



Stabilisasi Subbase Agregat Eksisting Jalan Hauling PT. Servo Lintas Raya Menggunakan Sistem *Hybrid Semen–Polyroads (Soiltech Mk-II)* Terhadap Peningkatan Nilai CBR

BE. Dwi Anggoro Winardi¹, Aprizal², Dadang Iskandar^{3,4}, M. Aldair Sila⁵, M. Fatwa Putro Sampurna⁶

¹Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Bandar Lampung, Indonesia, bedwianggorowinardi@gmail.com

²Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Bandar Lampung, Indonesia, aprizal@ubl.ac.id

³Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Bandar Lampung, Indonesia, dadangiskandar@rocketmail.com

⁴Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Metro, Indonesia, dadangiskandar@rocketmail.com

⁵Program Studi Teknik Sipil, Universitas Lampung, Indonesia, Muhamadaldair@gmail.com

⁶Program Studi Teknik Sipil, Universitas Lampung, Indonesia, fatwaputra@icloud.com

Corresponding Author: bedwianggorowinardi@gmail.com¹

Abstract: *This study evaluates early-strength improvement of a haul-road subbase by stabilizing Class A aggregate with a hybrid system of cement and Soiltech MK-II, emphasizing 0–4 day performance and moisture resistance. Laboratory testing used CBR under cement contents of 0%, 1%, and 3% and Soiltech dosages of 0%, 0.60%, and 0.75% (by dry mass), at curing ages of 0 h, 1 day, 3 days, and 4 days, and three curing conditions: direct sun drying, ambient room curing, and soaked (water-saturated) curing. A total of 108 observations were obtained. To provide additional quantitative evidence for the optimal composition within the tested ranges, a multivariate multiple linear regression was fitted using curing age, cement content, Soiltech dosage, and curing condition as predictors of CBR. The model was significant ($F=152.088$; $p<0.001$) with strong fit ($R=0.925$; $R^2=0.855$; adjusted $R^2=0.850$). Standardized coefficients indicate cement as the most influential factor ($\beta=0.764$), followed by curing age ($\beta=0.391$) and Soiltech dosage ($\beta=0.223$), while curing condition shows a negative effect associated with increasing moisture severity ($\beta=-0.262$). Experimentally, increasing cement and Soiltech increased CBR and improved stability under saturation. The optimal mixture was 3% cement and 0.75% Soiltech, selected for field trial. On a 25 m × 5 m × 0.20 m section, LWD results showed E_{vd} increasing from ~50.9 MPa (0 h) to ~171.5 MPa (20 h), with equivalent CBR rising from ~72.96% to ~151.65%. The 7-day UCS of ~29.43 kg/cm² met the acceptance criterion, confirming the practical effectiveness of cement–polymer stabilization for rapid subbase capacity improvement and field verification. Material quantities were computed for laboratory molds and field volume.*

Keywords: *Aggregate Subbase, CBR, Cement, Hauling Road, Hybrid Stabilization, Soiltech MK-II.*

Abstrak: Penelitian ini mengevaluasi peningkatan daya dukung lapis pondasi bawah (subbase) jalan hauling melalui stabilisasi material agregat kelas A menggunakan kombinasi semen dan Soiltech MK-II, dengan fokus pada kekuatan dini (0–4 hari) dan ketahanan terhadap kondisi basah. Pengujian laboratorium menggunakan uji CBR pada variasi kadar semen 0%, 1%, dan 3% serta dosis Soiltech 0%, 0,60%, dan 0,75% (terhadap massa kering), pada umur curing 0 jam, 1 hari, 3 hari, dan 4 hari, dengan tiga kondisi curing: jemur terik matahari, suhu ruang, dan rendam (jenuh air). Total diperoleh 108 data pengamatan. Untuk memperkuat penentuan komposisi optimum, dilakukan analisis multivariat dengan regresi linier berganda. Model signifikan ($F=152,088$; $p<0,001$) dengan $R=0,925$ dan $R^2=0,855$ (Adjusted $R^2=0,850$). Koefisien beta terstandar menunjukkan faktor dominan adalah kadar semen ($\beta=0,764$), diikuti umur curing ($\beta=0,391$), dosis Soiltech ($\beta=0,223$), sedangkan kondisi curing berpengaruh negatif ($\beta=-0,262$). Secara eksperimental, kenaikan semen dan Soiltech meningkatkan CBR dan menjaga stabilitas pada kondisi jenuh air. Komposisi optimum dalam rentang variasi penelitian adalah semen 3% dan Soiltech 0,75%, yang dipilih untuk trial lapangan. Pada segmen $25\text{ m} \times 5\text{ m} \times 0,20\text{ m}$, uji LWD menunjukkan Evd meningkat dari $\pm 50,9\text{ MPa}$ (0 jam) menjadi $\pm 171,5\text{ MPa}$ (20 jam), dengan CBR ekuivalen naik dari $\pm 72,96\%$ menjadi $\pm 151,65\%$. Uji UCS 7 hari sebesar $\pm 29,43\text{ kg/cm}^2$ memenuhi kriteria penerimaan. Hasil penelitian menegaskan efektivitas stabilisasi semen-polimer untuk percepatan peningkatan daya dukung subbase dan verifikasi kinerja lapangan. Selain itu, perhitungan kebutuhan bahan dilakukan pada skala laboratorium (mould $\text{Ø}15 \times 30\text{ cm}$, 13 kg/mould) dan skala lapangan berdasarkan volume lapisan serta MDD $2,060\text{ kg/m}^3$, sehingga rancangan campuran dapat direplikasi secara praktis pada pelaksanaan dan mutu.

Kata Kunci: CBR, Jalan Hauling, Semen, Soiltech MK-II, Subbase Agregat, Stabilisasi Hybrid.

PENDAHULUAN

Jalan hauling merupakan prasarana vital dalam kegiatan pertambangan batubara karena berfungsi sebagai jalur utama transportasi material dari area tambang menuju fasilitas pengolahan maupun pelabuhan. Kinerja jalan hauling sangat menentukan efisiensi operasional, keselamatan kerja, serta biaya pemeliharaan alat berat. Oleh karena itu, kualitas struktur perkerasan jalan hauling harus mampu menahan beban lalu lintas berat dengan repetisi tinggi.

Pada umumnya, struktur jalan hauling dibangun menggunakan lapisan subbase berupa material agregat bergradasi kasar seperti batu split yang dipadatkan. Namun, pada kondisi lapangan, proses pemadatan sering kali tidak menghasilkan kepadatan dan ikatan antarbutir yang merata sehingga menyebabkan rendahnya daya dukung struktural lapisan. Kondisi ini tercermin dari nilai *California Bearing Ratio (CBR)* yang tidak memenuhi kriteria teknis lapisan pondasi bawah jalan hauling. Nilai CBR yang rendah mempercepat terjadinya deformasi permanen, *rutting*, dan penurunan kinerja struktural perkerasan.

Berdasarkan pengujian awal pada jalan hauling PT. Servo Lintas Raya, diperoleh nilai *CBR in situ* subbase agregat eksisting berada di bawah 60%, yang menunjukkan bahwa lapisan tersebut belum memenuhi persyaratan daya dukung minimum untuk lalu lintas alat berat pertambangan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa subbase telah mengalami degradasi mekanis akibat beban berulang dan pengaruh kelembapan, sehingga diperlukan upaya perbaikan untuk meningkatkan kapasitas dukung lapisan.

Salah satu metode perbaikan yang berkembang adalah stabilisasi menggunakan bahan aditif kimia berupa *Polyroads (Soiltech MK-II)* yang dikombinasikan dengan semen sebagai bahan pengikat. *Polyroads (Soiltech MK-II)* berfungsi meningkatkan ikatan antarbutiran

agregat serta menurunkan sensitivitas terhadap air, sedangkan semen berperan membentuk ikatan sementasi yang meningkatkan kekuatan struktural lapisan.

Berdasarkan hasil trial lapangan, kombinasi *Polyroads (Soiltech MK-II)* dan semen mampu meningkatkan nilai CBR subbase agregat eksisting hingga lebih dari 60% pada umur 24 jam. Namun demikian, peningkatan kekuatan tersebut belum dikaji secara sistematis melalui pengujian laboratorium yang terkontrol dengan variasi kadar bahan stabilisasi dan umur peram.

Tinjauan Pustaka

Jalan Hauling Tambang

Jalan hauling merupakan prasarana transportasi internal pertambangan yang berfungsi sebagai jalur utama pengangkutan material tambang menggunakan alat berat dengan beban gandar tinggi dan repetisi lalu lintas ekstrem. Menurut Thompson dan Visser (2003), tingkat degradasi struktural jalan hauling dapat mencapai 6–10 kali lebih cepat dibandingkan dengan jalan umum akibat tekanan kontak roda yang tinggi serta repetisi beban yang masif. Menurut Thompson dan Visser (2000), jalan hauling termasuk kategori ultra-heavy-duty unpaved road, di mana nilai Equivalent Standard Axle Load (ESAL) dapat mencapai $>10^6$ ESAL/tahun, jauh melampaui jalan nasional. Kondisi ini menyebabkan mekanisme kegagalan dominan berupa *shear failure* dan *fatigue shakedown*, bukan sekadar *fatigue* bending seperti pada jalan aspal umum". "Giroud & Han (2004) menjelaskan bahwa lapisan subbase merupakan lapisan kontrol deformasi pada jalan hauling, sehingga peningkatan modulus resilien dan CBR subbase berbanding lurus dengan penurunan *rutting* permanen

Subbase Agregat dan Degradasi

Subbase agregat eksisting pada jalan hauling tambang merupakan lapisan granular yang umumnya tersusun dari material batu pecah hasil *quarry* lokal, *recycled CTB/CTRB*, serta material *finer* akibat degradasi lalu lintas berat, yang secara bertahap mengalami perubahan sifat mekanik dari kondisi awal desainnya. Pada kondisi jalan hauling, subbase sering mengalami degradasi mekanis akibat beban berulang dan kondisi lingkungan yang ekstrem, yang meliputi: Crushing agregat, yaitu hancurnya butiran agregat akibat tekanan gandar tinggi sehingga ukuran butiran menjadi lebih halus, meningkatkan kandungan *finer*, dan menurunkan sudut geser internal; Loss of interlock, yaitu hilangnya mekanisme saling mengunci antar partikel akibat degradasi bentuk butir dan pengisian rongga oleh partikel halus, sehingga menurunkan kekakuan struktural lapisan; *Moisture softening*, yaitu penurunan kekuatan akibat infiltrasi air yang meningkatkan tekanan air pori dan sensitivitas terhadap deformasi; *Rutting*, yaitu deformasi permanen berbentuk alur roda akibat kegagalan geser pada subbase yang telah kehilangan interlock; Pumping, yaitu keluarnya *slurry* halus akibat tekanan roda yang memompa air pori ke permukaan yang menyebabkan *settlement* progresif.

Stabilisasi Menggunakan Semen

Semen Portland menghasilkan reaksi hidrasi senyawa C_3S dan C_2S yang membentuk gel CSH dan $Ca(OH)_2$ sebagai jembatan ikat antarpartikel agregat. Mekanisme ini meningkatkan kohesi internal, kuat tekan, dan ketahanan terhadap air, namun menghasilkan struktur yang relatif kaku dan rentan terhadap retak mikro pada kondisi lalu lintas dinamis. Reaksi hidrasi semen membentuk *Cemented Granular Material (CGM)* yang memiliki kuat tekan awal tinggi namun modulus elastisitas besar, sehingga rentan terhadap retak mikro akibat lalu lintas dinamis berat (Austroads, 2008). Hal ini menjadi dasar perlunya kombinasi dengan polimer.

Polyroads (Soiltech MK-II) sebagai Polymer Stabilizer

Polyroads (Soiltech MK-II) merupakan polimer sintesis cair yang membentuk lapisan film elastis pada permukaan agregat. Lapisan ini menutup pori mikro, meningkatkan adhesi antarpartikel, menurunkan permeabilitas, serta mengurangi sensitivitas terhadap air sehingga meningkatkan fleksibilitas struktural lapisan. “Santoni & Webster (2001) menjelaskan bahwa polimer membentuk *viscoelastic membrane* yang meningkatkan tensile strain capacity dan mengurangi pore water migration hingga 70%, sehingga efektif mencegah *pumping dan ravelling*”.

Kombinasi Semen dan *Polyroads (Soiltech MK-II)*

Kombinasi semen dan *Polyroads* membentuk sistem *hybrid rigid-flexible*, di mana semen memberikan kekuatan tekan dan *Polyroads* memberikan fleksibilitas serta ketahanan terhadap deformasi dan kelelahan (*fatigue*). Sistem ini menghasilkan lapisan subbase yang memiliki kekuatan awal tinggi, fleksibel, dan tahan terhadap pengaruh air. Sistem *hybrid* menghasilkan *quasi-flexible stabilized base (QFSB)* yang memiliki modulus sedang namun strain tolerance tinggi, sehingga sangat sesuai untuk *hauling road* yang mengalami *high dynamic load* (Yilmaz & Civelekoglu, 2009).

Konsep California Bearing Ratio (CBR)

CBR merupakan indeks daya dukung material granular berdasarkan ASTM D1883 dan SNI 1744:2012. Pada jalan hauling aktif, parameter kekuatan awal (<24 jam) menjadi krusial karena lapisan sering dibuka sebelum hidrasi semen matang. Oleh karena itu, peningkatan CBR dan Evd umur dini menjadi indikator kinerja struktural yang relevan. Menurut “Van Niekerk (2002), hubungan empiris antara Evd dan CBR dapat digunakan untuk evaluasi cepat lapangan, khususnya pada konstruksi *hauling road* yang menuntut buka lalu lintas dini (<24 jam)”.

METODE

Lokasi Penelitian

Penelitian ini merupakan studi eksperimental kuantitatif yang menggabungkan pengujian laboratorium dan validasi lapangan pada agregat subbase eksisting di jalan hauling PT. Servo Lintas Raya. Material agregat eksisting dikarakterisasi melalui uji pemadatan untuk memperoleh parameter pemadatan acuan, yaitu *Maximum Dry Density (MDD)* sebesar 2,060 g/cm³ dan *Optimum Moisture Content (OMC)* sebesar 8,4%. Seluruh benda uji dipadatkan pada kadar air mendekati OMC untuk menjaga konsistensi.

Data

Variasi campuran yang diuji di laboratorium terdiri dari kadar semen 0%, 1%, dan 3% serta dosis Soiltech MK-II sebesar 0%, 0,60%, dan 0,75% (berdasarkan massa kering). Pengujian CBR dilakukan pada umur pemeraman 0 jam, 1 hari, 3 hari, dan 4 hari, dengan tiga kondisi pemeraman:

- a. Terpapar sinar matahari langsung,
- b. Disimpan pada suhu ruang, dan
- c. Direndam (jenuh air).

Kombinasi faktor tersebut menghasilkan 108 data pengamatan (9 variasi campuran × 4 umur pemeraman × 3 kondisi). Validasi lapangan dilakukan pada segmen uji berukuran 25 m × 5 m × 0,20 m menggunakan campuran terpilih (3% semen + 0,75% Soiltech MK-II). Pengujian LWD dilakukan pada 0 jam dan sekitar 20 jam setelah pemadatan untuk memperoleh nilai Evd. Nilai Evd kemudian dikonversi menjadi CBR ekuivalen menggunakan hubungan empiris:

$$\text{CBR} = -0,0024(\text{Evd})^2 + 1,216(\text{Evd}) + 17,351$$

Pengujian *Unconfined Compressive Strength* (UCS) dilakukan pada umur 7 hari untuk campuran terpilih (n = 3).

Metode Analisis

Analisis data dilakukan menggunakan analisis deskriptif (tabel dan ringkasan pencapaian target) serta analisis regresi linier berganda sebagai verifikasi kuantitatif tambahan. Model regresi menggunakan CBR sebagai variabel dependen, dengan variabel prediktor meliputi umur pemeraman (hari), kadar semen (%), dosis Soiltech MK-II (%), dan kondisi pemeraman yang dikodekan sebagai 1 = paparan sinar matahari, 2 = suhu ruang, dan 3 = terendam. Untuk menghindari inkonsistensi perhitungan, kadar semen dan Soiltech dimasukkan dalam satuan persen (misalnya 0,75 untuk 0,75%).

Tabel 1. Desain Variasi Pengujian CBR Laboratorium

No	Faktor	Tingkatan
1	Kadar semen (% berat kering)	0; 1; 3
2	Dosis Soiltech MK-II (% berat kering)	0; 0,60; 0,75
3	Umur Pemeraman	0 jam; 1 hari; 3 hari; 4 hari
4	Kondisi Pemeraman (kode)	1 = paparan sinar matahari; 2 = suhu ruang; 3 = terendam
5	Jumlah Pengamatan	108 (9 variasi campuran × 4 umur pemeraman × 3 kondisi)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian CBR menunjukkan bahwa material eksisting memiliki kekuatan awal yang rendah dan sangat sensitif terhadap kondisi kadar air. Pada semua kondisi pemeraman, penambahan semen secara konsisten meningkatkan nilai CBR, sementara Soiltech MK-II memberikan peningkatan tambahan serta membantu menjaga stabilitas pada kondisi jenuh air. Secara umum, kombinasi hibrida menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan stabilisasi tunggal, khususnya untuk kebutuhan kekuatan awal.

Untuk merangkum kinerja kekuatan awal dan ketahanan terhadap kondisi basah, Tabel 2 menyajikan ringkasan rentang nilai CBR (minimum–maksimum) pada 0 jam dan 4 hari, serta waktu yang dibutuhkan untuk mencapai CBR ≥ 60% (kriteria minimum lapis pondasi bawah) dan CBR ≥ 100% (indikator operasional yang lebih ketat untuk lalu lintas berat) pada kondisi terburuk dari tiga kondisi pemeraman.

Tabel 2. Ringkasan Pencapaian Target CBR (0–4 Hari) pada Berbagai Campuran

Sumber: Hasil analisis penulis (ringkasan pengujian CBR laboratorium)

No	Campuran	CBR 0 jam (min–maks)	CBR 4 hari (min–maks)	Worst-case capai CBR ≥ 60%	Worst-case capai CBR ≥ 100%
1	Eksisting	25.1–32.0	33.1–57.9	Tidak tercapai ≤4 hari	Tidak tercapai ≤4 hari
2	Eksisting + Soiltech 0.6%	35.7–44.5	53.1–72.4	Tidak tercapai ≤4 hari	Tidak tercapai ≤4 hari
3	Eksisting + Soiltech 0.75%	41.0–54.0	61.8–83.6	4 hari	Tidak tercapai ≤4 hari
4	Eksisting + Semen 1%	55.0–68.0	79.6–97.5	1 hari	Tidak tercapai ≤4 hari
5	Eksisting + Semen 3%	66.8–81.5	100.7–131.4	0 jam	4 hari
6	Eksisting + Semen 1% + Soiltech 0.6%	58.4–72.4	85.1–107.9	1 hari	Tidak tercapai ≤4 hari
7	Eksisting + Semen 1% + Soiltech 0.75%	62.0–78.5	88.9–115.5	0 jam	Tidak tercapai ≤4 hari
8	Eksisting + Semen 3% + Soiltech 0.6%	71.3–88.3	109.4–140.9	0 jam	3 hari
9	Eksisting + Semen 3% + Soiltech 0.75%	76.5–95.6	116.2–149.3	0 jam	3 hari

Ringkasan tersebut menunjukkan bahwa campuran tanpa semen tidak secara konsisten memenuhi target $CBR \geq 60\%$ pada kondisi terburuk (terendam) hingga 4 hari pemeraman. Pada kadar semen 1%, penambahan Soiltech 0,75% mampu memenuhi target minimum $CBR \geq 60\%$ sejak 0 jam pada semua kondisi pemeraman, namun tidak secara konsisten mencapai $CBR \geq 100\%$ dalam waktu 4 hari. Untuk target kinerja yang lebih tinggi, campuran dengan kandungan semen 3% menunjukkan performa paling stabil, dan kombinasi hibrida 3% semen + Soiltech (0,60–0,75%) mempercepat pencapaian $CBR \geq 100\%$ pada kondisi terburuk.

Validasi lapangan terhadap campuran 3% semen + 0,75% Soiltech menunjukkan peningkatan kekakuan yang sangat cepat pada fase awal pemeraman. Tabel 3 menunjukkan bahwa nilai rata-rata Evd meningkat dari 50,9 MPa (0 jam) menjadi 171,5 MPa (20 jam), dengan CBR ekuivalen meningkat dari 72,96% menjadi 151,65%. Hasil ini menunjukkan bahwa target minimum lapangan ($CBR \geq 60\%$) telah tercapai segera setelah pemadatan, sementara target operasional ($CBR \geq 100\%$) dicapai setelah periode pemeraman awal sekitar 20–24 jam, dengan catatan kadar air dan sistem drainase dikontrol dengan baik.

Tabel 3. Hasil Pengujian LWD per Titik pada Stabilisasi Subbase (Semen 3% + Soiltech 0.75%)
 Sumber: Hasil pengujian lapangan dan perhitungan CBR ekuivalen

Umur	No Pengujian	S1 (mm)	S2 (mm)	S3 (mm)	Si (mm)	Evd (MPa)	CBR ekuivalen (%)
0 jam	35	0.419	0.409	0.381	0.403	55.8	77.73
0 jam	36	0.441	0.417	0.419	0.426	52.8	74.86
0 jam	37	0.473	0.442	0.433	0.449	50.0	72.15
0 jam	38	0.524	0.502	0.477	0.501	44.9	67.11
Rata-rata 0 jam						50.9	72.96
20 jam	42	0.128	0.123	0.121	0.124	181.4	158.96
20 jam	41	0.133	0.118	0.128	0.126	178.1	157.79
20 jam	40	0.104	0.100	0.107	0.104	217.0	168.21
20 jam	39	0.211	0.209	0.197	0.206	109.4	121.66
Rata-rata 20 jam						171.5	151.65

Pengujian *Unconfined Compressive Strength* (UCS) selama 7 hari pada campuran terpilih menghasilkan nilai rata-rata sebesar 29,43 kg/cm² (n = 3), yang berada dalam rentang penerimaan 28–35 kg/cm². Parameter UCS ini diposisikan sebagai verifikasi pendukung untuk memastikan bahwa ikatan sementasi yang memadai terbentuk dalam sistem hibrida, tanpa mengalihkan fokus utama penelitian dari kinerja kekuatan awal.

Sebagai verifikasi kuantitatif tambahan, dilakukan analisis regresi linier berganda berdasarkan 108 data pengamatan untuk mengevaluasi pengaruh simultan umur pemeraman, kadar semen, dosis Soiltech, dan kondisi pemeraman terhadap nilai CBR. Model yang dihasilkan signifikan secara statistik dengan $R^2 = 0,855$ (*Adjusted R*² = 0,850; F = 152,088; p < 0,001). Persamaan prediksi (koefisien tidak terstandarisasi/B) adalah: $CBR_{pred} = 50,851 + 6,774$ (Hari) + 18,882 (Soiltech) + 16,784 (Semen) – 8,803 (Kondisi).

Koefisien Beta terstandarisasi menunjukkan bahwa kadar semen merupakan faktor yang paling dominan, diikuti oleh umur pemeraman dan dosis Soiltech, sedangkan kondisi pemeraman memberikan pengaruh negatif seiring dengan meningkatnya tingkat kelembapan.

Tabel 4. Hasil Regresi Linier Berganda (Variabel Dependen: CBR)
 Sumber: Hasil analisis penulis (N = 108)

Variabel	B	Std. Error	Beta	t	Sig.
Konstanta	50.851	3.510	–	14.489	0.000
Hari	6.774	0.650	0.391	10.426	0.000
Soiltech MK-II	18.882	3.170	0.223	5.956	0.000

Semen	16.784	0.824	0.764	20.377	0.000
Kondisi	-8.803	1.258	-0.262	-6.997	0.000

Catatan interpretasi (konservatif): Istilah “terbaik/optimum” dalam artikel ini dipahami sebagai komposisi dengan kinerja paling tinggi dan paling stabil dalam rentang variasi yang diuji (semen 0–3% dan Soiltech 0–0,75%). Selain itu, pengujian CBR untuk setiap kombinasi perlakuan dilakukan satu kali ($n = 1$), sehingga hasil yang disajikan merupakan indikator kinerja eksperimental; pengujian ulang (*replicates*) dan uji ketahanan jangka panjang (siklus basah–kering, pembebanan berulang/*rutting*) direkomendasikan untuk penelitian selanjutnya.

KESIMPULAN

Stabilisasi agregat subbase eksisting menggunakan sistem hibrida semen–Soiltech MK-II secara signifikan meningkatkan nilai CBR pada umur awal (0–4 hari) serta meningkatkan ketahanan pada kondisi jenuh air. Dalam rentang variasi yang diuji, campuran 3% semen + 0,75% Soiltech memberikan kinerja tertinggi dan paling stabil pada ketiga kondisi pemeraman, sehingga dipilih sebagai campuran acuan untuk validasi lapangan. Validasi lapangan menunjukkan peningkatan nilai E_{vd} dari rata-rata 50,9 MPa (0 jam) menjadi 171,5 MPa (20 jam), dengan CBR ekuivalen meningkat dari 72,96% menjadi 151,65%, sehingga memenuhi kriteria penerimaan CBR lapangan $\geq 60\%$ segera setelah pemadatan. Nilai UCS 7 hari dari campuran acuan adalah 29,43 kg/cm² ($n = 3$), yang berada dalam rentang penerimaan 28–35 kg/cm². Analisis regresi linier berganda ($R^2 = 0,855$) mendukung temuan bahwa kadar semen merupakan faktor dominan, diikuti oleh umur pemeraman dan dosis Soiltech, sedangkan kondisi pemeraman (kelembapan) menurunkan nilai CBR.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada PT. Servo Lintas Raya yang telah menyediakan lokasi dan memfasilitasi pelaksanaan uji lapangan, serta kepada PT. Aplikasi Bitumen Indonesia atas dukungan teknis dalam penerapan stabilisasi. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Program Pascasarjana Universitas Bandar Lampung atas dukungan akademik selama penelitian berlangsung.

REFERENSI

- ASTM International. (n.d.). *ASTM D1883: Standard test method for California Bearing Ratio (CBR) of laboratory-compacted soils*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Austrroads. (2008). *Guide to pavement technology part 4D: Stabilised materials*. Sydney: Austrroads.
- Badan Standardisasi Nasional. (2012). *SNI 1744:2012: Metode uji California Bearing Ratio (CBR) di laboratorium*. Jakarta: BSN.
- Giroud, J. P., & Han, J. (2004). Design method for geogrid-reinforced unpaved roads. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(8), 775–786.
- Santoni, R. L., & Webster, S. L. (2001). Airfield pavement stabilization using polymeric binders. *Transportation Research Record*, 1747, 39–46.
- Thompson, R. J., & Visser, A. T. (2000). Mine haul road maintenance management systems. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 100(4), 243–249.
- Thompson, R. J., & Visser, A. T. (2003). The functional design of surface mine haul roads. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 103(3), 169–180.
- Van Niekerk, A. (2002). *Mechanical stabilization of granular materials for road construction*. Pretoria: University of Pretoria.
- Yilmaz, I., & Civelekoglu, B. (2009). Gypsum–cement stabilization of clayey soil. *Applied Clay Science*, 44(1–2), 166–172.