

Evaluasi Stabilitas Perkerasan dan Kinerja Transportasi Jalan *Hauling* Menggunakan Lapisan *Sub-Base Boulder* Nikel

Iin Fitrianty Suaib Cangara¹, Chaidir Suwahyo², Alifah Dhiya Maghfirah³, Achmad Irfan Nur⁴

¹Universitas Bosowa, ²Universitas Bosowa, ³Universitas Bosowa, ⁴Universitas Bosowa

iincangara@univeristasbosowa.ac.id, chaidirsuwahyo@gmail.com,
alifahdhiya@univeristasbosowa.ac.id achmadirfan@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi stabilitas struktur perkerasan dan efisiensi kinerja transportasi pada jalur *hauling* pengangkutan bijih nikel setelah penerapan penggantian material pondasi bawah (*sub-base*). Objek penelitian difokuskan pada koridor jalan *hauling* PT Weda Bay Nikel segmen KM 61–63 yang mengalami kegagalan struktur akibat saturasi material *cuttingan* eksisting di musim hujan. Metodologi yang digunakan adalah eksperimental lapangan (*field trial*) melalui penerapan sistem perkuatan kombinasi berjenjang (*graded chocking system*), yakni penghamparan batu *boulder* nikel berukuran 20–50 cm sebagai matras batuan dan dilanjutkan dengan pengisi batu pecah ukuran 5/7 cm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi *boulder* dan batu pecah mampu menciptakan mekanisme kuncian (*interlocking*) yang kokoh sekaligus menjaga fungsi drainase bebas internal. Perbaikan ini berhasil menghentikan fenomena *pumping*, mereduksi alur roda (*rutting*), memulihkan kelayakan lintasan (*trafficability*), serta mengoptimalkan kecepatan operasional dan waktu siklus (*cycle time*) armada *Dump Truck* (DT) secara aman.

Kata kunci— Perkerasan jalan, Jalur *hauling*, *Sub-base*, *Boulder* nikel, *Graded chocking system*, Kinerja transportasi

Abstract

This study aims to evaluate pavement structural stability and transportation performance efficiency along a nickel ore hauling road following sub-base material replacement. The research object focused on the PT Weda Bay Nikel hauling corridor at KM 61–63, which experienced structural failure due to saturated existing cut-material during the rainy season. The methodology utilized a field trial approach through a graded chocking system, applying 20–50 cm nickel boulders as a rock mattress followed by 5/7 cm crushed stone fillers. The results demonstrate that the combination of boulders and crushed stones successfully generated robust mechanical interlocking while maintaining internal free-draining functionality. This structural improvement effectively eliminated pumping, reduced rutting, restored road trafficability, and optimized the operational speed and cycle time of Dump Truck (DT) fleets safely.

Keywords— Road pavement, Hauling road, Sub-base, Nickel boulder, Graded chocking system, Transportation performance

I. PENDAHULUAN

Jalan tambang/*hauling* merupakan jalan khusus yang terdapat pada area pertambangan atau area proyek yang diperuntukkan bagi kegiatan pengangkutan (*hauling*) material tambang maupun tanah penutup (*overburden*), serta dilalui oleh alat pemindah tanah mekanis dan unit penunjang lainnya [1]. Jalur *hauling* atau koridor logistik tambang memegang peranan krusial sebagai urat nadi operasional pengangkutan bijih nikel pada kawasan industri PT Weda Bay Nikel khususnya KM 61–63. Tingginya volume mobilitas kendaraan berat (*heavy vehicles*) dengan beban gandar (*axle load*) yang masif menuntut performa struktur perkerasan jalan yang prima, khususnya pada lapisan pondasi bawah (*sub-base*). Lapisan ini berfungsi utama menyebar tegangan akibat beban lalu lintas agar aman diterima oleh tanah dasar (*subgrade*) [2].

Pada tahap awal konstruksi, lapisan *sub-base* pada jalur *hauling* ini dirancang memanfaatkan material agregat lokal yang diperoleh langsung dari area galian (*cuttingan*) di sekitar lokasi proyek [3]. Keputusan penggunaan material setempat tersebut pada mulanya diambil sebagai strategi efisiensi biaya dan waktu dalam pelaksanaan pekerjaan tanah (*earthwork*). Meski demikian, kendala teknis yang signifikan mulai timbul seiring masuknya musim hujan dengan intensitas presipitasi tinggi. Karakteristik material galian yang didominasi oleh butiran halus menyebabkan penyerapan air yang sangat cepat. Akibatnya, terjadi lonjakan kadar air bebas (*moisture content*) secara drastis hingga material mencapai kondisi jenuh air (*saturasi*), yang pada akhirnya merusak daya dukung struktur fondasi jalan [4].

Ditinjau dari perspektif rekayasa transportasi, penurunan kualitas perkerasan jalan pada jalur *hauling* ini memberikan dampak destruktif secara langsung terhadap kelancaran arus lalu lintas armada tambang. Kerusakan struktural dan fungsional yang terjadi ditandai oleh pembentukan alur roda (*rutting*) yang sangat dalam, area amblesan lokal, serta akumulasi desakan lumpur di sepanjang lintasan secara signifikan merusak kontinuitas

pergerakan unit angkut [5]. Kondisi permukaan yang tidak stabil dan licin tersebut memaksa para pengemudi armada untuk mengurangi kecepatan operasional kendaraan secara drastis demi mempertahankan traksi roda serta mengantisipasi potensi bahaya selip. Penurunan kecepatan angkut secara masif ini memicu dampak berantai terhadap manajemen transportasi tambang, seperti membengkaknya durasi waktu edar (*cycle time*) unit angkut secara keseluruhan, terdegradasinya kapasitas tampung jalan (*road capacity*) secara drastis, hingga meningkatnya eksposur risiko kecelakaan kerja bagi para operator di lapangan [6].

Kondisi jenuh air pada material *cuttingan* tersebut memicu penurunan drastis pada parameter geoteknis, seperti nilai *California Bearing Ratio* (CBR) dan modulus resilien perkerasan [7]. Ketika material *sub-base* mengalami saturasi, rongga pori di dalam agregat dipenuhi oleh air yang tidak dapat terkompresi. Saat beban gandar kendaraan *Dump Truck* (DT) melintas di atasnya, tekanan air pori (*pore water pressure*) meningkat secara signifikan, memicu terjadinya *pumping* (keluarnya air bercampur lumpur halus dari celah perkerasan) serta hilangnya kekangan lateral antarbutir [8]. Kondisi ini membuat jalur *hauling* menjadi sangat rentan terhadap kegagalan geser lokal, yang tidak hanya memperlambat *cycle time* armada angkut akibat penurunan kecepatan kendaraan, tetapi juga meningkatkan risiko kecelakaan kerja dan membengkaknya biaya perbaikan darurat (*corrective maintenance*) [9].

Hilangnya kekuatan dan stabilitas internal pada material agregat setempat menjadi pemicu utama bagi kegagalan fungsi lapisan *sub-base* [10]. Kombinasi destruktif antara repetisi beban muatan dinamis dari armada *Dump Truck* dan terdegradasinya kapasitas daya dukung tanah memicu penyebaran beban yang tidak merata di sepanjang lintasan [11]. Hal ini mengakibatkan terjadinya akumulasi deformasi vertikal permanen serta lonjakan tegangan geser berlebihan pada lapisan perkerasan. Tanpa adanya daya tahan geser yang memadai dari material lokal tersebut, struktur perkerasan mengalami pergeseran lateral dan keretakan internal yang merusak integritas jalan secara keseluruhan [12]. Fenomena ini mempercepat degradasi dini jalan seperti terjadinya alur roda (*rutting*), amblesan, hingga kegagalan struktur perkerasan secara keseluruhan yang pada akhirnya berdampak pada terganggunya efisiensi rantai pasok logistik tambang. Kondisi visual degradasi perkerasan dan genangan air pada koridor jalur *hauling* KM 61-63 saat intensitas hujan tinggi disajikan pada Gambar 1.



Gambar. 1 Kondisi visual jalur *hauling* KM 61-63 PT Weda Bay Nikel akibat saturasi material *cuttingan* pada musim hujan.

Kelemahan material *cuttingan* yang rentan mengalami penurunan daya dukung di musim hujan mendorong perlunya substitusi dengan material alternatif yang memiliki *interlocking* dan densitas lebih tinggi [13]. Penelitian ini menguji penggunaan batu *boulder* sebagai bahan pengganti material *cuttingan* guna menjamin stabilitas struktur perkerasan. Secara teknis, batu *boulder* atau batu gajah merupakan material tambang pegunungan yang terbukti andal untuk konstruksi pembetonan dan penstabilan berat seperti jalan tol, pelabuhan, serta penahan beban fisik [14]. Tingkat efektivitas batu *boulder* sebagai material pengganti sangat bergantung pada kepadatannya, yang terbagi dalam mutu kualitas baik (padat dan berwarna abu-hitam), batu burik (berpori), serta batu pecelan (merah/keabuan). Keberadaan rongga pada batu burik dapat mengganggu kerapatan antar-butir dan menurunkan durabilitas struktur saat jenuh air [15]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja mekanis serta peningkatan daya dukung lapisan *sub-base* setelah material *cuttingan* digantikan oleh batu *boulder*, dengan fokus pada distribusi tegangan dan ketahanan perkerasan terhadap beban dinamis *Dump Truck* (DT) di musim hujan.

Agar pembahasan lebih terarah, ruang lingkup penelitian ini dibatasi secara spesifik pada koridor jalan *hauling* PT Weda Bay Nikel KM 61-63. Fokus analisis ditinjau berdasarkan perubahan perilaku geoteknik dan respons struktural lapisan *sub-base* dari kondisi awal yang menggunakan material *cuttingan* hingga penanganan perbaikan struktur yang diterapkan di lapangan di bawah pengaruh beban lalu lintas kendaraan *Dump Truck* (DT) pada musim hujan, tanpa memperhitungkan aspek biaya konstruksi maupun dampak ekonomi makro [16].

II. METODE PENELITIAN

Untuk menjawab permasalahan degradasi lapisan *sub-base* akibat saturasi material *cuttingan*, penelitian ini dirancang menggunakan pendekatan eksperimental lapangan (*field trial*). Metodologi yang disusun mencakup penetapan lokasi pengujian, skema substitusi material dengan batu *boulder*, parameter pengamatan visual dan mekanis di bawah pembebanan dinamis, serta teknik evaluasi data sebelum dan sesudah penanganan.

A. Lokasi Studi dan Karakteristik Umum

Penelitian ini dilaksanakan pada koridor logistik utama jalur *hauling* pengangkutan bijih nikel PT Weda Bay Nikel, secara spesifik difokuskan pada segmen Km 61 – Km 63. Lokasi studi ini memiliki karakteristik operasional dengan tingkat mobilitas kendaraan berat (*heavy vehicles*) yang masif serta keterpaparan langsung terhadap intensitas presipitasi tinggi pada musim hujan. Evaluasi dilakukan pada ruas jalan yang mengalami degradasi atau kegagalan struktur akibat ketidakmampuan material galian (*cuttingan*) eksisting dalam menopang beban gandar kendaraan operasional.

B. Pendekatan dan Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental lapangan (*field trial*) melalui pembuatan segmen uji (*trial section*) secara langsung pada kondisi riil operasional. Pengujian dilakukan di bawah kombinasi pengaruh pembebanan dinamis armada *Dump Truck* (DT) muatan penuh (*laden condition*) dan kondisi lingkungan jenuh air selama berlangsungnya musim hujan.

Pekerjaan penanganan (*corrective/rehabilitation work*) pada segmen uji coba dilakukan dengan mengganti atau melapis kembali (*re-topping*) lapisan pondasi bawah (*sub-base*) eksisting yang berbahan material *cuttingan* menggunakan material batu *boulder* berukuran nominal 20 cm hingga 50 cm. Pemilihan ukuran ini bertujuan untuk memanfaatkan mekanisme kuncian antarbutir (*interlocking*) serta pembentukan rongga makro yang berfungsi sebagai saluran drainase internal (*drainage layer*) untuk mengalirkan air yang terperangkap di dalam struktur perkerasan [17].

C. Pengumpulan Data

Data penelitian yang dikumpulkan mencakup dua aspek utama, yaitu:

- 1) Parameter Stabilitas Perkerasan:
 - a. Pengamatan Visual Deformasi Permukaan: Mengidentifikasi tingkat kerusakan permukaan jalan yang meliputi pembentukan alur roda (*rutting*), amblesan (*settlement*), dan retakan (*cracking*).
 - b. Identifikasi Fenomena *Pumping*: Mengamati ada atau tidaknya kemunculan air bercampur lumpur/butiran halus yang tertekan keluar dari celah perkerasan akibat pembebanan dinamis berulang.
 - c. Kerapatan dan Mekanika Kuncian (*Interlocking*): Menilai efektivitas interaksi antarbutir dan stabilitas matriks pada lapisan pondasi bawah (*sub-base*).
- 2) Parameter Kinerja Transportasi:

- a. Kelancaran Arus Lalu Lintas: Mengamati ritme pergerakan dan kemandirian lintasan armada kendaraan berat (*Dump Truck / DT*).
- b. Pengamatan Hambatan Perjalanan (*Delay*): Mengukur potensi kemacetan atau penurunan kecepatan kendaraan akibat penurunan kondisi fisik perkerasan basah.
- c. Potensi Risiko Keselamatan Kerja: Menilai tingkat kekasaran permukaan/tahanan geser (*skid resistance*) serta potensi bahaya kendaraan selip (*slippage*).

D. Tahapan Pelaksanaan Penelitian

Pelaksanaan penelitian dilakukan secara bertahap yang diawali dengan tahap kondisi eksisting, yaitu mengamati dan mendokumentasikan kinerja perkerasan serta tingkat kelancaran arus lalu lintas armada *Dump Truck* (DT) pada lokasi uji coba yang masih memanfaatkan material *cuttingan* lokal sebagai lapisan *sub-base* di bawah pengaruh cuaca musim hujan. Kondisi visual jalur *hauling* KM 61–63 PT Weda Bay Nikel akibat saturasi material *cuttingan* pada kondisi eksisting musim hujan ini disajikan pada Gambar 1. Selanjutnya, penelitian memasuki tahap perbaikan perkerasan melalui pengamatan langsung terhadap proses aplikasi material pengganti, yang mencakup penghamparan batu *boulder* nikel berukuran 20–50 cm sebagai matras batuan (*rock mattress*), serta dilanjutkan dengan penghamparan batu pecah ukuran 5/7 cm sebagai bahan pengisi (*chocking/filler material*). Penggunaan batu pecah ini berfungsi untuk mengunci matriks batuan, menutup celah antar-*boulder*, dan meratakan permukaan jalan agar siap menerima lintasan beban kendaraan berat. Tahapan ini diakhiri dengan tahap evaluasi komparatif, yakni menganalisis secara mendalam perubahan perilaku stabilitas struktur perkerasan pasca-perbaikan serta dampaknya terhadap keandalan dan efisiensi kinerja transportasi armada DT setelah jalan *hauling* kembali dioperasikan secara penuh.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik Limbah Boulder Nikel dalam Perspektif Rekayasa Perkerasan Jalan

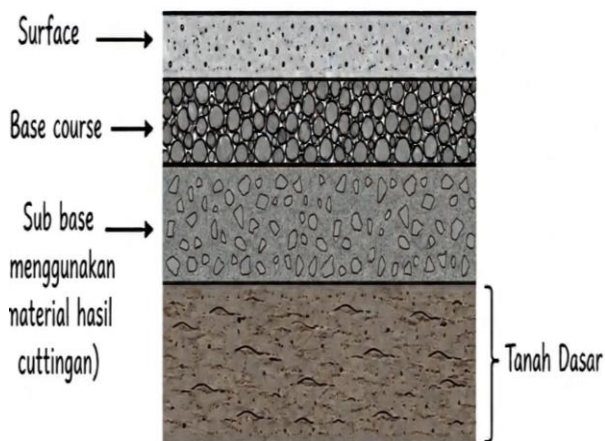
Material limbah nikel berspesifikasi *boulder* (20–50 cm) merupakan batuan penutup (*overburden*) atau sisa penambangan (*waste rock*) tanpa nilai ekonomis smelter [18]. Dalam rekayasa jalan raya, material ini dimanfaatkan kembali sebagai perkuatan struktur *sub-base*. Ukuran fisiknya yang masif dan keras sangat efektif menggantikan material halus yang mudah terdegradasi air, sekaligus mendukung konsep transportasi tambang berkelanjutan.

B. Evaluasi Kondisi Eksisting Sub Base Material Cuttingan

Sebagaimana ditampilkan pada skema susunan lapisan perkerasan Gambar 2, penggunaan material *cuttingan* pada

lapisan sub-base terbukti tidak andal dari sudut pandang rekayasa perkerasan musim hujan. Penjenuhan air memicu fenomena pumping dan pembentukan alur roda (rutting) akibat beban dinamis *Dump Truck* (DT) [19]. Dari sisi transportasi, kondisi ini menyebabkan:

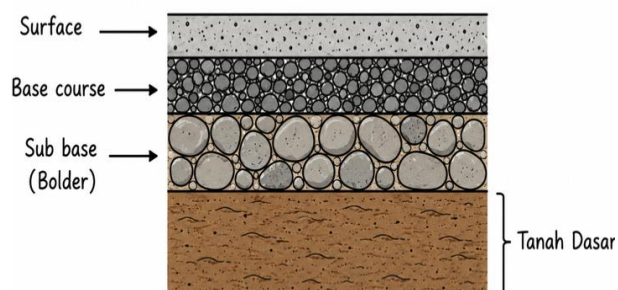
- 1) Penurunan Kecepatan Operasional: Kendaraan DT harus melambat ekstrem di titik-titik amblesan untuk menghindari kerusakan gandar.
- 2) Hambatan Arus Lalu Lintas: Terjadinya antrean armada (congestion) pada segmen jalan yang rusak karena kapasitas jalan (road capacity) menurun.
- 3) Gangguan Safety: Tingginya risiko kendaraan miring, terbalik, atau terperangkap lumpur (mud hole).



Gambar. 2 Ilustrasi penampang melintang susunan lapisan perkerasan eksisting berbasis material *cuttingan* dan mekanisme kegagalan struktur di musim hujan pada KM 61–63.

C. Evaluasi Perbaikan Sub-base Boulder Nikel (20–50 cm) dan Pengisi Batu Pecah (5/7 cm)

Sebagaimana disajikan pada skema susunan lapisan *sub-base* Gambar 3, hamparan batu *boulder* nikel berukuran 20–50 cm pada kondisi awal belum dapat dilalui secara langsung oleh armada kendaraan akibat besarnya rongga antar-batuan serta ketidakrataan permukaan tumpuan. Pelaksanaan teknis di lapangan terkait proses penghamparan dan penataan batu *boulder* nikel tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar. 3 Ilustrasi penampang melintang susunan lapisan *sub-base* perkuatan kombinasi berjenjang (*graded chocking system*) batu *boulder* nikel dan batu pecah pengisi pada jalur *hauling* KM 61–63.



Gambar. 4 Proses penghamparan dan penataan batu *boulder* nikel berukuran 20–50 cm sebagai matras batuan (*rock mattress*) pada jalur *hauling* KM 61–63.

Untuk mengatasi kendala struktur tersebut, diterapkan sistem perkuatan kombinasi berjenjang (*graded chocking system*). Mekanisme ini diawali dengan penghamparan batu *boulder* 20–50 cm sebagai matras batuan (*rock mattress*) sesuai gambar.4, yang kemudian dilapisi dengan agregat batu pecah ukuran 5/7 cm di atasnya. Material batu pecah ini secara efektif masuk dan mengisi celah antar-*boulder*, sehingga menciptakan efek penguncian sekunder (*chocking effect*) yang mengekang pergerakan *boulder*, meratakan permukaan perkerasan, serta mencegah risiko kerusakan pada ban *Dump Truck* (DT) [20].



Gambar. 5 Kondisi permukaan lapisan *sub-base* setelah dilapisi dan dipadatkan menggunakan batu pecah ukuran 5/7 cm (*chocking material*) pada jalur *hauling* KM 61–63.

D. Analisis Peningkatan Kinerja Transportasi Jalan Hauling

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa peningkatan kinerja transportasi di jalur *hauling* sangat dipengaruhi oleh optimalisasi struktur perkerasan jalan. Penambahan agregat batu pecah ukuran 5/7 cm sebagai bahan pengisi (*chocking material*) terbukti menjadi faktor kunci dalam meningkatkan kelayakan lintasan (*trafficability*). Secara teknis, material ini berfungsi mengisi rongga antar batuan dasar yang lebih besar guna menciptakan efek saling mengunci (*interlocking*) yang kuat, sehingga mampu menahan beban kendaraan berat tanpa mengalami pergeseran [17]. Stabilitas lapisan yang dihasilkan berhasil meminimalkan hambatan gulung (*rolling resistance*), mencegah terjadinya amblesan (*rutting*), dan mempercepat

waktu siklus angkut (*cycle time*). Dengan lintasan yang lebih kokoh dan rata, operasional armada hauling menjadi lebih aman, konsumsi bahan bakar lebih efisien, dan frekuensi perawatan jalan dapat ditekan secara signifikan.



Gambar. 6 Kondisi hasil akhir (*final surface*) permukaan jalan hauling KM 61–63 yang telah siap dan aman dilalui armada *Dump Truck* (DT) secara penuh.

Permukaan perkerasan hasil akhir yang telah terisi rapat dan terpadatkan secara optimal sesuai pada gambar 6 ini menghasilkan tumpuan roda dengan tahanan geser (*skid resistance*) yang baik, mereduksi guncangan ekstrem pada kendaraan, serta menjaga kestabilan kecepatan operasional [21]. Dampaknya, efisiensi waktu siklus (*cycle time*) kendaraan tambang dapat terpelihara secara konsisten sekaligus meningkatkan standar keselamatan kerja pengangkutan logistik.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil evaluasi eksperimental lapangan (*field trial*) dan analisis komparatif pada koridor jalan hauling PT Weda Bay Nikel, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Kejenuhan air selama musim hujan menyebabkan kegagalan struktur lapisan sub-base dari material galian (*cutting*) dalam menahan beban lintasan *Dump Truck* (DT). Tingginya saturasi air ini menurunkan daya dukung tanah dasar secara drastis, sehingga memicu timbulnya deformasi alur (*rutting*) serta munculnya desakan air dan lumpur ke permukaan (*pumping*).
2. Proses penghamparan batu *boulder* nikel berukuran 20–50 cm memerlukan aplikasi material pengisi (*chocking material*) berupa batu pecah ukuran 5/7 cm. Keberadaan bahan pengisi ini sangat krusial untuk mengunci serta menutup rongga-rongga kosong yang terbentuk di antara batuan berukuran besar, sekaligus menciptakan permukaan perkerasan yang rata dan stabil. Tanpa penguncian celah yang optimal dari bahan pengisi tersebut, struktur perkerasan jalan dianggap belum memenuhi standar kelayakan maupun keamanan struktural untuk dapat dilintasi oleh armada *Dump Truck* (DT).
3. Kombinasi antara *boulder* nikel berukuran 20–50 cm dan bahan pengisi batu pecah ukuran 5/7 cm terbukti efektif menciptakan mekanisme saling mengunci (*interlocking*) yang sangat kokoh pada struktur

perkerasan. Selain meningkatkan stabilitas daya dukung tanah, susunan batuan ini tetap mempertahankan fungsi drainase makro di bagian bawah lapisan perkerasan, sehingga air dapat mengalir dengan lancar tanpa terjebak di dalam struktur. Efektivitas aliran air dan kerapatan material ini berhasil mencegah terjadinya akumulasi tekanan air pori, sehingga lapisan perkerasan terbebas dari masalah *pumping* selama musim hujan.

4. Ditinjau dari aspek teknik transportasi, penyempurnaan struktur lapisan *sub-base* menggunakan bahan pengisi batu pecah ukuran 5/7 cm terbukti mampu memulihkan tingkat kemudahan melintas (*traffickability*) pada jalur hauling. Penutupan rongga batuan yang presisi ini menghasilkan permukaan jalan yang jauh lebih stabil dan rata, sehingga armada angkutan tambang dapat beroperasi dengan kecepatan ideal serta mencatatkan waktu edar (*cycle time*) yang lebih optimal. Dampak positif ini tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional pengangkutan material, tetapi juga secara langsung meminimalkan risiko kecelakaan kerja dan menjamin standar keselamatan operasional di area tambang.

REFERENSI

- [1] R. H. Ashari, J. S. Setiadji, P. Pendidikan, P. Insinyur, and U. K. Petra, "Evaluasi Geometri Jalan Hauling Overburden Pit X untuk Menunjang Operasional yang Aman," vol. 3, pp. 48–53, 2025.
- [2] S. Musdalifah, A. M. A. Sadiq, and B. Umar, "Evaluasi Stabilitas Lereng pada Area Longsor di Ruas Jalan Tator-Enrekang Km. 242+400," *J. Bangunan Konstr.*, vol. 3, no. 2, pp. 187–193, 2025.
- [3] S. P. Rizah, A. M. T. Hidayah, B. A. Prasetyo, and A. M. A. Sadiq, "Uji Karakteristik Tanah Kapur Dari Desa Pasempe Kecamatan Palakka Di Kabupaten Bone Sebagai Subgrade Pada Timbunan Jalan," *J. Bangunan Konstr.*, vol. 2, no. 2, pp. 110–115, 2024.
- [4] C. Suwahyo, A. M. A. Sadiq, I. F. S. Cangara, A. D. Maghfirah, and A. I. Nur, "Evaluasi risiko Area Longsor di Ruas Jalan Tana Toraja-Enrekang Km. 242+400," *J. Bangunan Konstr.*, vol. 4, no. 1, pp. 207–211, 2026.
- [5] P. D. Wicaksana and A. S. Erusani, "Peningkatan Produktivitas Alat Angkut dengan Menurunkan Rolling Resistance Jalan Angkut Berdasar Hasil Simulasi Talpac 10 . 2 Pengamatan dan Pengukuran Lapangan," vol. 1, no. 1, pp. 21–29, 2021, doi: 10.15408/jipl.v1i1.20627.
- [6] J. Angraini, "Strategi Kesatuan Lalu Lintas Dalam Menekan Kasus Kecelakaan Dijalan Raya Perspektif Fiqh Siyash (Studi kasus pada Kesatuan Lalu Lintas Polres Bengkulu Tengah)," 2025, *UIN Fatmawati Sukarno Bengkulu*.
- [7] M. Rahman, S. L. Gassman, and K. M. Islam, "Effect of Moisture Content on Subgrade Soils Resilient Modulus for Predicting Pavement Rutting," pp. 1–20, 2023.
- [8] I. D. Nawir and A. Z. Mansur, *Rekayasa Perkerasan Jalan: Prinsip, Praktik, dan Inovasi*. CV. Ruang Tentor, 2025.
- [9] D. Alfariz, "Analisis Jadwal Operasi Trailer Melalui Simulasi Time Slot Management untuk Mengatasi Ketidakseimbangan Lalu Lintas Pengangkutan Batubara di Simpang Hammer 73 Highway Pt. Adaro Indonesia di Tabalong, Provinsi Kalimantan Selatan," in *Bandung Conference Series: Mining Engineering*, 2025, pp. 293–300.
- [10] D. H. HAERUMAN, "KINERJA CAMPURAN ASPAL LAPIS ANTARA (AC-BC) DENGAN MENGGUNAKAN RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP)," 2024, *Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa*.
- [11] F. Mulia Artha, "Tinjauan Deformasi Permanen Pada Tanjakan dan Turunan Ruas Jalan Simpang Ampek-Sasak Kabupaten Pasaman Barat Km 278+000-279+500," 2024, *Universitas Malikussaleh*.

- [12] Y. Dong, "Deformation and force analysis of reinforced soil bridge abutment under dynamic vehicle loading," pp. 1–26, 2025.
- [13] H. Maizir, "Peningkatan Kepadatan dan Daya Dukung Tanah dengan Pencampuran Tanah Lempung dan Pasir," vol. 31, no. 3, pp. 267–274, 2024, doi: 10.5614/jts.2024.31.3.4.
- [14] R. Abdillah, F. Marisa, and D. Purnomo, "Sistem Klasifikasi Kualitas Batu Boulder Berdasarkan Tekstur Berbasis Pengolahan Citra Digital," vol. 1, no. 1, pp. 40–44, 2016.
- [15] M. R. Fatriady, M. R. Rachman, M. Jamal, I. W. Muliawan, W. Mustika, and D. S. S. Mabui, *Teknologi Bangunan dan Material*. Tohar Media, 2022.
- [16] H. FITRIANTO, "Analisis Penanganan Konstruksi Jalan Di Atas Tanah Lunak," 2025, *Universitas Narotama*.
- [17] P. Polaczyk, Y. Ma, R. Xiao, W. Hu, X. Jiang, and B. Huang, "Characterization of aggregate interlocking in hot mix asphalt by mechanistic performance tests," 2021, doi: 10.1080/14680629.2021.1908408.
- [18] R. Sandi, "Analisis Pengaruh Boulder Terhadap Kadar Nikel dan Basicity Nikel Pada Penambangan Nikel Laterit Menggunakan Mesin X-Ray di Provinsi Sulawesi Tengah," vol. 25, pp. 451–458, 2025, doi: 10.35965/eco.v25i2.6748.
- [19] P. Li, J. Fu, L. Sun, J. Yue, and Q. Zang, "Analysis of Rutting Formation Mechanisms and Influencing Factors in Asphalt Pavements Under Slow-Moving Heavy Loads," no. 1, pp. 1–20, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/ma18174153>.
- [20] A. I. State and I. State, "Production And Uses Of Crushed Rock Aggregates : An Overview," vol. 5, no. 8, pp. 92–110, 2019.
- [21] L. K. Lahamge, K. A. Sanjay, and P. S. Manoj, "Revolutionizing Construction : Roller- Compacted Concrete," vol. 9, pp. 217–230, 2024.