

BAB III LANDASAN TEORI

3.1 Gempa Bumi

Gempa bumi adalah getaran yang terjadi pada lapisan tanah bumi yang bersumber dari letusan gunung berapi yang disebut gempa bumi vulkanik dan bersumber dari patahan lempeng bumi yang disebut gempa bumi tektonik. Gempa bumi tektonik melepaskan energi yang dirambatkan oleh pusat gempa berupa gelombang primer (*P wave*) dan gelombang sekunder (*S wave*) yang merupakan gelombang badan (*body wave*). Akibat rambatan gelombang *S wave* terjadi gaya geser secara bolak balik yang mengakibatkan kerusakan dan juga dapat mengakibatkan terjadinya likuifaksi.

Likuifaksi adalah hilangnya kekuatan tanah akibat kenaikan tegangan air pori dan turunnya tekanan efektif dari lapisan tanah yang timbul akibat dari beban siklis dinamis. Likuifaksi dipengaruhi oleh parameter-parameter gempa yaitu magnitudo gempa, energi yang dilepas pada fokus gempa tektonik akibat deformasi lempeng, durasi/ lama gempa, dan percepatan permukaan tanah.

Menurut SNI 1726-2012 tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung, percepatan tanah maksimum untuk evaluasi likuifaksi menggunakan percepatan puncak MCE_G yang telah disesuaikan terhadap pengaruh situs yaitu PGA_M . Persamaan 3.1 percepatan tanah puncak PGA_M dapat dilihat sebagai berikut.

$$PGA_M = F_{PGA} \cdot PGA \quad (3.1)$$

dengan:

PGA_M = MCE_G percepatan tanah puncak yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs

F_{PGA} = koefisien situs

PGA = percepatan tanah puncak terpetakan

Koefisien situs sesuai dengan pembagian kelas situs dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut.

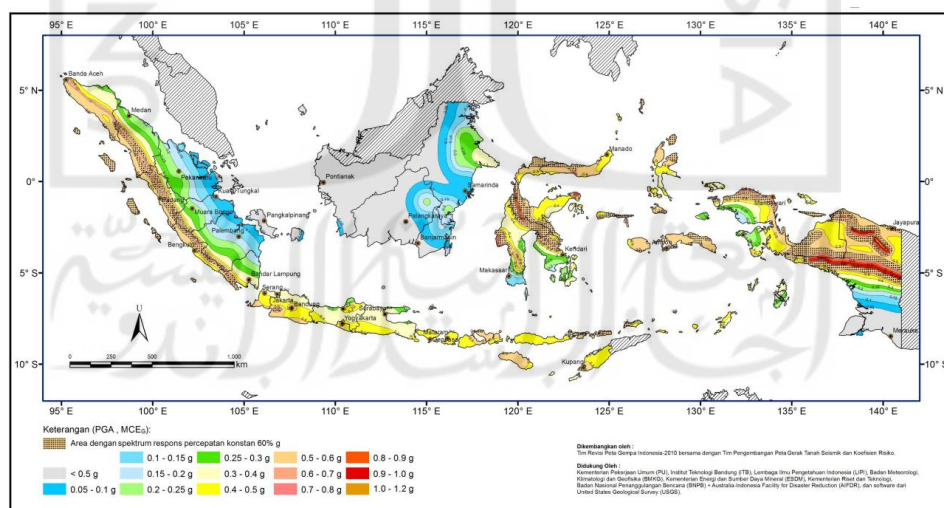
Tabel 3.1 Koefisien Situs

Kelas situs	PGA \leq 0,1	PGA = 0,2	PGA = 0,3	PGA = 0,4	PGA \geq 0,5
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1	1	1	1	1
SC	1,2	1,2	1,1	1	1
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1
SE	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
SF					

(Sumber: SNI 1726, 2012)

Kelas situs dibagi berdasarkan jenis-jenis tanah. SA adalah batuan keras, SB adalah batuan, SC adalah tanah keras, sangat padat dan batuan lunak dengan $N > 50$, SD adalah tanah sedang dengan N antara 15 sampai 50, SE adalah tanah lunak dengan $N < 15$, dan SF adalah tanah khusus yang membutuhkan investigasi spesifik.

Percepatan tanah puncak terpetakan dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut.



Gambar 3.1 Percepatan Permukaan Tanah terpetakan di Wilayah Indonesia

(Sumber : SNI 1726, 2012)

Indonesia adalah salah satu wilayah di dunia yang berada pada pertemuan empat lempeng tektonik utama di dunia, yaitu lempeng Australia, lempeng Eurasia, lempeng Philipina dan lempeng Pasifik. Indonesia juga berada pada pertemuan dua sistem pegunungan, yaitu pegunungan Mediterania dan pegunungan Pasifik. Perbedaan kecepatan gerak keempat lempeng utama dan aktifitas vulkanik dua sistem pegunungan tersebut menjadikan Indonesia salah satu wilayah rawan gempa. Gempa yang pernah terjadi di Indonesia salah satunya adalah gempa yang pernah terjadi di Daerah Istimewa Yogyakarta tepatnya di Bantul. Gempa Bantul terjadi pada tanggal 27 Mei 2006 yang menyebabkan banyaknya korban jiwa serta banyak rumah maupun gedung perkantoran yang rubuh. Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) adalah daerah setingkat provinsi yang berada di Selatan pulau Jawa yang merupakan salah satu pulau yang dilewati garis pertemuan pelat tektonik Australia dan Eurasia.

3.2 Tanah

Tanah merupakan komponen penting dalam kehidupan termasuk dalam bidang teknik sipil. Tanah berfungsi sebagai material konstruksi dan sebagai pendukung pondasi untuk menerima beban di atasnya. Tanah terdiri butiran-butiran mineral dengan atau tanpa kandungan bahan organik. Diantara butiran-butiran tersebut terdapat rongga yang diisi oleh air dan udara. Apabila rongga tanah terisi oleh air sepenuhnya maka tanah dalam kondisi jenuh. Apabila rongga tanah terisi oleh air dan udara maka tanah dalam kondisi jenuh sebagian. Dan apabila tanah tidak mengandung air maka tanah dalam kondisi kering.

Dalam istilah-istilah teknik sipil, jenis tanah dibedakan menjadi kerikil, pasir, lanau dan lempung. Tanah yang tidak hanya mengandung satu jenis tanah namun beberapa campuran jenis tanah, maka penamaan jenis tanah tersebut diberi tambahan nama di belakang material unsur utamanya. Contoh: pasir berlanau adalah pasir yang mengandung lanau dengan material utamanya adalah pasir. *Unified Class System*, ASTM, MIT *nomenclature* dan *International Nomenclature* membagi jenis tanah berdasarkan ukuran butir. Klasifikasi butiran tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.2 berikut.

	1,7 mm	0,38	0,075								
Unified Class system	kasar	sedang	halus	Butiran halus (lanau dan lempung)							
	pasir										
	2,0 mm	0,42	0,075	0,005	0,001						
ASTM	pasir sedang	pasir halus	Lanau	Lempung	Lempung koloidal						
	2,0 mm	0,6	0,2	0,06	0,02	0,006	0,002	0,0006	0,0002 mm		
MIT nomenclatur	kasar	sedang	halus	kasar	sedang	halus	kasar	sedang	halus		
	pasir			Lanau			Lempung				
	2,0 mm	1,0	0,5	0,2	0,1	0,05	0,02	0,006	0,002	0,0006	0,0002 mm
International nomenclatur	sangat kasar	kasar	sedang	halus	kasar	halus	kasar	halus	kasar	halus	sangat halus
	pasir				Mo		Lanau		Lempung		

Gambar 3.2 Klasifikasi Butiran menurut Sistem *Unified*, ASTM, MIT *Nomenclature* dan *International Nomenclature* berdasarkan Ukuran Butir

(Sumber : Hardiyatmo, 2014)

Dalam sistem klasifikasi tanah menurut *Unified*, tanah dibagi menjadi dua kelompok yaitu tanah berbutir kasar dan tanah berbutir halus. Tanah berbutir kasar merupakan butiran tanah yang tertahan saringan no. 200 (0,075 cm) dan tanah berbutir halus merupakan butiran tanah yang lolos saringan no. 200 (0,075 cm). Sistem klasifikasi *Unified* dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3.2 Sistem klasifikasi Unified

Divisi Utama		Simbol Kelompok	Nama Jenis	Nama Jenis		
Tanah berbutir kasar 50% butiran tertahan saringan no. 200 (0,075 mm)	Kerikil 50% atau lebih dari fraksi kasar tertahan saringan no. 4 (4,75 mm)	GW	Kerikil gradasi baik dan campuran pasir-kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$, $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kedua kriteria untuk GW		
		GP	Kerikil gradasi buruk dan campuran pasir-kerikil atau tidak mengandung butiran halus			
		GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil pasir-lempung			
		GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil pasir-lempung			
	Pasir lebih dari 50% fraksi kasar lolos saringan no. 4 (4,75 mm)	Kerikil bersih (sedikit atau tak ada butiran halus).	SW	Pasir gradasi baik, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus.	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$, $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kedua kriteria untuk SW	
			SP	Pasir gradasi buruk, pasir kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus.		
		Kerikil banyak kandungan butiran halus	SM	Pasir berlanau, campuran pasir-lanau		Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$ Bila batas Atterberg berada di daerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai simbol Batas-batas Atterberg di atas garis A atau $PI > 7$ Bila batas Atterberg berada di daerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai simbol
			SC	Pasir berlempung, campuran pasir-lempung		
			Klasifikasi berdasarkan prosentase butiran halus, kurang dari 5% lolos saringan no. 200: GW, GP, SW, SP. Lebih dari 12% lolos saringan no. 200: GM, GC, SM, SC. 5% - 12% lolos saringan no. 200: Batasan klasifikasi yang mempunyai simbol dobel.			
Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos saringan no. 200 (0,075 mm)	Lanau dan lempung batas cair 50% atau kurang	ML	Lanau tak organik dan pasir sangat halus, serbuk batuan atau pasir halus berlanau atau berlempung	<p>Diagram plastisitas: Untuk mengklasifikasi kadar butiran halus yang terkandung dalam tanah berbutir halus dan tanah berbutir kasar. Batas Atterberg yang termasuk dalam daerah yang arsir berarti batasan klasifikasinya menggunakan dua simbol.</p>		
		CL	Lempung tak organik dengan plastisitas rendah sampai sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung kurus ('lean clays')			
		OL	Lanau organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah.			
	Lanau dan lempung batas cair > 50%	MH	Lanau tak organik atau pasir halus diatomae, lanau elastis.			
		CH	Lempung tak organik dengan plastisitas tinggi, lempung gemuk ('fat clays')			
		OH	Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai tinggi			
Tanah dengan kadar organik tinggi	P _t	Gambut ('peat') dan tanah lain dengan kandungan organik tinggi.	Manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat di ASTM Designation D-2488			

(Sumber : Hardiyatmo, 2014)

Sistem klasifikasi *Unified* menggunakan simbol-simbol untuk mewakili penamaan jenis tanah. Huruf depan yang digunakan dalam penamaan jenis tanah yaitu:

G = kerikil (*gravel*)

S = pasir (*sand*)

M = lanau (*silt*, huruf M singkatan dari *MO*, bahasa Skandinavia)

C = lempung (*clay*)

O = organik (*organic*)

Pt = gambut (*peat*)

Huruf belakang yang digunakan dalam penamaan jenis tanah sistem klasifikasi *Unified* yaitu:

W = tanah bergradasi baik (*well graded*)

P = tanah bergradasi buruk (*poorly graded*)

L = tanah dengan plastisitas rendah (*low plasticity*)

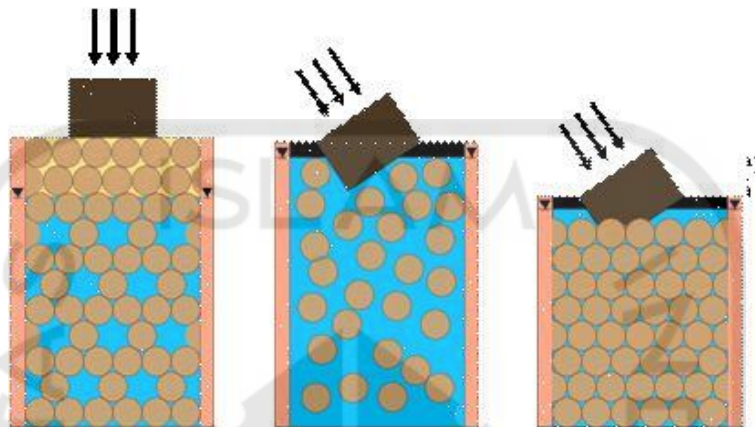
H = tanah dengan plastisitas tinggi (*high plasticity*)

Tanah terdiri dari berbagai macam ukuran butir. Tanah yang banyak mengandung variasi ukuran butir disebut tanah bergradasi baik, dan tanah yang sedikit mengandung variasi ukuran butir atau tanah seragam disebut tanah bergradasi buruk. Tanah bergradasi baik lebih padat dan stabil daripada tanah bergradasi buruk. Tanah bergradasi buruk atau tanah seragam sulit dipadatkan, sehingga tidak dapat mendukung beban yang besar.

3.3 Likuifaksi

Likuifaksi merupakan hilangnya kekuatan tanah akibat getaran gempa. Peristiwa likuifaksi disebabkan oleh kenaikan tegangan air pori dan turunnya tekanan efektif dalam lapisan tanah akibat beban siklis dinamis. Pendidihan tanah pasir (*sand boil*), atau munculnya lumpur pasir di permukaan tanah, atau mungkin ditunjukkan adanya rembesan air melalui rekahan tanah adalah kejadian likuifaksi. Akibat dari likuifaksi juga dapat menyebabkan tenggelamnya struktur bangunan serta penurunan tanah yang cukup besar. Bangunan akan miring, amblas atau bergeser ke samping kemudian bangunan tersebut akan runtuh karena

hilangnya kuat geser tanah akibat likuifaksi. Berikut dapat dilihat ilustrasi peristiwa likuifaksi yang mengakibatkan bangunan miring pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Ilustrasi Peristiwa Likuifaksi

(Sumber: Octavia, 2009)

Potensi likuifaksi pada suatu lapisan tanah dapat diketahui melalui sifat-sifat tanah, faktor lingkungan dan parameter gempa. Faktor-faktor tersebut yaitu:

1. sifat-sifat tanah, yaitu modulus geser (*dynamic shear modulus*), sifat redaman (*damping characteristic*), karakteristik butiran dan kepadatan tanah,
2. faktor lingkungan yaitu cara pembentukan tanah, riwayat geologis, koefisien tekanan tanah lateral dan tegangan keliling, dan
3. parameter gempa, yaitu intensitas getaran, lamanya getaran, besar dan arah getaran.

Beban siklis dinamis pada lapisan tanah terjadi akibat rambatan gelombang gempa bumi tektonik. Seed et al (1975) mendefinisikan, bahwa likuifaksi adalah proses perubahan kondisi tanah pasir yang jenuh air menjadi cair akibat meningkatnya tekanan air pori yang harganya menjadi sama dengan tegangan total oleh sebab terjadinya beban dinamik, sehingga tegangan efektif tanah menjadi nol.

Terzaghi (1923) memperkenalkan Persamaan 3.1 hubungan antara tegangan total, tegangan efektif dan tekanan air pori sebagai berikut.

$$\sigma = \sigma' + u \quad (3.1)$$

dengan:

σ = Tegangan total tanah

σ' = Tegangan efektif tanah

u = Tekanan air pori tanah

Tegangan total tanah merupakan perkalian antara berat volume tanah dengan kedalaman titik tanah yang ditinjau. Tegangan total tanah pada tanah kering dan tegangan total tanah pada tanah basah dapat dilihat pada Persamaan 3.2 dan Persamaan 3.3 berikut.

$$\sigma = h \cdot \gamma \quad (3.2)$$

dan

$$\sigma = h \cdot \gamma_{\text{sat}} \quad (3.3)$$

dengan:

h = Kedalaman titik tanah yang ditinjau

γ = Berat volume tanah

γ_{sat} = Berat volume tanah jenuh

Tekanan air pori tanah merupakan tegangan-tegangan yang bekerja di dalam air, mengisi rongga pori tanah dalam keadaan tanah jenuh air. Persamaan tekanan air pori dapat dilihat pada Persamaan 3.4 berikut.

$$u = h \cdot \gamma_w \quad (3.4)$$

dengan:

γ_w = Berat volume air = $9,81 \text{ kN/m}^3$

Tegangan efektif tanah merupakan tegangan-tegangan yang teruskan dari butiran satu ke butiran lainnya dalam keadaan tanah terendam air (jenuh air).

Persamaan tegangan efektif dapat dilihat pada Persamaan 3.5 hingga Persamaan 3.7 berikut.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (3.5)$$

atau

$$\sigma' = h \cdot \gamma_{\text{sat}} - h \cdot \gamma_w \quad (3.6)$$

atau

$$\sigma' = h (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w) \quad (3.7)$$

γ_{sat} dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.8 berikut.

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{(G_s + e) \gamma_w}{1 + e} \quad (3.8)$$

e dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.9 berikut.

$$e = \frac{n}{1 + n} \quad (3.9)$$

dengan:

G_s = berat jenis

e = angka pori

n = porositas

Likuifaksi terjadi pada saat lapisan tanah jenuh air mengalami kenaikan tekanan air pori tanah yang disebabkan oleh beban siklis pada saat terjadi gempa, sehingga tegangan total sama dengan tekanan air pori tanah.

Tegangan geser tanah merupakan daya dukung tanah untuk mendukung beban diatas atau disisi tanah tersebut. Persamaan tegangan geser tanah oleh Coulomb dapat dilihat pada Persamaan 3.10 berikut.

$$\tau' = c' + (\sigma - u) \tan \phi \quad (3.10)$$

dengan:

τ' = Tegangan geser tanah efektif

c' = Kohesi tanah efektif

σ = Tegangan total tanah

u = Tegangan air pori tanah

ϕ = Sudut geser dalam tanah efektif

Kohesi pada tanah pasir sama dengan nol maka persamaan tegangan geser dapat dilihat pada Persamaan 3.11 dan Persamaan 3.12 sebagai berikut.

$$\tau' = (\sigma - u) \tan \phi \quad (3.11)$$

atau

$$\tau' = \sigma' \tan \phi \quad (3.12)$$

Ketika tegangan total tanah sama dengan tekanan air pori tanah, maka tegangan efektif tanah menjadi nol yang mengakibatkan tegangan geser menjadi nol sehingga tanah akan kehilangan daya dukungnya selama terjadi gempa. Secara perlahan-lahan tekanan air pori tanah akan terdissipasi hingga stabil atau kembali ke keadaan awal setelah terjadinya gempa. Kembalinya tekanan air pori ke keadaan awal atau mendekati keadaan awal, menunjukkan bahwa tegangan efektif tanah kembali ke keadaan semula. Walaupun keadaan sudah mendekati semula, lapisan tanah tersebut masih belum stabil akibat mendapat beban siklik dinamik sehingga lapisan tanah menjadi *quick condition* dan runtuh.

Untuk menghindari terjadinya likuifaksi atau hilangnya daya dukung tanah, maka perlu diketahui besarnya potensi tanah terhadap likuifaksi. Menurut Seed (1990); Idriss (1990); Gupta (1979), potensi terjadinya peristiwa likuifaksi

mempertimbangkan beberapa hal, yaitu distribusi ukuran butir, kepadatan relatif, nilai N-SPT, karakteristik getaran dan lain sebagainya.

3.4 Potensi Likuifaksi berdasarkan Distribusi Butir Tanah

Banyak faktor yang mempengaruhi terjadinya peristiwa likuifaksi diantaranya yaitu karakteristik getaran, jenis tanah, muka air tanah, kepadatan awal, distribusi butir tanah, kemampuan drainasi tanah dan pengaruh-pengaruh lain seperti usia/ umur lapisan tanah.

Menurut Prakash (1981) dan Day (2002) mengatakan bahwa butir-butir pasir yang halus dan seragam cenderung lebih bahaya terhadap likuifaksi dibanding dengan butir-butir yang relatif besar. Tanah bergradasi baik atau tanah dengan distribusi butiran yang baik akan lebih tahan terhadap likuifaksi karena variasi butiran menjadikan butir-butir tanah yang lebih kecil akan mengisi diantara butir-butir yang lebih besar sehingga akan terjadi *interlocking* atau saling mengunci. Butir-butir halus dan seragam cenderung mudah terjadi likuifaksi dan butir-butir pasir yang besar akan relatif sulit terjadi likuifaksi.

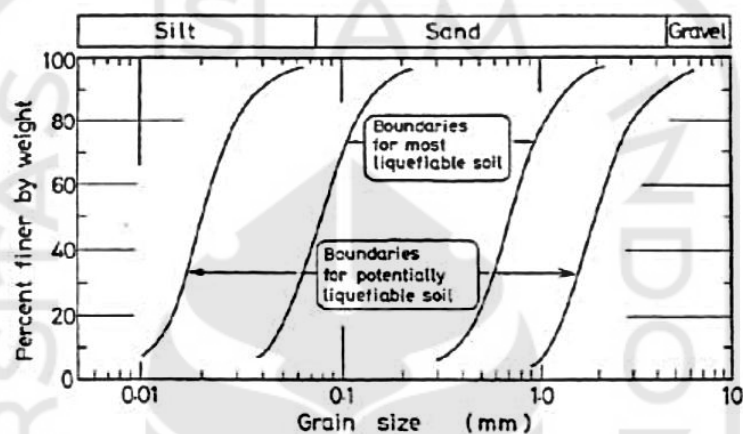
3.4.1 Karakteristik Butir-Butir Pasir

Likuifaksi akan lebih cenderung terjadi pada pasir jenuh air yang berdiameter halus, terutama tanah yang memiliki sistem drainasi tidak baik. Ada beberapa kriteria yang membuat jenis-jenis tanah tersebut mengalami likuifaksi (Youd dan Gilstrap, 1999 dalam Day 2002; Perlea dkk, 1999 dalam Prakash dan Puri, 2003), sebagai berikut.

1. Diameter tengah D_{50} antara 0,02-1,00 mm
2. Kandungan *finer*, butir $D < 0,005$ mm tidak lebih dari 20%
3. Koefisien keseragaman $D_{60}/D_{10} < 10$
4. Kepadatan Relatif $D_r < 75\%$
5. Indeks plastisitas $IP < 13\%$

3.4.2 Kurva Distribusi Butir Tanah

Tsuchida (1970) mengemukakan sebuah kurva distribusi butir tanah untuk memperkirakan kerentanan tanah terhadap likuifaksi. Berdasarkan distribusi butiran tanah, Tsuchida mengusulkan batas-batas distribusi butir tanah yang peka terhadap likuifaksi seperti ditunjukkan pada Gambar 3.4 berikut.



Gambar 3.4 Distribusi Butir Tanah yang berpotensi Likuifaksi (Tsuchida, 1970)

(Sumber : Legrans, 2016)

Boundaries for most liquefiable soil merupakan batasan untuk tanah paling berpotensi likuifaksi dan *boundaries for potentially liquefiable soil* merupakan batasan untuk tanah berpotensi likuifaksi.

Tanah bergradasi baik tidak rentan terhadap likuifaksi dibanding dengan tanah bergradasi buruk. Adanya butiran pengisi antara butiran-butiran kasar akan mengurangi potensi perubahan volume yang terjadi pada kondisi terdrainase, sebagai akibat tekanan air pori berlebih tidak akan terjadi.

3.4.3 Analisis Distribusi Butir Tanah

Analisa saringan saringan adalah metode yang dipakai untuk menentukan penyebaran (distribusi) butiran tanah yang mempunyai ukuran lebih besar dari 0,075 mm (saringan no 200 American Society for testing dan Materials, ASTM) sedangkan untuk menentukan penyebaran butiran tanah yang mempunyai ukuran lebih kecil dari 0,075 mm digunakan analisa Hidrometer.

1. Analisa saringan

Ukuran saringan yang umumnya digunakan untuk menentukan distribusi ukuran tanah adalah metode *American Society for testing and Materials* (ASTM,1981) *British Standard* (BS410: BS 1377, 1975), dan *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO). Berikut dapat dilihat ukuran standar diameter saringan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Diameter Lubang Saringan pada beberapa Standar

<i>American Society for Testing and Materials, ASTM</i>		<i>AASHTO</i>	<i>British Standard BS 1377: 1975</i>	
Nomor ayakan	Ukuran lubang (mm)	Ukuran lubang (mm)	Nomor ayakan	Ukuran lubang (mm)
No. 4	4.76	4.75		
No. 6	3.35			
No. 8	2.36	2.36	No. 8	2.057
No. 10	2.00			
No. 16	1.18	1.18	No. 16	1.003
No. 20	0.841			
No. 30	0.595	0.600	No. 30	0.500
			No. 36	0.422
No. 40	0.425			
No. 50	0.300	0.300	No. 52	0.295
No. 60	0.250		No. 60	0.251
No. 80	0.180		No. 85	0.178
No. 100	0.150	0.150	No. 100	0.152
No. 140	0.106			
No. 170	0.088	0.090		
No. 200	0.075	0.075	No. 200	0.076

(Sumber : Budi, 2011)

Uji analisa saringan dilakukan pada tanah yang mengandung sedikit butiran halus yang memiliki diameter kurang dari 0,075 mm. Apabila terdapat tanah lolos saringan diameter 0,075 mm lebih besar sama dengan 60 gram maka perlu dilakukan uji analisa hidrometer. Dari hasil pengujian analisa saringan maka akan didapat nilai berat pada setiap diameter saringan yang kemudian dihitung hingga mendapatkan nilai persen lolos. Berat butir tanah yang lolos dari masing-masing saringan berdasarkan berat butir tanah tertahan dapat dilihat pada Persamaan 3.13 berikut.

$$W_f = W - \sum d \quad (3.13)$$

dengan:

W_f = berat sampel lolos saringan (gram)

W = berat sampel total (gram)

$\sum d$ = berat sampel tertahan saringan (gram)

Persentase butir tanah yang lolos dari masing-masing saringan terhadap sampel tanah total dapat dilihat pada Persamaan 3.14 berikut.

$$P = \frac{W_f}{W} \times 100\% \quad (3.14)$$

dengan:

P = persen lolos saringan (%)

2. Analisa hidrometer

Analisa uji hidrometer digunakan untuk menentukan distribusi butiran tanah yang mempunyai ukuran kurang dari 0,075 mm. Persentase butir tanah yang lolos dari masing-masing saringan terhadap sampel tanah total dapat dilihat pada Persamaan 3.15 berikut.

$$P = \frac{R_c \times a}{w} \times 100 \quad (3.15)$$

dengan:

P = persen lolos saringan (%)

R_c = pembacaan hidrometer terkoreksi

w = berat sampel tanah uji hidrometer (gram)

a = konstanta yang tergantung dari kepadatan suspensi

Untuk perkiraan harga berat jenis tanah, G_s dan kepadatan air adalah 1,00 pada temperatur 20° C, nilai a dapat diperoleh dengan Persamaan 3.16 berikut.

$$a = \frac{Gs \times 1,65}{(Gs-1) \times 2,65} \quad (3.16)$$

Koreksi diperlukan agar pembacaan hidrometer lebih teliti. Koreksi pembacaan hidrometer dapat dilihat pada Persamaan 3.17 berikut.

$$R_c = R_a + M_t + x \quad (3.17)$$

dengan:

R_c = pembacaan hidrometer terkoreksi

R_a = pembacaan hidrometer

M_t = koreksi temperatur

x = koreksi *dispersing agent*

Pembacaan hidrometer aktual dapat dilihat pada Persamaan 3.18 berikut.

$$R = R_a + C_m \quad (3.18)$$

dengan:

R = pembacaan hidrometer aktual

C_m = koreksi meniskus

Hidrometer dikalibrasi pada temperatur air 20° C, sehingga bila pengujian dilakukan pada temperatur selain 20° C, *density* air dan alat hidrometer akan berubah. Koreksi temperatur dapat dilihat pada Tabel 3.4 berikut.

Tabel 3.4 Faktor Koreksi Temperatur
(*Engineer Manual EM1110-2-1906*)

Temperatur °C	Faktor koreksi Mt	Temperatur °C	Faktor koreksi Mt	Temperatur °C	Faktor koreksi Mt
15,0	-0,8	21,5	+0,3	28,0	+1,8
15,5	-0,7	22,0	+0,4	28,5	+1,9
16,0	-0,6	22,5	+0,5	29,0	+2,1
16,5	-0,6	23,0	+0,6	29,5	+2,2
17,0	-0,5	23,5	+0,7	30,0	+2,3
17,5	-0,4	24,0	+0,8	30,5	+2,5
18,0	-0,4	24,5	+0,9	31,0	+2,6
18,5	-0,3	25,0	+1,0	31,5	+2,8
19,0	-0,2	25,5	+1,1	32,0	+2,9
19,5	-0,1	26,0	+1,3	32,5	+3,0
20,0	+0,0	26,5	+1,4	33,0	+3,2
20,5	+0,1	27,0	+1,5	33,5	+3,2
21,0	+0,2	27,5	+1,6	34,0	+3,5

(Sumber : Budi, 2011)

Penambahan *dispersing agent* akan mempengaruhi density air, sehingga proses sedimentasi lebih cepat dari pada di media air. Koreksi *dispersing agent* dilakukan dengan cara menguapkan 50mL *stock dispersing agent* di dalam oven dengan temperatur 105°C – 110°C sampai kering. Masa stock yang tertinggal di dalam cawan penguapan ditimbang untuk mengetahui beratnya, m_d gram. Persamaan *dispersing agent* dapat dilihat pada Persamaan 3.17 berikut.

$$x = - (2m_d) \quad (3.19)$$

dengan:

x = *dispersing agent*

m_d = masa stock yang tertinggal di dalam cawan penguapan (gram)

Koreksi meniscus perlu diperhatikan karena permukaan air di sekeliling batang alat hidrometer lebih tinggi dari permukaan air sebenarnya, lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 3.5. Koreksi meniscus dapat dilihat pada Persamaan 3.20 berikut.

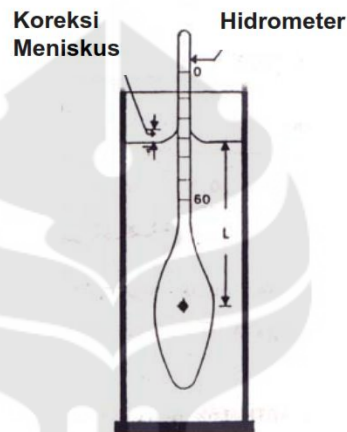
$$C_m = (\text{Pembacaan B} - \text{pembacaan A}) \times 1000 \quad (3.20)$$

dengan:

C_m = koreksi meniskus

Pembacaan A = pembacaan tinggi air di luar batang hidrometer

Pembacaan B = pembacaan tinggi air di sekeliling batang hidrometer



Gambar 3.5 Koreksi Meniskus dan Kedalaman Efektif (L)

(Sumber : SNI 3423, 2008)

Kedalaman efektif merupakan jarak dari permukaan suspensi ke tempat kepadatan suspensi yang diukur, lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 3.7. Penentuan kedalaman efektif hidrometer tipe 152H dapat dilihat pada Tabel 3.5 Berikut.

Tabel 3.5 Penentuan kedalaman efektif hidrometer tipe 152H

Pembacaan hidrometer aktual	Kedalaman efektif, L (cm)	Pembacaan hidrometer aktual	Kedalaman efektif, L (cm)	Pembacaan hidrometer aktual	Kedalaman efektif, L (cm)
0	16,3	21	12,9	42	9,4
1	16,1	22	12,7	43	9,2
2	16	23	12,5	44	9,1
3	15,8	24	12,4	45	8,9
4	15,6	25	12,2	46	8,8
5	15,5	26	12	47	8,6
6	15,3	27	11,9	48	8,4
7	15,2	28	11,7	49	8,3
8	15	29	11,5	50	8,1
9	15	30	11,4	51	7,9
10	14,8	31	11,2	52	7,8
11	14,7	32	11,1	53	7,6
12	14,5	33	10,9	54	7,4
13	14,3	34	10,7	55	7,3
14	14,2	35	10,6	56	7,1
15	14	36	10,4	57	7
16	13,8	37	10,2	58	6,8
17	13,5	38	10,1	59	6,6
18	13,3	39	9,9	60	6,5
19	13,2	40	9,7		
20	13	41	9,6		

(Sumber : Onggo dkk, 2018)

Diameter butir tanah dalam suspensi pada kedalaman efektif untuk setiap pembacaan pada menit T dapat dilihat pada Persamaan 3.21 berikut.

$$D = K \sqrt{\frac{L}{T}} \quad (3.21)$$

dengan:

D = diameter butiran tanah (mm)

K = konstanta yang besarnya dipengaruhi oleh temperatur suspensi dan berat jenis butir tanah, nilai K dapat dilihat pada Tabel 3.6

L = kedalaman efektif alat hidrometer (mm)

T = waktu (menit)

Tabel 3.6 Nilai K untuk Analisis Hidrometer

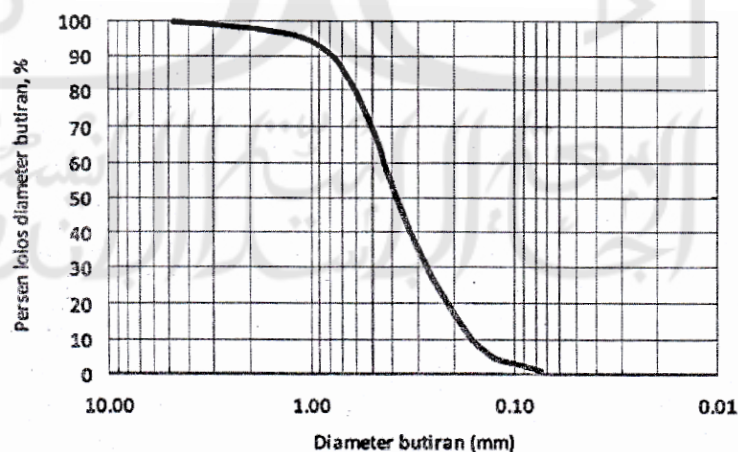
Temperatur °C	Berat jenis butiran tanah								
	2,45	2,50	2,55	2,60	2,65	2,70	2,75	2,80	2,85
16	0.01510	0.01505	0.01481	0.01457	0.01435	0.01414	0.01394	0.01374	0.01356
17	0.01511	0.01486	0.01462	0.01439	0.01417	0.01396	0.01376	0.01356	0.01338
18	0.01492	0.01467	0.01443	0.01421	0.01399	0.01378	0.01359	0.01339	0.01321
19	0.01474	0.01449	0.01425	0.01403	0.01382	0.01361	0.01342	0.1323	0.01305
20	0.01456	0.01431	0.01408	0.01386	0.01365	0.01344	0.01325	0.01307	0.01289
21	0.01438	0.01414	0.01391	0.01369	0.01348	0.01328	0.01309	0.01291	0.01273
22	0.01421	0.01397	0.01374	0.01353	0.01332	0.01312	0.01294	0.01276	0.01258
23	0.01404	0.01381	0.01358	0.01337	0.01317	0.01297	0.01279	0.01261	0.01243
24	0.01388	0.01365	0.01342	0.01321	0.01301	0.01282	0.01264	0.01246	0.01229
25	0.01372	0.01349	0.01327	0.01306	0.01286	0.01267	0.01249	0.01232	0.01215
26	0.01357	0.01334	0.01312	0.01291	0.01272	0.01253	0.01235	0.01218	0.01201
27	0.01342	0.01319	0.01297	0.01277	0.01258	0.01239	0.01221	0.01204	0.01188
28	0.01327	0.01304	0.01283	0.01264	0.01244	0.01225	0.01208	0.01191	0.01175
29	0.01312	0.01290	0.01269	0.01249	0.01230	0.01212	0.01195	0.01178	0.01162
30	0.01298	0.01276	0.01256	0.01236	0.01217	0.01199	0.01182	0.01165	0.01149

⁽¹⁾ Sumber : ASTM D 422-63 (Reapproved 1990)

(Sumber : SNI 3423, 2008)

3. Kurva distribusi butir tanah

Hasil analisa saringan dan analisa hidrometer akan menghasilkan diameter butiran dan persen lolos yang akan disajikan dalam bentuk kurva tipikal distribusi butir tanah. Contoh kurva tipikal distribusi butir tanah dapat dilihat pada Gambar 3.6 berikut.



Gambar 3.6 Kurva Tipikal Distribusi Butir Tanah

(Sumber : Budi, 2011)

Koefisien keseragaman (*uniformity coefficient*) didefinisikan sebagai kemiringan dari kurva penyebaran butiran tanah. Keseragaman dipresentasikan sebagai perbandingan antara ukuran saringan dimana masing-masing 60 persen dan 10 persen tanah lolos pada ukuran lubang saringan tersebut. Koefisien keseragaman yang dinotasikan C_u dapat dilihat pada Persamaan 3.22 berikut.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3.22)$$

dengan:

C_u = koefisien keseragaman (*uniformity coefficient*)

D_{60} = ukuran lubang saringan dimana 60% butiran tanah lolos pada ukuran lubang tersebut

D_{10} = ukuran efektif, ukuran lubang saringan dimana 10% butiran tanah lolos pada ukuran lubang tersebut

Persamaan koefisien gradasi (*coefficient of gradation*) dapat dilihat pada Persamaan 3.23 berikut.

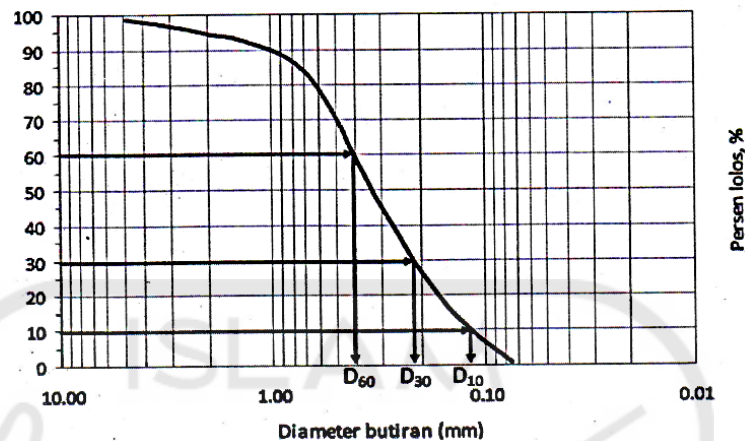
$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}} \quad (3.23)$$

dengan:

C_c = koefisien gradasi (*coefficient of gradation*)

D_{30} = ukuran lubang saringan dimana 30% butiran tanah lolos pada ukuran lubang tersebut

Besarnya nilai D_{10} , D_{30} dan D_{60} dapat dilihat pada Gambar 3.7 berikut.



Gambar 3.7 Penentuan D_{10} , D_{30} dan D_{60}

(Sumber : Budi, 2011)

3.5 Potensi Likuifaksi berdasarkan Data N-SPT

Evaluasi potensial likuifaksi dengan data N-SPT lapisan tanah yang jenuh air dilakukan dengan menggunakan 2 metode yaitu metode Seed, Martin & Lysmer (1975) dan metode Velera & Donovan (1977).

1. Metode Seed, Martin & Lysmer (1975)

Metode Seed, Martin & Lysmer (1975) atau dikenal juga dengan metode Seed et al (1975) merupakan analisis potensi likuifaksi yang dilakukan untuk mendapatkan nilai jumlah getaran *equivalen* (N_{eq}) dan nilai jumlah getaran yang diperlukan untuk mencapai likuifaksi (NL). Karakteristik/ parameter gempa nilai jumlah getaran (N_{eq}) dapat diketahui berdasarkan Tabel 3.7 berikut.

Tabel 3.7 Hubungan Nilai Skala Richter dengan Nilai Jumlah Getaran

(Seed et al, 1975)

Magnitude Skala Richter	Nilai Jumlah Getaran (N_{eq})
5,6 – 6.0	5
6,5	8
7	12
7,5	20
8	30

(Sumber : Hasmar, 2013)

Apabila nilai jumlah getaran equivalen akibat gempa (N_{eq}) lebih kecil dari jumlah getaran yang diperlukan untuk mencapai likuifaksi (NL), maka tidak akan terjadi likuifaksi pada lapisan tanah. Jika sebaliknya atau nilai N_{eq} lebih besar dari nilai NL akan terjadi likuifaksi. $N_{eq} < NL$, maka tidak berpotensi likuifaksi dan $N_{eq} > NL$, maka berpotensi likuifaksi.

Nilai NL dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.24 berikut.

$$NL = \left[\frac{0,4697 \cdot Dr \cdot \sigma_{vo'}}{\tau_{eq}} \right]^{5,5402} \quad (3.24)$$

dengan:

NL = jumlah getaran yang diperlukan untuk mencapai likuifaksi

Dr = relatif densiti

τ_{eq} = *cyclic shear stress equivalen*

$\sigma_{vo'}$ = tegangan efektif lapisan

Jika hasil uji lapangan N-SPT pada lapisan pasir yang akan dievaluasi potensi likuifaksi, relatif densiti (Dr) dapat dihitung berdasarkan Persamaan 3.25 dan Persamaan 3.26 pendekatan Bazaraa (1967) berikut.

Untuk $\sigma_{vo} \leq 71,82 \text{ kN/m}^2$:

$$Dr = \sqrt{\left[\frac{N}{20(1+0,04177 \cdot \sigma_{vo})} \right]} \quad (3.25)$$

Untuk $\sigma_{vo} > 71,82 \text{ kN/m}^2$:

$$Dr = \sqrt{\left[\frac{N}{20(3,25+0,01044 \cdot \sigma_{vo})} \right]} \quad (3.26)$$

dengan:

σ_{vo} = tegangan total lapisan tanah

Dr = relatif densiti

N = nilai N-SPT hasil uji lapangan

Nilai τ_{eq} dapat dihitung dengan Persamaan 3.27 dan Persamaan 3.28 berikut.

$$\tau_{eq} = 0,65 \tau_{maks} \quad (3.27)$$

dan

$$\tau_{maks} = (\sigma_{vo}/g) \cdot a_{maks} \cdot rd \quad (3.28)$$

dengan:

τ_{maks} = *cyclic shear stress* maksimum

g = percepatan gravitasi

a_{maks} = percepatan maksimum muka tanah

rd = faktor reduksi = $1 - 0,015 z$, dimana z adalah kedalaman tanah yang ditinjau

2. Metode Velera & Donovan (1977)

Metode Velera & Donovan (1977) memberikan hubungan antara getaran akibat gempa bumi tektonik yang menyebabkan *cyclic liquefaction* dengan nilai tahanan N-SPT dari lapisan pasir yang jenuh air. Analisis metode Velera & Donovan (1977) dilakukan dengan menentukan nilai kritis dari tahanan N-SPT (N_{crit}) untuk menentukan keadaan tanah yang likuifaksi atau tidak likuifaksi. Apabila tahanan N-SPT (N) lebih kecil dari nilai kritisnya (N_{crit}), maka akan terjadi likuifaksi. Dan apabila nilai tahanan N-SPT (N) lebih besar dari nilai kritisnya (N_{crit}), maka tidak terjadi likuifaksi. $N < N_{crit}$, maka berpotensi likuifaksi dan $N > N_{crit}$, maka tidak berpotensi likuifaksi.

Besar nilai N_{crit} ditentukan oleh Velera dan Donovan dengan Persamaan 3.29 berikut.

$$N_{crit} = \eta [1 + 0,125(ds - 3) - 0,05(dw - 2)] \quad (3.29)$$

dengan:

N_{crit} = nilai kritis dari N-SPT

- ds = kedalaman lapisan pasir yang ditinjau
 dw = kedalaman muka air tanah dari muka tanah
 η = suatu fungsi dari intensitas getaran akibat gempa tektonik yang dapat dibaca dari Tabel 3.8 berikut.

Tabel 3.8 Hubungan Skala MMI dengan Nilai η
 (Velera & Donovan, 1977)

<i>Modified Mercalli Intensity</i> (MMI)	η (blow/feet)
VII	6
VIII	10
IX	16

(Sumber : Hasmar, 2013)

Skala MMI ditentukan berdasarkan kerusakan bangunan dan hal-hal yang dirasakan oleh manusia akibat gempa bumi. Berikut perbandingan Richter skala magnitude dengan skala MMI dapat dilihat pada Tabel 3.9.

Tabel 3.9 Perbandingan Richter Skala Magnitude dengan Skala MMI
 (Braja M.Das, 1984)

Magnitude Skala Richter	Intensitas Maksimum Skala MMI
1	-
2	I, II
3	III
4	IV, V
5	VI, VII
6	VIII
7	IX, X
8	X

(Sumber : Hasmar, 2013)