



EVALUASI KEKAKUAN DAN STABILITAS HAULING ROAD BERDASARKAN MODULUS DEFORMASI TANAH HASIL REPETITIVE STATIC PLATE LOAD TEST

EVALUATION OF HAULING ROAD STIFFNESS AND STABILITY BASED ON SOIL DEFORMATION MODULUS FROM REPETITIVE STATIC PLATE LOAD TEST

Heri Khoeri^{1*}, Dini Sofiana² dan Panji Nugroho³

¹ Program Pasca Sarjana Magister Teknik, Universitas Tama Jagakarsa, Jakarta

² Program Pasca Sarjana Magister Teknik, Universitas Indonesia

³ PT. Hesa Laras Cemerlang, <https://hesa.co.id>

Abstrak

Kinerja struktural *hauling road* ditentukan oleh kekakuan dan stabilitas tanah dasar akibat beban berat berulang. Evaluasi lapangan umumnya dilakukan menggunakan *repetitive static plate load test* dengan modulus deformasi siklus pembebanan lanjutan sebagai dasar pemenuhan kriteria desain, meskipun pendekatan satu parameter belum sepenuhnya menggambarkan kondisi awal dan evolusi kekakuan tanah dasar. Penelitian ini mengevaluasi kinerja subgrade *hauling road* menggunakan *repetitive static plate load test* pada beberapa titik uji yang mewakili berbagai jalur operasional. Analisis difokuskan pada respons pembebanan siklus awal dan lanjutan serta rasio peningkatan kekakuan sebagai indikator stabilisasi tanah. Hasil menunjukkan bahwa sebagian besar titik uji memenuhi modulus minimum desain, namun didominasi oleh rasio peningkatan kekakuan yang tinggi, yang mengindikasikan sensitivitas subgrade terhadap pembebanan awal. Titik yang tidak memenuhi kriteria desain berkorelasi dengan kekakuan awal yang rendah dan dominasi deformasi plastis. Temuan ini menegaskan bahwa evaluasi kinerja subgrade *hauling road* akan lebih komprehensif apabila pemenuhan kriteria desain dikombinasikan dengan analisis perilaku tanah akibat pembebanan berulang untuk mendukung pengendalian mutu dan strategi perbaikan yang lebih efektif dan berkelanjutan.

Kata Kunci: deformasi, *haulingroad*, modulus, subgrade, stabilitas

Abstract

The structural performance of hauling roads is strongly influenced by the stiffness and stability of the subgrade under repetitive heavy loads from haulage vehicles. Field evaluation is commonly conducted using repetitive static plate load tests, with the deformation modulus obtained from the subsequent loading cycle used as the basis for meeting design criteria. However, evaluations based on a single parameter do not fully represent the initial condition of the subgrade or the mechanisms of stiffness enhancement induced by loading. This study evaluates hauling road subgrade performance using repetitive static plate load tests at several test locations representing different operational lanes. The analysis focuses on the subgrade response during the initial and subsequent loading cycles, as well as the stiffness increment ratio as an indicator of soil stabilization. The test results show that most locations satisfy the minimum design deformation modulus; however, the responses are predominantly characterized by high stiffness increment ratios, indicating that the initial subgrade condition remains sensitive to early-stage loading. Test locations that fail to meet the design criteria consistently exhibit low initial stiffness and a dominance of plastic deformation during the early loading stage. These findings confirm that a more comprehensive evaluation of hauling road subgrade performance can be achieved by combining compliance with design criteria and an analysis of soil behavior under repetitive loading, thereby supporting more effective and sustainable quality control and subgrade improvement strategies.

Keywords: deformation, *haulingroad*, modulus, subgrade, stability

PENDAHULUAN

Hauling road pada area pertambangan menerima beban gandar yang sangat besar dengan jumlah repetisi tinggi, sehingga respons deformasi tanah dasar menjadi faktor kunci dalam menentukan kinerja dan umur layanan jalan tambang. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kegagalan *hauling road* umumnya didominasi oleh deformasi permanen

tanah dasar akibat kekakuan yang tidak memadai, terutama pada jalur kendaraan berat (Thompson & Robnett, 2015), (Dawson & Kolisoja, 2016).

Metode evaluasi konvensional seperti *California Bearing Ratio (CBR)* dan *Dynamic Cone Penetrometer (DCP)* masih banyak digunakan karena kemudahan pelaksanaan, namun parameter yang diperoleh bersifat tidak

(*)Corresponding author

Telp : 08158255374

E-mail : heri.khoeri@umj.ac.id, <https://hesa.co.id>

<http://doi.org/10.33506/rb.v12i01.5359>

Received 24 Januari 2026; Accepted 31 Maret 2026; Available online 30 April 2026

E-ISSN: 2614-4344 P-ISSN: 2476-8928

langsung dan bergantung pada korelasi empiris yang sering kali tidak merepresentasikan kondisi tegangan aktual di lapangan (Rahman, 2017), (Livneh & Goldberg, 2016). Studi terbaru menunjukkan bahwa pendekatan berbasis modulus elastisitas lebih representatif untuk analisis mekanistik perkerasan dibandingkan parameter berbasis kekuatan semata (Luo & Prozzi, 2018), (Khoeri et al., 2024)

Static plate load test merupakan metode uji lapangan yang mampu merepresentasikan respons tegangan–regangan tanah dasar secara langsung. Penggunaan *repetitive static plate load test* dengan evaluasi modulus elastisitas siklus kedua (Ev_2) telah direkomendasikan sebagai indikator kekakuan tanah yang telah mengalami stabilisasi akibat pembebanan berulang (Werkmeister et al., 2001), (Arshad, 2019). Namun, aplikasi dan dokumentasi ilmiah metode ini pada *hauling road* pertambangan di Indonesia masih terbatas, sehingga diperlukan kajian berbasis data lapangan aktual.

TINJAUAN PUSTAKA

Kekakuan tanah dasar merupakan parameter fundamental dalam analisis mekanistik perkerasan, yang umumnya direpresentasikan oleh modulus elastisitas (Ev atau Es). Modulus ini menggambarkan hubungan antara tegangan dan regangan pada kondisi kerja tertentu dan bersifat nonlinier terhadap tingkat pembebanan (Huang, 2004).

Penelitian eksperimental menunjukkan bahwa nilai modulus tanah dasar cenderung meningkat setelah siklus pembebanan awal akibat densifikasi dan redistribusi struktur butiran tanah (Lekarp et al., 2000). Oleh karena itu, penggunaan modulus dari siklus pembebanan kedua (Ev_2) dianggap lebih stabil dan representatif dibandingkan Ev_1 yang masih dipengaruhi deformasi plastis awal (Wang, 2020).

ASTM D1195 merekomendasikan *repetitive static plate load test* untuk evaluasi perkerasan jalan dan bandara, dengan fokus pada hubungan beban–lendutan sebagai dasar perhitungan modulus elastisitas (ASTM D1195/D1195M-21, 2021). Beberapa studi menunjukkan bahwa Ev_2 memiliki korelasi yang lebih baik terhadap kinerja jangka panjang perkerasan dibandingkan

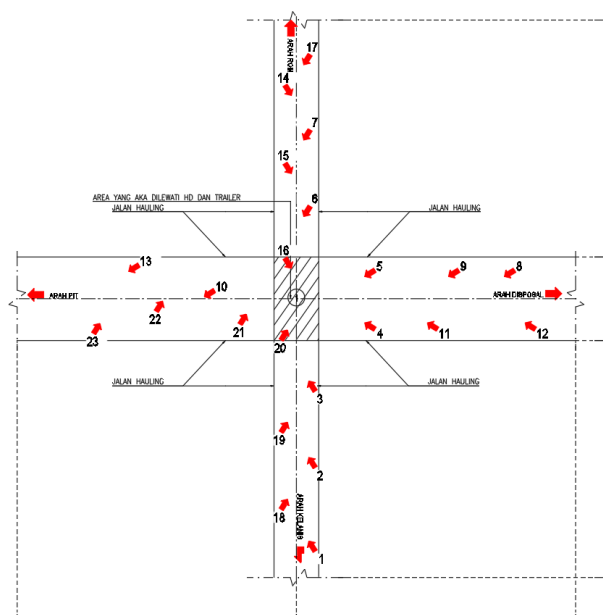
parameter empiris seperti *CBR* (Kim, 2017), (Choudhary, 2021).

Pada jalan tambang, penggunaan Ev_2 sebagai kriteria penerimaan semakin relevan karena beban operasional bersifat berat dan berulang. Nilai Ev_2 yang rendah berimplikasi pada peningkatan regangan tarik dan tekan pada lapisan perkerasan di atasnya, yang dapat mempercepat terjadinya *rutting* dan kerusakan struktural (Chen, 2022).

Variabilitas spasial tanah dasar merupakan fenomena umum yang dipengaruhi oleh kondisi geologi, kadar air, metode pemadatan, dan kualitas pelaksanaan lapangan. Penelitian terbaru menegaskan bahwa asumsi homogenitas tanah dasar sering kali menyebabkan ketidakakuratan dalam evaluasi kinerja perkerasan (Uthus, 2018). Oleh karena itu, pendekatan berbasis pengujian titik-per-titik (*point-based evaluation*) sangat dianjurkan untuk infrastruktur dengan tingkat risiko tinggi seperti *hauling road* tambang (Siripun & Puppala, 2023).

METODE

Metode *repetitive static plate load test* yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada ASTM D1195, yang secara luas telah diaplikasikan dalam evaluasi perkerasan jalan raya dan bandara (ASTM D1195/D1195M-21, 2021). Lokasi pengujian seperti pada **Gambar 1**.



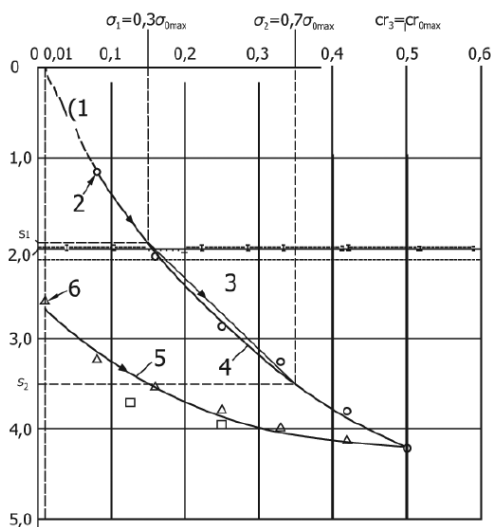
Gambar 1. Sebaran titik pengujian

Counterweight kemudian diposisikan sejajar dengan pusat pelat untuk menahan reaksi beban hidrolis. Pelat baja berdiameter 300 mm dipasang pada pusat lokasi uji, diikuti pemasangan dongkrak hidrolis dan *load cell* dengan kapasitas yang memadai. Tiga unit LVDT dipasang pada posisi radial dengan jarak sudut 120° pada rangka baja yang ditempatkan minimal 2,4 m dari pusat pelat. Sketsa pemasangan peralatan seperti pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Konfigurasi peralatan *static plate load test*

Pembebanan dilakukan secara bertahap hingga tekanan maksimum 500 kPa untuk mensimulasikan tegangan kerja hauling road tambang (Khoeri et al., 2024). Penggunaan dua siklus pembebanan bertujuan untuk memisahkan respon deformasi plastis awal dan respons elastis stabil, sehingga nilai E_{v2} yang diperoleh dapat digunakan sebagai parameter evaluasi utama (Lekarp et al., 2000), (Wang, 2020).



Gambar 3. Grafik beban-lendutan

Pendekatan regresi polinomial orde dua pada kurva beban–lendutan dipilih karena mampu menangkap perilaku nonlinier tanah dasar pada rentang tegangan menengah hingga tinggi, sebagaimana direkomendasikan dalam studi eksperimental tanah granular dan tanah kohesif berbutir kasar (Huang, 2004), (Chen, 2022). Contoh grafik beban-lendutan dapat dilihat pada gambar berikut:

Perhitungan modulus elastisitas, E_v dari siklus pertama dan siklus kedua harus berdasarkan kurva beban-lendutan. Perhitungan modulus ini akan menggunakan rumus polinomial derajat kedua sesuai persamaan berikut:

$$s = a_0 + a_1 \cdot \sigma_0 + a_2 \cdot \sigma_0^2 \tag{1}$$

dengan:

σ_0 = tegangan normal rata-rata di bawah pelat (MPa)

s = lendutan dari hasil uji (mm)

a_0 = konstanta dari polinomial derajat kedua (mm)

a_1 = konstanta dari polinomial derajat kedua (mm/MPa)

a_2 = konstanta dari polinomial derajat kedua (mm/MPa)²

Untuk mendapatkan nilai konstanta dari polinomial, maka persamaan berikut dapat digunakan:

$$a_0 \cdot n + a_1 \sum_{i=1}^n \sigma_{0i} + a_2 \sum_{i=1}^n \sigma_{0i}^2 = \sum_{i=1}^n s_i$$

$$a_0 \sum_{i=1}^n \sigma_{0i} + a_1 \sum_{i=1}^n \sigma_{0i}^2 + a_2 \sum_{i=1}^n \sigma_{0i}^3 = \sum_{i=1}^n s_i \cdot \sigma_{0i} \tag{2}$$

$$a_0 \sum_{i=1}^n \sigma_{0i}^2 + a_1 \sum_{i=1}^n \sigma_{0i}^3 + a_2 \sum_{i=1}^n \sigma_{0i}^4 = \sum_{i=1}^n s_i \cdot \sigma_{0i}^2$$

Setelah nilai konstanta didapatkan, maka nilai modulus elastisitas dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$E_v = 1.5 \cdot r \cdot \frac{1}{a_1 + a_2 \cdot \sigma_{0max}} \tag{3}$$

di mana:

$E\nu$ = modulus regangan (MPa)

r = jari-jari pelat

σ_{0max} = tegangan normal maksimum rata-rata di bawah pelat pada siklus pembebanan pertama (MPa)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil pengujian pada 23 titik, nilai $E\nu_2$ yang diperoleh berada pada rentang 111 MPa hingga 295 MPa seperti ditunjukkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Ringkasan Hasil $E\nu_1$ dan $E\nu_2$

| No | Lokasi | $E\nu_1$ (MPa) | $E\nu_2$ (MPa) Uji | Design | $E\nu_2 >$ 90% Desain |
|----|---------------|-------------------|-----------------------|--------|--------------------------|
| 1 | Jalur Trailer | 92.1 | 231.2 | 110 | OK |
| 2 | Jalur Trailer | 116.9 | 192.7 | 110 | OK |
| 3 | Jalur Trailer | 85.2 | 294.9 | 110 | OK |
| 4 | Jalur HD | 22.5 | 144.0 | 160 | OK |
| 5 | Jalur HD | 37.8 | 141.0 | 160 | OK |
| 6 | Jalur Trailer | 48.8 | 229.2 | 110 | OK |
| 7 | Jalur Trailer | 46.7 | 169.0 | 110 | OK |
| 8 | Jalur HD | 38.1 | 150.3 | 160 | OK |
| 9 | Jalur HD | 80.4 | 220.1 | 160 | OK |
| 10 | Jalur HD | 110.0 | 177.8 | 160 | OK |
| 11 | Jalur HD | 45.2 | 165.3 | 160 | OK |
| 12 | Jalur HD | 44.9 | 167.9 | 160 | OK |
| 13 | Jalur HD | 81.2 | 230.9 | 160 | OK |
| 14 | Jalur Trailer | 34.9 | 111.5 | 110 | OK |
| 15 | Jalur Trailer | 43.4 | 138.1 | 110 | OK |
| 16 | Area Crossing | 59.5 | 149.6 | 160 | OK |
| 17 | Jalur Trailer | 58.3 | 132.8 | 110 | OK |
| 18 | Jalur Trailer | 42.4 | 127.4 | 110 | OK |
| 19 | Jalur Trailer | 70.8 | 174.6 | 110 | OK |
| 20 | Area Crossing | 88.3 | 203.7 | 160 | OK |
| 21 | Jalur HD | 38.5 | 131.3 | 160 | NOT OK |
| 22 | Jalur HD | 58.5 | 208.3 | 160 | OK |
| 23 | Jalur HD | 40.2 | 125.1 | 160 | NOT OK |

Sebagian besar titik uji memenuhi nilai $E\nu_2$ rencana yang ditetapkan oleh perencana *geocell*. Namun, dua titik pada jalur *HD* arah *PIT* menunjukkan nilai $E\nu_2$ masing-masing sebesar 131 MPa dan 125 MPa, lebih rendah dari nilai minimum yang dipersyaratkan yaitu 140,8 MPa.

Perbedaan nilai $E\nu_2$ antar titik menunjukkan adanya variabilitas kekakuan tanah dasar yang signifikan. Jalur trailer cenderung memiliki nilai $E\nu_2$ lebih tinggi dibandingkan jalur *HD*, yang mengindikasikan perbedaan tingkat pemadatan,

kondisi kadar air, atau respons tanah terhadap beban berulang.

Meskipun perkuatan *geocell* dan spesifikasi konstruksi diterapkan secara seragam, hasil ini menunjukkan bahwa kualitas pelaksanaan lapangan dan kondisi lokal tanah dasar sangat berpengaruh terhadap kinerja struktural *hauling road*.

Modulus $E\nu_1$ yang diperoleh dari siklus pembebanan pertama pada *repetitive static plate load test* merepresentasikan respons awal tanah dasar terhadap beban statis. Pada tahap ini, perilaku tanah masih sangat dipengaruhi oleh deformasi plastis awal, redistribusi butiran, serta kondisi kadar air dan kepadatan aktual di lapangan. Oleh karena itu, nilai $E\nu_1$ umumnya lebih rendah dan menunjukkan variasi yang lebih besar dibandingkan $E\nu_2$, terutama pada tanah granular yang belum terpadatkan secara optimal atau tanah yang sensitif terhadap kadar air.

Meskipun $E\nu_1$ tidak digunakan sebagai parameter utama penerimaan kinerja tanah dasar, nilai ini memiliki peran penting sebagai indikator kondisi awal subgrade dan potensi perbaikannya. Nilai $E\nu_1$ yang relatif rendah menunjukkan bahwa tanah dasar masih mengalami deformasi signifikan pada pembebanan awal, yang dapat diinterpretasikan sebagai indikasi kepadatan yang belum memadai, kadar air yang tidak optimum, atau kombinasi keduanya. Sebaliknya, nilai $E\nu_1$ yang relatif tinggi mengindikasikan bahwa tanah telah memiliki struktur yang cukup stabil sejak awal pembebanan.

Dalam konteks evaluasi berbasis rasio $E\nu_2/E\nu_1$, $E\nu_1$ berfungsi sebagai pembagi yang menentukan besarnya peningkatan kekakuan akibat pembebanan ulang. Rasio $E\nu_2/E\nu_1$ yang tinggi umumnya berkorelasi dengan nilai $E\nu_1$ yang rendah, yang menandakan dominasi deformasi plastis pada siklus pertama. Kondisi ini menunjukkan bahwa tanah dasar masih sangat responsif terhadap pemadatan tambahan atau pengkondisian kadar air, sehingga tindakan perbaikan seperti *re-compaction* berpotensi memberikan peningkatan kekakuan yang signifikan.

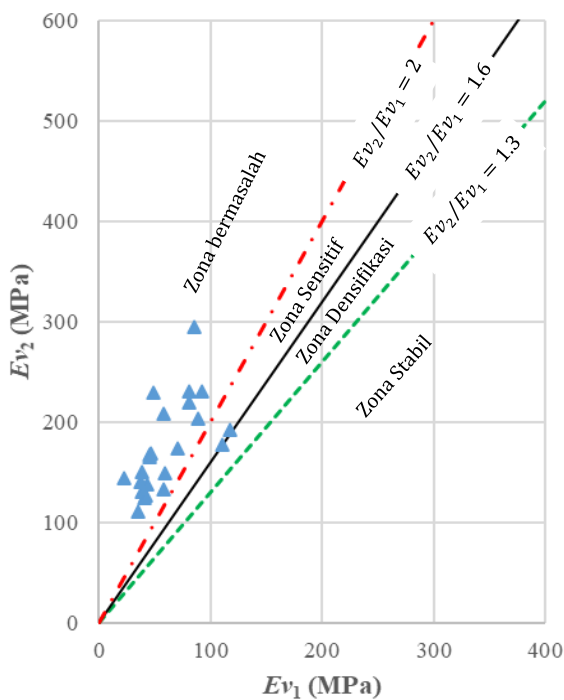
Namun demikian, kondisi di mana $E\nu_1$ rendah dan $E\nu_2$ tetap rendah setelah siklus pembebanan kedua mengindikasikan bahwa permasalahan

tanah dasar bersifat intrinsik, seperti sifat material yang lemah atau kejenuhan air yang tinggi. Pada kasus ini, tindakan pemadatan ulang saja umumnya tidak cukup, dan diperlukan intervensi lanjutan seperti penggantian material, penambahan lapisan granular (*capping*), atau stabilisasi kimia.

Dengan demikian, penilaian Ev_1 tidak dimaksudkan sebagai kriteria kelulusan, melainkan sebagai parameter diagnostik untuk memahami perilaku awal tanah dasar dan menentukan strategi perbaikan yang paling efektif. Kombinasi evaluasi Ev_1 , Ev_2 , serta rasio Ev_2/Ev_1 memberikan kerangka penilaian yang lebih komprehensif dalam mengevaluasi kualitas *subgrade hauling road* dibandingkan penggunaan satu parameter tunggal.

Tabel 2. Klasifikasi Kualitas *Subgrade* berdasarkan Rasio Ev_2/Ev_1

| Rasio Ev_2/Ev_1 | Klasifikasi Zona | Karakteristik Mekanistik | Implikasi Teknis |
|-------------------|------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| $\leq 1,3$ | Zona Stabil | Tanah sudah padat sejak awal | Cukup QC rutin |
| 1,3 – 1,6 | Zona Densifikasi | Densifikasi terjadi saat siklus 1 | Re-compaction efektif |
| 1,6 – 2,0 | Zona Sensitif | Tanah awal kurang stabil | Perlu moisture control |
| $> 2,0$ | Zona Bermasalah | Tanah sangat lunak/basah | Replacement/stabilisasi |



Gambar 4. Grafik Klasifikasi Kualitas *Subgrade* berdasarkan Rasio Ev_2/Ev_1

Berbagai panduan teknis dan studi eksperimental menunjukkan bahwa rasio Ev_2/Ev_1 dapat digunakan sebagai indikator kualitas pemadatan atau stabilisasi tanah, dimana nilai rasio yang lebih rendah umumnya menunjukkan kondisi yang lebih stabil sejak siklus pembebanan awal, sedangkan rasio yang lebih tinggi menunjukkan tanah yang masih mengalami deformasi plastis awal yang signifikan. Klasifikasi yang digunakan dalam **Tabel 2** dan **Gambar 4** merupakan interpretasi praktis berdasarkan rentang rasio yang umum dipakai dalam evaluasi uji pelat statis.

Nilai Ev_2 yang rendah berpotensi meningkatkan tegangan yang diteruskan ke lapisan perkerasan di atasnya, sehingga dapat mempercepat terjadinya deformasi permanen seperti alur (*rutting*). Oleh karena itu, tindakan perbaikan yang direkomendasikan lebih dipilih pemadatan ulang secara lokal pada area yang tidak memenuhi persyaratan, dibandingkan perbaikan menyeluruh yang kurang efisien.

Hubungan antara Ev_1 dan Ev_2 telah diakui secara luas dalam pengujian *repetitive static plate load*, di mana Ev_1 merepresentasikan respons awal tanah yang masih dipengaruhi deformasi plastis, sedangkan Ev_2 mencerminkan respons yang lebih stabil setelah densifikasi akibat pembebanan awal. Beberapa standar dan penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa peningkatan modulus dari siklus pertama ke siklus berikutnya dapat digunakan sebagai indikator kualitas pemadatan dan sensitivitas tanah terhadap pembebanan berulang. Rasio Ev_2/Ev_1 dengan demikian dapat diperlakukan sebagai parameter indikator untuk mengevaluasi tingkat stabilisasi tanah dasar, meskipun tidak ditetapkan sebagai nilai baku tunggal dalam standar ASTM (ASTM D1195/D1195M-21, 2021), (Werkmeister et al., 2001) et al., 2015; (Choudhary, 2021).

Dari perhitungan target respons $\sigma = 0,5$ MPa, Titik 21 memerlukan pengurangan lendutan 0,06 mm untuk memenuhi Ev_2 minimum dan sekitar 0,15 mm untuk mendekati Ev_2 desain. Sementara Titik 23 memerlukan pengurangan lendutan sekitar 0,10 mm (minimum) hingga 0,20 mm (desain). Target pengurangan lendutan ini dapat dicapai melalui pemadatan ulang terkontrol

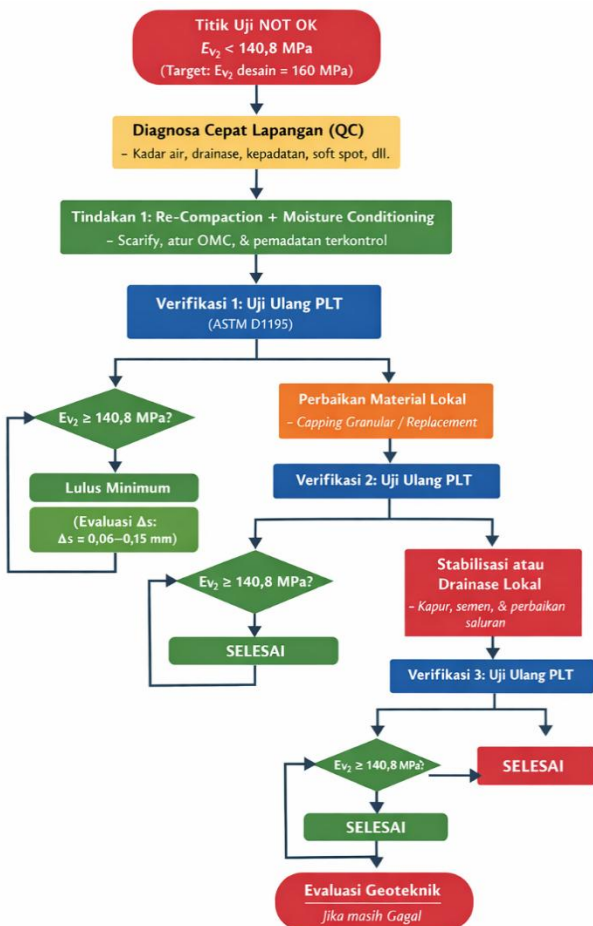
dengan pengkondisian kadar air, dan apabila hasil uji ulang masih belum memenuhi, dapat dilakukan perbaikan material secara lokal melalui penggantian/capping granular atau stabilisasi, disertai peningkatan drainase lokal pada jalur *HD*. Parameter perbaikan seperti pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Parameter untuk perbaikan

| Titik | E_{v2} Eksisting (MPa) | E_{v2} Target Desain (MPa) | $s(0,5)$ Eksisting (mm) | $s(0,5)$ Target untuk Min (mm) | Δs Target untuk Min (mm) | $s(0,5)$ Target Desain (mm) | Δs Target untuk Desain (mm) |
|-------|--------------------------|------------------------------|-------------------------|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| 21 | 131,251 | 160 | 3,076 | 3,018 | 0.058 | 2,922 | 0.154 |
| 23 | 125,081 | 160 | 2,917 | 2,817 | 0.1 | 2,721 | 0.196 |

Keterangan:

1. $s(0,5)$ adalah lendutan (*settlement*) pada tegangan $\sigma = 0,5$ MPa dari polinomial siklus ke-2: $s = a_0 + a_1\sigma + a_2\sigma^2$.
2. Target $s(0,5)$ dihitung dengan asumsi komponen kelenturan ($a_1 + a_2\sigma$) berbanding terbalik terhadap E_v , sementara a_0 dianggap tetap (aproksimasi konservatif untuk menentukan target penurunan lendutan).
3. Δs adalah pengurangan lendutan yang dibutuhkan pada $\sigma = 0,5$ MPa agar E_{v2} naik ke target.



Gambar 5. Usulan Diagram Alir Perbaikan

Untuk meningkatkan nilai E_{v2} pada titik yang tidak memenuhi persyaratan, tindakan perbaikan direkomendasikan dilakukan secara bertahap dan berbasis verifikasi. Tahap awal adalah pemadatan ulang terkontrol yang disertai pengkondisian kadar air mendekati kondisi optimum. Apabila nilai E_{v2} hasil uji ulang masih di bawah batas minimum, dilakukan perbaikan material secara lokal melalui penggantian atau penambahan lapisan granular (*capping*). Untuk lokasi yang sensitif terhadap kadar air atau menunjukkan indikasi subgrade intrinsik lemah, stabilisasi (misalnya kapur/semen) serta peningkatan drainase lokal direkomendasikan. Setiap tahap perbaikan wajib diverifikasi melalui uji ulang PLT untuk memastikan peningkatan E_{v2} telah memenuhi kriteria penerimaan.

Diagram alir perbaikan (**Gambar 5**) disusun untuk memastikan peningkatan E_{v2} dilakukan secara bertahap dan terverifikasi. Tahap awal difokuskan pada *re-compaction* dengan pengkondisian kadar air untuk menurunkan deformasi pada level tegangan tinggi. Apabila hasil uji ulang masih di bawah E_{v2} minimum, dilakukan perbaikan material lokal melalui *capping* atau penggantian granular layer. Untuk kondisi *subgrade* yang intrinsik lemah atau sensitif air, stabilisasi dan peningkatan drainase lokal menjadi opsi lanjutan. Setiap tahap wajib divalidasi melalui uji ulang PLT sehingga keputusan perbaikan berbasis bukti (*evidence-based maintenance*) dan efisien secara biaya.

KESIMPULAN

Evaluasi subgrade hauling road menggunakan *repetitive static plate load test* menunjukkan bahwa pemenuhan kriteria desain berbasis modulus elastisitas tidak selalu mencerminkan kondisi awal tanah dasar yang stabil. Titik-titik yang gagal memenuhi standar desain berkorelasi dengan kondisi awal subgrade yang lemah dan dominasi deformasi plastis pada tahap awal pembebanan, sementara pada titik-titik yang memenuhi standar desain, kestabilan *subgrade* lebih banyak dicapai melalui proses pembebanan awal daripada kondisi tanah yang telah optimal sejak awal. Oleh karena itu, evaluasi kinerja subgrade hauling road perlu mengombinasikan pemenuhan standar desain dengan analisis perilaku tanah akibat pembebanan berulang agar

diperoleh gambaran kinerja yang lebih komprehensif dan berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada PT. Hesa Laras Cemerlang, <https://hesa.co.id>, yang mendukung penuh penelitian ini.

REFERENSI

- Arshad, M. , et al. (2019). Evaluation of subgrade stiffness using plate load tests. *Soils and Foundations*.
- ASTM D1195/D1195M-21. (2021). *Standard Test Method for Repetitive Static Plate Load Tests of Soils*. ASTM International.
- Chen, D. , et al. (2022). Rutting mechanism in heavy-duty pavements. *International Journal of Pavement Engineering*.
- Choudhary, J. , et al. (2021). Correlation between plate load modulus and pavement performance. *Construction and Building Materials*.
- Dawson, A., & Kolisoja, P. (2016). Heavy vehicle effects on unbound pavement layers. *International Journal of Pavement Engineering*.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design* (Issue v. 1). Pearson/Prentice Hall. <https://books.google.co.id/books?id=hURIQgAACAAJ>
- Khoeri, H., Sofiana, D., Nugroho, P., & Muthohari, R. F. (2024). Operational Dynamic Load Testing for Repair Recommendations, Case Study of Access Road to Vehicle Weight in Motion. *Jurnal Ilmiah Dinamika Rekayasa*, 20(2), 173–182.
- Kim, Y. R. , et al. (2017). Comparison of E_{v2} and resilient modulus for pavement design. *Transportation Research Record*.
- Lekarp, F., Isacsson, U., & Dawson, A. (2000). State of the Art. I: Resilient Response of Unbound Aggregates. *Journal of Transportation Engineering*, 126(1), 66–75. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2000\)126:1\(66\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2000)126:1(66))
- Livneh, M., & Goldberg, Y. (2016). Quality assessment of in-situ CBR and DCP tests. *Journal of Transportation Engineering*.
- Luo, R., & Prozzi, J. A. (2018). Mechanistic-based evaluation of pavement foundations. *Construction and Building Materials*.
- Rahman, M. M. , et al. (2017). Limitations of CBR-based pavement evaluation. *Road Materials and Pavement Design*.
- Siripun, K., & Puppala, A. J. (2023). Risk-based subgrade evaluation for heavy haul roads. *Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Thompson, M. R., & Robnett, Q. L. (2015). Principles of pavement structural evaluation. *Transportation Research Record*.
- Uthus, L. , et al. (2018). Spatial variability of subgrade stiffness. *Engineering Geology*.
- Wang, H. , et al. (2020). Effect of repeated loading on subgrade modulus. *International Journal of Pavement Engineering*.
- Werkmeister, S., Dawson, A., & Wellner, F. (2001). Permanent Deformation Behavior of Granular Materials and the Shakedown Concept. *Transportation Research Record*, 1757, 75–81. <https://doi.org/10.3141/1757-09>