

BAB II KAJIAN PUSTAKA

2.1 Definisi Likuifaksi

Menurut Day (2001) gempa bumi dapat mengakibatkan *secondary effect* atau proses non tektonik di permukaan yang berhubungan langsung dengan gempa bumi. Salah satu efek sekunder ini adalah terjadinya fenomena pencairan tanah akibat beban siklik atau yang dikenal dengan istilah likuifaksi. Peristiwa likuifaksi pada umumnya terjadi pada konsistensi tanah granular jenuh (*saturated*) yang lepas sampai sedang dengan sifat drainase dalam tanah. Endapan atau deposit tanah yang berpotensi mengalami likuifaksi ketika diberikan beban siklik adalah pasir halus (*sand*), pasir berlumpur (*silty sand*), dan pasir lepas (*loose sand*). Karena hanya terjadi di tanah yang jenuh, likuifaksi umumnya terjadi di dekat sungai, teluk, atau badan air lainnya (Kramer, 1996).

Proses perubahan kondisi tanah pasir yang jenuh air akan menjadi cair akibat tekanan air pori yang meningkat hingga ke titik sama besar dengan tegangan total akibat adanya beban siklik sehingga tegangan efektif tanah akan berkurang hingga sama dengan nol. Hal ini menunjukkan bahwa likuifaksi merupakan fenomena suatu tanah kehilangan banyak kekuatan (*strength*) dan kekakuan (*stiffness*) dalam waktu yang singkat. Saat terjadi gempa, gaya geser yang ditimbulkan mengakibatkan pasir bereaksi sehingga tekanan air pori meningkat. Akibat getaran siklik yang terjadi dalam waktu singkat ini, tanah kehilangan banyak kekuatan atau kekakuannya sehingga tidak dapat mendukung struktur di atasnya dan menjaga untuk tetap stabil. (Jefferies dan Been, 2006).

Pasir dengan kepadatan lepas sampai sedang dan pasir berlumpur yang jenuh air cenderung bereaksi dengan beban siklik sehingga tanah kehilangan kuat geser akibat menurunnya tegangan efektif tanah seiring dengan meningkatnya tegangan air pori. Kondisi tanah pada saat terjadi likuifaksi dapat dinyatakan dalam Persamaan 2.1.

$$\sigma' = \sigma - u \dots\dots\dots (2.1)$$

dengan:

- σ' = tegangan efektif tanah (t/m^2)
 σ = tegangan total (t/m^2)
 u = tekanan air pori (t/m^2)

Menurut Das (1993) tegangan total dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.2.

$$\sigma = (H \cdot \gamma_d) + (H - H_A) \cdot \gamma_{sat} \dots\dots\dots (2.2)$$

dengan:

- σ = tegangan total (t/m^2)
 H = tinggi muka air diukur dari permukaan tanah (m)
 H_A = jarak antara titik A dengan muka air (m)
 γ_d = berat volume tanah kering (t/m^3)
 γ_{sat} = berat volume tanah jenuh air (t/m^3)

Sedangkan nilai rasio tekanan air pori tanah dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.3.

$$u = H_A \cdot \gamma_w \dots\dots\dots (2.3)$$

dengan:

- H_A = jarak antara titik A dengan muka air
 γ_w = berat volume air ($10 \text{ kN}/m^3$)

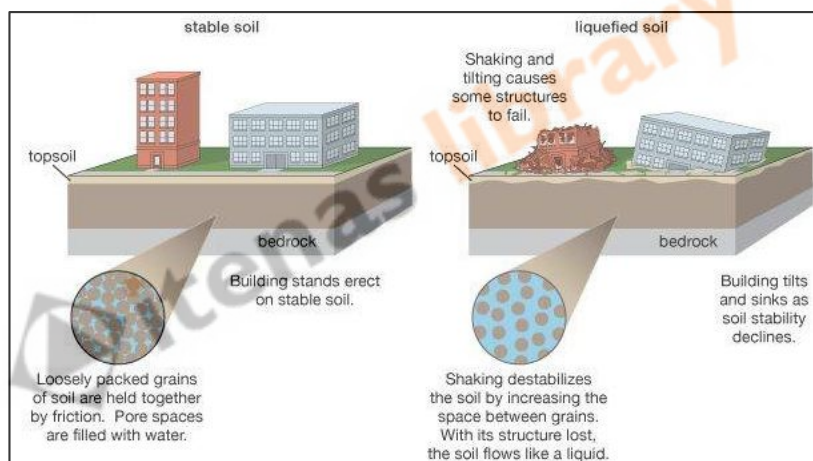
Peningkatan tekanan air pori menyebabkan aliran air naik ke permukaan tanah dalam bentuk semburan lumpur atau pasir. Untuk keadaan likuifaksi ini, tegangan efektif tanah menjadi sama dengan nol dan partikel tanah saling melepaskan seolah-olah mengambang di air. Struktur yang berada di atas endapan tanah pasir yang terlikuifaksi saat gempa bumi akan tenggelam atau jatuh dan saluran yang terkubur akan mengapung ke permukaan (Seed, 1970).

2.1.1 Proses Peristiwa Likuifaksi

Endapan atau deposit tanah pasir yang mempunyai muka air tanah di bawah permukaan rentan mengalami likuifaksi. Selama gempa bumi, tegangan geser siklik yang

disebabkan oleh rambatan gelombang geser menyebabkan pasir lepas bereaksi dan menghasilkan tekanan air pori yang meningkat. Akibat gelombang siklik yang terjadi begitu cepat, air pada tanah tidak mampu keluar. Meningkatnya tekanan air pori menyebabkan aliran air ke atas permukaan berupa semburan lumpur atau pasir. Tekanan air pori meningkat karena tanah yang bergerak mengakibatkan air mengalir ke atas dan mengubah pasir dari fase padat menjadi fase cair disebut likuifaksi (Day, 2001).

Pasir dengan kepadatan sedang sampai lepas dan memiliki elevasi muka air tanah yang tinggi, saat tidak ada getaran tanah akan stabil karena partikel tanah pasir saling mengunci (*interlocking*). Ketika terjadi gempa, volume tanah cenderung menyusut dan mengakibatkan peningkatan pada tekanan air pori sehingga kuat geser efektif tanah akan menurun. Pasir yang jenuh air akan mengisi ruang antar partikel sehingga kekuatan *interlocking* antara partikel hilang seperti pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Proses Terjadinya Likuifaksi

(Sumber: *Encyclopedia Britannica, Inc.* 2012)

Ishihara (1985) mengemukakan bahwa pada saat keadaan likuifaksi, tegangan efektif tanah sama dengan nol. Hal ini diakibatkan karena tekanan air pori meningkat hingga ke titik saat tegangan air pori sama besar dengan tegangan tanah. Karena kehilangan kuat geser tanah, partikel-partikel pasir yang mengunci saling melepaskan dan seolah-olah partikel pasir mengembang di air.

Setelah terjadi likuifaksi, tekanan air pori berlebih akan mulai terdisipasi. Lamanya waktu tanah tetap dalam keadaan cair bergantung pada 2 faktor utama, yaitu durasi getaran akibat gempa bumi dan kondisi drainase dari tanah yang terlikuifaksi. Semakin

lama dan kuat tegangan geser siklik akibat gempa, semakin lama likuifaksi terjadi. Ketika proses likuifaksi selesai, tanah dapat kembali memadat, ambles, atau kemungkinan tidak sempat untuk memadat.

2.1.2 Bahaya yang Ditimbulkan Akibat Likuifaksi

Salah satu penyebab paling dahsyat dari kerusakan struktur selama gempa bumi adalah terjadinya likuifaksi pada tanah pasir yang jenuh air. Menurut Idriss (2008), pada umumnya gejala yang ditimbulkan oleh likuifaksi dapat berupa semburan pasir (*sand boiling*) atau semburan lumpur (*mud spouts*) seperti pada Gambar 2.2 dan kerusakan pada permukaan seperti pada Gambar 2.2 sampai Gambar 2.5.



Gambar 2. 2 Likuifaksi di Kelurahan Petobo, Palu

(Sumber: Pemerintah Provinsi Sulawesi Tengah, 2018)



Gambar 2. 3 Retakan Tanah disertai Keluarnya Air dan Lumpur

(Sumber: Tim Pusat Studi Gempa Nasional, 2018)



Gambar 2. 4 *Lateral Spreading* di Daerah Bayan, Lombok Utara

(Sumber: Tim Pusat Studi Gempa Nasional, 2018)



Gambar 2. 5 Lubang Kerucut Terbalik di Daerah Sekitar dan Tepi Pantai di Lombok

(Sumber: Tim Pusat Studi Gempa Nasional, 2018)

Menurut Kramer (1996) terdapat 2 fenomena terkait gempa bumi yang menjadi pertimbangan dalam mengevaluasi likuifaksi, yaitu sebagai berikut:

1. *Flow Liquefaction*

Fenomena *flow liquefaction* terjadi akibat tegangan geser statis yang diperlukan lebih besar daripada tegangan geser tanah dalam kondisi likuifaksi ($\sigma_{\text{static}} > \sigma_{\text{residual}}$) sehingga menyebabkan terjadinya aliran-aliran dalam tanah. Pada umumnya *flow liquefaction* terjadi di tanah pasir lepas (*loose sand*) yang dapat dipicu oleh sumber getaran nonseismik seperti *pile driving*, getaran kereta api, eksplorasi geofisika, dan ledakan. *Flow liquefaction* dapat menyebabkan *foundation failures*.

2. *Cyclic Mobility*

Fenomena *cyclic mobility* dapat terjadi apabila dipicu oleh pembebanan siklik. *Cyclic mobility* dapat menyebabkan deformasi yang besar secara bertahap akibat adanya tekanan statis dan dinamis terjadi selama gempa bumi. Kondisi tanah saat *cyclic mobility* adalah tekanan geser statis lebih kecil dibandingkan dengan tegangan geser tanah dalam keadaan likuifaksi ($\sigma_{\text{static}} < \sigma_{\text{residual}}$). Pada umumnya *cyclic mobility* terjadi di tanah pasir yang relatif padat (*dense sand*).

2.2 Analisis Potensi Likuifaksi

Potensi likuifaksi yang mengakibatkan tanah kehilangan kekuatan dan kekakuan yang disebabkan oleh gempa bumi perlu dievaluasi. Laporan penyelidikan geoteknik akan menilai konsekuensi setiap potensi likuifaksi dan kehilangan kekuatan tanah, termasuk estimasi penurunan tanah, pengurangan daya dukung, dan tindakan mitigasi.

Seed dan Idriss (1967, 1971) mengusulkan metoda umum untuk mengevaluasi potensi likuifaksi. Langkah-langkah dalam mengevaluasi potensi likuifaksi adalah dengan menentukan jenis tanah, kedalaman muka air tanah, *Cyclic Stress Ratio* (CSR), *Cyclic Resistance Ratio* (CRR), dan *Safety of Factor* (FS).

2.2.1 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Likuifaksi

Ada banyak faktor yang dapat menyebabkan tanah mengalami proses likuifaksi. Berdasarkan hasil uji laboratorium serta observasi dan studi lapangan, menurut Day (2001) faktor-faktor tersebut diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Intensitas, durasi, dan karakteristik gempa bumi

Tanah akan mengalami likuifaksi apabila tanah tersebut diberikan getaran. Karakteristik gerakan tanah seperti percepatan dan durasi gempa dapat menentukan regangan geser yang menyebabkan reaksi antarpartikel tanah dan peningkatan tekanan air pori berlebih sehingga terjadi likuifaksi. Potensi likuifaksi meningkat seiring intensitas gempa dan lamanya guncangan terjadi. Gempa bumi yang

memiliki kekuatan tertinggi akan menghasilkan percepatan tanah maksimum pada tanah dasar atau *Peak Ground Acceleration* (PGA).

2. Muka air tanah

Kondisi yang paling rentan untuk likuifaksi adalah permukaan yang dekat dengan muka air tanah. Hal ini disebabkan karena tanah tidak jenuh yang terletak di atas permukaan air tanah tidak akan mengalami likuifaksi.

3. Jenis tanah

Ishihara (1985) menyatakan bahwa peristiwa likuifaksi yang pernah terjadi selama gempa bumi telah ditemukan dalam endapan yang terdiri dari pasir halus sampai sedang dan pasir yang mengandung rasio plastisitas yang rendah. Dengan demikian, jenis tanah yang rentan terhadap likuifaksi adalah tanah nonplastis (nonkohesif). Diperkirakan tanah nonkohesi yang rentan terhadap likuifaksi adalah pasir bersih (*clean sands*), pasir berlumpur nonplastis (*nonplastic silty sands*), lumpur nonplastis (*nonplastic silt*) dan kerikil (*gravel*).

4. Kepadatan relatif awal (*Initial relative density*)

Berdasarkan studi lapangan, tanah non-kohesif yang mempunyai kepadatan relatif yang lepas rentan terhadap likuifaksi. Jika tanah memiliki D_r yang semakin besar maka akan semakin besar tahanannya terhadap potensi likuifaksi.

5. Gradasi dan analisis butiran tanah

Tanah yang memiliki gradasi seragam (*uniformly graded soil*) cenderung tidak stabil dan lebih rentan terhadap likuifaksi daripada tanah yang bergradasi baik (*well-graded soil*). Tanah dengan gradasi baik memiliki partikel yang saling mengisi rongga dan mengurangi potensi kontraksi tanah sehingga menghasilkan tekanan air pori yang lebih sedikit selama gempa bumi. Selain itu, gradasi tanah pada D_{50} yang memiliki ukuran butir 0,15 mm hingga 0,35 mm berpotensi mengalami likuifaksi.

6. Kondisi drainase dan dimensi deposit atau endapan

Jika tekanan air pori berlebih dapat dengan cepat akan terdisipasi, maka kemungkinan tidak akan terjadi likuifaksi. Oleh karena itu, drainase dengan kerikil permabel atau lapisan kerikil dapat mengurangi potensi terjadinya likuifaksi. Selain itu, endapan alami yang terbentuk di danau, sungai, atau lautan cenderung membentuk lapisan konsistensi tanah lepas dan terjadi segregasi sehingga lebih

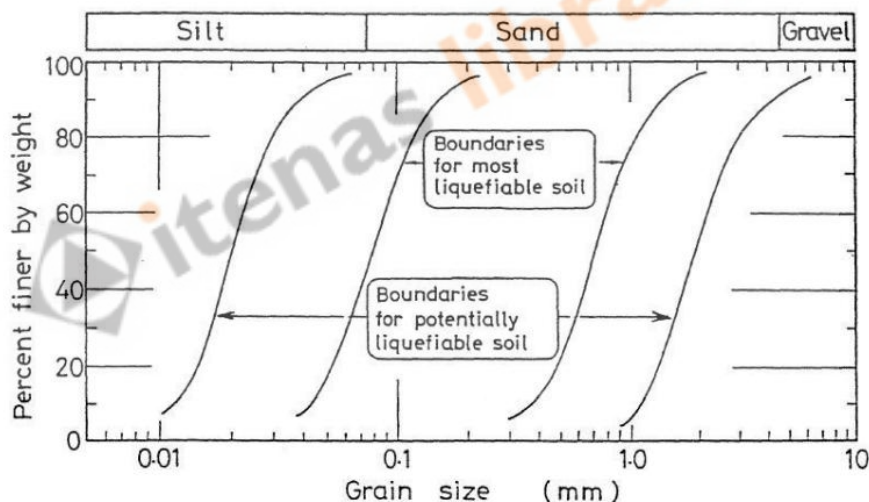
rentan terhadap likuifaksi. Tanah yang sangat rentan terhadap likuifaksi terbentuk di lingkungan pengendapan *lacustrine*, *alluvial*, dan *marine*.

7. Historis lingkungan

Menurut Finn et al. (1970) dan Seed et al. (1975), historis lingkungan tanah dapat mempengaruhi potensi likuifaksi. Misalnya, tanah yang sudah lama mengendap telah mengalami guncangan seismik akan meningkatkan ketahanan likuifaksi dibandingkan dengan tanah baru yang sama dan memiliki kerapatan identik.

2.2.2 Distribusi Ukuran Butiran Tanah

Jenis tanah yang rentan terhadap likuifaksi adalah tanah pasir lepas sampai medium yang jenuh. Tsuchida (1970) meringkas hasil analisis saringan pada sejumlah tanah yang diketahui telah terlikuifaksi dan yang tidak terlikuifaksi selama gempa bumi. Kurva ukuran butir yang memisahkan tanah yang dapat terlikuifaksi dan tidak ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Kurva Distribusi Ukuran Butir Tanah yang Rentan Terhadap Likuifaksi (Tsuchida, 1970)

(Sumber: *Geotechnical Engineering Buereau*, 2015)

Terdapat 3 paramater dasar yang dapat ditentukan dari kurva distribusi ukuran butir dan hasilnya dapat mengklasifikasikan tanah berdasarkan bentuk butiran. Paramater tersebut antara lain adalah sebagai berikut:

1. Ukuran efektif (*effective size*) adalah ukuran butiran yang bersesuaian dengan 10% lolos saringan (D_{10}).

2. Koefisien keseragaman (*coefficient of uniformity*, C_u) dapat dinyatakan dalam Persamaan 2.4.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \dots\dots\dots (2.4)$$

dengan:

C_u = Koefisien keseragaman

D_{60} = Diameter saringan ketika lolos 60%

3. Koefisien kelengkungan (*coefficient of curvature*, C_c) dinyatakan dalam Persamaan 2.5.

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} \dots\dots\dots (2.5)$$

dengan:

C_c = Koefisien kelengkungan

D_{30} = Diameter saringan ketika lolos 30%

Apabila tanah memiliki nilai C_u sama dengan 1 maka tanah hanya memiliki 1 ukuran butir, apabila nilai C_u antara 2 sampai 3 maka tanah memiliki gradasi buruk, dan nilai C_u lebih besar dari 15 maka tanah memiliki gradasi baik.

2.3 Metode Evaluasi Likuifaksi

Langkah pertama dalam mengevaluasi likuifaksi adalah menentukan apakah tanah memiliki kemampuan untuk mencair (*liquefable*) saat diberikan getaran. Sebagian besar tanah yang rentan terhadap likuifaksi adalah tanah nonkohesi. Metode analisis yang paling umum digunakan untuk menentukan potensi likuifaksi adalah dengan menggunakan uji penetrasi standar (SPT) seperti yang dikemukakan oleh Seed *et al.* (1985). Metode tersebut diusulkan oleh Seed dan Idriss (1971) dan disebut dengan *simplified procedure*.

2.3.1 Cyclic Stress Ratio (CSR)

Likuifaksi yang terjadi pada tanah pasir jenuh dapat disebabkan oleh *seismic stress ratio* (SSR) atau biasa disebut *Cyclic Stress Ratio* (CSR) yang diakibatkan oleh gempa bumi. Besarnya CSR dipengaruhi oleh percepatan gempa maksimum, percepatan bumi, tegangan tanah total, tegangan tanah efektif, dan reduksi faktor kedalaman.

Seed dan Idriss (1971) mengembangkan metode dengan membandingkan rasio tegangan siklik akibat gempa bumi atau CSR dengan rasio ketahanan siklik tanah atau CRR. Nilai CSR dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.6

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_v} = 0,65 \frac{\tau_{max}}{\sigma'_v} = 0,65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) r_d \dots\dots\dots(2.6)$$

dengan:

CSR = tegangan siklik yang menyebabkan likuifaksi atau *cyclic stress ratio*

τ_{max} = tegangan geser siklik

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

σ'_v = tegangan *overburden* vertikal efektif (t/m^2)

a_{max} = percepatan permukaan tanah maksimum arah horizontal (m/s^2)

r_d = koefisien reduksi kedalaman

g = percepatan gravitasi $9,81 m/s^2$

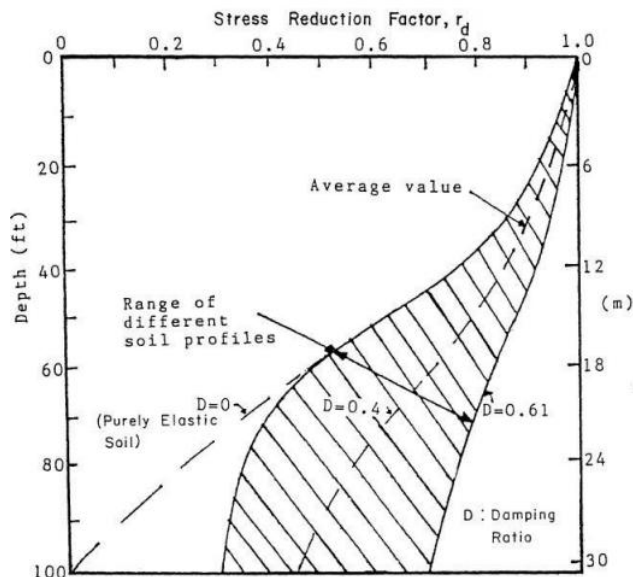
Untuk memperhitungkan koefisien reduksi tegangan, Liao dan Whitman (1986) mengembangkan persamaan untuk mengestimasi reduksi tegangan. Besarnya koefisien reduksi tegangan dapat dihitung berdasarkan persamaan 2.7a sampai 2.7d atau menggunakan grafik hubungan antara koefisien reduksi tegangan dengan kedalaman seperti pada Gambar 2.7.

$$r_d = 1,0 - 0,00765z \quad \text{untuk } z \leq 9,15 \text{ m} \dots\dots\dots(2.7a)$$

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

$$r_d = 0,774 - 0,008z \quad \text{untuk } 23 \text{ m} < z \leq 30 \text{ m} \dots\dots\dots(2.7c)$$

$$r_d = 0,5 \quad \text{untuk } z \geq 30 \text{ m} \dots\dots\dots(2.7d)$$



Gambar 2. 7 Faktor Reduksi Tegangan dan Kedalaman

(Sumber: Seed dan Idriss, 1970)

2.3.2 Cyclic Resistance Ratio (CRR)

Kemampuan tanah untuk menahan likuifaksi atau *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) dapat ditentukan berdasarkan data hasil uji. Nilai CRR bergantung dari data hasil uji seperti hasil uji CPT atau SPT karena pada umumnya berkorelasi dengan parameter *in situ*, seperti nilai penetrasi resisten CPT, jumlah pukulan SPT, atau kecepatan gelombang geser, V_s (Idriss dan Boulanger, 2008).

Jika nilai tahanan tanah terhadap likuifaksi atau *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) lebih besar dari pembebanan yang terjadi atau *Cyclic Stress Ratio* (CSR) maka tanah aman dari likuifaksi. Namun apabila nilai CRR lebih kecil dari CSR maka tanah tidak aman dari likuifaksi.

2.3.3 Safety of Factor (FS)

Untuk mengetahui faktor keamanan terhadap likuifaksi dapat menggunakan Persamaan 2.8.

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \dots\dots\dots(2.8)$$

Martin dan Lew (1999) mengusulkan nilai faktor keamanan terhadap potensi likuifaksi sebesar 1,3. Kondisi tanah dengan nilai faktor keamanan kurang dari 1,3 akan memiliki kemungkinan terjadi likuifaksi, apabila tanah memiliki faktor keamanan sama dengan 1,3 maka kondisi tanah berada di kondisi kritis, dan tanah dengan faktor keamanan lebih dari 1,3 akan aman dari likuifaksi.

2.3.4 Liquefaction Potential Index (LPI)

Liquefaction potential index (LPI) adalah parameter untuk mengevaluasi potensi likuifaksi secara regional. Nilai LPI dihitung dengan mengintegrasikan faktor keamanan (FS) pada kedalaman 0 – 20 m. Iwasaki *et al.* (1978, 1982) mengembangkan metode LPI karena menganggap bahwa kerusakan likuifaksi yang sebanding terhadap ketebalan lapisan, jarak antara tanah terlikuifaksi dengan permukaan, dan faktor keamanan dalam Persamaan 2.9.

$$LPI = \int_0^{20} F(z)w(z)dz \dots\dots\dots (2.9)$$

dengan:

- z = Kedalaman lapisan pasir (0 – 20 m)
- F = Faktor keamanan pada tanah yang likuifaksi
- w(z) = Faktor beban yang dipengaruhi kedalaman

Ada beberapa faktor yang menjadi syarat untuk menentukan besarnya faktor beban dan faktor keamanan pada kedalaman 0 – 20 m. Faktor tersebut adalah sebagai berikut:

$F(z) = 1 - FK$	untuk $FK < 1$
$F(z) = 0$	untuk $FK \geq 1$
$w(z) = 10 - 0,5z$	untuk $z < 20$ m
$w(z) = 0$	untuk $z \geq 20$ m

Nilai LPI disesuaikan dengan Tabel 2.1. untuk menentukan kerusakan tanah akibat likuifaksi.

Tabel 2. 1 Nilai Kekuatan Tanah Berdasarkan *Liquefaction Potential Index* (LPI)

LPI	Iwasaki <i>et al.</i> (1982)	Luna and Frost (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>
15 < LPI	<i>Very high</i>	<i>Major</i>	<i>High</i>

(Sumber: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2012)

2.4 Analisis Potensi Likuifaksi Berdasarkan Data CPT

Keuntungan utama menggunakan data hasil CPT adalah profil atau properties yang lebih detail dan terus dikembangkan untuk interpretasi stratigrafi. Data hasil CPT umumnya lebih konsisten dan berulang daripada hasil dari pengujian penetrasi lainnya. Profil yang menerus juga memungkinkan definisi lapisan tanah yang lebih rinci. Kemampuan stratigrafi ini membuat CPT sangat menguntungkan untuk mengembangkan profil ketahanan likuifaksi. Namun demikian, interpretasi berdasarkan data CPT harus diverifikasi dengan beberapa lubang bor yang ditempatkan berdekatan.

^Dalam metode Youd dan Idriss (2001) prosedur menganalisis menggunakan CPT membutuhkan normalisasi nilai tahanan ujung (q_c). Normalisasi ini menghasilkan nilai q_{c1N} yang dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.10.

$$q_{c1N} = C_q \times \left(\frac{q_c}{P_a}\right) \dots\dots\dots (2.10)$$

dengan:

q_{c1N} = Tahanan ujung yang terkoreksi

C_q = Faktor normalisasi

q_c = Tahanan ujung konus (kg/cm^2)

Dengan faktor normalisasi tahanan ujung konus dihitung menggunakan Persamaan 2.11.

$$C_q = \left(\frac{q_c}{P_a}\right)^n \dots\dots\dots (2.11)$$

Rasio gesekan atau *Friction Ratio* (FR) pada CPT pada umumnya akan meningkat seiring dengan meningkatnya *finer content* dan plastisitas tanah yang memungkinkan

perkiraan jenis tanah dan *finer content* yang dapat ditentukan berdasarkan data CPT. Batas-batas antara jenis tanah dapat diperkirakan berdasarkan nilai lingkaran kosentris (*concentric circles*) atau jari-jari lingkaran yang dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.12.

$$I_c = [(3,47 - \log Q)^2 + (1,22 + \log F)^2]^{0,5} \dots\dots\dots (2.12)$$

Dengan nilai Q dan F yang dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.13a dan 2.13b. Untuk *clean sand* eksponen yang sesuai yaitu $n = 0,5$ dan untuk *silt* dan *silty sand* menggunakan eksponen $n = 1$.

$$Q = \left[\frac{q_c - \sigma_{vo}}{P_a} \right] \left[\frac{P_a}{\sigma_{vo}} \right]^2 \dots\dots\dots (2.13a)$$

$$F = \left[\frac{f_s}{q_c - \sigma'_{vo}} \right] \times 100 \dots\dots\dots (2.13b)$$

Youd dan Idriss (2001) mengusulkan untuk mengoreksi nilai (q_{c1N}) terhadap *clean sand* sehingga digunakan Persamaan 2.14.

$$(q_{c1N})_{CS} = K_c \times (q_{c1N}) \dots\dots\dots (2.14)$$

Untuk menentukan nilai CRR, digunakan persamaan berikut 2.15a atau 2.15b.

Jika $(q_{c1N})_{CS} < 211$

$$CRR_{7.5} = \exp\left[\left(\frac{(q_{c1N})_{cs}}{540}\right) + \left(\frac{(q_{c1N})_{cs}}{67}\right)^2 - \left(\frac{(q_{c1N})_{cs}}{80}\right)^3 + \left(\frac{(q_{c1N})_{cs}}{114}\right)^4 - 3\right] \dots\dots\dots (2.15a)$$

Jika $(q_{c1N})_{CS} > 211$

$$CRR_{7.5} = 2 \dots\dots\dots (2.15b)$$

2.5 Analisis Potensi Likuifaksi Berdasarkan Data SPT

Nilai N-SPT yang diukur dapat dipengaruhi oleh jenis tanah, seperti tanah jenuh yang didominasi oleh pasir. Lanau atau pasir kelempungan dapat memberikan nilai N tinggi jika memiliki kecenderungan untuk melebar dan memberikan nilai N rendah jika cenderung bereaksi selama kondisi *undrained shear*. Metode untuk menentukan rasio stres siklik (CSR) sebagai suatu fungsi N dalam SPT diusulkan oleh Seed *et al.* (1982) atas dasar kinerja endapan pasir selama gempa bumi.

2.5.1 Metode Seed *et al.* (1985)

Hubungan yang diperoleh adalah nilai koreksi SPT $(N_1)_{60}$ terhadap CSR pada gempa dengan magnitudo $M = 7,5$. Nilai koreksi SPT terhadap 60% energi efektif dihitung menggunakan Persamaan 2.16.

$$(N_1)_{60} = N_m \cdot C_N \cdot \eta = N_m \cdot \frac{2,2}{1,2 + \frac{\sigma_v'}{P_a}} \cdot 60\% \dots\dots\dots (2.16)$$

dengan:

N_{60} = uji penetrasi standar nilai N dikoreksi untuk prosedur pengujian lapangan

N_m = N-SPT yang diperoleh dari hasil uji di lapangan

C_N = koreksi faktor tegangan *overburden*

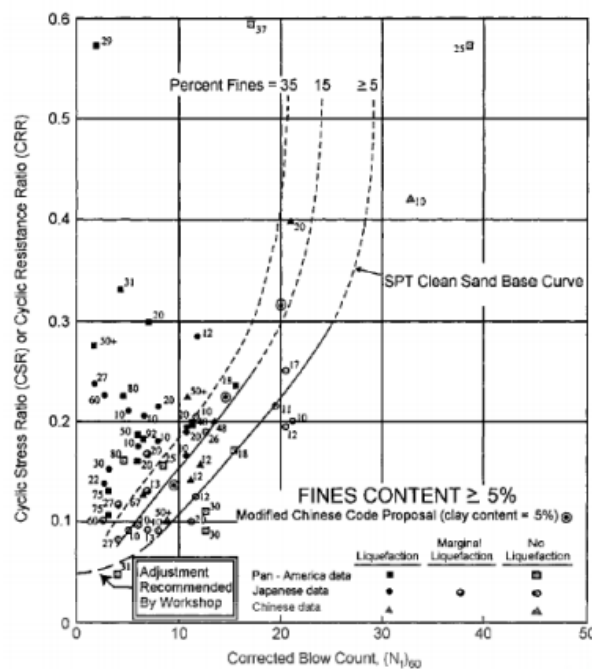
Menurut penelitian yang telah dilakukan oleh Seed *et al.* (1985), disimpulkan bahwa potensi kerusakan dapat diidentifikasi berdasarkan N-SPT yang tercantum pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Potensi Kerusakan Akibat Likuifaksi Berdasarkan N-SPT

$(N_1)_{60}$	Potensi kerusakan
0 – 20	Tinggi
20 – 30	Sedang
> 30	Kerusakan tidak signifikan

(Sumber: Day, 2001)

Nilai CSR didapat berdasarkan persamaan 2.56 Namun untuk mendapatkan nilai CRR diperlukan nilai koreksi SPT $(N_1)_{60}$ yang akan diplot ke dalam grafik hubungan antara CRR dengan $(N_1)_{60}$ seperti pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Grafik Hubungan Antara $(N_1)_{60}$ dengan Nilai CRR

(Sumber: Kramer, 1996)

2.5.2 Metode Youd and Idriss (2001)

Selama 25 tahun terakhir metode yang dikenal dengan “*simplified procedure*” telah digunakan sebagai standar untuk mengevaluasi ketahanan tanah terhadap likuifaksi. Sejak saat itu, “*simplified procedure*” yang diusulkan oleh Seed dan Idriss (1971) mengalami modifikasi dan perbaikan secara berkala. Pada tahun 1996, T. L. Youd dan I. M. Idriss mengadakan *workshop* yang terdiri dari 20 ahli untuk memperbaharui *simplified procedure* dan menambahkan penelitian yang ditemukan dari dekade sebelumnya.

Ruang lingkup *workshop* dibatasi pada prosedur untuk mengevaluasi ketahanan likuifaksi di bawah permukaan tanah yang landai. Youd dan Idriss (2001) mengusulkan metode analisis likuifaksi dengan memperhitungkan nilai *cyclic stress ratio*, faktor reduksi kedalaman, dan *cyclic resistance ratio* menggunakan nilai SPT yang telah dikoreksi $(N_1)_{60}$ berdasarkan *finer content*.

Dalam menentukan nilai CSR, Youd dan Idriss (2001) menghitung berdasarkan rumus 2.3 sama seperti yang digunakan oleh Seed *et al.* (1985). Perhitungan pada nilai SPT yang dikoreksi dipengaruhi oleh panjang *rod*, energi *hammer*, detail sampel, ukuran

lubang bor, dan tekanan *overburden effective*. Untuk mendapatkan nilai SPT yang terkoreksi digunakan persamaan 2.17.

$$(N_1)_{60} = C_N C_E C_R C_B C_S N_m \dots\dots\dots (2.17)$$

dengan:

C_N = faktor normalisasi N_m terhadap tegangan *overburden*

C_E = faktor koreksi rasio *energy hammer* (ER)

C_R = faktor koreksi panjang batang

C_B = faktor koreksi diameter lubang bor

C_S = faktor koreksi sampel

N_m = N-SPT yang diperoleh dari hasil uji di lapangan

Berdasarkan Seed dan Idriss (1982), diperlukannya faktor koreksi untuk menghitung tegangan *overburden* yang diakibatkan karena adanya peningkatan nilai N-SPT yang dihitung berdasarkan persamaan 2.18. (1 Pa = 1 atm)

$$C_N = \frac{2,2}{(1,2 + \frac{\sigma_{vo}}{Pa})} \dots\dots\dots (2.18)$$

Robertson dan Wride (1998) menguraikan nilai faktor koreksi terhadap SPT yang telah dimodifikasi dari Skempton (1986) pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Faktor Koreksi N-SPT

Factor	Equipment Variable	Term	Correction
Overburden pressure	-	C_N	
Overburden pressure	-	C_N	
Energy ratio	Donut hammer	C_E	0,5 - 1,0
Energy ratio	Safety hammer	C_E	0,7 - 1,2
Energy ratio	Automatic-trip Donut type hammer	C_E	0,8 - 1,3
Borehole diameter	65 - 115 mm	C_B	1
Borehole diameter	150 mm	C_B	1,05
Borehole diameter	200 mm	C_B	1,15
Rod length	< 3 mm	C_R	0,75
Rod length	3 - 4 mm	C_R	0,8
Rod length	4 - 6 mm	C_R	0,85
Rod length	6 - 10 mm	C_R	0,95
Rod length	10 - 30 mm	C_R	1,0
Sampling method	Standard sampler	C_s	1,0
Sampling method	Sampler without liners	C_s	1,1 - 1,3

(Sumber: *Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, 2001)

Youd dan Idriss (2001) meneruskan prosedur yang telah dikerjakan oleh Seed *et al.* (1985) dengan memperkirakan koreksi terhadap *finer content* (FC) untuk nilai koreksi $(N_1)_{60}$ agar ekuivalen dengan pasir bersih dengan menggunakan persamaan 2.19.

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta \cdot (N_1)_{60} \dots\dots\dots (2.19)$$

Dengan α dan β merupakan koefisien yang dapat ditentukan dengan persamaan 2.20a sampai dengan persamaan 2.20d.

$$\alpha = 0, \beta = 1 \quad \text{FC} \leq 5\% \dots\dots\dots (2.20a)$$

$$\alpha = \exp [1,76 - (190/\text{FC}^2)] \quad 5\% < \text{FC} < 35\% \dots\dots\dots (2.20b)$$

$$\beta = [0,99 - (\text{FC}^{1.5}/1000)] \quad 5\% < \text{FC} < 35\% \dots\dots\dots (2.20c)$$

$$\alpha = 5, \beta = 1,2 \quad \text{FC} \geq 35\% \dots\dots\dots (2.20d)$$

Korelasi nilai CRR dengan nilai SPT yang telah dikoreksi dan gempa bumi dengan magnitudo $M = 7,5$ dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.21.

$$\text{CRR}_{7,5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60cs}} + \frac{(N_1)_{60cs}}{135} + \frac{50}{[10 \times (N_1)_{60cs} + 45]^2} - \frac{1}{200} \dots\dots\dots (2.21)$$

Persamaan yang diusulkan oleh Youd dan Idriss (2001) berlaku untuk gempa bumi dengan dengan kekuatan 7,5 SR. Semakin tinggi magnitudo gempa, semakin lama durasi guncangan tanah. Dengan demikian semakin besarnya magnitudo maka jumlah siklik yang dihasilkan akan lebih besar. Untuk menyesuaikan dengan magnitudo yang lebih besar atau lebih kecil, Seed dan Idriss (1982) memperkenalkan faktor penskaln besaran atau yang disebut *magnitude scale factor* (MSF) seperti pada Persamaan 2.22.

$$MSF = \frac{10^{2,24}}{M_w^{2,56}} \dots\dots\dots(2.22)$$

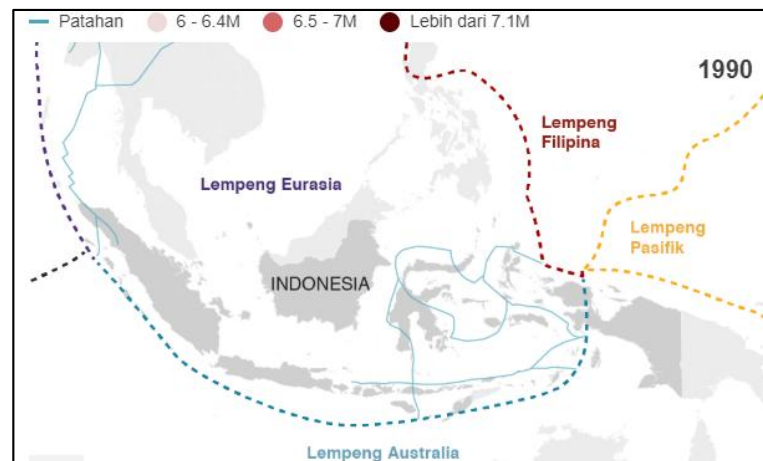
dengan:

MSF = *Magnitude Scale Factor*

M_w = Kekuatan gempa bumi \neq 7,5 SR

2.6 Gempa Bumi

Sunarjo *et al.* (2010) mengemukakan bahwa gempa bumi merupakan peristiwa terjadinya getaran atau guncangan bumi secara tiba-tiba karena adanya pergeseran lapisan batuan pada kulit bumi akibat pergerakan lempeng tektonik. Energi yang dipancarkan akibat pergerakan dari lapisan batuan di dalam bumi berupa gelombang gempa atau seismik. Gempa bumi selalu datang secara mendadak tanpa didahului dengan tanda atau gejala yang muncul sebelum kejadian. Hal ini mengakibatkan guncangan yang terjadi menimbulkan kepanikan umum dan merusak segala sesuatu di permukaan bumi. Indonesia menjadi salah satu negara yang rawan gempa bumi karena termasuk ke dalam daerah kegempaan aktif. Letak Indonesia berada di pertemuan 3 lempeng utama dunia, yaitu lempeng Australia, Eurasia, dan Pasifik seperti pada Gambar 2. 9.



Gambar 2. 9 Lempeng Tektonik Indonesia

(Sumber: *United State Geological Survey*, 2018)

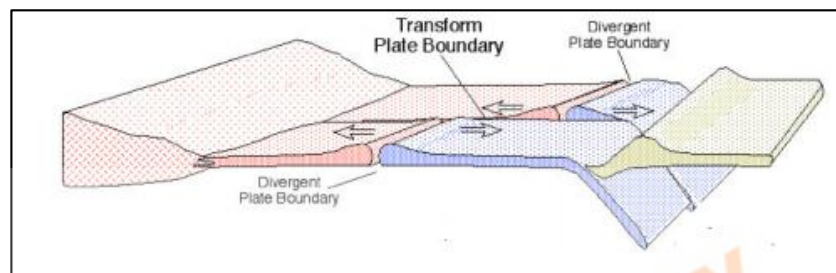
Pulau Sumatera, lepas pantai selatan Pulau Jawa, lepas pantai selatan Kepulauan Nusa Tenggara, dan perairan Maluku sebelah selatan dilalui oleh tumbukan lempeng Eurasia dan Australia. Sementara tumbukan lempeng Australia dan Pasifik terjadi di Pulau Papua. Berdasarkan data dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana (2019) sepanjang tahun 2010–2019 telah terjadi sedikitnya 134 kali gempa bumi dengan magnitudo $M > 5.0$ di Indonesia.

Ketika gempa bumi terjadi, gelombang seismik yang memancar dari sumbernya akan bergerak dengan cepat melalui kerak bumi. Gelombang seismik yang telah mencapai permukaan tanah akan menghasilkan getaran yang berlangsung dari detik hingga menit. Kekuatan dan durasi getaran di suatu lokasi bergantung pada ukuran gempa, lokasi terjadinya, dan karakteristik lokasi tersebut. Getaran gempa dapat dianggap sebagai hal paling penting dari semua bahaya karena dapat mengakibatkan bahaya lainnya atau *secondary fault* (Kramer, 1996).

Menurut Hidayat dan Santoso (1997) gempa tektonik adalah salah satu gempa bumi yang mempunyai pengaruh mengerikan sehingga perlu diperhatikan. Beberapa hal yang perlu diketahui diantaranya mengenai besarnya frekuensi yang terjadi, energi yang dibebaskan, dan luas pengaruh dalam kaitannya dengan pergerakan lempeng tektonik. Kious dan Tilling (1996) membedakan batas lempeng menjadi 3 tipe, yaitu:

1. Batas divergen atau konstruktif (*Divergent boundary*)

Batas divergen terjadi ketika 2 lempeng bergerak saling menjauh seperti pada Gambar 2.10. Gaya tarik (*tensional force*) yang terjadi antar lempeng menyebabkan naiknya magma ke permukaan sehingga membentuk material baru berupa lava dan mengakibatkan lempeng saling menjauh. Salah satu akibatnya adalah naiknya material dari mantel bumi sehingga membentuk Perbukitan Tengah Samudra (*Mid Oceanic Ridges*) yang berada di dasar Samudra Atlantik.

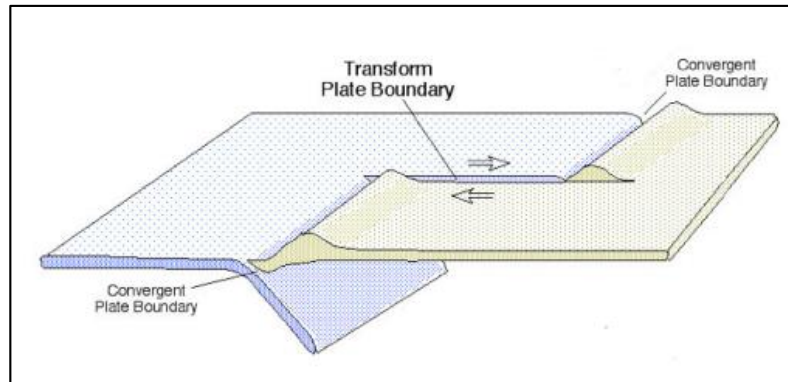


Gambar 2. 10 Batas Divergen (*Divergent Boundary*)

(Sumber: Railsback, 2002)

2. Batas konvergen atau destruktif (*Convergent boundary*)

Batas konvergen terjadi ketika lempeng saling bertumbukan seperti pada Gambar 2.11. Batas konvergen dapat dibedakan menjadi 2, yaitu batas subduksi (*subduction*) dan batas obduksi (*obduction*). Batas subduksi merupakan batas lempeng yang berupa tumbukan dengan salah satu lempeng menghunjam ke dalam mantel sehingga dapat membentuk palung. Sedangkan batas obduksi merupakan hasil tumbukan lempeng benua dengan benua yang membentuk suatu rangkaian pegunungan. Selain itu, batas konvergen memiliki 3 jenis batas, yaitu lempeng samudera dengan lempeng samudera, lempeng benua dengan lempeng benua, dan lempeng samudera dengan lempeng benua.

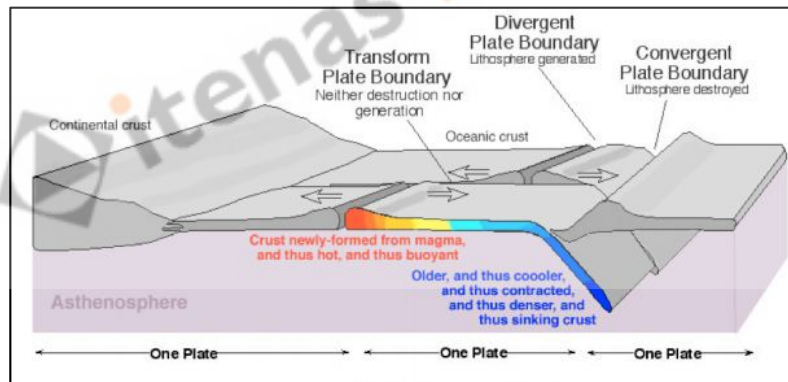


Gambar 2. 11 Batas Konvergen (*Convergent Boundary*)

(Sumber: Railsback, 2002)

3. Batas transform (*Transform boundary*)

Batas transform atau disebut juga dengan batas geser (*shear boundary*) atau batas konservatif merupakan batas yang tidak menghasilkan atau pun menghancurkan litosfer. Pada batas transform, lempeng-lempeng saling berinteraksi, bergeser, dan bergerak relatif mendatar dipengaruhi oleh rotasi bumi pada sumbunya dan menghasilkan suatu sesar mendatar (*strike slip fault*) seperti pada Gambar. 2.12.



Gambar 2. 12 Batas Transform (*Transform Boundary*)

(Sumber: Railsback, 2002)

2.6.1 Parameter Gempa

Parameter gempa yang menyebabkan pergerakan tanah sangat penting untuk menggambarkan karakteristik gempa yang terjadi. Menurut Kramer (1996) ada beberapa parameter yang mempengaruhi kekuatan gempa, diantaranya:

1. Amplitudo

Kekuatan gempa dapat digambarkan dalam bentuk gelombang. Parameter gelombang yang tercatat dapat berupa hubungan antara waktu dengan percepatan, kecepatan, atau perpindahan.

2. Waktu kejadian gempa bumi (*Origin time*)

Waktu kejadian gempa bumi atau *origin time* adalah waktu pada saat terlepasnya akumulasi tegangan berupa gelombang gempa yang dinyatakan dalam hari, tanggal, bulan, tahun, jam, menit, dan detik dalam satuan UTC (*Universal Time Coordinated*).

3. Durasi

Durasi guncangan berkaitan dengan waktu yang diperlukan untuk melepaskan energi yang terakumulasi oleh guncangan di sepanjang patahan. Lamanya durasi guncangan yang besar dapat memberikan pengaruh besar terhadap kerusakan akibat gempa bumi. Guncangan yang berdurasi pendek memiliki kemungkinan tidak cukup merusak struktur meskipun mempunyai amplitudo yang tinggi.

4. Hiposenter

Hiposenter merupakan titik pusat terjadinya gempa bumi. Menurut Howell (1969) terdapat beberapa jenis gempa bumi berdasarkan kedalaman hiposentrumnya, diantaranya:

- a. Gempa bumi dangkal dengan pusat kedalaman < 70 km
- b. Gempa bumi sedang dengan pusat kedalaman $70 - 300$ km
- c. Gempa bumi dalam dengan pusat kedalaman $300 - 700$ km

5. Episenter

Episenter merupakan lokasi di permukaan tanah yang tegak lurus dengan hiposenter atau titik awal terjadinya gempa.

6. Kekuatan gempa bumi atau magnitudo

Besarnya energi yang dilepaskan saat gempa terjadi disebut dengan kekuatan gempa atau magnitudo gempa. Untuk dapat menggambarkan besarnya gempa bumi digunakan alat yang disebut seismograf. Saat gempa bumi terjadi, seismograf memantau kekuatan gempa bumi kemudian dicatat dalam seismogram. Kekuatan gempa dapat dibedakan menjadi beberapa kelas seperti pada Tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Kekuatan Gempa Bumi Berdasarkan Kelas

Magnitudo Gempa	Kelas Kekuatan	Pengaruh akibat Gempa
$\leq 2,9$	<i>Micro</i>	Tidak terasa
3 - 3,9	<i>Minor</i>	Pada umumnya tidak dirasakan, dapat direkam dengan seismograf
4 - 4,9	<i>Light</i>	Sering dirasakan, hanya menyebabkan kerusakan ringan
5 - 5,9	<i>Moderate</i>	Kerusakan ringan pada bangunan dan struktur yang lain
6 - 6,9	<i>Strong</i>	Kemungkinan dapat menyebabkan kerusakan di daerah populasi padat
7 - 7,9	<i>Major</i>	Gempa besar, menimbulkan kerusakan serius
8 - 8,9	<i>Great</i>	Dapat menghancurkan daerah dekat pusat gempa
≥ 9	<i>Great and rare</i>	

(Sumber: *United State Geological Survey*, 2005)

2.6.2 Ukuran Kekuatan Gempa

Untuk mengukur kekuatan gempa yang terjadi dapat diketahui berdasarkan ukuran kekuatan atau magnitudo gempa dan dari intensitas gempa. Magnitudo diperhitungkan berdasarkan besarnya energi yang dilepaskan, sedangkan intensitas gempa berdasarkan berapa besar kerusakan yang terjadi (Day, 2001).

Pada umumnya para ahli seismologis menggunakan skala magnitudo yang berbeda. Beberapa diantaranya adalah sebagai berikut:

1. *Local Magnitude Scale (M_L)*

Magnitudo gempa diukur dengan seismograf standar berdasarkan perpindahan gerakan tanah. Salah satunya adalah *local magnitude scale* atau dikenal dengan skala Richter (SR).

Meningkatnya energi yang dilepaskan mengakibatkan percepatan tanah maksimum (a_{\max}) dan durasi bergetar ikut meningkat. Pada Tabel 2.5 dijelaskan mengenai korelasi

antara *local magnitude* (M_L) dengan percepatan tanah maksimum (a_{max}), durasi bergetar, dan skala Modified Mercalli Intensity (MMI).

Tabel 2. 5 Nilai Korelasi Antara Skala Richter dengan Percepatan Tanah Maksimum, Durasi Bergetar, dan Skala MMI

Skala Richter (SR)	Percepatan Maksimum Tanah (a_{max})	Durasi Tanah Bergetar di Daerah Sekitar (detik)	Modified Mercalli Intensity (MMI)
≤ 2	-	-	I - II
3	-	-	III
4	-	-	IV - V
5	0,09 g	2	VI - VII
6	0,22 g	12	VII - VIII
7	0,37 g	24	IX - X
≥ 8	0,50 g	34	XI - XII

(Sumber: Day, 2001)

2. *Surface Wave Magnitude Scale* (M_S)

Surface wave magnitude dihitung berdasarkan amplitudo pada gelombang permukaan yang memiliki periode 20 detik.

3. *Moment Magnitude Scale* (M_W)

Untuk memperhitungkan kekuatan gempa besar, metode yang umum digunakan adalah skala magnitudo momen. Pada skala magnitudo momen seluruh ukuran gempa cenderung diperhitungkan. Salah satunya adalah momen seismik (M_0). Momen seismik ditentukan berdasarkan radius pengaruh di permukaan.

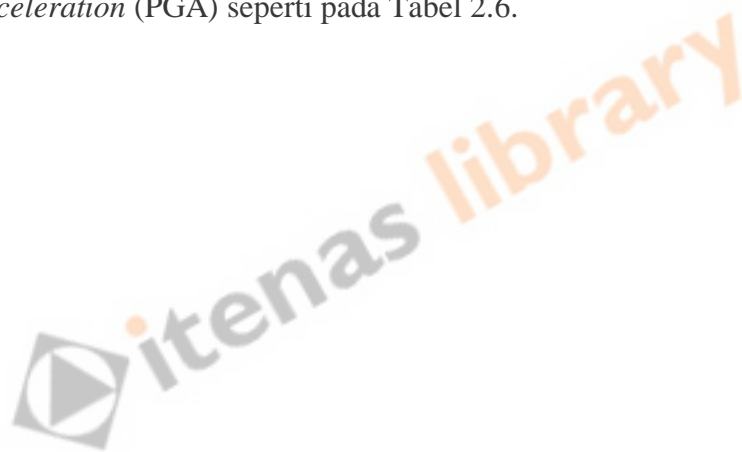
2.6.3 Intensitas Gempa

Day (2001) mengemukakan bahwa intensitas gempa merupakan pengukuran berdasarkan pengamatan struktur yang rusak dan adanya efek sekunder, seperti tanah longsor akibat gempa, likuifaksi, dan tanah retak. Intensitas gempa juga didasarkan pada sejauh mana gempa dirasakan oleh individu. Skala yang paling umum digunakan untuk menentukan gempa adalah skala Modified Mercalli Intensity (MMI).

2.6.4 Dampak Gempa

Gempa bumi adalah salah satu peristiwa yang tidak dapat dihidari dan sulit untuk diprediksi. Banyak kerugian dan korban jiwa yang disebabkan oleh guncangan yang terjadi secara tiba-tiba. Dampak dan tingkat kerusakan yang terjadi akibat gempa bumi dapat diperkirakan dalam skala Modified Mercalli Intensity (MMI) dan Skala Intensitas Gempabumi BMKG (SIG-BMKG). Tujuan penyusunan skala intensitas adalah agar masyarakat bisa lebih baik dan akurat dalam memahami tingkatan dampak yang terjadi akibat gempa bumi.

Deskripsi pada SIG-BMKG relatif lebih sederhana dalam penyampaiannya dibandingkan dengan skala MMI. Pada SIG-BMKG dijelaskan secara rinci dengan keterangan warna dan nilai percepatan tanah maksimum di batuan dasar atau *Peak Ground Acceleration* (PGA) seperti pada Tabel 2.6.



Tabel 2. 6 Ukuran Kekuatan Gempa Berdasarkan Skala Intensitas Gempabumi BMKG (SIG-BMKG)

Skala SIG BMKG	Warna	Deskripsi Sederhana	Deskripsi Rinci	Skala MMI	PGA
I	Putih	Tidak dirasakan (<i>No felt</i>)	Tidak dirasakan atau dirasakan hanya oleh beberapa orang tetapi terekam oleh alat.	I-II	< 2,9
II	Hijau	Dirasakan (<i>Felt</i>)	Dirasakan oleh orang banyak tetapi tidak menimbulkan kerusakan. Benda-benda ringan yang digantung bergoyang dan jendela kaca bergetar.	III-V	2,9 – 99
III	Kuning	Kerusakan ringan (<i>Slight damage</i>)	Bagian non struktur bangunan mengalami kerusakan ringan, seperti retak rambut pada dinding, atap bergeser ke bawah dan sebagian berjatuhan.	VI	89 – 167
IV	Jingga	Kerusakan sedang (<i>Moderate damage</i>)	Banyak retakan terjadi pada dinding bangunan sederhana, sebagian roboh, kaca pecah. Sebagian plester dinding lepas. Hampir sebagian besar atap bergeser ke bawah atau jatuh. Struktur bangunan mengalami kerusakan ringan sampai sedang.	VII-VIII	168 - 564
V	Merah	Kerusakan berat (<i>Heavy damage</i>)	Sebagian besar dinding bangunan permanen roboh. Struktur bangunan mengalami kerusakan berat. Rel kereta api melengkung.	IX-XII	> 564

(Sumber: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, 2019)

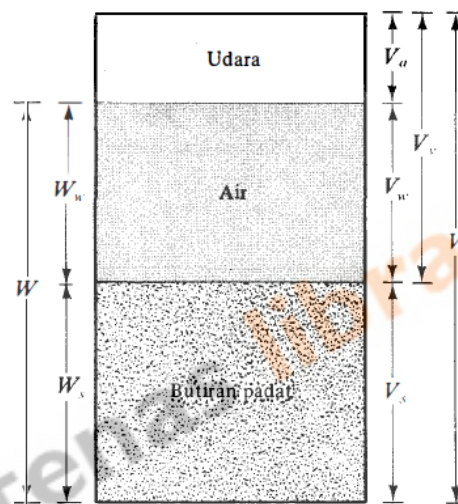
2.6.5 Pengaruh Akibat Gempa Bumi

Yeats *et al.* (1997) mengemukakan bahwa pengaruh gempa bumi disebabkan oleh proses tektonik dan efek sekunder. Efek sekunder merupakan proses nontektonik yang berhubungan langsung dengan guncangan gempa bumi. Beberapa akibat efek sekunder diantaranya yaitu, retak pada permukaan (*surface rupture*), penurunan ketinggian

permukaan tanah (*regional subsidence*), likuifaksi (*liquefaction*), dan pergerakan pada lereng (*slope movement*).

2.7 Definisi Tanah

Tanah merupakan material yang terdiri atas mineral-mineral padat yang tidak terikat secara kimia satu sama lain. Tanah berasal dari bahan organik yang telah melapuk disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi rongga diantara partikel-partikel tersebut seperti pada Gambar 2.12 (Das, 1995).



Gambar 2. 13 Komponen Penyusunan Tanah

(Sumber: Das, 1995)

Tanah terbentuk di bawah pengaruh faktor lingkungan yang bekerja dalam masa yang sangat panjang meliputi iklim, organisme, bahan induk, topografi dan waktu. Menurut Sutanto (2005) komponen tanah yang terdiri atas mineral, organik, air, dan udara tersusun antara yang satu dan yang lain membentuk tubuh tanah. Berbagai jenis tanah yang terbentuk merupakan pengaruh kondisi lingkungan yang berbeda-beda.

Setiap jenis tanah memiliki karakteristik dan sifat yang berbeda-beda. Untuk memberikan informasi karakteristik dan sifat tanah diperlukan sistem klasifikasi dengan mengelompokkan sesuai dengan perilaku tanah tersebut. Sistem klasifikasi tanah bertujuan agar penggunaan tanah dapat dikelola dengan baik dan sesuai potensi yang ada.

Selain itu, sistem klasifikasi digunakan untuk menjelaskan secara singkat mengenai sifat-sifat umum tanah dari suatu daerah (Bowles, 1989).

Ada beberapa sistem klasifikasi yang dapat digunakan seperti pada Tabel 2.7. Sistem klasifikasi yang umum digunakan adalah sebagai berikut:

1. Klasifikasi berdasarkan *Unfined Soil Classification System (USCS)*
Sistem klasifikasi USCS digunakan oleh *American Society for Testing and Materials (ASTM)* sebagai metode standar dalam mengklasifikasikan tanah. USCS membagi tanah menjadi 2 kategori, yaitu:
 - a. Tanah berbutir kasar (*Coarse grained soil*), yaitu tanah yang terdiri atas kerikil dan pasir kurang dari 50% tanah yang lolos saringan No. 200.
 - b. Tanah berbutir halus (*fine grained soil*), yaitu tanah yang terdiri atas kerikil dan pasir lebih dari 50% tanah yang lolos saringan No. 200.
2. Klasifikasi berdasarkan *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*
Sistem klasifikasi AASHTO umumnya digunakan untuk mengklasifikasi kualitas tanah timbunan jalan, *subbase*, dan *subgrade*.

Tabel 2. 7 Batasan-batasan Ukuran Golongan Tanah

Nama golongan	Ukuran butiran (mm)			
	Kerikil	Pasir	Lanau	Lempung
American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)	76,2 - 2	2 - 0,075	0,075 - 0,002	<0,002
Unified Soil Classification System (U.S. Army Corps of Engineers, U.S. Bureau of Reclamation)	76,2 - 4,75	4,75 - 0,075	Halus (yaitu lanau dan lempung < 0,0075)	

(Sumber: Das, 1988)

2.8 Tanah Pasir

Tanah pasir merupakan tanah yang terbentuk akibat pelapukan batuan beku dan sedimen. Pasir yang mengalami pelapukan kemudian terangkut oleh air dan mengendap di suatu tempat seperti danau, hilir sungai, sepanjang garis pantai, dan sebagainya.

Menurut Goodman (1993) pasir memiliki ukuran butir berdiameter 0,06 mm sampai 2 mm. Saat proses pengendapan pada tanah pasir, partikel halus pada sedimen cenderung mengisi ruang antar butir yang seragam.

Ruang yang berisi partikel tersebut dapat mengurangi porositas sehingga menurunkan kapasitas serap air pada pasir (Fetter, 1994). Kondisi ini menyebabkan tanah memiliki struktur yang gembur dan lepas. Pada umumnya, menurut Freeze dan Cherry (1979) tanah pasir mempunyai porositas antara 30% sampai 50%. Tekstur butir, ukuran butir, dan tempat terbentuknya butiran dapat mempengaruhi besar kecilnya porositas pada tanah pasir. Berdasarkan ukuran butir, tanah pasir dapat dibedakan menjadi beberapa jenis seperti pada Tabel 2.8.

Tabel 2. 8 Ukuran Partikel Tanah

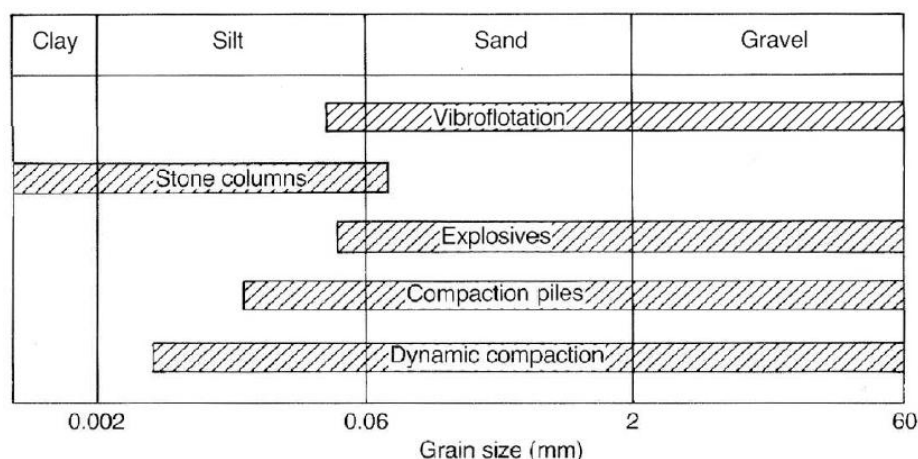
Fraksi	Ukuran
Lempung (<i>clay</i>)	< 0,002 mm
Lanau (<i>silt</i>)	0,002 - 0,05 mm
Pasir sangat halus (<i>very fine sand</i>)	0,05 - 0,10 mm
Pasir halus (<i>fine sand</i>)	0,10 - 0,25 mm
Pasir sedang (<i>medium sand</i>)	0,25 - 0,50 mm
Pasir kasar (<i>coarse sand</i>)	0,50 - 1,00 mm
Pasir sangat kasar (<i>very coarse sand</i>)	1,00 - 2,00 mm

(Sumber: *United States of Agriculture*, 1975)

2.9 Perbaikan Tanah pada Tanah Pasir

Kondisi tanah dengan konsistensi granular jenuh air yang lepas sampai sedang perlu dilakukan perbaikan tanah agar bangunan atau struktur di atasnya tidak mengalami keruntuhan. Hal tersebut dilakukan untuk mengurangi tingkat kerusakan apabila terjadi gempa bumi dan likuifaksi di atas kondisi tanah tersebut. Metode-metode yang dapat

digunakan untuk perbaikan tanah pada tanah pasir salah satunya adalah dengan pemadatan secara mekanis (*mecanichal compaction*) seperti ditunjukkan Gambar 2.14.



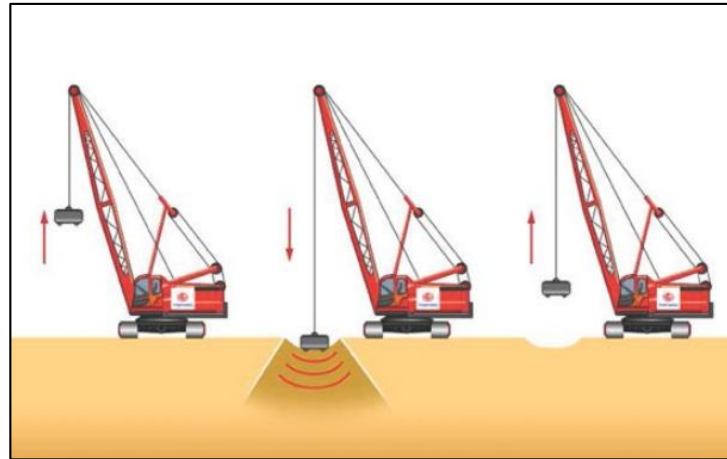
Gambar 2. 14 Perbaikan Tanah Berdasarkan Ukuran Butir Tanah

2.9.1 Metode *Deep Dynamic Compaction* (DDC)

Dynamic Compaction (DC) merupakan salah satu metode pertama dalam pemadatan tanah dengan menggunakan energi tinggi untuk meningkatkan kondisi tanah. Prinsip DC adalah dengan menjatuhkan beban berat pada permukaan tanah. Hasil dari tanah yang dipadatkan bergantung pada kondisi, struktur, dan kedalaman tanah itu sendiri. Menard (1975) memperkenalkan alat *dynamic consolidation* dengan karakteristik sebagai berikut:

- Berat *tamper* atau berat beban sampai 170 ton.
- Tinggi jatuh lebih sampai 22 m.
- Efek kedalaman pemadatan sampai 40 meter.
- Berlaku untuk tanah non kohesif dan tanah granular/berbatu.

Prosedur kerja *Deep Dynamic Compaction* (DDC) adalah menerapkan energi dengan menaikkan dan menjatuhkan *tamper* atau beban berat berulang kali seperti pada Gambar 2.15. Energi ditransfer ke lapisan tanah bagian bawah dengan penumbuk baja yang memiliki berat mulai dari 5 hingga 40 ton dan jatuh bebas dari ketinggian mulai dari 10 hingga 40 meter (Jei Han, 2015). Pemadatan dengan metode DCC tidak dianjurkan untuk tanah lempung dengan indeks plastisitas tinggi.



Gambar 2. 15 Metode *Deep Dynamic Compaction* (DCC)

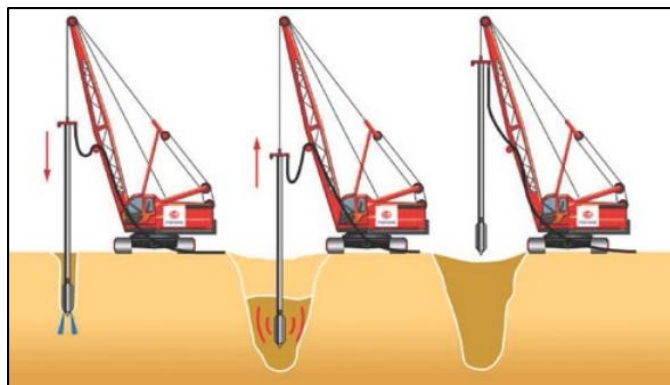
(Sumber: Menard Asia)

Pemadatan tanah dengan metode DDC telah digunakan untuk meningkatkan geomaterial yang bermasalah dengan meningkatkan daya dukung (*bearing capacity*), mengurangi penurunan (*reducing settlement*), meminimalkan potensi terjadi keruntuhan, mitigasi likuifaksi pada bangunan komersial dan perumahan, membuat tangki penyimpanan, untuk jalan raya dan kereta api, bandara, dan pelabuhan.

Metode DCC merupakan metode pemadatan untuk meningkatkan geomaterial yang luas dalam waktu relatif singkat dengan biaya relatif rendah. Sangat efektif untuk memadatkan tanah yang memiliki konsistensi lepas dan jenuh dengan *finer content* kurang dari 15%. Metode ini dapat mendeteksi area tanah lepas selama pengoperasian sehingga dapat dipadatkan dengan baik. Peralatan utama yang diperlukan dalam metode ini adalah *crane* dan *tamper*.

2.9.2 Metode *Vibro Compaction* (VC)

Prinsip kerja *Vibro Compaction* (VC) adalah meningkatkan tanah non kohesif dengan mengatur ulang pola distribusi butiran tanah melalui getaran siklik untuk memadatkan tanah seperti pada Gambar 2.16. Peralatan yang digunakan dalam metode *vibrator compaction* adalah *vibrator heavy plunge* yang disebut vibroflot berbentuk silinder dengan diameter mulai dari 30 hingga 50 cm. Pada umumnya bagian bawah vibroflot dilengkapi dengan *jets*, tempat air atau udara yang dipompa masuk untuk meningkatkan pemadatan tanah.



Gambar 2. 16 Metode *Vibro Compaction* (VC)

(Sumber: Menard Asia)

Vibro Compaction paling cocok digunakan pada tanah non kohesif seperti pasir lepas, kerikil, dan kerikil berpasir. Tanah yang memiliki lebih dari 10% lempung dan lanau tidak cocok pada metode ini. *Vibro compaction* cocok digunakan untuk fondasi dengan tekanan terdistribusi secara merata pada setiap lapisan tanah (meminimalkan permasalahan penurunan).

Vibro compaction menggerakkan alat getaran ke dalam tanah yang menghasilkan gaya getaran arah lateral untuk mengatur ulang partikel agar menjadi keadaan yang padat. Dalam tanah non kohesif jenuh, getaran dapat menghasilkan tekanan air pori berlebih yang akan mengurangi gaya kontak antarpartikel sehingga gesekan antarpartikel akan berkurang. Hasilnya penataan ulang partikel menjadi lebih mudah. Metode *vibro compaction* cocok untuk memadatkan endapan tanah non kohesif dengan *finer content* sampai 20% (lebih baik kurang dari 10%) tetapi memiliki kurang dari 2-3% untuk partikel tanah lempung.

2.10 Penelitian Sebelumnya

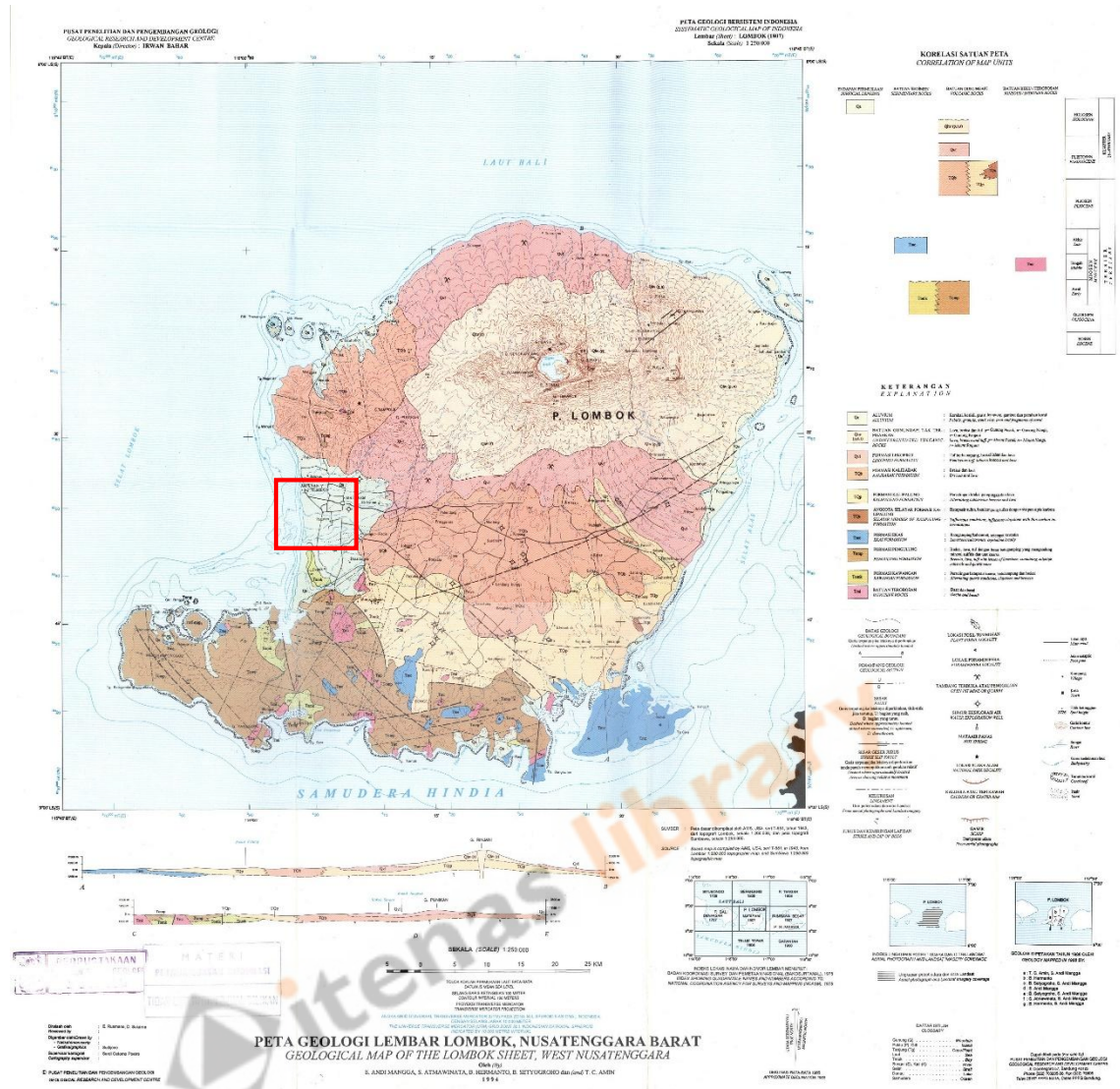
Penelitian potensi likuifaksi pada tanah pasir seragam dilakukan oleh Siahaan (2015) menggunakan permodelan alat di laboratorium. Penelitian dilakukan dengan pengujian analisis saringan berdasarkan standar pengujian ASTM D 422-63. Sampel tanah pasir yang tertahan di setiap saringan dengan variasi kepadatan relatif dijenuhkan kemudian dilakukan pengujian dengan menggetarkannya di atas meja getar. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa terdapat 2 hal yang mempengaruhi likuifaksi pada tanah

pasir jenuh, yaitu ukuran butiran dan nilai koefisien keseragaman (C_u). Dengan tingkat keseragaman yang cenderung sama akan memiliki potensi likuifaksi yang berbanding lurus dengan ukuran butiran yang mewakili. Semakin besar ukuran butiran dan semakin kasar tanah pasir maka semakin besar penurunan likuifaksi yang terjadi. Namun, untuk koefisien keseragaman apabila semakin tinggi nilai C_u pada tanah pasir maka semakin kecil penurunan yang terjadi. Hal ini membuktikan bahwa semakin baik gradasi butiran maka semakin rendah potensi terjadinya likuifaksi.

Warman dan Jumas (2013) melakukan penelitian di 3 lokasi untuk mengetahui faktor keamanan terhadap bahaya potensi likuifaksi di Kota Padang, Sumatera pada tahun 2009 akibat gempa tektonik dengan magnitudo M7,6. Penyelidikan tanah di lapangan dengan teknik penyondiran tanah mengacu pada standar pengujian ASTM D 3441-86. Hasil data uji CPT kemudian dianalisis menggunakan persamaan Seed dan Idriss (1971) untuk menghitung nilai CSR dan CRR. Hasil penelitian menunjukkan daerah yang aman terhadap potensi likuifaksi terdapat pada nilai konus $q_c > 100 \text{ kg/cm}^2$, jenis tanah didominasi oleh tanah lanau kepasiran atau pasir berlanau. Dari 3 lokasi yang ditinjau, 2 diantaranya berpotensi terjadi likuifaksi. Namun, 1 lokasi berpotensi likuifaksi apabila muka air tanahnya tinggi. Hal ini ditunjukkan oleh faktor keamanan $FK \leq 1,5$.

2.11 Kondisi Geologi Regional Mataram

Berdasarkan Buku Geologi Lembar Lombok Nusa Tenggara, Lembar Lombok dibatas oleh garis $08^{\circ}00' - 09^{\circ}00'$ LS dan $113^{\circ}45' - 116^{\circ}45'$ BT dan secara administratif Provinsi Nusa Tenggara Barat dibagi menjadi Kabupaten Lombok Utara, Lombok Tengah, dan Lombok Timur. Secara fisiografi daerah ini terletak di Busur Vulkanik Nusa Tenggara di bagian timur, Busur Sunda di bagian barat, dan Busur Banda Dalam di bagian barat. Daerah tersebut ditempati oleh gunung berapi, batuan intrusif dan sedimen mulai dari Oligosen hingga Holosen seperti pada Gambar 2. 17.



Gambar 2. 17 Peta Geologi Lembar Lombok, Nusa Tenggara Barat
 (Sumber: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi)

Menurut Mangga dkk., (1994) morfologi Lembar Lombok terbagi dalam 3 satuan, yaitu dataran rendah, pegunungan menggelombang, dan pegunungan. Dataran rendah terdapat di bagian barat dan pantai utara timur laut Pulau Lombok yang digunakan sebagai pemukiman dan lahan pertanian. Morfologi pegunungan menggelombang terdapat di bagian selatan Lembar dengan ketinggian berkisar dari 50 m sampai 400 m di atas muka air laut. Pada umumnya pola aliran sungainya sejajar. Morfologi pegunungan bertimbulan kasar terdapat di bagian utara Lembar yang ditempati oleh batuan gunung api tak terpisahkan, sedangkan di bagian barat daya di tempati oleh Formasi Pengulung. Puncak ketinggian antara 400 m sampai 3.726 m di atas permukaan laut. Tatanan stratigrafi di Lembar Lombok terdiri dari batuan gunung api, batuan sedimen, dan batuan terobosan yang

umurnya berkisar dari Tersier sampai Kuarter. Batuan sedimen dan batuan gunungapi yang terdapat di Lembar Lombok adalah Formasi Pengulung (*Tomp*), Formasi Kawangan (*Tomk*), Formasi Ekas (*Tme*), Formasi Kalipalung (TQp), Formasi Kalibabak (TQb), Formasi Lekopiko (Qvl), Batuan gunungapi takterpisahkan (Qhv), dan Batuan Terobosan (Tmi). Struktur yang terdapat di Lembar Lombok berupa sesar normal dan sesar geser yang terdapat di bagian barat laut dan tenggara yang terbentuk pada awal Kuarter.

Secara geografis Kota Mataram terletak pada ujung sebelah barat Pulau Lombok dengan posisi 08°33'-08°38' LS dan 116°04'-116°10' BT. Mataram mempunyai letak yang strategis sehingga menjadi pusat berbagai aktivitas seperti pusat pemerintahan, pendidikan, dan perdagangan. Dengan luas wilayah 61,30 km² yang berbatasan dengan Kabupaten Lombok Barat di sebelah utara, selatan, dan timur dan dengan Selat Lombok di sebelah barat. Menurut Sumber dan Bahaya Gempa Nasional (2017), Pulau Lombok dikelilingi oleh beberapa sumber gempa, yaitu Zona Back Arch Thrust di wilayah utara, Megathrust di selatan, dan sistem sesar geser di sisi barat dan timurnya. Jumlah penduduk berdasarkan data yang diperoleh dari Badan Pusat Statistik Kota Mataram terdapat 486.715 jiwa hingga bulan Juli 2019.

Gempa bumi yang terjadi pada hari Minggu, 5 Agustus 2018 di Labuan, Lombok merupakan gempa bumi terbesar yang pernah terjadi di Nusa Tenggara Barat. Gempa bumi yang bersumber dari zona sesar naik busur belakang Flores mengakibatkan Pulau Bali dan Sumbawa ikut terkena bencana. Dampak kejadian gempa bumi pada Minggu, 5 Agustus 2018 dapat dilihat pada Tabel 2.9.

Tabel 2. 9 Dampak Kejadian Gempa Bumi Lombok Tanggal 5 Agustus 2018

No	Daerah	Meninggal dunia	Luka-luka	Rumah Rusak	Pengungsi
1	Kota Mataram	9	63	754	18.894
2	Kab. Lombok Barat	39	399	25.540	116.453
3	Kab. Lombok Utara	405	829	24.989	178.122
4	Kab. Lombok Timur	12	122	25.540	104.060
5	Kab. Lombok Tengah	2	0	4.767	0
	Jumlah	466	1054	71.937	417.529

(Sumber: Badan Penanggulangan Bencana Nasional, 2018)