

14/SKRIPSI/S.Tr-TPJJ/2026

SKRIPSI

**ANALISIS POTENSI LIKUEFAKSI SECARA ANALITIS
DAN NUMERIS DENGAN VARIASI
MAGNITUDO GEMPA**

(Studi Kasus: Proyek Jembatan Steel Box Girder Simpang Susun Bitung)



**Disusun untuk melengkapi salah satu syarat kelulusan Program D-IV
Politeknik Negeri Jakarta**

Muhammad Bayu Nugroho

NIM 2201411025

Pembimbing Jurusan :

Putera Agung Maha Agung, Ph.D.

NIP. 196606021990031002

**PROGRAM STUDI
D-IV TEKNIK PERANCANGAN JALAN DAN JEMBATAN
JURUSAN TEKNIK SIPIL
POLITEKNIK NEGERI JAKARTA**

2026



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

HALAMAN PERSETUJUAN

Skripsi berjudul :

ANALISIS POTENSI LIKUEFAKSI SECARA ANALITIS DAN NUMERIS DENGAN VARIASI MAGNITUDO GEMPA

(Studi Kasus: Proyek Jembatan Steel Box Girder Simpang Susun Bitung)
yang disusun oleh Muhammad Bayu Nugroho (2201411025) yang telah disetujui
dosen pembimbing untuk dipertahankan dalam
Sidang Skripsi

Pembimbing

Putera Agung Maha Agung, Ph.D.

NIP 196606021990031002



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi berjudul :
**ANALISIS POTENSI LIKUEFAKSI SECARA ANALITIS
DAN NUMERIS DENGAN VARIASI
MAGNITUDO GEMPA**

(Studi Kasus: Proyek Jembatan Steel Box Girder Simpang Susun Bitung)
yang disusun oleh Muhammad Bayu Nugroho (2201411025) telah dipertahankan
dalam Sidang Skripsi di depan Tim Penguji pada hari Rabu tanggal 3 Juni 2026.

	Nama Tim Penguji	Tanda Tangan
Ketua	Sutikno, S.T., M.T. NIP 196201031985031004	
Anggota	Andikanoza Pradiptiya, S.T., M.Eng. NIP 198212312012121003	
Anggota	Sony Pramusandi, S.T., M.Eng., Dr.Eng. NIP 197509151998021001	

Mengetahui

**Ketua Jurusan Teknik Sipil
Politeknik Negeri Jakarta**



Istifatu, S.T., M.T.

NIP 196605181990102001

- Hak Cipta :**
- Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
 - Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi berjudul :

ANALISIS POTENSI LIKUEFAKSI SECARA ANALITIS DAN NUMERIS DENGAN VARIASI MAGNITUDO GEMPA

(Studi Kasus: Proyek Jembatan Steel Box Girder Simpang Susun Bitung)
yang disusun oleh Muhammad Bayu Nugroho (2201411025)

Dengan ini saya menyatakan:

1. Skripsi ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar Sarjana Terapan, baik yang ada di Politeknik Negeri Jakarta maupun di Perguruan Tinggi lainnya.
2. Skripsi yang dibuat ini adalah serangkaian gagasan, rumusan, dan penelitian yang telah saya buat sendiri, tanpa bantuan pihak lain terkecuali atas arahan tim Pembimbing dan Penguji.
3. Pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya tanpa ada paksaan dari pihak manapun.

Depok, 18 Juni 2026
Yang menyatakan,

Muhammad Bayu Nugroho

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan naskah Skripsi dengan baik yang berjudul "ANALISIS POTENSI LIKUEFAKSI SECARA ANALITIS DAN NUMERIS DENGAN VARIASI MAGNITUDO GEMPA (STUDI KASUS PROYEK JEMBATAN STEEL BOX GIRDER SIMPANG SUSUN BITUNG)" tepat pada waktunya.

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh tingginya keingintahuan mengenai kerentanan seismik di wilayah Tangerang-Banten serta pentingnya evaluasi potensi likuefaksi pada infrastruktur transportasi vital sebagai upaya mitigasi risiko geoteknik. Dalam penyelesaian skripsi ini, penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. ALLAH SWT., atas segala kuasa, rahmat, dan karunia-Nya.
2. Kedua orang tua dan keluarga yang senantiasa selalu memberikan doa, dukungan, motivasi selama penyusunan penelitian ini.
3. Bapak Putera Agung Maha Agung, Ph.D., selaku dosen pembimbing yang senantiasa memberikan bimbingan, arahan, dan masukan dari awal hingga akhir penyusunan skripsi.
4. Bapak Sutikno, S.T., M.T., Bapak Andikanoza Pradiptiya, S.T., M.Eng., dan Bapak Sonny Pramusandi, S.T., M.Eng., Dr.Eng., selaku tim dosen penguji.
5. Ibu Istiatun, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Jakarta.
6. Rekan-rekan seperjuangan yang telah memberikan dukungan dan motivasi selama penyusunan skripsi.
7. Diri pribadi yang telah bertahan dan berjuang hingga titik ini.

Penulis menyadari bahwa penulisan ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi perbaikan di masa mendatang. Penulis berharap penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi para pembaca ataupun pihak-pihak yang membutuhkannya.

Muhammad Bayu Nugroho

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkannya dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR ISI

HALAMAN PERSETUJUAN.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iv
KATA PENGANTAR.....	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Gempa Bumi	7
2.1.1 Percepatan Tanah Maksimum (PGA).....	7
2.1.2 Percepatan Permukaan Tanah Maksimum (α_{max}).....	8
2.1.3 Momen Magnitudo (M_w).....	8
2.1.4 <i>Time History Analysis</i>	9
2.2 Tanah.....	10
2.3 Likuefaksi.....	12
2.4 Parameter Identifikasi Potensi Likuefaksi	13
2.4.1 Tegangan Tanah.....	13
2.4.2 Koreksi Nilai N-SPT, $(N_1)_{60}$	15
2.4.3 <i>Cyclic Stress Ratio (CSR)</i>	16
2.4.4 <i>Cyclic Resistance Ration (CRR)</i>	17
2.4.5 <i>Factor of Safety (FS)</i>	20
2.5 <i>Liquefaction Potential Index (LPI)</i>	20
2.6 <i>Liquefaction Severity Index (LSI)</i>	21



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritis atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2.7	<i>Post-Liquefaction Settlement</i>	22
2.8	Analisa Likuefaksi Secara Numeris	23
2.9	Penelitian Terdahulu.....	24
2.10	Keterbaruan Penelitian	26
BAB III METODOLOGI.....		28
3.1	Lokasi Penelitian.....	28
3.2	Diagram Alir Metode Penelitian	29
3.3	Alat Penelitian.....	30
3.4	Metode Pengumpulan Data	30
3.5	Metode Analisis Data	31
3.6	Jadwal Penelitian.....	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		32
4.1	Data Perencanaan	32
4.1.1	Profil dan Data Tanah.....	32
4.1.2	Parameter Gempa Rencana dan Kalibrasi Rekaman Gempa	33
4.2	Analisis Potensi Likuefaksi.....	34
4.2.1	Perhitungan Tegangan Tanah	34
4.2.2	Koreksi Nilai N-SPT	35
4.2.3	Perhitungan Tegangan Siklik (CSR)	36
4.2.4	Perhitungan Tahanan Siklik (CRR).....	37
4.2.5	Hasil Likuefaksi Secara Analitis	39
4.2.6	Komparatif Akhir Antar Parameter dan Antar Borehole.....	43
4.3	Analisis Potensi Likuefaksi Secara Numeris	43
4.3.1	Parameter Material Tanah untuk Analisis Numeris.....	44
4.3.2	Pemodelan dan Setup Analisis	44
4.3.3	Hasil Analisis Likuefaksi Secara Numeris.....	45
4.3.4	Hasil Analisis dan Rekapitulasi Antaravariasi Magnitudo.....	48
4.4	Perbandingan Hasil Analitis dan Numeris	49
BAB V KESIMPULAN		51
DAFTAR PUSTAKA		53
LAMPIRAN.....		56



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Nilai Korelasi Parameter Tanah dengan N-SPT untuk Jenis Tanah Pasir (Sand) dan Lempung (Clays)	14
Tabel 2. 2 Faktor Koreksi Uji SPT (Badan Standardisasi Nasional, 2008)	15
Tabel 2. 3 Liquefaction Potential Index	21
Tabel 2. 4 Klasifikasi Liquefaction Severity Index.....	22
Tabel 2. 5 Hubungan antara kerusakan dan estimasi penurunan	23
Tabel 2. 6 Parameter UBCSand	24
Tabel 2. 7 Penelitian Terdahulu.....	24
Tabel 3. 1 Alat Penelitian	30
Tabel 4. 1 Kedalaman Muka Air Tanah (GWL).....	32
Tabel 4. 2 Kelas Situs Tiap Titik Bor	33
Tabel 4. 3 Tegangan Tanah Borehole 12 (MAT -2 m).....	35
Tabel 4. 4 Koreksi N-SPT Borehole 12 (MAT -2 m).....	36
Tabel 4. 5 Cyclic Stress Ratio Borehole 12 (MAT -2 m).....	37
Tabel 4. 6 CRR Borehole 12 untuk Mw 6 (MAT -2 m)	37
Tabel 4. 7 CRR Borehole 12 untuk Mw 7 (MAT -2 m).....	38
Tabel 4. 8 CRR Borehole 12 untuk Mw 8 (MAT -2 m).....	38
Tabel 4. 9 Rekapitulasi CRRMw Borehole 12 (MAT -2m)	38
Tabel 4. 10 Hasil Perhitungan Faktor Keamanan (FS) Borehole 12 (MAT -2 m)	39
Tabel 4. 11 Liquefaction Potential Index (LPI) Tiap Borehole.....	40
Tabel 4. 12 Liquefaction Severity Index (LSI) Tiap Borehole.....	41
Tabel 4. 13 Post-Liquefaction Settlement Tiap Borehole	42
Tabel 4. 14 Parameter material UBC-SAND.....	44
Tabel 4. 15 Ringkasan Distribusi Pore Pressure Ratio hasil analisis numeris	47
Tabel 4. 16 Penurunan Pasca-Likuefaksi	48
Tabel 4. 17 Perbandingan Settlement Mw 8,0 Hasil Analitis & Numeris.....	49

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Puskim Desain Spektra Indonesia	7
Gambar 2. 2 Klasifikasi Situs dan Koefisien Situs (FPGA)	8
Gambar 2. 3 Situs Database Ground Motion	10
Gambar 2. 4 Software Seismomatch Spectral Matching	10
Gambar 2. 5 Fase Tanah	11
Gambar 2. 6 Ilustrasi Likuefaksi	13
Gambar 3. 1 Titik Borehole Sumber : Google Earth, 2025.....	28
Gambar 3. 2 Lokasi Penelitian	28
Gambar 3. 3 Diagram Alur Penelitian Sumber : Olahan Penulis, 2026.....	29
Gambar 3. 4 Jadwal Penelitian.....	31
Gambar 4. 1 Stratigrafi Nilai N-SPT BH-10 s/d BH-14	32
Gambar 4. 2 Matching Spektrum Respon Gempa Parkfield 2004.....	33
Gambar 4. 3 Matching Spektrum Respon Gempa Landers 1992.....	34
Gambar 4. 4 Matching Spektrum Respon Gempa Tokachi 2003.....	34
Gambar 4. 5 Factor of Safety per kedalaman untuk pervariasi.....	40
Gambar 4. 6 Liquefaction Potential Index (LPI) Tiap Borehole.....	41
Gambar 4. 7 Liquefaction Severity Index (LSI) Tiap Borehole.....	42
Gambar 4. 8 Post-Liquefaction Settlement Tiap Borehole	43
Gambar 4. 9 Geometri Model FEM dan Kondisi Batas.....	45
Gambar 4. 10 Input Rekaman Gempa.....	45
Gambar 4. 11 Distribusi Pore Pressure Ratio (PPR) hasil simulasi gempa Mw 6,0..	46
Gambar 4. 12 Distribusi Pore Pressure Ratio (PPR) hasil simulasi gempa Mw 7,0..	46
Gambar 4. 13 Distribusi Pore Pressure Ratio (PPR) hasil simulasi gempa Mw 8,0..	47

POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun

tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Lembar Pernyataan Calon Pembimbing	57
Lampiran 2 Lembar Pengesahan	58
Lampiran 3 Lisensi Software yang Dipakai	59
Lampiran 4 Hasil Perhitungan Tegangan Tanah	63
Lampiran 5 Hasil Koreksi N-SPT	65
Lampiran 6 Hasil Perhitungan CSR	66
Lampiran 7 Hasil Perhitungan CRR	68
Lampiran 8 Factor of Safety	72
Lampiran 9 Sebelum dan Sesudah Matching Spektrum Respon	74





BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara yang secara geografis terletak di zona perpotongan tiga lempeng tektonik utama dunia, yaitu Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik, yang menjadikannya sebagai wilayah dengan aktivitas seismisitas yang sangat tinggi dan memiliki potensi melepaskan energi secara tiba-tiba serta dapat menimbulkan kerusakan besar pada infrastruktur (Prasetio et al., 2023). Besaran kerusakan struktur sangat bergantung pada parameter utama gempa bumi, seperti magnitudo, kedalaman, dan kondisi tanah wilayah setempat (BMKG, 2021a). Ancaman seismik ini juga relevan pada Provinsi Banten, khususnya Tangerang, yang memiliki kerentanan terhadap gempa dari aktivitas sesar aktif dangkal maupun zona *megathrust* (Fazriyanti et al., 2020). Secara geologis, formasi tanah pada wilayah tersebut didominasi oleh endapan aluvial berupa lapisan lempung dan pasir yang relatif lepas serta jenuh air, sehingga sangat rentan terhadap kegagalan geoteknik saat terjadi beban seismik.

Tantangan geoteknik utama pada lapisan pasir lepas jenuh air akibat beban siklik gempa adalah fenomena likuefaksi, yaitu hilangnya kekuatan geser tanah secara ekstrem yang dapat mengubah sifat tanah menjadi seperti bubur (Idriss & Boulanger, 2008). Getaran gempa memicu peningkatan tekanan air pori secara drastis dalam kondisi pembebanan tanpa drainase, sehingga tegangan efektif antar butiran tanah turun mendekati nol (Kramer, 1996). Akibatnya, tanah kehilangan daya dukung secara signifikan yang berpotensi menyebabkan fondasi bergeser, amblas, dan penurunan permukaan (*settlement*) yang tidak merata.

Kondisi ini menjadi ancaman serius bagi infrastruktur transportasi vital seperti Proyek Modifikasi Simpang Susun Tol Bitung, yang memiliki beban struktur signifikan dan juga berada di atas jalur tol aktif. Apabila lapisan tanah pendukung di area abutmen atau pilar jembatan mengalami likuefaksi saat terjadi gempa, hilangnya daya dukung tanah dapat memicu perpindahan struktur bawah yang fatal dan merusak peletakan (*bearing*), yang pada akhirnya mengancam stabilitas struktur atas jembatan dan kendaraan yang melintas di bawahnya

Untuk mengevaluasi potensi ancaman tersebut, langkah awal umumnya dilakukan dengan mengkaji potensi likuefaksi secara analitis berdasarkan data uji

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

penetrasi standar (N-SPT). Perhitungan empiris dilakukan untuk mendapatkan nilai *Factor of Safety* (FS) (Boulanger et al., 2014), yang selanjutnya digunakan untuk menghitung *Liquefaction Potential Index* (LPI) (Iwasaki et al., 1981) guna mengevaluasi probabilitas likuefaksi di permukaan. Analisis juga menggunakan *Liquefaction Severity Index* (LSI) (Sonmez & Gokceoglu, 2005) untuk mengklasifikasikan risiko kerusakan dengan lebih rinci pada infrastruktur kritis seperti jembatan. Selain itu, estimasi penurunan pasca-likuefaksi (*post-liquefaction settlement*) dihitung untuk memprediksi regangan volumetrik selama fase rekonsolidasi pasca-gempa terjadi (Ishihara, 1996; Lshiharad & Yoshimine, 1992; Muktaf et al., 2025).

Meskipun metode analitis cukup baik untuk asesmen awal, pendekatan ini memiliki keterbatasan karena belum sepenuhnya mampu merepresentasikan perilaku dinamis tanah secara spasial dan interaksi rambatan secara *real-time*. Sebagai bentuk keterbaruan dari analisis empiris satu dimensi, penelitian ini mengintegrasikan pemodelan numeris *Finite Element Method* (FEM) menggunakan perangkat lunak *Midas GTS NX*. Simulasi dilakukan dengan menerapkan model tanah *UBCSAND* untuk memprediksi perilaku likuefaksi tanah pasir secara komprehensif akibat beban dinamis gempa (Tuna & Altun, 2015). Analisis numeris ini mengevaluasi *Pore Pressure Ratio* (PPR), di mana nilai mendekati angka satu mengindikasikan terjadinya likuefaksi, serta mengestimasi deformasi vertikal pasca-gempa (Sun et al., 2019).

Selain itu, wilayah Tangerang, Banten terancam dua sumber gempa dengan karakteristik yang berbeda, Sesar Baribis dan sesar aktif dangkal sejenis yang menghasilkan gempa Mw 6,0 dan 7,0 dengan durasi pendek hingga menengah, dan zona Meghatrust Selatan Jawa yang berpotensi melepaskan Mw 7,5 – 9,0 dengan durasi jauh lebih panjang (Fazriyanti et al., 2020; Pratama et al., 2021). Pendekatan berbasis periode ulang tunggal menghasilkan satu nilai PGA sebagai representasi bahaya seismik, namun tidak memisahkan kontribusi masing-masing sumber terhadap risiko geoteknik. Ini relevan dengan durasi guncangan yang berbeda antara kedua sumber yang akan langsung menentukan besaran akumulasi tekanan air pori pada lapisan pasir jenuh.

Keterkaitan magnitudo dan respons likuefaksi terformulasikan dalam metode *Boulanger-Idriss* (2014) melalui *Magnitude Scaling Factor* (MSF) sebagai modifikator CRR. MSF ini memiliki fungsi langsung terhadap magnitudo, Mw lebih tinggi menghasilkan jumlah siklus pembebanan ekuivalen lebih besar, MSF lebih kecil,

CRR_{MW} lebih rendah, dan FS lebih kritis (Youd et al., 2001). Variasi Magnitudo dalam penelitian ini bukan pilihan eksplorasi, melainkan konsekuensi dari formulasi *Boulanger-Idriss* itu sendiri. Tanpa variasi Mw, sensitivitas CRR dan FS terhadap durasi guncangan dari masing-masing sumber gempa tidak dapat dikuantifikasi.

Pemilihan tiga variasi magnitudo dalam penelitian ini merupakan konsekuensi teknis dari formulasi Boulanger-Idriss (2014), bukan pilihan eksplorasi. Metode tersebut mengintegrasikan dua parameter yang sensitif terhadap Mw, *Magnitude Scaling Factor* (MSF) yang memodifikasi CRR terhadap magnitudo rujukan Mw 7,5 di mana Mw lebih tinggi menghasilkan MSF lebih kecil, CRR_{MW} lebih rendah, dan FS lebih kritis, serta koefisien reduksi tegangan r_d yang merepresentasikan atenuasi guncangan terhadap kedalaman berdasarkan karakteristik rekaman gempa (Youd et al., 2001). Tanpa variasi Mw, sensitivitas FS, LPI, dan LSI terhadap perbedaan durasi dan siklus pembebanan dari kedua sumber gempa dominan di atas tidak dapat dikuantifikasi. Oleh karena itu, Mw 6,0 dan Mw 7,0 ditetapkan merepresentasikan *Design Basis Earthquake* (DBE, periode ulang 500 tahun) yang mencerminkan ancaman sesar aktif dangkal, sedangkan Mw 8,0 merepresentasikan *Maximum Considered Earthquake* (MCE, periode ulang 2.500 tahun) yang mencerminkan variasi megathrust dengan durasi dan potensi kerusakan jauh lebih besar sesuai hirarki level ancaman seismik. Ketiga variasi ini sekaligus memenuhi persyaratan minimal penggunaan tiga rekaman *ground motion* independen untuk analisis *time history* yang representatif (SNI 2833, 2016).

Nilai percepatan tanah maksimum (PGA) yang diperoleh dari situs desain spektra Indonesia Puskim PU digunakan sebagai parameter tetap di seluruh variasi, sehingga variasi magnitudo dalam penelitian ini tidak menggantikan pendekatan berbasis periode ulang, melainkan bersifat komplementer. Tujuannya adalah mengungkapkan sensitivitas respons likuefaksi yang tercermin pada nilai FS, LPI, LSI, dan penurunan pasca-likuefaksi terhadap perbedaan magnitudo gempa dari kedua sumber gempa dominan di wilayah Tangerang, Banten. Integrasi pendekatan analitis dan numeris melalui ketiga variasi magnitudo ini diharapkan menghasilkan evaluasi risiko geoteknik yang lebih konservatif dan komprehensif dibandingkan evaluasi berbasis satu variasi desain tunggal, serta dapat berkontribusi pada pengembangan literatur geoteknik kegempaan di Indonesia.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta





Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, permasalahan dikaji dalam penelitian ini adalah, sebagai berikut :

1. Bagaimana potensi likuefaksi dan tingkat keparahan berdasarkan *Factor of Safety* (FS), *Liquefaction Potential Index* (LPI) dan *Liquefaction Severity Index* (LSI) dengan adanya variasi magnitudo gempa.
2. Bagaimana estimasi penurunan tanah pasca-likuefaksi dan tingkat kerusakannya berdasarkan perhitungan analitis.
3. Bagaimana potensi likuefaksi berdasarkan *Pore Pressure Ratio* (PPR) dan estimasi deformasi vertikal menggunakan pemodelan numerik dengan *software Midas GTS NX* pada berbagai variasi magnitudo gempa.

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini dapat berjalan secara sistematis maka permasalahan yang ada perlu dibatasi dengan batasan-batasan sebagai berikut :

1. Penelitian terbatas pada lokasi konstruksi jembatan *Steel Box Girder* di Proyek Pembangunan Modifikasi Simpang Susun Tol Bitung di Tangerang-Banten.
2. Data tanah yang digunakan adalah data sekunder berupa data laporan penyelidikan tanah (SPT).
3. Nilai percepatan tanah maksimum (PGA) yang digunakan adalah sebesar 0.4011g diperoleh dari situs *website* Desain Spektra Indonesia Puskim PU.
4. Beban gempa yang dianalisis dibatasi pada variasi magnitudo gempa (M_w 6, 7, dan 8) untuk merepresentasikan rentang ancaman seismik.
5. Estimasi deformasi vertikal pasca likuefaksi didapatkan dari nilai regangan volumetrik baik secara analitis dan numeris.
6. Analisis numeris menggunakan *software Midas GTS NX* berlisensi resmi untuk mengevaluasi tekanan air pori dan estimasi penurunan pasca-likuefaksi.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penulisan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis potensi dan tingkat keparahan likuefaksi berdasarkan nilai *Factor of Safety* (FS), *Liquefaction Potential Index* (LPI), dan *Liquefaction Severity Index* (LSI) akibat pengaruh variasi magnitudo gempa.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2. Menghitung besaran estimasi penurunan tanah pasca-likuefaksi secara analitis.
3. Mengevaluasi potensi likuefaksi berdasarkan rasio tekanan air pori (*Pore Pressure Ratio/PPR*) dan mengestimasi deformasi vertikal pasca-gempa melalui simulasi numerik menggunakan *Midas GTS NX* dengan variasi magnitudo gempa.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Berisi latar belakang penelitian, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, target luaran, serta sistematika penulisan skripsi.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Membahas dasar teori dan kajian pustaka yang berkaitan dengan penelitian, meliputi konsep gempa bumi, mekanisme terjadinya likuefaksi, parameter geoteknik berdasarkan data uji N-SPT, perhitungan analitis (metode empiris untuk FS, LPI, LSI, dan estimasi penurunan pasca-likuefaksi), serta konsep dasar analisis numeris menggunakan perangkat lunak *Midas GTS NX*.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Berisi uraian mengenai metode penelitian yang digunakan, mencakup lokasi penelitian, sumber data, teknik pengumpulan data, model penelitian, rancangan penelitian, peubah yang diamati, serta diagram alir tahapan pengolahan dan analisis data secara analitis maupun numeris.

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Berisi penyajian data hasil uji lapangan (N-SPT) di lokasi penelitian. Pembahasan meliputi hasil perhitungan secara analitis (*Factor of Safety, Liquefaction Potential Index, Liquefaction Severity Index*, dan penurunan tanah) pada berbagai variasi magnitudo gempa, serta hasil analisis numeris (*Pore Pressure Ratio* dan deformasi vertikal) menggunakan perangkat lunak *Midas GTS NX*.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi kesimpulan dari hasil penelitian untuk menjawab rumusan masalah mengenai potensi likuefaksi di area Simpang Susun Tol Bitung, Tangerang, serta saran-saran yang relevan untuk penelitian selanjutnya.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB V KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis potensi likuefaksi secara analitis dan numeris dengan variasi magnitudo gempa, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Evaluasi potensi likuefaksi berdasarkan nilai FS, LPI, dan LSI menunjukkan bahwa BH-10, BH-13, dan BH-14 tetap berkategori Rendah pada ketiga variasi dan BH-11 dan BH-12 secara konsisten berkategori Tinggi pada seluruh variasi magnitudo, mengindikasikan kerentanan di kedua lokasi pilar tersebut terlepas dari level beban gempa yang diterapkan. Secara umum, peningkatan magnitudo gempa menyebabkan peningkatan potensi likuefaksi dan tingkat keparahan dampaknya pada lokasi penelitian.
2. Berdasarkan estimasi penurunan pasca-likuefaksi secara analitis, BH-10 dan BH-13 cenderung mengalami tingkat kerusakan ringan, sedangkan Borehole BH-14 menunjukkan tingkat kerusakan sedang. BH-11 merupakan titik dengan tingkat kerentanan tertinggi karena menunjukkan kategori kerusakan parah pada seluruh variasi magnitudo gempa. Sementara itu, BH-12 mengalami peningkatan tingkat kerusakan seiring bertambahnya magnitudo gempa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa variasi magnitudo gempa berpengaruh terhadap besarnya deformasi vertikal pasca-likuefaksi.
3. Analisis numeris menunjukkan luas zona likuefaksi penuh meningkat secara progresif pada setiap kenaikan variasi magnitudo. BH-11 dan BH-12 tetap teridentifikasi sebagai lokasi yang paling rentan terhadap terjadinya likuefaksi dan penurunan pasca-likuefaksi, sedangkan BH-10 dan BH-14 menunjukkan peningkatan deformasi hingga kategori kerusakan sedang pada magnitudo yang lebih besar dan BH-13 menunjukkan respons yang relatif lebih stabil pada seluruh skenario gempa. Secara keseluruhan, peningkatan magnitudo gempa menyebabkan perluasan zona likuefaksi dan peningkatan penurunan pasca-likuefaksi, serta mengonfirmasi hasil analisis analitis dalam mengidentifikasi BH-11 dan BH-12 sebagai lokasi paling rentan terhadap likuefaksi pada area penelitian.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritis atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

5.2 Saran

Berdasarkan hasil analisis potensi likuefaksi secara analitis dan numeris dengan variasi magnitudo gempa, disampaikan saran sebagai berikut:

1. Penelitian selanjutnya disarankan menambahkan pemodelan 3D dan analisis *liquefaction-induced lateral spreading* untuk menangkap perilaku spasial yang tidak tertangkap pada model 2D.
2. Perlu dilakukan uji laboratorium pada setiap lapisan sampel tanah lokasi untuk kalibrasi parameter yang lebih akurat
3. Evaluasi potensi likuefaksi sebaiknya menjadi bagian wajib dalam tahap perencanaan jembatan di wilayah dengan endapan *aluvial Kuarter* dan PGA tinggi, khususnya pada lokasi penelitian yang melintasi jalur tol aktif.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta





Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR PUSTAKA

- Agung, P. A. M., & Ahmad, M. A. (2014). Potential Liquefaction Of Loose Sand Lenses: Case Study in Surabaya East Coastal Plain, Indonesia. *International Journal of Integrated Engineering*, 6(2), 1–10.
- Agung, P. A. M., Ahmad, M. A., & Hasan, M. F. R. (2022). Probability Liquefaction On Silty Sand Layer On Central Jakarta. *International Journal of Integrated Engineering*, 14(9), 48–55. <https://doi.org/10.30880/ijie.2022.14.09.007>
- Agung, P. A. M., Sultan, R., Idris, M., Sudjipto, A. T., Ahmad, M. A., & Hasan, M. F. R. (2023). Probabilistic of in Situ Seismic Soil Liquefaction Potential Based on CPT-Data in Central Jakarta, Indonesia. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 14(1), 241–248. <https://doi.org/10.30880/ijscet.2023.14.01.021>
- Agung, P. A. M., Suropto, Yatmadi, D., Satwarnirat, Amri, S., & Hasan, M. F. R. (2025). Influence of Grain Size Distribution of Sand Lenses in Evaluating the Liquefaction Potential. *International Journal of Safety and Security Engineering*, 15(11), 2239–2246. <https://doi.org/10.18280/ijss.151105>
- Agustian, Y. (2021). LIKUEFAKSI. *Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi Terapan*, 8(1).
- ASTM D2487-17. (2017). *Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2487-17>
- BMKG. (2021a). *KATALOG GEMPABUMI INDONESIA: RELOKASI HIPOSENTER DAN IMPLIKASI TEKTONIK*. Bidang Informasi Gempabumi dan Peringatan Dini Tsunami.
- BMKG. (2021b). *RELOKASI HIPOSENTER DAN IMPLIKASI TEKTONIK*.
- Boulanger, R. W., Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2014). *CPT AND SPT BASED LIQUEFACTION TRIGGERING PROCEDURES*.
- Cetin, K. O., Seed, R. B., Kayen, R. E., Moss, R. E. S., Bilge, H. T., Ilgac, M., & Chowdhury, K. (2018). The use of the SPT-based seismic soil liquefaction triggering evaluation methodology in engineering hazard assessments. *MethodsX*, 5, 1556–1575. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.11.016>
- Das, B. (2010). *Principles of Geotechnical Engineering / B.M. Das*.
- Das, B. M. (1995). *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)* (Vol. 1).
- Fazriyanti, L., Tjahjono, A., Febriani, F., Raya Puspipetek, J., & Tangerang Selatan, K. (2020). Analisis Anomali Sinyal Geomagnetik Menggunakan Metode Detrended Fluctuation Analysis pada Gempa Bumi Magnitudo 6,1 di Lebak, Banten. *Journal of Materials Science, Geophysics, Instrumentation and Theoretical Physics*, 3(1). <https://doi.org/10.15408/fiziya.vi1.15091>
- Fitri, S. N., Sawada, K., & Yoshikawa, T. (2026). Liquefaction index ratio analysis for the 2018 Sulawesi Earthquake: Simplified and dynamic numerical method evaluation. *Earthquake Research Advances*. <https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2026.100445>
- Hendriyansyah, R., Pradiptiya, A., Agung, P. A. M., & Fathur Rouf Hasan, M. (2026). Analisis Potensi Likuefaksi pada Lapisan Pasir dengan Metode Standard



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- Penetration Test (SPT). *JOURNAL OF RESEARCH AND INOVATION IN CIVIL ENGINEERING AS APPLIED SCIENCE (RIGID)*, 5(1), 9–16.
- Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2008). *Soil liquefaction during earthquakes*.
- Ikhsan, M., Rifai, A., & Rahardjo, A. P. (2024). Post liquefaction effect on 1 and 2-dimensional model: A case study of Pasigala raw water transmission structure. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1373(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1373/1/012008>
- Ishihara, Kenji. (1996). *Soil behaviour in earthquake geotechnics*. Clarendon Press.
- Iwasaki, T., Tokida, K., & Tatsuoka, F. (1981). *Soil Liquefaction Potential Evaluation with Use of the Simplified Procedure*. <https://scholarsmine.mst.edu/icrageesd/01icrageesd/session02/12>
- Jalil, A., Fathani, T. F., Satyarno, I., & Wilopo, W. (2021). Liquefaction in Palu: the cause of massive mudflows. *Geoenvironmental Disasters*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s40677-021-00194-y>
- Jonathan, Prihatiningsih, A., & Leman, S. (2025). *ANALISIS POTENSI LIKUIFAKSI DAN CYCLIC MOBILITY AKIBAT GEMPA BUMI DI TANGERANG SELATAN DAN WAKATOBI*. 8(4), 1009–1020.
- Kramer, S. Lawrence. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*.
- Lshiharad, K., & Yoshimine, M. (1992). EVALUATION OF SETTLEMENTS IN SAND DEPOSITS FOLLOWING LIQUEFACTION DURING EARTHQUAKES. In *SOILS AND FOUNDATIONS* (Vol. 32, Number 1).
- Majdanawan, A., Ismanti, S., & Rifa, A. (2023). *Analisis Likuefaksi Secara Analitis Dan Numeris*. 7(2).
- Mase, L. Z., Tanapalungkorn, W., Likitlersuang, S., Ueda, K., & Tobita, T. (2025). *Ground motion, liquefaction and hazard analysis at the Palu site during the 2018 Indonesian great earthquake (Mw 7.5)*. 152–174. <https://doi.org/10.31035/cg20240607>
- Muktaf, F., Hardiyatmo, H. C., & Ismanti, S. (2025). Post-Earthquake Liquefaction Potential Study on the Foundation Area of Palu IV Bridge. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1503(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1503/1/012021>
- Nugroho, W. O., Sagara, A., & Imran, I. (2022). The evolution of Indonesian seismic and concrete building codes: From the past to the present. *Structures*, 41, 1092–1108. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.05.032>
- Nurdiansyah, F., Adi, A. D., & Ismanti, S. (2023). Settlement Analysis in Potentially Liquefiable Soil at Kretek 2 Bridge Area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1184(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1184/1/012008>
- Prasetio, A., Makmun, M., & Dwi, M. N. (2023a). Analisis Gempa Bumi Di Indonesia Dengan Metode Clustering. *Bulletin of Information Technology (BIT)*, 4(2), 338–343. <https://doi.org/10.47065/bit.v3i1>



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- Prasetio, A., Makmun, M., & Dwi, M. N. (2023b). Analisis Gempa Bumi Di Indonesia Dengan Metode Clustering. *Bulletin of Information Technology (BIT)*, 4(2), 338–343. <https://doi.org/10.47065/bit.v3i1>
- Pratama, A., Fathani, T. F., & Satyarno, I. (2021). Liquefaction potential analysis on Gumbasa Irrigation Area in Central Sulawesi Province after 2018 earthquake. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 930(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/930/1/012093>
- SNI 1726. (2019). *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung: SNI 1726 2019*.
- SNI 2833. (2016). *Standar Nasional Indonesia Perencanaan jembatan terhadap beban gempa*. www.bsn.go.id
- SNI 4153. (2008). *SNI 4153-2008-Cara uji penetrasi lapangan dengan SPT*.
- Sonmez, H., & Gokceoglu, C. (2005). A liquefaction severity index suggested for engineering practice. *Environmental Geology*, 48(1), 81–91. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-1263-9>
- Sun, Z., Liu, T., & Ma, S. (2019). Soil parameters inversion and influence based on MIDAS GTS. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 384(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/384/1/012126>
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1969). *SOIL MECHANICS IN ENGINEERING PRACTICE (Third)*.
- Tuna, S. C., & Altun, S. (2015, November). INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING Modern Approaches in Soil Liquefaction Analysis. *Earthquake Geotechnical Engineering*. <https://www.issmge.org/publications/online-library>
- William, L. T., & Whitman, R. V. (1969). *Soil Mechanics*. Massachusetts Institute of Technology.
- Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Finn, W. D. L., Harder Jr, L. F., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S. S. C., Carcusion III, W. F., Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., ... Stokoe II, K. H. (2001). LIQUEFACTION RESISTANCE OF SOILS : SUMMARY REPORT FROM THE 1996 NCEER AND 1998 NCEER / NSF WORKSHOPS ON EVALUATION OF LIQUEFACTION RESISTANCE OF SOILS. *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(10), 817–833.