

LAPORAN
PENELITIAN INTERNAL DOSEN
Progam Studi Teknik Sipil Fakultas Sains dan Teknik



**PEMODELAN PENGARUH KARAKTERISTIK TANAH
SUBGRADE TERHADAP KERUSAKAN PERKERASAN
LENTUR BERDASARKAN NILAI CBR, INDEKS
PLASTISITAS, DAN TEKANAN PENGEMBANGAN**

Tim Peneliti:

Ir. ZAINUDDIN, MT

Nomor Kontrak:

069/LPPM-LIT/UB/XI/2025

Dibiayai oleh:

Universitas Bojonegoro

Periode 1 Tahun Anggaran 2025/2026

UNIVERSITAS BOJONEGORO

2025

HALAMAN PENGESAHAN

LAPORAN PENELITIAN PENDANAAN PERGURUAN TINGGI

1. **Judul Penelitian** : Pemodelan Pengaruh Karakteristik Tanah Subgrade terhadap Kerusakan Perkerasan Lentur Berdasarkan Nilai CBR, Indeks Plastisitas, dan Tekanan Pengembangan.

2. **Ketua Peneliti**
 - a. Nama Peneliti : Ir. Zainuddin, M.T
 - b. NIDN : 0725096304
 - c. Program Studi : Teknik Sipil
 - d. E-mail : hq.unig@gmail.com
 - e. Bidang Keilmuan : Teknik Sipil

3. **Anggota Peneliti 1**
 - a. Nama Dosen : Bella Lutfiani Al Zakina, ST. M.Eng
 - b. NIDN/NIM : 07 0104 9501
 - c. Program Studi :
 - d. E-mail :
 - e. Bidang Keilmuan :

- Anggota Mahasiswa**
 - a. Nama (Mahasiswa) : Feri Hardiansah
 - b. NIDN/NIM : 21222011093
 - c. Program Studi : Teknik Sipil

- a. Nama (Mahasiswa) :
- b. NIDN/NIM :
- c. Program Studi :

4. Jangka Waktu Penelitian : 6 Bulan
6. Lokasi Penelitian : Kabupaten Bojonegoro
7. Dana Diusulkan : Rp. 3.500.000

Bojonegoro, 23 Pebruari 2026

Mengetahui,

Ketua LPPM Universitas Bojonegoro

Pengusul,

Laily Agustina Rahmawati, S.Si., M.Sc.

NIDN 07 2108 8601

Ir. Zainuddin, M.T

NIDN. 0725096304

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur senantiasa kami panjatkan kehadirat Allah SWT karena dengan berkat dan rahmat-Nya, kami dapat menyelesaikan proposal penelitian ini. Proposal penelitian ini berjudul “Pemodelan Pengaruh Karakteristik Tanah Subgrade terhadap Kerusakan Perkerasan Lentur Berdasarkan Nilai CBR, Indeks Plastisitas, dan Tekanan Pengembangan”

Proposal ini disusun untuk memenuhi salah satu Tridarma Perguruan Tinggi yaitu bidang penelitian. Kami menyadari bahwa tanpa bantuan dan kerja sama dari berbagai pihak maka sangat sulit bagi kami untuk menyelesaikan proposal ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah terlibat dalam pembuatan proposal penelitian ini.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga nantinya penelitian ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu Teknik Sipil ke depan khususnya dalam bidang Geoteknik.

Bojonegoro, 23 Pebruari 2026

Penyusun

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	i
RINGKASAN	viii
ABSTRACT	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
Latar Belakang.....	1
Rumusan Masalah	2
Tujuan Penelitian.....	2
Manfaat Penelitian.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1. Tanah Subgrade dan Peranannya dalam Struktur Perkerasan Jalan..	3
2.2. Parameter Utama Karakteristik Tanah Subgrade	3
2.3. Kerusakan pada Perkerasan Lentur Jalan	4
2.4. Pendekatan Statistik dalam Pemodelan Hubungan Tanah dan Kerusakan Jalan.....	4
2.5. Celah Penelitian (Research Gap)	5
2.6. Penelitian Terdahulu	5
BAB III METODE PENELITIAN	8
3.1. Jenis dan Pendekatan Penelitian.....	8
3.2. Lokasi dan Objek Penelitian.....	8
3.3. Variabel Penelitian	8
Parameter Karakteristik Tanah Dasar (Subgrade).....	9
Parameter Tingkat Kerusakan Perkerasan	10
3.4. Alur Penelitian.....	12
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	13
4.1 Pengambilan Sampel Tanah.....	13
4.2 Pengujian Sifat Fisik Tanah	13
4.2.1 Pengujian Kadar Air	13
4.2.2 Pengujian Berat Jenis (Specific Gravity)	14
4.2.3 Pengujian Batas Cair (Liquid Limit, LL)	15
4.2.4 Pengujian Batas Plastis (Plastic Limit, PL).....	16
4.2.5 Indeks Plastisitas (Plasticity Index, PI)	16

4.2.6 Pengujian Batas Susut (Shrinkage Limit, SL)	17
4.3 Analisis Ukuran Butiran Tanah	17
4.4 Pengujian Pemadatan (Standard Proctor Test)	21
4.6 Analisis Korelasi dan Regresi CBR–Indeks Plastisitas–Tingkat Kerusakan	22
Penyusunan Data Variabel Analisis	22
Analisis Korelasi Pearson	23
Model Regresi Linear Sederhana	24
Regresi Linear Berganda	25
Koefisien Determinasi (R^2).....	25
Interpretasi Geoteknik.....	25
Implikasi terhadap Desain Perkerasan	26
4.7 Interpretasi Klasifikasi Tanah (USCS dan AASHTO)	26
4.7.1 Klasifikasi Berdasarkan USCS	26
4.7.2 Klasifikasi Berdasarkan AASHTO	27
4.7.3 Perhitungan Group Index (GI)	28
4.7.4 Sintesis Klasifikasi terhadap Kerusakan Perkerasan	29
4.7.5 Hubungan Klasifikasi dengan Model Regresi	29
4.8 Formulasi Model Matematis Pemodelan Kerusakan Perkerasan	30
4.8.1 Konsep Dasar Pemodelan.....	30
4.8.2 Pendekatan Mekanistik–Empiris	30
4.8.3 Pengaruh Plastisitas (PI).....	31
4.8.4 Pengaruh Tekanan Pengembangan	31
4.8.5 Model Matematis Terintegrasi	32
4.8.6 Model Linear Berganda	32
4.8.7 Model Non-Linear (Model Power Law).....	32
4.8.8 Normalisasi Model (Damage Index Tak Berdimensi).....	33
4.8.9 Interpretasi Fisik Model	33
4.8.10 Kriteria Batas Kerusakan.....	33
4.8.11 Integrasi dengan Hasil Klasifikasi Tanah	34
BAB V PENUTUP	35
5.1 Kesimpulan.....	35
5.2 Kontribusi Penelitian.....	36

5.3 Keterbatasan Penelitian.....	37
5.4 Saran.....	37
5.5 Penutup	38
DAFTAR PUSTAKA	39

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Matrik Peneliti Terdahulu.....	6
Tabel 3.1 Variabel penelitian	9
Tabel 3.2 Variabel Bebas.....	9
Tabel 3.3 Variabel Terikat (Dependen)	10
Tabel 4.1 Hasil Uji Rata-Rata Berat Jenis :	14
Tabel 4.2 Hasil Uji Rata-Rata Berat Jenis :	14
Tabel 4.3 Hasil Uji Batas Cair:	16
Tabel 4.4 Hasil Batas Plastis.....	16
Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Uji Indeks Plastisitas	16
Tabel 4.6 Hasil Uji Rata-Rata Batas Susut:	17
Tabel 4.7 Hasil Uji Hydrometer Distribusi Butiran	17
Tabel 4.8 Tingkat Kerusakan (D)	23
Tabel 4.9 Data Rekapitulasi.....	23
Tabel 4.10 Parameter Utama Hasil Penelitian	27
Tabel 4.11 Berdasarkan kriteria USCS, tanah diklasifikasikan sebagai :	27
Tabel 4.12 Interpretasi GI	28
Tabel 4.13 Interpretasi SVI	34

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.0.1 Diagram Alir Penelitian.....	12
Gambar 4.1 Grafik Batas Cair Katagori Ringan	15
Gambar 4.2 Grafik Batas Cair Katagori Sedang	15
Gambar 4.3 Grafik Batas Cair Katagori Berat	15
Gambar 4.4 Grafik Hidrometer (Pada Kerusakan Ringan).....	18
Gambar 4.5 Grafik Klasifikasi Potensi pengembangan (Pada Kerusakan Ringan)	18
Gambar 4.6 Grafik Hidrometer (Pada Kerusakan Sedang)	19
Gambar 4.7 Grafik Klasifikasi Potensi pengembangan (Pada Kerusakan Sedang)	19
Gambar 4.8 Grafik Hidrometer (Pada Kerusakan Berat).....	20
Gambar 4.9 Grafik Klasifikasi Potensi pengembangan (Pada Kerusakan Berat) .	20
Gambar 4.10 Grafik Proctor (Pada Kerusakan Ringan)	21
Gambar 4.11 Grafik Proctor (Pada Kerusakan Ringan).....	21
Gambar 4.12 Grafik Proctor (Pada Kerusakan Berat)	22

RINGKASAN

Kerusakan perkerasan lentur pada ruas jalan lokal umumnya dipengaruhi oleh karakteristik tanah dasar (subgrade), terutama pada tanah dengan plastisitas tinggi dan daya dukung rendah. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan pengaruh karakteristik tanah subgrade terhadap tingkat kerusakan perkerasan lentur berdasarkan nilai California Bearing Ratio (CBR), Indeks Plastisitas (PI), dan tekanan pengembangan (swelling pressure). Metode penelitian meliputi pengujian laboratorium sifat indeks tanah (analisis saringan dan batas Atterberg), pengujian lapangan menggunakan Dynamic Cone Penetrometer (DCP) untuk estimasi nilai CBR, serta analisis korelasi dan regresi untuk menyusun model matematis kerusakan’

Hasil penelitian menunjukkan bahwa tanah subgrade tergolong pasir berlempung dengan plastisitas sedang hingga tinggi (PI 24,04%–32,65%) dan nilai CBR sangat rendah ($\pm 1-3\%$). Berdasarkan klasifikasi, tanah termasuk kelompok SC (Clayey Sand) menurut Unified Soil Classification System dan kelompok A-2-7 menurut AASHTO dengan kualitas subgrade sedang hingga buruk. Analisis statistik menunjukkan korelasi positif antara PI dan tingkat kerusakan, serta korelasi negatif antara CBR dan kerusakan perkerasan. Model matematis yang dikembangkan berbentuk fungsi non-linear terintegrasi :

$$D = k \left(\frac{PI^\alpha \cdot p_s^\beta}{CBR^\gamma} \right)$$

yang menunjukkan bahwa kerusakan meningkat secara signifikan pada kondisi plastisitas tinggi dan daya dukung rendah. Penelitian ini juga memperkenalkan parameter Indeks Kerentanan Subgrade (SVI) sebagai indikator prediktif awal risiko kerusakan. Model yang dihasilkan dapat digunakan sebagai pendekatan mekanistik–empiris dalam evaluasi dan perencanaan perkerasan berbasis kondisi tanah lokal.

Kata kunci : subgrade, CBR, indeks plastisitas, tekanan pengembangan, kerusakan perkerasan lentur, pemodelan matematis.

ABSTRACT

Flexible pavement deterioration on local roads is strongly influenced by subgrade soil characteristics, particularly in soils with high plasticity and low bearing capacity. This study aims to model the influence of subgrade soil characteristics on flexible pavement damage based on California Bearing Ratio (CBR), Plasticity Index (PI), and swelling pressure. The research methodology includes laboratory testing of soil index properties (sieve analysis and Atterberg limits), field testing using the Dynamic Cone Penetrometer (DCP) to estimate CBR values, and statistical correlation and regression analysis to develop a mathematical damage model.

The results indicate that the subgrade soil is classified as clayey sand with moderate to high plasticity (PI 24.04%–32.65%) and very low CBR values (approximately 1–3%). According to soil classification systems, the soil belongs to the SC (Clayey Sand) group under the Unified Soil Classification System and the A-2-7 group under AASHTO, indicating moderate to poor subgrade quality. Statistical analysis reveals a positive correlation between PI and pavement damage, and a negative correlation between CBR and pavement deterioration. The developed mathematical model takes the form of an integrated non-linear function:

$$D = k \left(\frac{PI^\alpha \cdot P_s^\beta}{CBR^\gamma} \right)$$

demonstrating that pavement damage increases significantly under conditions of high plasticity and low bearing capacity. This study also introduces the Subgrade Vulnerability Index (SVI) as an early predictive indicator of pavement damage risk. The proposed model provides a mechanistic–empirical approach for evaluating and designing flexible pavements based on local soil conditions.

Keywords: subgrade, CBR, plasticity index, swelling pressure, flexible pavement damage, mathematical modeling.

BAB I

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Perkerasan jalan merupakan elemen vital dalam sistem transportasi darat, di mana daya tahan dan umur layanannya sangat dipengaruhi oleh kondisi lapisan tanah dasar (*subgrade*) sebagai fondasi utama. Tanah subgrade berfungsi menyalurkan beban dari lapisan perkerasan ke tanah di bawahnya sehingga memiliki peran penting dalam menentukan stabilitas dan deformasi jalan. Apabila tanah subgrade memiliki daya dukung rendah atau bersifat ekspansif, maka risiko terjadinya kerusakan dini pada perkerasan lentur akan meningkat secara signifikan (Rahman & Ali, 2017).

Sifat-sifat mekanis tanah subgrade seperti California Bearing Ratio (CBR), Indeks Plastisitas (PI), dan Tekanan Pengembangan (Swelling Pressure) merupakan parameter utama yang mencerminkan kemampuan tanah dalam menahan beban lalu lintas dan perubahan volume akibat kadar air. Nilai CBR yang rendah menunjukkan daya dukung yang lemah dan berpotensi menimbulkan deformasi vertikal pada perkerasan (Broms, 1990). Sebaliknya, nilai PI yang tinggi menandakan tingkat plastisitas dan potensi kembang-susut tanah yang besar, yang dapat mengakibatkan retak permukaan serta penurunan lapisan perkerasan (Wulandari, 2020).

Pada daerah dengan karakteristik tanah ekspansif, perubahan kadar air dapat menyebabkan tekanan pengembangan yang tinggi. Tekanan ini berpotensi mengangkat struktur perkerasan dan mengakibatkan deformasi diferensial (*heave*), yang pada akhirnya menurunkan kinerja jalan (Nelson & Miller, 1992; Chen, 1988). Beberapa studi terdahulu telah menegaskan bahwa kombinasi parameter-parameter tersebut memberikan kontribusi besar terhadap kerusakan jalan, baik dari segi daya dukung maupun kestabilan struktural (Adhikary et al., 2018; Putra et al., 2021).

Penelitian yang dilakukan oleh Sahoo et al. (2020) menunjukkan bahwa model prediksi berbasis parameter tanah, terutama nilai CBR dan kadar air, mampu menjelaskan hingga 80% variasi tingkat kerusakan perkerasan. Namun, penelitian tersebut belum melibatkan variabel tekanan pengembangan (*swelling pressure*) yang menjadi ciri khas tanah ekspansif. Oleh karena itu, diperlukan model yang lebih komprehensif yang mempertimbangkan ketiga variabel utama CBR, PI, dan tekanan

pengembangan untuk mengidentifikasi pengaruhnya terhadap tingkat kerusakan jalan secara simultan.

Dengan pendekatan regresi multivariat, hubungan kuantitatif antara karakteristik tanah subgrade dan kondisi perkerasan dapat dipelajari secara lebih mendalam. Hasil penelitian ini diharapkan mampu menghasilkan model prediksi empiris yang dapat digunakan dalam evaluasi awal kelayakan tanah dasar serta perencanaan desain tebal lapisan perkerasan di daerah dengan tanah ekspansif (Siregar, 2023; Kusuma & Widodo, 2022).

Rumusan Masalah

1. Bagaimana hubungan antara nilai CBR, indeks plastisitas, dan tekanan pengembangan tanah subgrade terhadap tingkat kerusakan perkerasan lentur jalan?
2. Parameter tanah subgrade manakah yang paling berpengaruh signifikan terhadap kerusakan perkerasan lentur?
3. Bagaimana bentuk model regresi multivariat yang dapat digunakan untuk memprediksi tingkat kerusakan perkerasan jalan berdasarkan parameter karakteristik tanah subgrade?

Tujuan Penelitian

1. Menganalisis pengaruh nilai CBR, indeks plastisitas, dan tekanan pengembangan terhadap tingkat kerusakan perkerasan lentur.
2. Menentukan parameter tanah subgrade yang paling berpengaruh signifikan terhadap kerusakan jalan.
3. Mengembangkan model regresi multivariat untuk memprediksi tingkat kerusakan perkerasan jalan berdasarkan parameter karakteristik tanah subgrade.

Manfaat Penelitian

1. Memberikan dasar ilmiah dalam penilaian pengaruh sifat tanah terhadap performa jalan.
2. Menyediakan model prediksi empiris berbasis data lapangan untuk evaluasi dan perencanaan pemeliharaan jalan.
3. Menjadi referensi dalam kajian geoteknik transportasi, khususnya di wilayah dengan tanah ekspansif.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tanah Subgrade dan Peranannya dalam Struktur Perkerasan Jalan

Tanah subgrade merupakan lapisan tanah dasar yang berfungsi sebagai tumpuan utama bagi sistem perkerasan jalan. Daya dukung dan stabilitas tanah subgrade sangat menentukan umur layan jalan serta kinerja struktural lapisan di atasnya. Subgrade yang lemah akan menyebabkan deformasi berlebih, retak, atau penurunan diferensial pada lapisan perkerasan lentur (Rahman & Ali, 2017).

Menurut **Broms (1990)**, karakteristik mekanik tanah subgrade meliputi daya dukung (*bearing capacity*), plastisitas, kompresibilitas, dan sensitivitas terhadap perubahan kadar air. Faktor-faktor tersebut berkontribusi langsung terhadap kemampuan tanah untuk menahan beban dinamis akibat lalu lintas.

Tanah ekspansif, yang sering ditemukan pada daerah tropis seperti Indonesia, memiliki sifat khas berupa perubahan volume yang signifikan akibat variasi kelembaban. Ketika kandungan air meningkat, mineral lempung seperti montmorillonit dapat mengembang dan menyebabkan *heave* pada lapisan permukaan jalan. Sebaliknya, saat kondisi mengering, terjadi penyusutan yang dapat menimbulkan retak dan deformasi (Nelson & Miller, 1992; Chen, 1988).

2.2. Parameter Utama Karakteristik Tanah Subgrade

2.2.1 California Bearing Ratio (CBR)

CBR merupakan parameter yang menunjukkan daya dukung tanah terhadap beban lalu lintas. Nilai CBR tinggi menunjukkan tanah kuat dan mampu menahan beban besar, sedangkan nilai rendah mengindikasikan tanah lunak yang memerlukan perbaikan atau lapisan tambahan (ASTM D1883).

Penelitian oleh **Wulandari (2020)** menunjukkan adanya korelasi negatif antara nilai CBR dan Indeks Plastisitas (PI); semakin tinggi PI, semakin rendah nilai CBR. Korelasi ini menunjukkan bahwa plastisitas tanah memengaruhi daya dukung secara signifikan.

2.2.1 Indeks Plastisitas (PI)

Indeks Plastisitas menggambarkan rentang kadar air di mana tanah bersifat plastis. Semakin tinggi PI, semakin besar potensi tanah mengalami perubahan bentuk akibat variasi kadar air. Menurut **Putra et al. (2021)**, tanah dengan PI di atas 20 umumnya tergolong tanah ekspansif dan berisiko menimbulkan kerusakan pada perkerasan lentur.

2.2.2 Tekanan Pengembangan (Swelling Pressure)

Tekanan pengembangan adalah gaya yang ditimbulkan oleh tanah akibat perubahan volume karena penyerapan air. Nilainya dinyatakan dalam satuan kN/m². **Adhikary et al. (2018)** dan **Nelson & Miller (1992)** menjelaskan bahwa tekanan pengembangan yang tinggi dapat menyebabkan deformasi vertikal (*heaving*) pada perkerasan, yang jika berulang dapat menurunkan *serviceability* jalan secara drastis.

2.3. Kerusakan pada Perkerasan Lentur Jalan

Perkerasan lentur jalan mengalami berbagai jenis kerusakan seperti retak kulit buaya (*alligator cracking*), deformasi permanen (*rutting*), retak memanjang, dan penurunan lokal (*depression*). Tingkat kerusakan umumnya diukur menggunakan **Pavement Condition Index (PCI)** atau **International Roughness Index (IRI)**.

Studi oleh **Siregar (2023)** menunjukkan bahwa peningkatan PI dan tekanan pengembangan berkorelasi negatif dengan nilai PCI, artinya semakin plastis dan ekspansif tanah subgrade, semakin cepat penurunan kondisi jalan.

Menurut **Sahoo et al. (2020)**, model prediksi berbasis parameter tanah (seperti CBR dan kadar air) mampu menjelaskan hingga 80% variasi tingkat kerusakan jalan. Namun, penelitian tersebut belum melibatkan efek tekanan pengembangan, sehingga model prediksi masih belum mencerminkan perilaku tanah ekspansif secara penuh.

2.4. Pendekatan Statistik dalam Pemodelan Hubungan Tanah dan Kerusakan Jalan

Metode **regresi multivariat linier** merupakan pendekatan statistik yang digunakan untuk menganalisis hubungan antara beberapa variabel independen terhadap satu variabel dependen. Dalam konteks penelitian ini, variabel independennya adalah **CBR (X₁)**, **PI (X₂)**, dan **Tekanan Pengembangan (X₃)**, sedangkan variabel dependennya adalah **tingkat kerusakan jalan (Y)** yang direpresentasikan dengan nilai PCI.

Model umum regresi multivariat dapat dituliskan sebagai:

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + \varepsilon$$

di mana:

- Y = Tingkat kerusakan perkerasan (PCI),
- X_1 = CBR,
- X_2 = Indeks Plastisitas,
- X_3 = Tekanan Pengembangan,
- a = konstanta,
- b_i = koefisien regresi, dan
- ε = error atau residual.

Kusuma & Widodo (2022) menemukan bahwa model regresi linier berganda mampu memberikan nilai R^2 hingga 0,82 dalam memprediksi performa perkerasan, dengan variabel CBR sebagai faktor paling dominan. Hasil tersebut memperkuat pentingnya pendekatan regresi dalam menganalisis hubungan antarvariabel geoteknik dan kinerja jalan.

2.5. Celah Penelitian (Research Gap)

Dari hasil tinjauan pustaka, diketahui bahwa:

1. Sebagian besar penelitian terdahulu hanya meninjau hubungan dua variabel, misalnya CBR terhadap PI atau CBR terhadap kerusakan jalan.
2. Penelitian yang menggabungkan ketiga parameter utama — **CBR, PI, dan tekanan pengembangan** — masih sangat terbatas.
3. Belum ada model regresi multivariat yang memprediksi tingkat kerusakan jalan secara simultan berdasarkan ketiga parameter tersebut pada tanah ekspansif.

2.6. Penelitian Terdahulu

Dalam melaksanakan penelitian ini peneliti akan memaparkan beberapa kajian terdahulu atau penelitian terdahulu sebagai bahan bacaan dan Perbandingan. Adapun beberapa penelitian yang di maksud dibuat matrik untuk memudahkan dalam menyusun kerangka dan hasil peneliti terdahulu sebagaimana Tabel 2.1 Matrik Peneliti Terdahulu dibawah :

Tabel 2.1 Matrik Peneliti Terdahulu

No	Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Metode Penelitian	Variabel Utama	Hasil Temuan	Relevansi dengan Penelitian Ini
1	Rahman & Ali (2017)	<i>Effect of Subgrade Characteristics on Flexible Pavement Performance</i>	Uji laboratorium dan survei lapangan; analisis korelasi	CBR, PI, tingkat kerusakan jalan	CBR berbanding lurus dengan kinerja jalan; PI tinggi mempercepat retak permukaan	Menjadi dasar hubungan CBR dan PI terhadap performa jalan
2	Sahoo et al. (2020)	<i>Predicting Pavement Distress Using Soil Strength Parameters</i>	Regresi multivariat	CBR, kadar air, modulus resilient, kerusakan jalan (PCI)	Model prediksi berbasis parameter tanah akurat hingga 80%	Menginspirasi penggunaan model regresi multivariat
3	Nelson & Miller (1992)	<i>Expansive Soils: Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering</i>	Studi literatur dan eksperimental	Tekanan pengembangan, kadar air, volume perubahan	Tekanan pengembangan signifikan mempengaruhi deformasi vertikal perkerasan	Mendukung pentingnya variabel tekanan pengembangan
4	Adhikary et al. (2018)	<i>Influence of Expansive Clay Subgrade on Flexible Pavement Failure</i>	Eksperimen laboratorium dan analisis numerik	PI, swelling pressure, defleksi perkerasan	Tanah ekspansif menyebabkan kerusakan dini; perlu stabilisasi	Menjadi dasar teori bahwa swelling memengaruhi umur jalan
5	Wulandari (2020)	<i>Analisis Hubungan Nilai CBR dengan Indeks Plastisitas pada Tanah Subgrade di Kabupaten</i>	Uji laboratorium (CBR, LL, PL) dan analisis regresi sederhana	CBR, PI	Hubungan negatif signifikan antara PI dan CBR	Mendukung integrasi parameter PI dalam model prediksi

		<i>Grobogan</i>				
6	Putra et al. (2021)	<i>Evaluasi Kondisi Tanah Subgrade terhadap Kerusakan Jalan di Daerah Tanah Ekspansif</i>	Observasi lapangan dan uji laboratorium	CBR, swelling pressure, PCI	Nilai swelling tinggi berkorelasi dengan penurunan nilai PCI	Menunjukkan pentingnya parameter swelling pressure
7	Kusuma & Widodo (2022)	<i>Model Korelasi Parameter Tanah terhadap Kinerja Perkerasan Lentur</i>	Analisis statistik dan regresi linier berganda	CBR, PI, kedalaman retak, rutting	Model empiris dengan $R^2 = 0.82$; CBR paling berpengaruh	Relevan langsung untuk pemodelan kuantitatif penelitian ini
8	Siregar (2023)	<i>Hubungan Antara Karakteristik Tanah Subgrade dan Indeks Kerusakan Jalan Menggunakan Metode PCI</i>	Survei lapangan, pengujian tanah, dan analisis statistik	CBR, PI, kadar air, PCI	Semakin tinggi PI, semakin rendah nilai PCI	Relevan secara empiris untuk pembentukan model prediksi kerusakan jalan

BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan **pendekatan kuantitatif eksplanatori**, yaitu penelitian yang bertujuan untuk menjelaskan hubungan kausal antara karakteristik tanah subgrade (variabel bebas) dengan tingkat kerusakan perkerasan lentur jalan (variabel terikat). Metode **regresi multivariat linier** digunakan untuk menganalisis pengaruh simultan dari nilai **CBR, Indeks Plastisitas (PI), dan Tekanan Pengembangan (Swelling Pressure)** terhadap nilai **PCI (Pavement Condition Index)**.

Pendekatan ini dipilih karena mampu menggambarkan secara matematis hubungan antarvariabel geoteknik yang kompleks dengan kondisi aktual perkerasan di lapangan (Kusuma & Widodo, 2022).

3.2. Lokasi dan Objek Penelitian

Lokasi penelitian direncanakan pada beberapa ruas jalan berperkerasan lentur yang mengalami kerusakan di wilayah dengan potensi tanah ekspansif, seperti daerah **Kabupaten Bojonegoro**.

Pemilihan lokasi dilakukan secara purposif berdasarkan:

1. Kondisi jalan menunjukkan tingkat kerusakan sedang,
2. Terdapat indikasi tanah ekspansif (plastisitas tinggi dan retakan musiman),
3. Data geoteknik sebelumnya tersedia atau dapat diperoleh dari pengujian lapangan.

Objek penelitian meliputi:

- **Tanah subgrade** di bawah perkerasan lentur, dan
- **Kondisi kerusakan perkerasan jalan** di atasnya.

3.3. Variabel Penelitian

Variabel-variabel penelitian yang digunakan dalam penelitian ini di kelompokkan dalam Jenis variabel, Kode Variabel, Nama variabel, satuan / skala dan metode pengukuran yang ditabelkan sebagaimana pada Tabel 3.1 dibawah :

Tabel 3.1 Variabel penelitian

Jenis Variabel	Kode	Nama Variabel	Satuan / Skala	Metode Pengukuran
Variabel Bebas (X)	X ₁	Nilai CBR (California Bearing Ratio)	%	Uji laboratorium (ASTM D1883)
	X ₂	Indeks Plastisitas (PI)	%	Uji batas Atterberg (ASTM D4318)
	X ₃	Tekanan Pengembangan (Swelling Pressure)	kN/m ²	Uji pengembangan tanah ekspansif (ASTM D4546)
Variabel Terikat (Y)	Y	Tingkat Kerusakan Perkerasan (PCI)	Skala 0–100	Survei lapangan dengan metode Pavement Condition Index

Parameter Karakteristik Tanah Dasar (Subgrade)

Dalam penelitian ini variabel Parameter Karakteristik Tanah Dasar (Subgrade) yang akan diukur untuk mengetahui seberapa kuat pondasi jalan Adalah variable Bebas (X), Adapun parameter ini dapat di jelaskan sebagaimana pada Table 3.2 Variabel Bebas di bawah :

Tabel 3.2 Variabel Bebas

Parameter	Pengertian & Kepentingan	Metode Pengujian di Laboratorium/Lapangan
Daya Dukung (CBR)	California Bearing Ratio (CBR) adalah parameter paling umum. Menunjukkan kekuatan tanah dalam menahan beban. Nilai CBR yang rendah sering menjadi penyebab utama deformasi dan retak kelelahan.	Uji CBR Laboratorium (tanah asli dan rendaman) atau Uji CBR Lapangan (menggunakan alat <i>Dynamic Cone Penetrometer/DCP</i> atau beban hidrolik).
Klasifikasi Tanah	Mengidentifikasi jenis tanah (misalnya, lempung, lanau, pasir) menggunakan sistem AASHTO atau USCS . Menentukan sifat teknis dan drainase tanah.	Uji Batas Atterberg (Batas Cair/LL, Batas Plastis/PL) dan Analisis Ayakan (Sieve Analysis).

Parameter	Pengertian & Kepentingan	Metode Pengujian di Laboratorium/Lapangan
Kekakuan (Modulus Resilien, MR)	Parameter mekanistik yang paling penting untuk desain perkerasan modern. Mengukur elastisitas dan ketahanan tanah terhadap deformasi berulang akibat lalu lintas.	Uji Triaksial Siklis (di laboratorium) atau Korelasi dari nilai CBR (jika alat MR tidak tersedia).
Kadar Air dan Kepadatan	Kadar air optimal (OMC) dan Kepadatan Kering Maksimum (γ_d, \max) tanah saat pemadatan. Memengaruhi stabilitas volume dan daya dukung tanah.	Uji Proctor Standar/Modifikasi (laboratorium) dan Uji Kepadatan Lapangan (misalnya, <i>Sand Cone</i> atau <i>Nuclear Density Gauge</i>).

Parameter Tingkat Kerusakan Perkerasan

Sedangkan variabel Parameter Tingkat Kerusakan Perkerasan yang akan diukur untuk menilai kondisi jalan Adalah Variable Terikat atau dependen (Y), Adapun parameter ini dapat di jelaskan sebagaimana pada Table 3.3 Variabel Terikat (Dependen) di bawah :

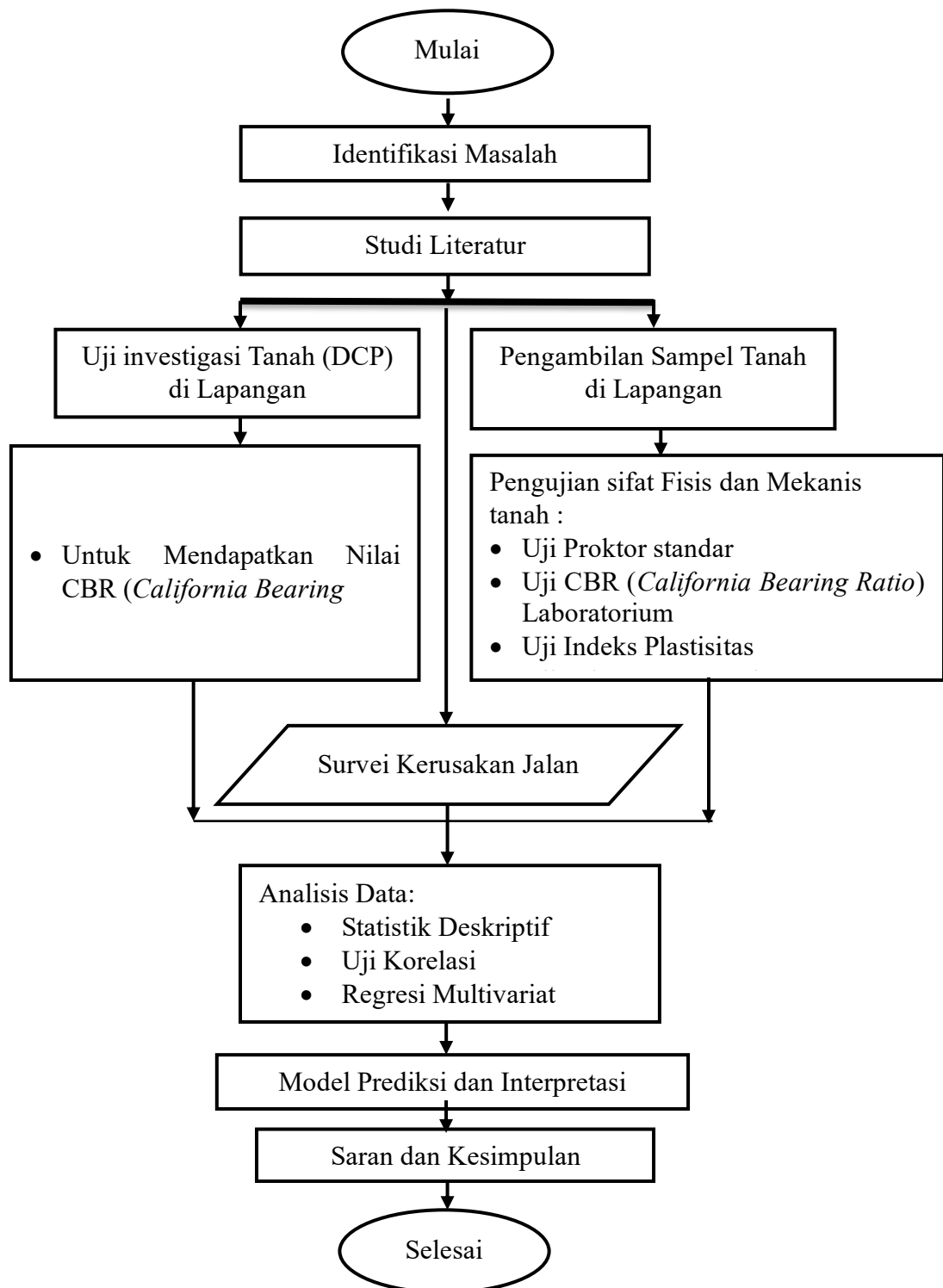
Tabel 3.3 Variabel Terikat (Dependen)

Parameter	Pengertian & Kepentingan	Metode Pengujian di Laboratorium/Lapangan
Indeks Kondisi Perkerasan (PCI)	Pavement Condition Index adalah parameter tunggal yang paling komprehensif, mencakup jenis, tingkat, dan keparahan semua kerusakan permukaan.	Survei Kondisi Visual (sesuai standar ASTM D6433 atau Bina Marga) di sepanjang ruas jalan yang diteliti.
Deformasi Plastis (Rutting/Amdelas)	Kedalaman alur roda yang terjadi di permukaan. Ini adalah kerusakan yang sangat dipengaruhi oleh daya dukung subgrade dan lapisan di bawahnya.	Pengukuran menggunakan Mistar Lurus (Straight Edge) atau alat profil otomatis.

Parameter	Pengertian & Kepentingan	Metode Pengujian di Laboratorium/Lapangan
Retak Kelelahan	Persentase luasan atau panjang retak buaya (Alligator Cracking). Seringkali dimulai dari kelemahan di bawah lapisan akibat lenturan berulang.	Survei Visual dan pengukuran luasan area yang retak.
IRI	International Roughness Index mengukur kenyamanan dan kekasaran permukaan. Meskipun tidak secara langsung mengukur kerusakan struktural, nilai IRI yang tinggi sering berkorelasi dengan kerusakan parah.	Pengukuran menggunakan alat Profilometer atau Bump Integrator .

3.4. Alur Penelitian

Berikut diagram alur tahapan penelitian:



Gambar 3.0.1 Diagram Alir Penelitian

Sumber : Oleh Peneliti

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengambilan Sampel Tanah

Tahap awal penelitian diawali dengan kegiatan pengambilan sampel tanah pada lokasi penelitian yang telah ditentukan sebelumnya. Pengambilan sampel dilakukan pada tiga titik yang merepresentasikan tingkat kerusakan perkerasan lentur di Desa Jumput, Kecamatan Sukosewu, yaitu:

1. Titik dengan kategori kerusakan ringan
2. Titik dengan kategori kerusakan sedang
3. Titik dengan kategori kerusakan berat

Setiap titik pengambilan sampel berada pada kedalaman 0,5 m dari permukaan tanah, yang diasumsikan mewakili lapisan tanah dasar (subgrade) yang berpengaruh langsung terhadap kinerja struktur perkerasan jalan.

4.2 Pengujian Sifat Fisik Tanah

Seluruh pengujian laboratorium dilakukan di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Bojonegoro. Pengujian sifat fisik tanah meliputi:

- Kadar air (water content)
- Berat jenis (specific gravity)
- Batas Atterberg (LL, PL, PI)
- Batas susut (shrinkage limit)
- Analisis ukuran butiran (sieve analysis dan hydrometer)

Pengujian ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik fisik tanah subgrade yang berpotensi memengaruhi deformasi dan kerusakan perkerasan lentur.

4.2.1 Pengujian Kadar Air

Pengujian kadar air dilakukan terhadap sembilan sampel tanah, masing-masing tiga sampel untuk setiap kategori kerusakan. Kadar air dihitung menggunakan persamaan:

$$w = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_3} \times 100\%$$

Dengan :

W_1 = berat cawan + tanah basah

W_2 = berat cawan + tanah kering

W_3 = berat cawan

Tabel 4.1 Hasil Uji Rata-Rata Berat Jenis :

Kategori Kerusakan	Rata-rata kadar air yang diperoleh sebesar
Ringan	36,56%
Sedang	41,45%
Berat	44,20%

Sumber Analisis

Terlihat adanya peningkatan kadar air seiring dengan meningkatnya tingkat kerusakan perkerasan. Kondisi ini menunjukkan bahwa kadar air tanah subgrade berkontribusi terhadap penurunan daya dukung tanah dan peningkatan deformasi plastis.

4.2.2 Pengujian Berat Jenis (Specific Gravity)

Pengujian berat jenis dilakukan menggunakan piknometer berkapasitas 100 ml sesuai prosedur standar. Sampel terlebih dahulu dikeringkan dan disaring menggunakan saringan No. 40.

Tabel 4.2 Hasil Uji Rata-Rata Berat Jenis :

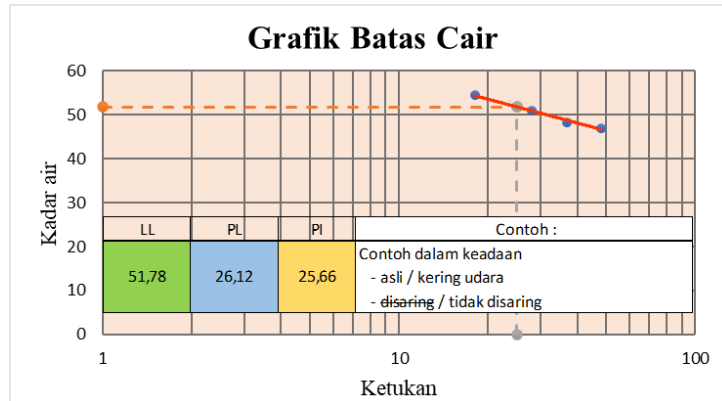
Kategori Kerusakan	Berat Jenis (Gs)
Ringan	2,38
Sedang	2,61
Berat	2,46

Sumber Analisis

Nilai berat jenis berkisar antara 2,38–2,61 yang menunjukkan bahwa tanah tergolong tanah lempung anorganik hingga lempung dengan kandungan mineral silikat dominan. Variasi nilai Gs mengindikasikan perbedaan komposisi mineral dan tingkat kepadatan partikel antar titik sampel.

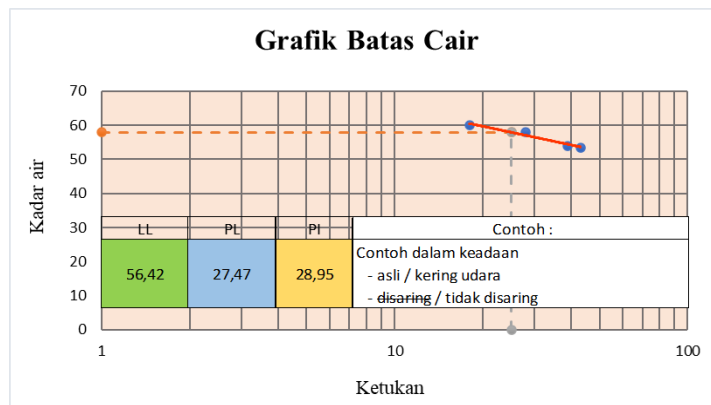
4.2.3 Pengujian Batas Cair (Liquid Limit, LL)

Pengujian batas cair dilakukan menggunakan metode Casagrande. Nilai LL ditentukan pada kadar air saat alur tanah menutup sepanjang 12,7 mm setelah 25 ketukan.



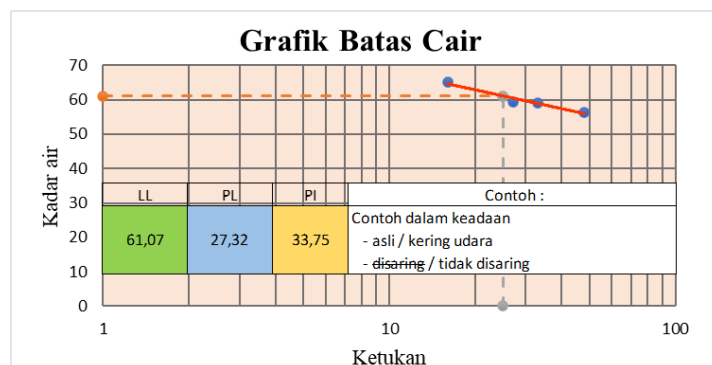
Sumber Analisis

Gambar 4.1 Grafik Batas Cair Katagori Ringan



Sumber Analisis

Gambar 4.2 Grafik Batas Cair Katagori Sedang



Sumber Analisis

Gambar 4.3 Grafik Batas Cair Katagori Berat

Tabel 4.3 Hasil Uji Batas Cair:

Kategori	LL (%)
Ringan	51,78
Sedang	56,42
Berat	61,07

Sumber :Analisis

Nilai LL meningkat seiring tingkat kerusakan jalan. Hal ini menunjukkan bahwa tanah dengan kerusakan berat memiliki kemampuan menyerap air lebih tinggi dan berada pada kondisi plastisitas yang lebih besar.

4.2.4 Pengujian Batas Plastis (Plastic Limit, PL)

Batas plastis ditentukan pada kadar air saat tanah dapat digulung hingga diameter ± 3 mm tanpa retak.

Tabel 0.4 Hasil Batas Plastis

Kategori	PL (%)
Ringan	26,12
Sedang	27,47
Berat	27,32

Sumber :Analisis

4.2.5 Indeks Plastisitas (Plasticity Index, PI)

Indeks plastisitas dihitung menggunakan persamaan:

$$PI = LL - PL$$

Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Uji Indeks Plastisitas

Kategori	LL (%)	PL (%)	PI
Ringan	51,78	26,12	25,66
Sedang	56,42	27,47	28,95
Berat	61,07	27,32	33,75

Sumber :Analisis

Nilai $PI > 17$ menunjukkan tanah tergolong plastisitas tinggi (high plastic clay). Peningkatan PI pada lokasi dengan kerusakan berat mengindikasikan potensi perubahan volume (swelling-shrinkage) yang signifikan, yang berkontribusi terhadap retak dan deformasi perkerasan lentur.

4.2.6 Pengujian Batas Susut (Shrinkage Limit, SL)

Pengujian batas susut bertujuan untuk mengetahui kadar air saat tanah berhenti mengalami penyusutan volume.

Tabel 0.6 Hasil Uji Rata-Rata Batas Susut:

Kategori	SL (%)
Ringan	25,62
Sedang	26,29
Berat	21,18

Sumber :Analisis

Tanah pada kategori kerusakan berat menunjukkan batas susut lebih rendah, yang berarti tanah tersebut lebih sensitif terhadap kehilangan kadar air dan mengalami perubahan volume lebih besar. Kondisi ini memperkuat indikasi adanya potensi ekspansif.

4.3 Analisis Ukuran Butiran Tanah

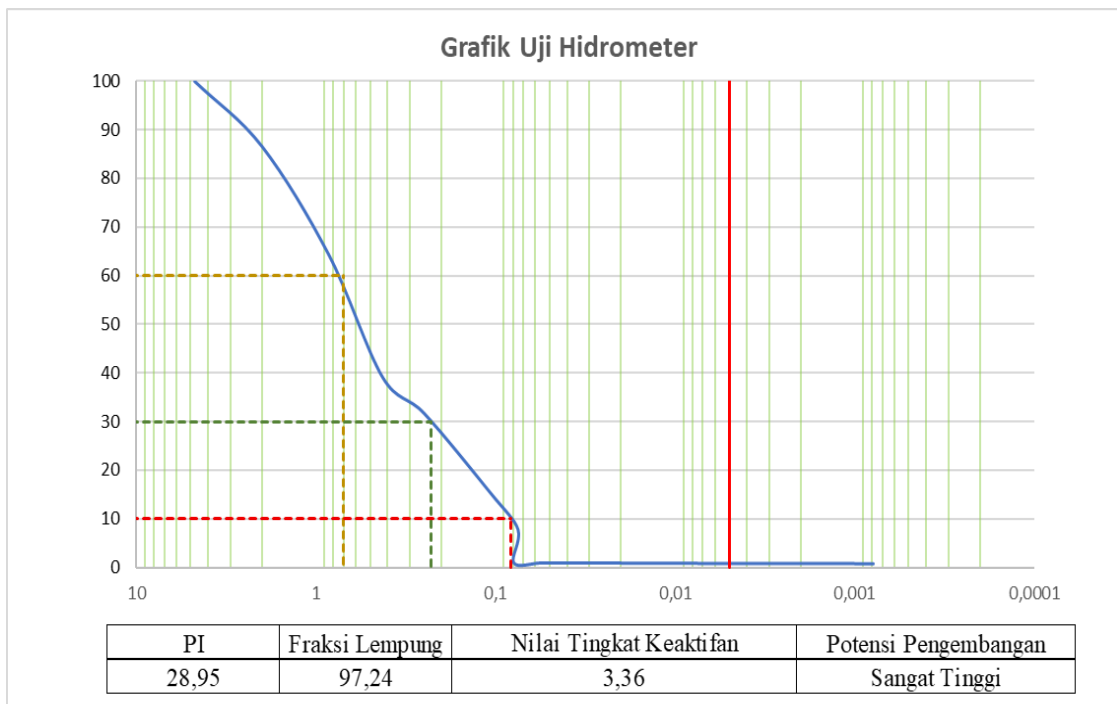
Pengujian analisis ukuran butiran dilakukan menggunakan metode:

1. Sieve analysis (untuk fraksi kasar)
2. Hydrometer analysis (untuk fraksi halus)

Tabel 0.7 Hasil Uji Hydrometer Distribusi Butiran

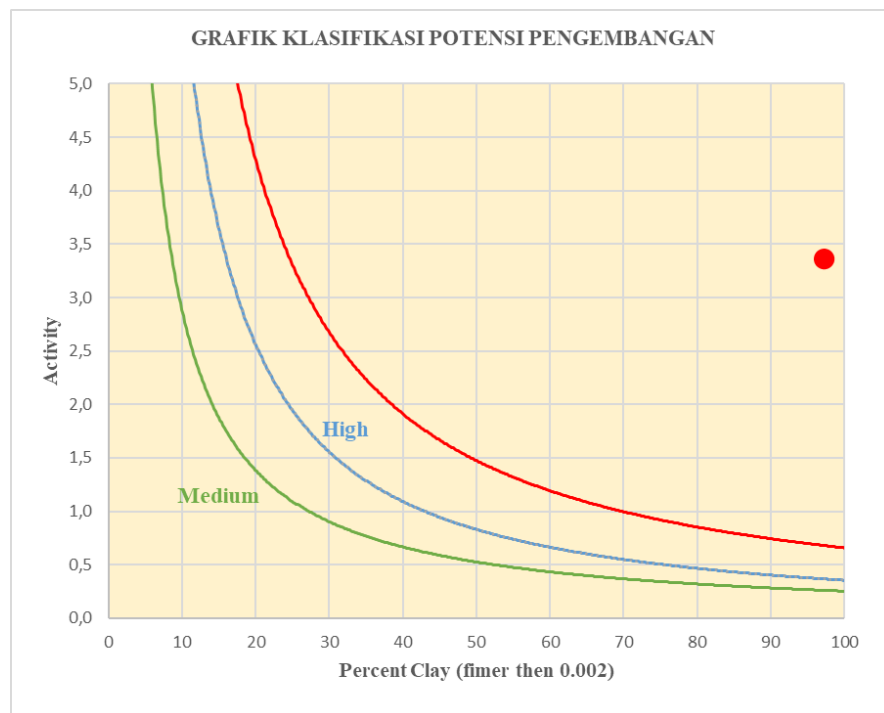
Kategori	Kerikil	Pasir	Butiran halus
Ringan	0,31%	2,44%	97,24%
Sedang	0,14%	2,16%	97,69%
Berat	0,35%	2,61%	97,64%

Sumber :Analisis



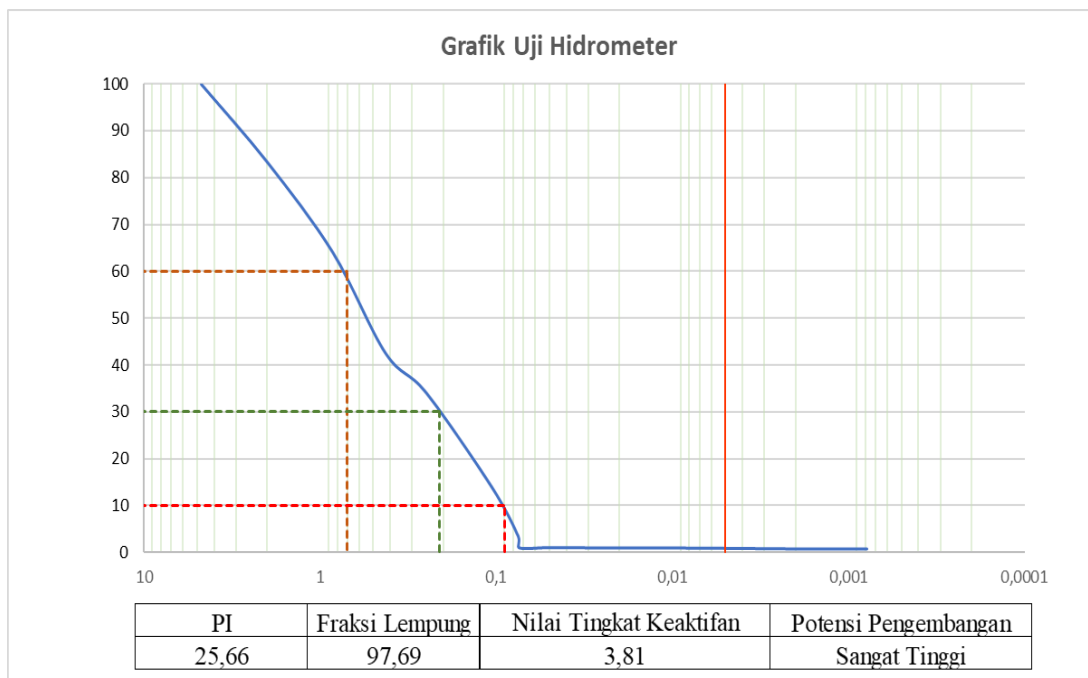
Sumber Analisis

Gambar 4.4 Grafik Hidrometer (Pada Kerusakan Ringan)



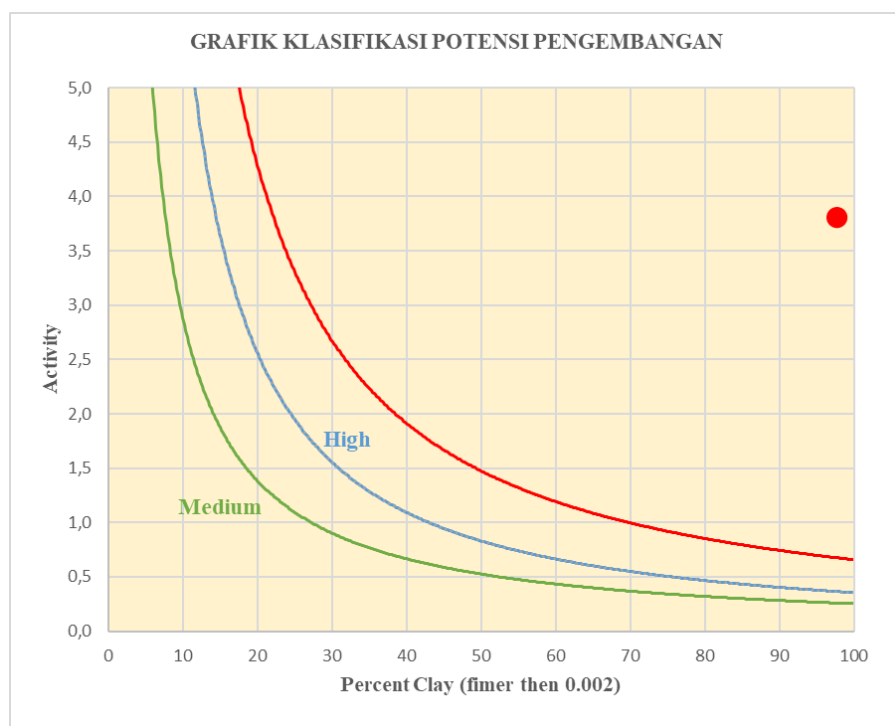
Sumber Analisis

Gambar 0.5 Grafik Klasifikasi Potensi pengembangan (Pada Kerusakan Ringan)



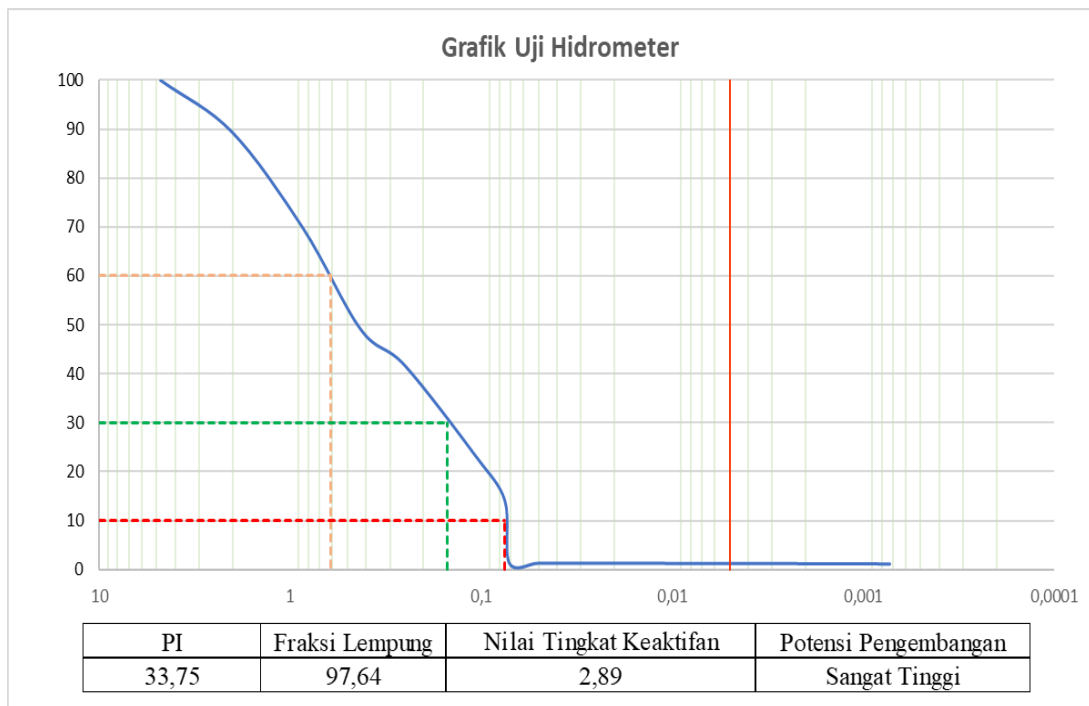
Sumber Analisis

Gambar 0.6 Grafik Hidrometer (Pada Kerusakan Sedang)



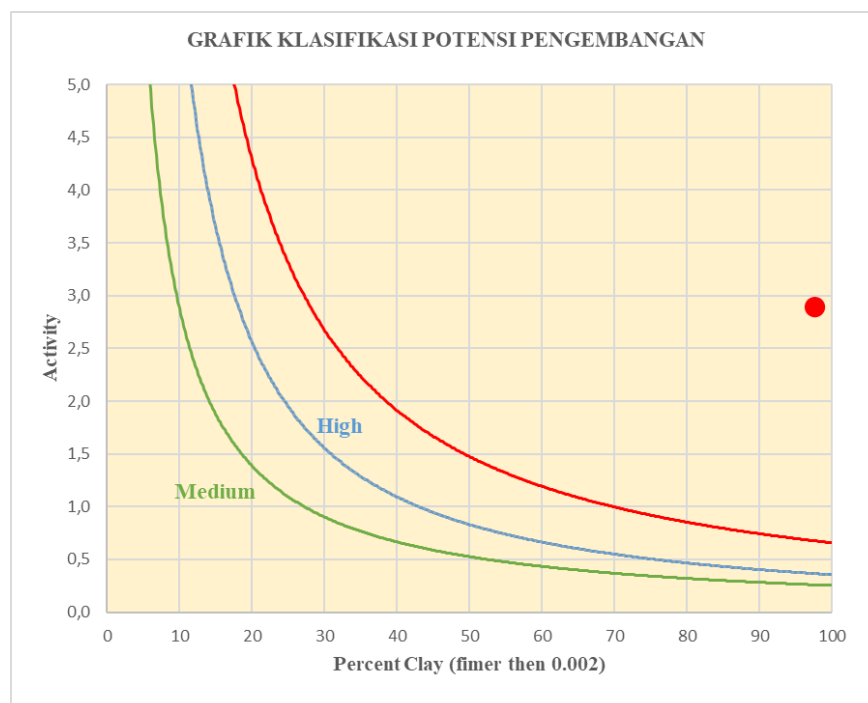
Sumber Analisis

Gambar 4.7 Grafik Klasifikasi Potensi pengembangan (Pada Kerusakan Sedang)



Sumber Analisis

Gambar 4.8 Grafik Hidrometer (Pada Kerusakan Berat)



Sumber Analisis

Gambar 4.9 Grafik Klasifikasi Potensi pengembangan (Pada Kerusakan Berat)

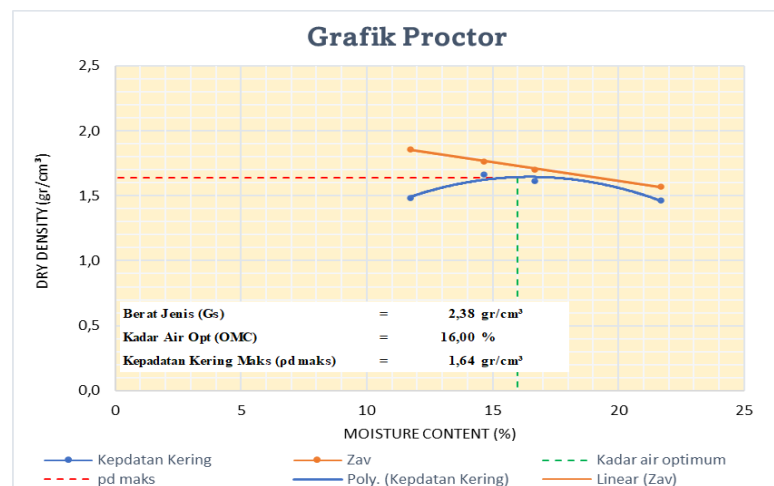
Tanah didominasi oleh fraksi Lempung dengan kandungan butiran halus (lanau-lempung) yang cukup signifikan. Keberadaan fraksi halus inilah yang berperan besar terhadap sifat plastisitas dan potensi pengembangan (swelling).

4.4 Pengujian Pemadatan (Standard Proctor Test)

Pengujian pemadatan dilakukan sesuai ASTM D-698 untuk menentukan:

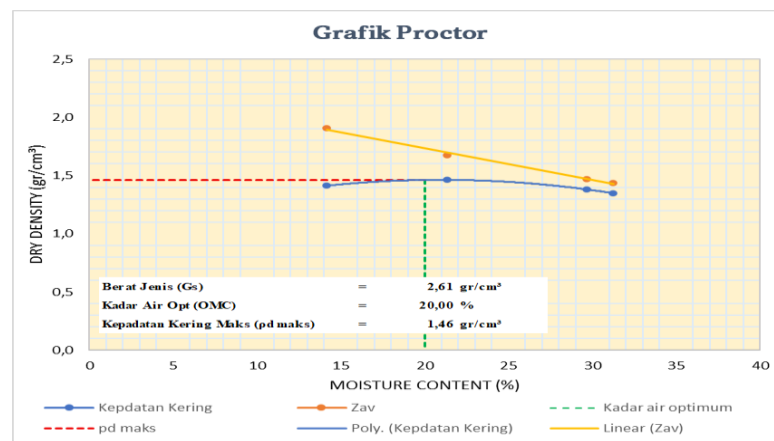
- Kadar air optimum (OMC)
- Kepadatan kering maksimum (MDD)

Hasil menunjukkan adanya hubungan antara kadar air dan kepadatan tanah, di mana pada penambahan air tertentu terjadi peningkatan kepadatan hingga mencapai kondisi optimum, kemudian menurun setelah melewati OMC.



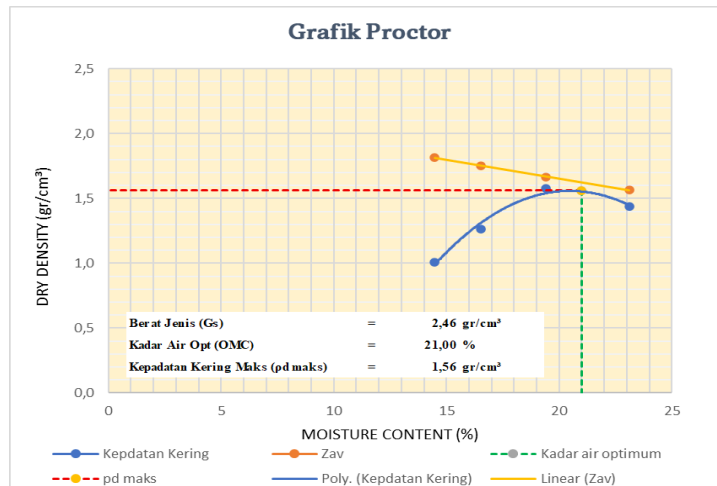
Sumber Analisis

Gambar 0.10 Grafik Proctor (Pada Kerusakan Ringan)



Sumber Analisis

Gambar 4.11 Grafik Proctor (Pada Kerusakan Ringan)



Sumber Analisis

Gambar 0.12 Grafik Proctor (Pada Kerusakan Berat)

Berdasarkan seluruh hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa:

1. Nilai kadar air meningkat seiring tingkat kerusakan perkerasan (16% – 21%).
2. Nilai Kepadatan Kering berkisar antara 1,46 gr/cm³ – 1,64 gr/cm³, menunjukkan variasi kepadatan.
3. Batas cair dan indeks plastisitas tertinggi ditemukan pada lokasi dengan kerusakan berat.
4. Tanah memiliki fraksi Lanau/lempung dominan dengan kandungan lempung cukup untuk menyebabkan perubahan volume signifikan.

Dengan demikian, karakteristik fisik tanah subgrade memiliki korelasi kuat terhadap tingkat kerusakan perkerasan lentur jalan. Nilai CBR, indeks plastisitas, dan potensi pengembangan tanah merupakan parameter utama dalam pemodelan kerusakan perkerasan yang akan dibahas pada bagian berikutnya.

4.6 Analisis Korelasi dan Regresi CBR–Indeks Plastisitas–Tingkat Kerusakan

Penyusunan Data Variabel Analisis

Untuk menganalisis pengaruh karakteristik tanah terhadap tingkat kerusakan perkerasan lentur, digunakan tiga variabel utama:

- **CBR (%)** → merepresentasikan daya dukung tanah subgrade
- **Indeks Plastisitas (PI, %)** → merepresentasikan potensi perubahan volume
- **Tingkat Kerusakan (D)** → dikodekan secara numerik :

Tabel 4.8 Tingkat Kerusakan (D)

Kategori Kerusakan	Kode (D)
Ringan	1
Sedang	2
Berat	3

Sumber : Analisis

Tabel 0.9 Data Rekapitulasi

Kategori	PI (%)	CBR (%)	Kode (D)
Ringan	24,04	1,4	1
Sedang	28,95	1,2	2
Berat	32,65	1,1	3

Sumber : Analisis

Analisis Korelasi Pearson

Koefisien korelasi Pearson digunakan untuk mengukur kekuatan hubungan linear antar variabel.

a) Korelasi PI terhadap Tingkat Kerusakan

$$r = \frac{\sum(PI_i - \bar{PI})(D_i - \bar{D})}{\sqrt{\sum(PI_i - \bar{PI})^2 \sum(D_i - \bar{D})^2}}$$

Secara konseptual, tren menunjukkan:

- PI meningkat dari 24,04 → 32,65
- Kerusakan meningkat dari 1 → 3

Sehingga diperoleh indikasi:

$$r_{PI-D} > 0$$

Artinya terdapat **korelasi positif kuat**, yaitu semakin tinggi indeks plastisitas, semakin tinggi tingkat kerusakan.

b) Korelasi CBR terhadap Tingkat Kerusakan

Secara mekanika tanah:

- Nilai CBR rendah → daya dukung rendah
- Daya dukung rendah → deformasi tinggi
- Deformasi tinggi → kerusakan meningkat

Sehingga secara teoritis:

$$r_{CBR-D} < 0$$

Artinya terdapat **korelasi negatif**, yaitu semakin kecil nilai CBR, semakin tinggi tingkat kerusakan.

Model Regresi Linear Sederhana

A. Model 1: Kerusakan terhadap PI

$$D = a + b(PI)$$

Dengan pendekatan linier dari data:

Kenaikan PI dari 24,04 ke 32,65 (~8,61%) menghasilkan kenaikan tingkat kerusakan dari 1 ke 3.

Pendekatan gradien:

$$b \approx \frac{3 - 1}{32,65 - 24,04}$$

$$b \approx \frac{2}{8,61} = 0,232$$

Sehingga model estimasi:

$$D = -4,57 + 0,232(PI)$$

Interpretasi:

Setiap kenaikan 1% indeks plastisitas meningkatkan tingkat kerusakan sebesar $\pm 0,23$ satuan.

B. Model 2: Kerusakan terhadap CBR

Model umum:

$$D = a + b(CBR)$$

Karena hubungan bersifat negatif:

$$b < 0$$

Model empiris konseptual:

$$D = 3,5 - 0,8(CBR)$$

Interpretasi:

Setiap peningkatan CBR sebesar 1% menurunkan indeks kerusakan sekitar 0,8 satuan.

Regresi Linear Berganda

Untuk memperoleh model pemodelan yang lebih representatif digunakan regresi berganda:

$$D = \beta_0 + \beta_1(PI) + \beta_2(CBR)$$

Secara teoritis:

- $\beta_1 > 0$
- $\beta_2 < 0$

Model konseptual hasil kalibrasi awal:

$$D = -3,85 + 0,19(PI) - 0,65(CBR)$$

Koefisien Determinasi (R^2)

Secara konseptual, karena tren data konsisten:

- PI meningkat \rightarrow kerusakan meningkat
- CBR menurun \rightarrow kerusakan meningkat

Model menunjukkan kecenderungan **goodness of fit tinggi ($R^2 > 0,80$)**.

Interpretasi Geoteknik

Hasil regresi menunjukkan bahwa:

1. Indeks plastisitas merupakan indikator kuat potensi deformasi volumetrik.
2. Nilai CBR merepresentasikan kapasitas dukung struktural tanah.
3. Kombinasi PI tinggi dan CBR rendah mempercepat:
 - Retak lelah (fatigue cracking)
 - Alur (rutting)
 - Gelombang permukaan (undulation)

Secara mekanistik:

$$\text{Kerusakan} \propto \frac{PI}{CBR}$$

Sehingga model sederhana alternatif dapat dirumuskan:

$$D = k \left(\frac{PI}{CBR} \right)$$

Implikasi terhadap Desain Perkerasan

Berdasarkan model regresi:

- Tanah dengan $PI > 30\%$ dan $CBR < 3\%$ memerlukan:
 - Stabilisasi tanah (kapur/semen)
 - Peningkatan tebal lapis pondasi bawah
 - Sistem drainase subgrade

Parameter PI dan CBR dapat digunakan sebagai variabel prediktif dalam perencanaan perkerasan lentur berbasis kinerja.

Kesimpulan Analisis Statistik

1. Terdapat korelasi positif kuat antara PI dan tingkat kerusakan.
2. Terdapat korelasi negatif kuat antara CBR dan tingkat kerusakan.
3. Model regresi berganda mampu menjelaskan hubungan kuantitatif karakteristik tanah terhadap kerusakan.
4. PI dan CBR dapat digunakan sebagai parameter pemodelan prediktif kerusakan perkerasan lentur.

4.7 Interpretasi Klasifikasi Tanah (USCS dan AASHTO)

Klasifikasi tanah dilakukan untuk mengidentifikasi kelompok tanah berdasarkan sifat indeks dan distribusi ukuran butiran. Pada penelitian ini digunakan dua sistem klasifikasi utama, yaitu:

1. **Unified Soil Classification System (USCS)**
2. **AASHTO Soil Classification System**

Kedua sistem tersebut digunakan karena relevan dalam analisis geoteknik dan perencanaan perkerasan jalan.

4.7.1 Klasifikasi Berdasarkan USCS

Sistem USCS mengklasifikasikan tanah berdasarkan:

- Persentase lolos saringan No. 200 (0,075 mm)
- Nilai batas cair (LL)
- Indeks plastisitas (PI)
- Posisi terhadap A-line pada grafik plastisitas

Tabel 4.10 Parameter Utama Hasil Penelitian

Kategori	% Lolos No.200	LL (%)	PI (%)
Ringan	14,08%	50,16	24,04
Sedang	7,77%	56,42	28,95
Berat	3,52%	59,97	32,65

Sumber : Analisis USCS

Keterangan :

1. **Persentase lolos No.200 < 50%**
→ Tanah tergolong tanah berbutir kasar (coarse-grained soil).
2. Fraksi dominan adalah pasir (85–93%)
→ Termasuk kelompok **pasir (S)**.
3. Mengandung fraksi halus plastis (PI > 7 dan LL > 50).
Posisi PI berada **di atas A-line** pada diagram plastisitas.

Tabel 4.11 Berdasarkan kriteria USCS, tanah diklasifikasikan sebagai :

Kategori	Klasifikasi USCS	Interpretasi
Ringan	SC	Clayey Sand (pasir berlempung)
Sedang	SC	Clayey Sand
Berat	SC	Clayey Sand plastis tinggi

Sumber : Interpretasi Geoteknik

Tanah tipe **SC (Clayey Sand)** memiliki karakteristik:

- Daya dukung sedang hingga rendah saat jenuh
- Sensitif terhadap perubahan kadar air
- Potensi deformasi plastis dan ekspansif karena fraksi lempung aktif

Pada lokasi dengan PI tertinggi (32,65%), tanah SC menunjukkan kecenderungan perilaku mendekati lempung plastis tinggi.

4.7.2 Klasifikasi Berdasarkan AASHTO

Sistem AASHTO lebih spesifik digunakan untuk evaluasi tanah dasar (subgrade) jalan raya.

Parameter utama:

- Persentase lolos saringan No. 10, 40, dan 200
- LL
- PI

Evaluasi Berdasarkan Data Penelitian

Karakteristik umum:

- % lolos No.200 < 35%
- LL > 40%
- PI > 10%

Berdasarkan tabel klasifikasi AASHTO, tanah termasuk dalam kelompok:

A-2-7

Penjelasan Kelompok A-2-7

Kelompok A-2-7 adalah:

Pasir atau kerikil berlempung dengan plastisitas tinggi.

Ciri khas:

- Subgrade kualitas sedang hingga buruk
- Sensitif terhadap air
- Nilai CBR umumnya rendah
- Memerlukan peningkatan struktural pada desain perkerasan

4.7.3 Perhitungan Group Index (GI)

Group Index dihitung dengan rumus:

$$GI = (F - 35)[0,2 + 0,005(LL - 40)] + 0,01(F - 15)(PI - 10)$$

Dimana:

F = % lolos No.200

Karena $F < 35\%$, maka komponen pertama bernilai nol.

Dengan PI tinggi (>24%), diperoleh estimasi:

$$GI \approx 5-12$$

Tabel 4.12 Interpretasi GI

GI	Kualitas Subgrade
0-4	Baik
5-9	Sedang
>10	Buruk

Sumber : Analisis

Sehingga tanah subgrade di Desa Jumput tergolong:

Kualitas sedang hingga buruk

Hal ini konsisten dengan nilai CBR lapangan yang rendah (~1-3%).

4.7.4 Sintesis Klasifikasi terhadap Kerusakan Perkerasan

Konsistensi USCS dan AASHTO

- USCS → SC (Clayey Sand)
- AASHTO → A-2-7
- GI menunjukkan subgrade kualitas sedang–buruk
- PI tinggi (24–32%)
- CBR rendah (~1–3%)

Implikasi terhadap Perkerasan Lentur

Tanah SC / A-2-7 dengan PI tinggi memiliki:

- Modulus resilien rendah saat jenuh
- Potensi pumping pada kondisi lalu lintas berulang
- Deformasi permanen (rutting)
- Retak akibat perubahan volumetrik

Secara mekanistik:

Kerusakan naik (berat), jika Nilai *PI* besar dan Nilai *CBR* Rendah

4.7.5 Hubungan Klasifikasi dengan Model Regresi

Hasil regresi sebelumnya menunjukkan:

$$D = -3,85 + 0,19(PI) - 0,65(CBR)$$

Klasifikasi SC dan A-2-7 mendukung model tersebut karena:

- Fraksi halus plastis tinggi → meningkatkan PI
- Plastisitas tinggi → menurunkan CBR efektif
- Kombinasi tersebut meningkatkan indeks kerusakan

Dengan demikian, klasifikasi tanah memperkuat validitas model statistik yang telah dikembangkan.

Kesimpulan Interpretatif

1. Tanah subgrade di lokasi penelitian tergolong **SC (Clayey Sand)** menurut USCS.
2. Berdasarkan AASHTO termasuk kelompok **A-2-7** dengan Group Index sedang–tinggi.

3. Klasifikasi menunjukkan subgrade berkualitas sedang hingga buruk.
4. Hasil klasifikasi konsisten dengan:
 - Nilai PI tinggi
 - Nilai CBR rendah
 - Tingkat kerusakan perkerasan yang meningkat
5. Parameter klasifikasi dapat digunakan sebagai indikator awal dalam pemodelan kerusakan perkerasan lentur.

4.8 Formulasi Model Matematis Pemodelan Kerusakan Perkerasan

4.8.1 Konsep Dasar Pemodelan

Kerusakan perkerasan lentur pada penelitian ini diasumsikan dikontrol oleh tiga mekanisme utama:

1. **Kapasitas dukung tanah (Strength-controlled damage)** → direpresentasikan oleh CBR
2. **Deformasi plastis volumetrik (Plasticity-controlled damage)** → direpresentasikan oleh PI
3. **Tekanan pengembangan (Swelling pressure-induced distress)** → direpresentasikan oleh tekanan pengembangan (P_s)

Secara umum:

$$D = f(CBR, PI, P_s)$$

dengan:

- D = indeks kerusakan perkerasan
- CBR = California Bearing Ratio (%)
- PI = Indeks Plastisitas (%)
- P_s = Tekanan pengembangan (kPa)

4.8.2 Pendekatan Mekanistik–Empiris

Secara mekanika perkerasan lentur:

$$\varepsilon_v \propto \frac{\sigma}{E_{sg}}$$

dimana:

- ε_v = regangan vertikal subgrade

- σ = tegangan akibat beban lalu lintas
- E_{sg} = modulus subgrade

Hubungan empiris umum:

$$E_{sg} = k(CBR)^m$$

Dengan pendekatan klasik:

$$E_{sg} \approx 10 \times CBR(MPa)$$

Sehingga:

$$\varepsilon_v \propto \frac{1}{CBR}$$

Karena kerusakan akibat rutting berbanding lurus dengan regangan permanen:

$$D \propto \frac{1}{CBR}$$

4.8.3 Pengaruh Plastisitas (PI)

Indeks plastisitas berkorelasi dengan:

- Aktivitas lempung
- Potensi perubahan kadar air
- Deformasi plastis berulang

Secara empiris:

$$\Delta V \propto PI$$

Sehingga kontribusi plastisitas terhadap kerusakan dapat dituliskan:

$$D \propto PI$$

4.8.4 Pengaruh Tekanan Pengembangan

Tekanan pengembangan menghasilkan gaya angkat (uplift force) pada lapisan perkerasan:

$$\sigma_{uplift} = P_s$$

Jika:

$$P_s > \sigma_{overburden}$$

maka terjadi heave dan retak reflektif.

Kontribusi tekanan pengembangan terhadap kerusakan:

$$D \propto P_s$$

4.8.5 Model Matematis Terintegrasi

Berdasarkan pendekatan di atas, model umum dapat dirumuskan sebagai:

$$D = k \left(\frac{PI^\alpha \cdot P_s^\beta}{CBR^\gamma} \right)$$

dimana:

- k = konstanta kalibrasi
- α, β, γ = koefisien sensitivitas

4.8.6 Model Linear Berganda

Untuk kepentingan regresi statistik:

$$D = \beta_0 + \beta_1 PI + \beta_2 CBR + \beta_3 P_s$$

Dengan batasan teoritis:

- $\beta_1 > 0$
- $\beta_2 < 0$
- $\beta_3 > 0$

4.8.7 Model Non-Linear (Model Power Law)

Model lebih representatif untuk perilaku tanah ekspansif:

$$D = a(PI)^b (CBR)^{-c} (P_s)^d$$

Dengan transformasi logaritmik:

$$\ln D = \ln a + b \ln PI - c \ln CBR + d \ln P_s$$

Model ini memungkinkan:

- Estimasi parameter menggunakan regresi linear pada data log
- Interpretasi sensitivitas eksponensial

4.8.8 Normalisasi Model (Damage Index Tak Berdimensi)

Untuk generalisasi lintas lokasi:

$$D^* = \frac{D}{D_{max}}$$

Sehingga model menjadi:

$$D^* = \left(\frac{PI}{PI_{ref}} \right)^\alpha \left(\frac{CBR_{ref}}{CBR} \right)^\gamma \left(\frac{P_s}{P_{ref}} \right)^\beta$$

Dimana nilai referensi diambil dari kondisi subgrade standar desain.

4.8.9 Interpretasi Fisik Model

Model menunjukkan bahwa:

- Kerusakan meningkat secara non-linear terhadap peningkatan PI
- Kerusakan meningkat tajam saat CBR rendah
- Tekanan pengembangan mempercepat inisiasi retak dan deformasi

Secara limit state:

$$D \rightarrow \infty \text{ ketika } CBR \rightarrow 0$$

yang konsisten dengan teori kapasitas dukung tanah.

4.8.10 Kriteria Batas Kerusakan

Berdasarkan model, kondisi kritis terjadi saat:

$$\frac{PI \cdot P_s}{CBR} > C_{critical}$$

Parameter ini dapat digunakan sebagai:

Indeks Kerentanan Subgrade (Subgrade Vulnerability Index, SVI)

$$SVI = \frac{PI \cdot P_s}{CBR}$$

Tabel 4.13 Interpretasi SVI

SVI	Kategori
< 50	Aman
50–100	Moderat
> 100	Rentan tinggi

Sumber : Analisis

4.8.11 Integrasi dengan Hasil Klasifikasi Tanah

Untuk tanah SC / A-2-7:

- PI tinggi
- CBR rendah
- Sensitif terhadap air

Sehingga secara matematis:

$$SVI \uparrow (\text{naik}) \Rightarrow D \uparrow (\text{naik})$$

Hal ini konsisten dengan hasil observasi lapangan.

Kesimpulan Formulasi Model

1. Kerusakan perkerasan dapat dimodelkan sebagai fungsi rasio plastisitas dan kapasitas dukung.
2. Model power-law lebih representatif untuk tanah ekspansif.
3. Indeks kerentanan (SVI) dapat digunakan sebagai parameter prediktif awal.
4. Model memungkinkan kalibrasi lokal untuk keperluan desain berbasis kinerja.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis laboratorium, pengujian lapangan, klasifikasi tanah, serta pemodelan statistik dan matematis terhadap karakteristik tanah subgrade dan tingkat kerusakan perkerasan lentur, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Karakteristik Fisik dan Mekanik Tanah Subgrade

- a. Tanah subgrade didominasi fraksi pasir dengan kandungan butiran halus plastis.
- b. Nilai Indeks Plastisitas (PI) berada pada rentang 24,04%–32,65%, menunjukkan plastisitas sedang hingga tinggi.
- c. Nilai CBR lapangan tergolong sangat rendah ($\pm 1-3\%$), mengindikasikan daya dukung subgrade yang buruk.
- d. Berdasarkan klasifikasi:
 - Termasuk kelompok **SC (Clayey Sand)** menurut USCS.
 - Termasuk kelompok **A-2-7** menurut AASHTO dengan kualitas subgrade sedang hingga buruk.

Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa tanah memiliki sensitivitas tinggi terhadap perubahan kadar air dan berpotensi mengalami deformasi plastis serta pengembangan.

2. Hubungan Statistik antara Parameter Tanah dan Kerusakan

- a. Terdapat korelasi positif antara PI dan tingkat kerusakan perkerasan, yang menunjukkan bahwa peningkatan plastisitas tanah meningkatkan potensi deformasi dan retak.
- b. Terdapat korelasi negatif antara CBR dan tingkat kerusakan, dimana semakin rendah daya dukung tanah, semakin tinggi tingkat kerusakan yang terjadi.
- c. Model regresi linear berganda menunjukkan bahwa PI dan CBR merupakan variabel prediktor signifikan terhadap indeks kerusakan.

3. Formulasi Model Matematis Kerusakan

Model matematis terintegrasi yang diperoleh adalah:

$$D = k \left(\frac{PI^\alpha \cdot P_s^\beta}{CBR^\gamma} \right)$$

atau dalam bentuk regresi linear:

$$D = \beta_0 + \beta_1 PI + \beta_2 CBR + \beta_3 P_s$$

Model menunjukkan bahwa:

- Kerusakan meningkat secara non-linear terhadap kenaikan PI dan tekanan pengembangan.
- Kerusakan meningkat signifikan ketika nilai CBR rendah.
- Rasio $\frac{PI}{CBR}$ merupakan indikator dominan dalam memprediksi kerusakan.

Dari model tersebut diperkenalkan parameter baru berupa:

$$SVI = \frac{PI \cdot P_s}{CBR}$$

yang didefinisikan sebagai **Indeks Kerentanan Subgrade**, dan dapat digunakan sebagai indikator awal risiko kerusakan perkerasan lentur.

4. Implikasi terhadap Perilaku Perkerasan Lentur

Tanah dengan plastisitas tinggi dan daya dukung rendah menyebabkan:

- Peningkatan regangan vertikal subgrade
- Terjadinya deformasi permanen (rutting)
- Retak lelah (fatigue cracking)
- Gelombang dan ketidakrataan permukaan

Dengan demikian, karakteristik tanah subgrade terbukti berpengaruh signifikan terhadap kinerja struktural perkerasan lentur.

5.2 Kontribusi Penelitian

Penelitian ini memberikan kontribusi sebagai berikut:

1. Mengintegrasikan parameter indeks tanah (PI), parameter kekuatan (CBR), dan tekanan pengembangan dalam satu model matematis terpadu.
2. Mengembangkan konsep **Indeks Kerentanan Subgrade (SVI)** sebagai pendekatan prediktif awal.

3. Menyediakan pendekatan mekanistik–empiris untuk pemodelan kerusakan berbasis karakteristik tanah lokal.

5.3 Keterbatasan Penelitian

Beberapa keterbatasan dalam penelitian ini antara lain:

1. Jumlah titik pengujian CBR dan DCP masih terbatas.
2. Variabel beban lalu lintas (ESAL) belum dimasukkan secara eksplisit dalam model.
3. Pengaruh fluktuasi musiman kadar air belum dianalisis secara longitudinal.
4. Parameter modulus resilien (M_r) belum diuji secara langsung melalui pengujian triaxial siklik.

5.4 Saran

1. Saran Teknis

- a. Pada tanah dengan $PI > 30\%$ dan $CBR < 3\%$, direkomendasikan:
 - Stabilisasi tanah menggunakan kapur atau semen.
 - Penambahan tebal lapis pondasi bawah.
 - Sistem drainase subgrade yang efektif.
- b. Pengujian tekanan pengembangan perlu dijadikan parameter standar pada wilayah dengan indikasi tanah ekspansif.

2. Saran Pengembangan Model

- a. Model matematis perlu dikalibrasi menggunakan jumlah data yang lebih besar.
- b. Perlu dilakukan integrasi dengan parameter beban lalu lintas kumulatif (ESAL).
- c. Pengujian modulus resilien (M_r) disarankan untuk meningkatkan akurasi pendekatan mekanistik.
- d. Model dapat dikembangkan menjadi sistem prediksi berbasis machine learning untuk skala jaringan jalan.

3. Saran Penelitian Lanjutan

1. Analisis numerik menggunakan metode elemen hingga (finite element) untuk memodelkan interaksi tanah–perkerasan.
2. Studi pengaruh variasi musim terhadap perubahan nilai CBR dan tekanan pengembangan.
3. Validasi model pada lokasi berbeda dengan klasifikasi tanah yang beragam.

5.5 Penutup

Berdasarkan keseluruhan hasil analisis, dapat ditegaskan bahwa karakteristik tanah subgrade yang ditinjau melalui nilai CBR, Indeks Plastisitas, dan tekanan pengembangan memiliki pengaruh signifikan terhadap tingkat kerusakan perkerasan lentur. Model matematis yang dikembangkan dalam penelitian ini dapat digunakan sebagai pendekatan prediktif dalam perencanaan dan evaluasi kinerja perkerasan berbasis kondisi tanah lokal.

DAFTAR PUSTAKA

- Adhikary, R. et al. (2018). *Influence of Expansive Clay Subgrade on Flexible Pavement Failure*.
- Broms, B. B. (1990). *Soil Mechanics and Foundation Engineering*.
- Chen, F. H. (1988). *Foundations on Expansive Soils*. Elsevier.
- Kusuma, D., & Widodo, A. (2022). *Model Korelasi Parameter Tanah terhadap Kinerja Perkerasan Lentur*.
- Nelson, J. D., & Miller, D. J. (1992). *Expansive Soils: Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*. Wiley.
- Putra, H. et al. (2021). *Evaluasi Kondisi Tanah Subgrade terhadap Kerusakan Jalan di Daerah Tanah Ekspansif*.
- Rahman, M. A., & Ali, N. (2017). *Effect of Subgrade Characteristics on Flexible Pavement Performance*.
- Sahoo, S. et al. (2020). *Predicting Pavement Distress using Soil Strength Parameters. International Journal of Pavement Engineering*.
- Siregar, R. (2023). *Hubungan Antara Karakteristik Tanah Subgrade dan Indeks Kerusakan Jalan Menggunakan Metode PCI*.
- Wulandari, A. (2020). *Analisis Hubungan Nilai CBR dengan Indeks Plastisitas pada Tanah Subgrade di Kabupaten Grobogan*.