

2 LANDASAN TEORI

2.1 Tanah

Tanah merupakan kumpulan mineral, bahan organik serta endapan yang relatif lepas diatas batuan dasar (Hardiyatmo, 2017). Secara fisik, proses pembentukan tanah yaitu berubahnya batuan menjadi partikel yang lebih kecil yang disebabkan oleh pengaruh erosi, air, es, manusia. Secara kimia, proses pembentukan tanah terjadi akibat adanya pelapukan kimiawi yang berupa hidrasi, hidrolisis, oksidasi dan karbonasi.

Ukuran partikel tanah sesuai dengan batas-batas ukuran dan sifat khusus tanah dikategorikan menjadi tanah pasir, lempung, lanau atau lumpur (Hardiyatmo, 2017). Ukuran partikel tanah bervariasi mulai dari 0,0001 mm sampai lebih besar dari 100 mm. Kebanyakan jenis tanah terdiri dari campuran beberapa jenis kategori tanah. Jenis tanah yang mendominasi dapat menjadi acuan dalam penentuan sifat khusus tanah pada suatu tempat.

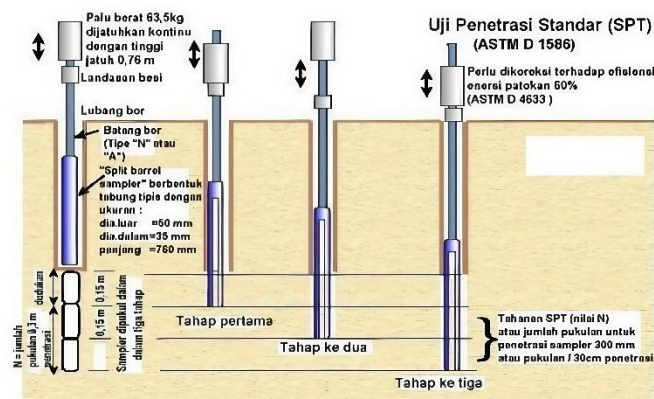
2.2 Penyelidikan Tanah

Penyelidikan tanah diperlukan untuk mendapatkan data tanah untuk keperluan desain dan pelaksanaan konstruksi dari suatu proyek. Penyelidikan tanah ini akan memberikan gambaran mengenai pelapisan kondisi tanah dan parameter yang dimiliki tanah. Profil dan analisis parameter tanah yang nantinya akan dicantumkan dalam laporan penyelidikan geoteknik paling tidak harus meliputi:

1. Profil tanah untuk perencanaan harus mewakili kondisi lapisan tanah khususnya parameter-parameter untuk perencanaan fondasi.
2. Muka air tanah.
3. Daya dukung tanah untuk jenis fondasi yang direncanakan.
4. Parameter tanah untuk analisis penurunan jangka pendek dan jangka panjang.
5. Parameter tanah untuk kondisi *drained* ataupun *undrained*.

2.2.1 *Standard Penetration Test*

Standard Penetration Test (SPT) merupakan metode pengujian dengan memasukkan sebuah *split spoon sampler* kedalam tanah pada bagian dasar dari sebuah lubang bor. *Standard Penetration Test* (SPT) dilakukan pada setiap lubang bor teknik dengan interval 2 m. Pelaksanaan *Standard Penetration Test* (SPT) mengacu pada SNI 4153:2008 dan ASTM D-1586-67 (Badan Standardisasi Nasional, 2008). Ilustrasi pelaksanaan *Standard Penetration Test* (SPT) dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Ilustrasi Pelaksanaan *Standard Penetration Test* (SPT)

2.2.2 *Pengujian Laboratorium*

Pengujian laboratorium dilakukan dengan tujuan untuk memperoleh informasi geoteknik berupa parameter fisik dan mekanika tanah untuk kebutuhan desain bangunan yang aman dan ekonomis. Hasil pengujian akan memberikan dasar untuk mengidentifikasi dan mengklasifikasikan serta mengevaluasi karakteristik kekuatan dan kompresibilitas lapisan tanah. Jenis-jenis pengujian yang dilakukan di laboratorium meliputi pengujian (Badan Standardisasi Nasional, 2017):

1. Kadar air (*moisture content*) pada tanah
2. Berat jenis tanah (*specific gravity*)
3. Berat isi (*bulk density*) dan berat kering (*dry density*) tanah
4. Analisis ukuran butiran tanah

Tabel 2.1 Klasifikasi Tanah Berdasarkan Ukuran Butir Tanah

No.	Ukuran Butir (mm)	Jenis Tanah
1	<0.0020	Clay (lempung)
2	0.0020 – 0.0074	Silt (Lanau)
3	0.0074 – 4.7500	Sand (pasir)
4	>4.7500	Gravel (kerikil)

Sumber: Kementerian PUPR

5. Uji batas-batas konsistensi (batas *atterberg*)
 - a. Batas susut, yaitu
 - b. Batas kadar air dimana tanah dengan kadar air dibawah nilai tersebut tidak menyusut lagi atau tidak mengalami perubahan volume.
 - c. Batas plastis, merupakan kadar air terendah dimana tanah mulai bersifat plasti. Dalam hal ini sifat plastis ditentukan berdasarkan kondisi dimana tanah yang digulung dengan telapak tangan diatas kaca mulai retak setelah mencapai diameter 3,0 mm.
 - d. Batas cair, merupakan kadar air tertentu dimana perilaku tanah berubah dari kondisi plastis ke cair.

Batas-batas *Atterberg* dapat dilihat pada Gambar 2.2 (Kementerian PUPR,2008).

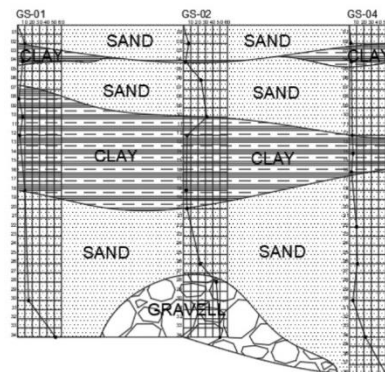
Fase	KEADAAN PADAT	KEADAAN SEMI PADAT	KEADAAN PLASTIS	KEADAAN CAIR	SUSPENSI
Air	Kadar air berkurang ←				
Batas-batas	Tanah kering	Batas susut SL	Batas plastis PL Batas lengket Indeks Plastisitas PI	Batas Cair LL	
Susut	Volume Konstan	Volume berkurang ←			
Kondisi	Keras hingga kaku	Dapat dikerjakan	Lengket	Bubur	Air tertahan suspensi
Kuat Geser (kN/m ²)	Kuat geser meningkat (~ 170) (~ 1,7)				Dapat diabaikan hingga nol
Kadar Air	O	SL	PL	LL	
			← PI →		

Gambar 2.2 Batas-batas Atterberg

6. Uji hidrometer
7. Uji geser tanah
8. Uji konsolidasi
9. Uji kompaksi

2.3 Stratifikasi Tanah

Stratifikasi tanah merupakan pengelompokkan tanah menjadi beberapa lapisan, dimana setiap lapisan memiliki sifat yang homogen. Stratifikasi tanah biasanya dibuat berdasarkan jenis tanah, konsistensi tanah, dan gabungan antara konsistensi dan jenis tanah. Melalui proses stratifikasi tanah ini dapat diketahui jumlah lapisan tanah dan tebal tanah dalam setiap lapisan tanah. Stratifikasi tanah dibuat berdasarkan data hasil penyelidikan tanah berupa uji bor dan beberapa uji lapangan lainnya. Data penyelidikan tanah yang digunakan dapat dilengkapi dengan data hasil uji laboratorium yang kemudian disederhanakan dan ditafsirkan menjadi stratifikasi tanah.



Gambar 2.3 Contoh Statifikasi Tanah

2.4 Parameter Tanah

Parameter tanah merupakan ukuran atau acuan untuk mengetahui atau menilai suatu proses perubahan yang terjadi dalam tanah baik dari sifat fisik dan jenis tanah (Anggrahini dkk., 2022). Parameter tanah digunakan untuk mengidentifikasi berbagai indeks yang dimiliki oleh tanah. Selain itu, parameter tanah juga digunakan untuk membantu perhitungan analisis rencana yang membutuhkan data karakteristik tanah baik secara fisik maupun kimiawi.

2.5 Gempa Bumi

Gempa bumi merupakan peristiwa pelepasan energi dari dalam bumi secara tiba-tiba hingga menimbulkan gelombang seismic (Rachman dkk., 2017). Gempa bumi dapat menyebabkan kegagalan suatu struktur akibat dari hilangnya daya dukung tanah pada tanah yang kedap air (Warouw dkk., 2019). Gempa bumi memiliki parameter sebagai berikut:

1. *Origine time*

Origine time adalah waktu kejadian gempa bumi, dimana terlepasnya akumulasi tegangan (*stress*) yang berbentuk perpanjangan gelombang gempa dan dinyatakan dalam hari, tanggal, bulan, tahun, jam, menit dan detik pada satuan waktu.

2. *Magnitude*

Magnitude adalah ukuran kekuatan gempa bumi. *Magnitude* menggambarkan besarnya energi yang terlepas saat gempa bumi, dimana kekuatan gempa atau pelepasan energi ini dinyatakan dalam satuan Skala Richter (SR).

3. Episentrum

Episentrum adalah titik di permukaan bumi yang merupakan refleksi tegak lurus dari kedalaman sumber gempa bumi (Wibisono dkk., 2021). Posisi episentrum dinyatakan dalam sistem koordinat geografis.

4. Hiposentrum

Hiposentrum adalah kedalaman sumber gempa bumi atau jarak yang dihitung tegak lurus dari permukaan bumi (Wibisono dkk., 2021). Kedalaman gempa terbagi menjadi 3 (tiga) zona yaitu zona dangkal, zona sedang dan zona dalam.

Kekuatan gempa bumi dapat diukur atau diperhitungkan berdasarkan besar *magnitude* dan intensitas gempa yang terjadi. *Magnitude* dihitung berdasarkan besarnya energi yang dilepas. Intensitas gempa dihitung berdasarkan besarnya kerusakan yang terjadi akibat gempa bumi. Para ahli seismologis pada umumnya menggunakan skala *magnitude* yang berbeda-beda. Skala *magnitude* yang umum

digunakan oleh para ahli seismologis yaitu *Local Magnitude Scale* (M_L), *Surface Wave Magnitude Scale* (M_S), dan *Moment Magnitude Scale* (M_W).

2.5.1 Percepatan Pada Permukaan Tanah ($a_{\max}$)

Nilai percepatan maksimum pada muka tanah dapat dihitung menggunakan rumus:

$$a_{\max} = F_{\text{PGA}} \times \text{PGA} \quad (2.1)$$

Keterangan: F_{PGA} = faktor amplifikasi

PGA = percepatan gempa di batuan dasar

Nilai PGA didapatkan dengan menggunakan aplikasi Lini Binamarga atau menggunakan peta deagregasi bahaya gempa. F_{PGA} merupakan rasio nilai percepatan puncak di permukaan tanah dan nilai di batuan dasar. Besarnya nilai F_{PGA} bergantung pada kelas situs dan nilai PGA pada lokasi tersebut.

Tabel 2.2 Faktor Amplifikasi untuk PGA (F_{PGA})

Klasifikasi Situs	S_{PGA}					
	$\text{PGA} \leq 0,1$	$\text{PGA} = 0,2$	$\text{PGA} = 0,3$	$\text{PGA} = 0,4$	$\text{PGA} = 0,5$	$\text{PGA} \geq 0,6$
Batuan keras (SA)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Batuan (SB)	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Tanah sangat padat dan batuan lunak (SC)	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
Tanah sedang (SD)	1.6	1.4	1.3	1.2	1.1	1.1
Tanah lunak (SE)	2.4	1.9	1.6	1.4	1.2	1.1
Tanah khusus (SF)	SS					

Sumber: (Kementrian PUPR, 2010)

2.5.2 Klasifikasi Kelas Situs

Klasifikasi kelas situs dilakukan untuk menentukan amplifikasi besaran percepatan gempa puncak dari batuan dasar ke permukaan tanah. Penentuan kelas situs dilakukan berdasarkan profil tanah paling atas sedalam 30 m melalui

penyelidikan tanah di lapangan dan laboratorium. Apabila data tanah yang tersedia tidak spesifik pada situs sampai kedalaman 30 m, maka sifat-sifat tanah harus diestimasi oleh seorang ahli geoteknik bersertifikat berdasarkan kondisi geotekniknya. Kriteria klasifikasi kelas situs dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Klasifikasi Kelas Situs

Kelas Situs	V_s (m/detik)	N atau N_{ch}	s_u (kPa)
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (tanah lunak)	<175	<15	<50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut: 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$, 2. Kadar air, $w \geq 40\%$ 3. Kuat geser niralir, $s_u < 25$ kPa		
SF (tanah khusus yang membutuhkan investasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: – Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti likuefaksi, lempung sangat sensitive, tanah tersementasi lemah – Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan, $H > 3$ m) – Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan, $H > 7,5$ m dengan indeks plastisitas, $PI \geq 75$) – Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $s_u < 50$ kPa		

Sumber : (Badan Standardisasi Nasional, 2019)

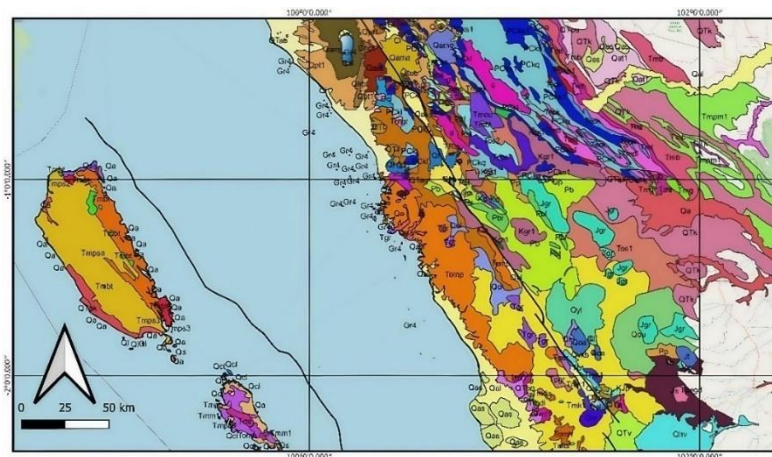
2.6 Kondisi Geologi Sumatera Barat

2.6.1 Struktur Geologi

Sumatera Barat merupakan salah satu daerah yang termasuk pada daerah zona sesar aktif (Pusat Studi Gempa Nasional, 2022). Wilayah ini memiliki 7 (tujuh) segmen sesar aktif. Segmen sesar aktif yang berada di Sumatera Barat terdiri dari segmen Siulak, segmen Sumpur, segmen Sianok, segmen Sumani, segmen Barumun, segmen Angkola, dan segmen Suliti. Selain sesar, di daerah Sumatera Barat juga ditemukan patahan yang disebut segmen Talamau.

2.6.2 Struktur Batuan

Struktur batuan yang terdapat di wilayah Sumatera Barat dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Peta Struktur Batuan Sumatera Barat

Keterangan untuk Gambar 2.4 dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Legenda Peta Struktur Batuan Sumatera Barat

Simbol	Umur	Nama Batuan/Formasi
Gr4	Jura	Batuan Terobosan
Qtta	Kuarter	Andesit dan Tuff
Qs	Kuarter	Endapan Danau
Tmou	Neogen	Formasi Ombilin
Tos1	Paleogen	Formasi Sangkarewang

Simbol	Umur	Nama Batuan/Formasi
Teos	Neogen	Formasi Sangkarewang
Pbl	Permo Karbon	Formasi Barisan
Pb	Permian	Formasi Barisan
Qa	Kuarter	Aluvial
Ql	Kuarter	Formasi Solok
Qcl	Kuarter	Batugamping Korai
Qh	Kuarter	Alluvium
Qhpt	Kuarter	Tuf Batuapung Hornblenda Hipersten
Qoa	Kuarter	Formasi Painan
Qp	Kuarter	Alluvium Tua
Qf	Kuarter	Kipas Alluvium
Qh	Kuarter	Alluvium
Teob	Neogen	Formasi Brani
Teos	Neogen	Formasi Sangkarewang
Qpt1	Kuarter	Formasi Totolan
Qamj	Kuarter	Andesit Kaldera Danau

2.6.3 Vulkanisme

Sumatera Barat juga termasuk daerah yang terdiri dari pegunungan dan perbukitan. Sebagian gunung yang berada di wilayah Sumatera Barat ada yang masih termasuk dalam gunung berapi aktif. Gunung yang masih aktif tersebut diantaranya yaitu gunung marapi, gunung sago, gunung tandikat dan gunung talamau.

2.6.4 Seismitas dan Tektonik

Wilayah Sumatera Barat memiliki aktifitas seismik dan tektonik yang tinggi karena merupakan daerah zona subduksi. Zona subduksi Sumatera dinobatkan menjadi salah satu margin tektonik lempeng teraktif di dunia. Batas lempeng Sumatera berarah barat laut dengan vektor pergerakan lempeng relatif 65mm/tahun

antara lempeng Indo-Australia dan Eurasia. Profil hiposentral zona subduksi Sumatera dapat dilihat pada. Berdasarkan profilnya, sumber gempa pada zona ini yaitu gempa *Megathrust (interface)* dan zona Benioff (*intraslab*).

2.7 Likuefaksi

Likuefaksi merupakan perubahan kondisi tanah yang terjadi karena tanah menerima beban siklik (dinamik) yang biasanya berupa beban gempa bumi (Idriss & Boulanger, 2010). Getaran yang diakibatkan oleh terjadinya gempa bumi akan membuat massa tanah mengalami transisi dari keadaan (perilaku) padat menjadi keadaan (perilaku) cair (Hakam, 2020). Likuefaksi biasanya terjadi pada tanah granular berbutir halus dan lepas dalam keadaan jenuh air. Tanah pasir berbutir halus memiliki sifat drainase/pengaliran air yang buruk.

Getaran yang terjadi pada saat gempa bumi dapat membuat butiran pasir yang cenderung lepas berubah posisi sehingga mengalami penurunan volume. Hal tersebut menyebabkan peningkatan tekanan air pori pada tanah dalam waktu yang sangat singkat dan menurunkan kuat geser tanah. Selama terjadinya getaran gempa bumi, peningkatan tekanan air pori dapat menyamai tegangan total tanah yang terjadi sehingga tekanan efektif tanah hilang dan tanah berubah menjadi seperti cairan (*liquid*).

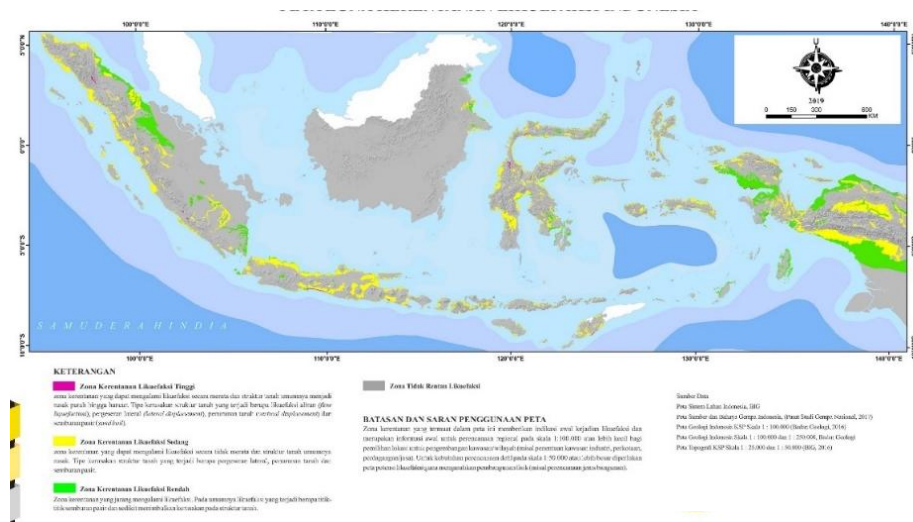
Perubahan partikel tanah menjadi seperti cairan menyebabkan tanah tidak memiliki daya dukung dan kestabilan untuk menopang struktur yang berada di atasnya (Hutagalung & Tarigan, 2019). Pada kondisi ini, tanah sudah berubah menjadi seperti cairan dan daya dukung tanah sepenuhnya berasal dari tegangan air pori. Hal tersebut menyebabkan beban struktur yang berada di atas tanah akan amblas kedalam tanah dan tangki-tangki yang berada dalam tanah akan muncul ke permukaan.

Faktor-faktor yang mempengaruhi terjadinya likuefaksi pada suatu daerah yaitu sebagai berikut (Subakti & Renagustiarini, 2019):

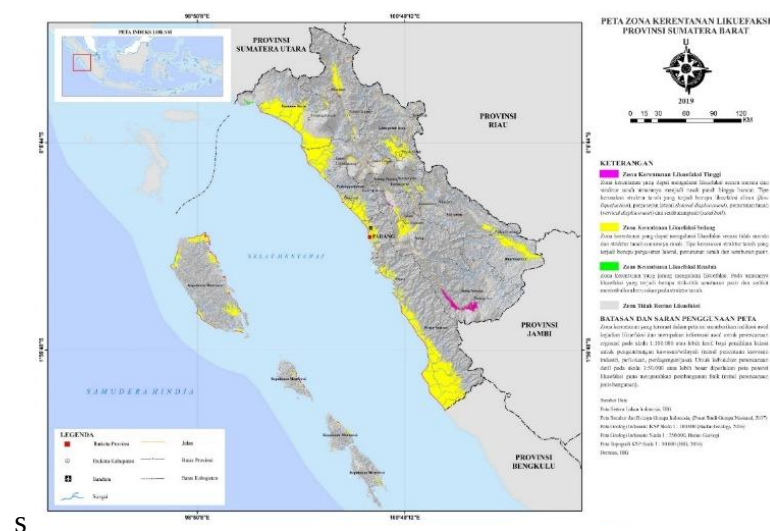
1. Karakteristik getaran
2. Jenis tanah
3. Muka air tanah (*ground water table*)

4. Distribusi diameter butiran tanah
5. Kepadatan awal (*initial relative density*)
6. Pengaruh-pengaruh lain

Daerah yang termasuk dalam kategori daerah yang berpotensi mengalami likuefaksi di Indonesia dapat dilihat pada buku Atlas Kerentanan Potensi Likuefaksi yang dikeluarkan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Peta kerentanan potensi likuefaksi di Indonesia dapat dilihat pada Gambar 2.5 (Kementerian ESDM, 2019). Wilayah yang rentan mengalami likuefaksi di Sumatera Barat dapat dilihat pada Gambar 2.6 .



Gambar 2.5 Peta Zona Likuefaksi Indonesia

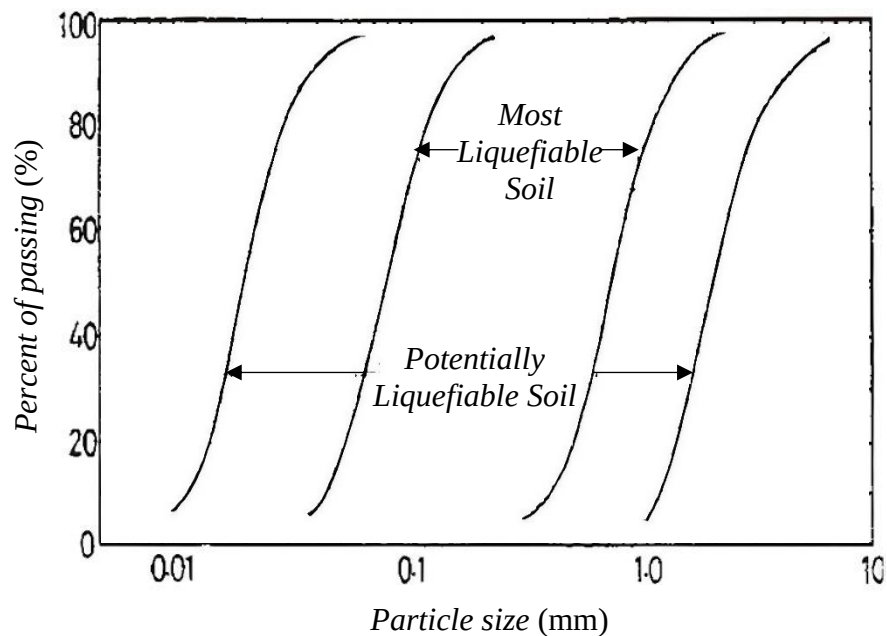


Gambar 2.6 Peta Likuefaksi Sumatera Barat

2.8 Metode Analisis Likuefaksi

2.8.1 Analisis Komposisi Tanah

Analisis komposisi tanah merupakan analisis susunan tanah atau ukuran butir tanah yang dilakukan untuk menentukan persentase tanah yang lolos saringan terhadap lubang saringan dengan diameter tertentu (Hardiyatmo, 2007). Tsuchida (1970) mengusulkan batas-batas distribusi tanah yang peka terhadap potensi likuifaksi berdasarkan pada kurva hasil distribusi tanah. Kurva Tsuchida ini bertujuan untuk memperkirakan kerentanan tanah terhadap potensi likuifaksi. Kurva Tsuchida dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Kurva Tsuchida

Boundaries for most liquefiable soil merupakan batas tanah berpotensi likuifaksi karena adanya butiran tanah halus yang menyebabkan penurunan Tingkat kecenderungan tanah memadat. *Boundaries for potentially liquefiable soil* merupakan batas tanah berpotensi likuifaksi karena terdapat butiran kasar yang bersifat permeabel.

Potensi likuifaksi pada tanah juga dapat ditentukan oleh faktor kedalaman air tanah/*ground water level* (GWT) (Zakaria, dkk., 2022). Hal tersebut dikarenakan, semakin dalam muka air tanah maka akan semakin besar tegangan

efektif normal yang bekerja pada sedimen jenuh di kedalaman tertentu begitu pula sebaliknya. Kerentanan likuefaksi terhadap kedalaman air tanah dapat dilihat pada Tabel 2.5

Tabel 2.5 Potensi Likuefaksi Berdasarkan Kedalaman Air Tanah

<i>Ground Water Level (m)</i>	<i>Maximum Possible Susceptibility</i>
< 3,0	<i>Very High</i>
3,0 – 9,1	<i>High</i>
9,1 – 15,2	<i>Low</i>
>15,2	<i>Very Low</i>

Sumber: (Zakaria, dkk., 2022)

2.8.2 Metode Histori Kejadian Likuefaksi

Metode histori kejadian likuefaksi merupakan sebuah metode analisis potensi likuefaksi berdasarkan kejadian likuefaksi yang telah terjadi pada masa lampau di area sekitar lokasi penelitian. Metode ini digunakan sebagai gambaran awal terjadinya potensi likuefaksi di suatu lokasi. Idriss dan Boulanger mengembangkan metode ini dengan tujuan yaitu:

1. Memperbaharui basis data gempa bumi yang menyebabkan likuefaksi.
2. Menambahkan estimasi data gempa bumi yang telah diperbaharui dengan magnitudo gempa, percepatan tanah puncak, dan rincian lainnya.
3. Mengilustrasikan pemilihan dan perhitungan SPT $(N_1)_{60cs}$ untuk beberapa kasus gempa bumi yang representatif.
4. Menyajikan distribusi basis data relatif terhadap berbagai parameter utama yang digunakan dalam korelasi pemicu likuefaksi.

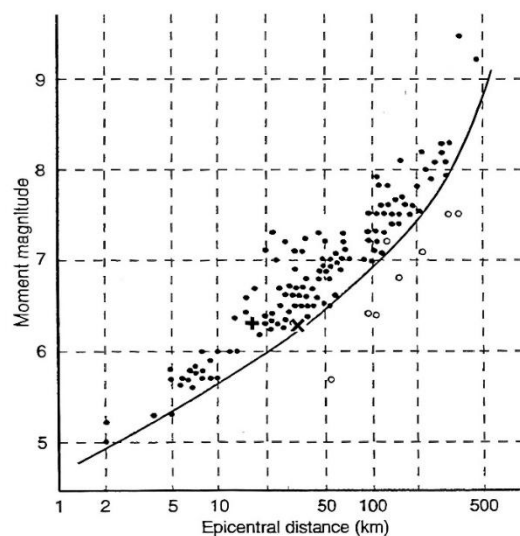
Basis data yang dapat digunakan dalam penelitian ini yaitu data gempa bumi yang dari *website* USGS. Data tersebut akan digunakan untuk memeriksa estimasi nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) untuk sejumlah lokasi yang tidak memiliki rekaman terdekat. Shakemaps yang terdapat pada *website* USGS menggabungkan pendekatan rata-rata tertimbang untuk menggabungkan berbagai jenis data

(rekaman, intensitas, dan persamaan prediksi gerakan tanah) untuk mendapatkan estimasi terbaik dari parameter gerakan tanah puncak.

Data yang didapatkan dari website USGS akan diolah sehingga mendapatkan nilai magnitudo kritis dan kedalaman kritis pada data histori gempa bumi yang menyebabkan terjadinya likuefaksi (Jayangondaperumal & Thakur, 2018). Hasil pengolahan data tersebut akan menunjukkan klasifikasi performa situs dari sebaran titik lokasi sumber gempa bumi. Pengklasifikasian yang dilakukan terdiri dari 3 (tiga) jenis yaitu:

1. Terjadi likuefaksi
2. Tidak terjadi likuefaksi
3. Marginal

Contoh grafik sebaran data magnitudo kritis dan kedalaman kritis gempa bumi dari basis data dapat dilihat pada Gambar 2.8(Jialei, 2023).



Gambar 2.8 Grafik Sebaran Data Magnitudo dan Episenter Gempa Bumi

2.8.3 Metode NCEER

Metode *National Center of Earthquake Engineering Research* (NCEER) merupakan metode analisis likuefaksi dengan menggunakan data hasil pengujian bor dan data hasil uji laboratorium dengan tujuan untuk mengetahui kekuatan geser tanah saat terjadi gempa bumi.

1. Tegangan vertikal total (σ_v)

Tegangan vertikal total merupakan tegangan pada lapisan tanah yang diakibatkan oleh beban yang berada di atasnya tanpa memperhitungkan tegangan air pori yang diakibatkan oleh air (Dandel dkk., 2017). Nilai tegangan vertikal total akan semakin besar seiring dengan bertambahnya kedalaman tanah. Persamaan untuk menghitung tegangan vertikal efektif dirumuskan sebagai berikut:

$$\sigma_v = \sum (\gamma \times z) \quad (2.2)$$

Keterangan:

σ_v = tegangan vertikal total (kN/m²)

γ = berat isi lapisan tanah (kN/m³)

z = kedalaman lapisan tanah (m)

2. Tegangan vertikal efektif (σ'_v)

Tegangan vertikal efektif merupakan tegangan pada lapisan tanah akibat beban di atasnya dengan memperhitungkan tegangan air pori akibat air (Dandel dkk., 2017). Tegangan air pori dalam tanah menyebabkan penurunan tekanan pada tanah. Persamaan yang digunakan untuk menghitung tegangan vertikal efektif yaitu sebagai berikut:

$$\sigma'_v = \sigma_v - \mu = \sigma_v - (\gamma_w \times z) \quad (2.3)$$

Keterangan:

σ'_v = tegangan vertikal efektif (kN/m²)

σ_v = tegangan vertikal total (kN/m²)

μ = tegangan air pori (kN/m²)

γ_w = berat isi air (kN/m³)

z = kedalaman lapisan tanah (m)

3. Nilai CSR (*Cyclic Stress Ratio*)

Nilai CSR (*Cyclic Stress Ratio*) merupakan tegangan siklik yang terjadi akibat gempa yang terbagi dengan tegangan efektif pada tanah. Seed dan

Idris merumuskan persamaan untuk perhitungannya yaitu sebagai berikut (Tijow dkk., 2018):

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_v} = 0,65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) r_d \quad (2.4)$$

$$\tau_{av} = 0,65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \sigma_v r_d \quad (2.5)$$

Dimana:

a_{max} = percepatan gempa di permukaan tanah (m/s^2)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

σ'_v = tegangan vertikal *overburden* efektif (kN/m^2)

σ_v = tegangan vertikal *overburden* total (kN/m^2)

r_d = faktor koreksi kedalaman

Faktor reduksi (r_d) merupakan nilai yang digunakan untuk mempengaruhi tegangan didalam tanah, dimana nilainya akan semakin kecil seiring dengan bertambahnya kedalaman tanah. Liao dan Whitman (1986) mengembangkan persamaan nilai faktor reduksi (r_d) untuk mengestimasi nilai r_d . Besarnya nilai koefisien faktor reduksi (r_d) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Hutagalung et. al., 2019):

$$r_d = 1 - 0,00765Z \text{ untuk } Z \leq 9,15 \text{ m} \quad (2.6)$$

$$r_d = 1,174 - 0,0267Z \text{ untuk } 9,15 \text{ m} < Z \leq 23 \text{ m} \quad (2.7)$$

$$r_d = 0,774 - 0,008Z \text{ untuk } 23 \text{ m} < Z \leq 30 \text{ m} \quad (2.8)$$

$$r_d = 0,5 \text{ untuk } Z \geq 30 \text{ m} \quad (2.9)$$

Nilai persamaan tersebut kemudian dikembangkan oleh F. Blake (1996) sehingga persamaan untuk menghitung nilai faktor reduksi (r_d) berubah menjadi sebagai berikut:

$$r_d = \frac{(1,000 - 0,4113z^{0,5} + 0,001753z^{1,5})}{(1,000 - 0,4177z^{0,5} + 0,05729z - 0,006205z^{1,5} + 0,001210z^2)} \quad (2.10)$$

Dimana z merupakan kedalaman dari lapisan tanah yang menjadi tinjauan dalam perhitungan yang dilengkapi dengan satuan meter.

4. Nilai *Cyclic Resistance Ratio* (CRR)

Cyclic Resistance Ratio (CRR) merupakan evaluasi tahanan likuefaksi tanah berdasarkan nilai N-SPT yang didapatkan melalui *Standard Peneration Test* (SPT). Untuk menghitung nilai CRR (*Cyclic Resistance Ratio*) yang perlu dilakukan pertama kali adalah menghitung nilai N-SPT koreksi baik itu terhadap alat, tegangan overburden maupun terhadap kandungan butir halusnya. Nilai N-SPT koreksi terhadap alat dan tegangan overburden tanah dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$(N_1)_{60} = N_M C_N C_E C_B C_R C_S \quad (2.11)$$

Dimana:

N_M = N-SPT yang didapatkan dari hasil pengujian SPT

C_N = faktor koreksi untuk normalisasi tegangan overburden efektif

C_E = koreksi untuk efisiensi energi

C_B = koreksi untuk diameter *borehole*

C_R = faktor koreksi dari panjang g tali (*rod length*)

C_S = koreksi untuk sampel

Tabel 2.6 Parameter Koreksi N-SPT

Parameter	Jenis Alat	Koreksi
C_N	Koreksi terhadap tegangan overburden vertikal efektif	$\frac{2,2}{1,2 + \frac{\sigma'_v}{P_a}}$
		$C_N \leq 1,7$
C_E	<i>Donut hammer</i>	0,5 – 1,0
	<i>Safety hammer</i>	0,7 – 1,2
	<i>Automatic-trip hammer</i>	0,8 – 1,3
C_B	65 – 115 mm	1,0
	150 mm	1,05
	200 mm	1,15
C_R	<3 m	0,75
	3 – 4 m	0,8

Parameter	Jenis Alat	Koreksi
	4 – 6 m	0,85
	6 – 10 m	0,95
	10 – 30 m	1,0
C _s	Tabung standar	1,0
	Tabung dengan pelapis	1,0 – 1,3

Sumber : (Badan Standardisasi Nasional, 2017)

Nilai N-SPT yang sudah dikoreksi terhadap alat dan tegangan overburden tanah juga harus dikoreksi terhadap kandungan butir halus atau *finest content* pada lapisan tanah tersebut dengan menggunakan persamaan berikut (Nurbani & Yakin, 2020):

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60} \quad (2.12)$$

Dengan nilai α dan β dipengaruhi oleh persentase *finest content* atau FC,

$$\alpha = 0 \text{ dan } \beta = 1 \text{ untuk } FC \leq 5 \% \quad (2.13)$$

$$\alpha = \exp\left[1,76 - (190 / FC^2)\right] \text{ untuk } 5\% < FC < 35\% \quad (2.14)$$

$$\beta = \left[0,99 - (FC^{1,5} / 1000)\right] \text{ untuk } 5\% < FC < 35\% \quad (2.15)$$

$$\alpha = 5 \text{ dan } \beta = 1,2 \text{ untuk } FC \geq 35\% \quad (2.16)$$

Setelah melakukan koreksi terhadap nilai N-SPT, nilai CRR (*Cyclic Resistance Ratio*) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Nurbani & Yakin, 2020):

$$CRR_{7,5} = \frac{\frac{95}{34 - (N_1)_{60CS}} + \frac{(N_1)_{60CS}}{1,3} - \frac{1}{2}}{100} \quad (2.17)$$

Keterangan :

$CRR_{7,5}$ = *Cyclic Resistance Ratio* pada gempa dengan M 7,5

$(N_1)_{60CS}$ = Nilai N-SPT *clean sand*

Nilai CRR yang didapat dari perhitungan diatas merupakan nilai CRR untuk magnitudo gempa 7,5 saja. Apabila dalam penelitian digunakan data dengan magnitudo kurang atau lebih dari nilai 7,5 maka nilai CRR

yang didapat harus disesuaikan dengan magnitudo gempa yang digunakan dengan menggunakan *magnitude scale factor* (MSF). Perhitungan untuk mendapatkan nilai MSF menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$MSF = \frac{10^3}{M_w^{3,46}} \text{ untuk nilai } M_w < 7 \quad (2.18)$$

$$MSF = \frac{10^{2,24}}{M_w^{2,56}} \text{ untuk nilai } M_w > 7 \quad (2.19)$$

5. Perhitungan potensi likuefaksi

Potensi likuefaksi yang dihitung dengan menggunakan metode *National Center of Earthquake Engineering Research* (NCEER) dihitung dengan persamaan berikut (Mase, 2018):

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (2.20)$$

dengan ketentuan,

$$FS = \frac{CRR}{CSR} < 1 \quad \text{Terjadi likuefaksi}$$

$$FS = \frac{CRR}{CSR} = 1 \quad \text{Kondisi kritis likuefaksi}$$

$$FS = \frac{CRR}{CSR} > 1 \quad \text{Tidak terjadi likuefaksi}$$

2.8.4 Metode Idriss Boulanger Procedure

Analisis potensi likuefaksi dengan menggunakan Idriss Boulanger *procedure* menggunakan pendekatan berbasis tegangan pada tanah untuk mengevaluasi potensi pemicu likuefaksi. Prinsip yang digunakan dalam perhitungan metode Idriss Boulanger *procedure* hampir sama seperti metode *National Center of Earthquake Engineering Research* (NCEER). Metode ini membandingkan rasio tegangan siklik akibat gempa (CSR) dengan rasio tahanan siklik (CRR) pada tanah. Komponen yang digunakan dalam perhitungan analisis likuefaksi dengan menggunakan metode ini telah dikembangkan untuk memberikan

perlakuan rasional pada berbagai faktor yang mempengaruhi ketahanan penetrasi dan ketahanan siklik pada tanah.

1. *Earthquake induced cyclic stress ratio (CSR)*

Nilai CSR (*Earthquake induced cyclic stress ratio*) pada kedalaman tertentu dalam profil tanah biasanya dinyatakan sebagai nilai refresentatif atau seragam sebesar 65% dari rasio tegangan siklik maksimum. Perhitungannya dapat menggunakan persamaan (Idriss & Boulanger, 2010):

$$CSR_{M,\sigma'_v} = 0,65 \frac{\tau_{max}}{\sigma'_v} \quad (2.21)$$

Keterangan :

τ_{max} = tegangan geser maksimum yang diinduksi gempa

σ'_v = tegangan vertikal efektif (kN/m²)

Nilai dari tegangan geser maksimum yang diinduksi gempa (τ_{max}) dapat diestimasi menggunakan analisis respon dinamis yang mencakup jumlah input deret percepatan yang cukup, lokasi yang memadai, dan detail karakterisasi gempa. Secara lebih sederhana, nilai CSR diperhitungkan dengan menggunakan persamaan (Idriss & Boulanger, 2010):

$$CSR_{M,\sigma'_v} = 0,65 \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) \left(\frac{a_{max}}{g} \right) r_d \quad (2.22)$$

Keterangan:

a_{max} = percepatan gempa di permukaan tanah (m/s²)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

σ'_v = tegangan vertikal *overburden* efektif (kN/m²)

σ_v = tegangan vertikal *overburden* total (kN/m²)

r_d = faktor koreksi kedalaman

2. Shear stress reduction parameter (r_d)

Nilai *shear stress reduction parameter* (r_d) yang telah dikembangkan untuk melakukan prosedur analisis potensi likuefaksi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (Idriss & Boulanger, 2010):

$$r_d = \exp[\alpha(z) + \beta(z) \cdot M] \quad (2.23)$$

$$\alpha(z) = -1,012 - 1,126 \sin\left(\frac{z}{11,73} + 5,133\right) \quad (2.24)$$

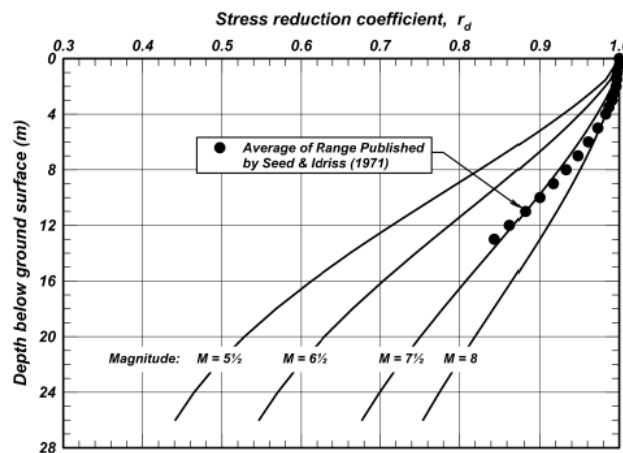
$$\beta(z) = 0,106 + 0,118 \sin\left(\frac{z}{11,28} + 5,142\right) \quad (2.25)$$

Keterangan :

z = kedalaman lapisan tanah (m)

M = magnitudo gempa

Hubungan antara *shear stress reduction parameter* (r_d) dengan kedalaman dan magnitudo gempa dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Grafik Hubungan r_d , *Depth*, dan *Magnitude*

3. Overburden correction faktor (C_N)

Nilai dari faktor koreksi overburden dalam perhitungannya menggunakan persamaan (Idriss & Boulanger, 2010):

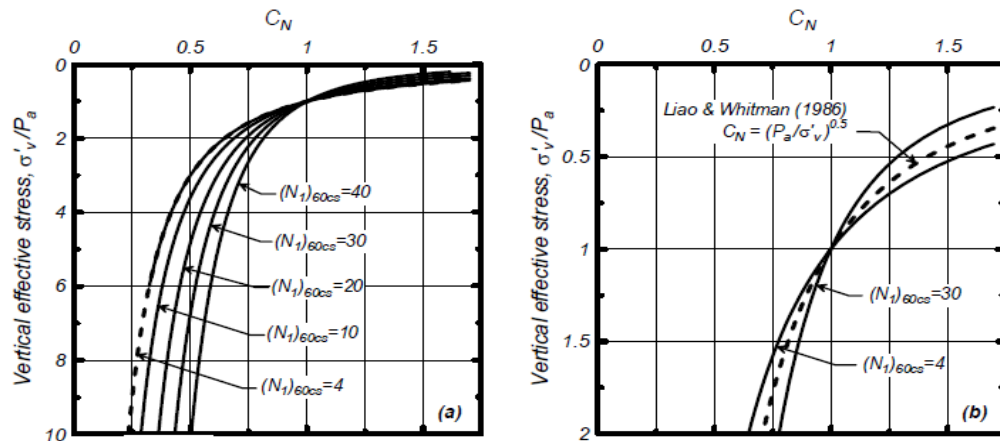
$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v} \right)^m \leq 1,7 \quad (2.26)$$

$$m = 0,784 - 0,0768\sqrt{(N_1)_{60CS}} \quad (2.27)$$

Keterangan:

$(N_1)_{60CS}$ = Nilai N-SPT *clean sand*

Hubungan antara tegangan vertikal efektif dengan nilai C_N direpresentasikan dalam grafik pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Grafik Hubungan Tegangan Vertikal Efektif dan Nilai C_N

4. Short rod correction faktor (C_R)

Short rod correction faktor (C_R) memperhitungkan efek dari panjang batang pada energi yang ditransfer ke batang sampel selama tumbukan palu pada pengujian *Standard Penetration Test* (SPT). Nilai *short rod correction faktor* (C_R) dapat dilihat pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7 Nilai C_R

Rod Length (m)	C_R
< 3	0,75
3 – 4	0,80
4 – 6	0,85
6 – 10	0,95
10 – 30	1,00

Sumber: (Idriss & Boulanger, 2010)

5. Overburden correction faktor (K_σ)

Pengembangan rumus untuk mendapatkan nilai K_σ didasarkan pada:

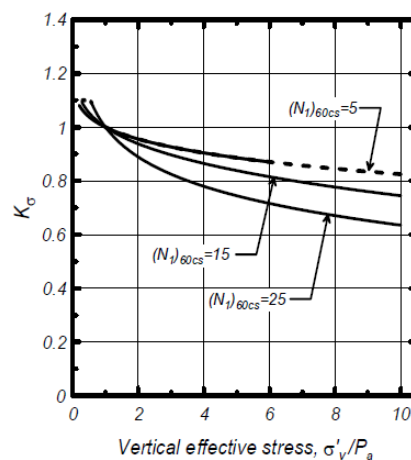
- Nilai CRR untuk pasir bersih yang dilarutkan di laboratorium dapat dihubungkan dengan indeks parameter keadaan relatif pasir (ξ_R)
- Hubungan K_σ untuk pasir bersih dapat diturunkan langsung dari hubungan CRR - ξ_R
- Menurunkan hubungan CRR- $(N_1)_{60cs}$ berbasis lapangan sesuai dengan hubungan CRR - ξ_R

Persamaan untuk menghitung nilai K_σ yaitu sebagai berikut:

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \ln \left(\frac{\sigma'_v}{P_a} \right) \leq 1,1 \quad (2.28)$$

$$C_\sigma = \frac{1}{18,9 - 2,55\sqrt{(N_1)_{60cs}}} \leq 0,3 \quad (2.29)$$

Hubungan antara nilai K_σ dengan tegangan vertikal efektif dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Hubungan antara nilai K_σ dengan tegangan vertikal efektif

6. *Magnitude scaling faktor (MSF)*

Nilai MSF digunakan untuk memperhitungkan efek durasi/jumlah siklus pada pemicu likuefaksi. Nilai MSF diperoleh dengan menggabungkan:

- Hubungan antara nilai CRR dan jumlah siklus pembebanan seragam yang setara pada hasil uji laboratorium.

- b. Korelasi jumlah siklus pembebanan ekuivalen dengan magnitudo gempa.

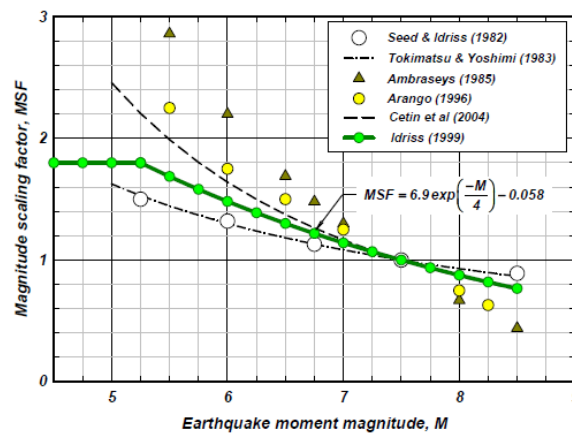
Idriss (2008) telah mengevaluasi kembali persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai MSF menjadi:

$$MSF = 6,9 \cdot \exp\left(\frac{-M}{4}\right) - 0,058 \leq 1,8 \quad (2.30)$$

Keterangan:

M = Magnitudo gempa

Hubungan antara nilai MSF dengan magnitudo gempa dapat dilihat pada Gambar 2.12.



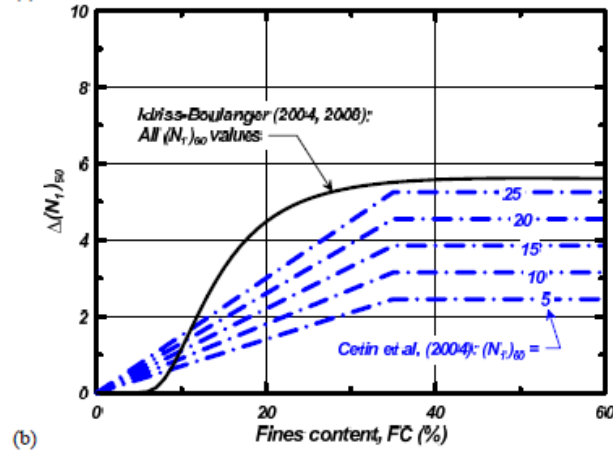
Gambar 2.12 Hubungan nilai MSF dengan magnitudo gempa

7. *Equivalent clean sand adjustment* ($\Delta(N_1)_{60}$)

Penyesuaian nilai SPT secara empiris berasal dari data riwayat kasus likuefaksi dan memperhitungkan efek dari kandungan pasir halus terhadap nilai CRR dan jumlah pukulan pada saat Standard Penetration Test (SPT). Persamaan untuk menyesuaikan nilai SPT yang dirumuskan oleh Idriss & Boulanger (2010) yaitu sebagai berikut:

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp\left(1,63 + \frac{9,7}{FC + 0,01} - \left(\frac{15,7}{FC + 0,01}\right)^2\right) \quad (2.31)$$

Hubungan nilai FC dengan $\Delta(N_1)_{60}$ tersaji pada Gambar 2.13..



Gambar 2.13 Hubungan nilai FC dengan $\Delta(N_1)_{60}$

8. *Cyclic resistance ratio (CRR)*

Persamaan untuk nilai *cyclic resistance ratio* (CRR) yang dirumuskan oleh Idriss dan Boulanger (2008) yaitu sebagai berikut:

$$CRR_{M, \sigma'_v} = CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1} \cdot MSF \cdot K_\sigma \quad (2.32)$$

Dimana nilai $CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1atm}$ didapatkan dari persamaan:

$$CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1atm} = \exp \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{14,1} + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{126} \right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{23,6} \right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{25,4} \right) - 2,8 \right) \quad (2.33)$$

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60} \quad (2.34)$$

2.8.5 *Liquefaction Potential Index (LPI)*

Liquefaction *Potential Index* (LPI) merupakan suatu indeks atau nilai yang menjadi acuan akan besarnya kerusakan yang terjadi akibat gempa bumi pada area tanah yang berpotensi mengalami likuefaksi. Perhitungan liquefaction potential index (LPI) menggunakan persamaan sebagai berikut (Nurbani & Yakin, 2020):

$$LPI = \int_0^{20} F(z)w(z)dz \quad (2.35)$$

Dimana:

z = kedalaman lapisan pasir (0-20 m)

F = faktor keamanan

w = faktor beban

Kriteria untuk *menentukan* besarnya nilai faktor keamanan dan faktor beban dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan :

$$F = 1 - FS \quad \text{untuk } FK < 1 \quad (2.36)$$

$$F = 0 \quad \text{untuk } FK > 1 \quad (2.37)$$

$$w = 10 - 0,5z \quad \text{untuk } z < 20 \text{ m} \quad (2.38)$$

$$w = 0 \quad \text{untuk } z > 20 \text{ m} \quad (2.39)$$

Tabel 2.8 *Liquefaction Potential Index*

LPI	Iwasaki et. al (1982)	Luna, R.& Frost, J. D. (1998)	MERM (2003)
LPI=0	<i>Very Low</i>	<i>Little to None</i>	<i>None</i>
$0 < LPI < 5$	<i>Low</i>	<i>Minor</i>	<i>Low</i>
$5 < LPI < 15$	<i>High</i>	<i>Moderate</i>	<i>Medium</i>
$LPI > 15$	<i>Very High</i>	<i>Major</i>	<i>High</i>

Sumber : (Nurbani & Yakin, 2020)