

LEMBAR PERNYATAAN.....	iv
PERSEMBAHAN	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
INTISARI.....	xiii
ABSTRACT	xiv
I. BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Manfaat Penelitian.....	3
1.5. Batasan Permasalahan	3
II. BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1. Likuefaksi.....	4
2.2. Aspek Geologi.....	5
2.3. Muka Air Tanah	7
2.4. Peta Zona Kerentanan Likuefaksi	8
2.5. Aspek Kegempaan.....	9
2.6. Kondisi Kota Palu dan Manokwari terhadap potensi likuefaksi	10
2.7. Percepatan Gempa.....	10
2.8. Pemodelan <i>Finite Element Method</i> (FEM) dengan Plaxis 2D	10
2.9. Mitigasi Likuefaksi	12
2.9.1 Mitigasi <i>Stone column</i>	13
2.10. Keaslian Penelitian	15
III. BAB III LANDASAN TEORI	18
3.1. Penyelidikan Tanah	18
3.2. Parameter Tanah Dinamis	20
3.3. Faktor Penyebab Likuefaksi.....	21
3.4. Penentuan Kelas Situs Tanah	23

3.5.	Perhitungan <i>Peak Ground Acceleration</i> (PGA)	24
3.5.1	Metode Deterministic Seismic Hazard Analysis (DSHA)	24
3.5.1.1	Analisis PGA Deterministik dengan Fungsi Atenuasi Kanno (2006)	25
3.5.1.2	Analisis PGA Deterministik dengan Ground Motion Prediction Equations Next Generation Attenuation West 2 (GMPE NGA West-2) ..	26
3.5.2	Analisis PGA Probabilistik Berdasarkan Aplikasi LINI Bina Marga	27
3.5.3	Metode nonlinear dengan DEEPSOIL V7.....	28
3.6.	Analisis Potensi Likuefaksi.....	29
3.7.	<i>Liquefaction Potential Index</i> (LPI)	33
3.8.	Estimasi Probabilitas Kegagalan Tanah (PG)	34
3.9.	<i>Liquefaction Severity Index</i> (LSI)	34
3.10.	Penyebaran Lateral.....	35
3.11.	Penurunan Setelah Likuefaksi	35
3.12.	Pemodelan Plaxis 2D	36
3.13.	Pemodelan gempa	39
3.14.	Tekanan Pori Berlebih.....	39
3.15.	Perencanaan <i>Stone Columns</i>	41
3.16.	Hipotesis penelitian	44
IV.	BAB IV METODE PENELITIAN.....	45
4.1.	Gambaran Lokasi Penelitian	45
4.2.	Alat dan Bahan Penelitian	46
4.3.	Tahapan Penelitian	46
4.3.1	Studi literatur	48
4.3.2	Pengumpulan Data Penelitian.....	48
4.3.3	Melakukan tinjauan dan studi awal	51
4.3.4	Penentuan kelas situs	51
4.3.5	Penentuan nilai PGA	51
4.3.5.1	Metode Deterministik dengan Fungsi Atenuasi Kanno (2006).....	52
4.3.5.2	Metode Deterministik dengan Ground Motion Prediction Equations Next Generation Attenuation West 2 (GMPE NGA West-2)	52
4.3.5.3	Metode Probabilistik Berdasarkan Aplikasi LINI Bina Marga.....	53
4.3.5.4	Metode nonlinear dengan DEEPSOIL V7.....	54
4.3.6	Analisa faktor keamanan (FS)	58
4.3.7	Analisis LPI, PG, LSI, LDI dan <i>Settlement</i>	58

4.3.8	Analisa Plaxis dan mitigasi.....	59
4.3.9	Diskusi hasil	59
4.3.10	Rangkuman penelitian dan rencana lebih lanjut.....	59
V.	BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN	60
5.1.	Pendekatan Geologi.....	60
5.2.	Pendekatan Komposisi Butiran dan Indeks Plastisitas.....	61
5.3.	Pendekatan tinggi Muka Air Tanah (MAT)	62
5.4.	Penentuan Kelas Situs Tanah	63
5.5.	Penentuan Nilai <i>Peak Ground Acceleration</i> (PGA).....	63
5.5.1.	Metode DSHA	64
5.5.2.	Metode PSHA.....	66
5.5.3.	Metode Nonlinear	68
5.6.	Analisa Faktor Keamanan Potensi Likuefaksi	70
5.7.	<i>Liquefaction Potential Index</i> (LPI)	76
5.8.	Probabilitas Kegagalan Tanah (PG)	77
5.9.	<i>Liquefaction Severity Index</i> (LSI)	78
5.10.	Analisis <i>Post-Liquefaction</i>	79
5.10.1.	<i>Lateral Displacement Index</i> (LDI)	79
5.10.2.	Potensi penurunan tanah (<i>settlement</i>)	79
5.11.	Analisa Plaxis 2D	81
5.11.1	Analisis nonlinear pada tanah asli dengan beban gempa	82
5.11.2	Analisis FEM pada kemiringan tanah dengan Plaxis 2D	85
5.12.	Mitigasi Likuefaksi	87
5.12.1	Densifikasi <i>stone columns</i>	91
5.12.2	Reduksi tegangan geser	91
5.12.3	Faktor keamanan setelah <i>stone column</i> (FSsc).....	92
5.13.	Hasil perhitungan <i>post-liquefaction</i> pasca mitigasi	95
VI.	BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	99
6.1.	Kesimpulan.....	99
6.2.	Saran	99
VII.	DAFTAR PUSTAKA	101

Gambar 2. 1	Proses pelepasan dan pemadatan butiran saat terjadi beban siklik (Butterworth & Heinemann, 2018)	4
Gambar 2. 2	Peta Geologi sekitar Lokasi penelitian (Ratman dkk, 1989)	6
Gambar 2. 3	Peta Zona Kerentanan Likuefaksi di Lokasi penelitian (Badan Geologi Kementerian ESDM, 2019)	8
Gambar 2. 4	Kejadian gempa radius 150 km dari titik penelitian sejak 1900-2024 (USGS, Oktober 2024).....	9
Gambar 2. 5	Penentuan titik peninjauan pada model Plaxis 2D (Bakr dkk., 2019)	11
Gambar 2. 6	Perubahan tekanan air pori untuk gempa Imperial pada titik (A, B, dan C) (Bakr dkk., 2019)	12
Gambar 2. 7	Metode perbaikan tanah (Schaefer dkk., 2012)	13
Gambar 2. 8	Penerapan Stone Column pada berbagai proyek A) Tol Jogja-Bawen; B) Tol Manado-Bitung; C) Tol Serang Panimbang; D) Landaasan Pacu Bandara Cengkareng (Keller, 2024)	14
Gambar 2. 9	Simplifikasi desain penempatan stone column pola segitiga dan persegi (Abdelaziz dkk., 2024).....	15
Gambar 3. 1	Zona kerentanan likuefaksi berdasarkan ukuran butir (Tsuchida; 1970).....	22
Gambar 3. 2	Diagram zona kerentanan likuefaksi berdasarkan nilai PI dan LL	22
Gambar 3. 3	Input perhitungan nilai PGA dari kalkulator PEER - NGA West-2	27
Gambar 3. 4	Peta Percepatan Puncak Batuan Dasar (PGA) 5% dalam 50 tahun	28
Gambar 3. 5	Hubungan antara regangan volumetrik, regangan maksimum, dan kepadatan relatif (Idriss & Boulanger, 2008 setelah Ishihara & Yoshimine, 1992)	36
Gambar 3. 6	Hubungan relative density awal, fines content dan permeabilitas	42
Gambar 3. 7	Hubungan N _{160cs} awal dengan (N ₁) _{60cs} saat stone column diterapkan berdasarkan permeabilitas a) $k > 10^{-5}$ m/s; b) $k = 10^{-6}$ m/s; c) $k = 10^{-7}$ m/s; d) $k = 10^{-8}$ m/s (Shenthan dkk, 2006)	42
Gambar 4. 1	Lokasi Penelitian (modifikasi Peta Topo ESRI).....	45
Gambar 4. 2	Gambaran rencana Konstruksi	46
Gambar 4. 3	Diagram alir penelitian	48
Gambar 4. 4	Lokasi Titik Bor (modifikasi Google earth)	49
Gambar 4. 5	Input perhitungan nilai PGA dari kalkulator PEER - NGA West-2	53
Gambar 4. 6	Tampilan Website Lini Bina Marga	54
Gambar 4. 7	Ground motion yang digunakan untuk analisa nonlinear	55
Gambar 4. 8	Menentukan tipe analisis.....	56
Gambar 4. 9	Menyusun profil tanah	56
Gambar 4. 10	Memilih gempa yang sesuai dengan lokasi penelitian.....	57
Gambar 4. 11	Menentukan analysis control definition dan menjalankan analisis.....	57
Gambar 4. 12	Hasil analisa PGA nonlinear dengan DEEPSOIL V7.....	58
Gambar 5. 1	Peta geologi regional lembar Manokwari (Ratman dkk, 1989).....	60

Gambar 5. 2	Gambaran Struktur geologi mayor aktif yang berkembang dan aktifitas kegempaan 10 tahun terakhir (Sukahar (1990) dan USGS, Oktober 2024)	61
Gambar 5. 3	Distribusi ukuran butir berdasarkan kurva Tsuchida (1970)	61
Gambar 5. 4	Nilai PI dengan w_c/LL , litologi masih terdapat kemungkinan untuk mengalami likuefaksi berdasarkan Bray & Sancio, 2006	62
Gambar 5. 5	Kondisi ketinggian MAT pada seitan titik Bor	62
Gambar 5. 6	Hasil perhitungan nilai PGA dari kalkulator PEER - NGA West-2	64
Gambar 5. 7	Gempa sekitar lokasi penelitian untuk perhitungan PGA dengan atenuasi Kanno; 2006 (Google earth; USGS)	66
Gambar 5. 8	Peta (PGA) 10% dalam 50 tahun (LINI Bina Marga)	67
Gambar 5. 9	Lapisan yang berpotensi terlikuefaksi	71
Gambar 5. 10	Nilai faktor keamanan pada titik BH-01 sampai BH-06	71
Gambar 5. 11	Nilai faktor keamanan pada titik BH-07 sampai BH-13	72
Gambar 5. 12	Nilai faktor keamanan pada titik BH-14 sampai BH-20	72
Gambar 5. 13	Kenampakan penampang lapisan terlikuefaksi BH-01 sampai BH-06	73
Gambar 5. 14	Kenampakan penampang lapisan terlikuefaksi BH-07 sampai BH-13	74
Gambar 5. 15	Kenampakan penampang lapisan terlikuefaksi BH-14 sampai BH-20	75
Gambar 5. 16	Nilai LPI pada masing-masing Titik Bor	76
Gambar 5. 17	Sebaran Nilai LPI di Lokasi penelitian	76
Gambar 5. 18	Nilai PG pada masing-masing Titik Bor	77
Gambar 5. 19	Sebaran Nilai PG di Lokasi penelitian	77
Gambar 5. 20	Nilai LSI pada masing-masing Titik Bor	78
Gambar 5. 21	Sebaran Nilai LSI di Lokasi penelitian	78
Gambar 5. 22	Nilai Settlement awal pada masing-masing Titik Bor	80
Gambar 5. 23	Sebaran Nilai (Settlement) awal di Lokasi penelitian	80
Gambar 5. 24	Keterbatasan Software Plaxis 2D yang hanya mampu menghitung pada geometri sederhana	82
Gambar 5. 25	Karakteristik tanah pada BH – 09 dan BH-13	83
Gambar 5. 26	Maximum excess pore pressure ratio vertical effective stress ($ru, \sigma'v_{max}$) pada akhir fase gempa di A) BH-09; B) BH-13	84
Gambar 5. 27	Excess pore water pressure (p_{excess}) pada akhir gempa di BH-09	84
Gambar 5. 28	Faktor Keamanan pada Kondisi tanah awal dengan beban statis	86
Gambar 5. 29	Faktor Keamanan pada Kondisi tanah awal dengan beban pseudostatis	86
Gambar 5. 30	Kenampakan dengan input kekuatan tanah kondisi tekanan pori berlebih	87
Gambar 5. 31	Kegagalan pada saat tahap inisiasi permodelan	87
Gambar 5. 32	Konfigurasi mitigasi dengan stone column (A) tanpa PVD; (B) dengan PVD	90
Gambar 5. 33	Grafik penurunan nilai settlement pasca implementasi stone column	96
Gambar 5. 34	Peta sebaran nilai settlement pasca implementasi stone column	98
Gambar 5. 35	Peta sebaran nilai settlement pasca implementasi stone column + PVD	98

Tabel 2. 1	Penelitian terdahulu	15
Tabel 3. 1	Hubungan N dengan (Dr) untuk tanah pasir (Terzaghi dkk; 1996).....	18
Tabel 3. 2	Hubungan N dengan konsistensi untuk lempung jenuh (Terzaghi dkk; 1996)	18
Tabel 3. 3	Korelasi dalam muka air tanah dengan kerentanan likuefaksi	19
Tabel 3. 4	Berat jenis tanah (Das, Braja M; 2013)	19
Tabel 3. 5	Pengelompokan nilai plasticity index (Darwis, 2018).....	20
Tabel 3. 6	Parameter regresi persamaan untuk Vs (Brandenberg , 2010)	21
Tabel 3. 7	Klasifikasi Kelas Situs (SNI 2833, 2016)	23
Tabel 3. 8	Nilai Koefisien Situs FPGA (SNI 2833, 2016).....	24
Tabel 3. 9	Kesesuaian Input Parameter pada Analisa DSHA	25
Tabel 3. 10	Nilai koefisien regresi untuk fungsi atenuasi (Kanno; 2006)	26
Tabel 3. 11	Nilai Faktor Koreksi (Boulanger & Idriss; 2008).....	31
Tabel 3. 12	Kategori potensi likuefaksi berdasarkan LPI (Iwasaki dkk; 1984)	33
Tabel 3. 13	Probabilitas likuefaksi menyebabkan kegagalan tanah (Li dkk; 2006)	34
Tabel 3. 14	Klasifikasi Liquefaction Severity Index (Sonmez & Gokceoglu; 2005)	34
Tabel 3. 15	Hubungan tingkat kerusakan tanah dan nilai penurunan	36
Tabel 3. 16	Rentang nilai kohesi tanah (c) pada intermediate soils (Kumar dkk; 2016)..	37
Tabel 3. 17	Rentang nilai kohesi tanah (c) pada tanah kohesif (Kumar dkk; 2016).....	37
Tabel 3. 18	Rentang nilai sudut geser tanah (ϕ) (Kumar dkk; 2016)	37
Tabel 3. 19	Rentang nilai poisson ratio (ν) (Kumar dkk; 2016)	37
Tabel 3. 20	Parameter yang digunakan untuk UBC3D-PLM (Bentley, 2022).....	39
Tabel 4. 1	Data lokasi borehole di daerah penelitian	50
Tabel 4. 2	Data input sumber gempa	52
Tabel 4. 3	Data masukan pada aplikasi kalkulator PEER NGA West-2	53
Tabel 5. 1	Kelas Situs Tanah di Lokasi Penelitian	63
Tabel 5. 2	Hasil perhitungan nilai PGA terkoreksi dari PEER - NGA West-2	65
Tabel 5. 3	Hasil perhitungan nilai PGAM Atenuasi Kanno (2006).....	66
Tabel 5. 4	Hasil perhitungan nilai PGA terkoreksi dengan LINI Bina Marga	67
Tabel 5. 5	Parameter profil tanah untuk analisa nonlinear DEEPSOIL V7.....	68
Tabel 5. 6	Nilai PGA hasil analisa nonlinear.....	69
Tabel 5. 7	Hasil perbandingan nilai PGAM.....	70
Tabel 5. 8	Rekapitulasi Nilai LDI dan Settlement (Si) pada masing-masing Titik Bor .	79
Tabel 5. 9	Contoh Tabel input model tanah BH-09 pada Plaxis 2D.....	83
Tabel 5. 10	Input model tanah pada Plaxis 2D saat mengalami kenaikan tekanan pori...	85
Tabel 5. 11	Hasil analisis peningkatan FS pasca implementasi mitigasi pada BH-05	93
Tabel 5. 12	Hasil analisis peningkatan FS pasca implementasi mitigasi pada BH-15	94
Tabel 5. 13	Penurunan nilai settlement pasca implementasi stone column	97