control*) yang memiliki tiga keunggulan utama. Pertama, metode ini memungkinkan pengarahan aliran lumpur secara terencana menuju titik pengendapan. Kedua, metode ini dapat mengurangi risiko operasional alat berat pada zona rawan. Ketiga, metode ini mendukung proses sedimentasi gravitasional secara lebih efisien. Diagram alur proses *dumping* lumpur menggunakan metode *sliding pad* ditunjukkan pada Gambar 3a, sedangkan desain geometri *pad* disajikan pada Gambar 3b.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Geologi dan Geoteknik

Bekas *Void* BBE Pit C2HU membentuk cekungan tertutup berbentuk elipsoidal dengan kedalaman efektif sekitar ±45 m dan luas permukaan ±8,5 ha. Litologi dinding *void* didominasi oleh batu lempung terlapukkan serta batu pasir berbutir halus hingga sedang yang termasuk dalam Formasi Warukin Atas berumur Miosen Tengah–Akhir (Maulin et al., 2021). Parameter geoteknik material penyusun lereng bekas *void* disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Geoteknik Material Lereng Bekas Void BBE Pit C2HU

Parameter	Batu lempung Lapuk	Batupasir	Satuan
Kohesi (c)	12–18	5–10	kPa
Sudut Geser Dalam (φ)	15–22	28–35	derajat (°)
Bobot Isi (γ)	17,5–19,0	19,0–21,0	kN/m³
Permeabilitas (k)	10^{-7}–10^{-8}	10^{-5}–10^{-6}	m/s

Nilai permeabilitas batu lempung yang relatif sangat rendah, yaitu berkisar antara 10^{-7}–10^{-8} m/s, menunjukkan bahwa material tersebut memiliki kemampuan infiltrasi yang terbatas. Kondisi ini menyebabkan air dan lumpur cenderung tertahan di permukaan, sehingga berpotensi meningkatkan tekanan air pori pada zona lereng. Peningkatan tekanan air pori tersebut dapat menurunkan tegangan efektif material lereng dan berdampak pada penurunan stabilitas lereng. Temuan ini sejalan dengan Retongga et al. (2023), yang menjelaskan bahwa kondisi jenuh air pada material berpermeabilitas rendah dapat menjadi salah satu faktor pemicu penurunan faktor keamanan lereng.

Efektivitas Reduksi Genangan dan Operasional

Perbandingan kondisi sebelum dan sesudah penerapan metode *sliding pad* dilakukan berdasarkan interpretasi citra drone dan hasil observasi lapangan. Ringkasan hasil pengukuran disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan Kondisi Sebelum dan Sesudah Implementasi *Sliding Pad*

Parameter	Sebelum SP	Sesudah SP	Perubahan
Luas Genangan (m²)	34.570	1.000	−97,1%
Jarak Tepi Genangan ke Lereng (m)	< 2	> 25	+23 m
Waktu Siklus *Dumping* (menit/trip)	35–45	18–25	−40%
Insiden *Near-Miss* K3 (per bulan)	0,5	0,0	−100%

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa penerapan metode *sliding pad* mampu menurunkan luas area genangan lumpur sebesar 97,1%, dari 34.570 m² menjadi sekitar 1.000 m². Nilai reduksi ini melampaui target awal sebesar ≥80% dan berada di atas kisaran efektivitas yang dilaporkan dalam beberapa literatur, yaitu sekitar 70–95% (Afrianto & Azmi, 2020). Tingginya efektivitas tersebut diduga dipengaruhi oleh morfologi cekungan tertutup pada bekas *void*, yang mendukung pengarahan aliran lumpur secara gravitasional menuju titik pengendapan yang lebih terkendali. Beberapa faktor teknis yang berkontribusi terhadap tingginya efektivitas reduksi meliputi: (1) kemiringan pad sebesar 15–25° yang menghasilkan gradien hidraulik memadai untuk mengalirkan material berkadar air tinggi, (2) orientasi gravitasional yang searah dengan morfologi cekungan *void*, serta (3) kondisi curah hujan yang relatif menurun selama periode transisi menuju musim kering, sehingga volume *influx* air ke sistem berkurang. Nilai reduksi sebesar 97,1% ini konsisten dengan hasil studi manajemen sedimen pada sistem gravitasional yang dilaporkan oleh Kondolf et al. (2014), yang menunjukkan bahwa sistem pengaliran berbasis gravitasi mampu meningkatkan efisiensi

pengendapan material tersuspensi secara signifikan dibandingkan sistem statis. Namun demikian, perlu dicatat bahwa pengukuran luas genangan dalam penelitian ini didasarkan pada interpretasi citra drone dengan akurasi pemetaan yang belum dilaporkan secara eksplisit (misalnya RMSE georeferensi). Oleh karena itu, angka 97,1% sebaiknya dipahami sebagai estimasi dengan ketidakpastian pengukuran yang perlu dikuantifikasi pada penelitian lanjutan.

Selain berdampak terhadap pengurangan luas genangan, penerapan *sliding pad* juga berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi operasional. Waktu siklus *dumping* menurun sekitar 40%, dari 35–45 menit/trip menjadi 18–25 menit/trip. Penurunan ini menunjukkan bahwa metode *sliding pad* dapat memperbaiki efisiensi pergerakan unit dan mengurangi waktu tunggu operasional (Huby & Doirebo, 2025). Selain itu, tidak tercatat adanya insiden *near-miss* setelah implementasi metode ini selama periode pengamatan. Meskipun demikian, hasil tersebut perlu dipahami sebagai indikasi awal peningkatan aspek keselamatan kerja, mengingat evaluasi K3 yang lebih komprehensif memerlukan periode pemantauan yang lebih panjang.

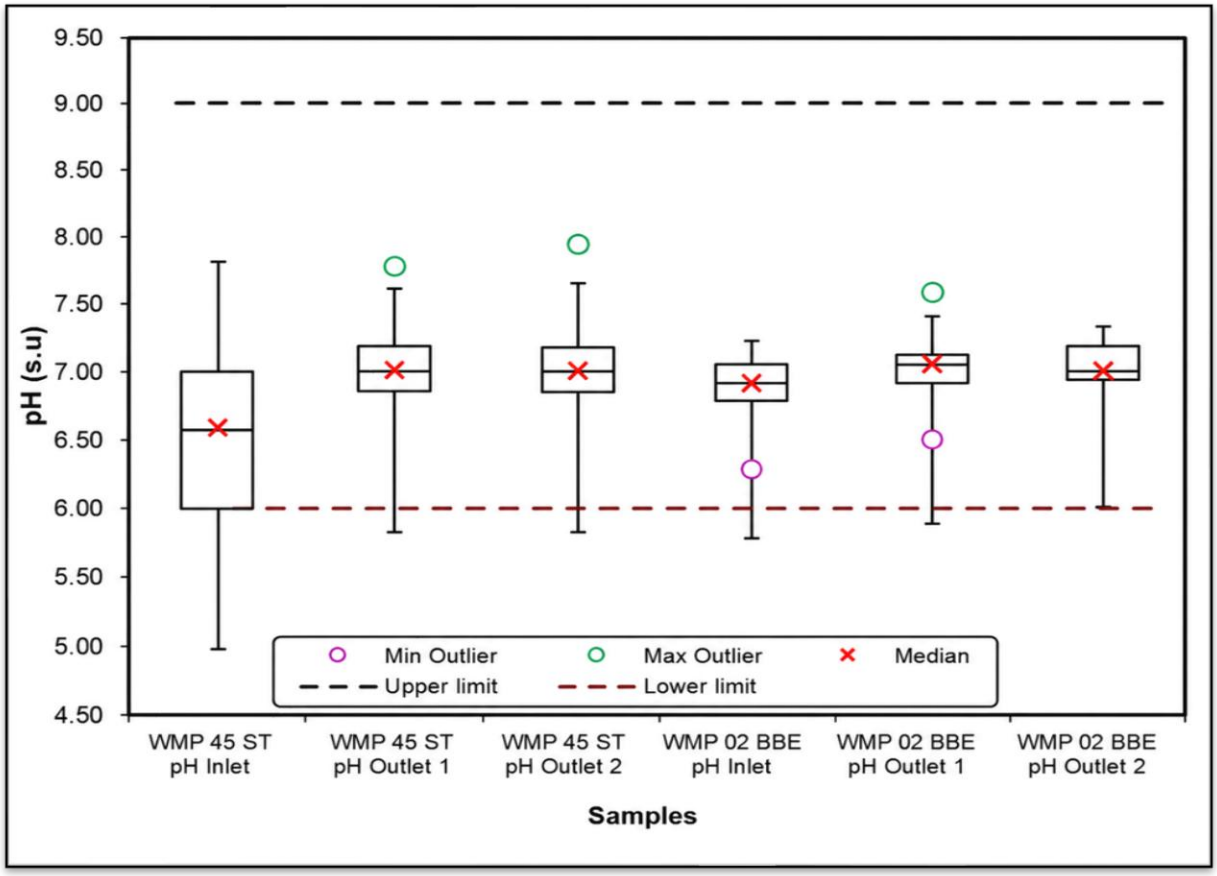
Analisis Kualitas Air Limpasan: pH dan TSS

Pemantauan kualitas air dilakukan pada dua *Water Management Point* (WMP), yaitu WMP 45 ST dan WMP 02 BBE. WMP 45 ST merepresentasikan sistem penampungan limpasan permukaan, sedangkan WMP 02 BBE merupakan titik pemantauan yang berkaitan langsung dengan area pembuangan lumpur melalui metode *sliding pad*. Pada setiap WMP, pengukuran dilakukan pada tiga titik, yaitu *inlet, outlet* 1, dan *outlet* 2. Pengaturan titik pemantauan ini bertujuan untuk mengevaluasi perubahan kualitas air dari titik masuk hingga titik keluar sistem pengelolaan air tambang. Ringkasan statistik parameter pH dan TSS disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Ringkasan Statistik Kualitas Air Limpasan Pada WMP 45 ST dan WMP 02 BBE

Parameter / Titik	WMP 45 ST *Inlet*	WMP 45 ST Outlet 1	WMP 45 ST Outlet 2	WMP 02 BBE *Inlet*	WMP 02 BBE Outlet 1	WMP 02 BBE Outlet 2
pH – Median (s.u.)	6,58	7,03	7,03	6,85	7,05	7,03
pH – Rentang (s.u.)	4,75–7,81	6,51–7,77	6,50–7,95	6,20–6,88	6,50–7,59	6,50–7,10
TSS – Median (mg/L)	30	23	24	30	12	12
Baku Mutu pH (PP 22/2021)	6,0–9,0	6,0–9,0	6,0–9,0	6,0–9,0	6,0–9,0	6,0–9,0
Status pH	Perhatian[1]	Memenuhi	Memenuhi	Perhatian[1]	Memenuhi	Memenuhi

Nilai pH pada titik *inlet* berada di bawah batas minimum baku mutu pH 6,0 pada periode tertentu. Sementara itu, nilai TSS pada seluruh titik pemantauan berada jauh di bawah baku mutu 400 mg/L sebagaimana mengacu pada PP No. 22 Tahun 2021. Distribusi parameter pH dan TSS pada seluruh titik pemantauan divisualisasikan melalui *boxplot* pada Gambar 4 dan Gambar 5.



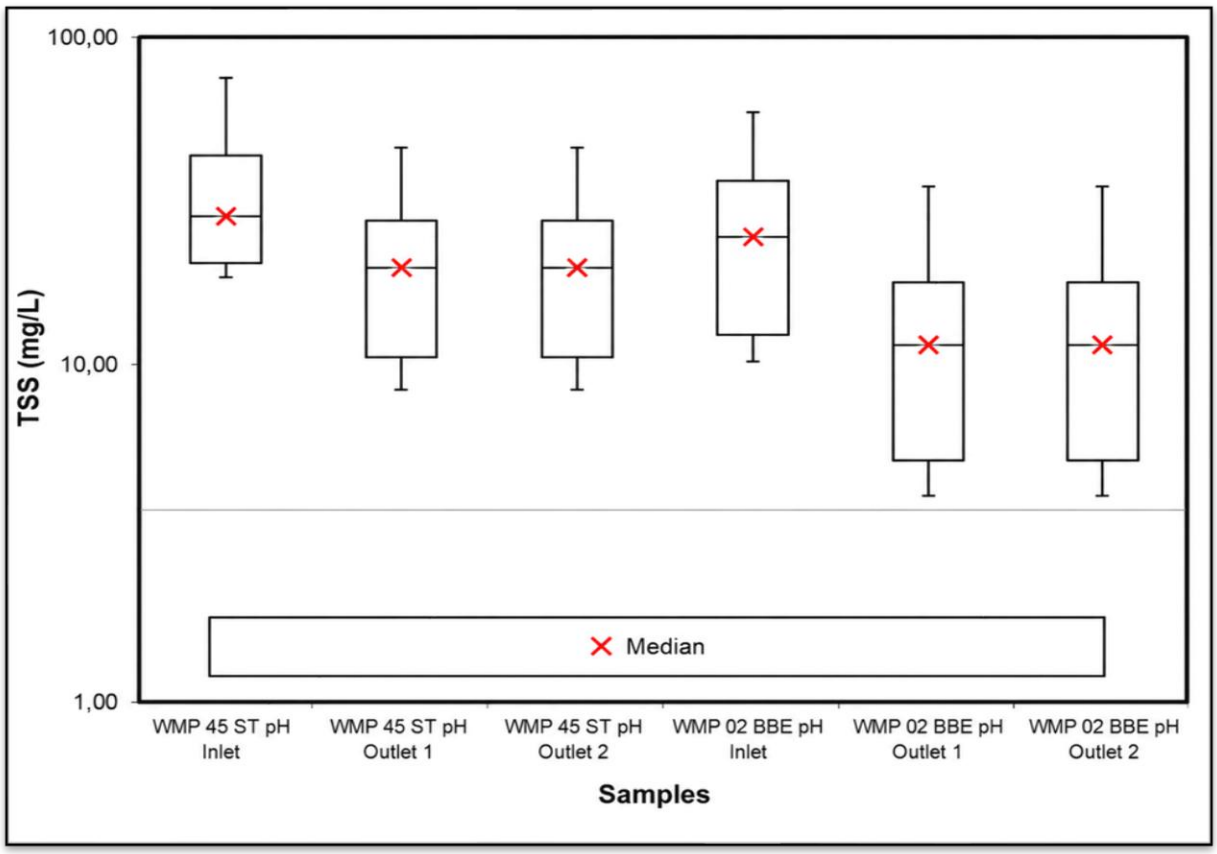
Gambar 4. ***Boxplot*** **Distribusi Ph (S.U.) Pada Enam Titik Pemantauan WMP 45 ST dan WMP 02 BBE, Site Sambarata, Selama Periode Penelitian.**

Garis hitam putus-putus menunjukkan batas atas baku mutu pH 9,0, sedangkan garis merah putus-putus menunjukkan batas bawah baku mutu pH 6,0 berdasarkan PP No. 22 Tahun 2021. Simbol (×) merah menunjukkan nilai median, sedangkan lingkaran menunjukkan nilai *outlier*. Berdasarkan Gambar 4, terdapat tiga pola utama pada distribusi pH di seluruh titik pemantauan. Pertama, titik *inlet* WMP 45 ST menunjukkan rentang distribusi pH paling lebar, yaitu 4,75–7,81. Keberadaan nilai minimum pada kisaran pH 4,75 mengindikasikan adanya fluktuasi kualitas air masuk yang kemungkinan dipengaruhi oleh variasi curah hujan, limpasan permukaan, serta potensi air asam tambang dari zona material terlapukkan. Namun, nilai pH pada *outlet* 1 dan *outlet* 2 WMP 45 ST secara umum berada dalam rentang baku mutu, yaitu 6,50–7,95, dengan median 7,03. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem kolam pengendapan berperan dalam menstabilkan pH sebelum air keluar dari sistem pengelolaan.

Kedua, titik *inlet* WMP 02 BBE memperlihatkan distribusi pH yang lebih sempit dengan median 6,85. Meskipun demikian, terdapat nilai minimum pada kisaran pH 6,20, yang masih berada di atas batas minimum baku mutu, tetapi tetap perlu diperhatikan karena dapat mengindikasikan adanya pengaruh material lumpur yang bersifat agak asam (*mildly acidic*). Kondisi tersebut kemungkinan berkaitan dengan proses oksidasi mineral sulfida pada material yang terpapar udara dan air. Nilai pH pada *outlet* 1 dan *outlet* 2 WMP 02 BBE, dengan median masing-masing 7,05 dan 7,03, berada dalam rentang baku mutu. Hal ini mengindikasikan bahwa proses pengendapan dan netralisasi alami di dalam sistem pengelolaan air berpotensi membantu memperbaiki kualitas pH.

Ketiga, seluruh nilai median pH pada titik pemantauan berada dalam rentang 6,58–7,05. Rentang ini menunjukkan bahwa secara umum kondisi air berada pada kisaran netral hingga

sedikit asam dan tidak menunjukkan indikasi kuat terjadinya pembentukan air asam tambang aktif selama periode pengamatan. Namun demikian, adanya nilai pH rendah pada titik *inlet* tetap perlu menjadi perhatian dalam pemantauan jangka panjang. Temuan ini sejalan dengan (Syaputra et al., 2023), yang menjelaskan bahwa potensi pembentukan air asam tambang pada litologi batu pasir dan batu lempung dipengaruhi oleh derajat pelapukan, kandungan mineral sulfida, serta tingkat paparan terhadap oksigen dan air.



Gambar 5. ***Boxplot*** **Distribusi TSS (Mg/L, Skala Logaritmik) Pada Enam Titik Pemantauan WMP 45 ST dan WMP 02 BBE, Site Sambarata, Selama Periode Penelitian.**

Seluruh nilai TSS berada jauh di bawah baku mutu 400 mg/L berdasarkan PP No. 22 Tahun 2021. Simbol (×) merah menunjukkan nilai median. Berdasarkan Gambar 5, distribusi TSS pada seluruh titik pemantauan berada dalam rentang 5–90 mg/L. Nilai tersebut berada jauh di bawah baku mutu TSS sebesar 400 mg/L berdasarkan PP No. 22 Tahun 2021. Pola yang paling menonjol terlihat pada WMP 02 BBE, yaitu adanya penurunan median TSS dari 30 mg/L pada titik *inlet* menjadi 12 mg/L pada *outlet* 1 dan *outlet* 2. Penurunan ini setara dengan efisiensi reduksi TSS sekitar 60% di dalam sistem WMP. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa proses sedimentasi gravitasional yang di fasilitasi oleh metode *sliding pad* berkontribusi terhadap penurunan beban partikel tersuspensi pada air yang masuk ke sistem pengelolaan.

Perbandingan antara WMP 45 ST dan WMP 02 BBE menunjukkan bahwa kedua WMP memiliki nilai median TSS yang sama pada titik *inlet*, yaitu 30 mg/L. Namun, WMP 02 BBE menunjukkan nilai median TSS pada *outlet* yang lebih rendah dibandingkan WMP 45 ST. Perbedaan ini kemungkinan dipengaruhi oleh waktu tinggal air yang lebih lama, morfologi kolam pengendapan yang lebih mendukung proses sedimentasi, serta aliran lumpur yang lebih terkendali melalui sistem *sliding pad*. Secara umum, konsistensi nilai TSS yang rendah pada

seluruh titik *outlet* menunjukkan bahwa sistem pengelolaan air terpadu, yang terdiri atas *sliding pad* dan kolam pengendapan WMP, telah berfungsi secara efektif dalam menurunkan konsentrasi partikel tersuspensi dan memenuhi ketentuan baku mutu lingkungan.

Analisis Stabilitas Lereng

Evaluasi geoteknik dilakukan menggunakan metode *limit equilibrium* untuk memperoleh nilai faktor keamanan (FK) lereng pada beberapa skenario kondisi lapangan. Hasil analisis faktor keamanan lereng Bekas *Void* BBE Pit C2HU disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Analisis Factor Keamanan Lereng Bekas Void BBE Pit C2HU

Skenario Analisis	FK Hasil	FK Min. (SNI)	Status
Kondisi kering (tanpa *sliding pad*)	1,42	1,3	Stabil
Kondisi jenuh air (tanpa *sliding pad*)	1,18	1,3	Kritis
Jenuh air + genangan lumpur (tanpa SP)	1,05	1,3	Tidak Aman
Jenuh air + *sliding pad* aktif	1,645	1,3	Aman

Hasil analisis menunjukkan bahwa kondisi lereng sangat dipengaruhi oleh tingkat kejenuhan air dan keberadaan beban genangan lumpur. Pada kondisi kering tanpa penerapan *sliding pad*, nilai FK sebesar 1,42 masih berada di atas batas minimum 1,3, sehingga lereng dapat dikategorikan stabil. Namun, pada kondisi jenuh air tanpa *sliding pad*, nilai FK menurun menjadi 1,18. Penurunan ini menunjukkan bahwa kejenuhan air berpengaruh signifikan terhadap stabilitas lereng, terutama melalui peningkatan tekanan air pori dan penurunan tegangan efektif.

Skenario paling kritis terjadi pada kondisi jenuh air dengan tambahan beban genangan lumpur tanpa penerapan *sliding pad*. Pada skenario ini, nilai FK menurun hingga 1,05, atau berada di bawah batas minimum yang disyaratkan. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa lereng berada dalam kondisi tidak aman dan memiliki potensi kegagalan yang lebih tinggi apabila tidak dilakukan pengendalian teknis.

Setelah penerapan *sliding pad*, nilai FK meningkat menjadi 1,645 pada kondisi jenuh air. Peningkatan ini menunjukkan bahwa metode *sliding pad* berkontribusi positif terhadap stabilitas lereng. Secara mekanis, peningkatan nilai FK tersebut kemungkinan dipengaruhi oleh dua faktor utama. Pertama, pengalihan genangan lumpur menuju pusat *void* dapat mengurangi beban lateral dan tekanan hidrostatik di sekitar kaki lereng. Kedua, berkurangnya akumulasi air dan lumpur pada zona lereng dapat membantu menurunkan tekanan air pori, sehingga tegangan efektif material lereng meningkat. Interpretasi ini sejalan dengan model analitik Retongga et al. (2023), yang menjelaskan bahwa pengurangan tekanan air pori merupakan salah satu faktor penting dalam peningkatan stabilitas lereng pada material tambang yang jenuh air.

Perbandingan Metode Pengelolaan Alternatif

Perbandingan antara metode *sliding pad* dan beberapa metode pengelolaan limbah cair tambang lainnya disajikan pada Tabel 5. Evaluasi dilakukan berdasarkan beberapa kriteria utama, yaitu kemampuan pengendalian sebaran material, risiko geoteknik, biaya investasi, kompleksitas operasi dan pemeliharaan, serta potensi kepatuhan terhadap regulasi lingkungan. Kepatuhan regulasi pada metode *sliding pad* dalam penelitian ini didukung oleh data kualitas air pada WMP 45 ST dan WMP 02 BBE, yang menunjukkan bahwa seluruh titik outlet memenuhi baku mutu berdasarkan PP No. 22 Tahun 2021.

Tabel 5. Perbandingan Metode Pengelolaan Limbah Cair Tambang

Kriteria	*Sliding pad*	*Tailings Pond*	*Open Dumping*	*Subsurf. Injection*
Pengendalian sebaran	Sangat Baik	Baik	Buruk	Sangat Baik
Risiko geoteknik	Rendah	Sedang	Tinggi	Rendah
Biaya investasi	Rendah	Tinggi	Sangat Rendah	Sangat Tinggi
Kompleksitas O&M	Rendah	Tinggi	Sangat Rendah	Sangat Tinggi
Kepatuhan regulasi	Tinggi	Tinggi	Rendah	Tinggi

Hasil perbandingan menunjukkan bahwa metode *sliding pad* memiliki keunggulan dalam hal pengendalian sebaran lumpur, risiko geoteknik yang relatif rendah, biaya investasi yang lebih ekonomis, serta kompleksitas operasi dan pemeliharaan yang lebih sederhana dibandingkan beberapa metode alternatif. Metode *tailings pond* memiliki kemampuan pengendalian yang baik, tetapi membutuhkan investasi, area, serta pengelolaan teknis yang lebih intensif. Sementara itu, metode *open dumping* memiliki biaya awal yang rendah, tetapi berisiko tinggi terhadap penyebaran material, ketidakstabilan lereng, dan ketidakpatuhan terhadap regulasi lingkungan. Adapun *subsurface injection* memiliki kemampuan pengendalian yang baik, tetapi membutuhkan biaya investasi dan teknologi yang jauh lebih kompleks.

Dengan mempertimbangkan hasil evaluasi kualitas air, reduksi genangan, stabilitas lereng, dan efisiensi operasional, metode *sliding pad* dapat dipandang sebagai salah satu alternatif pengelolaan limbah cair tambang yang efektif dan relatif ekonomis. Metode ini berpotensi diterapkan pada operasi tambang batu bara skala menengah hingga besar di Kalimantan, khususnya pada lokasi yang memiliki karakteristik morfologi *void*, kondisi geoteknik, dan sistem pengelolaan air yang serupa. Namun, penerapannya tetap perlu disesuaikan dengan kondisi spesifik setiap lokasi, termasuk karakteristik material, curah hujan, stabilitas lereng, kapasitas kolam pengendapan, serta sistem pemantauan kualitas air yang berkelanjutan (Vriens et al., 2020).

SIMPULAN

Metode *sliding pad* mampu mereduksi luas area genangan lumpur sebesar 97,1%, yaitu dari sekitar ±34.570 m² menjadi ±1.000 m². Hasil ini menunjukkan bahwa teknologi berbasis gravitasi berpotensi menjadi pendekatan yang efektif dalam pengendalian limbah cair pascatambang, khususnya pada area bekas *void* dengan karakteristik morfologi yang mendukung aliran terkendali. Data kualitas air pada enam titik pemantauan di WMP 45 ST dan WMP 02 BBE menunjukkan bahwa seluruh nilai TSS, dengan median berkisar antara 12–30 mg/L, berada jauh di bawah baku mutu 400 mg/L. Selain itu, nilai pH pada seluruh titik *outlet* memenuhi rentang baku mutu 6,0–9,0. Efisiensi reduksi TSS sekitar 60% dari *inlet* ke *outlet* pada WMP 02 BBE mengindikasikan bahwa sistem sedimentasi gravitasional yang terintegrasi dengan metode *sliding pad* berperan efektif dalam menurunkan konsentrasi partikel tersuspensi.

Hasil analisis geoteknik menunjukkan bahwa penerapan metode *sliding pad* berkontribusi terhadap peningkatan Faktor Keamanan (FK) lereng, dari kondisi tidak aman dengan nilai FK sebesar 1,05 tanpa *sliding pad* menjadi kondisi aman dengan nilai FK sebesar 1,645 setelah penerapan *sliding pad*. Temuan ini memberikan dasar kuantitatif bahwa pengendalian genangan lumpur merupakan salah satu tindakan penting dalam menjaga keselamatan operasional dan stabilitas lingkungan pada area bekas *void*. Nilai pH pada titik

inlet WMP 45 ST dan WMP 02 BBE menunjukkan adanya nilai pencilan (*outlier*) di bawah atau mendekati batas minimum baku mutu pada periode tertentu. Kondisi ini mengindikasikan adanya potensi air asam tambang (AAT) yang perlu diantisipasi melalui sistem pemantauan kualitas air secara berkelanjutan serta penyediaan fasilitas netralisasi apabila diperlukan. Penerapan metode *sliding pad* juga menunjukkan peningkatan efisiensi operasional, ditandai dengan pengurangan waktu siklus dumping sebesar sekitar 40% serta tidak tercatatnya insiden *near-miss* selama periode pengamatan. Dengan demikian, metode ini dapat dipertimbangkan sebagai solusi pengelolaan limbah cair pascatambang yang efektif, relatif ekonomis, dan sejalan dengan prinsip manajemen lingkungan pertambangan berbasis *Environmental, Social, and Governance* (ESG).

Dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang umumnya berfokus pada aspek teknis operasional *sliding pad* secara terpisah, penelitian ini memberikan kontribusi baru berupa evaluasi terpadu yang mencakup tiga aspek sekaligus, yaitu kualitas air limpasan, stabilitas geoteknik lereng, dan efisiensi operasional, dalam satu kerangka analisis berbasis data lapangan. Pendekatan terpadu ini mengisi celah literatur yang ada dan dapat menjadi acuan metodologis bagi penelitian serupa di lokasi tambang lain. Penelitian lanjutan direkomendasikan untuk: (1) memperluas periode pemantauan kualitas air minimal 12 bulan guna mencakup variasi musiman secara penuh; (2) menambahkan parameter kualitas air seperti logam berat terlarut (Fe, Mn, Al) dan sulfat untuk penilaian potensi air asam tambang yang lebih komprehensif; (3) melakukan analisis biaya-manfaat yang sistematis sebagai dasar evaluasi ekonomi metode *sliding pad*; (4) mengintegrasikan pemantauan deformasi lereng berbasis sensor untuk verifikasi nilai faktor keamanan secara *real-time*; serta (5) menguji penerapan metode ini pada lokasi tambang lain dengan karakteristik geoteknik berbeda untuk meningkatkan generalisabilitas temuan.

DAFTAR PUSTAKA

Afrianto, S., & Azmi, C. N. (2020). Penimbunan Material Lumpur Cair Dengan Menggunakan Metode *Sliding pad*. *Prosiding Temu Profesi Tahunan PERHAPI*, *1*(1), 615–622. https://doi.org/10.36986/ptptp.v1i1.103

Berger, K. C. (2017). Study of Tailings Management Technologies. *Mine Environment Neutral Drainage Project. The Mining Association of Canada*, *October*, 1–164. http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2.50.1Tailings_Management_TechnologiesL.pdf%0Ahttp://mend-nedem.org/mend-report/study-of-tailings-management-technologies-2017/

BSN. (2019). *SNI 6989.3:2019: Air dan Air Limbah – Bagian 3: Cara Uji Padatan Tersuspensi Total (Total Suspended Solids, TSS) secara Gravimetri*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional. https://pesta.bsn.go.id/produk/detail/12245-sni698932019

Corbett, G. J., & Leach, T. M. (2020). Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems. *Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems*. https://doi.org/10.5382/SP.06

Huby, G. S. W., & Doirebo, H. Y. E. (2025). Evaluasi Sinkronisasi Kerja Alat Muat Dan Alat Angkut Pada PT Modern Widyatehnical Kampung Wiraskadistrik Wanggar Kabupaten Nabire-Papua Tengah (Evaluation of Work Synchronization of Loading Equipment and Transport Equipment at PT Modern Widyatehnical Ka. *PROMINE*, *13*(1), 1–6.

KESDM. (2018). *Keputusan Menteri Energi Dan Sumber Daya Mineral No. 1827 K/30/MEM/2018 Tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan Yang Baik.* Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral. https://jdih.esdm.go.id/dokumen/view?id=1805

Kondolf, G. M., Gao, Y., Annandale, G. W., Morris, G. L., Jiang, E., Zhang, J., Cao, Y., Carling, P., Fu, K., Guo, Q., Hotchkiss, R., Peteuil, C., Sumi, T., Wang, H.-W., Wang, Z., Wei, Z., Wu, B., Wu, C., & Yang, C. T. (2014). Sustainable sediment management in

reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents. *Earth's Future*, *2*(5), 256–280. https://doi.org/10.1002/2013EF000184

Krisnabudhi, A., Sapiie, B., Riyanto, A. M., Gunawan, A., & Rizky, F. F. (2022). Mesozoic-Cenozoic Stratigraphy and Tectonic Development of the Southern Great Tarakan Basin, Northeast Borneo, Indonesia. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*, *37*(1), 123–138. https://doi.org/10.17794/RGN.2022.1.11

Krzemień, A., Frejowski, A., Wacławek, G., Tokarski, S., & Riesgo Fernández, P. (2026). Closure as a New Beginning: Repurposing Post-Mining Sites into Industrial Eco-Parks Backed by Virtual Power Plants. *Applied Sciences 2026, Vol. 16, Page 1916*, *16*(4), 1916. https://doi.org/10.3390/APP16041916

Lestari, L., Kusuma, G. J., Badhurahman, A., Dwiki, S., & Gautama, R. S. (2023). Mine void identification using Object-based Image Analysis (OBIA) of satellite imagery Sentinel 2 data. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, *10*(2), 4129–4142. https://doi.org/10.15243/jdmlm.2023.102.4129

Maulin, H. B., Sapiie, B., & Gunawan, I. (2021). Analisis Sesar Tumbuh pada Sistem Deformasi Delta Tersier di Subcekungan Tarakan, Kalimantan Utara. *Bulletin of Geology*, *5*(2), 570–579. https://doi.org/10.5614/bull.geol.2021.5.2.1

Pambudi, P. A., Utomo, S. W., Soelarno, S. W., & Takarina, N. D. (2023). Coal mining reclamation as an environmental recovery effort: a review. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, *10*(4), 4811–4821. https://doi.org/10.15243/JDMLM.2023.104.4811

Parbhakar-Fox, A., Fox, N., Jackson, L., & Cornelius, R. (2018). Forecasting Geoenvironmental Risks: Integrated Applications of Mineralogical and Chemical Data. *Minerals 2018, Vol. 8, Page 541*, *8*(12), 541. https://doi.org/10.3390/MIN8120541

Prihartini, R., Syaputra, R., & Kusuma, G. J. (2022). Karakteristik Pembentukan Air Asam Tambang pada Endapan High Sulphidation Epithermal. *Jurnal Pertambangan*, *6*(3), 107–114. https://doi.org/10.36706/JP.V6I3.1306

Quayson, M., Bai, C., Mahmoudi, A., Hu, W., Chen, W., & Omoruyi, O. (2023). Designing a decision support tool for integrating ESG into the natural resource extraction industry for sustainable development using the ordinal priority approach. *Resources Policy*, *85*, 103988. https://doi.org/10.1016/J.RESOURPOL.2023.103988

Republik Indonesia. (2009). *Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.* Jakarta: Pemerintah Republik Indonesia. https://peraturan.bpk.go.id/details/38771/uu-no-32-tahun-2009

Republik Indonesia. (2010). *Peraturan Pemerintah Nomor 78 Tahun 2010 tentang Reklamasi dan Pascatambang.* Jakarta: Pemerintah Republik Indonesia. https://peraturan.bpk.go.id/Details/5102/pp-no-78-tahun-2010

Republik Indonesia. (2024). *Penerapan Kerangka Kualifikasi Nasional Indonesia Bidang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun*. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia. https://peraturan.bpk.go.id/Details/300676/permen-lhk-no-11-tahun-2024

Retongga, N., Saputa, R. B., Agustin, F., Syaputra, R., Razi, M. H., Zahidah, A., & Nainggolan, E. N. (2023). Relationship of Rock Geomechanics and Coal Mine Slope Safety Factor in South Sumatra Region, Indonesia. *Journal of Earth and Marine Technology (JEMT)*, *4*(1), 97–102. https://doi.org/10.31284/J.JEMT.2023.V4I1.4852

Santoso, A. B. (2024). Analisis Pengukuran Volume Timbunan Stockwash menggunakan Metode Fotogrametri dan Terestris Pada Penambangan Bauksit. *Journal of Innovation Research and Knowledge*, *4*(2), 663–673. https://bajangjournal.com/index.php/JIRK/article/view/7905/6309

Soares, W. S., Oliveira, M. J. de, Câmara, R. A., Conceição, C. D. da, Ferreira Neto, J. A., &

Ferreira, J. R. (2025). Mine Closure: Challenges, Strategies and the Role of Public Universities of Minas Gerais in Mineral Sustainability. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, *19*(10), e013546. https://doi.org/10.24857/RGSA.V19N10-015

Suryaningsi, S. ., Ramadini, A. D. S., Sahputri, N. D. A., & Khasanah, N. I. (2025). Pengaturan hukum pengelolaan limbah penambangan batu bara dan perlindungan kesehatan masyarakat sekitar. . *SEIKAT: Jurnal Ilmu Sosial, Politik Dan Hukum, 4(6), 553–564. Https://Doi.Org/10.55681/Seikat.V4i6.Xxx*, 553–564.

Syaputra, R. (2026). Penerapan ESG dalam Pertambangan Berkelanjutan melalui Program Pengabdian kepada Masyarakat Profesional. *JNANADHARMA*, *4*(01), 73–81. https://doi.org/10.34151/JAFST.V4I01.5480

Syaputra, R., Kusuma, G. J., & Badhurahman, A. (2023). Prediction of Potential Acid Mine Drainage Formation in High Sulfidation Epithermal Deposit using Geochemical and Mineralogy Approaches. *EKSPLORIUM*, *44*(1), 33–40. https://doi.org/10.55981/EKSPLORIUM.2023.6652

Syaputra, R., Santoso, A. B., Retongga, N., Alfianita, L., Mu'awanah, F. R., & Heri, N. W. A. A. T. (2023). Analisis Peran Sektor Pertambangan dalam Pembangunan Regional Berkelanjutan di Provinsi Sumatera Selatan dengan Menerapkan Pendekatan Analisis Model Input-Ouput. *Jurnal Teknologi*, *16*(1), 37–47. https://doi.org/10.34151/JURTEK.V16I1.4320

Vriens, B., Plante, B., Seigneur, N., & Jamieson, H. (2020). Mine Waste Rock: Insights for Sustainable Hydrogeochemical Management. *Minerals 2020, Vol. 10, Page 728*, *10*(9), 728. https://doi.org/10.3390/MIN10090728

Zhang, Q. ;, Zhou, X., Zhang, Q., & Zhou, X. (2024). Modeling the Dynamics of Water and Mud Inrush in Fault Fracture Zones: The Role of Seepage–Erosion Interactions. *Applied Sciences 2024, Vol. 14, Page 5115*, *14*(12), 5115. https://doi.org/10.3390/APP14125115