

ILMU GEOTEKNIK



PENULIS :

**Fathur Rahman Rustan, Iis Roin Widiati, Christy Gery Buyang,
Adiguna, Dora Melati Nurita Sandi, Erny, Bagus Eko Prasetyo,
Komang Arya Utama**

ILMU GEOTEKNIK

**Fathur Rahman Rustan
Iis Roin Widiati
Christy Gery Buyang
Adiguna
Dora Melati Nurita Sandi
Erny
Bagus Eko Prasetyo
Komang Arya Utama**



GET PRESS INDONESIA

ILMU GEOTEKNIK

Penulis :

Fathur Rahman Rustan
Iis Roin Widiati
Christy Gery Buyang
Adiguna
Dora Melati Nurita Sandi
Erny
Bagus Eko Prasetyo
Komang Arya Utama

ISBN : 978-623-125-037-7

Editor : Ari Yanto M.Pd

Penyunting : Tri Putri Wahyuni,S.Pd

Desain Sampul dan Tata Letak : Atyka Trianisa, S.Pd

Penerbit : GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi :

Jln. Palarik Air Pacah No 26 Kel. Air Pacah
Kec. Koto Tangah Kota Padang Sumatera Barat
Website : www.getpress.co.id
Email : adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Januari 2024

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan
dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT dalam segala kesempatan. Sholawat beriring salam dan doa kita sampaikan kepada Nabi Muhammad SAW. Alhamdulillah atas Rahmat dan Karunia-Nya penulis telah menyelesaikan Buku Ilmu Geoteknik ini.

Buku ini membahas Pengantar Ilmu Geoteknik, Mekanika Tanah, Penilaian Risiko Bencana Alam, Pengaruh Lingkungan Terhadap Tanah, Penguatan Tanah dan Pondasi, Rekayasa Bawah Permukaan, Rekayasa Geoteknik pada Proyek Bangunan Tinggi, Geoteknik dalam Perencanaan Tata Ruang.

Proses penulisan buku ini berhasil diselesaikan atas kerjasama tim penulis. Demi kualitas yang lebih baik dan kepuasan para pembaca, saran dan masukan yang membangun dari pembaca sangat kami harapkan.

Penulis ucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung dalam penyelesaian buku ini. Terutama pihak yang telah membantu terbitnya buku ini dan telah mempercayakan mendorong, dan menginisiasi terbitnya buku ini. Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi masyarakat Indonesia.

Padang, Januari 2024

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTARTABEL	x
BAB 1 PENGANTAR ILMU GEOTEKNIK.....	1
1.1 Definisi Ilmu Geoteknik	1
1.2 Ilmu Geoteknik Dari Masa Ke Masa	2
1.2.1 Sebelum Abad Ke-18.....	2
1.2.2 Metode Mekanika Tanah Pra-klasik (1700 – 1776).....	2
1.2.3 Mekanika Tanah Klasik – Tahap I (1776 – 1856).....	3
1.2.4 Mekanika Tanah Klasik – Tahap II (1856 – 1910).....	3
1.2.5 Mekanika Tanah Modern (1910 – 1927).....	4
1.3 Peran Geoteknik dalam Rekayasa.....	4
1.4 Penutup.....	7
DAFTAR PUSTAKA.....	9
BAB 2 MEKANIKA TANAH.....	11
2.1 Pendahuluan	11
2.2 Konsep Dasar Mekanika Tanah	11
2.2.1 Kompaksi Tanah.....	12
2.3 Sifat-Sifat Tanah.....	13
2.3.1 Kekakuan (<i>Stiffness</i>)	13
2.3.2 Kondisi Kohesi (<i>Cohesion</i>).....	14
2.3.3 <i>Friction Angle</i> (Sudut Geser).....	14
2.3.4 Kepadatan (<i>Density</i>)	14
2.3.5 Tekanan Porositas (<i>Porosity</i>).....	15
2.4 Uji Laboratorium Mekanika Tanah	15
2.4.1 Uji Kepadatan	15
2.4.2 Uji Kekakuan	16
2.4.3 Uji Kohesi.....	17
2.4.4 Uji Sudut Geser	17
2.4.5 Uji Permeabilitas	18
2.4.6 Uji Atterberg	18
2.5 Analisis Stabilitas.....	19
2.5.1 Analisis Stabilitas Lereng.....	19

2.5.2 Analisis Stabilitas Pondasi.....	20
2.5.3 Analisis Stabilitas Dinding Penahan Tanah	23
2.6 Perpindahan Tanah.....	25
2.6.1 Perpindahan Horizontal	25
2.6.2 Perpindahan Vertikal.....	27
2.7 Perbaikan Tanah	29
2.7.1 Penggalan dan Penggantian	29
2.7.2 Pemadatan Tanah.....	29
2.7.3 Pemadatan Tanah Penggunaan Bahan Tambahan.....	30
2.7.4 Penurunan Air Tanah.....	30
2.7.5 Penstabilan Lereng	30
DAFTAR PUSTAKA.....	32
BAB 3 PENILAIAN RESIKO BENCANA ALAM	33
3.1 Pendahuluan	33
3.2 Banjir.....	34
3.3 Tanah Longsor.....	35
3.4 Gunung Meletus.....	36
3.5 Angin Topan	37
3.6 Tsunami	38
3.7 Penilaian Risiko secara umum.....	39
3.8 Manfaat Penilaian Risiko	41
3.9 Pemetaan Bencana Alam	42
DAFTAR PUSTAKA.....	46
BAB 4 PENGARUH LINGKUNGAN TERHADAP TANAH....	47
4.1 Pendahuluan	47
4.2 Kandungan Air	48
4.2.1 Perubahan Kadar Air Terhadap Parameter Kuat Geser Tanah.....	48
4.2.2 Kadar Air Terhadap Nilai Konsolidasi di Tanah	50
4.2.3 Peningkatan Kadar Air Terhadap Parameter Kekuatan Tanah.....	53
4.2.4 Pengaruh Perubahan Kadar Air Terhadap Uji Geser Langsung	55
4.2.5 Pengaruh Siklus Basah Kering Terhadap Perilaku Mekanik Tanah.....	58

4.2.6 Pengaruh Nilai Indeks Plastisitas Tanah Lempung Terhadap Perubahan Kuat Kokoh Tanah	60
4.3 Suhu	63
4.3.1 Pengaruh Suhu Terhadap Sifat Mekanis Tanah	63
4.3.2 Pengaruh Temperature Terhadap Perilaku Geser Tanah	68
4.3.3 Pengaruh Suhu terhadap Kinerja Fly Ash pada Tanah	70
4.3.4 Pengaruh Suhu Terhadap Daya Dukung Tanah Lunak.....	74
4.4 Tekanan dan Beban	76
4.4.1 Percepatan Proses Konsolidasi Tanah Dengan Aplikasi Tekanan Vakum dan Drainase Vertikal...77	
4.4.2 Penurunan Dan Waktu Konsolidasi Tanah Lunak Menggunakan Metode Preloading Dan Pre-Fabricated Vertical Drain.....	78
4.5 Aktivitas Biologis	82
4.5.1 Limbah Bauksit Dan Bakteri Probiotik Terhadap Karakterisasi Sifat Fisik Dan Mekanik Tanah Timbunan.....	82
4.5.2 Bio-Enzymes Terhadap Stabilisasi Tanah Ekspansif.....	85
4.5.3 Pengaruh Kultur Bakteri Pada Proses Biosementasi Tanah Laterit Terhadap Nilai CBR.....	86
4.5.4 Efek Gradasi Tanah Pasir Pada Penggunaan Jamur Rhizopus Oligosporus untuk Perbaikan Tanah Pasir Lepas	90
4.5.5 Pengaruh <i>Microbially Induced Calcite Precipitation</i> (MICP) terhadap Perilaku Kuat Geser Tanah Terkontaminasi Batubara	92
4.6 Kondisi Hidrologi.....	93
4.6.1 Pengaruh Curah Hujan Harian Maksimum Bulanan Terhadap Stabilitas Lereng	93

4.6.2 Analisis Stabilitas Lereng Berdasarkan Pengaruh Hujan Bulanan Maksimum Menggunakan Metode Bishop Disederhanakan...	97
4.7 Ketinggian Tempat dan Iklim	102
4.7.1 Longsor Akibat Perubahan Iklim	102
4.7.2 Perubahan Iklim Terhadap Penurunan Nilai Kohesivitas Tanah	104
DAFTAR PUSTAKA.....	108
BAB 5 PENGUATAN TANAH DAN PONDASI	111
5.1 Pendahuluan	111
5.2 Sheet Pile.....	112
5.2.2 Sheet Pile Kayu	113
5.2.3 Sheet Pile Beton	114
5.2.3 Sheet Pile Baja	114
5.3 Slurry	115
5.4 <i>Compaction</i> (Pemadatan Tanah).....	116
5.5 Stabilisasi Tanah.....	117
5.6 <i>Preloading</i> (<i>Surcharging</i>).....	117
5.7 Geotextile.....	119
DAFTAR PUSTAKA.....	122
BAB 6 REKAYASA BAWAH PERMUKAAN	125
6.1 Rekayasa Bawah Permukaan	125
6.2 Rekayasa Bawah Permukaan Dengan Perbaikan Tanah Dan Perkuatan Tanah	125
6.2.1 Perbaikan Tanah	126
6.2.2 Perkuatan Tanah.....	131
DAFTAR PUSTAKA.....	135
BAB 7 KEGAGALAN REKAYASA GEOTEKNIK PADA KASUS GALIAN DALAM.....	137
7.1 Pendahuluan	137
7.2 Keruntuhan Nicoll Highway, Singapura, 2004.....	138
7.2.1 Deskripsi Kejadian di Lapangan	139
7.2.2 <i>Lessons Learned</i>	142
7.3 Keruntuhan Xianghu Metro Station, Hangzhou, China, 2008.....	143
7.3.1 Analisis Penyebab Keruntuhan.....	145
7.3.2 <i>Lessons Learned</i>	148

7.4 Keruntuhan Struktur Square Foundation Pit, Guangzhou Haizhu City, China.....	149
7.4.1 Analysis Penyebab Keruntuhan.....	151
7.4.2 Lessons Learned.....	152
DAFTAR PUSTAKA.....	153
BAB 8 GEOTEKNIK DALAM PERENCANAAN	
TATA RUANG	155
8.1 Umum.....	155
8.2 Karakteristik Geoteknik Sebuah Wilayah	156
8.2.1 Stratifikasi Tanah.....	156
8.2.2 Parameter Geoteknik.....	159
8.2.3 Lereng dan hidrogeologi	163
8.2.4 Patahan.....	164
8.3 Peran Geoteknik dalam Perencanaan Tata Ruang	165
8.3.1 Informasi geoteknik sebagai dasar penataan ruang	165
8.3.2 Perencanaan tata ruang berbasis ancaman bahaya geologis.....	166
8.3.3 Geoteknik dalam pembangunan berkelanjutan	168
DAFTAR PUSTAKA.....	170
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1. Contoh Pemetaan Kawasan Bencana.....	43
Gambar 4.1. Hubungan Tegangan geser dengan kadar air tanah.....	48
Gambar 4.2. Hubungan Sudut Geser Dalam dengan Kadar Air	49
Gambar 4.3. Hubungan Kohesi dengan Kadar Air	50
Gambar 4.4. Kuat Geser Tanah Terhadap Lama Penjenuhan	54
Gambar 4.5. Grafik Hubungan Persentase Kadar Air Dengan q_u & c_u	56
Gambar 4.6. Grafik perbandingan uji CBR soaked.....	59
Gambar 4.7. Indeks Plastisitas dan Perubahan Kuat Kokoh Tanah	62
Gambar 4.8. Grafik Hubungan Antara Gaya Tekan	66
Gambar 4.9. Perilaku Kuat Tekan Bebas pada Suhu Ruangan.....	68
Gambar 4.10. Campuran Tanah Dan Fly Ash Variasi Pemeraman	72
Gambar 4.11. Grafik Hubungan Antara Nilai CBR_{Lab}	76
Gambar 4.12. Variasi Nilai Koefisien Kecepatan Konsolidasi Global	78
Gambar 4.13. Perbandingan Grafik Penurunan Antara Metode Analitis, MEH Dan Pembacaan Settlement Plate Di Lapangan.....	81
Gambar 4.14. Hasil Pengamatan Dengan Mikroskop Digital Untuk Sampel Tanah Setelah Perbaikan	31
Gambar 4.15. Prilaku Kuat Geser Tanah	93
Gambar 4.16. Hubungan Antara Kemiringan Lereng Dengan Faktor Keamanan (SF)	95
Gambar 4.17. Grafik Hubungan <i>Safety factor</i> (SF) dengan Kemiringan Lereng Sebelum dan Sesudah Hujan.....	98

Gambar 4.18. Grafik Hubungan antara SF dan Intensitas Hujan untuk Tutupan Lahan Eksisting.....	100
Gambar 5.1. (a) sheet pile baja sebagai bracing pada kondisi tanah yang bervariasi (b) sheet pile baja yang digunakan untuk caisson di tanah aluvial dekat Kings Lynn, Norflok	113
Gambar 5.2. Berbagai jenis turap kayu dan beton.	114
Gambar 5.3. Panel beton pracetak ditempatkan pada parit slurry untuk membentuk bagian dinding basement yang ditambatkan kembali	115
Gambar 5.4. Grafik hubungan berat volume tanah dengan kadar air.	117
Gambar 5.5. Aplikasi PVD.....	118
Gambar 5.6. Waktu penurunan konsolidasi dengan dan tanpa PVD	119
Gambar 5.7. Distribusi ukuran pori pada Geotextile	121
Gambar 6.1. Skema Dan Penerapan <i>Prefabricated Vertical Drains</i>	127
Gambar 6.2. Prinsip Kerja <i>Vacuum Preloading Method</i> ..	127
Gambar 6.3. (a) <i>m.a.t</i> sebelum dipompa (<i>effluent stream</i>) ; (b) <i>m.a.t</i> setelah pemompaan (<i>Influent stream</i>)	128
Gambar 6.4. Skema dan Penerapan <i>Vibroflotation</i>	130
Gambar 6.5. Tahapan Pelaksanaan <i>Stone Column</i>	130
Gambar 6.7. Skema Dan Penerapan <i>Dynamic Compaction</i>	131
Gambar 6.8. Batuan Lapis Berkurang Kekuatannya Karena Terpisah Akibat Migrasi Lempung.....	132
Gambar 6.9. Perbandingan Struktur Drainase Dengan Filter Konvensional Dan Geotekstil	133
Gambar 6.10. Macam-macam Cara Perletakan Geotekstil Pada Timbunan Di Atas Tanah Lunak.	133

Gambar 7.1. Diagram Alir Analisis dan Desain Galian Dalam	138
Gambar 7.2. Sketsa lapangan dan lokasi titik penyelidikan tanah dan monitoring deformasi.....	140
Gambar 7.3. Wilayah terdampak akibat keruntuhan di sekitar lokasi Nicoll Highway	140
Gambar 7.4. Grafik pengukuran Inclinator I-104, deformasi lateral dinding diafragma terhadap waktu.	142
Gambar 7.5. Denah keruntuhan galian N2 beserta area terdampak.....	144
Gambar 7.6. Kondisi pasca kegagalan struktur.	145
Gambar 7.7. Keruntuhan sisi selatan Foundation Pit.....	150
Gambar 7.8. Keruntuhan struktur bangunan eksisting di sebelah galian.....	150
Gambar 7.9. Penurunan permukaan tanah dan Cap Failure.....	151
Gambar 8.1. Stratifikasi tanah hasil uji sampel bor inti	158
Gambar 8.2. Peta tektonik sesar aktif Indonesia.....	164
Gambar 8.3. Zona tipe potensi longsor.....	168

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1. Klasifikasi Tanah Menurut Gautier's (1717)	2
Tabel 4.1. Nilai Koefisien Konsolidasi.....	51
Tabel 4.2. Sifat Fisis Lempung Setelah Dipanaskan	64
Tabel 4.3. Hasil Pengujian CBR Laboratorium.....	75
Tabel 4.4. Hasil Penurunan Berdasarkan Tahap Penimbunan.....	80
Tabel 4.5. Hasil Pengujian Sifat-Sifat Fisik Lumpur Merah Kondisi Asli	83
Tabel 4.6. Karakteristik Fisik Tanah.....	88
Tabel 4.7. Karakteristik Mekanik Tanah	88
Tabel 4.8. Perhitungan Angka Keamanan Lereng Metoda Bhosop.....	103
Tabel 4.9. Hasil Perhitungan Penurunan Nilai Kohesivitas Tanah.....	105
Tabel 8.1. Parameter statifikasi tanah dalam ilmu geoteknik	157
Tabel 8.2. Nilai konsistensi tanah.....	161
Tabel 8.3. Kisaran nilai permeabilitas tanah (k) pada temperatur 20° C	162
Tabel 8.4. Klasifikasi lereng.....	163

BAB 1

PENGANTAR ILMU GEOTEKNIK

Oleh Fathur Rahman Rustan

Dalam bidang Teknik Sipil, tanah merupakan elemen dasar yang perlu dipelajari karena tanah adalah tempat berdirinya bangunan-bangunan Teknik Sipil. Bangunan Teknik Sipil yang dibangun di atas perairan sekalipun masih memerlukan tanah untuk meletakkan pondasi hingga ke tanah dasar bahkan mencapai lapisan tanah keras. Seluruh beban struktur akan diteruskan oleh pondasi ke tanah dasar. Sebelum pelaksanaan konstruksi, pengetahuan terhadap sifat-sifat tanah dasar memegang peranan penting. Sehingga sifat-sifat tanah baik fisik dan mekanik serta hidraulika perlu diketahui dengan cermat. Selain itu, tanah didefinisikan untuk tujuan teknik sebagai campuran butiran mineral yang tidak disemen dan bahan organik yang membusuk, atau partikel padat, dengan cairan dan gas di ruang kosong di antara partikel padat. Tanah digunakan sebagai bahan konstruksi dan mendukung pondasi struktural. Akibatnya, insinyur teknik sipil harus memahami sifat-sifat tanah seperti asal-usulnya, distribusi ukuran butir, kemampuan mengalirkan air, kompresibilitas, kekuatan geser, dan kapasitas menahan beban.

1.1 Definisi Ilmu Geoteknik

Ilmu geoteknik merupakan cabang dari ilmu teknik sipil yang mempelajari tentang interaksi antara tanah dan struktur. Hal ini meliputi penilaian stabilitas tanah, perencanaan pondasi, dan analisis geoteknik. Geoteknik memainkan peran penting dalam bidang teknik sipil, terutama dalam perencanaan dan konstruksi struktur bangunan dan infrastruktur. Tanpa pemahaman yang baik tentang sifat-sifat tanah dan bagaimana tanah berinteraksi dengan struktur, maka struktur yang dibangun dapat menjadi tidak aman. Oleh karena itu, ilmu geoteknik sangat diperlukan dalam memastikan keamanan dan keandalan suatu proyek konstruksi.

1.2 Ilmu Geoteknik Dari Masa Ke Masa

1.2.1 Sebelum Abad Ke-18

Catatan mengenai kapan tanah digunakan sebagai bahan kontruksi bangunan untuk pertama kalinya oleh manusia telah hilang pada zaman kuno. Di dalam istilah keinsinyuran yang sebenarnya, pengertian rekayasa geoteknik seperti yang dikenal saat ini dimulai pada awal abad ke-18 (Skempton, 1985). Selama bertahun-tahun, seni rekayasa geoteknik dulu hanya berdasarkan pengalaman masa lalu melalui serangkaian eksperimen tanpa tahu karakteristik tanah yang sebenarnya. Berdasarkan eksperimen tersebut, banyak konstruksi bangunan sipil dibangun—ada yang sudah runtuh, ada pula yang masih berdiri hingga saat ini.

Setelah menemui beberapa kendala terkait pondasi selama konstruksi berlangsung hingga proyek selesai. Berabad-abad yang lalu, para insinyur dan ilmuwan mulai membahas sifat dan perilaku tanah dengan cara yang lebih metodis dimulai pada awal abad ke-18.

1.2.2 Metode Mekanika Tanah Pra-klasik (1700 – 1776)

Pada era ini dikonsentrasikan pada studi yang berkaitan dengan kemiringan tanah dan berbagai macam satuan berat jenis tanah, serta teori tekanan tanah semiempiris. Pada tahun 1717 seorang bangsawan Perancis insinyur, Henri Gautier (1660–1737), mempelajari kemiringan alami tanah ketika ditimbun untuk merumuskan prosedur desain dinding penahan. Sistem klasifikasi tanah menurut Gautier’s (1717) ditampilkan dalam tabel 1.1.

Tabel 1.1. Klasifikasi Tanah Menurut Gautier’s (1717)

Klasifikasi	Berat Unit	
	kN/m ³	Lb/ft ³
Batu	–	–
Pasir Keras	16,7 sampai	106 sampai
Pasir Kompresi	18,4	117
Tanah Biasa (seperti yang ditemukan di lahan kering)	13,4	85

Klasifikasi	Berat Unit	
Tanah Lunak (Terutama Lanau)	16,0	102
Tanah Liat	18,9	120
Tanah Gambut	–	–

Sumber : Das, 2010

1.2.3 Mekanika Tanah Klasik – Tahap I (1776 – 1856)

Di era ini, sebagian besar perkembangan di bidang teknik geoteknik berasal dari para insinyur dan ilmuwan di Perancis. Pada periode praklasik, hampir semua pertimbangan teoretis yang digunakan dalam menghitung tekanan tanah lateral pada dinding penahan didasarkan pada permukaan keruntuhan tanah yang sewenang-wenang. Dalam makalahnya yang terkenal yang dipresentasikan pada tahun 1776, ilmuwan Perancis Charles Agustin Coulomb (1736–1806) menggunakan prinsip kalkulus dalam penentuan posisi sebenarnya dari permukaan geser dalam tanah di belakang dinding penahan. Dalam analisis ini, Coulomb menggunakan hukum gesekan dan kohesi untuk benda padat. Studi terus berkembang dan berakhirnya Tahap I periode mekanika tanah klasik ditandai pada tahun (1857) publikasi pertama oleh William John Macquorn Rankine (1820–1872). Studi ini menyediakan sebuah teori penting tentang tekanan bumi dan keseimbangan massa bumi yang merupakan penyederhanaan teori Coulomb.

1.2.4 Mekanika Tanah Klasik – Tahap II (1856 – 1910)

Beberapa hasil percobaan dari uji laboratorium pada pasir muncul dalam berbagai literatur pada tahap ini. Salah satu publikasi paling awal dan terpenting adalah karya insinyur Prancis Henri Philibert Gaspard Darcy (1803–1858). Pada tahun 1856, ia menerbitkan penelitian tentang permeabilitas filter pasir. Berdasarkan pengujian tersebut, Darcy mendefinisikan istilah koefisien permeabilitas (atau konduktivitas hidrolis) tanah, suatu parameter yang sangat berguna dalam rekayasa geoteknik. Sir George Howard Darwin (1845–1912), seorang profesor astronomi, melakukan uji laboratorium untuk menentukan momen guling pada dinding yang menahan pasir dalam kondisi pemadatan lepas dan

padat. Kontribusi penting lainnya, yang diterbitkan pada tahun 1885 oleh Joseph Valentin Boussinesq (1842–1929), adalah pengembangan teori distribusi tegangan pada area bantalan beban secara homogen, medium semifinit, elastis, dan isotropik. Pada tahun 1887, Osborne Reynolds (1842–1912) mendemonstrasikan fenomena dilatensi pada pasir.

1.2.5 Mekanika Tanah Modern (1910 – 1927)

Pada era modern, hasil-hasil penelitian yang diterbitkan dilakukan terhadap tanah liat yang didalamnya ditetapkan sifat dasar dan parameter tanah liat. Publikasi yang paling terkenal dijelaskan selanjutnya.

Sekitar tahun 1908, Albert Mauritz Atterberg (1846–1916), seorang ahli kimia dan ilmuwan tanah Swedia, mendefinisikan fraksi ukuran tanah liat sebagai persentase berat partikel yang berukuran lebih kecil dari 2 mikron. Tahun 1911, Atterberg juga menjelaskan konsistensi tanah kohesif dengan menentukan batas cair, plastis, dan susut serta mendefinisikan indeks plastisitas sebagai selisih antara batas cair dan batas plastis. Studi terus berlanjutnya dalam rentan waktu tersebut sampai dengan tahun 1925 Terzaghi menerbitkan teori konsolidasi melalui bukunya yang terkenal Terzaghi *Erdbaumechanik*.

1.3 Peran Geoteknik dalam Rekayasa

Ilmu geoteknik memiliki peran yang sangat penting dalam aplikasi rekayasa teknik sipil. Geoteknik adalah cabang ilmu teknik sipil yang mempelajari perilaku tanah dan batuan dalam konteks rekayasa. Dengan memahami karakteristik geoteknik, insinyur sipil dapat merancang struktur yang kuat dan aman.

Dalam perekayasaan teknik sipil, seringkali kita jumpai penggunaan ilmu geoteknik diantaranya:

1. Pengkajian Site Investigation

Ilmu geoteknik memainkan peran kunci dalam melakukan pengkajian situs atau site investigation. Ini melibatkan penilaian dan analisis karakteristik tanah di lokasi rencana konstruksi. Informasi yang diperoleh dari pengkajian ini

- membantu insinyur untuk membuat keputusan yang informasional dan akurat.
2. **Perencanaan Pondasi**
Dalam rekayasa teknik sipil, pondasi adalah elemen kritis dari setiap struktur. Geoteknik memungkinkan insinyur untuk memahami kapabilitas dukungan tanah sehingga pondasi yang efektif dapat dirancang. Hal ini memastikan stabilitas dan daya dukung struktur di atasnya.
 3. **Analisis Stabilitas Lereng**
Ilmu geoteknik membantu dalam menganalisis stabilitas lereng, terutama di daerah berkontur dan berlereng tinggi. Dengan memahami karakteristik tanah dan tekanan air tanah, insinyur dapat menentukan ketinggian lereng yang aman dan menghindari potensi longsor.
 4. **Penilaian Risiko Gempa Bumi**
Geoteknik memiliki peran penting dalam menilai risiko gempa bumi pada struktur. Ini melibatkan analisis respons tanah terhadap gempa dan pengembangan desain yang dapat menanggulangi efek getaran tanah selama gempa bumi.
 5. **Desain Dinding Penahan Tanah**
Dalam kasus pembangunan di daerah berkontur, dinding penahan tanah sering diperlukan untuk mengatasi perubahan elevasi. Ilmu geoteknik membantu dalam merancang dinding penahan tanah yang dapat menahan tekanan tanah dengan aman.
 6. **Perencanaan Drainase**
Manajemen air tanah sangat penting dalam rekayasa teknik sipil. Ilmu geoteknik digunakan untuk merencanakan sistem drainase yang efektif, mencegah masalah perendaman tanah dan mempertahankan stabilitas tanah.
 7. **Desain Pondasi Mendalam**
Dalam kondisi tanah tertentu, pondasi mendalam seperti tiang pancang diperlukan untuk mendukung struktur. Geoteknik membantu dalam desain pondasi mendalam yang efisien dan aman untuk digunakan dalam kondisi tanah tertentu.

8. **Evaluasi Kelayakan Tanah Rawa**
Ilmu geoteknik memungkinkan insinyur untuk mengevaluasi kelayakan tanah rawa untuk pembangunan. Ini melibatkan analisis daya dukung tanah dan potensi permasalahan geoteknik yang mungkin muncul.
9. **Perencanaan Struktur Tambahan**
Dalam beberapa kasus, struktur tambahan seperti jembatan atau terowongan dapat diperlukan. Geoteknik membantu insinyur dalam merancang struktur tambahan dengan mempertimbangkan kondisi tanah dan batuan di sekitarnya.
10. **Monitoring Perilaku Tanah dan Struktur**
Setelah konstruksi, ilmu geoteknik terus berperan dalam memonitor perilaku tanah dan struktur. Ini memungkinkan deteksi dini perubahan kondisi geoteknik yang dapat mempengaruhi kestabilan struktur.
11. **Analisis Penurunan Tanah**
Ilmu geoteknik digunakan untuk menganalisis potensi penurunan tanah yang dapat mempengaruhi struktur. Analisis ini membantu dalam merencanakan tindakan pencegahan atau koreksi yang diperlukan.
12. **Rekayasa Lingkungan**
Dalam situasi di mana pembangunan dapat memengaruhi lingkungan sekitar, geoteknik terlibat dalam rekayasa lingkungan. Ini mencakup mitigasi dampak lingkungan dan perlindungan sumber daya alam.
13. **Pengelolaan Lumpur Lumpur dan Tanah Longsor**
Ilmu geoteknik memainkan peran penting dalam mengelola risiko lumpur dan tanah longsor. Analisis geoteknik membantu dalam merancang struktur yang dapat menahan potensi longsor dan mencegah kerusakan yang disebabkan oleh pergerakan tanah.
14. **Desain Retaining Wall**
Dalam situasi di mana perlu ada struktur penahan tanah, seperti pada tanah bertingkat atau berlereng, ilmu geoteknik membantu dalam merancang retaining wall yang efektif dan aman.

15. Pemilihan Bahan Konstruksi yang Tepat

Pengetahuan geoteknik membantu dalam pemilihan bahan konstruksi yang tepat sesuai dengan karakteristik tanah di lokasi konstruksi. Ini termasuk pemilihan agregat, tanah urug, dan bahan konstruksi lainnya.

16. Pengelolaan Air Tanah

Dalam proyek-proyek yang melibatkan perubahan kondisi air tanah, ilmu geoteknik digunakan untuk merencanakan strategi pengelolaan air tanah yang efektif dan berkelanjutan.

17. Desain Jalan dan Jembatan

Dalam rekayasa jalan dan jembatan, ilmu geoteknik membantu insinyur dalam merancang fondasi dan struktur penunjang yang kokoh, mengingat pembebanan lalu lintas dan karakteristik tanah di sekitar proyek.

18. Analisis Beban Dinamis

Geoteknik terlibat dalam analisis beban dinamis yang mungkin timbul dari aktivitas manusia atau gejala alam seperti gempa bumi. Hal ini penting untuk memastikan keamanan dan keandalan struktur.

19. Pemodelan Numerik

Pemodelan numerik menggunakan teknik geoteknik membantu insinyur dalam merencanakan dan memahami perilaku tanah.

Tanpa pemahaman yang baik tentang sifat-sifat tanah dan bagaimana tanah berinteraksi dengan struktur, maka struktur yang dibangun dapat menjadi tidak aman. Oleh karena itu, ilmu geoteknik sangat diperlukan dalam memastikan keamanan dan keandalan suatu proyek konstruksi.

1.4 Penutup

Dalam penutup bab ini, kita telah menjelajahi dunia yang luas dari ilmu geoteknik. Dari apa itu geoteknik, asal muasal ditemukannya rumusan karakteristik tanah yang kompleks hingga peran pentingnya dalam rekayasa teknik sipil.

Pada bab berikutnya perjalanan akan dimulai, bagaimana kita menyaksikan betapa krusialnya pemahaman terhadap perilaku tanah dan batuan dalam merancang pondasi, dinding penahan tanah, dan struktur lainnya. Geoteknik bukan hanya sekadar serangkaian rumus dan prinsip, melainkan pondasi yang kokoh bagi keselamatan dan keberlanjutan infrastruktur.

Selain itu, kita juga akan mengeksplorasi bagaimana ilmu geoteknik menjadi kunci dalam mengelola risiko bencana alam, seperti gempa bumi, tanah longsor, dan penurunan tanah. Kemampuannya untuk meramalkan dan merespon perubahan kondisi geologis memberikan pondasi yang solid untuk mitigasi risiko dan perlindungan lingkungan.

Sebagai pembaca, semoga pembahasan yang telah diberikan dapat memberikan pemahaman yang mendalam dan membuka mata akan kompleksitas dunia di bawah permukaan yang seringkali terlupakan. Ilmu geoteknik bukan hanya untuk insinyur, namun juga merupakan kunci bagi semua yang tertarik pada keberlanjutan dan keamanan infrastruktur modern.

Terakhir, mari terus menjelajahi dan memahami keajaiban ilmu geoteknik ini. Sebagai pengetahuan yang terus berkembang, kita dapat yakin bahwa kontribusi ilmu ini akan terus membentuk masa depan rekayasa teknik sipil. Semoga pengetahuan yang diperoleh dari buku ini memberikan inspirasi dan motivasi untuk terus berkontribusi pada perkembangan dan keberlanjutan dunia rekayasa teknik sipil.

DAFTAR PUSTAKA

- Das, B. M. 2010. *Principles of Geotechnical Engineering*. Seventh Edition. USA: Cengage Learning.
- Skempton, A. W. 1985. A History of Soil Properties (1717–1927). Proceedings, *International Conference XI on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, Golden Jubilee Volume, A. A. Balkema, 95–121.
- Venkatramalah, C. 2006. *Geotechnical Engineering*. Third Edition. India: New Age International (P) Limited Publisher

BAB 2

MEKANIKA TANAH

Oleh Iis Roin Widiati

2.1 Pendahuluan

Mekanika tanah merupakan salah satu cabang dari ilmu teknik sipil yang mempelajari perilaku dan sifat fisik tanah dan aplikasinya dalam proyek konstruksi. Studi mekanika tanah penting karena tanah berperan sebagai bagian dasar dari sebagian besar struktur yang dibangun. Tanah harus mampu menopang berat struktur dan beban yang akan ditanggung. Oleh karena itu, pemahaman yang baik tentang sifat-sifat tanah dan perilaku tanah saat diberi beban sangat penting dalam perencanaan dan desain struktur.

Pada bab ini penulis akan memberikan gambaran umum konsep dasar tentang mekanika tanah, penjelasan mengapa studi mekanika tanah penting dan bagaimana hubungannya dengan teknik sipil.

Mekanika tanah telah banyak digunakan dalam perencanaan dan desain berbagai struktur seperti jembatan, gedung, dan jalan raya. Oleh karena itu, mekanika tanah sangat penting bagi para insinyur sipil. Beberapa topik yang akan dibahas pada bab mekanika tanah ini adalah konsep dasar mekanika tanah, sifat-sifat tanah, uji laboratorium mekanika tanah, analisis stabilitas, perpindahan tanah dan perbaikan tanah.

2.2 Konsep Dasar Mekanika Tanah

Mekanika tanah mempelajari perilaku dan sifat fisik tanah dan batuan di bawah akibat pengaruh beban. Dalam analisis geoteknik, tanah sering dianggap sebagai materi isotropik yang homogen, meskipun dalam kenyataannya, tanah dapat memiliki karakteristik heterogen yang kompleks. Beban diterapkan pada tanah, dan mekanika tanah memeriksa bagaimana tanah akan merespon terhadap beban tersebut.

2.2.1 Kompaksi Tanah

Kompaksi tanah adalah proses rekayasa geoteknik yang penting dalam konstruksi sipil, yang bertujuan untuk meningkatkan kepadatan tanah dengan mengurangi volume pori-pori dalam struktur tanah. Ini merupakan langkah kunci dalam persiapan lahan sebelum pembangunan berbagai struktur, termasuk jalan raya, landasan bandara, fondasi bangunan, bendungan, dan banyak proyek infrastruktur lainnya. Proses kompaksi bertujuan untuk meningkatkan kekuatan, stabilitas, dan daya dukung tanah, sehingga meminimalkan risiko pergeseran atau penurunan struktur di atasnya. Berikut ini, akan diberikan penjelasan kompaksi tanah, termasuk tujuan, metode, dan peralatan yang digunakan dalam proses ini.

1. Tujuan Kompaksi Tanah

Tujuan utama dari kompaksi tanah adalah meningkatkan kepadatan atau kerapatan partikel-partikel tanah (dengan mengurangi volume pori-pori, tanah menjadi lebih padat, yang meningkatkan kekuatan dan daya dukungnya), meningkatkan daya dukung: (tanah yang telah dikompaksi memiliki kemampuan yang lebih baik untuk menopang beban struktural di atasnya), mencegah penurunan tanah (proses kompaksi juga membantu mengurangi risiko penurunan tanah yang dapat merusak struktur di atasnya.) dan meningkatkan kualitas Drainase (meningkatkan kemampuan tanah untuk mengalirkan air dengan baik, mengurangi risiko perembesan atau longsoran)

2. Metode Kompaksi Tanah

Ada beberapa metode yang digunakan untuk melakukan kompaksi tanah, dan pilihan metode tergantung pada jenis tanah, lokasi proyek, dan tujuan akhir. Beberapa metode kompaksi tanah yang umum meliputi:

- a. Meningkatkan Kompaksi Mekanis (*Mechanical Compaction*) adalah metode yang paling umum digunakan dalam kompaksi tanah. Ini melibatkan penggunaan alat berat seperti *roller* atau pemadat tanah untuk meratakan dan mengompres tanah. *Roller* dapat berbentuk statis

(tidak memiliki getaran) atau getaran, tergantung pada jenis tanah dan tingkat kompaksi yang diperlukan.

- b. *Vibrocompaction*, metode ini melibatkan penggunaan *vibrator* besar yang ditempatkan dalam tanah untuk mengguncang partikel-partikel tanah dan meningkatkan kepadatan. Ini efektif untuk tanah lunak dan reaktif seperti tanah berpasir.
- c. Pemadatan Dinamis (*Dynamic Compaction*), proses ini melibatkan penggunaan palu berat yang jatuh dari ketinggian tertentu untuk menciptakan kekuatan tekanan. Ini digunakan untuk tanah-tanah yang sangat lunak atau untuk menghancurkan lapisan keras dalam tanah.
- d. Injeksi Semen (*Soil Cement*), metode ini melibatkan pencampuran tanah dengan semen yang mengeras setelah dicampur dengan air. Ini membentuk tanah yang lebih kokoh dan tahan air. Metode ini digunakan dalam konstruksi pondasi dan landasan.
- e. Pemadatan Hidrolik (*Hydraulic Compaction*), pemadatan hidrolik melibatkan injeksi air di bawah tekanan tinggi ke dalam tanah untuk menggerakkan partikel dan meningkatkan kepadatan.

2.3 Sifat-Sifat Tanah

Mekanika tanah juga mempelajari sifat-sifat tanah yang relevan untuk analisis geoteknik. Beberapa sifat dasar tanah termasuk:

2.3.1 Kekakuan (*Stiffness*)

Kekakuan tanah memengaruhi perilaku dan stabilitas dalam proyek rekayasa sipil. Faktor yang memengaruhi kekakuan termasuk jenis tanah, tekanan yang diterapkan, dan kelembaban. Kekakuan mencerminkan kemampuan tanah untuk menahan deformasi. Tanah keras memiliki kekakuan tinggi, sedangkan tanah lunak memiliki kekakuan rendah. Tanah berpasir memiliki kekakuan tinggi karena partikelnya memiliki sedikit kontak. Tanah liat cenderung memiliki kekakuan rendah karena partikel lengket. Kekakuan juga bergantung pada tekanan; semakin besar tekanan,

semakin tinggi kekakuan. Kelembaban yang tepat memengaruhi kekakuan, dengan kelembaban yang tidak sesuai mengurangi kekakuan tanah.

2.3.2 Kondisi Kohesi (*Cohesion*)

Sifat kohesi memainkan peran krusial dalam menentukan perilaku dan stabilitas tanah dalam berbagai konteks konstruksi dan rekayasa sipil. Kohesi, yang mencerminkan kemampuan tanah untuk menahan gaya geser melalui adhesi partikel-partikel tanahnya, khususnya berlaku pada tanah berbutiran halus seperti tanah liat dan serpih. Tanah jenis ini cenderung memiliki daya lekat yang kuat, memungkinkan partikel-partikelnya melekat erat. Dalam analisis stabilitas lereng, kohesi tanah mempengaruhi kestabilan atau potensi pergeseran. Tanah yang memiliki kohesi tinggi mampu menahan tekanan lateral, menjaga stabilitas lereng. Demikian juga, dalam perencanaan fondasi, kondisi kohesi tanah menjadi pertimbangan penting karena fondasi harus dirancang untuk mengatasi tekanan yang dihasilkan oleh kohesi tanah di bawahnya.

2.3.3 Friction Angle (*Sudut Geser*)

Sudut geser adalah parameter kunci dalam analisis stabilitas lereng dan fondasi. Diukur dalam derajat (ϕ), nilai sudut geser bervariasi sesuai dengan jenis tanah atau batuan yang diobservasi. Tanah berpasir memiliki sudut geser yang lebih besar dibandingkan tanah lempung karena adhesi yang lebih rendah. Sudut geser mencerminkan sifat internal tanah yang mempengaruhi kemampuannya untuk menahan pergeseran. Nilai yang lebih tinggi mengindikasikan stabilitas yang lebih baik dalam analisis stabilitas lereng. Pengukuran sudut geser dilakukan melalui uji laboratorium dan digunakan dalam rekayasa geoteknik untuk memahami perilaku tanah dalam konstruksi dan fondasi.

2.3.4 Kepadatan (*Density*)

Kepadatan tanah mencerminkan sejauh mana partikel-partikel tanah mengisi suatu volume. Kepadatan diukur dalam satuan berat per volume, seperti kg/m^3 atau lb/ft^3 . Ada dua parameter utama: kepadatan kering (saat tanah kering) dan

kepadatan jenuh (saat tanah jenuh air). Kepadatan tanah penting dalam rekayasa sipil, terutama dalam perencanaan fondasi, perhitungan beban tanah, analisis stabilitas lereng, dan desain jalan. Insinyur menggunakan uji lapangan dan laboratorium, seperti uji berat volume dan uji kerucut dinamik, untuk mengukur kepadatan. Data ini digunakan dalam perencanaan konstruksi untuk memastikan tanah memiliki kepadatan yang sesuai untuk menahan beban struktural dengan aman.

2.3.5 Tekanan Porositas (*Porosity*)

Porositas adalah parameter yang mengukur jumlah ruang kosong dalam material. Dalam ilmu geoteknik, porositas mengacu pada rongga dalam tanah atau batuan. Ini penting dalam rekayasa geoteknik dan konstruksi. Porositas dinyatakan dalam persentase dan mengukur perbandingan volume pori-pori dengan volume total material. Tingkat porositas memengaruhi sifat seperti penyimpanan air, konduktivitas termal, kekuatan, elastisitas, drainase, dan stabilitas tanah. Tanah dengan porositas tinggi bisa menyimpan lebih banyak air dan memengaruhi fondasi dan pergeseran. Proses pemadatan tanah juga memengaruhi porositas dan karakteristik tanah.

2.4 Uji Laboratorium Mekanika Tanah

Untuk memahami sifat-sifat tanah secara lebih mendalam, berbagai uji laboratorium digunakan untuk mengkarakterisasi tanah. Beberapa uji laboratorium umum yang dilakukan dalam mekanika tanah meliputi:

2.4.1 Uji Kepadatan

Uji kepadatan adalah prosedur dalam rekayasa geoteknik yang digunakan untuk mengukur seberapa padat atau rapat suatu tanah atau bahan geoteknik. Tujuan utama dari uji ini adalah untuk menentukan kepadatan tanah, yang merupakan parameter dalam perencanaan fondasi, analisis stabilitas lereng, desain jalan, dan berbagai proyek konstruksi lainnya. Hasil uji kepadatan digunakan untuk menentukan tingkat pemadatan tanah yang diperlukan dalam berbagai proyek konstruksi. Pemadatan yang tidak cukup dapat

menyebabkan penurunan tanah, sedangkan pemadatan berlebih dapat mengurangi daya dukung tanah. Ada beberapa metode yang digunakan untuk mengukur kepadatan tanah, termasuk uji berat volume, uji kerucut dinamik (*dynamic cone penetrometer*), uji proctor, dan lainnya.

Uji berat volume adalah salah satu metode yang umum digunakan untuk mengukur kepadatan tanah. Dalam uji ini, sampel tanah ditempatkan dalam silinder berukuran tertentu dan kemudian ditimbang untuk mendapatkan berat volume. Setelah itu, berat volume tersebut dibandingkan dengan berat volume tanah dalam keadaan ideal atau maksimum, yang disebut dengan berat volume terkompaksi maksimum. Hasil uji berat volume ini memberikan nilai kepadatan tanah, yang dinyatakan sebagai persentase dari berat volume terkompaksi maksimum.

Uji kerucut dinamik (*dynamic cone penetrometer*) adalah metode lain yang digunakan untuk mengukur kepadatan tanah. Pada uji ini, sebuah kerucut berat dilepaskan dari ketinggian tertentu dan dibiarkan menembus tanah. Kedalaman penetrasi kerucut ke dalam tanah digunakan untuk menghitung kepadatan tanah. Uji ini lebih cepat dan lebih sederhana daripada uji berat volume.

Uji proctor adalah metode laboratorium yang lebih rumit yang digunakan untuk mengukur kepadatan tanah dalam berbagai kelembaban. Dalam uji ini, sampel tanah diratakan dalam cetakan berukuran tertentu dan dipadatkan dengan jumlah tekanan tertentu. Selanjutnya, kelembaban diubah dalam berbagai tahap dan kepadatan tanah diukur pada setiap tahap tersebut.

2.4.2 Uji Kekakuan

Uji kekakuan digunakan untuk mengukur seberapa kaku suatu bahan geoteknik seperti tanah atau batuan. Kekakuan mencerminkan kemampuan material untuk menahan deformasi saat dikenai beban atau tekanan. Uji ini berguna dalam analisis struktural, perencanaan fondasi, dan rekayasa geoteknik. Metodenya bervariasi tergantung pada jenis material. Contoh metode uji termasuk uji kompresi, uji triaxial, uji modulus elastisitas,

dan uji modulus pembentukan. Hasil uji ini berperan dalam analisis stabilitas lereng, desain struktur, dan evaluasi tanah dasar jalan.

2.4.3 Uji Kohesi

Uji kohesi adalah metode penting dalam rekayasa geoteknik untuk mengukur kemampuan tanah atau material geoteknik dalam menahan tekanan geser. Kohesi mencerminkan daya lekat partikel dalam tanah atau bahan tersebut. Pengukuran kohesi kritikal dalam memahami sifat material geoteknik seperti tanah, lempung, atau pasir, dan berperan dalam analisis stabilitas lereng, desain fondasi, dan rekayasa geoteknik. Uji geser langsung adalah metode umum yang digunakan untuk mengukur kohesi, dengan sampel tanah dikenai tekanan geser secara bertahap. Kohesi diukur dalam satuan tekanan dan nilai yang lebih tinggi menunjukkan kemampuan material untuk menahan gaya geser yang lebih kuat.

2.4.4 Uji Sudut Geser

Uji sudut geser digunakan untuk mengukur sudut geser, yang merupakan sifat penting dari tanah. Sudut geser (*friction angle*) mengukur kemampuan tanah untuk menahan gaya geser atau tekanan yang bekerja sejajar dengan permukaan tanah. Parameter ini sangat penting dalam rekayasa geoteknik, terutama dalam analisis stabilitas lereng, perencanaan fondasi, dan desain struktur.

Dalam uji sudut geser, sampel tanah ditempatkan dalam perangkat uji khusus yang memungkinkan aplikasi gaya geser secara terkontrol. Gaya geser diterapkan pada sampel, dan responsnya dicatat untuk mengukur sudut geser. Sudut geser dinyatakan dalam derajat (biasanya disebut " ϕ " atau "*phi*") dan mencerminkan kemampuan tanah untuk menahan perubahan bentuk akibat tekanan lateral.

Metode uji sudut geser bervariasi, tetapi salah satu yang umum adalah uji geser langsung (*direct shear test*). Pada uji ini, sampel tanah ditempatkan dalam perangkat uji yang terdiri dari dua lapisan tanah yang bergerak satu terhadap yang lain. Kemudian, tekanan atau gaya geser diterapkan secara horizontal, sehingga menghasilkan data yang dapat digunakan untuk menghitung sudut geser tanah.

2.4.5 Uji Permeabilitas

Uji permeabilitas digunakan untuk mengukur kemampuan material seperti tanah dan batuan dalam menghantarkan cairan. Permeabilitas menggambarkan sejauh mana material memungkinkan aliran cairan melalui pori-porinya. Dalam uji ini, sampel dikenai perbedaan tekanan air untuk mengukur laju aliran cairan. Hasilnya menghasilkan koefisien permeabilitas, yang menunjukkan seberapa cepat atau lambat aliran cairan melalui material. Koefisien ini diukur dalam satuan panjang per waktu. Nilainya bervariasi; tanah liat memiliki permeabilitas rendah, sedangkan pasir atau kerikil memiliki permeabilitas tinggi.

2.4.6 Uji Atterberg

Uji Atterberg adalah serangkaian uji laboratorium yang digunakan dalam mekanika tanah untuk mengukur batas-batas kelembaban dari tanah, yang meliputi batas cair (*liquid limit*), batas plastis (*plastic limit*), dan batas lembek (*shrinkage limit*). Metode ini dinamakan berdasarkan nama ilmuwan Swedia bernama Albert Atterberg yang mengembangkannya. Berikut penjelasan mengenai ketiga uji Atterberg:

1. Batas Cair (*Liquid Limit*) adalah tingkat kelembaban di mana tanah berubah dari keadaan plastis menjadi cair. Uji batas cair melibatkan pencampuran sampel tanah dengan air hingga mencapai konsistensi tertentu. Nilai batas cair dinyatakan dalam persentase dan memberikan informasi tentang tingkat cairan yang dibutuhkan agar tanah menjadi cair sepenuhnya.
2. Batas Plastis (*Plastic Limit*) adalah tingkat kelembaban di mana tanah berubah dari keadaan elastis menjadi plastis. Batas plastis adalah kadar air minimum yang diperlukan agar tanah lempung dapat dibentuk menjadi bentuk lembaran tipis tanpa retak atau patah. Nilai batas plastis juga dinyatakan dalam persentase dan menggambarkan tingkat kelembaban yang diperlukan agar tanah masih dapat dibentuk tanpa patah.
3. Batas Lembek (*Shrinkage Limit*) adalah tingkat kelembaban terendah di mana tanah masih dapat menyusut. Uji batas lembek melibatkan pemadatan sampel tanah hingga

mencapai batas lembek, dan ini memberikan informasi tentang tingkat kelembaban yang menyebabkan penyusutan tanah.

2.5 Analisis Stabilitas

Analisis stabilitas adalah aspek penting dari mekanika tanah dan geoteknik. Ini melibatkan evaluasi kemungkinan pergerakan atau kegagalan tanah di bawah pengaruh beban. Beberapa jenis analisis stabilitas meliputi:

2.5.1 Analisis Stabilitas Lereng

Analisis stabilitas lereng ini penting dalam perencanaan konstruksi jalan, terowongan, dan bendungan. Analisis stabilitas lereng adalah proses evaluasi dan perhitungan untuk menilai apakah suatu lereng atau bukit alami atau buatan manusia mampu menahan gaya gravitasi dan beban bekerja serta mengidentifikasi risiko pergeseran atau longsoran tanah yang dapat terjadi. Analisis ini sangat penting dalam rekayasa geoteknik dan perencanaan konstruksi, terutama dalam melindungi kehidupan dan properti manusia dari potensi bencana alam dan kegagalan struktural.

Langkah-langkah utama dalam analisis stabilitas lereng meliputi:

1. Karakterisasi Tanah
Menentukan jenis dan sifat tanah yang membentuk lereng, seperti kohesi, sudut geser, kepadatan, dan sifat hidroliknya. Informasi ini digunakan untuk memahami perilaku tanah di bawah beban.
2. Pembebanan
Mengidentifikasi semua beban yang bekerja pada lereng, termasuk beban tanah yang sudah ada, tambahan beban seperti bangunan atau struktur, dan pengaruh lingkungan seperti perubahan tingkat air tanah atau curah hujan.
3. Pemodelan Geoteknik
Membuat model matematis dari lereng yang memungkinkan simulasi analisis stabilitas. Model ini mencakup konfigurasi geometri lereng, sifat-sifat tanah, dan beban yang bekerja.

4. Analisis Statis

analisis statis digunakan untuk mengevaluasi faktor-faktor yang mempengaruhi stabilitas, seperti sudut geser, kekuatan kohesi, dan daya dukung tanah di bawah beban. Analisis ini mempertimbangkan kondisi eksternal seperti kelembaban tanah dan perubahan lingkungan.

5. Analisis Dinamis

Dalam beberapa kasus, analisis dinamis digunakan untuk mempertimbangkan gaya dinamis seperti gempa bumi. Ini penting dalam daerah yang rentan terhadap gempa bumi.

6. Faktor Keamanan

Menghitung faktor keamanan yang menggambarkan seberapa besar margin keselamatan lereng. Faktor keamanan adalah perbandingan antara gaya stabil dengan gaya destabilisasi. Jika faktor keamanan kurang dari satu, itu menunjukkan bahwa lereng tidak stabil.

7. Rekomendasi dan Tindakan Pencegahan

Berdasarkan hasil analisis, insinyur merekomendasikan tindakan pencegahan seperti penambahan dinding penahan, peningkatan fungsi drainase, pemadatan tanah, atau perubahan desain untuk meningkatkan stabilitas lereng.

2.5.2 Analisis Stabilitas Pondasi

Analisis stabilitas pondasi adalah proses evaluasi dan perhitungan yang dilakukan untuk memastikan bahwa suatu fondasi yang mendukung struktur bangunan atau konstruksi memiliki kapasitas untuk menahan beban yang dikenakan padanya, serta menjaga stabilitas dan keselamatan struktur tersebut selama masa penggunaan. Analisis ini merupakan tahap penting dalam rekayasa geoteknik dan perencanaan konstruksi, yang memastikan fondasi memenuhi persyaratan kekuatan, kestabilan, dan keselamatan.

Berikut adalah beberapa komponen penting dalam analisis stabilitas pondasi:

1. Karakterisasi Tanah

Langkah pertama dalam analisis stabilitas pondasi adalah karakterisasi tanah di lokasi proyek. Ini termasuk mengukur

sifat-sifat geoteknik tanah seperti jenis tanah, kohesi, sudut geser, kepadatan, kekuatan, dan sebagainya. Informasi ini sangat penting dalam menentukan bagaimana tanah akan berperilaku di bawah beban fondasi.

2. Tipe Fondasi

Pemilihan tipe fondasi (misalnya, pondasi dangkal seperti pondasi pelat atau pondasi dalam seperti tiang pancang) sangat tergantung pada sifat tanah dan beban yang akan didukung oleh fondasi. Fondasi yang tepat harus dipilih untuk memastikan stabilitas struktur.

3. Beban Struktural

Beban yang akan diterima oleh fondasi harus dianalisis secara seksama. Ini mencakup beban vertikal seperti beban dari bangunan dan beban hidup, serta beban lateral seperti beban angin atau gempa bumi.

4. Analisis Statis

Analisis statis melibatkan perhitungan kekuatan dan kestabilan fondasi saat kondisi statis, termasuk penilaian terhadap berat sendiri struktur, beban yang dikenakan pada fondasi, dan kemampuan tanah di bawah fondasi untuk menopang beban ini.

5. Analisis Dinamis

Dalam beberapa kasus, analisis dinamis mungkin diperlukan untuk mengukur respons fondasi terhadap gaya dinamis, seperti akibat gempa bumi atau beban getaran.

6. Analisis Keamanan

Dalam analisis keamanan, insinyur menilai apakah fondasi memiliki faktor keamanan yang memadai untuk mencegah pergeseran, kegagalan fondasi, atau kerusakan struktural. Faktor keamanan merupakan perbandingan antara kapasitas fondasi dan beban yang diterimanya. Faktor keamanan harus lebih besar dari satu agar fondasi dianggap aman.

7. Analisis Penyusutan dan Pemadatan Tanah

Perubahan volume tanah yang disebabkan oleh perubahan beban atau kelembaban harus diperhitungkan. Proses

pemadatan dan penyusutan tanah di bawah fondasi harus diantisipasi untuk mencegah kerusakan struktural.

8. Analisis Drainase

Drainase yang baik di sekitar fondasi penting untuk mencegah pergerakan tanah yang tidak diinginkan. Analisis drainase dan penanganan air tanah harus menjadi bagian dari analisis stabilitas.

9. Analisis Pembebanan Dinamis (*Dynamic Loading*)

Pada beberapa proyek, fondasi mungkin menerima beban dinamis seperti akibat getaran mesin, aliran lalu lintas, atau gempa bumi. Analisis ini mempertimbangkan dampak beban dinamis terhadap fondasi.

10. Analisis Interaksi Struktur-Fondasi

Terutama pada bangunan tinggi atau struktur kompleks, analisis interaksi antara struktur dan fondasi diperlukan untuk memahami bagaimana fondasi akan merespons beban struktural.

11. Analisis Beban-Gempa (*Seismic Analysis*)

Di daerah yang rentan terhadap gempa bumi, analisis beban-gempa dilakukan untuk menilai seberapa baik fondasi dapat menahan gaya gempa dan mencegah kerusakan struktural.

12. Penilaian Teknik Drainase

Drainase yang buruk di sekitar fondasi dapat menyebabkan pergerakan tanah yang dapat merusak fondasi. Oleh karena itu, analisis drainase dan penanganan air tanah sangat penting.

Setelah semua parameter ini dianalisis, insinyur geoteknik dapat menentukan apakah fondasi memiliki faktor keamanan yang memadai untuk mengakomodasi beban yang diharapkan dan kondisi lingkungan. Jika faktor keamanan rendah, tindakan perbaikan seperti perubahan desain fondasi, pemadatan tanah, peningkatan drainase, atau penambahan dinding penahan mungkin diperlukan.

Analisis stabilitas pondasi adalah tahap kunci dalam perencanaan konstruksi untuk keselamatan struktur dan menghindari risiko kerusakan. Proses ini memastikan bahwa fondasi mampu menopang struktur secara efektif selama masa pakai dan menjamin keamanan dan keberlanjutan bangunan.

2.5.3 Analisis Stabilitas Dinding Penahan Tanah

Analisis stabilitas dinding penahan tanah digunakan untuk menilai kemampuan suatu struktur dinding penahan tanah dalam menahan tekanan tanah dan air serta menjaga stabilitas dan keselamatan struktur tersebut. Dinding penahan tanah adalah struktur yang dirancang khusus untuk mengendalikan pergerakan tanah, mencegah erosi, dan menciptakan platform datar atau ruang berbentuk teras yang digunakan untuk berbagai tujuan, seperti pertanian, konstruksi jalan, taman, dan lainnya.

Analisis stabilitas dinding penahan tanah melibatkan beberapa langkah penting:

1. Karakterisasi Tanah

Langkah pertama dalam analisis stabilitas dinding penahan tanah adalah karakterisasi tanah yang akan didukung oleh dinding tersebut. Ini melibatkan pengukuran sifat-sifat geoteknik tanah, seperti jenis tanah, kekuatan, kohesi, sudut geser, kepadatan, dan sifat hidroliknya. Informasi ini diperlukan untuk memahami perilaku tanah yang akan bersentuhan dengan dinding.

2. Geometri dan Tipe Dinding

Dalam tahap perencanaan, jenis dinding penahan tanah harus dipilih, misalnya, dinding gravitasi, dinding berbantalan, atau dinding gabion. Selain itu, konfigurasi geometri dinding, seperti tinggi, panjang, dan kemiringan juga harus ditentukan.

3. Analisis stabilitas dinding penahan tanah harus mempertimbangkan semua beban yang akan diterima oleh dinding, termasuk beban tanah yang ada di belakangnya (tekanan tanah aktif atau pasif), beban hidrostatik dari air tanah, dan beban struktural seperti beban bangunan atau lalu lintas di atas dinding.

4. Analisis Statis

Analisis statis dilakukan untuk menilai faktor-faktor yang mempengaruhi stabilitas dinding penahan tanah saat kondisi statis, seperti perhitungan kekuatan dinding dan penilaian tekanan tanah yang bekerja pada dinding. Analisis ini mempertimbangkan geometri dinding, jenis tanah yang berdekatan, kekuatan material dinding, dan berat tanah yang akan didukung dinding.

5. Faktor Keamanan

Dalam analisis stabilitas dinding penahan tanah, insinyur mencari faktor keamanan yang mengukur sejauh mana dinding mampu menahan beban dan tekanan tanah yang bekerja padanya. Faktor keamanan adalah perbandingan antara kapasitas dinding (misalnya, kekuatan material) dan beban yang diterimanya. Faktor keamanan harus lebih besar dari satu agar dinding dianggap aman.

6. Analisis Penyusutan dan Pemadatan Tanah

Pada beberapa kondisi, tanah di sekitar dinding penahan tanah dapat mengalami perubahan volume, seperti penyusutan atau pemadatan. Analisis ini penting untuk memastikan bahwa dinding dapat menangani perubahan volume tanah tanpa mengalami kerusakan.

7. Analisis Drainase

Drainase yang baik di sekitar dinding penahan tanah sangat penting untuk mencegah penumpukan air yang dapat merusak stabilitas dinding. Analisis drainase dan perencanaan sistem drainase yang efektif adalah bagian integral dari analisis stabilitas.

8. Analisis Beban Gempa (*Seismic Analysis*)

Di daerah yang rentan terhadap gempa bumi, dinding penahan tanah harus diuji untuk menahan beban gempa. Analisis ini melibatkan perhitungan seberapa baik dinding mampu menahan gaya gempa dan mencegah kerusakan struktural.

9. Analisis Interaksi Struktur-Dinding

Pada proyek-proyek tertentu, dinding penahan tanah dapat berinteraksi dengan struktur di atasnya, seperti bangunan

atau jalan. Analisis ini mempertimbangkan dampak beban dari struktur tersebut terhadap stabilitas dinding dan sebaliknya.

2.6 Perpindahan Tanah

Perpindahan tanah adalah perubahan posisi tanah yang dapat terjadi karena beban atau faktor-faktor lainnya. Dalam mekanika tanah, kita memperhatikan perpindahan tanah karena hal ini dapat memiliki dampak besar pada struktur dan lingkungan sekitarnya. Perpindahan tanah dapat terjadi dalam berbagai bentuk, termasuk:

2.6.1 Perpindahan Horizontal

Perpindahan horizontal dalam mekanika tanah mengacu pada pergerakan lateral atau horizontal yang terjadi dalam tanah di bawah pengaruh berbagai beban atau gaya eksternal.

Penyebab perpindahan horizontal dalam mekanika tanah dapat bervariasi, termasuk:

1. **Beban Struktural**

Beban dari struktur di atas tanah dapat menyebabkan perpindahan horizontal. Beban ini mungkin berasal dari berat sendiri bangunan, beban hidup seperti manusia dan perabotan, atau beban lain yang diterapkan pada tanah di sekitarnya.

2. **Beban Hidrostatik**

Tekanan air dari air tanah atau air di sekitar tanah juga dapat menyebabkan perpindahan horizontal. Ini terutama terjadi pada fondasi bangunan yang berada di bawah air tanah.

3. **Perubahan Kondisi Tanah**

Perubahan dalam kelembaban atau konsolidasi tanah dapat menyebabkan perpindahan horizontal. Misalnya, tanah lempung cenderung mengembang dan menyusut seiring perubahan kadar airnya.

4. **Gempa Bumi**

Gempa bumi adalah penyebab umum perpindahan horizontal yang signifikan. Gempa dapat menyebabkan

pergeseran tanah yang dapat mengakibatkan kerusakan pada struktur di atasnya.

5. Pergeseran Tanah

Pergeseran tanah adalah bentuk ekstrem dari perpindahan horizontal. Ini dapat terjadi akibat aktivitas seismik, kelembaban tinggi, atau proses alam lainnya.

6. Pengaruh Aktivitas Manusia

Penggalian atau pekerjaan konstruksi lainnya dapat memicu perpindahan horizontal. Ini sering terjadi dalam situasi di mana tanah yang ditumpuk tidak stabil.

Perpindahan horizontal dapat diukur dengan berbagai metode, termasuk penggunaan sensor deformasi, pengukuran leveling, pemantauan GPS, atau marker yang dapat dilihat. Metode ini membantu dalam pemahaman sejauh mana perpindahan terjadi.

Pentingnya perpindahan horizontal dalam mekanika tanah adalah sebagai berikut:

1. Stabilitas Tanah

Pemahaman perpindahan horizontal sangat penting dalam memastikan stabilitas tanah. Beban yang diterapkan pada tanah, terutama pada lereng atau tebing, dapat menyebabkan perpindahan horizontal yang dapat berakibat pada longsor atau pergeseran tanah.

2. Pondasi dan Fondasi

Perpindahan horizontal dapat memengaruhi fondasi dan pondasi bangunan. Fondasi yang tidak mampu menahan perpindahan horizontal yang signifikan dapat menyebabkan kerusakan struktural.

3. Kegagalan Struktur

Perpindahan horizontal yang tidak terkendali atau berlebihan dapat menyebabkan kerusakan pada struktur dan bahkan kegagalan struktur. Oleh karena itu, perpindahan harus dipantau dan dikelola dengan baik.

4. Pengendalian Perpindahan

Strategi pengendalian perpindahan horizontal melibatkan pemilihan bahan yang sesuai, desain fondasi yang stabil, pemantauan dan pemeliharaan yang tepat, serta

- penggunaan teknik mitigasi risiko seperti perkuatan tanah atau dinding penahan.
5. Dalam perencanaan konstruksi dan desain struktur, faktor keamanan digunakan untuk memastikan bahwa perpindahan horizontal tetap dalam batas yang aman. Faktor keamanan adalah perbandingan antara kapasitas struktur dengan perpindahan yang diharapkan.

2.6.2 Perpindahan Vertikal

Perpindahan vertikal dalam mekanika tanah merujuk pada pergerakan vertikal atau naik-turun yang terjadi pada lapisan tanah di bawah pengaruh berbagai beban atau tekanan. Konsep ini sangat penting dalam rekayasa geoteknik karena berhubungan erat dengan stabilitas tanah, pondasi, dan struktur yang berdiri di atas tanah tersebut. Pemahaman perpindahan vertikal diperlukan untuk memastikan keamanan dan kinerja konstruksi, serta mitigasi risiko geoteknik.

Berikut adalah penjelasan rinci tentang perpindahan vertikal dalam mekanika tanah:

1. Penyebab Perpindahan Vertikal

Perpindahan vertikal dapat disebabkan oleh berbagai faktor, termasuk beban hidrostatis (tekanan air dari air tanah atau air permukaan), beban struktural (misalnya, beban dari bangunan atau struktur), perubahan kelembaban tanah, perubahan suhu, perubahan kondisi air tanah, serta proses alamiah seperti pergeseran tanah atau perubahan konsolidasi.

2. Deformasi Elastis dan Plastis

Perpindahan vertikal dapat terjadi dalam bentuk deformasi elastis atau plastis. Deformasi elastis adalah perubahan sementara dalam bentuk tanah yang dapat pulih kembali ke bentuk semula setelah beban dihapus. Deformasi plastis, di sisi lain, adalah perubahan permanen dalam bentuk tanah yang terjadi ketika beban melebihi batas elastisitas tanah.

3. Pengukuran Perpindahan Vertikal

Perpindahan vertikal dapat diukur dengan berbagai metode, seperti penggunaan sensor deformasi, pemantauan leveling, penggunaan piezometer, atau alat-alat pemantauan geodetik. Metode-metode ini membantu dalam mengukur dan memahami perpindahan vertikal yang terjadi.

4. Efek Perubahan Suhu

Perubahan suhu dapat memengaruhi perpindahan vertikal pada tanah. Ketika suhu meningkat, tanah dapat memuai, sementara ketika suhu turun, tanah menyusut. Ini dapat mempengaruhi fondasi dan struktur yang didukung oleh tanah tersebut.

5. Beban Hidrostatik

Beban hidrostatik, seperti tekanan air yang berasal dari air tanah atau dari reservoir air di sekitarnya, juga dapat menyebabkan perpindahan vertikal. Ini terutama berlaku untuk pondasi yang berada di bawah air tanah atau untuk tanggul penahan air.

6. Analisis Statis dan Dinamis

Analisis perpindahan vertikal melibatkan perhitungan kekuatan dan kestabilan tanah saat kondisi statis (tidak ada perubahan waktu) dan dinamis (perubahan seiring waktu). Analisis ini mempertimbangkan tekanan dan beban yang diterapkan pada tanah serta responsnya terhadap beban tersebut.

7. Dampak pada Fondasi dan Struktur

Perpindahan vertikal yang signifikan dapat memengaruhi pondasi dan struktur yang didukung oleh tanah tersebut. Perpindahan yang tidak terkendali atau berlebihan dapat menyebabkan kerusakan struktural.

8. Pengendalian Perpindahan

Strategi pengendalian perpindahan vertikal dapat mencakup pemilihan bahan fondasi yang sesuai, desain fondasi yang stabil, pemantauan dan pemeliharaan yang tepat, serta penggunaan teknik mitigasi risiko seperti perkuatan tanah atau dinding penahan.

2.7 Perbaikan Tanah

Perbaikan tanah melibatkan berbagai metode dan teknik yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan spesifik di lokasi tersebut. Beberapa teknik perbaikan tanah yang umum meliputi penggalian dan penggantian, pemadatan tanah, penggunaan bahan tambahan, penurunan air tanah, dan penstabilan lereng.

2.7.1 Penggalian dan Penggantian

Dalam situasi di mana lapisan atas tanah tidak cukup kuat untuk mendukung struktur yang direncanakan, teknik penggalian dan penggantian dapat digunakan. Lapisan atas tanah yang lemah atau tidak sesuai digali dan digantikan dengan tanah yang lebih kuat atau bahan pengisi yang sesuai. Ini bertujuan untuk mencapai daya dukung yang memadai untuk pondasi struktur.

2.7.2 Pemadatan Tanah

1. Pemadatan Mekanis

Pemadatan tanah melibatkan penggunaan mesin pemadat seperti roller atau vibro untuk meningkatkan kerapatan tanah. Ini efektif dalam mengurangi kepadatan, meningkatkan kekuatan geser, dan mengurangi potensi pengendapan tanah. Pemadatan sering digunakan dalam pembangunan jalan, landasan pacu bandara, dan proyek-proyek lain yang memerlukan tanah yang padat dan stabil.

2. Pemadatan Dinamis

Teknik pemadatan tanah dinamis menggunakan guncangan energik seperti pemadatan dengan alat berat yang memiliki peralatan khusus yang menghasilkan gaya guncangan.

Metode ini berguna untuk meningkatkan daya dukung tanah yang lemah atau mengatasi permasalahan pengendapan.

2.7.3 Pemadatan Tanah Penggunaan Bahan Tambahan

1. Penggunaan Geotekstil

Geotekstil adalah bahan sintetis yang ditempatkan di antara lapisan tanah untuk meningkatkan daya dukung, mengurangi erosi, dan meningkatkan drainase. Geotekstil digunakan dalam berbagai aplikasi seperti jalan, dinding penahan tanah, dan proyek pemadatan.

2. Cetakan Lempung

Pada beberapa lokasi, cetakan lempung yang mengandung bahan tambahan seperti kapur atau semen dapat digunakan untuk mengkristal tanah liat yang lemah, meningkatkan daya dukungnya, dan mengurangi pengembangan tanah.

2.7.4 Penurunan Air Tanah

Jika air tanah tinggi menjadi masalah, dewatering adalah teknik yang digunakan untuk menurunkan muka air tanah dengan menggunakan pompa air. Ini berguna untuk mencegah tanah dari pencairan atau pengembangan yang dapat merusak struktur di atasnya.

2.7.5 Penstabilan Lereng

Penstabilan lereng melibatkan penggunaan struktur penahan seperti dinding penahan tanah, terasering, atau jaring penahan untuk mencegah tanah longsor dan menjaga stabilitas lereng. Setiap metode perbaikan tanah memiliki kelebihan dan keterbatasan sendiri, dan pemilihan teknik harus mempertimbangkan faktor-faktor seperti jenis tanah, kondisi geografis, biaya, dan waktu yang tersedia. Selain itu, analisis teknis dan perencanaan yang cermat diperlukan sebelum menerapkan teknik perbaikan tanah tertentu.

Dalam beberapa kasus, perbaikan tanah dapat melibatkan kombinasi dari berbagai teknik untuk mencapai hasil yang diinginkan. Misalnya, dalam proyek konstruksi gedung tinggi,

pemadatan tanah dapat digunakan bersama dengan penggunaan geotekstil dan dewatering untuk memastikan pondasi yang stabil dan mengatasi masalah air tanah.

DAFTAR PUSTAKA

- Braja M. Das . 2012. *Principles of Geotechnical Engineering*. Cengage Learning.
- Nagaratnam Sivakugan dan Braja M. Das. 2018. *Geotechnical Engineering: A Practical Problem Solving Approach*. CRC Press.
- Donald P. Coduto. 2010. *Geotechnical Engineering: Principles and Practices* . Pearson.
- Karl Terzaghi dan Ralph B. Peck. 1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons.
- Muni Budhu. 2011. *Soil Mechanics and Foundations*. John Wiley & Sons.
- Ralph B. Peck, Thomas H. Thornburn, dan Walter E. Hanson . 2017. *Foundation Engineering*. John Wiley & Sons.
- Robert D. Holtz dan William D. Kovacs. 2010. *Introduction to Geotechnical Engineering*. Pearson.
- Braja M. Das. 2018. *Geotechnical Engineering Handbook*. CRC Press.
- Steven L. Kramer. 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall.
- William Powrie. 2008. *Soil Mechanics: Concepts and Applications*. Taylor & Francis.

BAB 3

PENILAIAN RESIKO BENCANA ALAM

Oleh Christy Gery Buyang

3.1 Pendahuluan

Bencana alam merupakan peristiwa alam yang dapat menimbulkan dampak merugikan pada masyarakat, lingkungan, dan ekonomi. Bencana alam tidak hanya mencakup gejala fisik tetapi juga implikasi sosial, ekonomi, dan psikologis yang melibatkan interaksi kompleks antara manusia dan lingkungan alam (Quarantelli, 2005). Bencana alam sering dilihat sebagai suatu siklus yang melibatkan fase persiapan, respons, pemulihan, dan mitigasi. Berdasarkan pandangan Pemahaman terhadap setiap fase dalam siklus bencana membantu merancang strategi yang lebih efektif dalam mengelola dan mengurangi dampak bencana (Alexander, 2002).

Penilaian risiko bencana alam adalah suatu pendekatan sistematis dan ilmiah untuk mengidentifikasi, mengukur, dan mengevaluasi potensi dampak dan kerentanan terhadap suatu bencana alam. Pendekatan ini melibatkan analisis menyeluruh terhadap faktor-faktor yang mempengaruhi terjadinya bencana, tingkat kerentanan masyarakat dan infrastruktur, serta kapasitas adaptasi untuk menghadapi bencana tersebut. Faktor-faktor risiko bencana alam dapat mencakup variabel geografis, iklimologis, dan manusia. Studi mendalam tentang sejarah bencana di suatu wilayah, pola cuaca, dan interaksi manusia dengan lingkungan menjadi langkah awal dalam identifikasi risiko. Sebagai contoh, di wilayah tektonik aktif, gempa bumi dan letusan gunung berapi menjadi faktor risiko yang signifikan.

Pentingnya meningkatkan kapasitas adaptasi masyarakat dalam menghadapi bencana alam. Konsep ini menyoroti bahwa selain mitigasi fisik, faktor-faktor seperti pemberdayaan masyarakat, perencanaan tata ruang, dan penguatan kapasitas

individu dapat memainkan peran penting dalam mengurangi risiko bencana (Klein, 2006).

3.2 Banjir

Menurut Oliver-Smith (1996), bencana alam banjir tidak hanya dapat dilihat sebagai kejadian alamiah semata, melainkan sebagai hasil dari interaksi kompleks antara faktor lingkungan dan sosial. Dalam perspektifnya, dampak banjir melibatkan aspek-aspek sosial, ekonomi, dan budaya yang dapat merugikan masyarakat. Referensi karya Oliver-Smith "Anthropological Research on Hazards and Disasters" memberikan pemahaman mendalam tentang kompleksitas risiko banjir dalam konteks kajian antropologi.

Penilaian risiko bencana alam banjir adalah suatu proses sistematis yang dilakukan untuk mengidentifikasi, mengukur, dan mengevaluasi potensi dampak serta kerentanan yang dapat diakibatkan oleh peristiwa banjir. Penilaian ini melibatkan analisis mendalam terhadap faktor-faktor yang memicu banjir, karakteristik daerah terdampak, dan dampak potensialnya terhadap masyarakat dan lingkungan. Langkah-langkah dalam penilaian risiko banjir sangat penting untuk merancang strategi mitigasi yang efektif.

Identifikasi risiko banjir melibatkan pemahaman mendalam terhadap faktor-faktor pemicu, seperti curah hujan ekstrem, kondisi topografi, jenis tanah, dan kondisi sungai. Analisis hidrologi dan hidrogeologi diperlukan untuk memahami pola aliran air dan tingkat air yang dapat memicu banjir. Referensi mengenai hidrologi dapat digunakan untuk mendukung analisis ini.

Perhitungan probabilitas banjir melibatkan analisis sejarah curah hujan, pengukuran debit sungai, dan model hidrologi. Sementara itu, perhitungan dampak melibatkan estimasi potensi kerusakan pada pemukiman, pertanian, dan infrastruktur. Data historis dan pemodelan hidrologi dapat menjadi referensi penting dalam mengukur probabilitas dan dampak banjir.

Penentuan kategori risiko banjir melibatkan klasifikasi probabilitas dan dampak ke dalam skala tertentu. Kategori risiko dapat mencakup rendah, sedang, dan tinggi. Ini membantu dalam menentukan tingkat urgensi dan prioritas dalam pengelolaan risiko banjir.

Evaluasi kerentanan melibatkan identifikasi wilayah dan populasi yang lebih rentan terhadap dampak banjir. Kapasitas adaptasi masyarakat dan pemerintah setempat termasuk rencana evakuasi, sistem peringatan dini, dan infrastruktur tangguh banjir. Referensi mengenai rencana penanggulangan bencana dapat membantu dalam mengembangkan strategi adaptasi.

Strategi pengurangan risiko banjir melibatkan langkah-langkah pencegahan seperti pengelolaan tata ruang, pembangunan tanggul, dan perbaikan sistem drainase. Pendidikan kepada masyarakat tentang perilaku yang aman dan kesiapsiagaan juga menjadi bagian integral dari strategi pengurangan risiko.

Sebagai contoh kasus, banjir yang melanda Pakistan pada tahun 2010 merupakan salah satu bencana banjir terparah dalam sejarah. Faktor risiko melibatkan curah hujan ekstrem yang berkepanjangan dan sistem sungai yang tidak memadai. Studi ini, seperti yang diungkapkan dalam laporan dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana Pakistan, memberikan pemahaman mendalam tentang kompleksitas risiko banjir dan dampaknya pada masyarakat.

3.3 Tanah Longsor

Penilaian risiko bencana alam longsor adalah suatu proses analisis yang komprehensif untuk mengidentifikasi potensi dampak dan kerentanan yang mungkin terjadi akibat longsor. Hal ini memerlukan pendekatan multidisiplin yang melibatkan aspek geologi, hidrologi, dan tata ruang. Penilaian risiko longsor bertujuan untuk memahami sejauh mana suatu wilayah dapat terdampak oleh longsor dan bagaimana masyarakat serta infrastruktur dapat disiapkan menghadapi risiko tersebut.

Faktor-faktor yang mempengaruhi risiko longsor melibatkan karakteristik geologi, topografi, hujan, serta aktivitas manusia seperti deforestasi dan penggunaan lahan yang tidak tepat. Analisis mengenai jenis tanah, kemiringan lereng, dan curah hujan menjadi kunci dalam memahami potensi terjadinya longsor.

Perhitungan probabilitas longsor melibatkan pemodelan geologi dan hidrologi, termasuk evaluasi potensi tinggi lereng dan

tingkat curah hujan ekstrem. Dampak longsor dapat mencakup kerusakan infrastruktur, kehilangan nyawa, serta kerugian ekonomi.

Sebagai contoh kasus, longsor yang terjadi di Situ Gintung, Indonesia, pada tahun 2009. Faktor-faktor seperti curah hujan ekstrem, kemiringan lereng yang signifikan, serta ketidaksempurnaan waduk dan tanggul menjadi pemicu terjadinya longsor di daerah tersebut. Kejadian ini menimbulkan kerugian signifikan, termasuk korban jiwa dan kerusakan infrastruktur, menunjukkan betapa pentingnya penilaian risiko dan strategi mitigasi dalam menghadapi potensi bencana longsor.

3.4 Gunung Meletus

Penilaian risiko bencana alam gunung meletus adalah suatu pendekatan sistematis yang bertujuan untuk mengidentifikasi, mengukur, dan mengevaluasi potensi dampak serta kerentanan terhadap letusan gunung. Proses ini penting untuk merumuskan strategi mitigasi yang efektif dan memberikan panduan dalam menghadapi potensi bencana alam tersebut. Penilaian risiko gunung meletus melibatkan pemahaman mendalam terkait dengan aktivitas vulkanik, kondisi geologi, dan dampak potensial pada masyarakat dan lingkungan.

Faktor-faktor risiko gunung meletus melibatkan pemahaman tentang kondisi geologi dan geodinamika regional. Identifikasi jenis magma, sejarah aktivitas gunung, dan lokasi pemukiman manusia di sekitar gunung menjadi kunci dalam menentukan potensi bahaya dan risiko. Faktor manusia, seperti tingkat perencanaan penanggulangan bencana, juga perlu diperhitungkan.

Perhitungan probabilitas letusan gunung melibatkan pemodelan aktivitas vulkanik dan analisis sejarah letusan. Selain itu, perhitungan dampak mencakup estimasi potensi kerusakan pada pemukiman, lahan pertanian, serta dampak pada kesehatan masyarakat. Model numerik dapat digunakan untuk memprediksi arah dan intensitas awan letusan serta aliran piroklastik.

Penentuan kategori risiko gunung meletus melibatkan skala probabilitas dan dampak. Misalnya, gunung dengan tingkat aktivitas yang tinggi dan populasi yang padat di sekitarnya dapat

diklasifikasikan sebagai risiko tinggi. Skala ini membantu menentukan prioritas dalam upaya mitigasi dan persiapan.

Evaluasi kerentanan melibatkan identifikasi pemukiman dan infrastruktur yang terletak di zona bahaya gunung meletus. Kapasitas adaptasi masyarakat dan pemerintah setempat termasuk rencana evakuasi, sistem peringatan dini, dan pelatihan bagi penduduk setempat.

Strategi mitigasi risiko gunung meletus mencakup pencegahan dan persiapan. Ini melibatkan pengembangan infrastruktur tanggap bencana, perencanaan evakuasi, dan pemetaan zona bahaya. Pendidikan masyarakat tentang tata cara aman dan rencana darurat juga menjadi bagian integral dari strategi ini.

Sebagai contoh kasus, letusan Gunung Merapi di Indonesia pada tahun 2010. Aktivitas vulkanik yang intens menyebabkan awan panas, lahar, dan abu vulkanik melanda wilayah sekitarnya. Kejadian ini menekankan pentingnya penilaian risiko dan upaya mitigasi dalam merespons letusan gunung yang berdampak pada masyarakat dan lingkungan.

3.5 Angin Topan

Penilaian risiko bencana alam angin topan adalah suatu pendekatan yang terfokus pada identifikasi, pengukuran, dan evaluasi potensi dampak serta kerentanan terhadap angin topan. Tujuan utama dari penilaian ini adalah untuk merumuskan strategi mitigasi yang efektif dan meningkatkan kesiapsiagaan masyarakat dan infrastruktur menghadapi potensi bencana ini. Proses penilaian risiko melibatkan pemahaman mendalam tentang faktor-faktor yang memicu angin topan, dampak yang mungkin terjadi, serta tingkat kerentanan masyarakat dan lingkungan.

Faktor-faktor risiko angin topan melibatkan pemahaman tentang proses pembentukan angin topan, seperti suhu permukaan laut yang tinggi dan keadaan atmosfer yang mendukung pertumbuhan badai. Analisis topografi dan tata ruang juga penting untuk menentukan sejauh mana suatu wilayah dapat terdampak oleh angin topan.

Perhitungan probabilitas angin topan melibatkan pemodelan dinamika atmosfer dan analisis sejarah badai. Selain itu, perhitungan dampak mencakup estimasi potensi kerusakan pada bangunan, infrastruktur, serta risiko terhadap nyawa manusia. Penggunaan model numerik dan simulasi dapat membantu meramalkan intensitas dan jalur pergerakan angin topan.

Penentuan kategori risiko angin topan melibatkan penggabungan skala probabilitas dan dampak ke dalam suatu klasifikasi. Misalnya, risiko tinggi dapat diberikan pada wilayah dengan tingkat probabilitas tinggi dan dampak yang signifikan. Kategori risiko ini membantu menentukan tingkat urgensi dalam mengembangkan rencana mitigasi.

Evaluasi kerentanan melibatkan identifikasi wilayah dan populasi yang lebih rentan terhadap dampak angin topan. Kapasitas adaptasi masyarakat dan pemerintah setempat termasuk penyusunan rencana evakuasi, pengembangan infrastruktur tahan topan, dan kesiapsiagaan terhadap sistem peringatan dini.

Strategi pengurangan risiko angin topan melibatkan pencegahan dan persiapan. Ini mencakup pembangunan bangunan tahan topan, penataan tata ruang yang bijaksana, dan pendidikan masyarakat tentang rencana evakuasi dan tindakan aman selama badai. Sistem peringatan dini yang efektif juga menjadi bagian integral dari strategi ini.

Sebagai contoh kasus, Topan Haiyan yang melanda Filipina pada tahun 2013. Topan ini menjadi salah satu yang paling kuat yang pernah tercatat, menyebabkan kerusakan besar dan ribuan kematian. Studi ini memberikan pemahaman yang mendalam tentang kompleksitas risiko angin topan dan pentingnya perencanaan mitigasi yang matang.

3.6 Tsunami

Penilaian risiko bencana alam tsunami merupakan suatu pendekatan kritis dalam mengidentifikasi, mengukur, dan mengevaluasi potensi dampak serta kerentanan terhadap peristiwa tsunami. Tsunami adalah gelombang laut besar yang disebabkan oleh gempa bumi di dasar laut atau letusan gunung berapi bawah laut. Penilaian risiko ini melibatkan analisis mendalam terhadap

karakteristik geologi dan oseanografi wilayah terdampak, serta kesiapan masyarakat dalam menghadapi potensi bencana ini.

Identifikasi risiko tsunami melibatkan pemahaman mendalam terhadap faktor-faktor pemicu, seperti gempa bumi dan letusan gunung bawah laut. Analisis seismik dan pemetaan dasar laut menjadi penting untuk menentukan potensi terjadinya tsunami. Faktor topografi pantai juga perlu diperhitungkan, karena bentuk dan kedalaman perairan memengaruhi dampak tsunami.

Perhitungan probabilitas tsunami melibatkan pemodelan seismik dan analisis sejarah gempa bumi di wilayah tersebut. Sementara itu, perhitungan dampak mencakup estimasi tinggi gelombang, penetrasi laut ke daratan, dan potensi kerusakan pada infrastruktur. Penggunaan model numerik dan simulasi dapat membantu memprediksi perjalanan gelombang dan dampaknya.

Penentuan kategori risiko tsunami melibatkan skala probabilitas dan dampak. Wilayah dengan probabilitas gempa bumi tinggi dan dampak tsunami signifikan dapat diklasifikasikan sebagai risiko tinggi. Skala ini membantu menentukan prioritas dalam upaya mitigasi dan persiapan.

Sebagai contoh kasus, tsunami Samudera Hindia pada tahun 2004 yang disebabkan oleh gempa bumi besar. Tsunami ini menyebabkan kerusakan besar di sejumlah negara di sekitar Samudera Hindia, termasuk Indonesia, Sri Lanka, India, dan Thailand. Kejadian ini menyoroti urgensi penilaian risiko tsunami dan perlunya sistem peringatan dini yang efektif.

3.7 Penilaian Risiko secara umum

Penilaian risiko adalah suatu pendekatan sistematis yang digunakan untuk mengidentifikasi, mengukur, dan mengevaluasi potensi dampak serta kerentanan terhadap suatu peristiwa atau situasi yang dapat menimbulkan risiko. Proses ini melibatkan analisis mendalam terhadap faktor-faktor yang dapat memicu risiko dan tingkat kerentanan yang mungkin terjadi. Penilaian risiko menjadi landasan untuk merumuskan strategi mitigasi yang efektif dan memandu pengambilan keputusan dalam menghadapi risiko.

Identifikasi risiko melibatkan pengenalan dan dokumentasi potensi bahaya serta penyebab risiko yang mungkin terjadi.

Contohnya, dalam industri nuklir, risiko radiasi dapat diidentifikasi sebagai bahaya, sedangkan kegagalan sistem pendingin dapat menjadi penyebab risiko.

Setelah identifikasi, karakterisasi risiko melibatkan analisis mendalam terhadap sumber risiko, dampak yang mungkin terjadi, dan tingkat keparahan risiko. Contoh formulasi perhitungan sederhana untuk tingkat risiko (R) dapat menggunakan rumus:

$$R=P \times I$$

R= Nilai Risiko

P= *Probability* (Kekerapan)

I= *Impact* (Dampak)

Penilaian probabilitas dan dampak adalah langkah penting dalam mengevaluasi risiko. Probabilitas adalah tingkat kemungkinan terjadinya risiko, sedangkan dampak adalah besaran konsekuensi yang mungkin timbul. Misalnya, dalam bisnis, probabilitas kegagalan suatu proyek dapat dihitung berdasarkan sejarah kegagalan serupa.

Kategorisasi risiko melibatkan pembagian risiko ke dalam kategori berdasarkan tingkat keparahan atau dampaknya. Contoh kategori risiko dapat dibagi menjadi rendah, sedang, dan tinggi. Hal ini membantu dalam menentukan prioritas dan tingkat urgensi dalam tindakan mitigasi. Evaluasi kerentanan melibatkan identifikasi elemen atau kelompok yang rentan terhadap risiko. Sementara itu, kapasitas adaptasi mencakup analisis kemampuan suatu sistem atau komunitas untuk menanggapi dan beradaptasi terhadap risiko. Penilaian ini dapat membantu merancang strategi mitigasi yang lebih spesifik.

Sebagai contoh kasus, dalam proyek konstruksi jembatan, risiko kegagalan struktural dapat diidentifikasi. Formulasi perhitungan risiko (R) dalam konteks ini dapat melibatkan probabilitas kegagalan fondasi (P1) dan dampak potensial pada keselamatan pengguna jalan (D1), dengan rumus: $R1=P1 \times D1$.

3.8 Manfaat Penilaian Risiko

Penilaian risiko memiliki peran yang sangat penting dalam memastikan keberlanjutan hidup, terutama dalam konteks infrastruktur. Berikut adalah beberapa manfaat penilaian risiko untuk keberlanjutan hidup, khususnya dalam bidang infrastruktur:

1. **Identifikasi dan Pengurangan Risiko Potensial:** Penilaian risiko memungkinkan identifikasi potensi risiko yang dapat mengancam infrastruktur. Dengan mengevaluasi berbagai ancaman, seperti bencana alam, perubahan iklim, atau kegagalan teknis, kita dapat merumuskan strategi pengurangan risiko. Tindakan pencegahan dan mitigasi yang diambil berdasarkan penilaian risiko dapat membantu melindungi infrastruktur dari potensi kerusakan atau kegagalan.
2. **Pemilihan Desain dan Material yang Tepat:** Penilaian risiko membantu dalam memilih desain dan material yang sesuai dengan lingkungan dan ancaman potensial. Sebagai contoh, di daerah dengan risiko gempa bumi tinggi, infrastruktur dapat dirancang dengan menggunakan material yang tahan terhadap getaran dan guncangan. Ini membantu memastikan bahwa infrastruktur tidak hanya efektif tetapi juga tahan terhadap risiko yang mungkin terjadi.
3. **Peningkatan Kesiapsiagaan dan Respons:** Melalui penilaian risiko, kesiapsiagaan dapat ditingkatkan. Sistem peringatan dini dan rencana respons darurat dapat disusun berdasarkan skenario risiko yang diidentifikasi. Hal ini memungkinkan pihak terkait untuk merespons secara cepat dan efisien ketika terjadi bencana atau insiden yang dapat mengancam infrastruktur.
4. **Efisiensi Penggunaan Sumber Daya:** Penilaian risiko membantu mengalokasikan sumber daya dengan lebih efisien. Dengan memahami risiko yang dihadapi, keputusan investasi dapat diarahkan ke area-area yang membutuhkan perhatian prioritas. Ini dapat menghindari pemborosan sumber daya dan memastikan bahwa investasi dilakukan dengan cara yang memberikan nilai tambah terbesar untuk keberlanjutan hidup infrastruktur.

5. Peningkatan Keberlanjutan Ekonomi dan Sosial: Infrastruktur yang tahan terhadap risiko dapat memberikan kontribusi positif terhadap keberlanjutan ekonomi dan sosial. Dengan meminimalkan risiko kerusakan atau kegagalan, infrastruktur dapat terus berfungsi dengan optimal, mendukung aktivitas ekonomi, dan memastikan kesejahteraan masyarakat.
6. Perlindungan Lingkungan: Penilaian risiko juga dapat mempertimbangkan dampak infrastruktur terhadap lingkungan. Dengan mengidentifikasi potensi risiko terhadap ekosistem, penilaian risiko membantu merancang infrastruktur yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Dengan memanfaatkan penilaian risiko secara menyeluruh dalam perencanaan, pengembangan, dan pemeliharaan infrastruktur, kita dapat meningkatkan daya tahan dan keberlanjutan hidup infrastruktur, mengurangi dampak negatif, dan menciptakan lingkungan yang lebih aman dan berkelanjutan.

3.9 Pemetaan Bencana Alam

Pemetaan bencana alam adalah proses visualisasi spasial yang digunakan untuk menganalisis dan menggambarkan sebaran geografis risiko bencana. Peta tersebut dapat mencakup informasi tentang jenis bencana alam, tingkat kerentanan wilayah, lokasi titik bahaya, serta infrastruktur dan populasi yang rentan. Pemetaan ini memainkan peran penting dalam perencanaan mitigasi, respons darurat, dan pemulihan pasca-bencana.

Contoh Referensi untuk Pemetaan Bencana Alam:

1. ***Global Disaster Alert and Coordination System (GDACS)***: GDACS menyediakan pemetaan bencana alam global secara real-time. Anda dapat menemukan peta interaktif yang mencakup informasi tentang gempa bumi, tsunami, dan peristiwa bencana lainnya. Referensi: GDACS.
2. ***National Centers for Environmental Information (NCEI) - NOAA***: NCEI menyediakan pemetaan dan data terkait

bencana alam, seperti peta seismik dan peta zona risiko tsunami di berbagai wilayah. Referensi: NCEI.

3. **United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR):** UNDRR menyediakan pemetaan dan data terkait risiko bencana alam global. Peta dan laporan mereka memberikan informasi tentang risiko bencana di seluruh dunia. Referensi: UNDRR.
4. **Global Risk Data Platform - World Bank:** *Global Risk Data Platform* dari *World Bank* menyediakan akses ke data dan pemetaan risiko bencana. Referensi: *Global Risk Data Platform*.



Gambar 3.1. Contoh Pemetaan Kawasan Bencana
Sumber : (www.gdacs.org)

Dengan menggunakan teknologi pemetaan, informasi tentang risiko, kerentanan, dan dampak bencana alam dapat diidentifikasi dan divisualisasikan secara spasial. Berikut adalah beberapa manfaat utama dari pemetaan bencana alam:

1. **Identifikasi Daerah Risiko Tinggi:** Pemetaan bencana alam memungkinkan identifikasi daerah yang rentan

terhadap berbagai jenis bencana seperti gempa bumi, banjir, tsunami, dan lainnya. Informasi spasial ini membantu pemerintah dan pemangku kepentingan dalam menentukan daerah-daerah yang memerlukan perhatian khusus dan implementasi strategi mitigasi.

2. **Perencanaan Mitigasi yang Tepat Sasaran:** Pemetaan membantu dalam perencanaan mitigasi yang lebih efektif. Dengan memahami sebaran spasial risiko bencana, langkah-langkah pencegahan dan mitigasi dapat diarahkan pada daerah-daerah yang paling membutuhkan perlindungan. Ini memaksimalkan efisiensi sumber daya yang tersedia.
3. **Penentuan Rute Evakuasi dan Lokasi Perlindungan:** Pemetaan bencana alam membantu dalam menentukan rute evakuasi yang optimal dan lokasi perlindungan di wilayah-wilayah yang berpotensi terkena dampak bencana. Ini membantu meningkatkan kesiapsiagaan masyarakat dan meminimalkan risiko kehilangan nyawa.
4. **Pengembangan Sistem Peringatan Dini:** Dengan menggunakan pemetaan, sistem peringatan dini dapat dirancang berdasarkan informasi spasial yang akurat. Peta zona risiko tsunami, misalnya, dapat digunakan untuk mengidentifikasi daerah-daerah yang harus menerima peringatan dini lebih awal, memungkinkan masyarakat untuk melakukan evakuasi dengan tepat waktu.
5. **Evaluasi Dampak dan Pemulihan:** Pemetaan juga berperan penting dalam evaluasi dampak bencana dan proses pemulihan. Data spasial membantu dalam mengidentifikasi kerusakan pada infrastruktur, pemukiman, dan ekosistem. Informasi ini diperlukan untuk merancang program pemulihan yang sesuai dan memprioritaskan kebutuhan pemulihan.
6. **Pemantauan Perubahan Lingkungan:** Pemetaan bencana alam juga membantu dalam pemantauan perubahan lingkungan setelah bencana. Peta yang membandingkan kondisi sebelum dan setelah bencana membantu dalam memahami dampak jangka panjang dan memperkirakan potensi risiko di masa depan.

7. **Pengambilan Keputusan Berbasis Bukti:** Pemetaan menyediakan bukti visual yang dapat digunakan sebagai dasar untuk pengambilan keputusan. Hal ini membantu pemerintah, peneliti, dan pemangku kepentingan lainnya dalam merancang dan melaksanakan kebijakan yang dapat meningkatkan ketahanan masyarakat terhadap bencana.

DAFTAR PUSTAKA

- Alexander, D. 2002) From Civil Defence to Civil Protection. *Disaster Prevention and Management*, 11(3), 209–213.
- Fearnley, C. J. 2009. *The Boxing Day Tsunami: The Subversion of a Hazard. Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(6), 2041–2057. DOI: 10.5194/nhess-9-2041-2009.
- Füssel, H.-M., & Klein, R. J. T. 2006. Climate Change Vulnerability Assessments: An Evolution of Conceptual Thinking. *Climatic Change*, 75(3), 301–329.
- National Disaster Risk Reduction and Management Council (NDRRMC) Pakistan. 2010. Initial Damage and Needs Assessment Report: 2010 Pakistan Floods.
- National Disaster Risk Reduction and Management Council (NDRRMC). 2014. Final Report re Effects of Typhoon "YOLANDA" (HAIYAN). Retrieved from <https://reliefweb.int/report/philippines/philippines-final-report-effects-typhoon-yolanda-haiyan-november-2013>
- Oliver-Smith, A. 1996. Anthropological Research on Hazards and Disasters. *Annual Review of Anthropology*, 25, 303–328.
- Quarantelli, E. L. 2005. A Social Science Research Agenda for the Disasters of the 21st Century: Theoretical, Methodological, and Empirical Issues and Their Professional Implementation. *The American Behavioral Scientist*, 48(3), 282–313.
- Surono, Jousset, Pallister, Boichu, Buongiorno, Budisantoso, ..., Yunus. 2012. The 2010 explosive eruption of Java's Merapi volcano—A '100-year' event. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 241–242, 121–135. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2012.06.018.

BAB 4

PENGARUH LINGKUNGAN TERHADAP TANAH

Oleh Adiguna

4.1 Pendahuluan

Pengaruh lingkungan terhadap tanah adalah signifikan, karena faktor-faktor lingkungan memiliki dampak yang kuat terhadap perilaku dan sifat material tanah serta batuan.

Geoteknik adalah cabang ilmu teknik yang mempelajari perilaku material tanah dan batuan terhadap gaya, tekanan, dan perubahan lingkungan. Lingkungan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap bidang geoteknik, dan faktor-faktor lingkungan berikut ini memengaruhi perilaku dan karakteristik material tanah serta batuan:

1. Kandungan Air
2. Suhu
3. Tekanan dan Beban
4. Aktivitas Biologis
5. Kondisi Hidrologi
6. Ketinggian Tempat dan Iklim

Ketika merencanakan proyek-proyek konstruksi atau pengembangan, perhitungan geoteknik harus mempertimbangkan kondisi lingkungan untuk memastikan stabilitas, keamanan, dan keandalan struktur. Kondisi lingkungan yang berubah juga harus dipertimbangkan dalam pemeliharaan struktur atau mitigasi risiko yang terkait dengan geoteknik. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam tentang lingkungan dan dampaknya terhadap material tanah dan batuan penting dalam praktik geoteknik.

4.2 Kandungan Air

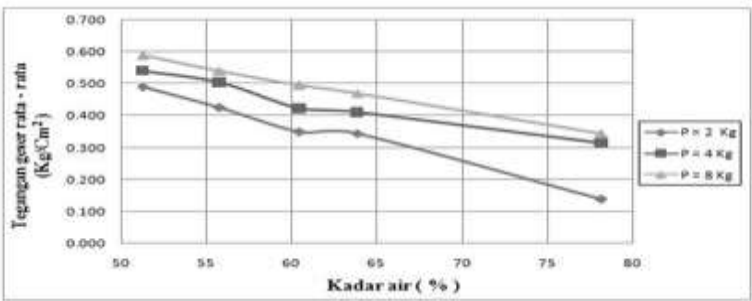
Kandungan air dalam tanah sangat memengaruhi sifat mekanis tanah. Variasi dalam kandungan air dapat menyebabkan perubahan volume, kekuatan geser, dan stabilitas tanah. Kelebihan air dapat mereduksi kekuatan tanah dan mengancam stabilitasnya.

4.2.1 Perubahan Kadar Air Terhadap Parameter Kuat Geser Tanah

Jika dilakukan variasi kadar air tanah untuk mengevaluasi dampaknya terhadap parameter geser tanah. Hasil dari uji geser langsung pada variasi tanah menunjukkan bahwa peningkatan kadar air tanah berhubungan dengan penurunan tegangan geser tanah. Hal ini mengindikasikan berkurangnya stabilitas tanah, yang pada gilirannya dapat meningkatkan risiko terjadinya longsor.

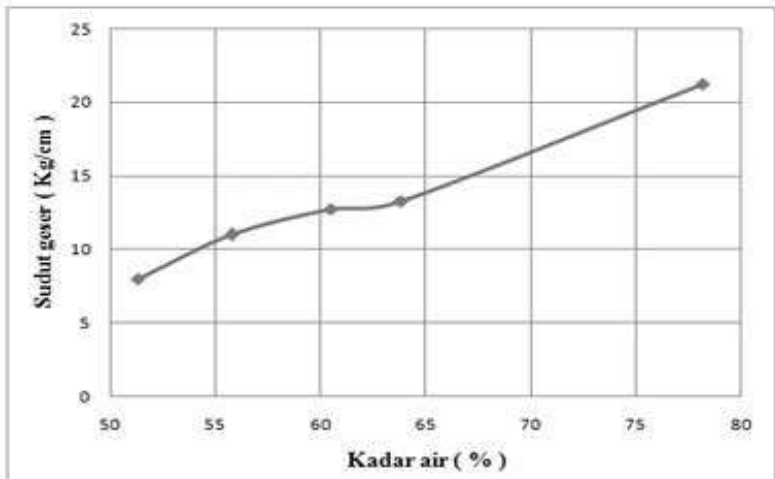
Meskipun nilai sudut geser menurun dan kohesi meningkat seiring peningkatan kadar air, tegangan geser tanah yang menurun cenderung menjadi faktor dominan dalam menurunkan stabilitas tanah. Sehingga, tanah menjadi lebih rentan terhadap kelongsoran ketika musim hujan atau pada kondisi dimana kadar air tanah meningkat secara signifikan.

Hal ini penting untuk memahami hubungan antara faktor lingkungan, khususnya perubahan kadar air tanah, dengan perilaku mekanik tanah dan potensi terjadinya bencana alam seperti longsor. Dengan pemahaman ini, diharapkan dapat dikembangkan strategi mitigasi yang lebih efektif untuk mengurangi risiko longsor dan melindungi infrastruktur serta kehidupan manusia dari dampak negatifnya.



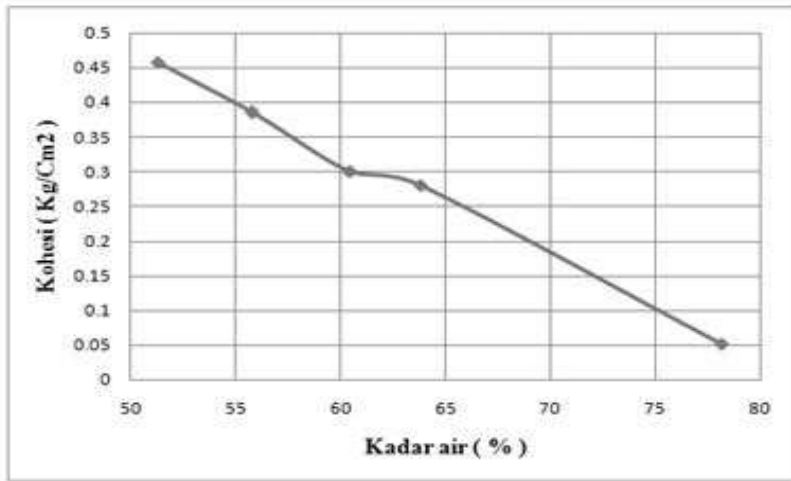
Gambar 4.1. Hubungan Tegangan geser dengan kadar air tanah
(Sumber : Utami, dkk., 2018)

Gambar di atas menampilkan beberapa grafik hasil uji geser langsung yang telah dijalankan di lingkungan laboratorium. Terlihat bahwa semakin besar beban vertikal (P), tegangan geser meningkat, sementara semakin tinggi kadar air tanah, tegangan geser cenderung menurun. Hal ini menandakan bahwa perubahan kadar air dalam tanah menyebabkan penurunan kekuatan geser tanah secara umum. Dalam konteks ini, perubahan ini seringkali menjadi faktor pemicu banyaknya kejadian longsor pada musim hujan, karena peningkatan kadar air dalam tanah mengurangi kestabilan, sehingga tanah lebih rentan terhadap kelongsoran.



Gambar 4.2. Hubungan Sudut Geser Dalam dengan Kadar Air
(Sumber : Utami, dkk., 2018)

Seperti yang terlihat dalam ilustrasi pada Gambar di atas, terdapat hubungan positif antara sudut geser dalam tanah dan kandungan air. Secara spesifik, sudut geser dalam tanah cenderung meningkat seiring dengan peningkatan kadar air tanah.



Gambar 4.3. Hubungan Kohesi dengan Kadar Air
(Sumber : Utami, dkk., 2018)

Seperti yang terlihat dalam ilustrasi pada Gambar di atas bahwa dengan meningkatnya kadar air, nilai kohesi tanah menurun. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan kadar air dalam tanah akan mengurangi kekuatan daya lekat antara partikel tanah.

Berdasarkan hasil Analisis dapat disimpulkan sebagai berikut: Pada hasil pengujian geser langsung bahwa nilai tegangan geser tanah untuk tiap-tiap pembebanan semakin besar seiring dengan makin rendahnya kadar air pada tanah tersebut. Semakin rendah kadar air pada ϕ tanah, sudut geser dalam tanah (nilainya semakin kecil). Perubahan kadar air tanah memberikan pengaruh pada nilai kohesi (c), semakin tinggi kadar air tanah maka nilai kohesi tanah semakin turun. Secara keseluruhan dapat dikatakan bahwa nilai tegangan geser tanah meningkat seiring dengan semakin rendahnya kadar air pada tanah, meskipun nilai sudut geser menurun dan kohesi meningkat (Utami, dkk., 2018).

4.2.2 Kadar Air Terhadap Nilai Konsolidasi di Tanah

Kadar Air dan Nilai Konsolidasi Pengujian konsolidasi dua macam sampel ini, didapatkan hasil yang menjelaskan penurunan/konsolidasi yang terjadi. Hasil-hasil yang didapat dari pengujian kemudian diolah dalam bentuk perhitungan sehingga

didapat nilai-nilai / koefisien mengenai konsolidasi yang terjadi. Koefisien-koefisien tersebut berupa nilai m_v , c_v , c_c dan nilai k (rembesan) seperti tabel dibawah ini :

Tabel 4.1. Nilai Koefisien Konsolidasi

No Sampel	Kedalaman (m)	Kadar Air (%)	Nilai		
			Cv Cm ² /det	Cc mm	K Cm ² /det
1	2,50 - 2,90	30,57	4,44 x 10 ⁻³	0,143	3,33 x 10 ⁻⁷
2	4,00 - 4,40	29,50	4,20 x 10 ⁻³	0,23	2,67 x 10 ⁻⁷

Sumber: Yamali 2018

1. Sampel 1 memiliki rentang kedalaman antara 2,50 - 2,90 meter dengan kadar air sebesar 30,57%. Nilai koefisien konsolidasi (C_v) untuk sampel ini adalah $4,44 \times 10^{-3}$ Cm²/det, nilai C_c adalah 0,143 mm, dan nilai permeabilitas (K) adalah $3,33 \times 10^{-7}$ Cm²/det.
2. Sampel 2 memiliki rentang kedalaman antara 4,00 - 4,40 meter dengan kadar air sebesar 29,50%. Nilai koefisien konsolidasi (C_v) untuk sampel ini adalah $4,20 \times 10^{-3}$ Cm²/det, nilai C_c adalah 0,23 mm, dan nilai permeabilitas (K) adalah $2,67 \times 10^{-7}$ Cm²/det.

Analisis lebih lanjut atau interpretasi dari data ini akan bergantung pada tujuan khusus dari studi atau penelitian yang dilakukan dengan data tersebut. Koefisien konsolidasi, indeks konsolidasi, dan permeabilitas adalah parameter geoteknik yang penting dalam mengevaluasi perilaku dan karakteristik tanah terkait dengan perubahan volume, permeabilitas, dan sebagainya.

Menurut Yamali (2018) Analisis Pengaruh Kadar Air terhadap Nilai Konsolidasi di Tanah Lempung:

1. Koefisien Konsolidasi (C_v):
 - a. Peningkatan Kadar Air: Kenaikan persentase kadar air dalam tanah lempung cenderung meningkatkan nilai koefisien konsolidasi (C_v). Ini berarti bahwa semakin

tinggi kadar air, tanah lempung akan lebih mudah mengalami proses konsolidasi atau penurunan volume.

- b. Kadar Air Rendah: Sebaliknya, jika kadar air rendah, nilai koefisien konsolidasi akan cenderung menurun. Tanah dengan kadar air rendah akan mengalami konsolidasi yang lebih lambat.

2. Indeks Kompresi (Cc) atau Indeks Tekanan:

- a. Peningkatan Kadar Air: Umumnya, nilai indeks kompresi (Cc) akan meningkat seiring dengan kenaikan kadar air dalam tanah. Tetapi, perlu diingat bahwa nilai ini juga dipengaruhi oleh ukuran butiran dalam tanah lempung. Kehadiran butiran yang lebih besar dapat mengurangi nilai indeks kompresi, mengurangi kompresibilitas tanah.
- b. Kadar Air dan Indeks Kompresi: Meskipun kadar air yang tinggi cenderung meningkatkan indeks kompresi, ukuran butiran juga memainkan peran penting. Kehadiran butiran yang lebih besar dapat mengurangi nilai ini.

3. Laju Rembesan (k):

- a. Peningkatan Kadar Air: Kadar air yang tinggi dalam tanah lempung cenderung meningkatkan nilai laju rembesan (k). Ini berarti bahwa semakin tinggi kadar air, kemungkinan rembesan air dari tanah juga lebih besar.
- b. Kadar Air Rendah: Sebaliknya, kadar air rendah dalam tanah lempung akan cenderung mengurangi nilai laju rembesan (k), yang berarti rembesan air dari tanah akan lebih kecil.

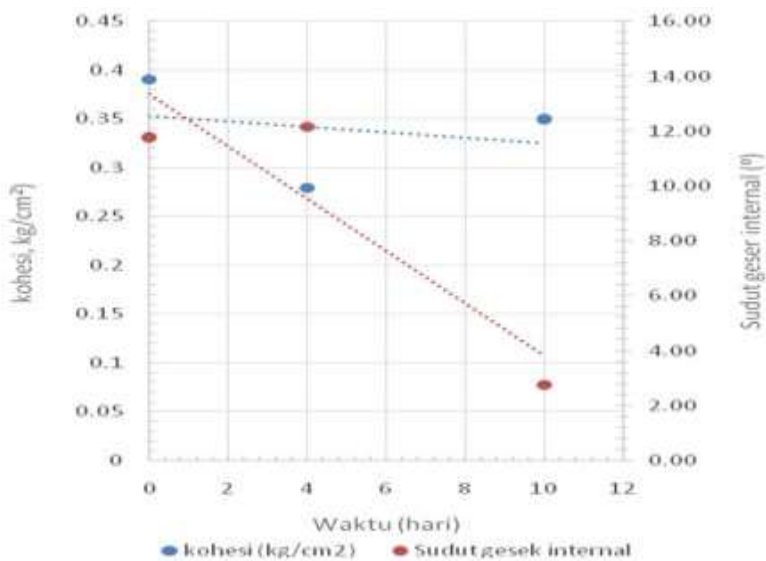
Penting untuk dicatat bahwa hubungan antara kadar air dan sifat-sifat mekanik tanah dapat bervariasi tergantung pada karakteristik tanah lempung yang ada, seperti ukuran butiran, struktur tanah, dan komposisi mineral. Variabel-variabel ini dapat mempengaruhi respons tanah terhadap perubahan kadar air.

4.2.3 Peningkatan Kadar Air Terhadap Parameter Kekuatan Tanah

Menurut Lestari (2023) dalam Analisis Hasil Pemodelan Peningkatan Kadar Air terhadap Kekuatan Tanah:

1. Perubahan Kadar Air Selama Proses Penjenuhan:
 - a. Saat tahap awal penjenuhan, terjadi peningkatan tingkat penyerapan air hingga mencapai maksimum sebesar 19,6%. Seiring berlalunya waktu, tingkat penyerapan ini secara proporsional menurun, mendekati kondisi penjenuhan penuh setelah 10 hari.
 - b. Kadar air tanah mendekati 100% setelah proses penjenuhan selama 10 hari. Ini menandakan bahwa tanah telah mencapai tingkat jenuh sempurna.
2. Pengaruh Kadar Air terhadap Kekuatan Tanah:
 - a. Parameter Kekuatan Geser (Kohesi): Proses penjenuhan menyebabkan penurunan nilai kohesi tanah. Nilai kohesi mengalami penurunan dari kondisi awal ke nilai sebesar 0,39 kg/cm², 0,28 kg/cm², dan 0,35 kg/cm² setelah penjenuhan.
 - b. Sudut Gesek Dalam Tanah: Tingkat jenuh tanah menyebabkan penurunan sudut gesek dalam tanah. Nilai sudut gesek semakin mendekati nol, yaitu 11,80°, 12,17°, dan 2,76° setelah proses penjenuhan. Peningkatan kadar air mengakibatkan penurunan sudut gesek dalam tanah.
3. Implikasi Terhadap Daya Dukung Tanah:
 - a. Semakin jenuhnya tanah menyebabkan penurunan kohesi dan sudut gesek dalam tanah, yang mengarah pada penurunan daya dukung tanah.
 - b. Penurunan nilai sudut gesek yang mendekati nol menunjukkan bahwa tanah dalam kondisi jenuh memiliki kecenderungan rendah untuk menahan gaya geser, yang berarti daya dukung tanah secara keseluruhan menurun.

Dari hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa kenaikan kadar air pada tanah berdampak signifikan terhadap parameter kekuatan geser tanah, dengan nilai kohesi dan sudut gesek dalam tanah yang menurun seiring dengan peningkatan kadar air. Hal ini mengindikasikan bahwa proses penjenuhan dalam tanah dapat berpotensi mengurangi daya dukung tanah dalam kondisi tersebut.



Gambar 4.4. Kuat Geser Tanah Terhadap Lama Penjenuhan
(Sumber : lestari 2023)

Berdasarkan hasil pemodelan peningkatan kadar air akibat infiltrasi ditinjau dari parameter kekuatan tanah, maka dapat disimpulkan bahwa jenis tanah lempung yang digunakan termasuk dalam kategori lempung dengan plastisitas tinggi (CH) sesuai dengan klasifikasi tanah menurut USCS. Besarnya penyerapan air akibat proses penjenuhan paling tinggi terjadi saat awal perendaman, yaitu sebesar 19,6%. Semakin lama waktu penjenuhan maka penyerapan air yang terjadi semakin kecil dan mendekati nol. Bertambahnya nilai kadar air pada tanah mengakibatkan menurunnya nilai kohesi dan sudut gesek dalam pada tanah. Semakin jenuh tanah (semakin lama penjenuhan) maka sudut gesek dalam tanah mendekati nol dan kohesi tanah lebih kecil dibanding

kondisi tanah asli. Sehingga semakin jenuh tanah maka nilai daya dukung tanah tersebut semakin kecil. (Lestari 2023)

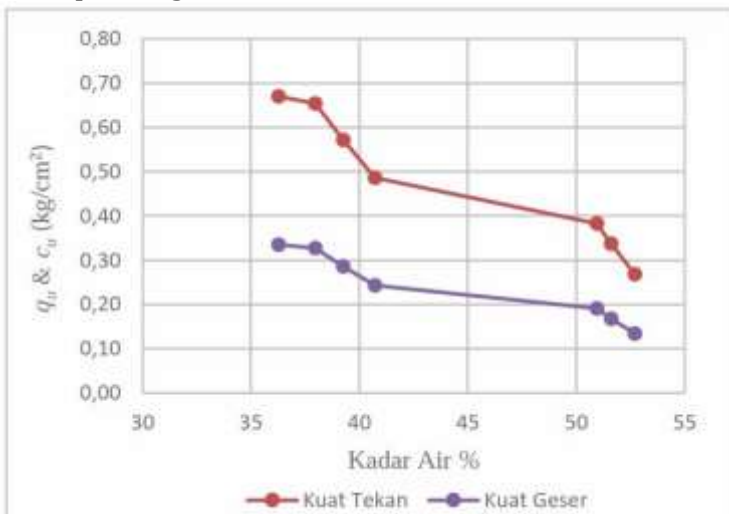
4.2.4 Pengaruh Perubahan Kadar Air Terhadap Uji Geser Langsung

Menurut Ningsih , dkk (2021) dalam studinya tentang Pengaruh Perubahan Kadar Air Pada Tanah Lempung Terhadap Uji Geser Langsung Dan Uji Kuat Tekan Bebas bahwa :

1. Karakteristik Tanah:
 - a. Kadar Air (w): 41,27%
 - b. Berat Isi (γ_d): 1,25 gr/cm³
 - c. Berat Jenis (Gs): 2,68
 - d. Laju Plastisitas: LL: 48,70%, PL: 25,96%, PI: 22,74%, Shrinkage Limit: 13,39%
 - e. Persentase Lolos Saringan No.200: 54,62% dengan nilai GI = 10
 - f. USCS: Kelompok CL (lempung anorganik dengan plastisitas rendah hingga sedang)
 - g. AASHTO: Kelompok A-7-5 (lempung)
2. Pengaruh Kadar Air terhadap Sifat Mekanik:
 - a. Pengeringan: Penurunan kadar air menyebabkan penurunan sudut geser, namun meningkatkan kohesi dan kuat geser karena tanah menjadi lebih keras.
 - b. Penambahan Air: Kenaikan kadar air di atas kadar air asli meningkatkan sudut geser, tetapi menurunkan kohesi dan kuat geser karena tanah menjadi lebih lunak dan lengket.
3. Pengaruh Kadar Air terhadap Kuat Tekan Bebas:
 - a. Pengeringan: Saat kadar air berkurang, kuat tekan bebas meningkat karena tanah menjadi lebih keras.
 - b. Penambahan Air: Saat kadar air meningkat, kuat tekan bebas menurun karena tanah menjadi lunak.
 - c. Variasi kadar air memengaruhi secara signifikan sifat mekanik tanah lempung, termasuk sudut geser, kohesi, kuat geser, dan kuat tekan bebas.

- d. Pengeringan menurunkan kadar air tanah, meningkatkan kekerasan, dan meningkatkan kuat tekan.
- e. Penambahan air mengakibatkan peningkatan kadar air, mengurangi kekerasan, dan menurunkan kuat tekan.

Analisis ini membuktikan bahwa kadar air adalah faktor kunci yang memengaruhi sifat fisik dan mekanik tanah lempung, yang relevan untuk pertimbangan teknik dan konstruksi dalam rekayasa sipil dan geoteknik.



Gambar 4.5. Grafik Hubungan Persentase Kadar Air Dengan q_u & c_u
(Sumber : Ningsih , dkk 2021)

Analisis dari hubungan antara kadar air dan nilai kuat tekan pada tanah lempung menunjukkan beberapa pola yang penting:

1. Pengaruh Kadar Air terhadap Kuat Tekan:
 - a. Pengeringan Tanah: Saat tanah lempung dikeringkan udara selama 6 jam dengan kadar air 36,27%, nilai kuat tekan bebas (q_u) mencapai 0,670 kg/cm². Hal ini menunjukkan bahwa proses pengeringan udara menghasilkan tanah lempung yang lebih keras dan

memiliki kuat tekan yang lebih tinggi karena pengurangan kadar air.

- b. Penambahan Air: Saat air ditambahkan sebesar 10% dengan kadar air 50,96%, nilai kuat tekan bebas (q_u) menurun menjadi 0,383 kg/cm². Penambahan air membuat tanah lempung menjadi lebih lunak dan mengurangi kuat tekan bebas.

2. Perbandingan Kekuatan antara Kondisi Tanah Lempung:

- a. Saat tanah lempung dikeringkan udara, nilai q_u meningkat sebesar 0,184 kg/cm² dari kondisi aslinya (0,486 kg/cm²). Proses pengeringan membuat tanah lempung lebih padat dan keras, sehingga meningkatkan kuat tekan bebasnya.
- b. Saat air ditambahkan ke tanah lempung, nilai q_u menurun sebesar 0,103 kg/cm² dari kondisi aslinya. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan air membuat tanah lempung menjadi lebih lunak, sehingga mengurangi kekuatan tekan bebasnya.
- c. Proses pengeringan udara menyebabkan peningkatan kuat tekan bebas karena mengurangi kadar air, membuat tanah lempung menjadi lebih keras.
- d. Penambahan air mengakibatkan penurunan kuat tekan bebas karena membuat tanah lempung menjadi lebih lunak.

Analisis ini menegaskan bahwa kadar air merupakan faktor kunci yang secara signifikan mempengaruhi kekuatan tekan tanah lempung. Pengeringan menghasilkan tanah yang lebih keras dan memiliki kuat tekan yang lebih tinggi, sementara penambahan air membuat tanah menjadi lebih lunak dan mengurangi kuat tekan bebasnya. Hal ini penting untuk dipertimbangkan dalam konstruksi dan rekayasa sipil yang melibatkan tanah lempung.

4.2.5 Pengaruh Siklus Basah Kering Terhadap Perilaku Mekanik Tanah

Menurut Indriani, dkk (2023) dalam studinya tentang Pengaruh Siklus Basah Kering Terhadap Perilaku Mekanik Tanah Lempung Stabilisasi Biosementasi Dengan Bakteri *Bacillus Subtilis* bahwa :

Analisis dari hasil studi menunjukkan perubahan signifikan dalam sifat fisik dan mekanik tanah lempung sebelum dan setelah stabilisasi dengan bakteri *Bacillus Subtilis*. Berikut adalah analisisnya:

Sifat Fisik Tanah Asli:

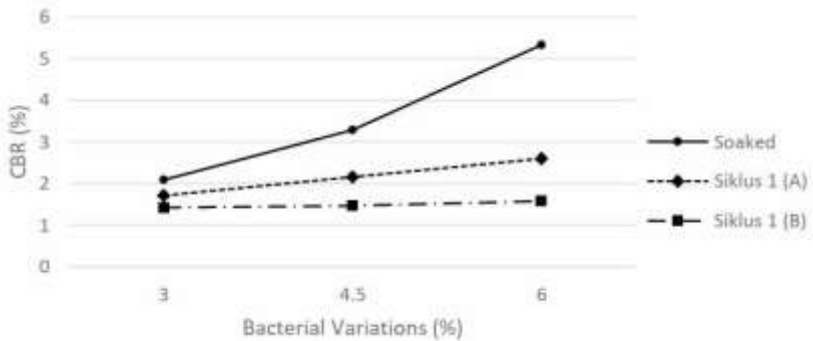
1. Berat Jenis (*Specific Gravity*): 2,72 gr/cm³, menunjukkan klasifikasi sebagai tanah lempung anorganik dengan plastisitas sedang.
2. Kadar Air Optimum: 23,25%
3. Kepadatan Kering Maksimum: 1,550 gr/cc
4. CBR Rendaman (*Soaked*): 1%
5. CBR Tanpa Rendaman (*Unsoaked*): 2%

Peningkatan Nilai CBR setelah Stabilisasi:

1. Penambahan Bakteri *Bacillus Subtilis*:** Penambahan 6% menunjukkan peningkatan signifikan dalam nilai CBR.
2. CBR *Unsoaked*: Meningkat dari 2% menjadi 9%.
3. CBR *Soaked*: Meningkat dari 1% menjadi 5%.
4. Metode Satu Siklus Kuat Tekan Maksimum:
5. Metode A (6 hari soaked, 8 hari unsoaked): Peningkatan CBR hingga 89% dari nilai asli sebelum stabilisasi.
6. Metode B (6 hari unsoaked, 6 hari soaked & 2 hari unsoaked): Peningkatan CBR hingga 15%. Metode A menunjukkan peningkatan CBR yang lebih besar dibandingkan dengan Metode B.
7. Stabilisasi dengan *Bacillus Subtilis*: Penambahan bakteri *Bacillus Subtilis* meningkatkan secara signifikan nilai CBR pada tanah lempung.
8. Efek pada CBR: Kondisi unsoaked dan soaked menunjukkan peningkatan masing-masing tiga kali lipat dan lima kali lipat dari nilai asli.

9. Metode Satu Siklus Kuat Tekan Maksimum: Metode A (6 hari soaked, 8 hari unsoaked) menunjukkan peningkatan CBR yang lebih signifikan dibandingkan dengan Metode B, dengan peningkatan hingga 89% dari nilai asli.

Analisis ini menekankan bahwa stabilisasi dengan bakteri *Bacillus Subtilis* memiliki dampak yang signifikan pada peningkatan nilai CBR pada tanah lempung, terutama dengan penambahan 6% dan penggunaan metode siklus tertentu, seperti Metode A, yang menghasilkan peningkatan yang lebih besar dalam kinerja tanah lempung yang stabilisasi.



Gambar 4.6. Grafik perbandingan uji CBR soaked
(Sumber : Indriani, dkk 2023)

Analisis hasil pengujian terhadap nilai CBR (*California Bearing Ratio*) menunjukkan perbedaan yang signifikan antara kondisi "soaked" dengan metode "satu siklus A" dan "satu siklus B".

1. Kondisi "Soaked" (Terendam):
 - a. Terjadi peningkatan yang paling signifikan pada nilai CBR setelah stabilisasi menggunakan bakteri *Bacillus Subtilis*.
 - b. Pada kondisi terendam, terjadi peningkatan CBR yang mencapai hingga hampir 3 kali lipat, mencapai nilai 5,33.
 - c. Penambahan bakteri dalam kondisi perendaman terbukti efektif dalam meningkatkan nilai CBR secara

dramatis, menunjukkan stabilitas yang tinggi pada tanah tersebut.

2. Metode "Satu Siklus A" dan "Satu Siklus B":
 - a. Peningkatan nilai CBR pada metode "satu siklus A" dan "satu siklus B" tidak sebesar kondisi "soaked".
 - b. Pada metode "satu siklus A", terdapat peningkatan CBR dari nilai asli sebesar 24% hingga 89% bergantung pada jumlah bakteri yang ditambahkan.
 - c. Metode "satu siklus B" menunjukkan peningkatan CBR yang lebih rendah, sekitar 3% hingga 15% tergantung pada jumlah bakteri yang digunakan.
3. Perbedaan Penambahan Bakteri dan Durasi Proses:

Periode perendaman yang lebih lama dalam kondisi "soaked" terbukti menjadi faktor peningkatan yang signifikan pada nilai CBR, dibandingkan dengan metode "satu siklus A" dan "satu siklus B" yang memiliki periode perendaman yang lebih singkat.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan nilai CBR terbesar terjadi pada kondisi "soaked" yang melibatkan periode perendaman yang lebih lama. Penambahan bakteri *Bacillus Subtilis* efektif dalam meningkatkan stabilitas tanah, namun, efeknya lebih terlihat saat periode perendaman lebih panjang. Metode "soaked" menunjukkan peningkatan nilai CBR yang lebih tinggi, mengindikasikan potensi penggunaan tanah tersebut dalam konstruksi sebagai lapisan pondasi dengan stabilitas yang lebih tinggi.

4.2.6 Pengaruh Nilai Indeks Plastisitas Tanah Lempung Terhadap Perubahan Kuat Kokoh Tanah

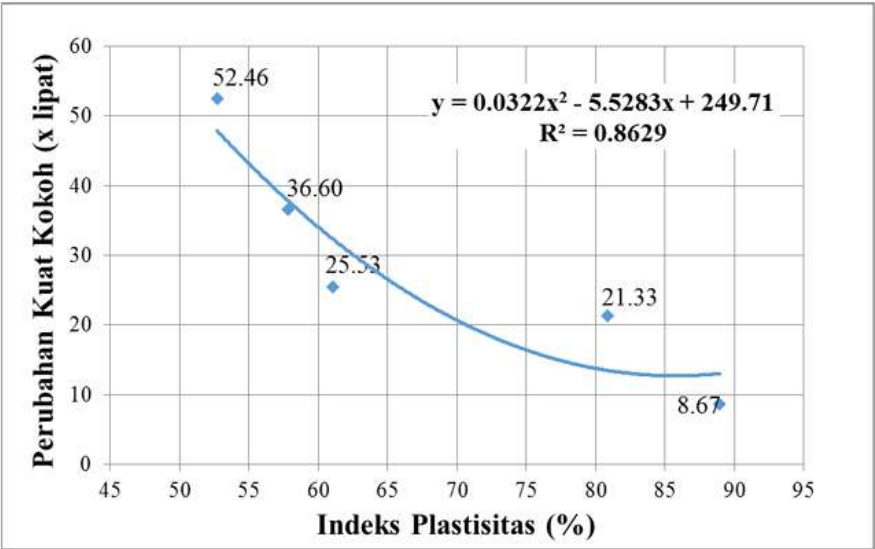
Menurut Wulandari, dkk. (2018) dalam studninya tentang Pengaruh Nilai Indeks Plastisitas Tanah Lempung Terhadap Perubahan Kuat Kokoh Tanah Lempung Akibat Variasi Kadar Air bahwa:

Analisis dari studi tersebut menyoroti pengaruh Indeks Plastisitas (PI) terhadap perubahan kekuatan tanah lempung dalam menghadapi fluktuasi kadar air tanah. Berikut ini sintesis dari hasil penelitian tersebut:

1. Menilai dampak Indeks Plastisitas (PI) terhadap perubahan kekuatan tanah lempung saat variasi kadar air tanah terjadi.
2. Menggunakan sampel tanah lempung dari lima lokasi di Surabaya bagian Timur dan Selatan dengan nilai PI yang bervariasi.
3. Variasi kadar air dilakukan dengan mengurangi air pada sampel tanah secara alami sebesar 10%, 20%, 30%, 40%, dan 50% dari kadar air awal.
4. *Unconfined Compression Test* digunakan untuk mengevaluasi kekuatan tanah pada setiap variasi kadar air.
5. Seiring dengan peningkatan kadar air, kekuatan tanah lempung menurun secara signifikan, dan sebaliknya, kekuatan meningkat saat kadar air berkurang.
6. Semakin tinggi nilai Indeks Plastisitas (PI) tanah, perubahan kekuatan tanah akibat variasi kadar air menjadi semakin kecil, dan sebaliknya.
7. Pada rentang perubahan kadar air yang sama, tanah lempung dengan nilai PI yang tinggi (dekat 90) mengalami perubahan kekuatan sekitar 8 kali lipat, sementara yang memiliki nilai PI sekitar 50 mengalami perubahan sekitar 50 kali lipat.
8. Indeks Plastisitas (PI) memiliki pengaruh yang signifikan terhadap perubahan kekuatan tanah lempung saat mengalami fluktuasi kadar air.
9. Semakin tinggi nilai PI, perubahan kekuatan tanah karena variasi kadar air menjadi lebih terbatas.
10. Tanah lempung dengan PI yang tinggi memiliki sensitivitas yang lebih rendah terhadap perubahan kadar air dibandingkan dengan yang memiliki nilai PI yang lebih rendah.

Analisis ini menyoroti pentingnya mempertimbangkan Indeks Plastisitas (PI) dalam menginterpretasikan perubahan

kekuatan tanah lempung terhadap fluktuasi kadar air, karena nilai PI dapat memberikan gambaran tentang sensitivitas tanah terhadap perubahan kadar air dan implikasinya terhadap stabilitas struktur bangunan.



Gambar 4.7. Indeks Plastisitas dan Perubahan Kuat Kokoh Tanah
(Sumber : Wulandari, dkk. 2018)

Analisis dari gambar menunjukkan bahwa nilai Indeks Plastisitas (PI) memiliki hubungan dengan kemungkinan terjadinya perubahan kekuatan tanah, terutama terkait dengan fluktuasi kadar air. Berikut adalah sintesis dari observasi tersebut;

Hubungan antara Indeks Plastisitas dan Perubahan Kekuatan Tanah:

1. Semakin rendahnya nilai Indeks Plastisitas, semakin besar kemungkinan perubahan kekuatan tanah.
2. Penurunan nilai Indeks Plastisitas mengakibatkan tanah menjadi lebih rentan mengalami perubahan dari keadaan plastis ke semi padat, dan sebaliknya.
3. Tanah dengan Indeks Plastisitas rendah menunjukkan jarak yang sempit antara Batas Cair dan Batas Plastis.

4. Jarak yang sempit antara Batas Cair dan Batas Plastis menandakan bahwa tanah memiliki potensi yang signifikan untuk mengalami perubahan kekuatan tanah yang besar saat terjadi fluktuasi kadar air di dalamnya.

Implikasi terhadap Kekuatan Tanah:

1. Tanah dengan Indeks Plastisitas rendah cenderung memiliki perubahan kekuatan yang lebih besar saat mengalami fluktuasi kadar air.
2. Kondisi ini penting untuk dipertimbangkan dalam analisis stabilitas struktur bangunan atau infrastruktur yang berdiri di atas tanah tersebut, terutama saat menghadapi perubahan musiman dalam kondisi air tanah.

Analisis ini menyoroti bahwa nilai Indeks Plastisitas merupakan indikator penting dalam menilai kemungkinan perubahan kekuatan tanah, khususnya dalam menghadapi fluktuasi kadar air. Tanah dengan nilai PI yang rendah memiliki potensi yang lebih besar untuk mengalami perubahan signifikan dalam kekuatannya, yang merupakan faktor kunci dalam perencanaan dan analisis struktural.

4.3 Suhu

Perubahan suhu juga berpengaruh terhadap sifat material tanah. Pada kondisi pembekuan tanah, bisa terjadi perubahan volume yang signifikan, seperti frost heave, yang dapat memengaruhi fondasi dan infrastruktur.

4.3.1 Pengaruh Suhu Terhadap Sifat Mekanis Tanah

Menurut Alaa, dkk (2015) dalam studinya tentang Pengaruh Suhu Pemanasan Lempung Terhadap Sifat Mekanis Gerabah Bahwa terdapat Perbedaan Sifat Fisik Lempung Setelah Dipanaskan.

Tabel 4.2. Sifat Fisis Lempung Setelah Dipanaskan

suhu °C	Maximum point stress Mpa	Break point Strain %GL	Upper yield stress Mpa	Lower yield stress Mpa	Modul us Young Mpa
700	8.3136	0.2396	1.5633	1.5486	8.6115
800	8.2524	2.636	1.5743	0.9536	54.631
900	5.0102	4.3148	3.503	3.4795	55.592

(Sumber: Alaa, dkk 2015)

Berikut ini adalah informasi yang terkandung dalam data tersebut:

1. Suhu (°C): Temperatur pada saat pengukuran dilakukan.
2. *Maximum Point Stress* (Mpa): Tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh lempung pada suhu tertentu, diukur dalam megapascal (Mpa).
3. *Break Point Strain* (%GL): Persentase regangan pada titik patah (break point) dalam satuan persen dari batas plastisitas (GL = limit plastisitas).
4. *Upper Yield Stress* (Mpa): Tegangan atas yield (titik batas elastisitas), merupakan nilai tegangan yang menyebabkan lempung mulai mengalami deformasi permanen setelah mencapai batas elastisitasnya.
5. *Lower Yield Stress* (Mpa): Tegangan bawah yield, menunjukkan nilai tegangan di bawah batas elastisitas di mana lempung mulai kembali ke bentuk semula setelah diberi beban.
6. *Modulus Young* (Mpa): Modulus elastisitas, menggambarkan kekakuan material pada suhu tertentu dalam megapascal (Mpa).

Data ini menunjukkan bagaimana sifat fisik dari lempung berubah dengan suhu. Pada suhu yang lebih tinggi, lempung mungkin mengalami perubahan signifikan dalam sifat-sifat mekaniknya seperti kekuatan, elastisitas, dan kemampuan deformasi.

Analisis dari pernyataan tersebut menyoroti perubahan sifat material lempung pada rentang suhu yang berbeda. Berikut adalah sintesis dari perubahan tersebut:

Perubahan Karakteristik pada Suhu yang Berbeda:

1. Pembakaran Sempurna hingga 700°C: Pada suhu ini, terjadi pembakaran sempurna material karbonat dalam lempung.
2. Suhu Di atas 800°C: Permukaan lempung tersegel, menyebabkan material karbonat dan sulfida yang belum terbakar terperangkap, menghasilkan fenomena black coring.
3. Rentang 800-900°C: Proses sintering dimulai, partikel lempung mulai saling menyatu membentuk material keras yang disebut bisque.

Perubahan dalam Kekuatan Tekan pada Suhu yang Berbeda:

1. 700°C: Lempung mampu menahan gaya maksimum sebesar 8.3136 MPa sebelum retak.
2. 800°C: Lempung dapat menahan gaya sebesar 8.2524 MPa sebelum mengalami retak, menunjukkan sedikit perbedaan dari suhu 700°C.
3. 900°C: Kekuatan lempung menurun secara signifikan, hanya mampu menahan gaya maksimum sebesar 5.0102 MPa.

Implikasi Terhadap Suhu dan Kekuatan Tekan Lempung:

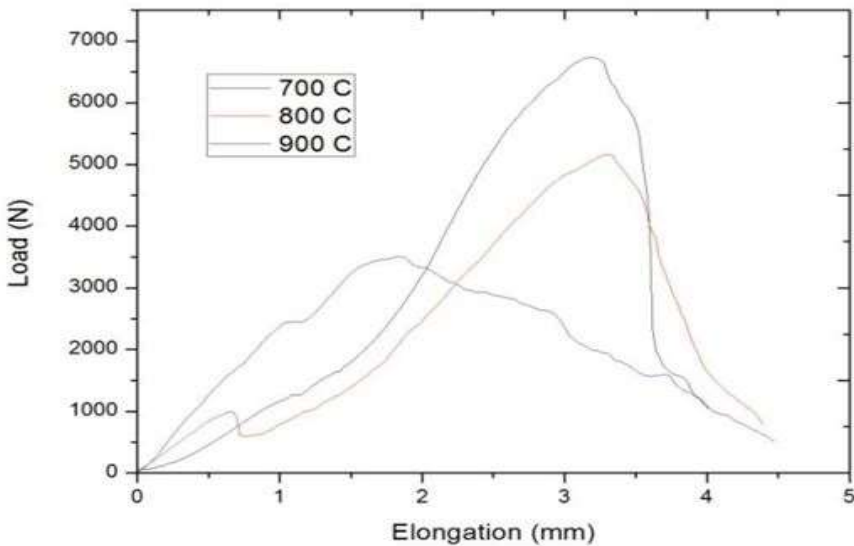
1. Penurunan Kekuatan Tekan: Peningkatan suhu dari 800°C ke 900°C mengakibatkan penurunan signifikan dalam kekuatan lempung.
2. Proses Sintering: Rentang suhu 800-900°C menandai awal proses sintering, di mana partikel lempung mulai menyatu membentuk material yang lebih padat.

Fenomena Black Coring:

1. Ketika mencapai suhu di atas 800°C, fenomena black coring terjadi akibat tersegelnya permukaan lempung, menyebabkan material karbonat dan sulfida yang belum terbakar terperangkap.

Analisis ini menunjukkan bahwa perubahan suhu pada lempung dapat mengakibatkan perubahan sifat material, termasuk kekuatannya. *Fenomena black coring* dan proses *sintering*

mempengaruhi karakteristik fisik dan mekanik lempung pada suhu yang berbeda, yang penting untuk dipertimbangkan dalam penggunaannya dalam aplikasi tertentu, terutama yang memerlukan stabilitas struktural pada suhu tinggi.



Gambar 4.8. Grafik Hubungan Antara Gaya Tekan
(Sumber: Alaa, dkk 2015)

Gambar 4.8. Grafik Hubungan antara gaya tekan yang diberikan terhadap perubahan ukuran sampel tanah lempung yang telah dipanaskan pada suhu yang berbeda bisa dijelaskan sebagai berikut:

Analisis dari eksperimen menunjukkan bahwa tanah lempung, ketika dipanaskan pada suhu yang berbeda, menunjukkan perubahan dalam responsnya terhadap gaya tekan. Perubahan suhu ini memengaruhi sifat fisik dan mekanik tanah lempung, dan beberapa perubahan tersebut dapat diamati selama eksperimen. Berikut adalah sintesis dari efek perubahan suhu pada tanah lempung:

Respons Tanah Lempung terhadap Gaya Tekan dan Perubahan Suhu:

1. Deformasi atau Perubahan Ukuran: Saat tanah lempung dipanaskan dan diberikan gaya tekan, perubahan ukuran

atau deformasi pada sampel dapat diukur. Ini mencerminkan respons sampel tanah lempung terhadap tekanan yang diberikan pada berbagai suhu.

Fase Perubahan pada Tanah Lempung saat Dipanaskan:

1. Pengeringan: Awalnya, terjadi proses pengeringan saat suhu naik.
2. Pembakaran Komponen Organik: Material organik dalam tanah lempung dapat terbakar atau terdekomposisi pada suhu tertentu.
3. Proses Sintesis dan Pengikatan Partikel: Saat suhu naik, terjadi proses sintesis di mana partikel-partikel tanah lempung mulai menyatu atau terikat, menghasilkan perubahan dalam kekuatan dan perilaku kompresif sampel.

Implikasi terhadap Sifat Mekanik dan Fisik Tanah Lempung:

1. Perubahan suhu dapat mengakibatkan perubahan dalam struktur dan sifat tanah lempung, yang tercermin dalam responsnya terhadap gaya tekan.
2. Tahapan perubahan termal (pengeringan, pembakaran, sintesis partikel) mempengaruhi kekuatan dan perilaku kompresif sampel tanah lempung.

Pentingnya Pengamatan pada Berbagai Suhu:

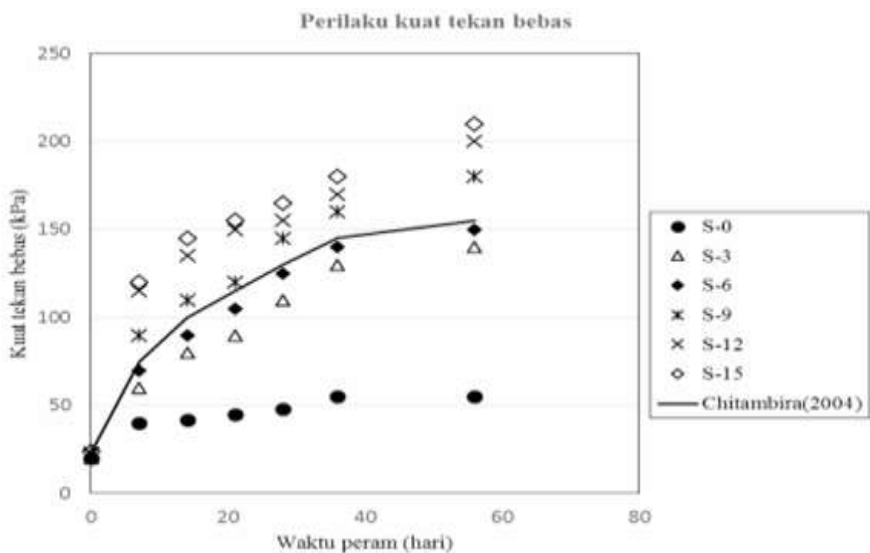
1. Pengamatan perubahan respons sampel tanah lempung pada berbagai suhu penting untuk memahami perubahan perilaku dan sifat fisik-mekaniknya.
2. Informasi ini dapat memberikan wawasan tentang bagaimana tanah lempung merespons tekanan pada kondisi suhu yang berbeda, yang penting untuk aplikasi di bidang rekayasa sipil, konstruksi, atau bidang lain yang memanfaatkan tanah lempung pada suhu bervariasi.

Analisis ini menyoroti bahwa perubahan suhu pada tanah lempung dapat menyebabkan perubahan signifikan dalam sifat fisik dan mekaniknya, dan memahami perubahan ini penting untuk

pemahaman yang lebih baik tentang respons tanah lempung terhadap tekanan pada kondisi suhu yang berbeda.

4.3.2 Pengaruh Temperature Terhadap Perilaku Geser Tanah

Menurut Harmoko, dkk (2018) dalam studinya tentang Pengaruh Temperature Pemeraman Pada Perilaku Geser Tanah Lempung Yang Distabilisasi Dengan Semen bahwa sejumlah rangkaian eksperimen dan tinjauan literatur yang dilakukan terkait stabilisasi tanah lempung dan tanah granular menggunakan berbagai variasi waktu dan suhu pemeraman.



Gambar 4.9. Perilaku Kuat Tekan Bebas pada Suhu Ruangan
(Sumber: Harmoko, dkk 2018)

Analisis dari kesimpulan yang dihasilkan dari studi pengujian mekanika tanah terkait distabilisasi tanah lempung dengan semen menyroti efek suhu, waktu pemeraman, jenis tanah, dan kandungan semen terhadap kuat tekan bebas tanah lempung. Berikut adalah sintesis dari kesimpulan tersebut;

Kesimpulan Studi Pengujian Mekanika Tanah:

1. Peningkatan Kuat Tekan Bebas dengan Kenaikan Suhu Pemeraman:
 - a. Tanah lempung anorganik yang distabilisasi dengan semen menunjukkan peningkatan kuat tekan bebas seiring dengan peningkatan suhu pemeraman pada waktu yang sama.
 - b. Kenaikan temperatur pemeraman tidak hanya meningkatkan tingkat sementasi, tetapi juga memicu reaksi posolanik yang berkontribusi pada peningkatan kuat tekan.
2. Proses Distabilisasi pada Suhu Tinggi dan Peningkatan Kuat Tekan Bebas:

Distabilisasi tanah lempung dengan semen pada suhu tinggi menghasilkan peningkatan kuat tekan bebas melalui pembentukan unsur-unsur posolanik.
3. Pengaruh Suhu Pemeraman pada Tanah Organik dan Inorganik:

Berbeda dengan tanah lempung inorganik, tanah organik yang distabilisasi dengan semen mengalami penurunan kuat tekan saat suhu pemeraman meningkat.
4. Reaksi Posolanik pada Kandungan Semen Rendah:

Meskipun kandungan semen rendah, reaksi posolanik masih berlangsung karena disosiasi silikat dan aluminat pada suhu tinggi.
5. Pengaruh Kadar Air pada Kuat Tekan Bebas:

Kadar air saat pencampuran juga memiliki pengaruh pada kuat tekan bebas, bahkan jika waktu dan suhu pemeraman tetap sama.

Implikasi dari Temuan Studi:

1. Proses distabilisasi tanah lempung dengan semen sangat dipengaruhi oleh suhu, kandungan semen, dan jenis tanah (organik vs. anorganik).
2. Peningkatan suhu pemeraman pada distabilisasi tanah organik dapat menghasilkan penurunan kuat tekan, berbeda dengan tanah anorganik yang mengalami peningkatan.
3. Pengaruh reaksi posolanik dan faktor kandungan air pada kuat tekan merupakan aspek penting yang perlu dipertimbangkan dalam proses distabilisasi tanah lempung untuk aplikasi teknik sipil dan konstruksi.

Analisis ini menggarisbawahi bahwa pengaruh suhu, kandungan semen, jenis tanah, dan kandungan air berkontribusi pada sifat mekanika tanah lempung yang telah distabilisasi dengan semen, menunjukkan kompleksitas proses distabilisasi dan pentingnya penyesuaian metode distabilisasi tergantung pada jenis tanah yang dikerjakan.

4.3.3 Pengaruh Suhu terhadap Kinerja Fly Ash pada Tanah

Menurut Auli, dkk (2021) dalam penelitian tentang Analisis dari studi tentang pengaruh suhu pemeraman terhadap kinerja fly ash dalam memperbaiki tanah lempung lunak menyoroti beberapa aspek penting terkait modifikasi tanah untuk konstruksi jalan. Berikut adalah sintesis dari temuan dan pengaruhnya terhadap parameter tanah yang relevan;

Pengaruh Fly Ash sebagai Bahan Stabilisasi pada Tanah Lunak:

1. Tujuan Stabilisasi: Penggunaan fly ash bertujuan untuk meningkatkan kualitas tanah lunak agar sesuai dengan standar teknis jalan raya.
2. Efektivitas Fly Ash: Dalam studi ini, fly ash dianggap efektif karena kemampuannya untuk mengeras dan meningkatkan kekuatan tanah saat bereaksi dengan air.

Dampak Variasi Kadar Fly Ash pada Parameter Tanah:

1. Berat Volume Kering & Kadar Air Optimum: Ditemukan penurunan berat volume kering maksimum dan peningkatan kadar air optimum tanah setelah dicampur dengan fly ash.
2. Batas Konsistensi: Terdapat penurunan nilai batas konsistensi tanah yang signifikan setelah penambahan fly ash.

Pengaruh Suhu Pemeraman:

1. Penurunan Batas Konsistensi: Suhu pemeraman sekitar 40°C mempengaruhi penurunan nilai batas konsistensi tanah setelah dicampur dengan fly ash.
2. Peningkatan CBR: Nilai CBR tertinggi tercatat pada penambahan kadar fly ash sebesar 10% dengan waktu pemeraman 7 hari pada suhu di atas 40°C.

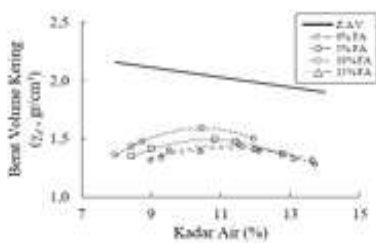
Implikasi Terhadap Penggunaan Fly Ash dan Stabilisasi Tanah Lunak:

Kehandalan Fly Ash: Fly ash menunjukkan efektivitasnya dalam meningkatkan kualitas tanah lunak, namun, perlu pertimbangan ketika suhu pemeraman melebihi 40°C karena pengaruhnya terhadap batas konsistensi dan nilai CBR.

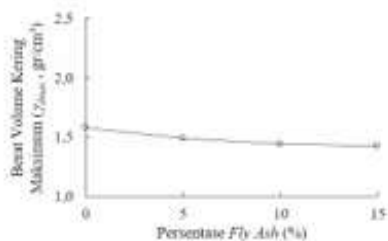
Relevansi dengan Konstruksi Jalan Raya:

Studi ini penting karena memberikan pandangan terhadap penggunaan *fly ash* dalam memperbaiki tanah lunak, yang relevan dalam memastikan keandalan dan kekuatan konstruksi jalan raya.

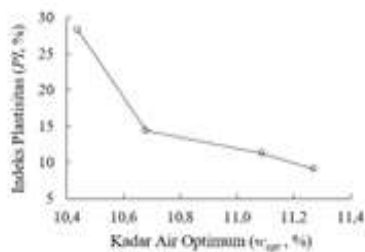
Analisis ini menunjukkan bahwa penggunaan fly ash sebagai bahan stabilisasi pada tanah lempung lunak dapat meningkatkan beberapa parameter tanah. Namun, efek dari suhu pemeraman, terutama pada batas konsistensi dan nilai CBR, memerlukan pertimbangan lebih lanjut untuk memastikan keefektifan dan keandalannya dalam aplikasi praktis di lapangan konstruksi jalan raya.



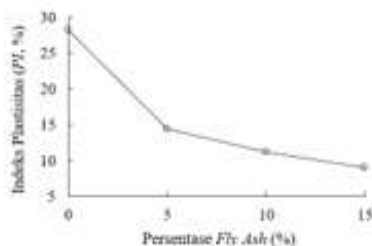
(a)



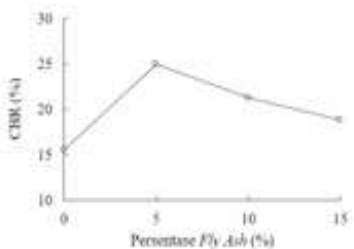
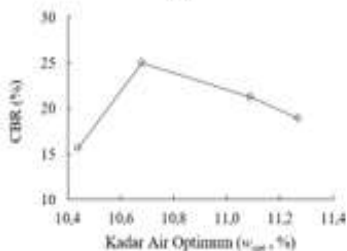
(b)



(c)



(d)



(f)

(e)

Gambar 410. Campuran Tanah Dan Fly Ash Variasi Pemeraman
(Sumber: Auli, dkk 2021)

Analisis ini membahas berbagai perubahan yang terjadi pada tanah lempung setelah penambahan fly ash dan perlakuan pemeraman pada suhu tertentu. Berikut adalah sintesis dari temuan yang diungkapkan dalam setiap gambar:

1. Gambar (a): Kadar Air Optimum

Keterkaitan Kadar Air Optimum dengan *Fly Ash*: Terdapat peningkatan kadar air optimum seiring dengan kenaikan kadar *fly ash*. Namun, pada variasi pemeraman selama 7 hari pada suhu 40°C, terjadi penurunan kadar air optimum. Ini menandakan adanya pengaruh waktu dan suhu pemeraman terhadap kadar air optimum.

2. Gambar (b): Berat Volume Kering Maksimum

Pengaruh *Fly Ash* dan Pemeraman pada Berat Volume Kering: Berat volume kering maksimum menurun dengan penambahan fly ash, tetapi mengalami peningkatan dengan waktu dan suhu pemeraman yang lebih tinggi.

3. Gambar (c) & (d): Batas Atterberg (Indeks Plastisitas)

Pengaruh *Fly Ash* terhadap Indeks Plastisitas: Indeks plastisitas menurun seiring dengan peningkatan kadar air optimum dan persentase penambahan fly ash. Fly ash dapat mengurangi indeks plastisitas, mengurangi perubahan volume tanah saat terpapar air.

4. Gambar (e) & (f): Nilai CBR (*California Bearing Ratio*)

Pengaruh *Fly Ash* dan Pemeraman terhadap Nilai CBR: Terjadi peningkatan signifikan pada nilai CBR pada tanah tanpa penambahan fly ash. Namun, penambahan kadar *fly ash* sebesar 10% dan 15% menyebabkan penurunan nilai CBR. Pada waktu pemeraman yang lebih lama dan suhu yang lebih tinggi, reaksi sementasi terjadi lebih cepat, menyebabkan sifat yang lebih rapuh pada campuran tanah dan *fly ash*.

Implikasi Hasil Pengujian:

1. *Fly ash* dapat meningkatkan sejumlah parameter tanah, namun, pengaruh pemeraman dan kadar fly ash perlu dipertimbangkan dengan cermat.

2. Pemeraman pada suhu yang lebih tinggi atau waktu yang lebih lama dapat memengaruhi secara signifikan sifat mekanik dan fisis tanah lempung yang telah ditambahkan fly ash, terutama dalam hal penurunan nilai CBR dan perubahan indeks plastisitas.

Analisis ini menunjukkan bahwa penerapan fly ash sebagai bahan stabilisasi pada tanah lempung mempengaruhi sejumlah parameter tanah, namun perlu dipertimbangkan dengan cermat dalam konteks waktu dan suhu pemeraman untuk memaksimalkan efektivitasnya tanpa mengurangi kinerja mekanik tanah secara keseluruhan.

4.3.4 Pengaruh Suhu Terhadap Daya Dukung Tanah Lunak

Menurut Gazali, dkk. (2018) dalam Analisis dari studinya menunjukkan beberapa hal penting terkait pengaruh waktu pemeraman dan penambahan semen Portland terhadap sifat mekanik tanah lunak gambut;

Pengaruh Penambahan Semen Portland:

1. Kenaikan Berat Volume Kering Maksimum (γ_d): Hasil menunjukkan bahwa penambahan semen secara konsisten meningkatkan nilai berat volume kering maksimum tanah lunak gambut. Hal ini mengindikasikan bahwa aditif semen Portland meningkatkan kerapatan tanah setelah proses pemadatan.
2. Perubahan Nilai Kadar Air Optimum (ω_{opt}): Meskipun terdapat peningkatan berat volume kering maksimum, nilai kadar air optimum tidak menunjukkan penurunan signifikan setiap kali penambahan semen. Ini menandakan bahwa aditif semen tidak secara signifikan mengurangi kadar air optimum, yang mungkin mempengaruhi kemampuan tanah dalam merespons pembebanan.
3. Kenaikan Berat Jenis Tanah: Penggunaan semen Portland menyebabkan kenaikan nilai berat jenis tanah lunak gambut yang telah dicampur dengan semen, menunjukkan bahwa aditif ini mempengaruhi sifat fisik tanah.

Pengaruh CBR (California Bearing Ratio):

1. Penambahan semen Portland pada kadar 15% dengan waktu pemeraman 21 hari menghasilkan nilai CBR maksimum sebesar 18,039%. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan semen dapat signifikan meningkatkan daya dukung tanah gambut, yang diperkuat oleh nilai CBR yang cukup tinggi.
2. Penggunaan semen Portland dalam penelitian ini terbukti efektif meningkatkan daya dukung tanah lunak gambut, terutama pada persentase penambahan semen tertentu dan waktu pemeraman yang optimal. Meskipun tidak menyebabkan penurunan signifikan pada kadar air optimum, penambahan semen secara keseluruhan berhasil meningkatkan nilai CBR dan daya dukung tanah secara mekanik. Ini menjadi indikasi positif terkait potensi stabilisasi tanah lunak gambut menggunakan semen Portland.

Berikut adalah data yang diperoleh dari hasil pengujian CBR tersebut:

Tabel 4.3. Hasil Pengujian CBR Laboratorium

Kadar Semen (%)	CBR Laboratorium (%)		
	7 Hari	14 Hari	21 Hari
0	4,0639	4,0639	4,0639
5	5,419	8,516	11,014
10	6,161	10,534	14,725
15	8,967	13,621	18,039

Sumber: Gazali,dkk (2018)

Keterangan tabel di atas berisi:

1. Kadar Semen (%): Persentase kadar semen yang digunakan dalam pengujian.
2. CBR Laboratorium (%): Nilai CBR yang diukur dalam persentase pada waktu pengamatan yang berbeda.

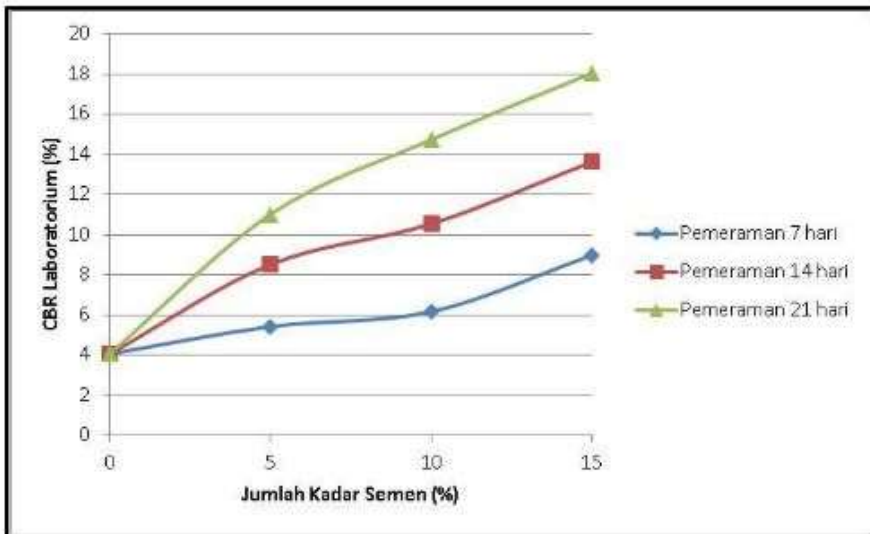
Dari data tersebut, terlihat bahwa semakin tinggi kadar semen yang digunakan, nilai CBR laboratorium cenderung

meningkat pada setiap periode pengamatan (7 hari, 14 hari, dan 21 hari).

Contohnya, jika kita fokus pada 21 hari:

1. Pada 0% kadar semen, nilai CBR adalah 4,0639%.
2. Namun, saat kadar semen meningkat menjadi 15%, nilai CBR juga meningkat menjadi 18,039%.

Hal ini menunjukkan adanya peningkatan signifikan dalam nilai CBR seiring dengan peningkatan kadar semen dalam campuran pada setiap periode pengamatan yang tercatat.



Gambar 4.11. Grafik Hubungan Antara Nilai CBR_{Lab}
(Sumber: Gazali,dkk 2018)

4.4 Tekanan dan Beban

Tekanan dari struktur atau beban lainnya dapat mengubah karakteristik tanah dan batuan, menyebabkan peningkatan atau penurunan kepadatan tanah, serta deformasi atau penurunan tanah.

4.4.1 Percepatan Proses Konsolidasi Tanah Dengan Aplikasi Tekanan Vakum dan Drainase Vertikal

Menurut Gofar (2023) dalam Analisis dari studinya menunjukkan beberapa hal penting terkait aplikasi tekanan vakum dan PVD dalam memperbaiki struktur tanah lempung sebagai pondasi jalan Tol Kayu Agung – Palembang;

Peningkatan Daya Dukung dan Percepatan Konsolidasi Tanah Lunak:

1. Efektivitas Metode: Penggunaan PVD dan tekanan vakum membawa peningkatan signifikan pada daya dukung tanah dan mempercepat proses konsolidasi. Hal ini mengindikasikan bahwa teknik ini berhasil dalam meningkatkan stabilitas dan kemampuan dukung tanah lempung yang digunakan sebagai pondasi jalan tol.
2. Variasi Kondisi Tanah: Variasi ketebalan lapisan tanah lempung dan panjang PVD menunjukkan kompleksitas kondisi tanah yang mempengaruhi jumlah penurunan total dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai konsolidasi.

Prediksi Penurunan Total dan Waktu Konsolidasi:

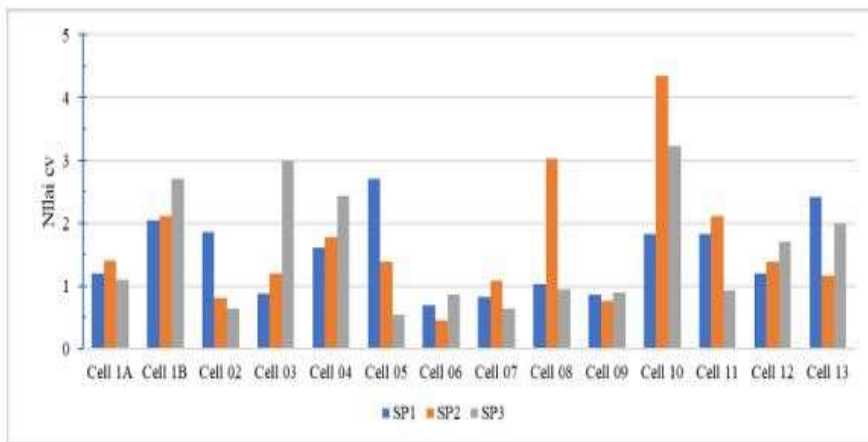
3. Prediksi Penurunan Total: Prediksi penurunan total bervariasi dari 10 cm hingga 76.24 cm, sementara penurunan aktual pada saat tekanan vakum dihentikan berkisar antara 10 cm hingga 84.64 cm. Terdapat korelasi antara panjang PVD dengan jumlah penurunan total, menunjukkan pengaruh yang signifikan dari panjang PVD terhadap penurunan tanah.
4. Waktu Konsolidasi: Prediksi waktu untuk mencapai 90% konsolidasi bervariasi antara 26 hingga 76 hari, sedangkan durasi aplikasi tekanan vakum berkisar antara 65 hingga 99 hari. Tidak ada korelasi yang jelas antara panjang PVD dengan jumlah penurunan total, mungkin disebabkan oleh variasi kondisi lapisan tanah yang berbeda-beda.

Analisis Konsolidasi Tanah:

5. Koefisien Konsolidasi (cv): Metode Asaoka menunjukkan nilai koefisien kecepatan konsolidasi global yang bervariasi antara 0.46 hingga 4.35×10^{-7} m²/det. Adanya peningkatan hingga sepuluh kali lipat terhadap nilai cv yang diukur di

laboratorium menunjukkan bahwa aplikasi lapangan (seperti tekanan vakum dan PVD) mungkin memiliki efek yang lebih kuat dalam mempercepat konsolidasi daripada pengujian laboratorium.

Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan PVD dan tekanan vakum efektif dalam meningkatkan daya dukung dan mempercepat proses konsolidasi tanah lempung sebagai pondasi jalan tol. Korelasi antara panjang PVD dengan jumlah penurunan total mengindikasikan pentingnya ukuran dan kedalaman PVD dalam merespon perubahan struktur tanah. Variasi waktu konsolidasi dan prediksi penurunan total menggambarkan kompleksitas kondisi lapisan tanah yang mempengaruhi efektivitas teknik stabilisasi tersebut.



Gambar 4.12. Variasi Nilai Koefisien Kecepatan Konsolidasi Global
(Sumber: Gofar 2023)

4.4.2 Penurunan Dan Waktu Konsolidasi Tanah Lunak Menggunakan Metode Preloading Dan Pre-Fabricated Vertical Drain

Menurut Barimbing, dkk. (2017) dalam Analisis dari studinya menyoroti pentingnya teknik perbaikan tanah seperti preloading dan PVD dalam mengatasi tantangan yang dihadapi oleh lapisan tanah lunak yang tidak menguntungkan pada proyek

konstruksi Jalan Bebas Hambatan Medan-Kualanamu STA 35+950. Beberapa aspek penting dari penelitian ini dapat dijabarkan sebagai berikut;

Kondisi Tanah Lunak yang Tidak Menguntungkan:

1. Sifat Tanah yang Merugikan: Lapisan tanah lunak cenderung memiliki daya dukung yang rendah, kompresibilitas tinggi, dan permeabilitas yang sangat rendah. Kondisi ini menghasilkan penurunan konsolidasi yang signifikan dan membutuhkan waktu yang lama, yang dapat berdampak buruk pada proses konstruksi.

Teknik Perbaikan Tanah:

2. Preloading: Metode kompresi tanah dengan pemberian tekanan vertikal sebelum konstruksi sesungguhnya dimulai. Teknik ini bertujuan untuk mengurangi penurunan tanah dan mempercepat proses konsolidasi.
3. *Pre-Fabricated Vertical Drain (PVD)*: Pemasangan PVD memiliki tujuan untuk mempercepat waktu konsolidasi tanah dengan meningkatkan pergerakan air dari dalam tanah ke permukaan, mempersingkat waktu yang dibutuhkan agar tanah mencapai tingkat konsolidasi yang diinginkan.

Efektivitas Penggunaan PVD:

4. Pengurangan Waktu Konsolidasi: Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan PVD dalam pola segitiga dengan jarak tertentu berhasil mengurangi waktu yang dibutuhkan untuk mencapai tingkat konsolidasi 95% secara signifikan. Dalam contoh ini, waktu konsolidasi berkurang drastis dari 202 hari menjadi hanya 25 hari dengan penerapan PVD.
5. Penurunan Tanah yang Serupa: Meskipun waktu konsolidasi berkurang secara dramatis, penurunan tanah tetap sama, yaitu 0,53 meter. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan

PVD berhasil mempercepat proses konsolidasi tanah tanpa mengorbankan penurunan tanah yang diinginkan.

Dalam studi ini, digunakan teknik preloading dan PVD untuk mengatasi tantangan dari lapisan tanah lunak yang tidak menguntungkan. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan PVD dalam pola yang tepat mampu secara efektif mempercepat waktu konsolidasi tanah, yang pada gilirannya dapat mengurangi waktu yang diperlukan untuk proyek konstruksi secara keseluruhan. Meskipun demikian, penurunan tanah yang diharapkan tetap tercapai, menunjukkan keberhasilan teknik ini dalam mereduksi waktu konsolidasi tanah tanpa mengorbankan penurunan tanah yang diinginkan.

Tabel 4.4. Hasil Penurunan Berdasarkan Tahap Penimbunan

Tahap penimbunan	Tinggi timbunan	Lama konsolidasi	Penurunan di titik nodal (m)		Penurunan di lapangan (m)	Metode Analitis (m)
			A	B	SP-28	
1	1,18	50	-014	-0,14	-0,01	-0,55
2	2,15	30	-0,23	-0,23	-0,02	-0,56
3	3,50	10	-0,34	-0,34	-0,02	-0,56
4	3,99	4	-0,37	-0,38	-0,02	-0,56
5	4,61	42	-0,44	-0,46	-0,03	-0,56
6	5,15	180	-0,47	-0,51	-0,16	-0,56

Sumber : Barimbing, dkk. (2017)

Keterangan dari table di atas sebagai berikut:

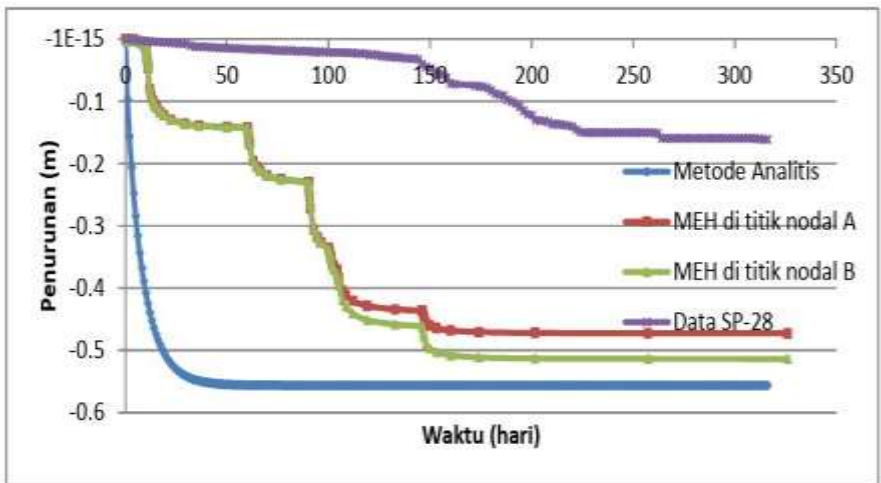
1. Tahap penimbunan: Nomor urutan tahap penimbunan.
2. Tinggi timbunan: Tinggi dari timbunan yang sedang dibangun pada tahap tersebut.
3. Lama konsolidasi: Waktu yang diberikan untuk konsolidasi pada tahap tersebut.
4. Penurunan di titik nodal (m): Besarnya penurunan pada titik nodal, diukur dalam meter.
5. Penurunan di lapangan (m): Besarnya penurunan di lapangan, diukur dalam meter.

6. Metode Analitis (m): Penurunan yang dihitung menggunakan metode analitis tertentu, seperti A, B, atau SP-28, diukur dalam meter.

Contoh, pada tahap 1:

1. Tinggi timbunan adalah 1,18.
2. Setelah 50 hari konsolidasi, terjadi penurunan sebesar -0,14 m di titik nodal dan -0,01 m di lapangan. Hasil perhitungan dengan metode analitis A adalah -0,55 m.

Data ini memberikan informasi tentang bagaimana tinggi timbunan dan waktu konsolidasi memengaruhi penurunan pada titik nodal dan di lapangan. Hal ini penting dalam analisis geoteknik untuk memahami perubahan yang terjadi pada tanah akibat penimbunan.



Gambar 4.13. Perbandingan Grafik Penurunan Antara Metode Analitis, MEH Dan Pembacaan Settlement Plate Di Lapangan
(Sumber : Barimbing, dkk. 2017)

4.5 Aktivitas Biologis

Aktivitas biologis, seperti akar tanaman atau aktivitas mikroorganisme, dapat mempengaruhi sifat dan kekuatan tanah.

4.5.1 Limbah Bauksit Dan Bakteri Probiotik Terhadap Karakterisasi Sifat Fisik Dan Mekanik Tanah Timbunan

Menurut Purnama, dkk (2021) dalam Analisis dari studinya menyoroti pemanfaatan limbah bauksit dalam pembuatan tanah timbunan Babalesi sebagai alternatif untuk mengurangi dampak lingkungan dari limbah tersebut, khususnya dalam proyek konstruksi jalan raya. Beberapa aspek penting dari penelitian ini dapat dijabarkan sebagai berikut;

Konteks Masalah dan Solusi:

1. Masalah Limbah Bauksit: Lumpur merah dari pengolahan bauksit merupakan sumber pencemaran air dan tanah, serta dapat berdampak buruk pada kesehatan masyarakat dan lingkungan sekitarnya.
2. Pendekatan Solusi: Dalam upaya mengatasi masalah limbah bauksit, penelitian ini menggunakan pendekatan ramah lingkungan dengan memanfaatkan limbah tersebut sebagai bahan baku untuk pembuatan tanah timbunan Babalesi, yang kemudian dimanfaatkan dalam konstruksi jalan raya.

Karakterisasi Sifat Tanah:

3. Uji Fisik Awal: Lumpur merah awalnya diklasifikasikan sebagai tanah lempung dengan kualitas buruk (A-7-6), sedangkan Tanah Babalesi diklasifikasikan sebagai tanah lanau dengan kualitas sedang (A-4) berdasarkan hasil uji fisik awal.
4. Kendala dalam Uji Mekanik: Meskipun Tanah Babalesi terbukti keras saat kering, dalam kondisi berair, uji mekanik pada Tanah Babalesi tidak dapat dilakukan sesuai prosedur standar karena tidak dapat dicetak. Oleh karena itu, parameter mekanik tidak dapat diukur secara langsung.

Kesimpulan dan Implikasi:

- 5. Kesimpulan Uji Fisik: Meskipun uji mekanik tidak dapat dilaksanakan, hasil uji fisik menunjukkan bahwa Tanah Babalesi memenuhi syarat sebagai tanah timbunan yang layak untuk digunakan dalam konstruksi jalan raya.
- 6. Metode Produksi Tanah Babalesi: Pembuatan Tanah Babalesi dapat dilakukan di lapangan dengan metode berlapis menggunakan alat berat sebagai pengaduk larutan bakteri dan limbah bauksit, memberikan alternatif dalam pemanfaatan limbah bauksit.

Implikasi Lingkungan dan Konstruksi:

Penelitian ini memberikan solusi berkelanjutan dalam mengelola limbah bauksit dengan cara mengubahnya menjadi bahan yang berguna dalam konstruksi jalan raya, sambil mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat sekitar lokasi pertambangan bauksit. Meskipun ada kendala dalam pengujian mekanik, karakterisasi fisik tanah menjadi bukti awal bahwa Tanah Babalesi memiliki potensi sebagai bahan konstruksi yang layak.

Tabel 4.5. Hasil Pengujian Sifat-Sifat Fisik Lumpur Merah Kondisi Asli

Jenis Pengujian	RM1	RM2	RM3
Kadar Air (%)	38,82	73,89	12,68
Kadar air rata-rata (%)		41,80	
Berat Jenis Tanah (Gs)	2,74	2,44	2,59
Berat Jenis Tanah Rata-rata (Gs)		2,59	
Berat Isi Tanah Basah (gr/cm3)	1,88	1,79	1,82
Berat Tanah Kering (gr)	1,35	1,03	1,62
Voit Ratio (e)	1,74	1,37	0,6
Porosity (n)	0,64	0,58	0,38
Derajat Kejenuhan S (%)	61,13	100	54,74

Jenis Pengujian	RM1	RM2	RM3
Volume Tanah (Vs) (%)	36	42	62
Volume Udara (Va (%))	24,88	0	17,2
Volume Air (Vw) (%)	39,12	58	20,8
Liquid Limit (LL) (%)	45,32	38,27	47,14
Plastic Limit (PL) (%)	30,21	23,88	33,79
Plastic Index (PI) (%)	15,11	14,39	13,35
Classification USCS	CL	CL	CL
Gradasi Butiran (%)			
Lempung (Clay) (%)		21	
Lanau (Silt) (%)		34,48	
Pasir (Sand) (%)			
Classification AASHTO	A-7-6	A-7-5	A-7-6

Sumber : Purnama, dkk (2021)

Tabel yang Anda berikan berisi hasil pengujian beberapa sifat fisik dari lumpur merah dalam kondisi asli, dengan tiga sampel yang diberi label RM1, RM2, dan RM3. Berikut ini adalah beberapa parameter dan pengukuran yang dilakukan:

Kadar Air dan Berat Jenis Tanah:

1. Kadar Air (%): Persentase kadar air dalam lumpur merah.
2. Berat Jenis Tanah (G_s): Berat jenis tanah (solid) dalam satuan gr/cm^3 .

Sifat-Sifat Fisik Tambahan:

1. Berat Isi Tanah Basah (gr/cm^3): Berat isi lumpur merah dalam kondisi basah.
2. Berat Tanah Kering (gr): Berat lumpur merah dalam kondisi kering.
3. Voigt Ratio (e): Perbandingan volume void terhadap volume padatan tanah.
4. Porosity (n): Porositas tanah.
5. Derajat Kejenuhan S (%): Persentase air terhadap volume rongga tanah.
6. Volume Tanah (V_s) (%): Persentase volume tanah terhadap total volume sampel.

7. Volume Udara (V_a) (%): Persentase volume udara dalam sampel.
8. Volume Air (V_w) (%): Persentase volume air dalam sampel.
9. Liquid Limit (LL) (%): Batas cair tanah (dalam persentase).
10. Plastic Limit (PL) (%): Batas plastis tanah (dalam persentase).
11. *Plastic Index* (PI) (%): Indeks plastis tanah.
12. Classification USCS: Klasifikasi tanah berdasarkan sistem USCS (Unified Soil Classification System).
13. Classification AASHTO: Klasifikasi tanah berdasarkan sistem AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials).

Gradasi Butiran:

1. Lempung (Clay) (%): Persentase lempung dalam sampel.
2. Lanau (Silt) (%): Persentase lanau dalam sampel.
3. Pasir (Sand) (%): Persentase pasir dalam sampel.

Hasil pengujian ini memberikan informasi yang penting dalam menentukan karakteristik fisik dari lumpur merah, seperti kekonsistenan, komposisi, sifat-sifat plastis, dan klasifikasi jenis tanah.

4.5.2 Bio-Enzymes Terhadap Stabilisasi Tanah Ekspansif

Menurut Yunus, dkk (2020) dalam penelitian ini, penggunaan fly ash dan enzim molase difokuskan untuk mengatasi permasalahan tanah ekspansif. Berikut adalah beberapa poin analisis terkait hasil penelitian;

Pengaruh Penggunaan Fly Ash dan Enzim Molase pada Sifat Tanah:

1. Pengaruh Penggunaan Fly Ash (FA):
 - a. Penurunan Indeks Plastisitas (PI): Campuran tanah lempung ekspansif dengan penambahan fly ash cenderung mengalami penurunan nilai PI. Campuran terbaik menunjukkan nilai PI minimum pada campuran Tanah + FA 17% + EM 2% sebesar 27,15%. Penurunan PI menunjukkan kemungkinan peningkatan stabilitas tanah.

- b. Perubahan Nilai Berat Volume Maksimum (γ_d) dan Kadar Air Optimum (W_{opt}): Penggunaan fly ash, terutama pada konsentrasi tertentu, memengaruhi nilai W_{opt} dan γ_d , dengan tanah asli memiliki nilai W_{opt} tertinggi 29,40% dan γ_d 1,42 gr/cm³.

2. Pengaruh Penggunaan Enzim Molase (EM):

- a. Variasi Nilai CBR (California Bearing Ratio): Campuran Tanah + FA 17% + EM menunjukkan variasi dalam nilai CBR unsoaked dan soaked. Terdapat peningkatan CBR unsoaked hingga 18,60% pada campuran Tanah + FA 17% + EM 6%, namun nilai terendah tercatat pada campuran Tanah + FA 17% + EM 10% sebesar 12,30%.
- b. Pengaruh terhadap Pembengkakan Tanah: Penambahan enzim molase juga mempengaruhi pembengkakan tanah (*swelling*), dengan campuran Tanah + FA 17% + EM 2% menunjukkan pembengkakan terendah sebesar 1,32%, sementara campuran Tanah + FA 17% tanpa enzim memiliki pembengkakan tertinggi sebesar 3,64%.

Implikasi dari Hasil Pengujian:

Hasil pengujian menunjukkan bahwa campuran tanah dengan fly ash dan enzim molase mampu mempengaruhi sifat-sifat tanah ekspansif seperti penurunan indeks plastisitas, perubahan nilai CBR, berat volume maksimum, kadar air optimum, dan pembengkakan tanah. Penggunaan kombinasi fly ash dan enzim molase memberikan alternatif potensial untuk meningkatkan stabilitas dan kualitas tanah dalam aplikasi teknik sipil, khususnya dalam mengatasi masalah tanah ekspansif pada proyek konstruksi.

4.5.3 Pengaruh Kultur Bakteri Pada Proses Biosementasi Tanah Laterit Terhadap Nilai CBR

Menurut Indriyani, dkk. (2023) dalam studinya mengenai pengaruh kultur bakteri, khususnya *Bacillus Subtilis*, pada tanah laterit terhadap nilai CBR (*California Bearing Ratio*) dievaluasi. Berikut adalah analisis dari penelitian tersebut;

Konteks Penelitian:

Tanah laterit cenderung memiliki konsistensi yang tidak konsisten dan sifat pelapukan yang signifikan, membuatnya tidak ideal untuk pekerjaan konstruksi. Salah satu metode untuk meningkatkan kualitasnya adalah menggunakan biosementasi, yang melibatkan bakteri untuk proses Microbial-induced Calcite Precipitation (MICP). Penelitian ini berfokus pada penggunaan bakteri *Bacillus Subtilis* untuk meningkatkan kestabilan tanah laterit.

Hasil Pengujian dan Implikasi:

1. Peningkatan CBR dengan Penggunaan Bakteri:
 - a. Pengaruh Umur Kultur Bakteri: Pengujian menunjukkan peningkatan nilai CBR Laboratorium pada kondisi terendam (Soaked) dari nilai awal sebelum stabilisasi menjadi 4,8 hingga 4,9 kali lipat pada periode perendaman 28 hari dengan umur kultur satu hari dan tiga hari.
 - b. Peningkatan Signifikan pada CBR: Penggunaan bakteri dengan konsentrasi 3% menunjukkan peningkatan CBR hingga 95% dengan umur kultur satu hari, dan 96% pada umur kultur tiga hari dari nilai awal sebelum stabilisasi.
2. Penerapan pada Pondasi Jalan:

Kelayakan Sebagai Bahan Lapisan Pondasi Jalan: Tanah yang telah mengalami stabilisasi menggunakan bakteri dapat dijadikan bahan lapisan pondasi jalan pada kelas B dengan peningkatan signifikan pada nilai CBR. Hal ini menunjukkan potensi penggunaan metode biosementasi untuk meningkatkan kemampuan tanah laterit dalam aplikasi konstruksi jalan.

Penggunaan bakteri *Bacillus Subtilis* dengan konsentrasi 3% pada tanah laterit menunjukkan peningkatan signifikan pada nilai CBR, menunjukkan efektivitas metode biosementasi dalam meningkatkan kestabilan tanah. Hal ini memberikan alternatif yang potensial untuk meningkatkan kualitas tanah laterit untuk

penggunaan dalam konstruksi jalan, terutama sebagai lapisan pondasi jalan dengan kelas B.

Tabel 4.6. Karakteristik Fisik Tanah

Jenis Pengujian	Hasil
Kadar air Natural	3.34%
Berat jenis	2.739 gr/cm3
Batas cair	15.49%
Batas plastis	8.12%
Indeks Plastisitas	7.38%
Lolos saringan no.200 (dicuci)	57.62 %

Sumber : Indriyani, dkk. (2023)

Hasil pengujian menunjukkan beberapa karakteristik fisik dari tanah yang diuji:

1. Kadar air alami (Natural) dari tanah tersebut adalah sebesar 3.34%.
2. Berat jenis tanah tersebut adalah sekitar 2.739 gr/cm³.
3. Batas cair tanah adalah sebesar 15.49%.
4. Batas plastis tanah adalah sebesar 8.12%.
5. Indeks plastisitas tanah ini adalah sebesar 7.38%.
6. Persentase lolos saringan no. 200 setelah dicuci adalah sebesar 57.62%.

Data ini memberikan informasi penting tentang sifat fisik tanah tersebut, termasuk tingkat kelembapan alami, kemampuan tanah untuk melebur (batas cair dan batas plastis), serta ukuran butiran tanah yang dapat lolos melalui saringan tertentu setelah proses pencucian.

Tabel 4.7. Karakteristik Mekanik Tanah

Jenis Pengujian	Concentration
Kadar Air Optimum (OMC)	16.1%
Kepadatan kering maximum (MDD)	1,696 gr/cc

Sumber : Indriyani, dkk. (2023)

Analisis terhadap nilai-nilai yang diberikan dalam pengujian mekanik tanah menyoroti informasi krusial terkait sifat-sifat dasar tanah.

Kadar Air Optimum (OMC):

1. Signifikansi OMC* Kadar air optimum (OMC) merupakan nilai penting karena menandakan jumlah air optimal yang dibutuhkan oleh tanah untuk mencapai kepadatan terbesar (MDD) saat proses pemadatan.
2. Hubungan dengan Kepadatan Kering Maksimum (MDD): OMC berkaitan erat dengan MDD karena OMC merujuk pada kelembaban yang memungkinkan tanah mencapai kepadatan kering maksimumnya. OMC yang mendekati kelembaban aktual saat konstruksi bisa meningkatkan efisiensi penggunaan air dan proses pemadatan tanah.

Kepadatan Kering Maksimum (MDD):

1. Indikator Stabilitas dan Kekuatan Tanah: Nilai Kepadatan Kering Maksimum (MDD) mencerminkan kepadatan maksimum yang dapat dicapai oleh tanah. Informasi ini krusial untuk mengevaluasi stabilitas dan daya dukung tanah saat digunakan dalam konstruksi.
2. Kaitannya dengan Kekuatan Mekanik: Kepadatan tanah pada MDD memberikan gambaran tentang kekuatan mekaniknya, karena kepadatan yang optimal berkaitan dengan stabilitas dan kemampuan tanah untuk menahan beban.

Relevansi dalam Konstruksi:

1. Pentingnya Efisiensi Air: OMC yang dekat dengan kelembaban aktual tanah saat konstruksi adalah hal yang diinginkan, karena memungkinkan pencapaian kepadatan maksimum tanah dengan menggunakan air secara efisien.
2. Stabilitas dan Daya Dukung: Kepentingan MDD dalam mengevaluasi stabilitas dan daya dukung tanah menunjukkan nilai penting dalam memilih teknik konstruksi yang sesuai dengan sifat-sifat tanah yang diuji.

Dengan demikian, informasi OMC dan MDD adalah indikator kunci dalam menilai sifat dan perilaku tanah, terutama dalam konteks pemadatan, stabilitas, dan kekuatan mekaniknya dalam proyek konstruksi.

4.5.4 Efek Gradasi Tanah Pasir Pada Penggunaan Jamur *Rhizopus Oligosporus* untuk Perbaikan Tanah Pasir Lepas

Menurut Lim, dkk. (2022) dalam Analisis dari studinya menyoroti pentingnya pengaruh gradasi pada tanah pasir lepas terhadap kekuatan geser tanah setelah ditambahkan jamur *Rhizopus oligosporus*. Beberapa poin kunci yang dapat disimpulkan: Variasi Gradasi Tanah Pasir:

Pentingnya Kombinasi Gradasi: Penelitian menunjukkan bahwa komposisi gradasi terbaik untuk tanah pasir lepas adalah dengan campuran 50% pasir halus dan 50% pasir sedang. Ini menunjukkan bahwa proporsi relatif antara pasir halus dan pasir sedang berperan penting dalam meningkatkan kekuatan geser tanah setelah perlakuan dengan jamur *Rhizopus oligosporus*.

Pengaruh Terhadap Kekuatan Geser Tanah:

Peningkatan Kekuatan Geser: Penggunaan jamur *Rhizopus oligosporus* pada campuran pasir halus dan pasir sedang menghasilkan peningkatan kuat geser maksimum. Nilai kohesi sebesar 0,59 kg/cm² dan sudut geser dalam sebesar 20° menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam kekuatan geser tanah dibandingkan dengan tanah yang tidak diolah dengan jamur.

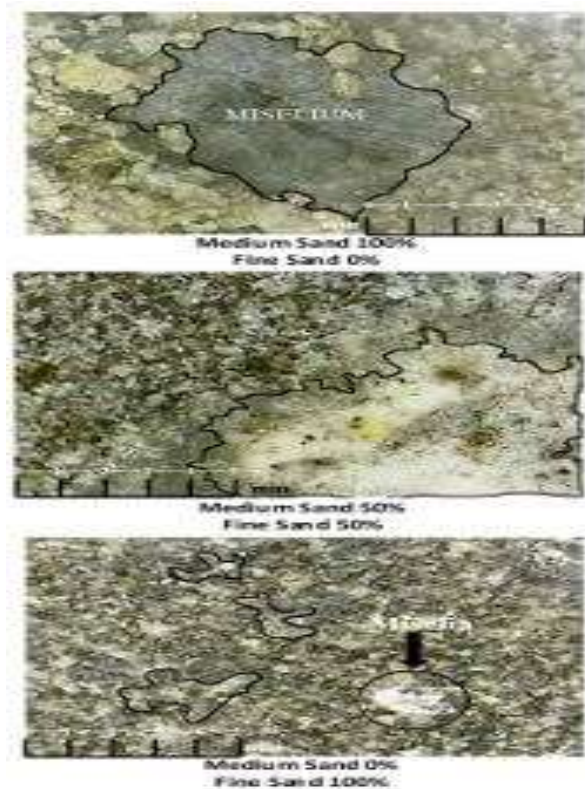
Pengamatan Mikroskopis:

Pertumbuhan Jamur: Pengamatan menggunakan mikroskop digital memperlihatkan pertumbuhan hifa dan miselium yang mengikat butiran-butiran pasir. Hal ini menunjukkan bahwa jamur *Rhizopus oligosporus* berperan dalam membentuk struktur yang mengikat butiran pasir, yang dapat meningkatkan kekuatan geser tanah.

Implikasi Teknis:

Potensi Aplikasi Praktis: Temuan ini dapat memiliki implikasi praktis dalam teknik stabilisasi tanah menggunakan jamur *Rhizopus oligosporus*. Komposisi gradasi tanah pasir yang diidentifikasi sebagai yang terbaik dapat diterapkan dalam praktik untuk meningkatkan kekuatan geser tanah pasir lepas.

Penelitian ini menggambarkan pentingnya komposisi gradasi tanah pasir lepas dalam meningkatkan kekuatan geser tanah setelah perlakuan dengan jamur *Rhizopus oligosporus*. Temuan ini membuka potensi baru dalam memperbaiki tanah pasir lepas untuk aplikasi konstruksi melalui penerapan mikroorganisme tertentu.



Gambar 4.14. Hasil Pengamatan Dengan Mikroskop Digital Untuk Sampel Tanah Setelah Perbaikan
(Sumber : Lim, dkk. 2022)

4.5.5 Pengaruh Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) terhadap Perilaku Kuat Geser Tanah Terkontaminasi Batubara

Menurut Indriani, dkk. (2023) dalam Analisis dari studinya menunjukkan hasil yang menarik dalam menggunakan teknik *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP) untuk meningkatkan perilaku kuat geser tanah yang terkontaminasi oleh batubara;

Efek Pengendapan Calcite terhadap Perilaku Kuat Geser Tanah:

Peningkatan Signifikan pada Nilai Kohesi dan Sudut Geser Dalam: Hasil pengujian menunjukkan adanya peningkatan yang signifikan pada nilai kohesi dan sudut geser dalam setelah masa pemeraman menggunakan teknik MICP.

Dampak pada Tanah yang Terkontaminasi oleh Batubara:

Peningkatan Kuat Geser yang Berbeda-beda: Stabilisasi MICP pada tanah yang terkontaminasi batubara pada tingkat yang berbeda menunjukkan peningkatan yang bervariasi. Terdapat peningkatan kuat geser yang signifikan pada tanah yang terkontaminasi 5%, 10%, dan 15% batubara setelah perlakuan MICP.

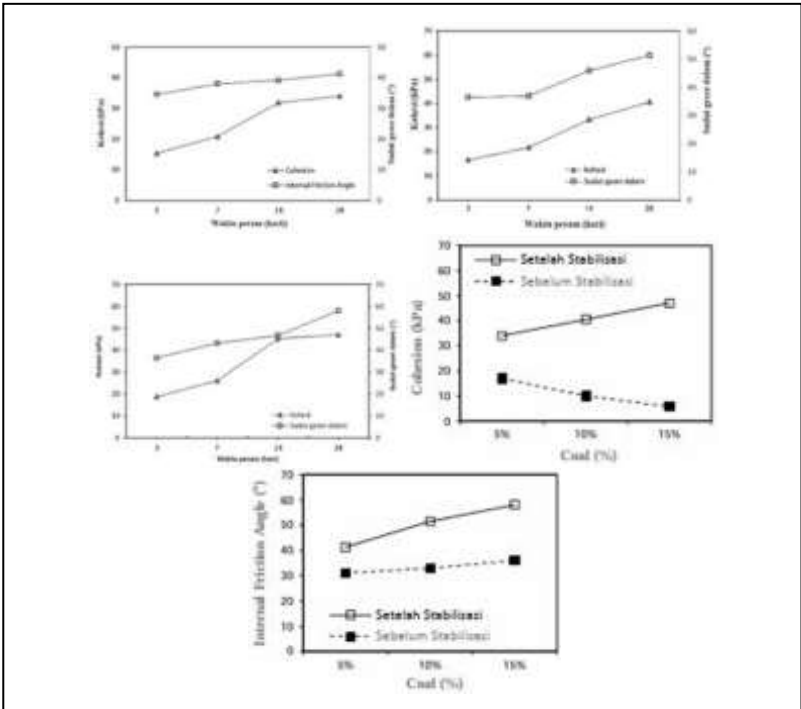
Tingkat Peningkatan Kuat Geser:

Peningkatan Pada Tanah Terkontaminasi: Pada tanah yang terkontaminasi 5% batubara, terjadi peningkatan kuat geser sebesar tiga kali lipat setelah perlakuan MICP. Sementara pada tanah yang terkontaminasi 10% dan 15% batubara, peningkatannya jauh lebih besar, masing-masing sebesar 7 dan 15 kali lipat dibandingkan dengan tanah asli.

Implikasi Teknis dan Lingkungan:

Potensi dalam Rehabilitasi Tanah Terkontaminasi: Hasil ini menunjukkan potensi MICP sebagai metode yang efektif dalam meningkatkan kuat geser tanah yang terkontaminasi oleh batubara. Hal ini dapat memiliki implikasi positif dalam rehabilitasi tanah terkontaminasi, membuka peluang baru dalam teknik pembersihan tanah.

Penelitian ini menyoroti efektivitas teknik MICP dalam meningkatkan kuat geser tanah yang terkontaminasi oleh batubara. Peningkatan kuat geser yang signifikan pada berbagai tingkat kontaminasi batubara mengindikasikan potensi teknik ini sebagai solusi untuk meningkatkan sifat mekanik tanah yang terpengaruh oleh pencemaran batubara.



Gambar 4.15. Prilaku Kuat Geser Tanah
(Sumber: Indriani, dkk. 2023)

4.6 Kondisi Hidrologi

Kondisi hidrologi, seperti perubahan muka air tanah atau drainase, memiliki dampak besar pada kondisi tanah di suatu daerah.

4.6.1 Pengaruh Curah Hujan Harian Maksimum Bulanan Terhadap Stabilitas Lereng

Menurut Tawakkal, dkk. (2016) dalam Analisis dari studninya menyoroti dampak dari curah hujan dan kemiringan

lereng terhadap stabilitas lereng di Desa Mangunharjo, Jatipurno, Wonogiri.

Pengaruh Curah Hujan:

1. Penurunan Stabilitas Lereng Setelah Hujan: Data curah hujan selama 10 tahun diobservasi dan hasilnya menunjukkan bahwa curah hujan memiliki dampak signifikan terhadap stabilitas lereng.
3. Infiltrasi Air Hujan dan Beban Lereng: Metode Green-Ampt digunakan untuk menghitung infiltrasi air hujan, yang menambah beban pada lereng. Hasilnya menunjukkan bahwa infiltrasi air hujan memperburuk stabilitas lereng karena menambah beban pada lereng akibat masuknya air ke dalam tanah.

Pengaruh Kemiringan Lereng:

1. Pengaruh Kemiringan Terhadap Stabilitas: Kemiringan lereng berperan penting dalam menentukan stabilitas. Semakin curam kemiringan lereng, nilai faktor keamanan (SF) yang menunjukkan stabilitas lereng akan semakin kecil.
2. Ketidakstabilan pada Kemiringan Ekstrem: Pada kemiringan lereng 60°, nilai SF yang kurang dari 1 mengindikasikan ketidakstabilan lereng secara signifikan.

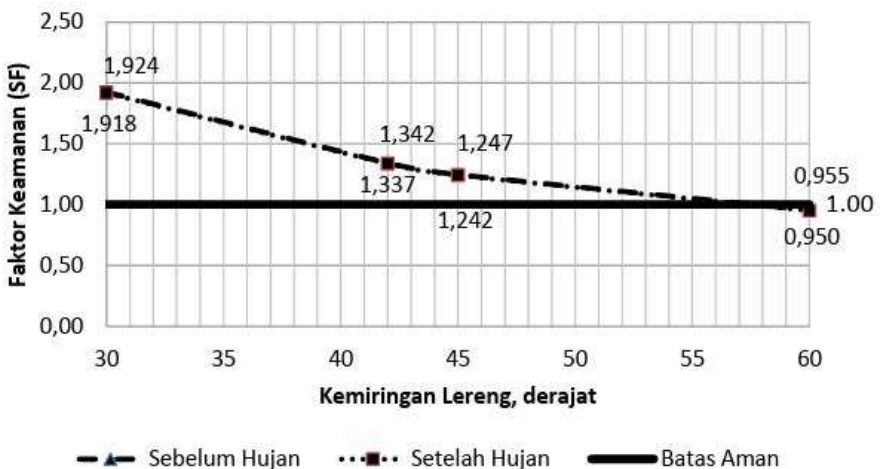
Implikasi Teknis dan Kesimpulan:

1. Penilaian Risiko Tanah Longsor: Penelitian ini memperlihatkan pentingnya evaluasi terhadap stabilitas lereng terkait dengan curah hujan dan kemiringan. Lereng yang curam dan terkena curah hujan intensitas tinggi berpotensi mengalami tanah longsor.
2. Pentingnya Perencanaan dan Pengelolaan Lereng: Data ini memberikan arahan penting bagi perencanaan wilayah terutama dalam mempertimbangkan risiko tanah longsor serta perluasan jaringan drainase untuk mengurangi dampak infiltrasi air hujan pada stabilitas lereng.

Rekomendasi dan Tindak Lanjut:

1. Pengawasan dan Mitigasi Risiko: Perlunya langkah-langkah mitigasi seperti pengawasan lereng, penambahan struktur penahan atau sistem drainase untuk mengelola air hujan, terutama di lereng yang curam atau rentan terhadap longsor.
2. Perencanaan Adaptasi: Pentingnya mempertimbangkan hasil ini dalam perencanaan penggunaan lahan dan bangunan di daerah dengan lereng curam, untuk mengurangi risiko dampak tanah longsor.

Penelitian ini menegaskan bahwa curah hujan dan kemiringan lereng berperan penting dalam menentukan stabilitas lereng. Lereng yang curam dan terpapar curah hujan tinggi cenderung mengalami penurunan stabilitas, dan pengetahuan tentang dampak ini menjadi kunci dalam pengelolaan risiko tanah longsor di wilayah lereng yang rentan.



Gambar 4.16. Hubungan Antara Kemiringan Lereng Dengan Faktor Keamanan (SF)

(Sumber: Tawakkal, dkk. 2016)

Analisis data dalam gambar menunjukkan pengaruh kemiringan lereng terhadap faktor keamanan (SF) sebelum dan setelah terjadinya curah hujan;

Sebelum Curah Hujan:

1. Lereng dengan kemiringan 30° memiliki nilai SF sebesar 1.924, menunjukkan stabilitas yang tinggi.
2. Kemiringan lereng yang lebih curam, seperti 42° dan 45° , memiliki nilai SF yang lebih rendah (1.342 dan 1.247), namun masih di atas nilai kritis ($SF > 1$).
3. Lereng dengan kemiringan 60° menunjukkan nilai SF di bawah 1 (0.955), mengindikasikan bahwa lereng pada kemiringan ini cenderung tidak stabil.

Setelah Curah Hujan:

1. Dampak curah hujan terlihat dari penurunan nilai SF pada semua model lereng. Namun, perubahan ini tidak signifikan.
2. Meskipun terjadi penurunan nilai SF pada semua kemiringan, lereng tetap mempertahankan status kestabilannya dalam skala yang sama. Nilai SF tetap di atas 1, kecuali untuk kemiringan 60° yang tetap tidak stabil dengan nilai SF 0.950.

Implikasi:

1. Pengaruh Infiltrasi Air Hujan: Curah hujan meningkatkan beban lereng, mengurangi nilai SF dan mengakibatkan potensi penurunan stabilitas lereng.
2. Kemiringan Lereng: Model lereng dengan kemiringan lebih curam cenderung memiliki nilai SF yang lebih rendah, menunjukkan potensi lebih besar terjadinya longsor.
3. Peningkatan Risiko Setelah Hujan: Penurunan nilai SF setelah hujan menunjukkan peningkatan risiko potensial terhadap longsor.
4. Kemiringan yang Curam Rentan Terhadap Longsor: Lereng dengan kemiringan 60° menunjukkan ketidakstabilan, sementara kemiringan 30° , 42° , dan 45° masih dalam kondisi stabil.

Rekomendasi:

1. Perencanaan dan Pengelolaan Lereng: Diperlukan perencanaan yang hati-hati dalam pemilihan dan pengelolaan lereng dengan kemiringan yang curam, terutama setelah hujan yang intensitasnya tinggi.
2. Pemantauan Lereng: Monitoring yang teratur diperlukan untuk mendeteksi perubahan dalam stabilitas lereng dan pengurangan risiko potensial terhadap longsor.

4.6.2 Analisis Stabilitas Lereng Berdasarkan Pengaruh Hujan Bulanan Maksimum Menggunakan Metode Bishop Disederhanakan

Menurut Arrozi, dkk. (2015) dalam Analisis data dalam studinya menunjukkan dampak kemiringan lereng dan infiltrasi air hujan terhadap faktor keamanan (SF) lereng di Dusun Pagah, Hargantoro, Tirtomoyo, Wonogiri;

Pengaruh Kemiringan Lereng:

Korelasi antara Kemiringan dan SF Lereng: Semakin curam kemiringan lereng, semakin rendah nilai faktor keamanan (SF). Lereng yang curam memiliki potensi lebih besar untuk mengalami longsor, terlepas dari pengaruh hujan. Ini menunjukkan kebutuhan akan perhatian khusus terhadap pengelolaan dan mitigasi risiko pada lereng dengan kemiringan yang curam.

Pengaruh Infiltrasi Air Hujan:

Pengaruh Infiltrasi Hujan Terhadap SF Lereng: Infiltrasi air hujan mempengaruhi nilai SF lereng secara signifikan. Tingkat infiltrasi yang tinggi dapat menyebabkan lereng menjadi jenuh, meningkatkan tekanan pada lereng, dan berpotensi mengurangi faktor keamanan (SF).

Peran Tutupan Lahan:

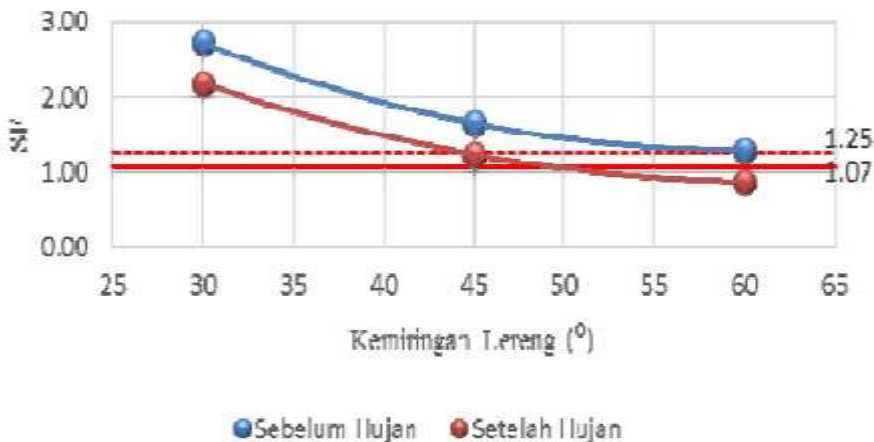
Peran Tutupan Lahan dan Penampungan Air: Tutupan lahan memiliki dampak pada kemampuannya menampung air hujan. Lahan yang mampu menampung air hujan dengan baik dapat mengurangi tekanan air di lereng dan meminimalkan kemungkinan peningkatan ketebalan lapisan tanah yang jenuh.

Implikasi:

Kemungkinan Risiko Longsor pada Lereng Curam:** Lereng dengan kemiringan yang curam memiliki risiko yang lebih tinggi terhadap longsor, terlepas dari faktor hujan. Infiltrasi air hujan menjadi faktor yang lebih meningkatkan risiko ini.

Rekomendasi:

- 1. Pengelolaan Lereng yang Efektif: Perencanaan dan pengelolaan lereng dengan kemiringan yang curam sangat penting untuk memitigasi risiko longsor.
- 2. Pemantauan Infiltrasi Air: Monitoring infiltrasi air hujan dan tingkat kejenuhan tanah pada lereng merupakan langkah yang penting untuk mengurangi risiko longsor di masa depan.
- 3. Penilaian dan Penanganan Risiko: Evaluasi terhadap faktor-faktor yang mempengaruhi stabilitas lereng dan implementasi strategi mitigasi yang tepat diperlukan untuk mengurangi risiko potensial longsor.



Gambar 4.17. Grafik Hubungan Safety factor (SF) dengan Kemiringan Lereng Sebelum dan Sesudah Hujan (Sumber: Arrozi, dkk. 2015)

Analisis data yang disampaikan menunjukkan korelasi antara faktor keamanan (SF) dan kemiringan lereng, serta pengaruh hujan terhadap stabilitas lereng:

Korelasi antara SF dan Kemiringan Lereng:

Pengaruh Kemiringan terhadap SF: Terdapat hubungan terbalik antara nilai faktor keamanan (SF) dan kemiringan lereng. Semakin curam kemiringan lereng, semakin rendah nilai SF. Ini menandakan bahwa kemiringan lereng yang lebih curam cenderung memiliki nilai faktor keamanan yang lebih rendah.

Pengaruh Hujan Terhadap Stabilitas Lereng:

Dampak Hujan Terhadap SF: Setelah hujan, terjadi penurunan nilai faktor keamanan (SF) pada semua kemiringan lereng. Hal ini menunjukkan bahwa stabilitas lereng rentan terhadap curah hujan, di mana air hujan meningkatkan risiko terjadinya longsor.

Implikasi:

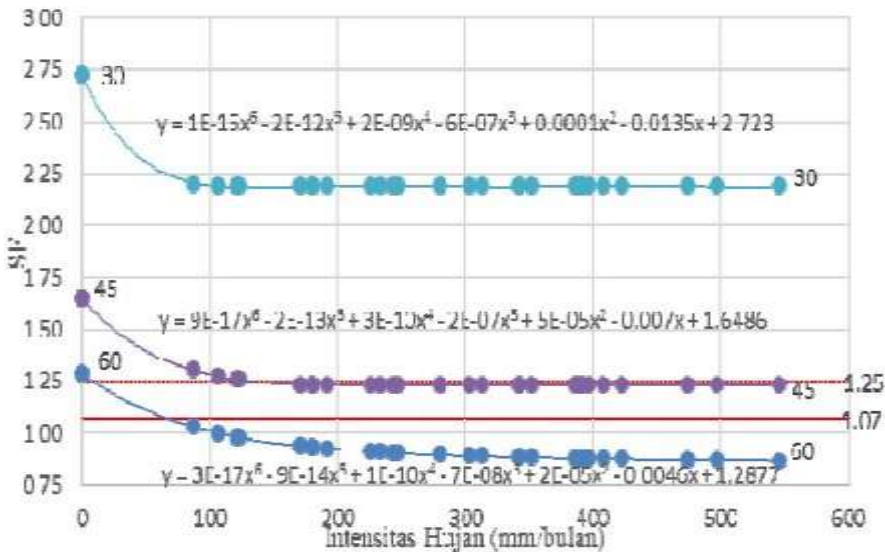
1. Pengaruh Kemiringan: Kemiringan lereng memiliki pengaruh signifikan terhadap faktor keamanan (SF) lereng. Semakin curam kemiringan, semakin rentan lereng terhadap potensi longsor.
2. Dampak Hujan: Intensitas hujan memiliki dampak langsung terhadap stabilitas lereng. Lereng yang lebih curam lebih rentan mengalami penurunan nilai SF setelah hujan, menunjukkan potensi risiko yang lebih tinggi.

Rekomendasi:

1. Pemantauan Lereng: Penting untuk melakukan pemantauan terhadap lereng dengan kemiringan curam, terutama setelah periode hujan yang intens. Ini akan membantu mengidentifikasi potensi risiko longsor dan mengambil tindakan pencegahan yang diperlukan.
3. Evaluasi Lereng: Perlu dilakukan evaluasi lebih lanjut terhadap lereng yang memiliki kemiringan yang signifikan untuk mengurangi risiko longsor, termasuk penilaian

terhadap drainase dan stabilitas lereng yang lebih mendalam.

Analisis menegaskan bahwa kondisi kemiringan lereng dan curah hujan berkontribusi secara signifikan terhadap stabilitas lereng. Lereng dengan kemiringan yang curam lebih rentan terhadap penurunan faktor keamanan setelah hujan, menunjukkan risiko potensial longsor yang lebih tinggi pada kondisi tersebut.



Gambar 4.18. Grafik Hubungan antara SF dan Intensitas Hujan untuk Tutupan Lahan Eksisting (Sumber: Arrozi, dkk. 2015)

Analisis kondisi lereng berdasarkan nilai faktor keamanan (SF) terkait dengan intensitas hujan dan klasifikasi Bowles memberikan gambaran penting tentang stabilitas lereng;

Pengaruh Intensitas Hujan terhadap Faktor Keamanan Lereng:

Penurunan SF akibat Hujan: Terdapat korelasi langsung antara peningkatan intensitas hujan (>80 mm/bulan) dan penurunan nilai faktor keamanan (SF) lereng pada semua kemiringan. Ini menunjukkan bahwa lereng rentan terhadap longsor ketika terjadi hujan yang intens.

Klasifikasi Bowles dan Kestabilan Lereng:

1. Interpretasi Klasifikasi Bowles: Penilaian kestabilan lereng berdasarkan SF menurut klasifikasi Bowles memberikan panduan yang jelas. Lereng dengan $SF > 1,25$ dianggap stabil, antara 1,25 dan 1,07 adalah kondisi kritis, dan $< 1,07$ menandakan lereng rentan longsor.
2. Kemiringan Lereng dan Kestabilan: Lereng dengan kemiringan 30° dan 45° tetap stabil meskipun terjadi hujan intensitas tinggi, dengan SF lebih besar dari 1,25.
3. Lereng Rentan Longsor: Lereng dengan kemiringan 60° mulai menunjukkan potensi rentan longsor saat hujan intensitas tinggi (>80 mm/bulan) karena SF-nya menurun di bawah 1,07. Ini menunjukkan bahwa lereng pada kemiringan 60° menjadi rentan saat kondisi hujan tertentu.

Rekomendasi:

1. Tindakan Pencegahan pada Lereng 60° : Disarankan untuk menghindari aktivitas di lereng dengan kemiringan 60° selama periode hujan intensitas tinggi untuk mengurangi risiko potensial longsor.
2. Eksperimen Variasi Tutupan Lahan: Dilakukan uji coba dengan variasi tutupan lahan (hutan dan ladang berteras) pada lereng dengan kemiringan 45° dan 60° untuk mengevaluasi pilihan tutupan lahan yang paling sesuai dalam mengurangi risiko longsor.
3. Analisis menunjukkan bahwa intensitas hujan >80 mm/bulan memiliki dampak signifikan pada penurunan faktor keamanan lereng.
4. Meskipun lereng dengan kemiringan 30° dan 45° tetap stabil saat hujan intensitas tinggi, lereng dengan kemiringan 60° menjadi rentan longsor pada kondisi tertentu.
5. Eksperimen dengan berbagai tutupan lahan akan memberikan wawasan lebih lanjut tentang cara mengurangi risiko longsor pada lereng dengan kemiringan 45° dan 60° .

4.7 Ketinggian Tempat dan Iklim

Ketinggian tempat dan iklim juga berpengaruh terhadap jenis tanah dan batuan yang ada, serta kondisi termal dan hidrologi tanah.

4.7.1 Longsor Akibat Perubahan Iklim

Menurut Gunawan, dkk. (2017) dalam Analisis data dari studinya tentang model longsor akibat perubahan iklim menggunakan Digital Elevation Models (DEM) dan perangkat Geoslope memberikan informasi penting terkait stabilitas lereng dan faktor risiko longsor;

Parameter Tanah dan Sifat Geoteknikal:

Data Geoteknik Laboratorium: Data parameter tanah seperti kadar air (wN), berat jenis tanah (Gs), berat volume tanah jenuh, kering, basah, batas cair, batas plastis, dan indeks plastisitas memberikan pemahaman mendalam tentang sifat tanah di area penelitian. Tanah diidentifikasi sebagai tanah lempung dengan indeks plastisitas yang relatif tinggi.

Parameter Model Lereng:

1. Karakteristik Lereng: Pemodelan melalui Geoslope memberikan nilai kohesi (c), sudut gesek (ϕ), kemiringan lereng, kedalaman medan, dan faktor keamanan (FK) lereng. Faktor keamanan adalah indikator kritis untuk menilai stabilitas lereng.
2. Klasifikasi Lereng: Lereng 1 tergolong aman dengan FK 1,71, sementara Lereng 2 dan 3 diklasifikasikan sebagai area yang tidak aman dengan FK masing-masing 1,52 dan 1,27. Ini mengindikasikan bahwa Lereng 2 dan 3 memiliki risiko potensial lebih tinggi terhadap longsor.

Relevansi :

1. Implikasi Model Lereng: Identifikasi bahwa Lereng 2 dan 3 tergolong dalam area yang tidak aman dari potensi longsor menunjukkan risiko yang signifikan. Hal ini mungkin memerlukan tindakan pencegahan atau mitigasi yang tepat.

2. Penelitian ini memberikan gambaran detail tentang sifat tanah, karakteristik lereng, dan risiko potensial longsor pada area penelitian.
3. Identifikasi terhadap lereng yang tergolong dalam area tidak aman (Lereng 2 dan 3) menunjukkan perlunya tindakan pencegahan atau mitigasi untuk mengurangi risiko potensial longsor.

Analisis ini menyoroti pentingnya pemahaman mendalam terhadap karakteristik tanah dan evaluasi stabilitas lereng untuk mengidentifikasi risiko potensial longsor dan memungkinkan pengambilan tindakan yang tepat untuk mengurangi risiko tersebut.

Tabel 4.8. Perhitungan Angka Keamanan Lereng Metoda Bhosop.

No	Kohesi (c) (kPa)	Sudut Gesek Dalam (φ) (°)	Berat Isi Tanah Basah (γ_b) (kN/m ³)	Berat Isi Tanah Jenuh Air (γ_{sat}) (kN/m ³)	Faktor Keamanan lereng (FK)
1	23.26 6	17.031	15.57	16.55	1,71
2	27.790	19.582	15.86	16.73	1,52
3	22.61 9	18.053	16.16	16.82	1,27

Sumber : Gunawan, dkk. (2017)

Analisis dari hasil perhitungan menggunakan metode Bishop menunjukkan pentingnya faktor keamanan (FK) dalam menilai potensi terjadinya longsor pada lereng:

Interpretasi Hasil FK pada Lereng:

- a. Lereng 1 (FK = 1,71): Dalam konteks penelitian ini, nilai FK lebih besar dari 1,5 yang menurut Hardiyatmo (2002) menunjukkan bahwa lereng ini tergolong dalam kondisi aman terhadap bahaya longsor.
3. Lereng 2 (FK = 1,52) dan Lereng 3 (FK = 1,27): Kedua lereng ini menunjukkan nilai FK di bawah 1,5, mengindikasikan potensi ketidakamanan lereng terhadap risiko longsor.

Relevansi dengan Pendekatan Metode Bishop:

- a. Keamanan Lereng: Terdapat kesesuaian dalam hasil dengan pendekatan Hardiyatmo (2002), yang mengonfirmasi bahwa lereng 2 dan 3 memperlihatkan risiko yang lebih tinggi terhadap potensi longsor.
- b. Penilaian menggunakan metode Bishop menunjukkan ketidakamanan pada lereng 2 dan 3, yang memerlukan tindakan pencegahan atau mitigasi untuk mengurangi risiko potensial longsor.

Analisis ini menggambarkan pentingnya nilai faktor keamanan dalam mengevaluasi stabilitas lereng berdasarkan metode Bishop, yang memberikan indikasi terhadap potensi risiko longsor pada area lereng tertentu. Hal ini penting untuk dijadikan dasar dalam pengambilan keputusan terkait upaya mitigasi dan tindakan pencegahan untuk mengurangi risiko longsor yang mungkin terjadi.

4.7.2 Perubahan Iklim Terhadap Penurunan Nilai Kohesivitas Tanah

Menurut Anggraini, dkk. (2016) dalam Analisis dari studinya menunjukkan dampak yang signifikan dari perubahan iklim, khususnya terkait hujan berdurasi panjang dengan intensitas sedang, terhadap kestabilan lereng, serta penurunan nilai kohesi tanah;

Dampak Hujan Berdurasi Panjang dengan Intensitas Sedang:

1. Risiko Longsor Terkait Hujan Panjang: Hujan dengan intensitas 21,38 mm/jam dan durasi lebih dari 60 menit memiliki risiko yang signifikan terhadap kestabilan lereng. Daerah seperti Kecamatan Kasembondengan dapat mengalami kelongsoran dengan nilai *Safety Factor* lereng hanya sebesar 0,847, yang menunjukkan tingkat ketidakamanan yang signifikan pada lereng.
2. Penurunan *Safety Factor*: Pemodelan menunjukkan penurunan *Safety Factor* terbesar terjadi di Kecamatan Kalipare, dengan penurunan nilai mencapai 0,395. Ini

menunjukkan kondisi yang sangat tidak aman pada lereng di daerah tersebut.

- 3. Penurunan Nilai Kohesi Tanah: Penurunan kohesi tanah di area longsor mencapai sekitar $\pm 40\%$, yang menunjukkan bahwa infiltrasi hujan ke dalam tanah dapat menyebabkan penurunan signifikan dalam sifat kohesi tanah. Nilai ini memberi gambaran bahwa tanah menjadi lebih rentan terhadap kelongsoran.

Implikasi:

Penurunan nilai kohesi tanah yang signifikan, serta penurunan *Safety Factor* yang mencolok pada daerah tertentu, menegaskan pentingnya pengelolaan risiko longsor terkait perubahan iklim. Hal ini memerlukan langkah-langkah mitigasi dan perencanaan yang kuat untuk menghadapi dan mengurangi dampak potensial dari hujan berdurasi panjang dengan intensitas sedang terhadap kestabilan lereng.

Analisis ini menyoroti pentingnya pemahaman terhadap dampak perubahan iklim, terutama terkait hujan berdurasi panjang, terhadap stabilitas lereng dan kohesi tanah. Hal ini menjadi dasar untuk penanganan risiko longsor dan pentingnya tindakan pencegahan yang tepat guna mengurangi risiko potensial dari perubahan iklim terhadap kestabilan lereng.

Tabel 4.9. Hasil Perhitungan Penurunan Nilai Kohesivitas Tanah

KECAMATAN	DUSUN/DESA	KOHE SI BASEL INE (Kpa)	SUDUTGESER DALAM ϕ (°)	KOHESI PROJECTIO N(Kpa)	PENURU NAN KOHESI
KASEMBON	PONDOKAGUNG	16	32.47	9,4	6,6
NGANTANG	WATUREJO	16	32.47	9,4	6,6
PUJON	MARON	28,5	21.04	14	14,725
BUMIAJI	SUMBERBRANT AS	20,5	23.70	18,94	1,56
BATU	DAU	21	28.07	13,49	7,51
SINGOSARI	KLAMPOK	11,9	21.59	11,64	0,26
DAU	SELOREJO	21	28.07	13,49	7,51
KALIPARE	KALIPARE	6,6	45.15	0	6,6
PAGAK	JUDEG	6,6	45.15	0	6,6

KECAMATAN	DUSUN/DESA	KOHE SI BASEL INE (Kpa)	SUDUTGESER DALAM ϕ (°)	KOHESI PROJECTIO N(Kpa)	PENURU NAN KOHESI
DONOMULYO	SUMBERETO	6,6	45.15	0	6,6
BANTUR	SUMBERREJO	0,25	8.50	0	0,25
GEDANGAN	K SATSUMBERPE LUS	0,2	24.83	0	0,2
TUREN	SATSUMBERPE LUS	14,9	20.43	14,19	0,71
TIRTOYUDO	WIROTAMAN	1,9	22.06	0	1,9
AMPELGADIN G	LEBAKHARJO	1,9	22.06	0	1,9
SUMBERMAN JINGWETAN	PRANGAS	20,2	55.09	12,8	7,4
JABUNG	SBLMDESATAJI	27	28.61	25,98	1,02
TUMPANG	UTARABENJOR	0.00	8.50	0	0
PONCOKUSU MO	COBANPLANGI	1,4	24.44	0	1,4
WAJAK	BAMBANG	1,9	22.06	0	1,9
KEPANJEN	PANCIR	0,5	3.53	0	0,5

(Sumber : Anggraini, dkk. 2016)

Analisis dari informasi yang disajikan tentang dampak perubahan iklim terhadap tanah longsor menunjukkan beberapa poin kunci;

Pengaruh Perubahan Pola Curah Hujan Terhadap Kejadian Longsor:

1. Peningkatan Kejadian Longsor: Perubahan pola curah hujan, terutama intensitas dan durasinya, diproyeksikan dapat meningkatkan kejadian tanah longsor di masa depan. Faktor-faktor ini secara langsung berpengaruh pada stabilitas lereng dengan mempengaruhi infiltrasi air ke dalam tanah.
2. Durasi dan Intensitas Curah Hujan: Durasi yang panjang dan intensitas hujan yang tinggi berkontribusi pada kejadian longsor. Hal ini mempengaruhi kemampuan tanah untuk menampung air yang diinfiltrasi dan dapat menyebabkan tanah menjadi jenuh, yang pada gilirannya menurunkan kekuatan dan kohesi tanah.

3. Perubahan kondisi tanah dari tak jenuh menjadi jenuh: Infiltrasi air ke dalam tanah menyebabkan perubahan kondisi tanah dari tak jenuh menjadi jenuh. Hal ini mempengaruhi karakteristik fisik dan mekanik tanah, termasuk kohesi tanah dan kekuatan tanah, yang dapat menyebabkan penurunan stabilitas lereng.
4. Korelasi Kurva IDF, Konduktivitas Hidraulik, dan Karakteristik Air Tanah: Hubungan antara kurva IDF (Intensitas-Durasi Frekuensi), kurva konduktivitas hidraulik, serta karakteristik air tanah menjadi penting dalam memahami proses infiltrasi air ke dalam tanah, yang pada akhirnya mempengaruhi kestabilan lereng.
5. Analisis Stabilitas Lereng: Analisis tersebut memeriksa hubungan antara kondisi tanah yang berubah dan stabilitas lereng. Penurunan kohesi tanah dan kekuatan tanah dapat menjadi indikasi potensial dari kejadian longsor di masa depan.

Analisis ini menyoroti pentingnya memahami dinamika curah hujan, infiltrasi air ke dalam tanah, dan konsekuensi perubahan kondisi tanah terhadap kestabilan lereng. Mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi kejadian longsor dan mengaitkannya dengan perubahan dalam sifat fisik dan mekanik tanah sangat krusial dalam mengantisipasi serta mengurangi risiko bencana tanah longsor di masa mendatang yang diakibatkan oleh perubahan iklim.

DAFTAR PUSTAKA

- Alaa, S., & Wijaya, D. (2015). Pengaruh Suhu Pemanasan Lempung Terhadap Sifat Mekanis Gerabah. *Jurnal Fisika*, 1(1), 32-34.
- Anggraini, N., San, I. C., & Hastuti, Y. (2016). Analisa Dampak Perubahan Iklim Terhadap Kelongsoran Dengan Mengestimasi Penurunan Nilai Kohesivitas Tanah. *Cantilever: Jurnal Penelitian Dan Kajian Bidang Teknik Sipil*, 5(2).
- Arrozi, M. F., Surjandari, N. S., & Djarwanti, N. (2015). Analisis Stabilitas Lereng Berdasarkan Pengaruh Hujan Bulanan Maksimum Di Das Tirtomoyo Wonogiri Menggunakan Metode Bishop Disederhanakan (Studi Kasus Di Dusun Pagah, Hargantoro, Tirtomoyo, Wonogiri). *Matriks Teknik Sipil*, 3(2).
- Auli, S. (2021). Pengaruh Suhu Tinggi Pemeraman Terhadap Kinerja Fly Ash (Studi Perbaikan Tanah Lunak Bergradasi Seragam).
- Barimbing, F. R. B., & Iskandar, R. (2017). Analisis Penurunan Dan Waktu Konsolidasi Tanah Lunak Menggunakan Metode Preloading Dan Pre-Fabricated Vertical Drain (Studi Kasus Proyek Pembangunan Jalan Bebas Hambatan Medankualanamu Sta 35+ 950). *Skripsi Universitas Sumatera Utara*.
- Gazali, A., & Adawiyah, R. (2018). Pengaruh Variasi Waktu Pemeraman Terhadap Daya Dukung Tanah Lunak Gambut Kalimantan Selatan Distabilisasi Menggunakan Semen Portland: Effect Of Variation Of Curing Time On The Soft Carrying Capacity Of South Kalimantan Peat Stabilized Using Portland Cement. *Media Ilmiah Teknik Sipil*, 7(1), 9-17.
- Gofar, N. (2023). Percepatan Proses Konsolidasi Tanah Lempung Dengan Aplikasi Tekanan Vakum Dan Drainase Vertikal. *Rekayasa Sipil*, 17(3), 300-307.
- Gunawan, G., & Razali, M. R. (2017). Model Longsor Akibat Perubahan Iklim Dengan Menggunakan Digital Elevation Models Dan Geoslope.
- Harmoko, J. T., & Suryadharma, H. (2018). Pengaruh Temperatur Pemeraman Pada Perilaku Geser Tanah Lempung Yang

- Distabilisasi Dengan Semen. *Cantilever: Jurnal Penelitian Dan Kajian Bidang Teknik Sipil*, 7(2).
- Indriani, A. M., & Utomo, G. (2023). Pengaruh Microbially Induced Calcite Precipitation (Micp) Terhadap Perilaku Kuat Geser Tanah Terkontaminasi Batubara. *Cived*, 10(1), 53-60.
- Indriani, A. M., Utomo, G., & Fitriyani, N. (2023). Pengaruh Kultur Bakteri Pada Proses Biosementasi Tanah Laterit Terhadap Nilai Cbr: The Influence Of Bacterial Culture On The Soil Laterite Biosementation Process On Cbr Value. *Media Ilmiah Teknik Sipil*, 11(2), 143-149.
- Indriani, A. M., Utomo, G., & Syahputra, M. R. (2023). Pengaruh Siklus Basah Kering Terhadap Perilaku Mekanik Tanah Lempung Stabilisasi Biosementasi Dengan Bakteri Bacillus Subtilis. *Cived*, 10(2), 416-427.
- Lestari, N. P., Suwarno, A., Mulyono, T., Sudarmono, S., Praharseno, F., & Wicaksono, T. M. (2023). Pemodelan Peningkatan Kadar Air Akibat Infiltrasi Ditinjau Dari Parameter Kekuatan Tanah. *Bangun Rekaprima*, 9(1), 115-123.
- Lim, A. (2022). Efek Gradasi Tanah Pasir Pada Penggunaan Jamur Rhizopus Oligosporus Untuk Perbaikan Tanah Pasir Lepas. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 20(2), 157-162.
- Ningsih, R., Ikhwan, I., & Suradji, S. (2021). Pengaruh Perubahan Kadar Air Pada Tanah Lempung Terhadap Uji Geser Langsung Dan Uji Kuat Tekan Bebas. *Sigma: Jurnal Teknik Sipil*, 1(2), 54-62.
- Purnama, I. A. (2021). Karakterisasi Sifat Fisik Dan Mekanik Tanah Timbunan Babalesi Yang Berdasar Dari Limbah Bauksit Dan Bakteri Probiotik. *Jurnal Retensi*, 2(1), 1-16.
- Tawakkal, M. Z., Surjandari, N. S., & Dananjaya, R. H. (2016). Pengaruh Curah Hujan Harian Maksimum Bulanan Terhadap Stabilitas Lereng (Studi Kasus: Desa Mangunharjo, Jatipurno, Wonogiri). *Matriks Teknik Sipil*, 4(2).
- Utami, G. S., & Caroline, J. (2018, September). Analisis Pengaruh Perubahan Kadar Air Terhadap Parameter Kuat Geser Tanah. In *Prosiding Seminar Nasional Sains Dan Teknologi Terapan* (Pp. 289-296).

- Wulandari, P. S., & Tjandra, D. (2018). *Pengaruh Nilai Indeks Plastisitas Tanah Lempung Terhadap Perubahan Kuat Kokoh Tanah Lempung Akibat Variasi Kadar Air* (Doctoral Dissertation, Petra Christian University).
- Yamali, F. R. (2018). Pengaruh Kadar Air Terhadap Nilai Konsolidasi Di Tanah Lempung Pada Lokasi Yang Sama. *Jurnal Ilmiah Universitas Batanghari Jambi*, 11(1), 70-75.
- Yunus, Y., Syarwan, S., Rosalina, R., & Reza, M. (2020). Stabilisasi Tanah Ekspansif Menggunakan Fly Ash Dan Bio-Enzymes. In *Prosiding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe* (Vol. 4, No. 1, Pp. 18-24).

BAB 5

PENGUATAN TANAH DAN PONDASI

Oleh Dora Melati Nurita Sandi

5.1 Pendahuluan

Rekayasa tanah untuk mencapai kekuatan yang diinginkan, sering kali digunakan jika tanah pada lokasi tidak bisa dihilangkan dan diganti dengan tanah timbunan. (Glossop, 1968). Penilaian kondisi tanah baik maupun buruk diidentifikasi dari daya dukung tanah (*bearing capacity*) dan stabilitas tanah. Kondisi tanah yang buruk secara umum disebabkan adanya besarnya air dalam tanah, rendahnya tegangan geser tanah / kekuatan tanah, dan besarnya deformasi tanah.

Besarnya aliran air dalam tanah atau permeabilitas tanah didasarkan pada jenis tanah. Tanah kerikil dan pasir memiliki nilai permeabilitas lebih tinggi dibandingkan tanah lanau dan lempung. Namun, hal tersebut tidak menjamin bahwa tanah dengan permeabilitas rendah tidak memiliki masalah. Sebaliknya, tanah dengan permeabilitas rendah akan berpotensi memiliki genangan air. Hal tersebut dapat mengakibatkan tanah runtuh.

Tanah dengan daya dukung rendah, dapat menyebabkan deformasi bila diberikan beban lebih besar dibandingkan dengan nilai daya dukung tanahnya. Terjadinya deformasi, dicirikan dengan adanya penurunan tanah pada struktur pondasi. Tanah yang biasanya memiliki masalah baik terhadap daya dukung maupun stabilitasnya adalah tanah gambut, tanah organik, tanah lempung dengan mineral montmorillonik, tanah dengan sensitivitas tinggi terhadap air (tanah ekspansif), tanah saturated, tanah unsaturated dan tanah lanau.

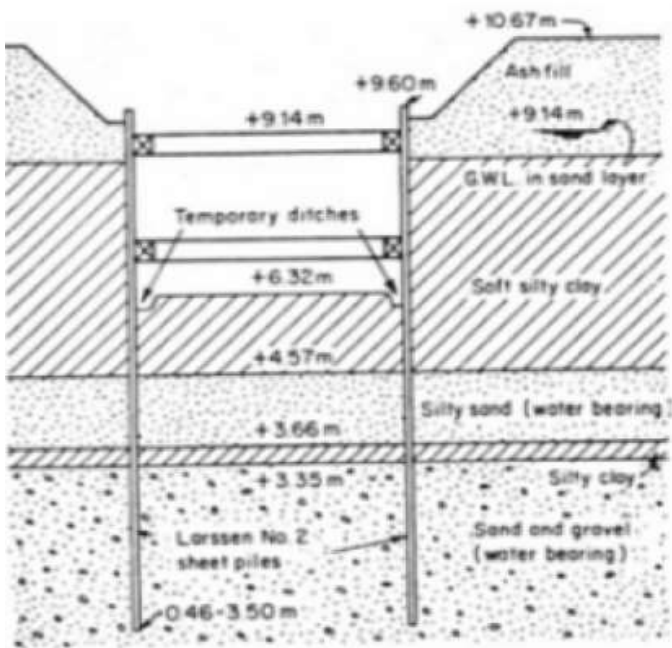
Soil treatment atau perkuatan tanah dapat bersifat sementara atau permanen. Misalnya penggunaan sistem titik sumur atau dewatering dapat dianggap perbaikan atau perkuatan tanah sementara. Disisi lain, grouting merupakan metode perkuatan tanah

permanen. Jenis teknik yang dipilih berdasarkan sifat permasalahan dan jenis kondisi tanah. (F.G. Bell, 1993)

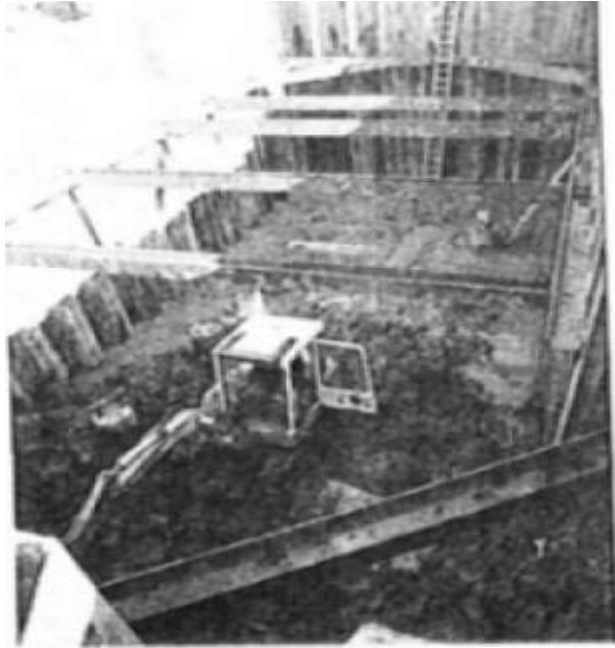
5.2 Sheet Pile

Sheet pile sering kali digunakan untuk menahan tanah arah lateral, beberapa diantaranya yaitu sebagai dinding untunk menahan gaya lateral pada tebing, digunakan sebagai penahan galian, digunakan untuk pembuatan basement, dan digunakan untuk dermaga dan bendungan.

Berdasarkan bahannya, sheet pile dikategorikan dalam sheet pile kayu, sheet pile beton bertulang dan baja. Sheet pile yang terdiri dari tiang baja, kayu maupun beton masing-masing dihubuungkan satu sama lain untuk membentuk dinding yang berkesinambungan. (F.G. Bell, 1993)



(a)



(b)

Gambar 5.1. (a) sheet pile baja sebagai bracing pada kondisi tanah yang bervariasi (b) sheet pile baja yang digunakan untuk caisson di tanah aluvial dekat Kings Lynn, Norflok.

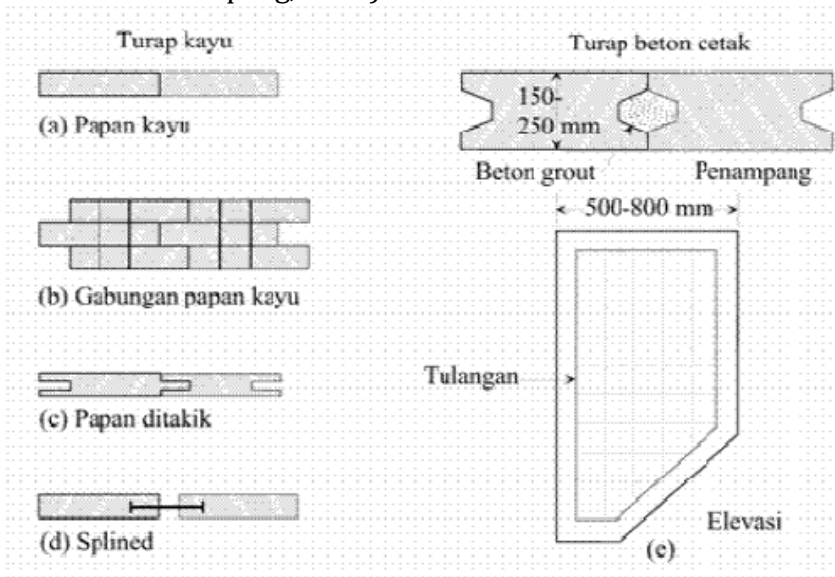
(Sumber : F.G. Bell, 1993)

5.2.2 Sheet Pile Kayu

Sheet pile kayu digunakan untuk konstruksi yang tidak terlalu tinggi, hal ini disebabkan sheet pile kayu tidak dapat menahan beban lateral terlalu besar. Sifat kayu yang mudah mengalami pelapukan, sehingga harus dilakukan pelapisan pelindung. Sheet pile kayu digunakan untuk konstruksi yang tidak permanen atau sementara waktu.

Sheet pile kayu digunakan hanya untuk konstruksi ringan yang bersifat sementara yang terletak di atas permukaan air. Biasanya menggunakan papan kayu atau beberapa papan yang digabung (wakefield piles). Papan kayu dengan ukuran penampang 50 mm x 300 mm dengan takik pada ujung-ujungnya seperti terlihat pada

Gambar 5.2 (a) Tiang wakefield dibuat dengan memakukan tiga papan secara Bersama-sama, dimana papan tengahnya dioffset sejauh 50 - 75 mm seperti pada Gambar 4.2 (b). Papan kayu juga bisa ditakik dalam bentuk takik lidah dalam Gambar 5.2 (c). Atau pada Gambar 5.2 (d) dengan menggunakan besi yang ditanamkan pada masing-masing papan setelah tiang dimasukkan ke dalam tanah (Pintor Tua Simatupang, 2008)



Gambar 5.2. Berbagai jenis turap kayu dan beton.
(Sumber : Pintor Tua Simatupang, 2008)

5.2.3 Sheet Pile Beton

Sheet pile beton pracetak dirancang dengan tulangan untuk menahan beban permanen setelah konstruksi dan juga untuk menangani tegangan yang dihasilkan selama konstruksi. Penampang tiang-tiangnya berukuran sekitar 500 - 800 mm lebar dan tebal 150 - 250 mm. Gambar 2.2 (e) memperlihatkan diagram skematik ketinggian dan penampang tiang turap beton bertulang.

5.2.3 Sheet Pile Baja

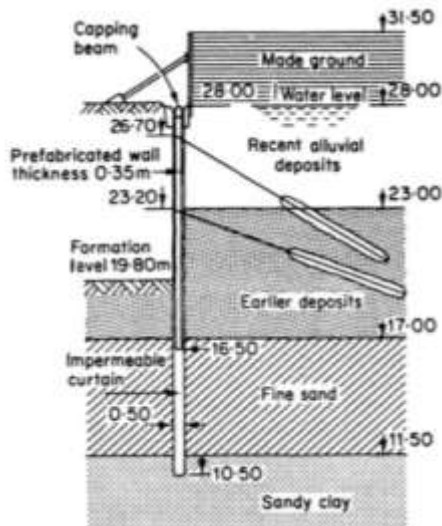
Sheet pile baja di USA memiliki ketebalan sekitar 10 -13 m. Sedangkan penampang sheet pile berasal dari Eropa bisa lebih tipis

tetapi lebih lebar. Penampang tiang bisa berbentuk Z, lengkung dalam (*deep arch*), lengkung rendah (*low arch*), atau sayap lurus (*straight web*). Interlok pada tiang turap dibentuk seperti jempol-telunjuk atau bola-keranjang untuk hubungan interlock yang rapat untuk menahan air. (Pintor Tua Simatupang, 2008)

5.3 Slurry

Slurry digunakan sebagai penyumbat aliran air dalam tanah. Slurry ssering digunakan untuk mengendalikan rembesan pada bandungan, untuk mengedalikan kontaminasi air tanah pada area penampungan sampah, dan penampungan limbah berbahaya.

Fungsi dari slurry adalah memperkecil nilai permeabilitas tanah. Ada dua tipe slurry, yaitu tanah bentonite (tanah lempung *high plasticity*) dan semen bentonite (campuran air semen dengan nilai slump tinggi). Slurry sering digunakan untuk mengendalikan muka air tanah dalam proses excavation. Dimana, kedalaman penyuntikan slurry ditentukan dari tipe tanah terutama ditentukan oleh posisi tanah kedap air dan jenit sheet pile yang digunakan sebagai dinding penahan tanah lateralnya.



Gambar 5.3. Panel beton pracetak ditempatkan pada parit slurry untuk membentuk bagian dinding basement yang ditambatkan kembali.

(Sumber : F.G. Bell, 1993)

Area atau zona persebaran cairan slurry di dalam tanah sering disebut area filter cake. Filter cake merupakan penghalang utama dalam pergerakan air dalam tanah. Dalam kasus dinding pada pekerjaan excavation, Millet dan Perez (1981) menyarankan bahwa dinding harus memiliki ketebalan bervariasi antara 1.5 hingga 2.3 m. Meningkatnya kekuatan geser dinding slurry yang membentuk bubur semen-bentonit memungkinkannya menjadi lebih tipis, ketebalannya berkisar antara 0,6 hingga 0,9 m.

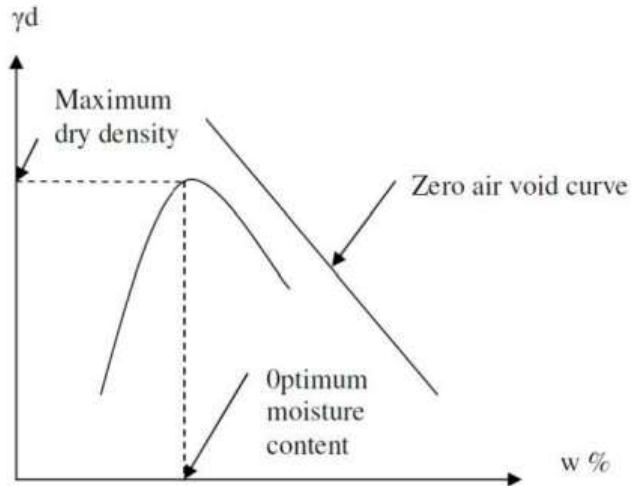
5.4 Compaction (Pemadatan Tanah)

Pemadatan berfungsi untuk meningkatkan kekuatan tanah, sehingga meningkat pula daya dukung pondasi di atasnya. Tujuan lain dari pemadatan tanah adalah mengurangi besarnya penurunan tanah dan meningkatkan stabilitas atau kekuatan lereng timbunan (*embankments*).

Alat-alat yang umumnya digunakan untuk memadatkan tanah dilapangan adalah Penggilas besi berpermukaan halus (*smooth-wheel rollers*), dan penggilas getar (*vibratory rollers*). (Braja Das, 1995)

Pemadatan tanah adalah suatu proses merapatkan butiran tanah, sehingga mengurangi volume pori dalam tanah. Besarnya tingkat pemadatan tanah diukur dalam nilai berat isi atau berat volume tanah kering. Proses pemadatan tanah membutuhkan air untuk mengikat antar butiran tanahnya dan melunakkan partikel-partikel tanah. Sejumlah air yang dibutuhkan oleh suatu massa tanah untuk mencapai berat volume maksimum dinamakan dengan nilai OMC

Pengujian proctor. Berdasarkan R.R proctor (1993) terdapat empat variabel yang mempengaruhi kepadatan tanah, yaitu pemadatan atau energi kepadatan, jenis tanah (gradasi, kohesif atau tidak kohesif, dll), kadar air dan berat isi kering.



Gambar 5.4. Grafik hubungan berat volume tanah dengan kadar air.
(Sumber :Das, 1995)

5.5 Stabilisasi Tanah

Stabilisasi tanah adalah usaha untuk meningkatkan stabilisasi dan kapasitas daya dukung tanah. Menurut Bowles (1984) apabila tanah yang ada di lapangan bersifat sangat lepas, atau mudah tertekan atau memiliki indeks konsistensi tidak sesuai, permeabilitas yang terlalu tinggi atau sifat lainnya yang tidak diinginkan sehingga tidak sesuai untuk suatu proyek pembangunan maka tanah tersebut harus distabilkan.

Berbagai macam proses stabilisasi antara lain:

1. Penggantian tanah asli
2. Perbaikan gradasi butiran
3. Stabilisasi dengan bahan kimia
4. Stabilisasi dengan pemadatan

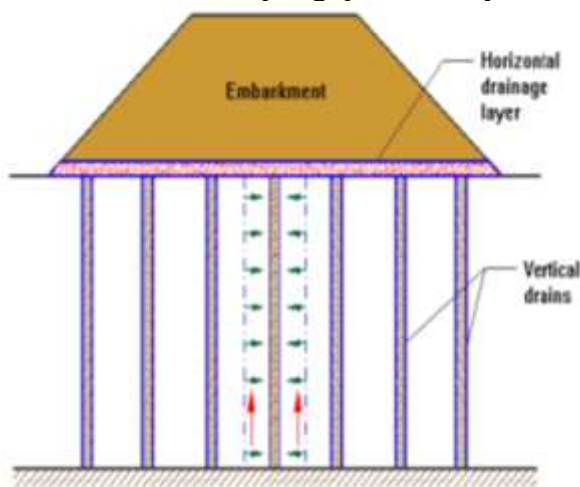
5.6 Preloading (Surcharging)

Preloading, surcharging atau pra-kompresi adalah suatu proses dimana suatu lokasi diaplikasikan tekanan tambahan pada tanah sebelum bangunan sebenarnya diaplikasikan. Tujuan surcharging atau preloading adalah meningkatkan penurunan awal,

sehingga mengurangi penurunan ketika bangunan sebenarnya ditempatkan di lokasi. Preloading mengeluarkan air dari rongga tanah yang dapat dikompresi, dan air dikeluarkan dari lokasi melalui pompa atau saluran terbuka. Rongga-rongga yang sebelumnya ditempati oleh air kini menghilang, dan rongga-rongga tersebut menghasilkan penurunan bersih pada permukaan tanah. Salah satu cara yang digunakan untuk mempercepat drainase air adalah dengan memperkecil jalur yang harus ditempuh partikel air untuk keluar dari tanah.

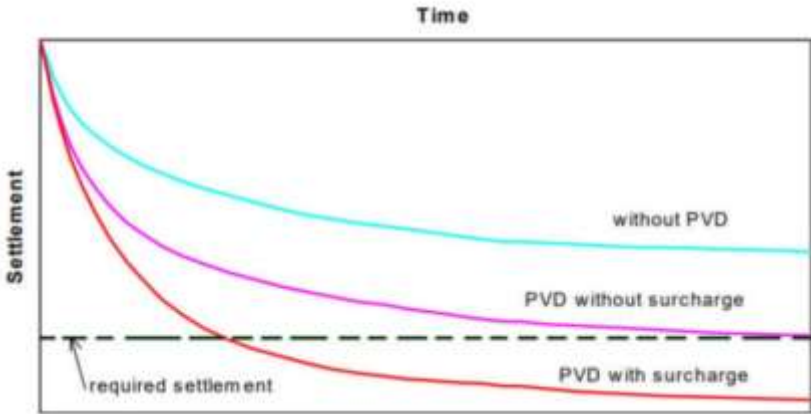
Prefabricated Vertical Drain (PVD) merupakan salah satu perbaikan tanah dengan mempercepat proses penurunaan tanah dan mengeluarkan air dari dalam rongga poti tanah. berdasarkan SNI 8460-2017 adalah material geosintetik komposit yang digunakan dalam perancangan perbaikan tanah lunak berpermeabilitas rendah, berkompresibilitas tinggi yang dikombinasikan dengan prapembebanan (preloading) berupa tanah timbunan. Material PVD ini terdiri dari plastic core (inti) dan filter jacket (selimut). Kelebihan PVD sebagai berikut.

1. Meningkatkan kecepatan konsolidasi
2. Mengurangi waktu pra konstruksi
3. Meningkatkan stabilitas lereng
4. Murah dan mudah dalam pengaplikasiannya



Gambar 5.5. Aplikasi PVD

Perbandingan waktu penurunan konsolidasi dengan mengaplikasikan beban preloading terhadap waktu penurunan konsolidasi dengan mengaplikasikan kombinasi PVD dan beban preloading ditampilkan pada gambar berikut.



Gambar 5.6. Waktu penurunan konsolidasi dengan dan tanpa PVD

Gambar 5.6 memperlihatkan bahwa dengan adanya PVD waktu penurunan konsolidasi menjadi jauh lebih cepat dibandingkan dengan waktu penurunan tanpa menggunakan PVD. Hal ini dikarenakan dengan adanya PVD, maka akan memperpendek jarak tempuh air yang terekses dari dalam tanah. Serta memanfaatkan sifat tanah kohesif dimana permeabilitasnya lebih besar di arah horizontalnya. Maka dengan adanya PVD ditambah dengan beban, maka waktu konsolidasi bisa dicapai jauh lebih cepat.

5.7 Geotextile

Geotextile adalah geosintetik permeabel berbentuk serupa dengan tekstil. Geotextile memiliki fungsi utama adalah sebagai filtration, separation dan reinforcement. Fungsi secara umum Geotextile sebagai berikut.

1. Penyaring (filter)

Geotextile memiliki nilai permeabilitas tinggi sehingga dapat digunakan untuk filter yang membuat aliran air dapat tersaring tanpa media tanah.

2. Pemisah (separator)

Geotextile dapat difungsikan sebagai bahan pemisah/separator dalam pencegahan pencampuran tanah. Misalkan pada tanah persiapan badan jalan, sering kali tanah dasar berupa tanah lunak bergerak diakibatkan peristiwa merembesnya tanah akibat air hujan. Ketika dasar tanah lunak terjadi pergerakan, maka geotextile dapat berperan sebagai pemisah.

3. Stabilisator

Geotextile mempunyai gaya tarik yang kuat dan dapat mendistribusikan beban di atasnya. Hal ini yang menjadikan geotekstile sebagai bagan satbilisator, dikarenakan dapat meningkatkan daya dukung tanah.

Geotekstil terbuat dari polipropilen, poliester, polietilen, poliamida (nilon), polivinilidena klorida, dan fiberglass. Namun, material pembentuk geotextile didominasi oleh polypropylene dan polyester. Penggunaan bahan tambahan dalam komposisi dan dengan mengubah metode pengolahan yang digunakan untuk membentuk bahan cair menjadi filamen. Benang terbentuk dari serat yang diikat dan dipelintir menjadi satu, suatu proses yang juga disebut pemintalan. (Referensi ini berbeda dengan istilah pemintalan yang digunakan untuk menunjukkan proses ekstrusi filamen dari bahan cair.) Benang dapat terdiri dari serat yang sangat panjang (filamen) atau potongan yang relatif pendek yang dipotong dari filamen (serat stapel). Dalam pembuatan Geotextiel anyaman, benang lusi, yang sejajar dengan panjang panel geotekstil (arah mesin), dijalin dengan benang yang disebut benang pengisi atau benang pengisi, yang dipasang tegak lurus dengan panjang panel (arah silang 1 Kevlar adalah merek dagang terdaftar Du Pont untuk serat aramidnya (UFC, 2004)

Berikut meruapakan macam-macam geotextile serta aplikasi penggunaannya.

1. Geotextile woven

Geotextile woven berbahan serat polypropylene dengan produksi beberapa baris benang paralel membentuk suatu anyaman. Kelebihan geotextile woven adalah tahan

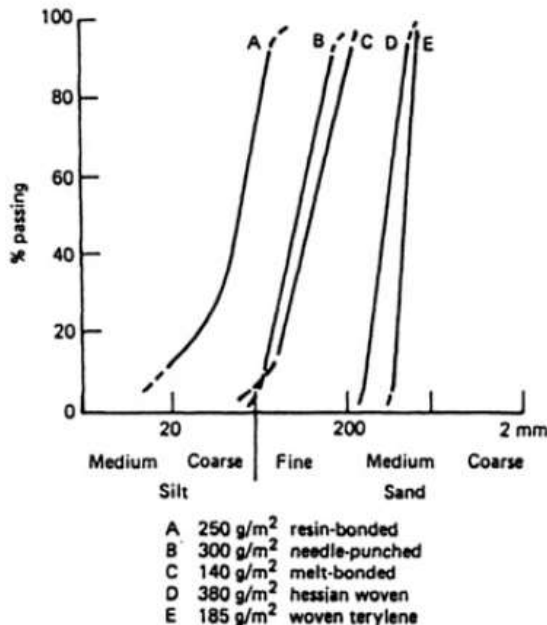
terhadap sinar matahari dan dapat menahan tanah yang tidak stabil. Pengaplikasian geotextile woven untuk alas timbunan material pada perkuatan lapisan tanah dasar. Berfungsi untuk memisahkan, menyaring dan memperkuat sub grade pada perkerasan jalan raya, terminal, pelabuhan dan bandara.

2. Geotextile non woven

Geotextile non woven terbuat dari benang serat polyester atau polypropylene yang tersusun tidak beraturan (tidak teranyam). Keunggulan geotextile non woven adalah sebagai material pemisah antara dua lapisan tanah yang berbeda. Selain itu dapat digunakan untuk filtrasi pada proyek konstruksi jalan dan sistem drainase.

Sifat Mekanik Geotextile

Perilaku tegangan regangan pada geotextile menunjukkan kekuatan, modulus, dan tegangan patah.



Gambar 5.7. Distribusi ukuran pori pada Geotextile
(Sumber: McGown, 1976).

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Rawi, N.M. and Awad, A.A.A. (1981) Permeability of lime stabilized soils. Proc. American Society of Civil Engineers, Journal Transportation Engineering Division, 107 (TEI), 25–35.
- Andrawes, K.Z., McGown, A., Mashour, M.M. and Wilson-Fahmy, R.F. (1980) Tension resistant inclusions in soils. Proc. American Society Civil Engineers, Journal Geotechnical Engineering Division, 106 (GT12), 1313–26.
- Anon. (1955) Drainage and erosion control. Subsurface drainage for airfields. Engineering Manual, Military Construction, Chapter 2, United States Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
- Anon. (1957) Chemical grouting. Report of the Task Committee on Chemical Grouting. Proc. American Society of Civil
- Braja, M.Das. 1995. Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknik). Jakarta: Erlangga.
- Bell, F.G. (1975) Methods of Treatment of Unstable Ground, Newnes-Butterworths, London.
- Bell, F.G. (1976) The influence of the mineral content of clays on their stabilization with cement. Bulletin Association of Engineering Geologists, 13, 267–78.
- Bell, F.G. (1988) Lime stabilization of clay soils: Part 1, Basic principles. Ground Engineering, 21 (1), 10–15.
- Bowless, Joseph E. 1984. Analisa dan Desain Pondasi. Jakarta: Erlangga.
- McGown, A. (1971) The classification for engineering purposes of tills from moraines and associated landforms. Quarterly Journal of Engineering Geology, 4, 115–30.
- McGown, A. (1976) The properties and uses of permeable fabric membranes. Proc. Residential Workshop on Materials and Methods for Low Cost Road, Rail and Reclamation Work, Leura, Australia, pp. 663–709.
- McGown, A. and Hughes, F.H. (1981) Practical aspects of the design and installation of deep vertical drains. Geotechnique, 31, 3–18.

- McGown, A., Kabir, M.H. and Murray, R.T. (1978) Compressibility and hydraulic conductivity of geotextiles. Proc. 1st International Conf. on the Use of Fabrics in Geotechnics, Paris, Vol. 2, pp. 167–72.
- McGown, A., Andrawes, K.Z. and Kabir, M.H. (1982) Load extension properties of geotextiles confined in soil. Proc. 2nd International Conf. on Geotextiles, Las Vegas, Vol. 3, pp. 793–8.
- McGown, A., Andrawes, K.Z., Hytiris, N. and Mercer, F.B. (1985) Soil strengthening using randomly distributed mesh elements. Proc. 11th International Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Vol. 3, pp. 1735–8.
- McKeand, E. and Sissons, C.R. (1978) Textile reinforcements—characteristic properties and their measurements. *Ground Engineering*, 11 (5), 13–16.
- McKittrick, D.P. (1979) Reinforced earth: application of theory and research to practice. *Ground Engineering*, 12 (1), 19–31.
- Van der Merwe, C.J. and Horak, E. (1989) Evaluation of soil/geotextile compatibility. Proc. 12th International Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, Vol. 3, pp. 1671–7.

BAB 6

REKAYASA BAWAH PERMUKAAN

Oleh Erny

6.1 Rekayasa Bawah Permukaan

Rekayasa bawah permukaan dalam ilmu geoteknik mencakup berbagai aspek yang terkait dengan perbaikan dan perkuatan sifat-sifat tanah. Perbaikan dan perkuatan tanah yang bertujuan untuk meningkatkan dan mempertahankan sifat-sifat tertentu pada tanah, agar selalu memenuhi syarat teknis yang dibutuhkan. Berbagai syarat teknis yang dibutuhkan dalam mengoptimalkan kinerja konstruksi antara lain yakni kapasitas daya dukung tanah, kuat geser tanah, penurunan (*settlement*), permeabilitas tanah, dan lain sebagainya, yang mana syarat teknis tersebut selalu dikaitkan dengan jenis dan fungsi konstruksi yang dibangun (Darwis,2017).

6.2 Rekayasa Bawah Permukaan Dengan Perbaikan Tanah Dan Perkuatan Tanah

Rekayasa bawah permukaan dengan perbaikan dan perkuatan sifat-sifat tanah yakni :

1. Perbaikan tanah (*soil improvement*) adalah suatu jenis memperbaiki dan/atau mempertahankan kemampuan dan kinerja tanah sesuai syarat teknis yang dibutuhkan, dengan melalui penyaluran energi statis/dinamis (pemadatan) ke dalam lapisan tanah (fisik), menggunakan bahan *additive* (kimiaawi), pengeringan tanah (*dewatering*) dan pengantian atau pencampuran tanah (*re-gradation*).
2. Perkuatan tanah (*soil reinforcement*) adalah suatu untuk memperbaiki dan/atau mempertahankan kemampuan dan kinerja tanah sesuai syarat teknis yang dibutuhkan, dengan memberikan material sisipan ke dalam lapisan tanah tersebut seperti penggunaan geosintetik (geotekstil atau georid).

6.2.1 Perbaikan Tanah

Perbaikan tanah dalam ilmu geoteknik berbagai teknik dan metode yang digunakan untuk meningkatkan karakteristik tanah di bawah permukaan tanah. Tujuan perbaikan tanah ini dapat bervariasi, seperti meningkatkan daya dukung tanah, mengurangi penurunan tanah, atau memitigasi risiko tanah *liquefaction* seperti pemadatan tanah, dengan melalui penyaluran energi statis atau dinamis ke dalam lapisan tanah (fisik), menggunakan Larutan atau bahan *additive* (kimiaawi), pengeringan tanah (*dewatering*) dan *penggantian* atau pencampuran tanah (*re-gradation*).

1. Perbaikan Tanah Dengan Pemadatan

Pemadatan tanah dengan pembebanan dinamis, Akibat beban dinamis butir-butir tanah akan merapat satu sama lain, sehingga mengakibatkan berkurangnya rongga udara di dalam tanah. Pekerjaan pemadatan tanah pada umumnya digunakan untuk jalan, landasan runway bandara dan lainnya (Masdina, 2023), dapat dilakukan menggunakan alat berat seperti roller atau vibratory compactors. Ketebalan lapisan tanah yang dipadatkan sangat mempengaruhi jumlah lintasan yang dibutuhkan oleh alat pemadat untuk mendapatkan kondisi kepadatan yang diinginkan. Makin tebal lapisan tanah yang dipadatkan, makin besar pula enersi yang dibutuhkan, sehingga diperlukan jumlah lintasan penggilas yang lebih banyak. (Darwis,2017).

2. Perbaikan Tanah Dengan Konsolidasi

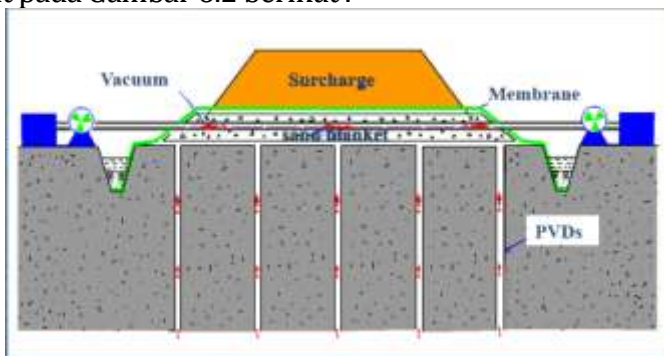
Perbaikan tanah dengan metode konsolidasi merupakan beban statis, menurunkan muka air tanah, pembebanan sementara, dan percepatan konsolidasi (XXX,UGM,2005). pemadatan yang murni dengan metode konsolidasi membutuhkan waktu yang cukup lama. Metode dikombinasikan dengan metode lainnya, untuk lapisan tanah yang jenuh air penempatan drainase berupa saluran buatan (*vertical drain* dan *horizontal drain*). Penyaluran vertikal (*vertical drain*) biasanya digunakan untuk memperbaiki tanah yang bergradasi halus dan jenuh.

Teknik ini meliputi cara vertikal drain dari bahan pabrikan, dengan grid tertentu ke dalam lapisan tanah. (*prefabricated vertical drains - PVDs*), ditempatkan sebelum pemberian beban *pre-loading* agar mempercepat pengaliran air tanah ke permukaan (drainase air tanah) dan mengurangi waktu konsolidasi, dapat di lihat pada gambar 6.1 berikut .



Gambar 6.1. Skema Dan Penerapan *Prefabricated Vertical Drains* (James D. Hussin, 2006)

Menurut Chu & Yan (2011), metode efektif diterapkan dengan konsolidasi untuk perbaikan tanah liat lunak bahwa metode *vacuum preloading*. Metode ini lebih murah dan lebih cepat mengukur baik penurunan maupun tekanan air pori untuk menghitung tingkat konsolidasi dan mengevaluasi kinerja dari perbaikan tanah yang dilaksanakan. Kedalaman efektif untuk penerapan metode *vacuum preloading* adalah lebih dari 10 m lihat pada Gambar 6.2 berikut .



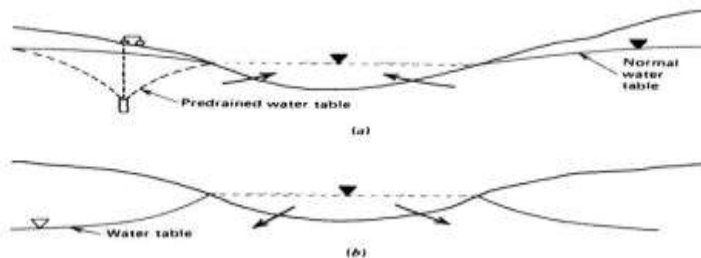
Gambar 6.2. Prinsip Kerja *Vacuum Preloading Method* (Chu & Yan, 2011)

c. Perbaikan Tanah Dengan Menambahkan Larutan Dan Bahan Kimia

Perbaikan tanah dengan larutan kimia (*solvent stabilization*); yang mana berbagai bahan kimia yang biasa digunakan untuk meningkatkan parameter tanah, seperti larutan soda kaustik (NaOH), larutan asam sulfat (H_2SO_4), dan berbagai larutan lain. Cairan pencampur yang sekarang banyak digunakan cukup bervariasi, yang mana beberapa pabrikan telah mengembangkan berbagai jenis cairan additive sebagai bahan stabilizer untuk perbaikan tanah. Penambahan bahan kimia (*additive*) merupakan hasil olahan pabrik yang bila ditambahkan ke dalam tanah dengan perbandingan tepat akan memperbaiki sifat-sifat teknis tanah, kekuatan, tekstur, kemudahan-di kerjakan (*workability*) dan plastis. Contoh bahannya Kapur, Semen Portland, abu terbang dan lainnya (Hardiyatmo, 2010).

4. Perbaikan Tanah Dengan Metode Pengeringan

Perbaikan tanah dengan metode pengeringan (*Dewatering*). *Dewatering* digunakan untuk menggambarkan tindakan menghilangkan air tanah atau air permukaan dari lokasi konstruksi, proses pengeringan dilakukan dengan memompa atau menguapkan, dan dilakukan sebelum penggalian dilakukan lebih dalam. Stabilitas tanah yang didapatkan dari proses *dewatering*, biasanya berlaku jangka pendek. *Dewatering* meningkatkan penurunan dan juga dapat menurunkan tekanan overburden di dalam tanah. Dapat dilihat pada gambar 6.3 berikut.



Gambar 6.3. (a) *m.a.t* sebelum dipompa (*effluent stream*) ;
(b) *m.a.t* setelah pemompaan (*Influent stream*)
(Patrick Powers, 1992)

5. Perbaikan Dengan Penggantian Tanah

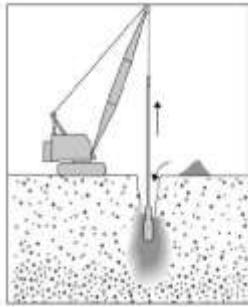
Daya dukung pondasi dapat diperbaiki dengan penggantian tanah yang buruk (misalnya tanah organik atau tanah lempung lunak), dengan bahan yang lebih baik dan kompeten seperti pasir, kerikil

atau batu pecah. Hampir semua tanah dapat digunakan sebagai bahan mengisi, namun beberapa jenis tanah yang sulit dipadatkan bila digunakan sebagai lapis pengganti (Abdel Salam, 2007). Penggunaan tanah pengganti di bawah pondasi dangkal dapat mengurangi penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*) sekaligus dapat meningkatkan daya dukung tanah. (Dawis, 2017). Zona dengan tegangan tinggi pada tanah di bawah pondasi dangkal (*shallow foundation*), hanya 1 sampai 1,5 dari luasnya yang dapat diganti dengan tanah yang baik (*replacement area*) (P.C. Varghese, 2005). Meningkatnya ketebalan lapisan pengganti, maka penurunan vertikal (*vertical settlement*) akan berkurang (Abdel Fatah, 2014).

6. Perbaikan Dengan Teknik *Vibroflotation*

Teknik *Vibroflotation* yang juga biasa disebut Teknik *Vibro Compaction*, cukup efektif diterapkan pada tanah yang granular dan tidak koheren, seperti pasir dan kerikil. Prosedur pelaksanaan *Vibroflotation* cukup sederhana. Probe ditancapkan ke dalam tanah di atas titik pemadatan. Pembilasan air atau udara dikeluarkan melalui jet di ujung probe. Getaran injeksi yang diinduksi ini akan mencairkan tanah, sehingga memungkinkan probe penetrasi terus menerus di bawah beratnya sendiri. Setelah probe mencapai lapisan tanah yang buruk, suntikan air dan udara dihentikan. Pada titik ini tanah dipadatkan oleh getaran probe yang akan menimbulkan kawah (*crater*) di sekitar vibrator, dan *crater* tersebut dapat diisi ulang dengan bahan granular. Begitu proses pengisian dan pemadatan selesai, probe perlahan ditarik ke atas secara bertahap setiap 12 inch. Zona pemadatan di sekitar probe akan terbentuk (*silindris*), dan tingkat pemadatan yang dicapai dapat dibaca

pada alat pressuremeter. Material yang digunakan untuk pengisian ulang harus bebas dari lumpur, kerikil atau batu pecah. Skema dan penerapannya dapat di lihat pada gambar 6.4. berikut.



(a) Skema

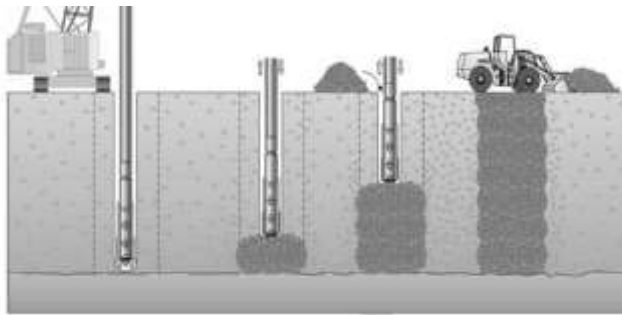


(b) Implementasi Lapangan

Gambar 6.4. Skema dan Penerapan *Vibroflotation*
(James D. Hussin, 2006)

7. Perbaikan Dengan Teknik Stone Column

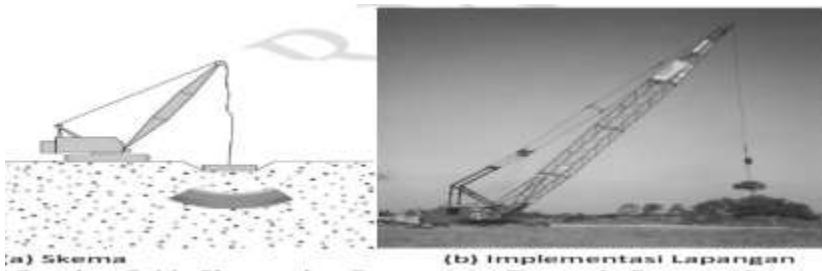
Teknik kolom batu (*stone column technique*) merupakan pengembangan dari teknik *vibroflotation*, dengan menggunakan material pengisi dari kerikil besar atau batu. *Stone column* juga bisa berfungsi sebagai saluran pembuangan, dan membantu percepatan konsolidasi pada tanah di sekitarnya. Untuk daerah pada kawasan rawan gempa (*seismic area*), *stone column* juga dapat mengurangi risiko likuifaksi pada tanah dapat di lihat tahapan *stone column* dapat di lihat pada gambar 6.5 berikut.



Gambar 6.5. Tahapan Pelaksanaan *Stone Column*
(James D. Hussin, 2006)

8. Perbaikan Dengan Teknik *Dynamic Compaction*

Perbaikan Dengan Teknik pemadatan dinamis (*Dynamic Compaction*) Prinsip teknik ini terdiri dari beban dijatuhkan berulang-ulang dengan berat beban beberapa ton dari ketinggian di atas 10 meter. Efektifitas dari hasil pekerjaan pemadatan dinamis sangat ditentukan oleh besarnya beban penumbukan yang diterapkan (Hussin,2006)



Gambar 6.7. Skema Dan Penerapan *Dynamic Compaction*
(James D. Hussin, 2006)

6.2.2 Perkuatan Tanah

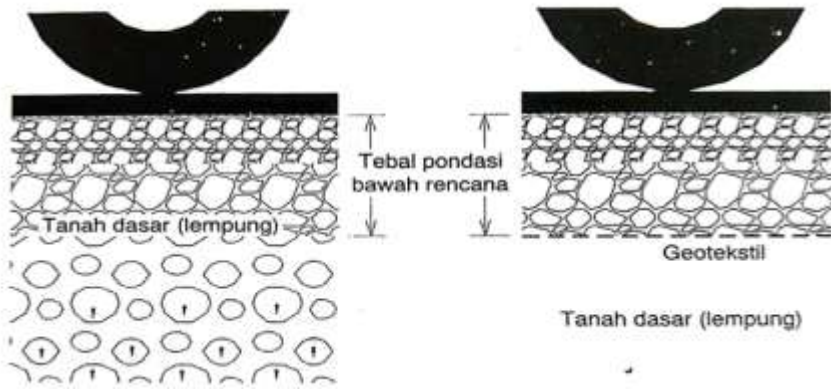
Perkuatan tanah dalam ilmu geoteknik melibatkan berbagai teknik dan metode yang digunakan untuk meningkatkan kekuatan dan kestabilan tanah di suatu lokasi. Tujuan perkuatan tanah dapat bervariasi, seperti meningkatkan daya dukung tanah untuk pondasi, mencegah erosi, mengendalikan longsor, atau memitigasi efek tanah liquefaction, seperti penggunaan Geosintektik (Hardiyatmo, 2013). Geosintektik adalah suatu dari bahan polymer yang di gunakan dalam sitem atau struktur tanah, batuan dan bahan rekayasa geoteknik lainnya. Geosintektik memiliki beberapa fungsi utama pemisah, Fitrasi atau penyaringan, drainase, Tulangan atau perkuatan dan proteksi atau perlindungan.

Macam-macam geosintektik yang banyak digunakan rekayasa geoteknik,geostektil,geomembran,geogrid, geonet dan eogkomposit.

1. Geotekstil untuk jalan

Geotekstil digunakan dalam aplikasi jalan fungsi pemisah atau sparasi (separator) dari geotekstil di butuhkan untuk mencegah naiknya butiran halus dari tanah dasar ke dalam agregat batu

pecah lapis pondasi (*Base Course*). Naik Butiran Halus ini akibat aksi pemompaan yang di akibatkan beban lalu lintas bekerja di atasnya. Geostektil di letakkan antar lapisan agregat dan tanah dasar dapat di lihat pada gambar 6.8 berikut.



a. Tanpa Geotekstil

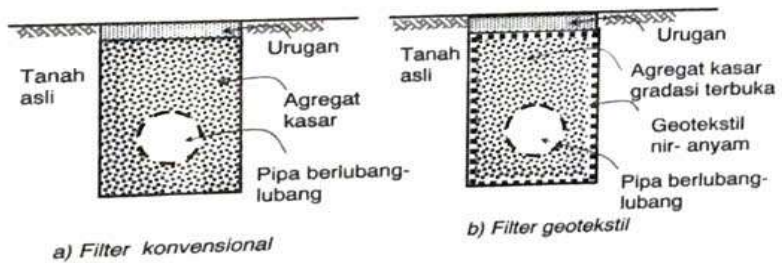
b. Dengan Geotekstil

Gambar 6.8. Batuan Lapis Berkurang Kekuatannya Karena Terpisah Akibat Migrasi Lempung (Hardiyatmo,2013)

Cara pemasanganya geotekstil bervariasi bergantung lokasi. Namun secara tipikal, geotekstil dapat di letakkan secara langsung pada tanah dasar dan di ikuti dengan penghamparan dan pemadatan batu pecah pada ketebalan yang telah di tentukan.

2. Geotekstil untuk drainase bawah tanah

Geotekstil dapat di gunakan sebagai filter dalam system drainase bawah tanah, karena problem utama drainase konvensional tersumbatnya butiran halus bawah tanah. Contoh penempatan geotekstil ini dapat di lihat pada gambar 6.9 berikut.

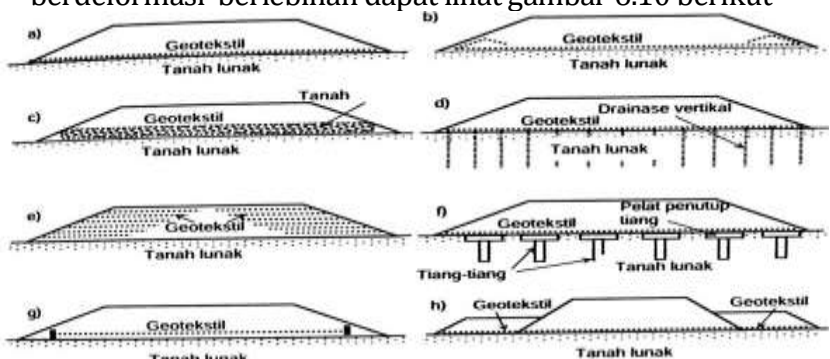


Gambar 6.9. Perbandingan Struktur Drainase Dengan Filter Konvensional Dan Geotekstil (Hardiyatmo,2013)

Pemasangan optimal adalah geotekstil di pasang di bagian luar dari batu pecah, karena air akan bebas mengalir yang lolos air sehingga air tidak tersumbat. Tanah yang buruk sebaiknya penggunaan geotekstil tebal dan berat memberikan tambahan ketebalan filter dan memungkinkan drainase lewat bidang geotekstil.

3. Geotekstil Pada Timbunan Di Atas Tanah Lunak

Geotekstil pada timbunan di atas tanah lunak sebagai tulangan dan pemisah atau drainase. Timbunan pada tanah lunak memiliki deformasi yang berlebihan menyebabkan timbunan menjadi melengkung ke bawah, maka dari di perlukan kekuatan tulangan geotekstil agar timbunan tidak berdeformasi berlebihan dapat lihat gambar 6.10 berikut



Gambar 6.10. Macam-macam Cara Perletakan Geotekstil Pada Timbunan Di Atas Tanah Lunak. (Gourc, 1993).

Aplikasi perkuatan tanah timbunan di atas tanah lunak (Gourc, 1993) pada gambar 10 dapat di jelaskan sebagai berikut.

1. Gambar 6.10 a, geotekstil di letakkan pada pertemuan tanah lunak dan timbunan yang berfungsi sebagai pemisah, mencegah kontaminasi tanah timbunan oleh butiran halus tanah lunak dibawahnya, geotekstil ini berfungsi sebagai tulangan
2. Gambar 6.10 b, geotekstil pada bagian ujungnya di tekuk ke belakang untuk mencegah longsoran lereng.
3. Gambar 6.10 c, geotekstil membentuk bantalan berisi tanah yang mendistribusikan beban atau sebagai lapisan drainase
4. Gambar 6.10 d, lapisan drainase di hubungkan dengan jaringan drainase vertical
5. Gambar 6.10 e, geotekstil di pasang agar lereng timbunan dapat lebih tegak.
6. Gambar 6.10 f, geotekstil dihubungkan system kolom pada tiang-tiang mendukung beban tanah
7. Gambar 6.10 g, geotekstil di ujung-ujungnya di kunci agar tidak terjadi penggelinciran.

DAFTAR PUSTAKA

- Darwis. 2017. *Dasar Dasar Teknik Perbaikan Tanah*. Yogyakarta: Pustaka AQ
- Gourc, J.P. 1993. *Geosintetktik in embankment, Review Of Theory dan Practice module; Le Reinforment et L amelioterion Drs Sols*, IRIGM, University Joseph Fourier, Grenoble : France.
- Hary Christady Hardiyatmo. 2010. *Stabilisasi Tanah Untuk Perkerasaan Jalan*. Yogyakarta : Gajah mada University Press.
- Hary Christady Hardiyatmo. 2013. *Geosintektik untuk jalan raya perancangan dan apalikasi*. Yoyakarta :Gajah mada University Press.
- James D. Hussin. 2006. *Methods of Soft Ground Improvement*. © 2006 by Taylor & Francis Group, LLC.
- Jian Chu and Shuwang Yan. 2011. *Case histories of ground improvement methods for road or airport construction". Mid-Continent Transportation Research Symposium*, August 18-19, 2011, Ames.
- J. Patrick Powers P.E. 1992. *Construction Dewatering, New Methods and Applications*. John Wiley & Sons, Inc. Second Edition
- Marwa Abdel Fatah. 2014. *Improvement Of Bearing Capacity Of Soft Clay Soil Beneath Shallow Foundation Using Cohesionless Soil Replacement* . Menoufiya University, Egypt
- Masdiana,dkk, 2023. *Perencanaan produktifitas alat berat bagi permula*. Makasar : CV.Tohar medika.
- P.C.Varghese. 2005. *Foundation engineering* . New Delhi: PHI learning private limited.
- Sherif Abdel Salam. 2007. *The effect of replacement soil on reducing settlement of footing on deep soft clay using numerical approach*. cairo university, Giza, egypt, thesis 2007.
- xxxx. 2004. *Bangunan bawah- Sub Structures*. Yogyakarta: Pascasarjana UGM.

BAB 7

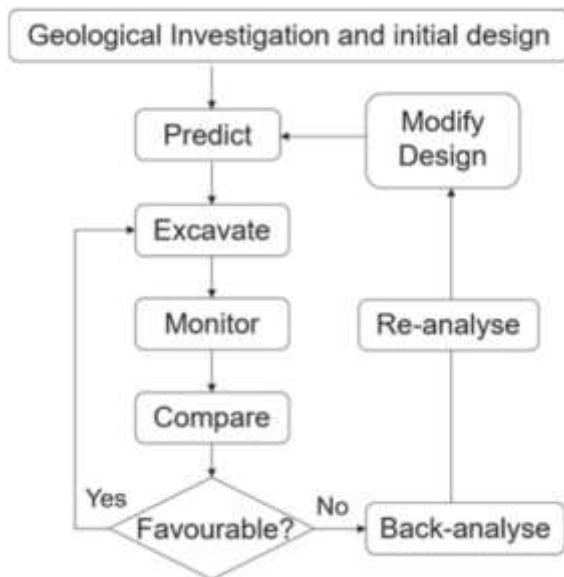
KEGAGALAN REKAYASA GEOTEKNIK PADA KASUS GALIAN DALAM

Oleh Bagus Eko Prasetyo

7.1 Pendahuluan

Analisis galian dalam atau *deep excavation* biasanya diperlukan sebelum masuk ke dalam tahap desain dan konstruksi bangunan. Analisis galian dalam adalah kajian mengenai topik interaksi antara tanah dan struktur yang khas. Tanah adalah materi dengan sifat nonlinear, inelastis, dan anisotropik. Perilakunya biasanya dipengaruhi oleh kadar air, sejarah tekanan, dll. Beberapa jenis tanah memiliki karakteristik konsolidasi dan creep, di mana performanya sangat dipengaruhi oleh waktu dan ruang. Secara teoretis, analisis galian dalam melibatkan simulasi perilaku elastoplastic tanah, perilaku antarmuka antara tanah dan dinding penahan, dan proses tahapan penggalian. Beberapa teori simulasi belum sepenuhnya dikembangkan, dan beberapa terlalu rumit untuk digunakan dalam praktik rekayasa. Oleh karena itu, untuk menganalisis secara seksama berdasarkan teori yang berkembang saat ini masih sangat tidak praktis. Sebagai kesimpulan, analisis penggalian yang rasional pada saat ini, seharusnya memanfaatkan prinsip mekanika tanah konvensional dan mekanika struktural sederhana, dikombinasikan dengan metode simulasi numerik, bersama dengan modifikasi yang sesuai berdasarkan pengamatan lapangan.

Desain galian dalam yang lengkap meliputi sistem penahan, sistem penyangga, sistem pengeringan (*dewatering*), prosedur penggalian, sistem pemantauan, langkah-langkah perlindungan bangunan, dll. Gambar 7.1 menggambarkan diagram alir umum dari rencana desain galian dalam :



Gambar 7.1. Diagram Alir Analisis dan Desain Galian Dalam
(Sumber : Zhang & Liu, 2022)

Dalam beberapa tahun terakhir, kegagalan pada kasus galian dalam banyak terjadi pada beberapa kota seperti Singapura, Shanghai, Guangzhou, Hangzhou, dan Taipei. Kegagalan-kegagalan ini melibatkan runtuhnya pondasi, rembesan air, penurunan permukaan tanah, miringnya bangunan-bangunan di sekitarnya, kebocoran pipa air atau gas di sekitarnya, dan bahkan ledakan. Kecelakaan-kecelakaan ini memberi peringatan kepada kita bahwa konstruksi penggalian bawah tanah memiliki risiko besar dan potensi bahaya yang harus diatasi. Kerugian material dari beberapa kecelakaan tersebut sangat besar. Para insinyur seharusnya belajar dari kasus-kasus kecelakaan tersebut. Kegagalan penggalian berikut yang dipilih dikenal karena dampaknya pada komunitas geoteknik.

7.2 Keruntuhan Nicoll Highway, Singapura, 2004

Sebuah galian dalam untuk konstruksi rel kereta api runtuh bersama dengan sebagian dari jalan tol 6 lajur di Singapura. Empat pekerja tewas. Jenis konstruksi ini telah digunakan selama lebih dari 30 tahun di Singapura dengan sedikit kecelakaan. Runtuhnya

sebagian besar tersebut merupakan kejutan besar. Ada penyelidikan rinci yang mengidentifikasi bahwa penyebab kegagalan adalah koneksi yang kurang baik dalam sistem penyangga dan runtuhnya total disebabkan oleh ketidakmampuan sistem dalam menahan kegagalan satu baris penyangga. Selain itu, ada banyak faktor kontributif lain yang diidentifikasi, seperti penggunaan yang salah dari program simulasi numerik yang digunakan untuk merancang sistem penahan tanah, *back analysis* yang keliru, pemantauan yang kurang memadai, tidak mematuhi batas kerja, dan banyak lagi, termasuk budaya ketidakpedulian yang dominan. Bab ini secara singkat merangkum peristiwa-peristiwa tersebut, temuan dari Komite Penyelidikan, tindakan perbaikan yang diambil, dan beberapa pelajaran yang dipetik.

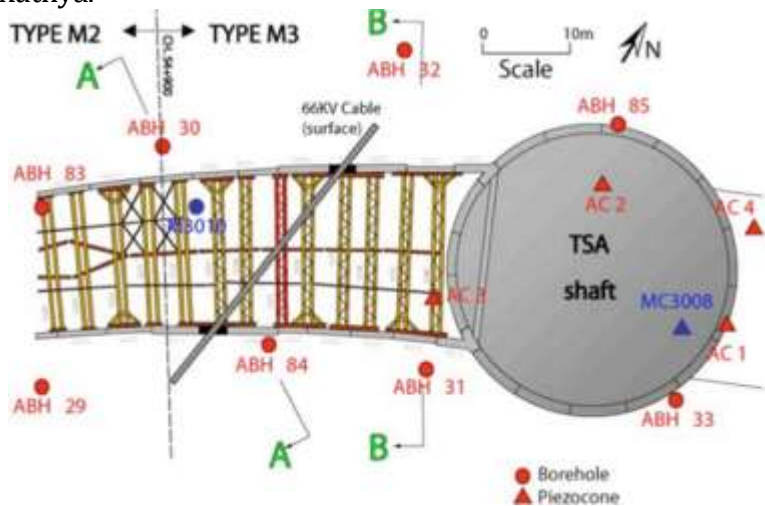
7.2.1 Deskripsi Kejadian di Lapangan

Pada sekitar pukul 3:30 sore pada tanggal 20 April 2004, penggalian cut and cover sepanjang 33,5 meter yang diperlukan untuk konstruksi terowongan antara stasiun Nicoll Highway dan Boulevard (seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.2) runtuh. Runtuhnya tersebut sangat merugikan, menyebabkan empat kematian dan banyak kerusakan (seperti yang terlihat pada Gambar 14.3), yang menunda penyelesaian tahap CCL1 selama sekitar empat tahun.

Pemerintah Singapura menunjuk sebuah Komite Penyelidikan (COI) untuk menetapkan penyebab dan keadaan insiden tersebut. Laporan COI, diserahkan kepada Pemerintah pada Mei 2005 dan diumumkan secara publik di Internet, merupakan sumber utama informasi untuk bab ini.

Ketika insiden terjadi, tanah di sekitarnya runtuh ke area penggalian. Luas zona runtuh tersebut sekitar 100 x 130 meter dan kedalamannya 30 meter. Pinggirannya hanya sekitar 10 meter dari bangunan terdekat, yaitu Golden Mile Complex. Jalan Nicoll Highway dan pelat pendekatan sebelum abutmen Jembatan Merdeka di atas Sungai Kallang juga rusak. Saluran air hujan yang terletak di selatan terowongan cut and cover adalah saluran pembuangan utama, mengalirkan air ke Sungai Kallang. Ketika runtuh terjadi, air sungai membanjiri area runtuh tersebut. Beberapa utilitas kunci, termasuk

saluran listrik utama, saluran gas, dan saluran air, semua rusak akibat keruntuhan tersebut menyebabkan terjadinya kebakaran. Semua ini merupakan tantangan bagi pekerjaan perbaikan berikutnya.



Gambar 7.2. Sketsa lapangan dan lokasi titik penyelidikan tanah dan monitoring deformasi
(Sumber : Whittle & Davis, 2006)

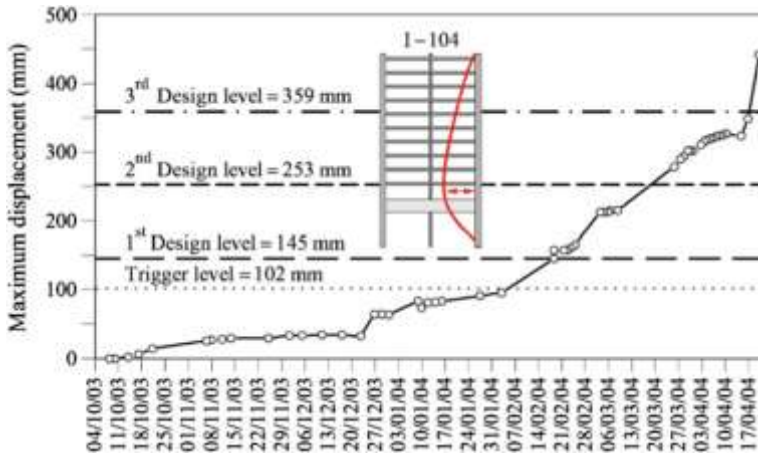


Gambar 7.3. Wilayah terdampak akibat keruntuhan di sekitar lokasi Nicoll Highway
(Sumber : Whittle & Davis, 2006)

Laporan COI menyatakan: "Peringatan akan kejadian runtuh yang mendekat sudah ada sejak tahap awal namun tidak dianggap serius." Memang, sejak Agustus 2003, menjadi jelas bahwa ada yang tidak beres dengan desain tersebut. Pertama, di dalam lubang *platform* untuk mesin *boring* terowongan, di seberang sungai di timur dari area yang runtuh, defleksi dinding yang diukur melebihi 500 mm, sementara tingkat desain yang dihitung hanya 190 mm. Hal ini menyebabkan kerusakan pada dinding penahan, penurunan permukaan tanah.

Selanjutnya, pada Januari 2004, tingkat defleksi desain terlampaui dan retak-retak muncul pada struktur penahan di penggalian cut and cover di sebelah barat area yang runtuh. Tingkat defleksi desain harus direvisi ke atas dari 222 hingga 522 mm (dari 125 hingga 313 mm lebih dekat ke area runtuh). Hal ini disertai dengan banyak keluhan yang diterima dari pemilik properti tetangga, termasuk penurunan permukaan tanah di *driveway*, retak-retak di bangunan, dan kerusakan bangunan lainnya. Sumber daya tenaga kerja dari tim proyek C824 diikutsertakan untuk menangani pekerjaan perbaikan. Akhirnya, di area yang runtuh itu sendiri, inclinometer I-104 menunjukkan bahwa tingkat desain asli sebesar 145 mm pada dinding diafragma selatan sudah terlampaui sejak Februari 2004 (Gambar 7.4). Pada saat itu, pemasangan level strut keenam sedang berlangsung.

COI menyimpulkan bahwa penggunaan model numerik yang salah dalam desain geoteknik, serta beberapa kesalahan struktural, adalah penyebab utama runtuhnya Nicoll Highway.



Gambar 7.4. Grafik pengukuran Inclinometer I-104, deformasi lateral dinding diafragma terhadap waktu.
(Sumber : Whittle & Davis, 2006)

7.2.2 Lessons Learned

Laporan akhir dari Komite Penyelidikan tentang runtuhnya Nicoll Highway diserahkan pada 11 Mei 2005. Menghadapi tugas monumental untuk menyusun informasi dari 193 saksi dan sejumlah besar dokumen, COI menjelaskan kesalahan krusial dan juga orang-orang yang bertanggung jawab atas runtuhnya Nicoll Highway. Dalam kata-kata COI: "Peringatan akan mendekati runtuhnya sudah ada sejak awal, tetapi tidak dianggap serius." Laporan tersebut menyimpulkan bahwa "kematian empat orang adalah hasil langsung dari runtuhnya" dan bahwa "runtuhnya Nicoll Highway dapat dihindari." Berikut adalah rekomendasi yang diajukan oleh Komite Penyelidikan untuk mencegah kejadian serupa di masa depan.

1. Manajemen risiko yang efektif

Potensi resiko kecelakaan tinggi, baik karena proses konstruksi maupun kesalahan dalam desain, harus diakui dan segera dikendalikan. Tidak tepat untuk sepenuhnya meninggalkan kendali risiko kepada kontraktor. Manajemen pemilik dan pembangun harus mencari keseimbangan antara tekanan produktivitas dan tujuan kualitas serta keamanan konstruksi.

2. Kekokohan desain

Desain yang kokoh sangat penting. Kekokohan ini diberikan dengan mengidentifikasi bahaya dan memastikan bahwa desain yang diusulkan dapat cukup kuat untuk menahan struktur. Desain harus memiliki kelebihan yang cukup untuk mencegah keruntuhan yang sangat merugikan dalam kejadian kegagalan elemen struktur. Pekerjaan *temporary* untuk galian dalam harus diberi perlakuan yang sama dengan pekerjaan permanen (Whittle & Davis, 2006).

3. Pemodelan Numerik dalam Desain Geoteknik

Analisis numerik harus bersifat sebagai pelengkap dan bukan menggantikan penilaian dan praktik teknik yang baik. Mereka yang melakukan analisis numerik geoteknik harus memiliki pengetahuan dasar mekanika tanah dan pemahaman yang jelas tentang pemodelan numerik.

4. *Back Analysis*

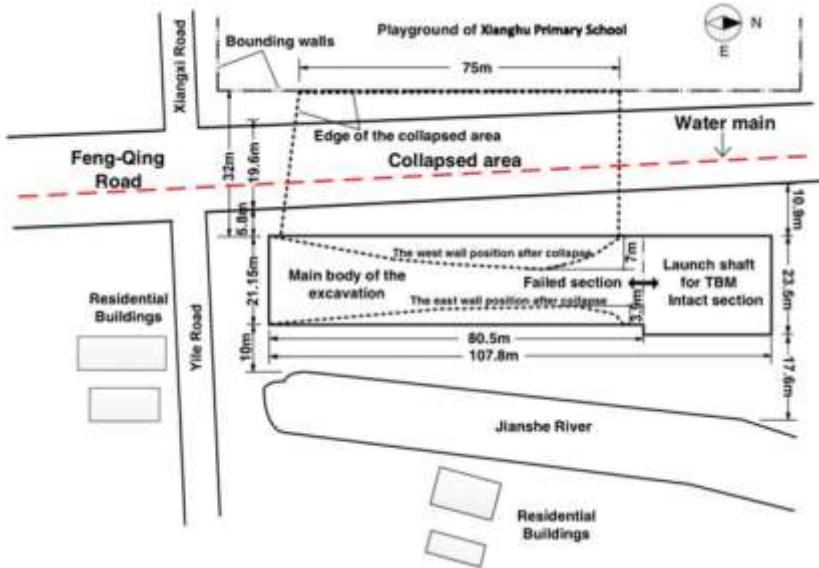
Back Analysis yang tepat harus dilakukan dengan pemahaman mengapa desain tidak berkinerja seperti yang awalnya diprediksi, bukan hanya untuk meningkatkan tingkat desain. Parameter *input* (misalnya, properti tanah) harus disesuaikan untuk memungkinkan pergeseran dan gaya sesuai dengan pengukuran. Jika parameter masukan yang disesuaikan ini berada di luar rentang yang bermakna, model analisis mungkin salah dan sebaiknya tidak digunakan untuk prediksi lebih lanjut.

7.3 Keruntuhan Xianghu Metro Station, Hangzhou, China, 2008

Stasiun Xianghu adalah titik awal dari Jalur 1 Metro Hangzhou. Stasiun ini dibangun menggunakan metode konstruksi dari bawah ke atas dalam delapan penggalian dari utara ke selatan. Posisi yang runtuh adalah penggalian kedua di sisi utara (penggalian N2), yang berdekatan dengan persimpangan Jalan Fengqing dan Jalan Xiangxi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.5. Penggalian ini mencakup area rencana sekitar 2313 m², dengan lebar sekitar 21,5 m dan panjang sekitar 107,6 m. Kedalaman galian maksimum mencapai 16,2 m. Kejadian ini terjadi di Fondasi Pit No. 2. Fondasi

Pada sekitar pukul 15:15 pada tanggal 15 November 2008, terjadi keruntuhan skala besar di sisi barat Fondasi Pit Utara 2 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14.6. Area yang runtuh memiliki panjang 75 m, lebar sekitar 20 m, dan kedalaman 15 m. Lebih dari 11 kendaraan yang sedang bergerak jatuh ke area yang runtuh. Setidaknya 50 orang terkubur dalam runtuh tersebut, menyebabkan 21 kematian, 4 luka, dan kerugian ekonomi lebih dari 49,62 juta yuan. Ini adalah kecelakaan paling serius yang terjadi dalam sejarah konstruksi subway di China.

Pada 17 November 2008, terjadi retak pada tanah di ujung selatan Fondasi Pit yang runtuh. Untuk memudahkan pekerjaan penyelamatan, rumah-rumah di dekat kecelakaan telah sepenuhnya diratakan.



Gambar 7.5. Denah keruntuhan galian N2 beserta area terdampak.
(Sumber : Ma et al, 2012)



Gambar 7.6. Kondisi pasca kegagalan struktur.
(Sumber : Ma et al, 2012)

7.3.1 Analisis Penyebab Keruntuhan

Melalui investigasi lapangan dan analisis awal, penyebab runtuhnya penggalian adalah kesalahan dari penentuan parameter tanah, penggalian berlebihan, pemasangan baja penyangga yang tidak benar, data pemantauan yang tidak valid, dan perbaikan tanah yang tidak memadai (Ma et al, 2012).

Kondisi tanah di Hangzhou abnormal, berdasarkan investigasi lapangan, kecelakaan terjadi di tanah liat berpasir. Jalan utama, Fengqing Avenue di sisi fondasi pit, memiliki lalu lintas besar dan beban besar, yang berpengaruh signifikan pada dinding penahan beban di sisi barat fondasi pit, menyebabkan seluruh fondasi pit runtuh. Selain itu, curah hujan terus-menerus yang sangat jarang terjadi di Hangzhou pada bulan Oktober meningkatkan ketidakstabilan tanah (Gong & Zhang, 2012).

Desain keseluruhan tidak mempertimbangkan pengaruh lingkungan sekitar. Bangunan dan rumah di sekitarnya seharusnya dikosongkan atau direlokasi karena memberikan kontribusi

terhadap beban. Metode konstruksi seharusnya secara erat terintegrasi dengan lapisan tanah dan lingkungan sekitar, namun, tidak ada metode konstruksi yang baik yang dikembangkan dalam proyek ini karena dipilih yang lebih murah, yang menyebabkan kerusakan serius pada lingkungan.

Konstruksi dilakukan dengan tergesa-gesa, untuk menghemat uang dan waktu, periode konstruksi dan biaya tidak masuk akal, ini adalah beberapa alasan utama yang mempengaruhi keselamatan dan kualitas. Selama proyek, terjadi kerusakan pipa saluran pembuangan yang runtuh dan bocor dalam waktu yang lama, yang menyebabkan pembentukan permukaan licin, akibatnya, dapat menyebabkan runtuh dengan bantuan hujan terus menerus.

1. Penyebab Langsung

a. Over-excavation:

Dokumen desain menetapkan bahwa ketika penggalian fondasi pit mencapai 0,5 m di bawah elevasi desain penyangga, penggalian harus dihentikan, dan penyangga harus dipasang tepat waktu, serta tidak ada over-excavation yang diizinkan. Namun, selama penggalian, ketika penyangga terakhir seharusnya dipasang, beberapa bagian telah digali hingga dasar fondasi pit, dan pemasangan penyangga serta konstruksi lantai beton tidak dilakukan tepat waktu.

b. Titik lemah dalam sistem penyangga:

Sistem penyangga adalah dinding diafragma dengan penyangga pipa baja, namun, laporan desain tidak mencakup deskripsi rinci tentang hubungan penyangga pipa baja dan dinding diafragma, serta contoh dari sambungan penyangga. Tidak ada persyaratan teknis yang sesuai yang diajukan mengenai sambungan, juga tidak ada persyaratan pengelasan untuk penyangga baja dan bagian tertanam dinding diafragma. Tidak ada pengelasan yang dilakukan. Deformasi lateral berlebihan dari *sectional wall* bersamaan dengan gaya aksial yang besar dan eksentrisitas yang parah dari penyangga, menyebabkan ketidakstabilan dalam sistem penyangga.

c. *Monitoring Failed:*

Sebelum tanggal 15 November, penurunan maksimum tanah telah mencapai 316 mm, dan perpindahan maksimum inclinometer pada kedalaman 18 m adalah 43,7 mm. Pada tanggal 13 November, deformasi lateral maksimum inclinometer sudah mencapai 65 mm, keduanya sudah melebihi nilai peringatan, tetapi tidak ada respon penanganan yang diberikan.

2. Penyebab Tidak Langsung

- a. *Original design* adalah memperkuat fondasi pit dengan pile group berbentuk strip di dasar. Namun kontraktor mengusulkan untuk mengkonsolidasi dasar galian dengan menurunkan air tanah tanpa menggunakan tindakan penguatan. Laporan desain mengusulkan:

- 1) Muka air tanah di fondasi pit dikurangi hingga 1 m di bawah titik terendah struktur internal dan 3 m di bawah dasar fondasi pit;
- 2) Tes *dewatering* harus dilakukan sebelum penggalian, dan penurunan air di lokasi harus dilakukan 4 minggu sebelumnya;
- 3) Ketika penurunan tanah melebihi nilai peringatan, proses *dewatering* harus dihentikan dan dilaporkan tepat waktu.

Namun, tidak satu pun usulan ini sepenuhnya diimplementasikan dalam konstruksi lapangan

- b. Pengawas tidak menghentikan masalah serius yang melanggar kode dan spesifikasi desain.
- c. Hasil uji sifat fisik dan mekanik dapat diandalkan. Namun, desain sistem penyangga tidak mempertimbangkan desain komprehensif dan rekomendasi yang *reasonable* sesuai dengan karakteristik tanah lunak lokal. Sehingga menyebabkan pemilihan parameter yang digunakan terlalu besar dan menghasilkan faktor keamanan yang rendah.

7.3.2 Lessons Learned

Setelah investigasi lapangan dan analisis awal, lima alasan keruntuhan galian pada proyek ini disimpulkan: (1) menggunakan nilai rata-rata CQ dan bukan nilai standar CU sebagai parameter kekuatan; (2) membatalkan pemasangan penyangga tingkat keempat; (3) koneksi sambungan yang buruk antara penyangga pipa dengan balok kopel dan dinding diafragma; (4) instrumen pemantauan yang tidak memadai dan pengabaian terhadap kinerja galian yang tidak biasa; dan (5) menggunakan sumur artesis (*dewatering*) untuk konsolidasi dibanding penggunaan jet grouting (Ma et al, 2012).

1. Keruntuhan ini sekali lagi membuktikan bahwa galian dalam harus didasarkan pada prinsip konstruksi berlapis dan berzona, penggalian simetris dan seimbang, pengecoran awal pelat basal, dan penggalian berlebihan harus dilarang dengan ketat, terutama di daerah tanah lunak. Proyek ini tidak diimplementasikan sesuai dengan prinsip-prinsip ini, yang merupakan salah satu penyebab langsung kecelakaan.
2. Ketika menggunakan dinding penahan dengan struktur penyangga internal di daerah tanah lunak yang tebal, dinding harus mempertimbangkan masalah stabilitas di area dalam, termasuk penurunan dinding, *uplift*, dan kerusakan "toe kick", harus dihitung dan diverifikasi dengan berbagai metode. Jika persyaratan tidak dapat dipenuhi, kedalaman sisipan dinding harus diperdalam atau area pasif harus diperkuat. Desain proyek ini tidak cukup kuat, dan penguatan area pasif tidak dilakukan.
3. Jika penyangga internal terbuat dari truss baja atau penyangga pipa baja, persyaratan struktur sambungan dan pengelasan harus diajukan dengan benar untuk menghindari eksentrisitas dan ketidakstabilan; dan penyangga internal pertama harus didukung oleh beton bertulang.
4. Pemilihan parameter kekuatan geser harus sesuai dengan tujuan perhitungan dan faktor keamanan. Untuk perhitungan tekanan tanah, perhitungan terkait "*toe kick*" dan "*overturning*" harus menggunakan hasil uji geser

- konsolidasi cepat atau uji triaksial CU; perhitungan pergerakan basal, geseran, dan stabilitas keseluruhan harus menggunakan hasil uji geser langsung, uji triaksial UU, atau uji kekuatan geser pelat silang; ketika tanah liat lunak memainkan peran penting, desain harus didasarkan pada pertimbangan komprehensif, tidak hanya rata-rata, tetapi juga data maksimum dan minimum.
5. Pemantauan harus dilakukan dengan ketat, independen, dan tanpa gangguan. Ketika nilai peringatan tercapai, harus segera dilaporkan dan tidak boleh disembunyikan. Departemen pengawasan harus familiar dengan rekayasa geoteknik dan harus secara ketat menghentikan beberapa pelanggaran utama.

7.4 Keruntuhan Struktur Square Foundation Pit, Guangzhou Haizhu City, China

Fondasi pit Zhuhai City Plaza runtuh sekitar pukul 12:20 pada tanggal 21 Juli 2005. Penggalian ini telah dimulai sejak Oktober 2002, tetapi telah dihentikan beberapa kali di tengah jalan hingga runtuh pada tanggal 21 Juli 2005, yang berlangsung selama 2 tahun dan 9 bulan.

Setelah runtuhnya sisi selatan fondasi pit, penyangga di sudut tenggara mengalami kegagalan, menyebabkan dinding penahan di kedalaman 20 m di sebelah timur tidak mendapat dukungan, dan membahayakan keamanan lingkungan sekitar (seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.7). Fondasi tiang Hotel Seafarer, yang berada di selatan pit yang runtuh, rusak dan bergeser, dan kepala tiangnya menggantung di udara, menyebabkan bangunan tersebut roboh di dekat fondasi pit (seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.8); fondasi tiang bangunan hunian No. 1 di dekat pit terbongkar dan mengalami kegagalan, serta tanah di bawah kepala tiang yang kosong (seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.9).



Gambar 7.7. Keruntuhan sisi selatan Foundation Pit.
(Sumber : Chen et al, 2006)



Gambar 7.8. Keruntuhan struktur bangunan eksisting di sebelah galian.
(Sumber : Chen et al, 2006)



Gambar 7.9. Penurunan permukaan tanah dan Cap Failure
(Sumber : Chen et al, 2006)

7.4.1 Analisis Penyebab Keruntuhan

Menurut Chen et al. 2006, alasan teknis utama untuk runtuhnya ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat disimpulkan dari data eksplorasi geologi bahwa lokasi tersebut terdiri dari lapisan batuan berupa batupasir lempung berargil yang bercampur dengan lapisan tanah yang sangat tererosi di bagian galian dalam; selama penggalian, terlihat bahwa massa batuan di sisi selatan cenderung ke arah pit, dan terjadi rembesan air serta aliran lumpur di lapisan tererosi dengan kuat; berdasarkan data pemantauan deformasi, terdapat tanda-tanda nyata runtuhnya di sisi selatan fondasi pit. Namun, tidak ada perhatian yang memadai terhadap masalah ini, dan tidak diambil langkah-langkah efektif, yang merupakan penyebab utama kecelakaan.
2. Kedalaman desain awal fondasi pit adalah 17,0 m, tetapi kedalaman penggalian aktual adalah 20,3 m. Over-excavation sepanjang 3,3 m tidak hanya menyebabkan kurangnya gaya pengikat, tetapi juga membuat dinding

penahan 20 m menjadi dinding tergantung dan tidak dapat disesuaikan, mengakibatkan bahaya yang potensial.

3. Waktu penundaan konstruksi fondasi pit adalah 2 tahun dan 9 bulan. Ini jauh lebih lama dari periode satu tahun sesuai dengan kode terkait konstruksi sementara, yang menyebabkan pelembutan lapisan tanah akibat rembesan, dan pengurangan gaya pengikat dari kabel angkur karena korosi komponen baja.
4. Ketika fondasi pit runtuh, masih ada satu ekskavator backhoe, satu derek, dan satu truk dump truck 16 m² di sisi selatan fondasi pit dekat Hotel Seafaring. Ketika fondasi pit dalam bahaya, beban konstruksi ini juga menjadi salah satu penyebab runtuhnya fondasi pit.

7.4.2 Lessons Learned

Berdasarkan kasus diatas, berikut ini adalah situasi yang harus dihindari secara ketat:

1. Over-excavation: kedalaman desain asli adalah 17 m, tetapi pit sebenarnya telah digali menjadi 20,3 m, menyebabkan dinding penahan menggantung.
2. Overtime: periode layan struktur penyangga sementara fondasi pit adalah satu tahun, tetapi penggalian aktual terjadi hampir tiga tahun.
3. Beban berlebih: beban berlebih di atas pit seperti dump truk, crane, dan ekskavator.
4. Mengabaikan respons kondisi geologi: lapisan batuan dangkal dan lebih condong ke dalam pit. Perencana menggunakan perangkat lunak untuk merancang dan memeriksa fondasi pit tetapi mengabaikan fakta bahwa lapisan batuan condong 25°. Ditemukan bahwa pergeseran dinding di sisi selatan terlalu besar, sehingga bagian dinding ini diperkuat dengan ground angkur, tetapi cakupannya terlalu kecil, hanya mencakup 20–30 m di sepanjang sisi barat selatan. Kontraktor meyakini bahwa perkuatan yang tidak memadai disebabkan oleh desain yang tidak reasonable (Chen et al, 2006)

DAFTAR PUSTAKA

- Chen, W., Wu, Y. J., & Peng, Z. Z. 2006. Monitoring of rescue of a foundation pit and technical analysis of its collapse in GuangZhou. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2(6), 1034–1039. (in Chinese).
- Gong, X. N., & Zhang, X. C. 2012. Excavation collapse of Hangzhou subway station in soft clay and numerical investigation based on orthogonal experiment method. *Journal of Zhejiang University Science*, 13(10), 760–767.
- Ma, Y., de Jong, M., Koppenjan, J., Xi, B., & Mu, R. 2012. Explaining the organizational and contractual context of subway construction disasters in China: The case of Hangzhou. *Policy and Society*, 31(1), 87–103.
- Whittle, A. J., & Davies, R. V. 2006. June. Nicoll Highway collapse: Evaluation of geotechnical factors affecting design of excavation support system. *International Conference on Deep Excavations*, 28, 30–36.
- Zhang, W., Liu, H. 2022. Design of Deep Braced Excavation and Earth Retaining Systems Under Complex Built Environment. Science Press Beijing, China, <https://doi.org/10.1007/978-981-16-5320-9>.

BAB 8

GEOTEKNIK DALAM PERENCANAAN TATA RUANG

Oleh Komang Arya Utama

8.1 Umum

Indonesia adalah negara yang bentang alam atau lansekap (*landscape*) daratannya didominasi oleh pegunungan/perbukitan, jenis batuan yang beragam serta terletak di daerah lempeng tektonik aktif yang dikelilingi dengan deretan gunung berapi atau dikenal sebagai jalur cincin api (*ring of fire*) bumi. Hal inilah yang menjadikan Indonesia sebagai negara yang sangat rentan terhadap bencana geologis seperti: gempa bumi, likuifaksi, tanah longsor, dan letusan gunung api. Kondisi tersebut yang membuat pemerintah Indonesia dan masyarakat perlu atau harus memiliki pengetahuan dan kewaspadaan dalam urusan penataan ruang dan pembangunan agar mampu melakukan antisipasi dini terhadap ancaman bencana geologis tersebut. Oleh karena itu, kajian ilmu geoteknik sangat dibutuhkan dalam penataan ruang dalam menunjang pembangunan dan perkembangan wilayah di Indonesia.

Geoteknik menjadi disiplin ilmu yang memiliki peran penting dalam perencanaan tata ruang sebuah wilayah. Hal ini disebabkan karena ilmu geoteknik sangat berkaitan dengan studi dan analisis tentang karakteristik tanah, formasi batuan, dan kelerengan suatu daerah yang dapat mempengaruhi keputusan perencanaan tata ruang pada wilayah tersebut. Kajian geoteknik sangat diperlukan untuk membantu para perencana dalam menata ruang yang dapat menghindarkan kita dari bencana, utamanya bencana geologis yang kerap mengancam. Melalui implementasi kajian geoteknik pada suatu wilayah, diharapkan bisa membantu para perencana tata ruang untuk melakukan perencanaan pembangunan yang komprehensif, maju dan berkelanjutan di wilayah tersebut.

Tata ruang merupakan istilah yang berkaitan dengan usaha merencanakan, mengatur, mengendalikan dan memanfaatkan ruang dalam pembangunan sebuah wilayah ruang fisik pada satu daerah administratif tertentu (Republik Indonesia 2007). Lingkup utama tata ruang sangat berkaitan dengan perencanaan tata guna lahan, pemukiman, transportasi, dan berbagai elemen infrastruktur lainnya untuk mengatur bagaimana suatu wilayah dapat digunakan, dikembangkan, serta dikelola secara baik dan optimal. Setiap daerah/wilayah administratif, khususnya di Indonesia, harus memiliki rencana tata ruang wilayah sebagai alat bantu dalam mengatur, mengendalikan dan mengarahkan pemanfaatan ruang di daerah tersebut.

Implementasi ilmu geoteknik dalam perencanaan tata ruang diharapkan akan dapat membantu dalam melakukan perencanaan pembangunan kewilayahan dan infrastruktur terutama terkait dengan penataan ruang wilayah yang aman dari ancaman risiko dan bencana, seperti gempa bumi, likuifaksi, tanah longsor dan penurunan tanah (*subsidence*) pada bangunan infrastruktur dan permukiman masyarakat.

8.2 Karakteristik Geoteknik Sebuah Wilayah

Guna bisa mengenali, memahami, dan mengotimalkan peran geoteknik dalam perencanaan tata ruang, maka terlebih dahulu perlu diketahui bagaimana karakteristik geoteknik di wilayah tersebut. Karakteristik geoteknik sebuah wilayah dapat dipahami berdasarkan stratifikasi tanahnya, parameter geoteknik, kelerengan dan formasi patahan geologis pada wilayah tersebut.

8.2.1 Stratifikasi Tanah

Tanah menurut perspektif rekayasa geoteknik memegang peranan yang penting pada konstruksi sebuah bangunan. Tanah menjadi penyangga bangunan melalui fondasinya (Wesley 2010). Tanah yang stabil akan memberikan daya dukungan yang baik, biaya fondasi yang murah dan proses pengerjaan bangunan yang mudah.

Lapisan tanah terbentuk melalui sebuah proses geologis yang sangat kompleks karena melibatkan berbagai faktor diantaranya: (1) pelapukan batuan, (2) aktivitas organisme, (3)

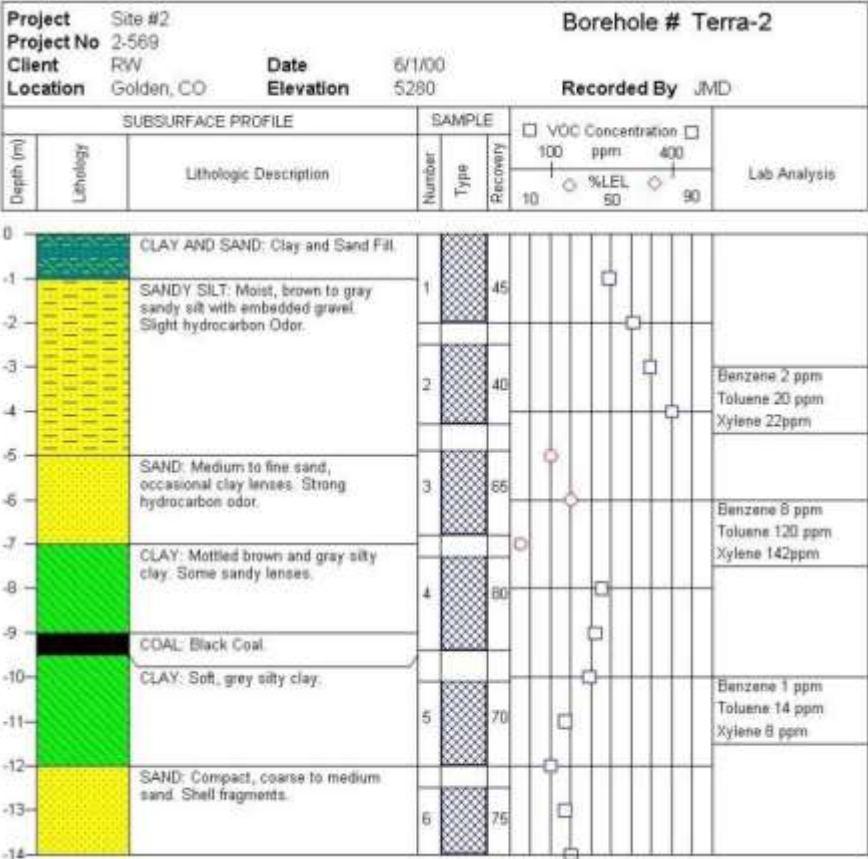
cuaca, (4) gerakan air tanah, (5) proses erosi-transportasi-deposisi sedimen, dan (6) kejadian alam seperti tanah longsor dan banjir. Pembentukan lapisan tanah berlangsung dalam kurun waktu yang lama. Hal inilah yang menyebabkan tanah yang kita pijak di sebuah wilayah terdiri atas berlapis-lapis sesuai dengan proses geologis yang di alami di wilayah tersebut. Lapisan tanah ini dikenal dengan istilah stratifikasi tanah.

Stratifikasi tanah adalah susunan lapisan tanah, baik itu secara vertikal maupun horisontal, berupa jumlah dan ketebalan lapisan yang pengelompokannya didasari oleh jenis, tekstur, warna, sifat fisis/mechanis, dan konsistensi tanah (Safrilah 2022). Pada umumnya, dalam ilmu geoteknik, stratifikasi tanah diperoleh dari penyelidikan langsung di lapangan dengan metode bor dalam (*deep drilling*). Kemudian sampel yang diperoleh dari kegiatan bor dalam tersebut dibawa ke laboratorium untuk diuji dan diteliti untuk menentukan stratifikasi tanah. Stratifikasi tanah ini sangat berpengaruh dalam pengambilan keputusan teknis dalam perencanaan fondasi dan aspek geoteknis lainnya (Li, et al. 2015).

Tabel 8.1. Parameter stratifikasi tanah dalam ilmu geoteknik

Jenis	Tekstur	Warna	Sifat fisis/ mekanis	Konsistensi
Lempung	Halus	Hitam	Kepadatan	<i>Very soft</i>
Lanau	Kasar	Abu-abu	Kohesi	<i>Soft</i>
Pasir		Cokelat	Sudut geser	<i>Medium</i>
Gravel			Elastisitas	<i>Stiff</i>
Koral			<i>Poisson ratio</i>	<i>Very stiff</i>
				<i>Hard</i>

Sumber: Li, 2015



Gambar 8.1. Stratifikasi tanah hasil uji sampel bor inti
(sumber: Darmadi, 2016)

Hasil dari penyelidikan tanah yang disajikan dalam bentuk info stratifikasi tanah akan memberikan informasi bagaimana gambaran parameter geoteknik tanah. Hal ini bisa dijadikan masukan dalam penyusunan penataan ruang sebuah wilayah berdasarkan stratifikasi tanahnya.

Kesesuaian peruntukan lahan dalam penataan ruang sebuah daerah harus disandingkan dengan stratifikasi tanah pada daerah tersebut. Melalui informasi atau data-data stratifikasi tanah yang diperoleh dari hasil penyelidikan geoteknik di lapangan, bisa disusun pola penataan ruang berdasarkan fungsi pemanfaatannya. Analisis yang mendalam terhadap parameter tanah ini, akan

menuntun kita dalam merencanakan pembangunan gedung maupun infrastruktur yang tepat di lokasi yang diinginkan.

8.2.2 Parameter Geoteknik

Tanah dan batuan memiliki parameter geoteknik yang umum digunakan dalam perencanaan bangunan. Parameter ini merupakan gambaran sifat tanah yang dijadikan sebagai input analisis dalam kajian geoteknik pada pekerjaan konstruksi bangunan dan infrastruktur. Beberapa parameter geoteknik dasar yang perlu diketahui yang bisa dijadikan sebagai dasar penyusunan kebijakan perencanaan tata ruang di antaranya adalah (Naim, Priadi and Aprianto 2016) (Ali, Najib and ALi 2018) (Putranto, et al. 2020): (1) daya dukung tanah, q_u ; (2) kuat geser, τ , (3) konsistensi tanah; dan (4) permeabilitas tanah - k . Parameter ini hanya sebagaian dari parameter geoteknik yang ada, namun informasi parameter ini sangat diperlukan dalam menyusun perencanaan tata ruang dalam hal pemanfaatan dan pembangunan sebuah infrastruktur.

1. *Daya dukung tanah (q_u)*

Daya dukung tanah merupakan parameter utama yang dibutuhkan dalam membangun struktur konstruksi, seperti: menara, jembatan, gedung, permukiman, penahan tanah, dan lain sebagainya (Vanapalli and Mohammed 2013). Daya dukung tanah, juga dikenal sebagai kapasitas dukung atau *bearing capacity*, adalah kekuatan tanah untuk menahan suatu beban yang bekerja padanya, yang biasanya disalurkan melalui fondasi. Faktor-faktor yang mempengaruhi daya dukung tanah adalah tekstur, struktur dan mineralogi pada tanah tersebut sebagai faktor internal, sedangkan kadar air, dan lokasi kedalaman tanah sebagai faktor eksternal material tanah.

Sangatlah penting untuk mengetahui kondisi daya dukung tanah pada saat proses perencanaan maupun pelaksanaan pembangunan. Tanah yang memiliki daya dukung yang baik atau cukup akan membuat fondasi lebih stabil dan kuat. Sebaliknya, tanah yang memiliki daya dukung yang rendah akan menyebabkan fondasi tidak dapat bekerja sebagaimana mestinya atau bahkan dapat merusak fungsi

fondasi itu sendiri (Sundary, Chairullah and Gunawan 2014).

Informasi terkait daya dukung tanah pada suatu wilayah, akan menjadi dasar dalam perencanaan tata ruang di wilayah tersebut. Peruntukan lahan dalam perencanaan tata ruang tersebut sangat membutuhkan informasi daya dukung tanah. Lokasi, jenis dan tipe bangunan yang akan dibangun, akan sangat bergantung pada kondisi daya dukung tanah di lokasi tersebut. Melalui informasi daya dukung tanah, dapat disusun tipikal jenis fondasi yang cocok untuk lokasi tertentu.

2. *Kuat geser tanah (τ)*

Kuat geser adalah parameter tanah yang menggambarkan kemampuan tanah dalam bereaksi terhadap gaya yang bekerja secara lateral untuk menjaga kestabilannya. Kuat geser tanah ini ditentukan oleh dua parameter utama, yaitu kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) tanah. Kohesi tanah adalah sifat tanah yang menggambarkan gaya tarik-menarik antar partikel tanah terhadap satuan luas penampang tanah tinjauan. Sudut geser dalam adalah sudut yang terbentuk pada bidang geser ketika tanah mengalami keruntuhan akibat adanya pembebanan normal.

Kuat geser tanah sangat berperan pada daerah yang memiliki topografi berbukit/bergunung atau berlereng (*slopping area*). Sehingga dalam perencanaan tata ruang pada daerah semacam ini, parameter kuat geser tanah sangat dipertimbangkan. Semakin besar kuat geser tanah, maka semakin besar kestabilan tanah pada daerah berlereng.

Daerah berlereng umumnya wilayah yang kaya akan pemanfaatan, misalnya dijadikan sebagai tempat wisata. Sehingga, pemanfaatan ilmu geoteknik dalam penataan ruang di daerah berlereng diperlukan agar pemanfaatannya bisa optimal dan bisa menjadi bentuk awal mitigasi bencana terkait potensi bahaya tanah longsor yang bisa terjadi.

3. *Konsistensi*

Konsistensi adalah istilah umum yang digunakan untuk menggambarkan perilaku tanah dalam menanggapi gaya yang diterapkan pada berbagai kondisi air-tanah. Konsistensi tanah mengacu pada kemampuan tanah untuk menahan deformasi atau perubahan bentuk akibat gaya yang diberikan. Pemahaman tentang konsistensi tanah sangat penting dalam berbagai bidang seperti teknik sipil, geoteknik, pertanian dan ilmu lingkungan.

Tabel 8.2. Nilai konsistensi tanah

Sondir-CPT (q_c) Kg/cm²	SPT (N)	UCS Kg/cm²	Konsistensi Tanah
0 - 5	0 - 2	0 - 5	Sangat lunak
5 - 10	2 - 5	5 - 10	Lunak
10 - 20	5 - 10	10 - 20	Medium
20 - 40	10 - 20	20 - 40	Kaku
40 - 80	20 - 30	40 - 80	Sangat kaku
80 - 100	> 30	80 - 100	Keras

Sumber: Sanglerat, 1997

Mengetahui dan memahami konsistensi tanah sangat penting untuk berbagai penerapan di lapangan, termasuk pemilihan/desain jenis fondasi bangunan, analisis stabilitas lereng, praktik pelaksanaan di bidang pertanian, penilaian lingkungan dan perencanaan penataan ruang dan wilayah. Melalui analisis dan evaluasi konsistensi tanah, maka para ahli sipil-geoteknik, ahli geologi, dan ilmuwan lainnya dapat membuat keputusan yang tepat dan merancang solusi yang sesuai berdasarkan sifat dan perilaku mekanis tanah.

4. *Permeabilitas tanah (k)*

Permeabilitas adalah sifat mekanis tanah yang sangat penting dalam konteks rekayasa geoteknik dan hidrogeologi. Permeabilitas tanah dapat dijelaskan sebagai salah satu sifat mekanis tanah berupa kemampuan tanah dalam meloloskan atau mengizinkan air bergerak melalui pori-pori atau ruang antarpartikel di dalam tanah. Permeabilitas tanah memiliki dampak yang signifikan pada berbagai aspek, di antaranya: infiltrasi air, konduktivitas, perkolasi dan aliran air tanah.

Nilai permeabilitas tanah sangat tergantung pada sifat tanah yaitu jenis dan tekstur tanah, serta ukuran dan distribusi butiran tanah. Selain itu, permeabilitas tanah juga tergantung pada kepadatan tanah, porositas, temperatur dan kandungan organik tanah. Tanah lempung akan memiliki nilai permeabilitas yang sangat kecil dibandingkan tanah berbutir halus seperti pasir.

Tabel 8.3. Kisaran nilai permeabilitas tanah (*k*) pada temperatur 20° C (Das, 1983)

Jenis tanah	Permeabilitas tanah (<i>k</i>) mm/det
Butiran kasar	1 – 10 ²
Kerikil halus; Butiran kasar bercampur pasir butiran sedang	10 ⁻³ – 1
Pasir halus; Lanau longgar	10 ⁻⁵ – 10 ⁻³
Lanau padat; Lanau berlempung	10 ⁻⁶ – 10 ⁻⁵
Lempung berlanau; Lanau	10 ⁻⁹ – 10 ⁻⁶

Sumber: Hardiyatmo, 2017

8.2.3 Lereng dan hidrogeologi

Hubungan erat antara bidang geoteknik dalam perencanaan tata ruang, selain pada sifat atau parameter tanah, juga pada kelerengan lahan dan kondisi air-tanah di wilayah tersebut. Kondisi kelerengan dan hidrogeologi suatu wilayah akan sangat mempengaruhi potensi kejadian erosi dan longsor. Kestabilan lereng dipengaruhi oleh dua faktor (Arifadillah, Zakaria and Sophian 2021). Faktor internal, yaitu parameter dalam lereng tersebut, seperti *properties* tanah dan kondisi air-tanah. Sedangkan untuk faktor eksternal dapat berupa curah hujan, aktivitas manusia, dan kegempaan.

Hal ini tentunya akan sangat mempengaruhi penentuan penggunaan lahan dalam merencanakan tata ruang sebuah wilayah. Tanah yang berlereng dengan kondisi hidrogeologis yang tak terkendali, tentunya akan memberikan tingkat risiko bahaya longsor yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanah dengan kondisi yang datar.

Tabel 8.4. Klasifikasi lereng

Kemiringan lereng (°)	Kemiringan lereng (%)	Klasifikasi
< 1	0 – 2	Datar – Hampir datar
1 – 3	3 – 7	Sangat landai
3 – 6	8 – 13	Landai
6 – 9	14 – 20	Agak curam
9 – 25	21 – 55	Curam
25 – 65	56 – 140	Sangat curam
> 65	> 140	Terjal

Sumber: Zuidam, 1983

yang aktif bergerak. Indonesia setidaknya memiliki 295 sesar/patahan aktif yang tersebar dari Barat ke Timur (Ruchyat 2023). Patahan aktif terbut di antaranya adalah Sesar Semangko, Sesar Tarahan, Sesar Mentawai, Sesar Cimandiri, Sesar Lembang, Sesar Opak, Sesar Baribis, Sesar Semarang, Sesar Kendeng, Sesar Palu-Koro, Sesar Sorong, dan Sesar Anjak.

Oleh karena banyaknya patahan aktif di Indonesia, maka perencanaan tata ruang di Indonesia harus mempertimbangkan kondisi ini. Hal ini merupakan bagian dari bentuk mitigasi dini terhadap ancaman bahaya bencana geologis yang berpotensi tinggi terjadi di Indonesia.

8.3 Peran Geoteknik dalam Perencanaan Tata Ruang

Kegiatan perencanaan tata ruang merupakan sebuah mekanisme atau sistem proses dalam merencanakan tata ruang, pemanfaatan ruang, dan pengendalian pemanfaatan ruang (Republik Indonesia 2007). Undang-undang tersebut juga mengamatkan tentang pengurangan risiko bencana yang berbasis pada penataan ruang dalam sebuah wilayah. Oleh karena itu, geoteknik memainkan peran penting dalam perencanaan tata ruang karena melibatkan pemahaman tentang karakteristik tanah dan batuan di suatu wilayah. Penerapan prinsip-prinsip geoteknik dalam perencanaan tata ruang membantu memastikan keberlanjutan dan keamanan infrastruktur yang dibangun.

8.3.1 Informasi geoteknik sebagai dasar penataan ruang

Kurangnya pengetahuan dasar dan informasi tentang karakteristik geoteknik dalam perencanaan tata ruang, menjadi salah satu hal yang mendasari tentang banyaknya terjadi masalah pemanfaatan ruang di masyarakat. Hal ini dapat meningkatkan risiko dan ancaman keselamatan, seperti: bahaya tanah longsor, penurunan tanah (*land subsidence*) dan likuifaksi. Sehingga konsep perencanaan tata ruang yang mempertimbangkan aspek geomorfologi dan geoteknik sudah harus segera diterapkan yang biasa kita sebut sebagai *geo-planning*.

Integrasi perencanaan tata ruang dengan bidang geoteknik, maka informasi dan pemahaman sifat tanah dan batuan harus

komprehensif. Karakteristik seperti: daya dukung tanah, kuat geser tanah, kepadatan tanah, kelerengan, litologi dan beberapa aspek lainnya, umumnya dijadikan sebagai informasi data dalam perencanaan dan penataan peruntukan lahan, utamanya dalam hal pengelompokan (*clustering*) pembangunan permukiman dan infrastruktur.

Penyusunan tata ruang sebuah wilayah, harus mempertimbangkan kondisi kerawanan terkait bencana geologis. Melalui parameter geoteknik, tata ruang sebuah wilayah harus disusun dengan baik untuk meminimalisir kerugian atau bahkan menghindari adanya kerugian akibat bencana ini. Pembuatan *geo-planning* akan memberikan informasi daerah mana yang bisa dimanfaatkan atau tidak bisa untuk permukiman, bangunan infrastruktur, wilayah perkebunan/pertanian produktif, atau mana wilayah konservasi. Rekayasa geoteknik merupakan komponen kunci dalam perencanaan tata ruang, yang berkontribusi terhadap pencegahan bahaya, pengendalian keamanan dan ketahanan, serta penyokong keramahan lingkungan pembangunan infrastruktur.

8.3.2 Perencanaan tata ruang berbasis ancaman bahaya geologis

Ancaman bahaya geologis di sebuah wilayah telah banyak direpresentasikan dalam bentuk peta zonasi bahaya. Zonasi geologis biasanya dilakukan dalam dua bagian, satu di tingkat makro dan satu lagi di tingkat mikro.

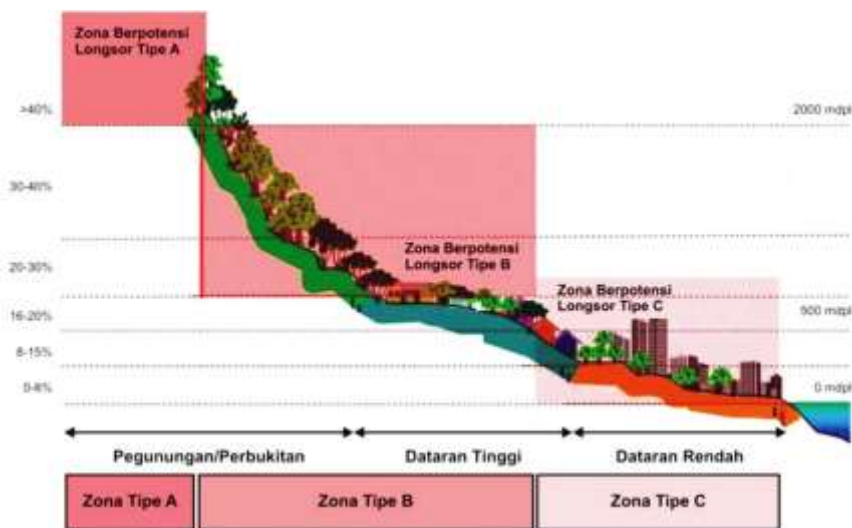
Makrozonasi dilakukan dengan mempertimbangkan kegempaan geologi dalam skala besar tanpa mempertimbangkan aspek geoteknik. Sedangkan mikrozonasi dilakukan dalam skala yang lebih kecil dengan mempertimbangkan kegempaan regional, geologi dan kondisi parameter geoteknik lahan setempat (Anbazhagan 2013).

Zonasi tingkat mikro menjadi penting untuk kota-kota dan pusat-pusat kota karena meningkatnya aglomerasi populasi di kota-kota, yang mengakibatkan pembangunan yang cepat dan tidak terencana. Kota-kota tersebut merupakan daerah yang berisiko tinggi. Mikrozonasi menjadi langkah pertama untuk meminimalkan korban jiwa dan kerusakan akibat kejadian bencana geologis.

Mikrozonasi secara umum telah diakui sebagai alat yang paling diterima dalam penilaian bahaya seismik dan evaluasi risiko dan didefinisikan sebagai zonasi sehubungan dengan karakteristik gerakan tanah dengan mempertimbangkan sumber dan kondisi lokasi.

Salah satu bencana geologis yang sering dihadapi adalah tanah longsor. Tanah longsor, yang selanjutnya disebut longsor merupakan suatu proses perpindahan massa tanah atau batuan dengan arah miring dari kedudukan semula, sehingga terpisah dari massa yang mantap, karena pengaruh gravitasi; dengan jenis gerakan berbentuk rotasi dan translasi (Permen PU 2007). Penilaian bahaya geologi, utamanya longsor, umumnya mencakup dua dimensi mendasar (Qiang, et al. 2021):

1. Penilaian kecenderungan (longsor): Aspek ini mencakup analisis komprehensif tentang jenis, skala, mekanisme pembangunan, dan kondisi terkait dari daerah rawan bahaya geologi. Hal ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi bahaya geologi dan stabilitas kondisi tersebut di wilayah tertentu.
2. Penilaian Kerentanan (*Vulnerability Assessment*): Aspek ini melibatkan pemeriksaan ekstensif terhadap jenis, karakteristik, jumlah, dan distribusi spasial dari berbagai elemen atau aset di dalam wilayah geografis yang rentan terhadap bahaya geologi. Tujuannya adalah untuk menilai kerentanan elemen-elemen ini terhadap dampak bahaya geologi.



Gambar 8.3. Zona tipe potensi longsor
(sumber: Permen PU, 2007)

Berdasarkan gambar di atas, berdasarkan zonasi tipe longsor, para perencana tata ruang bisa menyusun tata ruang wilayah untuk mengurangi risiko bencana longsor sebagai bagian mitigasi bencana. Melalui penataan ruang, maka pembangunan akan dilakukan untuk mewujudkan wilayah nasional yang aman, nyaman, produktif dan berkelanjutan.

8.3.3 Geoteknik dalam pembangunan berkelanjutan

Rekayasa geoteknik memberikan wawasan penting mengenai kondisi dan sifat tanah yang diperlukan untuk pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan. Dengan memahami perilaku tanah dan batuan, para insinyur dapat mengatasi tantangan alam dan menciptakan struktur yang tangguh, aman, dan tahan lama. Berikut adalah beberapa alasan utama mengapa rekayasa geoteknik sangat penting dalam pembangunan infrastruktur berkelanjutan.

1. *Penyelidikan parameter teknis tanah*: investigasi untuk menilai karakteristik tanah, batuan, dan air tanah. Kajian ini dilakukan untuk menentukan daya dukung, potensi

- penurunan, dan risiko erosi, yang sangat penting untuk merancang struktur yang stabil.
2. *Optimasi desain fondasi*: merancang fondasi untuk memastikan usia pemanfaatan infrastruktur.
 3. *Stabilitas lereng*: merencanakan dinding penahan tanah, dan memperkuat lereng untuk memastikan keamanan dan ketahanan infrastruktur.
 4. *Struktur tahan gempa*: geoteknik sangat penting di wilayah yang rawan aktivitas seismik.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, Fauziah, Najib, and Rinal Khaidar ALi. 2018. "Kajian Geoteknik untuk Perencanaan Pembangunan Pemukiman Baru pada Kawasan Handil Berkat Makmur, Kabupaten Kapuas, Kalimantan Tengah." *Jurnal Geosains dan Teknologi* 1 (2): 50-58. doi:<https://doi.org/10.14710/jgt.1.2.2018.50-58>.
- Anbazzhagan , P. 2013. "Method for Seismic Microzonation with Geotechnical Aspects." *Disaster Advances* 6 (4): 66-86.
- Arifadillah, Raffy Rizki , Zufialdi Zakaria, and Raden Irvan Sophian. 2021. "Desain Lereng Optimal Berdasarkan Probabilitas Kelongsoran Melalui Analisis Balik di Lereng Tambang Emas Pit X Jawa Barat." *Padjadjaran Geoscience Journal* 5 (3): 210-218.
- Darmadi. 2016. <https://darmadi18.wordpress.com/2016/10/30/data-tanah-tugas-besar-pondasi/>. October 30.
- Hardiyatmo, Hary Christady. 2017. *Mekanika Tanah* 1. 7. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Kusuma, Bobby Daneswara. I, Moehammad Awaluddin, and Bambang Darmo Yuwono. 2017. "Survey Deformasi Sesar Kaligarang dengan Metode Pengamatan GPS Tahun 2016." *Jurnal Geodesi Undip* 6 (1): 93-99.
- Li, Jinhui Lisa, Michael J Cassidy, J Huang, L M Zhang, and Richard Kelly. 2015. "Probabilistic identification of soil stratification." *Géotechnique* (ICE Publishing) 1-12. doi:<http://dx.doi.org/10.1680/geot.14.P.242>.
- Naim, Eka Priadi, and Aprianto. 2016. "Pemetaan Zonasi Geoteknik di Kota Pontianak Berdasarkan Data Konsistensi dan Sifat-Sifat Tanah dengan Sistem Informasi Geografis." *Jurnal Teknik Sipil Universitas Tanjungpura* 16 (2): 1-16.
- Natawidjaja, Danny Hilman. 2021. *Riset Sesar Aktif Indonesia dan Peranannya dalam Mitigasi Bencana Gempa dan Tsunami*. Jakarta: LIPI Press.
- Noor, Djauhari. 2014. *Pengantar Geologi*. 1st. Yogyakarta: Deepublish.
- Permen PU. 2007. *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No 22/PRT/M/2007 Tentang Pedoman Penataan Ruang*

- Kawasan Rawan Bencana Longsor*. Jakarta: Direktorat Jenderal Penataan Ruang, Departemen Pekerjaan Umum,.
- Putranto, D. D. A, M. M Iqbal, F Alia, A. L Yuono, and Sarino. 2020. "Integrasi Data Hasil Penyelidikan Tanah dalam Sistem Informasi Geografis Daya Dukung Tanah." Palembang: Seminar Nasional AVoER XII 2020.
- Qiang, Yang, Gaofeng Wang, Rongjian Li, Weicui Ding, Youlong Gao, and Lele Han. 2021. "Risk assessment of geological hazards in mountain town scale based on FLO-2D and GIS." Beijing: IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 861.
- Rachmawati, Turniningtyas Ayu, Dwi Rahmawati, and Adi Susilo. 2018. *Pengurangan Risiko Bencana Berbasis Tata Ruang*. Edisi Pertama. Malang: UB Press.
- Republik Indonesia. 2007. *Undang-undang Republik Indonesia Tentang Penataan Ruang*. Jakarta: Sekretariat Negara RI.
- Ruchyat, Fenty. 2023. <https://www.jurnalmetropolitan.com/>. Accessed November 25, 2023. <https://www.jurnalmetropolitan.com/nasional/pr-7276003301/ada-295-patahan-aktif-di-indonesia-berpotensi-besar-bergeser-bmkg-wanti-wanti>.
- Safirah. 2022. *Modul Penyusunan Stratifikasi Tanah Advance Geocalculation For Infrastructure Problem*. Jakarta: Universitas Bakrie.
- Sanglerat, Guy. 1997. *Mekanika Tanah dan Pondasi*. Jakarta: Erlangga.
- Sunday, Devi, Banta Chairullah, and Hendra Gunawan. 2014. "Pemetaan Daya Dukung Tanah di Beberapa Daerah Aceh Besar Menggunakan Data Cone Penetration Test." *Jurnal Teknik Sipil Universitas Syah Kuala* 3 (2): 157-166.
- Van Zuidam, R. A. 1983. "Guide to Geomorphologic aerial photographic interpretation and mapping." Enschede: International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation.
- Vanapalli, Sai K, and Fathi M. O Mohammed. 2013. "Bearing Capacity and Settlement of Footings In Unsaturated Sands." *Int. J. of Geomate* 5 (1): 595-604.

Wesley, Laurence D. 2010. *Mekanika Tanah untuk Tanah Endapan dan Residu*. 1st. Yogyakarta: Andi.

BIODATA PENULIS



Ir. Fathur Rahman Rustan, S.T., M.T., IPM.

Dosen Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Sembilanbelas November Kolaka

Penulis lahir di Kendari dan merupakan dosen tetap di Program Studi Teknik Sipil Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Sembilanbelas November Kolaka. Penulis tercatat sebagai lulusan Sarjana Teknik (S.T.) bidang Teknik Sipil Universitas Halu Oleo (2009), Magister Teknik (M.T.) bidang Manajemen Rekayasa dan Sumber Air FTSP ITS Surabaya (2013), dan tahun 2020 mengambil Pendidikan Profesi Insinyur (Ir.) Universitas Hasanuddin Makassar. Penulis telah menghasilkan beberapa artikel penelitian dan menghasilkan beberapa Book Chapter serta telah memiliki hak kekayaan intelektual berupa hak cipta.

BIODATA PENULIS



Ir. Iis Roin Widiati, ST., MT,
Dosen Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik UNYAP

Penulis lahir lahir di Kota Jayapura pada tanggal 02 Oktober 1981. Menyelesaikan kuliah pada Institut Teknologi Nasional Malang dan mendapat gelar Sarjana Teknik pada tahun 2006. Kemudian melanjutkan Program Magister pada Institut Teknologi Bandung dan menyandang gelar Magister Teknik pada tahun 2013. Pada tahun 2015 bergabung menjadi Dosen Universitas Yapis Papua. Tahun 2020 diamanahkan tanggung jawab sebagai Kepala Laboratorium Teknik Sipil di Universitas Yapis Papua.

BIODATA PENULIS



Christy Gery Buyang, S.T., M.T.
Dosen Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Pattimura

Penulis lahir di Ambon tanggal 19 Desember 1990. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Pattimura. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Sipil dan melanjutkan S2 pada jurusan Teknik Sipil pada Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis menekuni bidang manajemen konstruksi sewaktu menempuh Pendidikan. Serta aktif dalam kegiatan konstruksi di wilayah provinsi Maluku dan sekitarnya.

BIODATA PENULIS



Ir. Adiguna, ST, MSi.

Dosen Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas PGRI Palembang

Penulis lahir di Palembang tanggal 10 Agustus 1977. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas PGRI Palembang. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Sipil Universitas Sriwijaya dan melanjutkan S2 pada Jurusan Manajemen Lingkungan BKU Pengelolaan Sumberdaya alam dan lingkungan pada Universitas Sriwijaya. Penulis menekuni bidang pengembangan material konstruksi yang bersumber dari sumberdaya alam dan dampak kegiatan konstruksi terhadap lingkungan.

BIODATA PENULIS



Dora Melati Nurita Sandi, S.T.,M.T.

Dosen Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Jalan dan Jembatan , Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Banyuwangi

Penulis lahir di Situbondo tanggal 21 November 1990. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Jalan dan Jembatan, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Banyuwangi. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jember lulus pada tahun 2013. Penulis melanjutkan studi S2, di bidang keahlian Geoteknik, Jurusan Teknik Sipil, ITS dan lulus pada tahun 2016.

BIODATA PENULIS



Erny, S.T., M.T.

Dosen Program Studi Teknik Sipil
Institut Teknologi Dan Bisnis Indragiri

Penulis lahir di Tanjung Pinang tanggal 20 Oktober 1984. Penulis dosen tetap Program Studi Teknik Sipil di Institut Teknologi dan Bisnis Indragiri, menyelesaikan pendidikan sarjana (strata S1) Jurusan teknik sipil di Universitas Islam Riau dan magister (strata S2) jurusan Geoteknik jalan raya di Universitas Islam Riau. Saat ini penulis sebagai Kepala Laboratorium Teknik Sipil Institut Teknologi dan Bisnis Indragiri, Selain sebagai seorang pengajar penulis juga aktif bekerja sebagai konsultan perencanaan dan pengawas di CV. Ritra Consultant sebagai tenaga ahli madya teknik bangunan gedung. Email penulis erny201084@gmail.com.

BIODATA PENULIS



Ir. Bagus Eko Prasetyo, S.T., M.T.

Dosen Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Sembilanbelas November Kolaka

Ir. Bagus Eko Prasetyo, ST., MT Lahir di Ciamis, pada tanggal 30 Juli 1986. Menyelesaikan Sarjana (S1) Jurusan Teknik Sipil pada Universitas Jember tahun 2008, menamatkan Program Magister (S2) di Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan (FTSL) Institut Teknologi Bandung tahun 2015. Penulis mendapatkan gelar Insinyur-nya di Universitas Hasanuddin pada tahun 2023. Aktivitas saat ini adalah sebagai salah satu dosen tetap Universitas Sembilanbelas November Kolaka pada Fakultas Sains dan Teknologi Prodi S1 Teknik Sipil sejak 2018. Penulis juga adalah seorang Geotechnical Engineer pemegang sertifikat Ahli Madya (G1) pada Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia (HATTI). Penulis juga pernah terlibat dalam beberapa proyek desain dan penanganan teknis yang berhubungan dengan keahliannya sebagai Geotechnical Engineer pada PT. LAPI ITB tahun 2013 - 2017

BIODATA PENULIS



Dr. Ir. Komang Arya Utama, S.T., M.Eng.

Dosen Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik, Universitas Negeri Gorontalo

Lahir di Ujungpandang, tanggal 22 Desember 1978, penulis berprofesi sebagai pengajar tetap (dosen) pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Gorontalo. Penulis berhasil menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Sipil Universitas Hasanuddin pada tahun 2003, pendidikan S2 Jurusan Teknik Sipil Universitas Gadjah Mada pada tahun 2011 dan pendidikan S3 Teknik Sipil di Universitas Hasanuddin pada tahun 2023. Penulis juga telah menyelesaikan pendidikan Profesi Insinyur pada tahun 2020 di Universitas Hasanuddin. Penulis menekuni bidang Geoteknik dan Rekayasa Sungai. Selain aktif mengajar dan meneliti, penulis juga beberapa kali aktif terjun dalam implementasi pelaksanaan proyek infrastruktur seperti pekerjaan jembatan, bendung, dan pembangunan gedung sarana pendidikan.