

**Evaluasi Rekayasa Perkuatan Jalan Tambang Menggunakan Material Limestone Reject dan Metode Stone Column Pada Kondisi *Slippery* di Kabupaten Balangan**

**Pikar Chandra Syah Putro<sup>1</sup>, Rani Nasrasyam Zalma<sup>2</sup>  
Dimas Wahyu Pamungkas<sup>3</sup>**

<sup>1,3</sup>Divisi Engineering, PT. Saptaindra Sejati

<sup>2</sup> Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sapta Mandiri

*pikar.chandra@saptaindra.co.id<sup>1</sup>, raninszalma@univsm.ac.id<sup>2</sup>,*

*dimas.pamungkas@saptaindra.co.id<sup>3</sup>*

**ABSTRACT**

*High rainfall intensity and surface water accumulation on mine haul roads frequently cause slippery conditions, leading to a reduction in Effective Working Hours (EWH) of heavy equipment and disruptions in overburden removal activities. This inefficiency results in substantial production losses, estimated at approximately IDR 403 million per hour due to waiting times and operational delays. This study aims to evaluate the effectiveness of haul road reinforcement engineering through the utilization of local limestone reject material as a surface layer and the stone column method as a subgrade reinforcement system under slippery conditions in Balangan Regency, South Kalimantan. The evaluation was conducted on a 21 km section, equivalent to 66% of the total 31.9 km haul road network at PT Saptaindra Sejati (SIS) Job Site SERA, focusing on segments with the highest frequency of slippery occurrences. Additional measures included optimizing road geometry design (double crossfall), constructing grader parking areas, and improving surface compaction techniques. The evaluation results revealed a reduction in slippery duration from an average of 1.32 hours to 0.5 hours per rainfall event, an increase in soil bearing capacity by 167%, a 15% reduction in fuel consumption, and a 20% decrease in hauler tire wear. Overall, the integrated implementation of limestone reject and stone column proved to be an effective, efficient, and sustainable engineering solution for improving subgrade strength, enhancing drainage performance, and increasing operational efficiency of haul roads in high-rainfall mining environments such as Balangan.*

**Keywords :** *Haul road, Slippery, Limestone reject, Stone column, Soil bearing capacity, Work efficiency, Balangan Mine.*

**ABSTRAK**

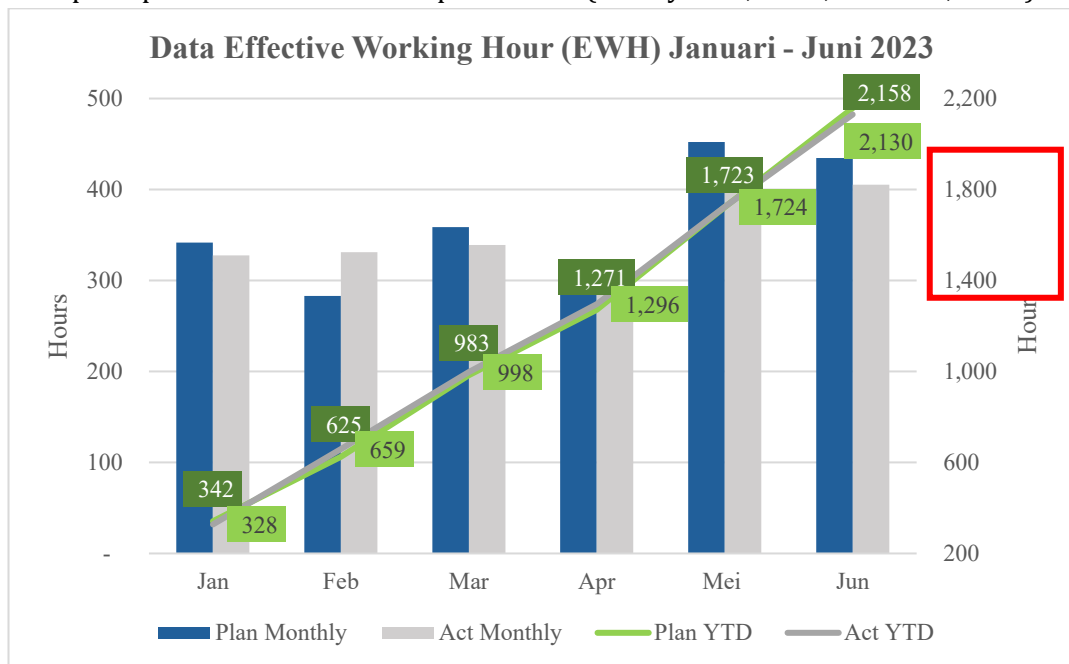
Intensitas curah hujan yang tinggi dan akumulasi air di permukaan jalan tambang sering menimbulkan kondisi licin (*slippery*), yang berdampak pada penurunan Effective Working Hours (EWH) alat berat serta menghambat kegiatan overburden removal. Ketidakefisienan ini menimbulkan kerugian produksi yang signifikan, diperkirakan mencapai sekitar Rp403 juta per jam akibat waktu tunggu dan keterlambatan operasional. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas rekayasa perkuatan jalan tambang melalui pemanfaatan material lokal limestone reject sebagai lapisan permukaan (*surface layer*) dan metode stone column sebagai sistem perkuatan tanah dasar (*subgrade reinforcement*) pada kondisi *slippery* di Kabupaten Balangan, Kalimantan Selatan. Evaluasi dilakukan pada ruas jalan sepanjang 21 km atau sekitar 66% dari total jaringan jalan tambang PT Saptaindra Sejati (SIS) Job Site SERA, dengan fokus pada segmen yang memiliki frekuensi *slippery* tertinggi. Upaya tambahan mencakup optimalisasi desain geometri jalan (*double crossfall*), pembangunan area parkir grader, serta peningkatan teknik pemadatan permukaan. Hasil evaluasi menunjukkan penurunan durasi *slippery* dari rata-rata 1,32 jam menjadi 0,5 jam per kejadian hujan, peningkatan daya dukung tanah sebesar 167%, penurunan konsumsi bahan

bakar sebesar 15%, serta pengurangan keausan ban hauler sebesar 20%. Secara keseluruhan, penerapan terintegrasi antara limestone reject dan stone column terbukti sebagai solusi rekayasa yang efektif, efisien, dan berkelanjutan dalam meningkatkan kekuatan tanah dasar, memperbaiki kinerja drainase, serta meningkatkan efisiensi operasional jalan tambang di wilayah Balangan yang memiliki curah hujan tinggi.

**Kata kunci :** Jalan tambang, *Slippery*, *Limestone reject*, *Stone column*, Daya dukung tanah, Efisiensi kerja, Tambang Balangan.

### PENDAHULUAN

Jalan tambang memiliki peranan penting dalam menjamin kelancaran aktivitas produksi di sektor pertambangan, khususnya dalam proses *overburden removal* yang sangat bergantung pada stabilitas dan kapasitas dukung jalan angkut (*haul road*). Kinerja jalan yang tidak optimal dapat menyebabkan terganggunya jam kerja efektif alat berat (*Effective Working Hours, EWH*), peningkatan biaya operasional, dan penurunan produktivitas tambang. Salah satu permasalahan utama yang sering dihadapi adalah kondisi jalan licin (*slippery*) akibat curah hujan tinggi dan genangan air di permukaan jalan, yang secara langsung menurunkan traksi ban dan mempercepat kerusakan struktur perkerasan (Hardiyatmo, 2018; Sari dkk., 2023).



**Gambar 1.** Data Perbandingan antara Plan Monthly dan Actual Monthly (dalam *Effective Working Hour (EWH)*), serta akumulasi Plan YTD dan Actual YTD (dalam jam kerja kumulatif tahunan) selama periode Januari hingga Juni 2023. (Sumber: Data lapangan PT SIS)

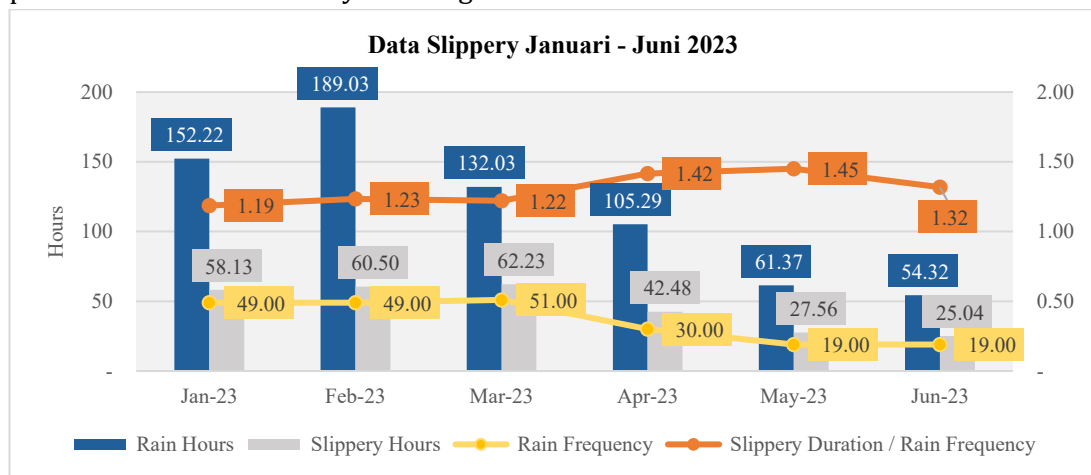
Berdasarkan data *Effective Working Hour* periode Januari-Juni 2023 (Gambar 1), total jam kerja efektif aktual (Actual YTD) mencapai 2.130 jam, sedikit lebih rendah dibandingkan target 2.158 jam. Selisih ini menunjukkan adanya kehilangan EWH akibat kondisi jalan yang tidak mendukung kelancaran operasi alat angkut.



**Gambar 2.** Komposisi faktor-faktor utama yang menyebabkan penurunan *Effective Working Hour* (EWH) di area operasional tambang selama periode pengamatan. .

(Sumber: Data lapangan PT SIS)

Analisis Pareto terhadap penurunan EWH (Gambar 2) menunjukkan bahwa dua kelompok utama penyebab kehilangan waktu kerja adalah *Breakdown* dan *Delay*. Faktor dominan adalah S1 – *Rain* (56,2%) diikuti oleh S2 – *Slippery* (14,5%), yang menggambarkan bahwa kondisi jalan licin pasca hujan tetap menjadi hambatan utama meskipun hujan telah berhenti. Faktor lain seperti S12 – *Waiting Hauler* (12,8%), S14 – *Front, Road, and Dispatch Maintenance* (7,9%), dan S18 – *Pit, Road, and Dispatch Movement* (5,2%) juga memberikan kontribusi terhadap penurunan produktivitas. Dengan demikian, lebih dari 70% penyebab kehilangan EWH berkaitan dengan kondisi cuaca dan kualitas struktur jalan tambang, menegaskan pentingnya perbaikan drainase dan daya dukung tanah dasar.



**Gambar 3.** Hubungan antara Rain Hours, Rain Frequency, *Slippery* Hours, dan Rasio *Slippery* Duration/Rain Frequency selama periode Januari hingga Juni 2023.

(Sumber: Data lapangan PT SIS)

Hubungan antara curah hujan dan kondisi jalan tambang (Gambar 3) menunjukkan bahwa rata-rata durasi kondisi *slippery* adalah 1,32 jam, dengan puncak tertinggi pada Mei 2023 (1,45 jam). Meskipun durasi hujan tertinggi terjadi pada Februari (189,03 jam dengan 49 kali hujan), tingkat kelicinan justru meningkat pada Mei ketika intensitas hujan menurun menjadi 61,37 jam dengan 19 kali hujan.

Fenomena ini mengindikasikan bahwa genangan air bertahan lama di badan jalan karena sistem drainase yang tidak efektif, sehingga tanah dasar tetap jenuh air dan tidak mampu menahan beban kendaraan berat secara optimal.

Permasalahan lapangan yang ditunjukkan pada Gambar 4 mengonfirmasi bahwa lemahnya sistem drainase permukaan dan deformasi plastis tanah dasar menjadi penyebab utama penurunan daya dukung jalan tambang. Kondisi tersebut memperpanjang durasi *slippery*, meningkatkan risiko kerusakan struktural, dan mengurangi kecepatan operasi alat angkut.



(a)

(b)

**Gambar 4.** Dua permasalahan utama yang menyebabkan penurunan daya dukung jalan tambang, yaitu (a) adanya genangan air di badan jalan akibat sistem drainase permukaan yang kurang efektif, dan (b) permukaan jalan yang bergelombang sebagai dampak deformasi plastis pada lapisan tanah dasar yang jenuh air. (Sumber: Dokumentasi lapangan PT SIS)

Berbagai penelitian terdahulu telah mengusulkan dua pendekatan utama untuk perbaikan daya dukung jalan tambang, yaitu perbaikan lapisan permukaan dan perkuatan tanah dasar. Pada lapisan permukaan, material bergradasi baik seperti *limestone reject*, *fly ash*, dan agregat halus terbukti dapat meningkatkan drainase serta kekasaran permukaan (Sari et al., 2023; Arifin & Widodo, 2022). Sedangkan pada tanah dasar, metode vertikal seperti *stone column* dan *geogrid* efektif meningkatkan kekuatan geser tanah jenuh serta mempercepat konsolidasi (Das, 2017; Rahardjo & Fredlund, 2019). Namun, sebagian besar penelitian tersebut dilakukan pada konteks jalan umum, bukan pada lingkungan tambang dengan lalu lintas berat dan curah hujan tinggi.

Inovasi perbaikan jalan tambang di PT Saptaindra Sejati (SIS) Job Site SERA dilakukan dengan menggabungkan kedua pendekatan tersebut. Pendekatan pertama adalah pemanfaatan *limestone reject* — material sisa produksi batu kapur dengan gradasi baik dan daya serap air rendah — sebagai lapisan permukaan (*surface layer*). Pendekatan kedua adalah penerapan metode *stone column* pada tanah dasar untuk meningkatkan daya dukung vertikal dan mengurangi deformasi plastis akibat beban kendaraan berat (Wibowo & Suprpto, 2020; Suganda et al., 2021). Implementasi kedua metode ini pada 21 km dari total 31,9 km jaringan jalan tambang (66%) terbukti meningkatkan daya dukung sebesar 167% dan menurunkan durasi *slippery* hingga 80%.

Kombinasi *limestone reject* dan sistem *stone column* tidak hanya memberikan manfaat teknis dan ekonomis, tetapi juga mendukung prinsip *green mining*, yakni

pemanfaatan material sisa produksi secara berkelanjutan (Pratama & Kurniawan, 2022). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas penerapan material *limestone reject* dan metode *stone column* dalam meningkatkan daya dukung jalan tambang serta menurunkan waktu *slippery* pada kegiatan *overburden removal* di Kabupaten Balangan, Kalimantan Selatan.

Penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi terhadap pengembangan teknologi perkerasan jalan tambang berkelanjutan melalui pemanfaatan material lokal dan sistem perkuatan vertikal yang disesuaikan dengan kondisi geoteknik tropis basah di Kalimantan Selatan.

## METODE PENELITIAN

### Lokasi dan Desain Penelitian

Penelitian ini dilakukan di area operasional PT Saptaindra Sejati (SIS) Job Site SERA (Gambar 5) yang berlokasi di Kabupaten Balangan, Kalimantan Selatan. Area penelitian difokuskan pada ruas jalan tambang dengan tingkat kejadian *slippery* tertinggi, yaitu pada segmen STA 1+000 hingga STA 1+200 di area OB2 PIT SCM. Desain penelitian menggunakan pendekatan *before-after comparison* untuk mengevaluasi perubahan kinerja jalan sebelum dan sesudah penerapan tindakan perbaikan. Evaluasi dilakukan terhadap parameter teknis, geoteknik, dan operasional selama periode Januari 2023 hingga Juni 2025.



**Gambar 5.** (a) Peta Pesebaran Jobsite PT SIS (b) Peta Pit PT. SIS Jobsite SERA. .  
(Sumber: Data Laporan PT SIS).

## Prosedur Penelitian

Pada penelitian ini terdapat tiga tahapan utama penelitian, yaitu pengumpulan data, tahap pengukuran sampel, dan tahap analisis dan interpretasi data:

### Tahapan Pengumpulan Data

Tahap awal penelitian difokuskan pada pengumpulan data pendukung yang mencerminkan kondisi eksisting jalan tambang, karakteristik tanah dasar, serta performa operasional alat angkut. Pengumpulan data dilakukan secara terintegrasi melalui beberapa sumber utama, yaitu data curah hujan dan durasi kondisi licin (*slippery*) yang diperoleh dari sistem *dispatch monitoring* dan alat ukur curah hujan otomatis selama periode Januari hingga Juni 2023; data operasional alat berat yang mencakup *Effective Working Hour (EWH)*, *rain hours*, serta waktu tunggu (*waiting time*) akibat gangguan jalan licin; dan data geoteknik yang meliputi hasil uji laboratorium terhadap sifat fisik dan mekanik tanah, seperti uji *California Bearing Ratio (CBR)*, batas Atterberg, serta analisis gradasi material, disertai observasi visual terhadap deformasi permukaan dan sistem drainase jalan. Selain itu, dokumentasi lapangan berupa foto kondisi jalan sebelum dan sesudah perbaikan juga dikumpulkan sebagai data pendukung analisis kualitatif. Seluruh data tersebut digunakan untuk mengidentifikasi penyebab utama penurunan kinerja jalan tambang sekaligus menjadi dasar pemilihan lokasi penelitian pada STA 1+005 – STA 1+055 dan STA 1+085 – STA 1+115, yang mewakili segmen dengan tingkat kerusakan dan frekuensi *slippery* tertinggi.

### Tahap Analisis dan Interpretasi Data

Hasil pengumpulan data selanjutnya dianalisis dengan pendekatan deskriptif-kuantitatif untuk menilai efektivitas tindakan perbaikan jalan tambang berdasarkan parameter teknis dan operasional. Analisis dilakukan melalui langkah-langkah berikut: (1) Evaluasi teknis, dilakukan dengan membandingkan nilai *California Bearing Ratio (CBR)*, tingkat deformasi permukaan, dan durasi *slippery* antara kondisi sebelum dan sesudah perbaikan guna mengukur peningkatan daya dukung tanah serta kestabilan perkerasan; (2) Analisis hubungan operasional, yang menilai korelasi antara *rain hours* dan *slippery duration* menggunakan metode *Pearson correlation* dan regresi linear sederhana untuk mengidentifikasi pengaruh curah hujan terhadap performa jalan tambang; serta (3) Analisis efisiensi kerja, yang menghitung peningkatan *Effective Working Hours (EWH)* berdasarkan selisih antara nilai *Actual YTD* sebelum dan sesudah implementasi perbaikan.

Prosedur penelitian ini membentuk sistem yang terukur, sistematis, dan dapat direproduksi, menggabungkan analisis kinerja (Pareto, QCDSMP) dengan pendekatan teknis (*limestone reject* dan *stone column*). Kombinasi ini memastikan bahwa hasil penelitian tidak hanya memberikan solusi teknis terhadap penurunan kondisi *slippery*, tetapi juga membangun model implementasi perbaikan jalan

tambang berkelanjutan (*continuous improvement framework*) yang dapat dijadikan acuan dalam pengelolaan infrastruktur tambang di daerah beriklim tropis basah. Setiap hasil analisis kemudian diinterpretasikan secara sistematis untuk menilai kontribusi relatif dari penerapan *limestone reject* sebagai lapisan permukaan dan *stone column* sebagai sistem perkuatan tanah dasar. Hasil kuantitatif dikombinasikan dengan observasi lapangan guna memperoleh gambaran menyeluruh mengenai mekanisme peningkatan daya dukung, drainase, dan efisiensi operasional.

## Kerangka Implementasi dan Evaluasi

Prosedur penelitian dirancang secara terukur, sistematis, dan dapat direplikasi pada lokasi tambang lain dengan karakteristik geoteknik serupa. Pendekatan ini mengintegrasikan analisis kinerja operasional (*Pareto* dan *QCDSMP*) dengan intervensi rekayasa berbasis material lokal (*limestone reject*) serta sistem perkuatan vertikal (*stone column*). Integrasi kedua pendekatan tersebut bertujuan menghasilkan solusi teknik yang tidak hanya efektif dalam mengatasi permasalahan *slippery*, tetapi juga mendukung pembentukan *continuous improvement framework* untuk perbaikan infrastruktur jalan tambang secara berkelanjutan. Dengan demikian, hasil penelitian ini dapat dijadikan acuan teknis dalam pengelolaan jalan tambang pada lingkungan pertambangan beriklim tropis basah secara lebih efisien, adaptif, dan berorientasi pada keberlanjutan operasional.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Analisis Implementasi Pemanfaatan Material *Limestone Reject* sebagai Lapisan Permukaan Jalan Tambang

Kondisi eksisting jalan tambang sebelum dilakukan perbaikan sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 6 memperlihatkan berbagai permasalahan yang signifikan, terutama pada aspek drainase dan daya dukung tanah dasar. Hasil pengamatan lapangan menunjukkan bahwa material clay spoil menutupi saluran air, menyebabkan genangan pada badan jalan dan memperpanjang durasi kondisi licin (*slippery*). Selain itu, kemiringan jalan (*crossfall*) tidak terbentuk secara optimal, sehingga air hujan tidak dapat mengalir ke sisi jalan dengan baik. Kondisi tanah dasar yang jenuh air menyebabkan deformasi plastis (*rutting*) dan penurunan stabilitas perkerasan, yang secara langsung berdampak pada penurunan produktivitas alat angkut. Berdasarkan data *dispatch monitoring*, *Effective Working Hour* (EWH) aktual berada di bawah target bulanan akibat meningkatnya waktu tunggu saat hujan.



(a)



(b)

**Gambar 6.** Permasalahan kondisi jalan sebelum perbaikan, yaitu (a) material clay spoil yang menutupi saluran air dan menghambat aliran permukaan, serta (b) kemiringan jalan (*crossfall*) yang tidak terbentuk sehingga menyebabkan genangan air di badan jalan. Kedua kondisi ini mengakibatkan meningkatnya durasi kondisi licin (*slippery*) dan penurunan daya dukung perkerasan jalan tambang. (Sumber: Dokumentasi PT SIS, 2024)

Program perbaikan jalan tambang dilaksanakan melalui pendekatan *continuous improvement* dengan menerapkan *countermeasure* teknis berbasis material lokal, yaitu pemanfaatan *limestone reject* dan penataan sistem drainase permukaan. Material *limestone reject*, yang sebelumnya merupakan hasil samping proses penambangan, dikumpulkan kembali untuk digunakan sebagai lapisan permukaan (*surface layer*) jalan tambang. Material ini memiliki gradasi baik, daya serap air rendah, serta permeabilitas tinggi, sehingga dapat meningkatkan kemampuan drainase dan kapasitas dukung lapisan atas (*surface bearing capacity*). Pelaksanaan perbaikan dilakukan pada area OB2 PIT SCM dengan ketebalan lapisan  $\pm 30$  cm yang dipadatkan hingga mencapai  $\geq 95\%$  *Maximum Dry Density* (MDD). Selain itu, dilakukan penyesuaian kemiringan jalan menggunakan sistem *double crossfall* untuk mempercepat aliran air permukaan dan mencegah terbentuknya genangan pada badan jalan. Sebagai langkah pendukung operasional, dipasang rambu acuan kemiringan jalan (*crossfall sign*) sebagai panduan bagi operator grader dalam menjaga keseragaman bentuk jalan, serta dilakukan sosialisasi teknis melalui sistem *grader zone management* agar kegiatan pemeliharaan jalan berjalan lebih efektif dan terstandar.

Hasil pengamatan lapangan pascaperbaikan (Gambar 7) menunjukkan bahwa permukaan jalan telah menjadi lebih padat dan memiliki kemampuan drainase yang baik. Permukaan yang terbentuk menunjukkan tekstur lebih kasar dan homogen, sehingga mampu meningkatkan traksi roda alat angkut serta mempercepat proses pengeringan pascahujan. Hasil pengujian tersebut selanjutnya dianalisis untuk mengetahui hubungan antara kemampuan drainase, daya dukung tanah dasar, dan durasi kondisi licin (*slippery*), yang menjadi dasar penilaian efektivitas penerapan *limestone reject* terhadap peningkatan kinerja jalan tambang.



(a)



(b)

**Gambar 7.** Kondisi jalan setelah perbaikan (a), (b) Pemasangan rambu acuan kemiringan jalan (*crossfall sign*) sebagai panduan bagi operator grader untuk menjaga keseragaman profil jalan tambang. (Sumber: Dokumentasi PT SIS, 2024)

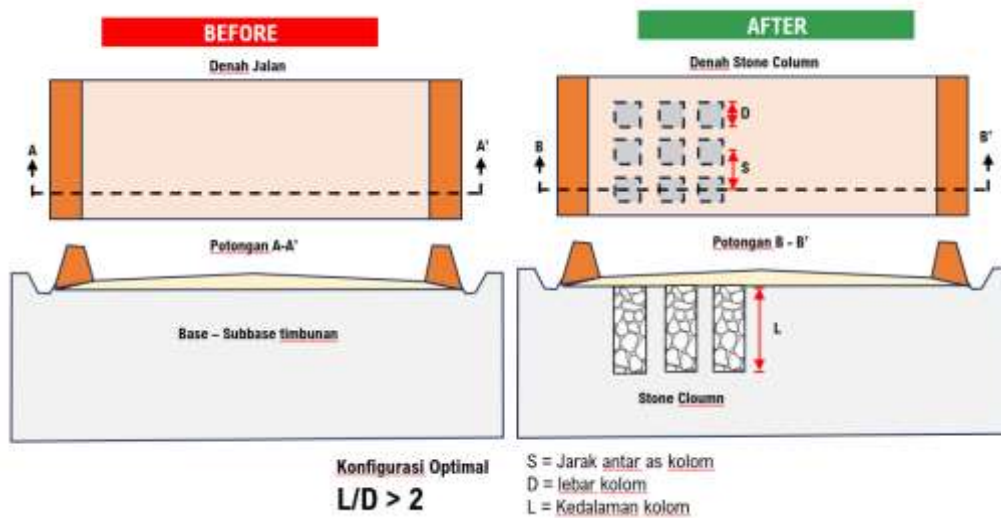
Dengan demikian, implementasi *limestone reject* sebagai lapisan permukaan tidak hanya memperbaiki aspek struktural jalan, tetapi juga berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi operasional, yang kemudian dianalisis lebih lanjut pada subbab berikutnya untuk menilai korelasinya dengan penurunan durasi *slippery* dan peningkatan *Effective Working Hours (EWH)*.

### Analisis Rekayasa Perkuatan Jalan dengan Stone Column

#### Analisis Hasil Empiris Pelaksanaan Lapangan

Penerapan sistem perkuatan tanah dasar dengan metode stone column dilakukan untuk mengatasi keterbatasan daya dukung lapisan subgrade pada ruas jalan tambang yang berada di atas tanah lempung plastis tinggi (*high plasticity clay*). Berdasarkan hasil investigasi awal, lapisan tanah dasar memiliki karakteristik lempung kohesif dengan kadar air tinggi dan nilai California Bearing Ratio (CBR) rata-rata di bawah 4%, yang menyebabkan penurunan berlebih (*excessive settlement*) serta deformasi plastis pada lapisan perkerasan akibat beban siklik dari alat angkut berat. Kondisi ini menjadi salah satu penyebab utama penurunan kinerja jalan tambang, terutama saat kondisi jenuh air setelah hujan.

Metode stone column diterapkan sebagai solusi rekayasa untuk meningkatkan kapasitas dukung tanah (*bearing capacity*) dan mengurangi deformasi vertikal. Kolom batu berfungsi sebagai elemen perkuatan vertikal yang memperkuat tanah lunak melalui mekanisme peningkatan kekakuan massa tanah (*composite stiffness*) serta drainase vertikal air pori. Dalam implementasinya, sistem ini terdiri atas kolom berdiameter 0,8–1,0 m dengan jarak antar kolom 2 m dan kedalaman 3–4 m, membentuk konfigurasi dengan rasio  $L/D > 2$  yang dianggap optimal untuk mencapai efisiensi struktural pada lapisan lempung jenuh. Kolom diisi dengan agregat batuan *limestone* bergradasi baik (*well-graded aggregate*) guna memastikan kekompakan tinggi dan kemampuan drainase vertikal yang memadai.



(a)

(b)

**Gambar 8.** Desain sistem perkuatan stone column pada jalan tambang: (a) kondisi awal sebelum perkuatan menunjukkan lapisan dasar dengan tanah lempung jenuh yang memiliki daya dukung rendah, dan (b) kondisi setelah penerapan stone column.

Pelaksanaan pekerjaan dilakukan secara sistematis berdasarkan tahapan konstruksi lapangan. Kegiatan diawali dengan pengarahan teknis (*technical briefing*) kepada operator lapangan, pemasangan rambu peringatan dan area kerja, serta penentuan titik koordinat kolom berdasarkan rancangan grid. Tahapan selanjutnya meliputi pekerjaan *ripping surface*, penggalian kolom hingga kedalaman desain, pengisian material batuan *limestone* bergradasi baik, dan proses pemadatan bertahap menggunakan *compactor* serta *bucket tamping*. Setelah seluruh kolom selesai dipasang, dilakukan pekerjaan akhir berupa penghamparan lapisan penutup dari material *limestone reject* dan pemadatan akhir untuk membentuk profil permukaan yang stabil dan seragam.



**Gambar 9.** Evaluasi kondisi permukaan jalan tambang sebelum dan sesudah penerapan sistem stone column pada STA 1+000 – STA 1+200 sepanjang 80 meter. Gambar menunjukkan perubahan signifikan dari kondisi awal yang mengalami deformasi dan genangan (a), menjadi kondisi lebih stabil pasca penerapan stone column (b), serta hasil pemantauan lapangan tanggal 23 Agustus 2024 (c) dan 17 September 2024 (d) yang memperlihatkan permukaan jalan tetap padat, rata, dan bebas genangan air setelah lebih dari satu bulan masa observasi.

**Analisis Hasil Pengujian dan Peningkatan Daya Dukung**

**Tabel 1.** Evaluasi Perkuatan Stone Column Terhadap Surface. (Sumber: Data lapangan PT SIS)

No	Lokasi	Waktu Pelaksanaan	Panjang segmen (m)	Umur (21/09/2024)	Maintenance		CBR (%)		Keterangan
					Patching Resheting Grading	Before (6/6/2024)	After (14/08/2024)	After (11/09/2024)	

1	ST A 1+ 00 5 – ST A 1+ 05 5	13 Agustus 2024	50	39	√	31,08	70,76	79,91	↑ 48,83 %
2	ST A 1+ 08 5 – ST A 1+ 11 5	13 Agustus 2024	30	39	√	30,48	72,64	77,39	↑ 46,92 %

Hasil pengujian California Bearing Ratio (CBR) yang disajikan pada Tabel 1 menunjukkan peningkatan signifikan pada kedua segmen uji. Nilai CBR rata-rata meningkat dari 30,48–31,08% menjadi 70,76–79,91% setelah implementasi stone column, atau mengalami peningkatan daya dukung sebesar 47,9%. Hasil ini menunjukkan efektivitas sistem kolom batu bergradasi baik dalam memperkuat lapisan tanah lempung plastis tinggi (CH) yang sebelumnya memiliki daya dukung rendah dan tingkat deformasi tinggi pada kondisi jenuh air.

Hasil pengujian tersebut selanjutnya dianalisis untuk memahami mekanisme peningkatan kekuatan tanah dan hubungannya dengan stabilitas permukaan jalan tambang. Berdasarkan analisis geoteknik, peningkatan ini dijelaskan melalui mekanisme interaksi tanah–kolom yang membentuk sistem tanah komposit (composite ground system). Agregat bergradasi baik di dalam kolom meningkatkan kekakuan massa tanah melalui dua mekanisme utama: (1) redistribusi tegangan vertikal, di mana sebagian beban kendaraan dialihkan dari tanah lunak ke kolom batu, dan (2) disipasi tekanan air pori yang lebih cepat akibat permeabilitas tinggi dari kolom batu.

Kondisi ini sejalan dengan model teoritis yang dikemukakan oleh Basack dan Purkayastha (2015), bahwa perkuatan dengan *stone column* mempercepat konsolidasi dan mengurangi deformasi plastis pada tanah jenuh air akibat siklus beban dinamis. Selain itu, peningkatan CBR setelah 39 hari pascaimplementasi menunjukkan adanya konsolidasi sekunder di sekitar kolom batu. Air pori tersisa secara perlahan terdisipasi melalui celah antarbutir batuan *limestone*, menyebabkan

peningkatan tegangan efektif tanah (*effective stress increase*) dan bertambahnya nilai CBR serta *k-value*. Fenomena ini juga konsisten dengan temuan Kamila et al. (2022), yang menjelaskan bahwa peningkatan kekakuan lapisan tanah setelah pemasangan *stone column* tidak hanya disebabkan oleh efek struktural, tetapi juga oleh peningkatan kekuatan geser (*shear strength gain*) akibat rekonsolidasi alami.

### Interpretasi Teknis dan Implikasi Operasional

Secara praktis, penerapan *stone column* pada segmen STA 1+000 – STA 1+200 menunjukkan dampak positif terhadap stabilitas dan performa permukaan jalan tambang. Berdasarkan hasil observasi lapangan, deformasi permukaan dan rutting yang sebelumnya tampak jelas telah berkurang secara signifikan. Permukaan jalan menjadi lebih padat, seragam, dan tetap bebas genangan meskipun terjadi hujan dengan intensitas sedang. Hal ini mengindikasikan bahwa kolom batu juga berperan sebagai sistem drainase vertikal tambahan yang membantu mengalirkan air dari lapisan subgrade menuju lapisan bawah, sehingga mempercepat pengeringan pascahujan dan menjaga kondisi jalan tetap stabil.

Hasil analisis tersebut selanjutnya diinterpretasikan untuk mengevaluasi dampaknya terhadap performa operasional tambang. Peningkatan daya dukung tanah dan perbaikan karakteristik drainase berkontribusi langsung terhadap peningkatan *Effective Working Hours* (EWH) alat angkut, karena berkurangnya waktu tunda akibat kondisi *slippery*. Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian Hardiyatmo (2018) dan Rahardjo & Fredlund (2019), yang menegaskan bahwa kombinasi sistem perkuatan vertikal dan drainase merupakan strategi efektif untuk mengendalikan penurunan diferensial pada tanah jenuh air.

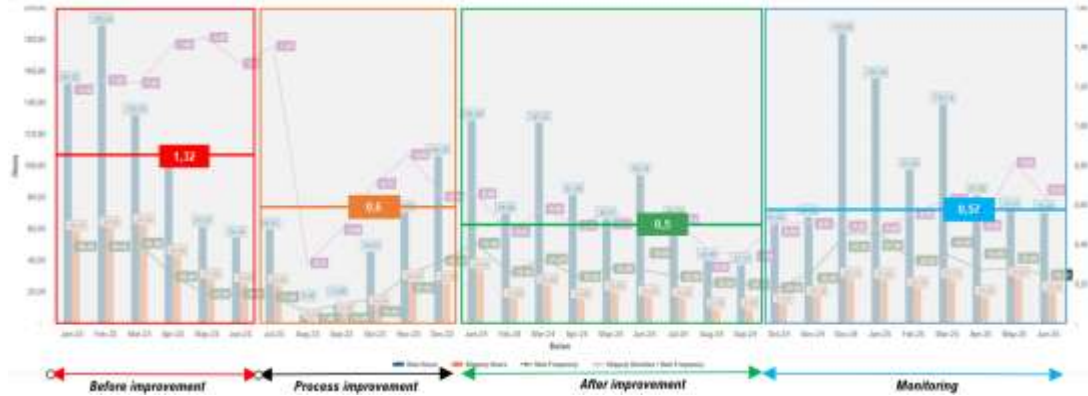
Dibandingkan penelitian terdahulu oleh Wibowo & Suprpto (2020), peningkatan nilai CBR dalam studi ini (47,9%) sedikit lebih tinggi dibandingkan peningkatan rata-rata 40–45% yang diperoleh pada proyek serupa menggunakan material granular non-kapur. Perbedaan ini dapat dikaitkan dengan karakteristik agregat *limestone reject* yang memiliki permeabilitas lebih tinggi dan kemampuan drainase lebih baik dibandingkan material granular konvensional.

Secara keseluruhan, hasil analisis mengindikasikan bahwa penerapan metode *stone column* dengan material lokal bergradasi baik merupakan pendekatan rekayasa yang efektif, efisien, dan berkelanjutan untuk meningkatkan daya dukung tanah, mempercepat drainase, serta mengurangi durasi kondisi licin (*slippery*) pada jalan tambang di wilayah dengan curah hujan tinggi seperti Kabupaten Balangan.

### Analisis Efektivitas Penurunan Durasi *Slippery* Per Frekuensi Hujan

Berdasarkan data pada Gambar 10, penerapan program perbaikan jalan tambang melalui pemanfaatan *limestone reject* sebagai lapisan permukaan dan metode *stone column* sebagai sistem perkuatan tanah dasar memberikan dampak signifikan terhadap penurunan durasi kondisi licin (*slippery duration*) per frekuensi hujan. Grafik tersebut menggambarkan empat fase utama, yaitu sebelum perbaikan

(before improvement), selama proses perbaikan (process improvement), setelah perbaikan (after improvement), dan periode pemantauan (monitoring).



**Gambar 10.** Data Durasi Slippery Per Frekuensi Hujan. (Sumber: Data lapangan PT SIS)

Pada fase *before improvement* (Januari-Juni 2023) sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 10 dan Tabel 2, rata-rata durasi *slippery* per frekuensi hujan mencapai 1,32 jam, dengan intensitas hujan tinggi (*rain hours* 152–189 jam) dan frekuensi hujan sekitar 49–51 kali per bulan. Nilai ini mengindikasikan bahwa sistem drainase dan lapisan perkerasan belum mampu mengalirkan air secara efektif, menyebabkan genangan dan kondisi jenuh air pada lapisan permukaan. Genangan tersebut menurunkan traksi ban alat angkut dan memperpanjang waktu tunggu operasi, yang secara langsung menurunkan *Effective Working Hours (EWH)* pada area operasional tambang.

**Tabel 2.** Data Monitoring Frkuensi Hujan dan SLIPPERY. (Sumber: Data lapangan PT SIS)

Month	Year	Rain Hours	Slippery Duration (Hours)
Jan	2023	152	1.32
Feb	2023	165	1.32
Mar	2023	178	1.32
Apr	2023	189	1.32
May	2023	152	1.32
Jun	2023	165	1.32
Jul	2023	45	0.6
Aug	2023	51	0.6
Sep	2023	49	0.6
Oct	2023	51	0.6
Nov	2023	45	0.6
Dec	2023	51	0.6
Jan	2024	45	0.5
Feb	2024	51	0.5
Mar	2024	45	0.5
Apr	2024	51	0.5
May	2024	45	0.5
Jun	2024	51	0.5
Jul	2024	45	0.5
Aug	2024	51	0.5
Sep	2024	45	0.5
Oct	2024	51	0.5
Nov	2024	45	0.5
Dec	2024	51	0.5
Jan	2025	45	0.5
Feb	2025	51	0.5
Mar	2025	45	0.5
Apr	2025	51	0.5
May	2025	45	0.5
Jun	2025	51	0.5

Hasil pengujian tersebut selanjutnya dianalisis untuk menilai dampak teknis dari penerapan sistem perbaikan jalan terhadap peningkatan efisiensi drainase dan daya dukung lapisan tanah dasar. Memasuki fase *process improvement* (Juli–Desember 2023), setelah penerapan awal material *limestone reject* dan penyesuaian geometri jalan (*double crossfall*), durasi *slippery* menurun signifikan menjadi rata-rata 0,6 jam per frekuensi hujan. Penurunan sebesar 54,5% ini menunjukkan perbaikan kapasitas drainase permukaan serta peningkatan kemampuan perkerasan dalam menahan beban dinamis pada kondisi basah. Meskipun curah hujan masih berfluktuasi (45–100 jam per bulan), permukaan jalan menunjukkan respon positif terhadap desain baru dengan waktu pengeringan lebih cepat setelah hujan berhenti. Fase *after improvement* (Januari–September 2024) memperlihatkan kondisi yang lebih stabil, dengan rata-rata durasi *slippery* turun menjadi 0,5 jam per frekuensi hujan. Penerapan sistem *stone column* pada area dengan tanah dasar lempung plastis tinggi meningkatkan kapasitas dukung tanah dan drainase vertikal, sehingga air

hujan tidak lagi terperangkap di lapisan bawah. Peningkatan ini sejalan dengan hasil pengujian lapangan yang menunjukkan kenaikan nilai *CBR* sebesar 46–48% dan *k-value* sebesar 40%, yang menegaskan terjadinya perbaikan struktural signifikan pada lapisan *subgrade*.

Selanjutnya, fase monitoring (Oktober 2024–Juni 2025) mengindikasikan durasi *slippery* yang relatif stabil, dengan nilai rata-rata 0,57 jam meskipun curah hujan kembali meningkat hingga 180 jam pada Desember 2024 dan Februari 2025. Stabilitas ini menunjukkan bahwa sistem perbaikan jalan telah mencapai performa jangka menengah yang andal, mampu mempertahankan fungsi struktural dan hidrologis meskipun terjadi variasi intensitas hujan tinggi.

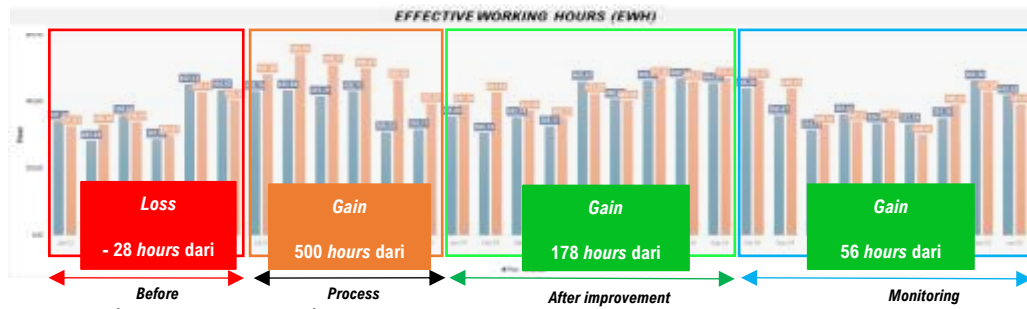
Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa durasi *slippery* per frekuensi hujan berhasil diturunkan sebesar 62,8%, dari rata-rata 1,32 jam sebelum perbaikan menjadi 0,5-0,57 jam setelah perbaikan. Penurunan ini menggambarkan efektivitas kombinasi tindakan perbaikan struktural dan fungsional, meliputi : (1) penerapan material *limestone reject* untuk meningkatkan permeabilitas dan kekasaran permukaan; (2) perkuatan tanah dasar dengan *stone column* yang mempercepat disipasi tekanan air pori; dan (3) optimalisasi geometri jalan (*double crossfall*) yang mempercepat pembuangan air permukaan.

Konsistensi hasil ini sejalan dengan teori drainase jalan tambang yang dikemukakan oleh Thompson & Visser (2003) serta penelitian Hardiyatmo (2018), yang menegaskan bahwa peningkatan sistem drainase dan kapasitas dukung tanah merupakan faktor dominan dalam pengendalian durasi genangan dan peningkatan umur layan (*service life*) jalan tambang. Hasil pemantauan jangka panjang mengonfirmasi bahwa metode ini tidak hanya efektif secara teknis, tetapi juga efisien secara operasional, karena mampu menjaga stabilitas jalan meskipun curah hujan tinggi tanpa meningkatkan biaya pemeliharaan secara signifikan.

### **Analisis Ketercapaian EWH pada fase Process Improvement**

#### **Analisis Hasil Empiris dan Tren Kinerja Operasional**

Berdasarkan data pada Gambar 11, penerapan program perbaikan jalan tambang di PT Saptaindra Sejati (SIS) Job Site SERA memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan kinerja operasional yang tercermin melalui kenaikan *Effective Working Hours (EWH)*. Parameter *EWH* digunakan sebagai indikator utama efisiensi waktu kerja alat berat dalam aktivitas *overburden removal*. Nilai *EWH* yang tinggi menunjukkan bahwa kondisi jalan tambang berada dalam keadaan stabil, aman, dan minim hambatan operasional akibat genangan air atau permukaan jalan licin (*slippery*).



**Gambar 11.** Ketercapaian EWH pada fase Process Improvement sampai dengan Monitoring menjadi salah satu pencapaian KPI Site yang dapat menambah opportunity produksi OB Removal. (Sumber: Data Lapangan PT SIS)

Sebelum dilakukan perbaikan (*before improvement*), EWH aktual menunjukkan deviasi negatif terhadap rencana (*plan*), dengan rata-rata kehilangan waktu kerja sebesar -28 jam per periode pengamatan. Kehilangan jam kerja ini terjadi akibat tingginya frekuensi hujan dan durasi kondisi *slippery*, yang menyebabkan waktu tunggu alat angkut meningkat dan menurunkan produktivitas produksi *overburden*.

Setelah program *Process Improvement* diterapkan, yang meliputi penerapan material *limestone reject* sebagai lapisan perkerasan, sistem perkuatan tanah dasar *stone column*, serta perbaikan geometri jalan dengan *double crossfall*, nilai EWH meningkat signifikan sebesar +500 jam dibandingkan target rencana. Peningkatan ini menunjukkan keberhasilan rekayasa perkerasan dalam meminimalkan dampak genangan air dan mempercepat pemulihan kondisi jalan pascahujan.

Pada fase *After Improvement*, kinerja EWH terus menunjukkan tren positif dengan selisih rata-rata +178 jam di atas target, mencerminkan stabilitas kondisi jalan yang memiliki kemampuan drainase dan daya dukung lebih baik. Selanjutnya, pada fase *Monitoring* (Oktober 2024–Juni 2025), nilai EWH tetap stabil dengan tambahan rata-rata +56 jam, menandakan bahwa perbaikan yang diterapkan memiliki keberlanjutan performa dalam jangka menengah.

Secara kumulatif, dari fase *Process Improvement* hingga *Monitoring*, diperoleh tambahan waktu kerja efektif sebesar 706 jam dibandingkan periode sebelum perbaikan. Hasil pengujian tersebut selanjutnya dianalisis untuk menilai hubungan antara peningkatan EWH dengan efektivitas tindakan perbaikan teknis yang diterapkan pada infrastruktur jalan tambang.

### Analisis Teknis dan Interpretasi Hasil

Kenaikan EWH mencerminkan peningkatan efisiensi operasional alat berat, yang secara langsung berkaitan dengan keberhasilan rekayasa infrastruktur jalan tambang. Penggunaan *limestone reject* sebagai lapisan permukaan terbukti meningkatkan permeabilitas dan mempercepat aliran air permukaan, sehingga mengurangi waktu genangan. Sementara itu, sistem *stone column* meningkatkan modulus reaksi tanah (*k-value*) dan mempercepat disipasi tekanan air pori, yang memperkuat daya dukung lapisan subgrade. Kombinasi kedua metode tersebut

menghasilkan distribusi tegangan yang lebih merata, menurunkan deformasi plastis, dan meningkatkan stabilitas kendaraan berat selama operasi hauling.

Secara ilmiah, hasil ini konsisten dengan penelitian Hardiyatmo (2018) dan Thompson & Visser (2003), yang menegaskan bahwa peningkatan daya dukung tanah dan efisiensi sistem drainase merupakan faktor dominan dalam menjaga keandalan jalan tambang terhadap beban berulang. Peningkatan nilai *EWH* juga dapat diartikan sebagai bukti bahwa kondisi jalan telah memenuhi tiga kriteria utama jalan tambang fungsional, yaitu: (a) permukaan padat dengan deformasi minimal, (b) sistem drainase yang mampu mengalirkan air secara efektif, dan (c) kekasaran permukaan yang konsisten untuk mempertahankan traksi ban alat berat.

Secara keseluruhan, hasil analisis mengindikasikan bahwa peningkatan *EWH* tidak hanya merupakan akibat dari perbaikan struktural jalan tambang, tetapi juga hasil integrasi antara inovasi rekayasa perkerasan dan efektivitas manajemen operasional. Hal ini memperlihatkan sinergi antara aspek teknis dan manajerial dalam mendukung keberlanjutan produktivitas tambang melalui peningkatan efisiensi waktu kerja alat berat.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan evaluasi rekayasa yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa permasalahan kondisi jalan tambang yang licin (*slippery*) akibat tingginya curah hujan di wilayah pertambangan Balangan dapat diatasi secara efektif melalui kombinasi penerapan material lokal *limestone reject* sebagai lapisan permukaan dan metode *stone column* sebagai sistem perkuatan tanah dasar. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa kombinasi kedua metode ini mampu meningkatkan stabilitas struktural jalan tambang, memperbaiki sistem drainase, serta menurunkan durasi *slippery* secara signifikan, sehingga berdampak langsung pada peningkatan *Effective Working Hours* (*EWH*) dan efisiensi operasional alat angkut.

Secara teknis, *limestone reject* berperan dalam meningkatkan kemampuan drainase dan kekasaran permukaan, sementara *stone column* memperkuat tanah jenuh air melalui peningkatan kapasitas dukung dan disipasi tekanan pori. Sinergi keduanya menghasilkan perbaikan daya dukung dan ketahanan jalan tambang terhadap kondisi jenuh air.

Secara keseluruhan, hasil evaluasi menegaskan bahwa penerapan *limestone reject* dan *stone column* merupakan solusi rekayasa yang efektif, efisien, dan berkelanjutan dalam meningkatkan kinerja jalan tambang di wilayah beriklim tropis basah seperti Kabupaten Balangan. Pendekatan ini dapat dijadikan acuan praktis dalam pengembangan dan pemeliharaan jalan tambang berkelanjutan di lingkungan pertambangan dengan intensitas hujan tinggi.

## DAFTAR PUSTAKA

Arifin, A., & Widodo, D. (2022). Pengaruh penggunaan *limestone reject* terhadap peningkatan daya dukung lapisan permukaan jalan tambang. *Jurnal Rekayasa Infrastruktur dan Material*, 8(2), 65–73.

- Basack, S., & Purkayastha, R. D. (2015). Analysis of soft clay ground reinforced with stone columns. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 9(4), 355–362.
- Das, B. M. (2017). *Principles of foundation engineering* (9th ed.). Boston: Cengage Learning.
- Hardiyatmo, H. C. (2018). *Mekanika tanah II: Prinsip-prinsip rekayasa geoteknik*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Kamila, A. N., Wicaksono, A. D., & Nugraha, F. (2022). Improvement of soft clay bearing capacity using stone column and geosynthetic reinforcement. *Geotechnical and Geological Engineering Journal*, 40(6), 2871–2884.
- Pratama, R., & Kurniawan, T. (2022). Pemanfaatan material limbah tambang batu kapur sebagai alternatif material konstruksi jalan tambang berkelanjutan (*green mining concept*). *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 10(1), 33–42.
- Rahardjo, H., & Fredlund, D. G. (2019). *Soil mechanics for unsaturated soils*. New York: John Wiley & Sons.
- Sari, A. P., Rachman, M., & Widodo, B. (2023). Analisis pengaruh curah hujan terhadap kondisi jalan tambang dan produktivitas alat angkut di area hauling. *Jurnal Teknologi Pertambangan Indonesia*, 12(1), 25–36.
- Suganda, R., Hidayat, E., & Prasetyo, R. (2021). Perbaikan tanah dasar jalan tambang menggunakan metode *stone column* dengan material lokal. *Jurnal Rekayasa Sipil dan Infrastruktur*, 9(3), 112–121.
- Thompson, R. J., & Visser, A. T. (2003). *Mine haul road design and management*. Johannesburg: The South African Institute of Mining and Metallurgy.
- Wibowo, S., & Suprpto, B. (2020). Evaluasi efektivitas perkuatan tanah dasar menggunakan kolom batu (*stone column*) pada lapisan lempung plastis sedang. *Jurnal Geoteknik Indonesia*, 7(2), 84–93.