

## **BAB II**

### **STUDI LITERATUR**

#### **2.1 Likuifaksi**

##### **2.1.1 Definisi Likuifaksi**

Likuifaksi adalah suatu proses perubahan kondisi sebuah tanah pasir yang jenuh air menjadi cair, dikarenakan meningkatnya tekanan air pori yang nilainya menjadi sama dengan tekanan total tanah yang timbul akibat beban dinamik sehingga efektif tanah menurun menjadi nol (Seed 1971). Dengan tekanan efektif tanah menjadi nol maka akan kehilangan kuat dukung tanahnya. Persamaan dari tekanan efektif tanah dapat ditulis :

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

Dimana :

$\sigma'$  = tekanan efektif tanah

$\sigma$  = tekanan total tanah

$u$  = tekanan air pori

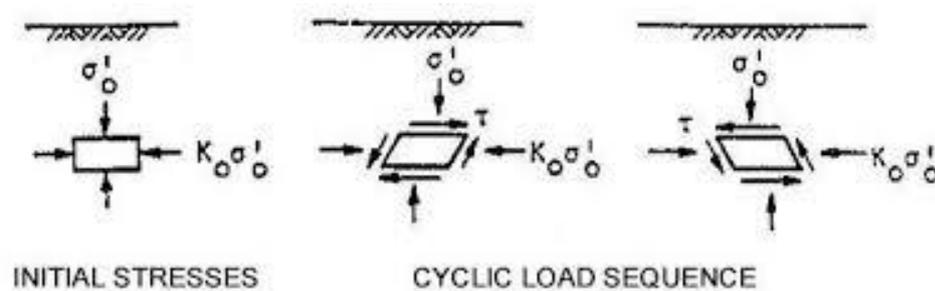
Beban dinamik yang membebani kondisi tanah tersebut berupa beban siklik. *Initial Liquefaction* menunjukkan suatu keadaan dimana akibat beban siklik, tekanan pori meningkat dan nilainya menjadi sama dengan tekanan total tanah. Pada saat pasir yang jenuh air menerima getaran, pasir itu akan cenderung memadat atau memampat dan berkurang volumenya. Untuk bisa memampat, air yang ada

dalam pori harus dikeluarkan (Meiwa 2015). Jika air pori tidak dapat mengalir keluar maka pengurangan volume tidak dapat terjadi, ini mengakibatkan akan timbul tekanan air pori yang berlebihan. Bila tekanan air pori yang berlebih dan besarnya sama dengan tekanan total tanah (*overburden pressure*), tekanan tanah efektif hilang atau berubah menjadi nol, tanah akan mencair menyerupai bubur dan kehilangan daya dukungnya. Fenomena ini dapat terjadi pada saat terjadinya gempa bumi terutama gempa tektonik. Getaran tanah akibat gempa bumi ini menimbulkan tegangan geser siklik itu terjadi sedemikian cepatnya, sehingga air pori tidak mempunyai cukup waktu untuk keluar dan mendisipasikan tegangannya.

Telah disebutkan bahwa sebab utama terjadinya Likuifaksi pada saat gempa itu karena terjadinya peningkatan tekanan pori akibat tegangan siklik. Tegangan siklik terjadi karena adanya perambatan gelombang geser yang berasal dari pusat pelepasan energi ke permukaan tanah. Tanah akan mengalami tegangan geser yang berasal dari perambatan gelombang geser tersebut. Tegangan geser tersebut walaupun secara alamiah bersifat acak tetapi bersifat bolak-balik (siklik).

Akibat tegangan siklik tersebut maka struktur tanah pasir akan cenderung mengecil volumenya karena terjadinya peristiwa sangat cepat sehingga drainase tidak sampai terjadi dan kecenderungan tanah untuk memadat tercegah. Akibatnya terjadi pengalihan tegangan tersebut ke tekanan air pori. Selanjutnya tegangan pori tersebut mendekati tegangan total elemen tanah sehingga terjadi pengurangan tegangan kontak antar partikel tanah. Hal ini akan menyebabkan deformasi secara berlebihan. Deformasi ini tidak terbatas karena terjadinya perubahan tanah menjadi *liquid*. Pada tanah pasir lepas, kondisi tersebut lebih cepat tercapai. Proses pencairan tanah tersebut terjadi di lapisan tanah pasir pada kombinasi nilai

kepadatan relatif, tegangan keliling dan getaran tertentu. Zona seperti itu dapat terjadi di dekat permukaan maupun pada suatu kedalaman tergantung kondisi tanah, besarnya tegangan keliling dan karakteristik gempa. Peristiwa pencairan lapis atas pasir dapat saja terjadi karena peristiwa pencairan air dari lapis pasir di bawahnya yang mengalami peristiwa pencairan.



Gambar 2. 1 Idealisasi kondisi tanah akibat beban siklik (Seed & Idriss 1971)

### 2.1.2 Tipe Likuifaksi

Likuifaksi dibagi menjadi dua macam kategori, yaitu likuifaksi akibat beban non-siklik (*flow liquefaction*) dan likuifaksi akibat beban siklik (*cyclic liquefaction*). Meskipun mekanismenya berbeda, namun cukup sulit membedakan kedua tipe ini karena dampak yang ditimbulkan tidak jauh berbeda.

#### a. *Flow liquefaction*

*Flow liquefaction* terjadi bila tegangan geser statik lebih besar daripada tegangan geser tanah terlikuifaksi (kuat geser residu). Pada kondisi ini tanah sepenuhnya kehilangan kuat gesernya. Likuifaksi jenis ini ditandai oleh pergerakan tanah yang terjadi cepat dan dengan skala yang cukup besar.

#### b. *Cyclic liquefaction*

*Cyclic liquefaction* merupakan fenomena atau peristiwa likuifaksi yang disebabkan oleh beban siklik yang terjadi pada tanah tegangan geser lebih kecil daripada daya dukung tanah. Deformasi terjadi akibat tegangan siklik yang diakibatkan oleh tegangan statis dan dinamis yang terjadi selama gempa berlangsung ini semakin besar. Gaya yang menyebabkan likuifaksi jenis ini pada umumnya merupakan gaya dengan arah horizontal-lateral. Berbeda dengan *Flow liquefaction*, pada kondisi ini terjadi deformasi secara *inkremental* (berubah sedikit dan bertahap).

Dengan adanya tekanan air pori yang meningkat drastis karena likuifaksi, maka akan menyebabkan air pori tersebut keluar secara cepat ke permukaan tanah. Aliran ini bisa terjadi pada saat gempa ataupun setelah gempa terjadi. Jika hal ini terjadi, air pori juga dapat membawa partikel pasir ke permukaan. Keadaan ini disebut sebagai *sand boiling* (Ramadhan 2011).

### **2.1.3 Faktor Yang Mempengaruhi Likuifaksi**

Likuifaksi dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain :

1. Berupa tanah pasir (pasir lepas, *loose sand*)
2. Muka air tanah tinggi (lebih dari 90%)
3. Terjadi pada gempa kuat
4. Kandungan *Fine Content* dibawah 15% (tanah butir halus < 0.005mm)
5. Nilai Batas Cair tanah (LL) < 35%
6. Nilai Indeks Likuiditas (LI) < 0.75%

## 2.2 Analisis Potensi Likuifaksi

Perhitungan evaluasi potensi likuifaksi melibatkan tiga parameter umum, yaitu :

1. Tingkat pembebanan siklik yang dialami tanah akibat gempa bumi. Tingkat pembebanan ini dihitung dalam rasio antara tegangan geser siklik yang didekati dengan percepatan permukaan tanah maksimum arah horizontal dan tegangan efektif vertikal tanah. Nilai tingkat pembebanan siklik ini diekspresikan dalam *cyclic stress ratio* (CSR).
2. Tingkat tahanan tanah terhadap likuifaksi. Tingkat tahanan ini dihitung dalam rasio antara tegangan geser yang terjadi pada bidang horizontal dan tegangan efektif vertikal tanah. Nilai tingkat tahanan ini diekspresikan dalam *cyclic resistance ratio* (CRR).
3. Angka keamanan yang diekspresikan dalam *factor of safety* (FS). Nilai FS lebih besar dari satu ( $FS > 1$ ) menunjukkan bahwa tahanan yang dimiliki tanah cukup untuk menahan beban siklik sehingga likuifaksi tidak terjadi. Sedangkan nilai FS kurang dari dan sama dengan satu ( $FS \leq 1$ ) menunjukkan bahwa tahanan yang dimiliki tanah tidak cukup untuk menahan pembebanan siklik yang terjadi sehingga likuifaksi terjadi.

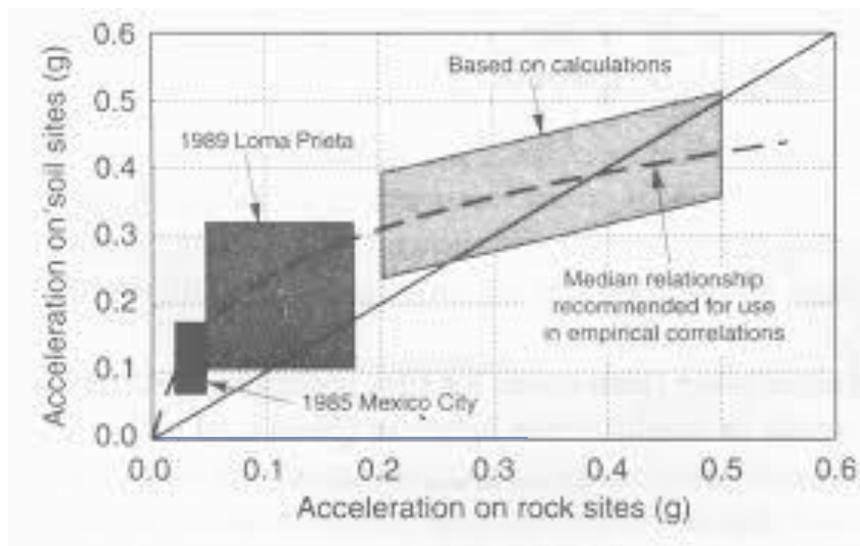
Usaha perbaikan tanah yang dilakukan adalah dengan meningkatkan nilai angka keamanan hingga lebih dari satu.

### 2.2.1 Metode Evaluasi *Cyclic Stress Ratio* (CSR)

Untuk menganalisis nilai CSR, dalam penulisan ini menggunakan persamaan dari Seed & Idriss (1971) :

$$CSR = 0.65 * \frac{a_{max}}{g} * \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} * r_d \quad (2.2)$$

Parameter gempa  $a_{max}$  merupakan percepatan puncak gempa dipermukaan tanah atau yang biasa disebut *Peak Surface Acceleration* (PSA). Nilai PSA diperoleh dengan cara mengkorelasikan nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) dengan nilai PSA menggunakan grafik dibawah ini. Dimana PGA merupakan percepatan puncak gempa di dalam tanah.

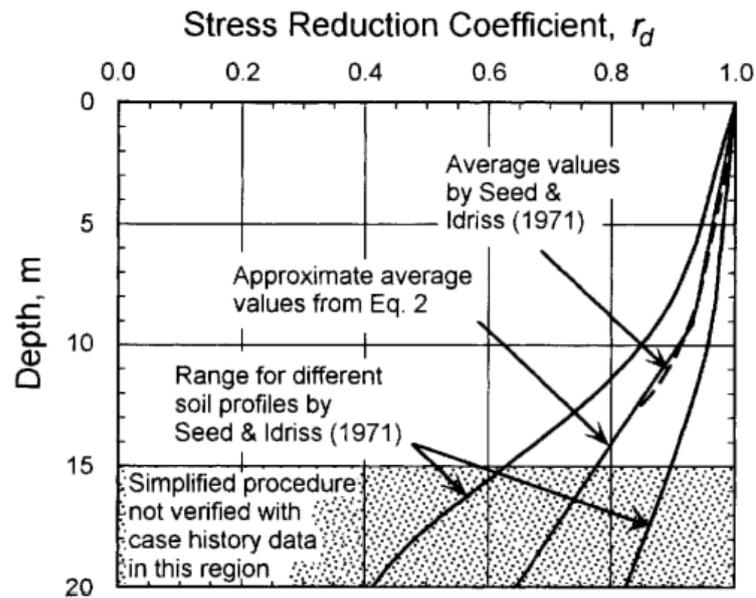


**Gambar 2. 2** Grafik korelasi PSA vs PGA (Google Image : <https://images.app.goo.gl/RCbqKvAH3PCaiqo66> )

Untuk  $r_d$  menggunakan persamaan dengan ketentuan sebagai berikut

$$r_d = 1.0 - 0.00765 * z \quad \text{untuk } z \leq 9.15 \text{ m} \quad (2.3)$$

$$r_d = 1.174 - 0.0267 * z \quad \text{untuk } 9.15 < z \leq 23 \text{ m} \quad (2.4)$$



Gambar 2. 3  $r_d$  versus Depth Curves Developed (Seed et all 1971)

Atau menggunakan rumus korelasi  $r_d$  sebagai berikut

$$rd = \frac{(1 - 0.4113z^{0.5} + 0.04052z + 0.001753z^{1.5})}{(1 - 0.4177z^{0.5} + 0.05729z - 0.006205z^{1.5} + 0.001210z^2)} \quad (2.5)$$

Dimana :

$a_{max}$  = Percepatan maksimum gempa di permukaan tanah (g)

$g$  = Percepatan Gravitasi bumi ( $m/s^2$ )

$\sigma'_v$  = Tegangan efektif tanah di kedalaman  $z$  ( $kN/m^2$ )

$\sigma_v$  = Tegangan total tanah di kedalaman ( $kN/m^2$ )

$r_d$  = Koefisien reduksi tegangan

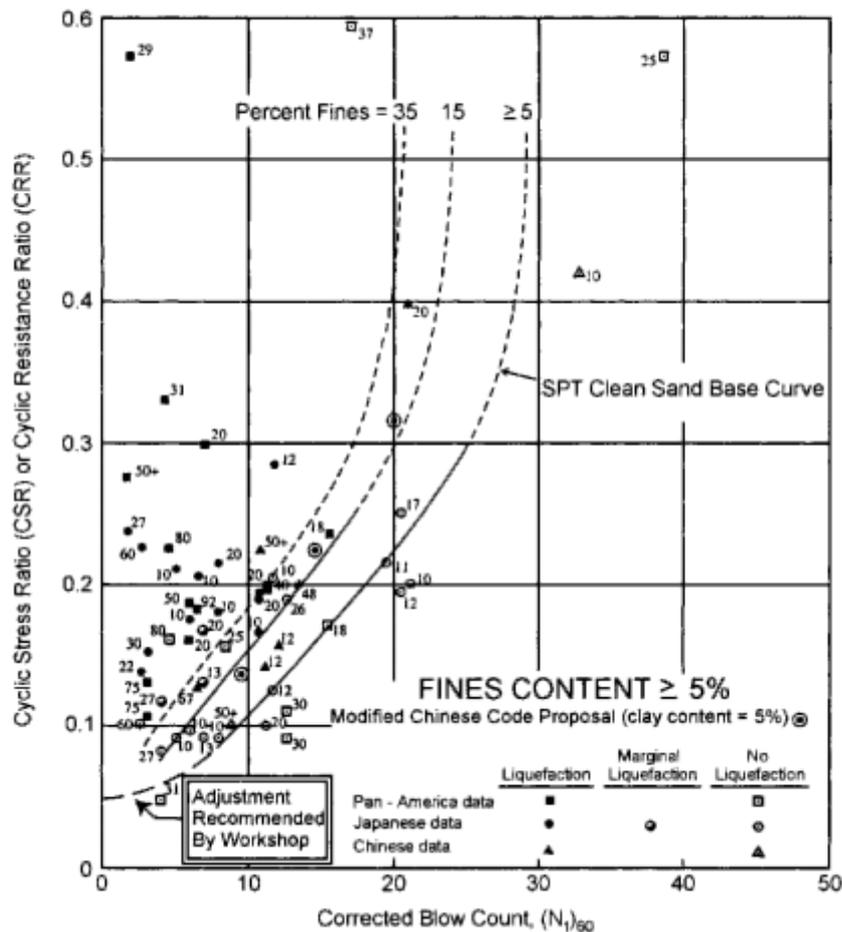
$z$  = Kedalaman

Konstanta 0.65 adalah weighting faktor untuk menghitung siklus tegangan uniform yang dibutuhkan untuk menghasilkan kenaikan tekanan air pori yang sama

dengan getaran gempa bumi irregular, amax sangat berpengaruh dalam analisa potensi likuifaksi (Lonteng et all 2013).

### **2.2.2 Metode Evaluasi *Cyclic Resistance Ratio* (CRR)**

Diambil metode dari NCEER/NSF tentang ketahanan tanah terhadap likuifaksi tahun 1998 mengenai analisa likuifaksi, didapatkan metode evaluasi CRR dengan berdasarkan nilai hasil SPT ini sudah diuji selama bertahun-tahun sehingga mendapatkan plot kurva antara CRR dan  $N_{spt}$  terkoreksi yang terkoreksi atau  $(N1)_{60}$  yang hanya berlaku pada magnitude 7.5. Dari data-data yang mengalami kasus likuifaksi sejauh ini tidak pernah mencapai magnitude yang melebihi 7.5.



Gambar 2. 4 Kurva SPT *Clean-Sand Base* untuk magnitude 7,5 (Youd 2001)

Kurva diatas merupakan pemisah secara konservatif antara zona likuifaksi dan tidak likuifaksi. Kurva dikembangkan untuk tanah butiran dengan *finer content* sebesar 5% atau kurang, 15% dan 35% seperti yang ditunjukkan pada plot kurva. Kurva CRR untuk *finer content* <5% adalah kriteria penetrasi dasar untuk penyederhanaan prosedur dan selanjutnya disebut sebagai “kurva dasar SPT pasir murni”. Berikut adalah persamaan untuk mendapatkan CRR.

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{[10 * (N_1)_{60} + 45]^3} - \frac{1}{200} \quad (2.6)$$

Dimana  $(N_1)_{60}$  diatas adalah  $(N_1)_{60cs}$

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta (N_1)_{60} \quad (2.7)$$

$$(N_1)_{60} = N_M C_N C_E C_B C_R C_S \quad (2.8)$$

$N_M$  merupakan nilai  $N_{SPT}$  sedangkan untuk faktor koreksi dilihat dari gambar tabel sebagai berikut :

**Tabel 2. 1 Tabel faktor koreksi (Youd 2001)**

Factor	Equipment variable	Term	Correction
Overbuden pressure	-	$C_N$	$2.2/(1.2 + \sigma'_{vo} / P_a) \leq 1.7$
Energy ratio	Donut hammer	$C_E$	0.5 - 1.0
	Safety hammer	$C_E$	0.7 - 1.2
	Automatic-trip Donut-type hammer	$C_E$	0.8 - 1.3
Borehole diameter	65 - 115 mm	$C_B$	1.0
	150 mm	$C_B$	1.05
	200 mm	$C_B$	1.15
Rod length	< 3m	$C_R$	0.75
	3 - 4 m	$C_R$	0.8
	4 - 6 m	$C_R$	0.85
	6 - 10 m	$C_R$	0.95
	10 -30 m	$C_R$	1.0
Sampling method	Standard sampler	$C_S$	1.0
	Sampler without liners	$C_S$	1.1 - 1.3

Dimana  $\alpha$  dan  $\beta$  adalah sebuah koefisien dengan ketentuan berikut ini.

$$\alpha = 0 \quad \text{untuk } FC \leq 5\% \quad (2.9)$$

$$\alpha = \exp [1.76 - (190/FC^2)] \quad \text{untuk } 5\% < FC < 35\% \quad (2.10)$$

$$\alpha = 0.5 \quad \text{untuk } FC \geq 35\% \quad (2.11)$$

$$\beta = 1.0 \quad \text{untuk } FC \leq 5\% \quad (2.12)$$

$$\beta = [0.99 + (FC^{1.5}/1000)] \quad \text{untuk } 5\% < FC < 35\% \quad (2.13)$$

$$\beta = 1.2 \quad \text{untuk } FC \geq 35\% \quad (2.14)$$

Dimana :

- CRR7.5 = *Cyclic Resistance Ratio* direfrensi gempa (Mw = 7.5)
- (N1)60.cs = Nilai (N1)60 yang sudah dikoreksi tegangan tanah
- (N1)60 = Nilai SPT yang sudah dikoreksi tegangan tanah
- FC = *Fines Content* (%)

### 2.2.3 Metode Evaluasi Faktor Keamanan (FS)

Dari nilai faktor keamanan ini dapat diketahui tanah tersebut berpotensi likuifaksi atau tidak. Dimana untuk keamanan dipakai  $FS > 1.1$  . Untuk mendapatkan nilai faktor keamanan, digunakan persamaan sebagai berikut :

$$FS = \frac{CRR}{CSR} * MSF \quad (2.15)$$

$$FS = \frac{CRR}{CSR} * MSF * K\sigma * K\alpha \quad (2.16)$$

Dimana :

$K\sigma$  = faktor koreksi untuk tegangan efektif

$K\alpha$  = faktor koreksi untuk kemiringan lereng

Dengan melibatkan variabel  $K_\sigma$  dan  $K_\alpha$  biasanya digunakan dalam perhitungan untuk kasus khusus. Untuk nilai MSF menggunakan persamaan Youd & Noble (1997), dengan persamaan sebagai berikut.

$$MSF = 10^{2.44} / M_w^{2.56} \quad (2.17)$$

Dimana  $M_w$  adalah magnitude gempa.

### **2.3 Analisis Menghitung Besar Penurunan Akibat Likuifaksi**

Likuifaksi akan menjadi masalah serius bila menyebabkan terjadinya keruntuhan gedung sebagai akibat penurunan permukaan tanah akibat terjadinya gempa bumi. Penurunan permukaan tanah ini terjadi pada regangan yang relatif kecil (*small-strain*) setelah likuifaksi (*post-liquefaction*). Ishihara dan Yoshimine (1992) merumuskan suatu hubungan antara regangan volumetrik ( $\epsilon_v$ ), N-SPT awal ( $N_1$ ), dan faktor keamanan terhadap likuifaksi (FS). Nilai regangan volumetrik sebagai akibat disipasi tekanan air pori saat guncangan gempa akan digunakan untuk perhitungan penurunan permukaan tanah. Tokimatsu dan Seed (1987) juga merumuskan hubungan antara nilai CSR dan nilai dari  $(N_1)_{60}$ . Hubungan tersebut disajikan pada gambar diagram grafik berikut.

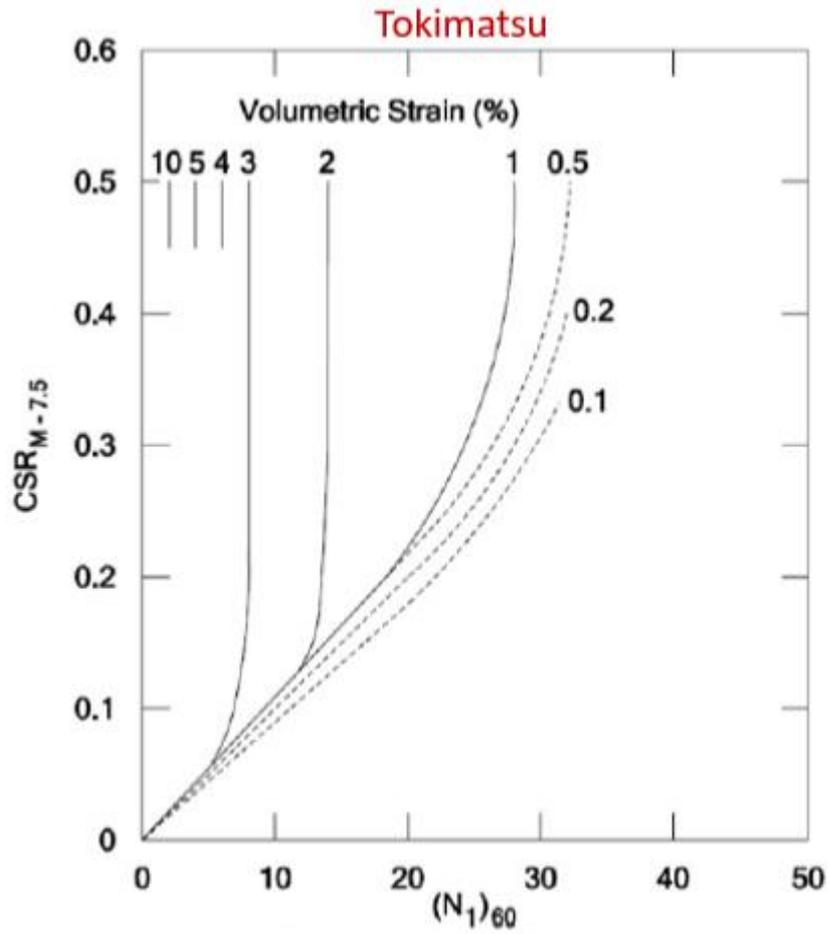


Figure 6-9. Liquefaction induced settlement estimated using the Tokimatsu & Seed procedure (redrafted from Tokimatsu and Seed, 1987).

Gambar 2. 5 Gambar diagram grafik Tokimatsu (Tokimatsu et all 1987)

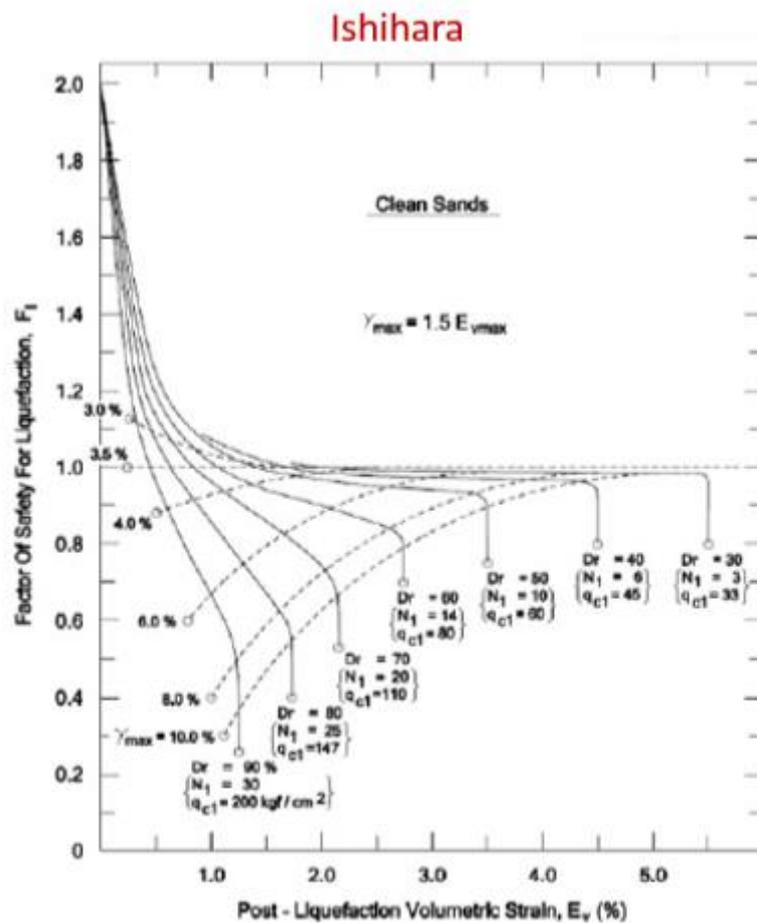


Figure 6-10. Liquefaction induced settlement estimated using the Ishihara and Yoshimine procedure. (redrafted from Ishihara and Yoshimine, 1992).

Gambar 2. 6 Gambar diagram grafik Ishihara (Ishihara et all 1992)

## 2.4 Stone Column

### 2.4.1 Definisi Stone Column

*Stone column* (tiang batu) merupakan salah satu metode perbaikan tanah yang diterapkan pada tanah lunak kohesif ataupun non-kohesif lepas. Selain berfungsi sebagai drainase dalam meredam peningkatan tekanan air pori yang dapat menyebabkan peristiwa likuifaksi, penerapan *stone column* pada pelapisan berpotensi likuifaksi juga akan meningkatkan respon ketahanan terhadap likuifaksi.

Secara umum proses konstruksi *stone column* adalah dengan cara membuat lubang pada tanah yang ingin ditingkatkan daya dukungnya. Selanjutnya ke dalam lubang tersebut dimasukkan material granular (*coarse agregat*) dengan berbagai ukuran. Rasio perbedaan ukuran tersebut ditentukan berdasarkan kriteria desain yang diinginkan. Biasanya seiring dengan dimasukkannya material granular dilakukan dengan proses penggetaran yang menggunakan alat *vibroflot* (*vibro probe*) yang digunakan pada proses *vibro compaction* yang menjadikan material granular yang berada di lubang tersebut bisa semakin memadat. Sehingga dapat disimpulkan bahwa *stone column* adalah salah satu teknik perbaikan tanah dengan cara memasukkan material granular (*coarse agregat*) yang dipadatkan sehingga daya dukung tanah di sekitarnya meningkat.



**Gambar 2. 7** Alat vibroflot atau vibro probe (Google Image : <https://www.pinterest.com/pin/331436853801731605/>)

Proses konstruksi *stone column* dapat menggunakan dua teknik yaitu dengan teknik *vibro replacement* dan *vibro displacement*. Secara singkat, teknik *vibro*

*replacement* dilakukan dengan cara menyemprotkan air dengan kecepatan tinggi (*water jetting*) pada saat pembuatan lubang sehingga tanah yang awalnya berada di lubang tersebut keluar bersama air karena tekanan yang disebabkan oleh *water jetting*, lalu pada lubang tersebut dimasukkan material yang di padatkan. Lapisan tanah kohesif yang berlapis-lapis pada umumnya tidak mudah di padatkan jika hanya dilakukan penggetaran. Teknik *vibro replacement* sangat baik untuk digunakan terutama untuk jenis tanah yang seperti ini. Tanah seperti ini biasanya secara efektif ditingkatkan kekuatannya dengan proses penggetaran yang cukup dalam. Sedangkan pada proses *vibro displacement* tidak ada proses *water jetting*, yaitu hanya perlu pemindahan massa tanah ketika material granular dipadatkan di dalam lubang tersebut.

#### **2.4.2 Fungsi Stone Column**

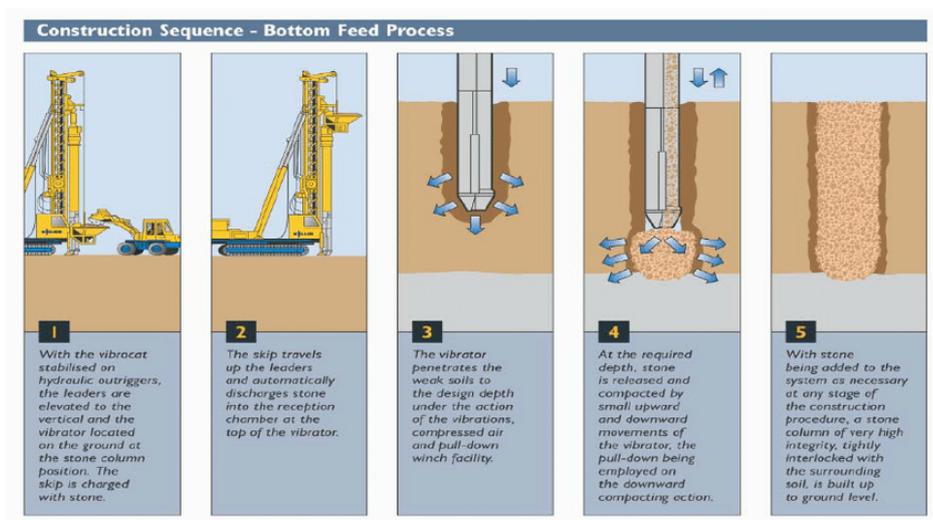
Berikut ini merupakan beberapa fungsi penggunaan *stone column*.

- Meningkatkan daya dukung tanah
- Pencegahan terjadinya likuifaksi
- Meningkatkan stabilitas lereng
- Mengurangi *settlement* pada pondasi dangkal
- Juga dapat berfungsi sebagai *vertical drain* sehingga mempercepat waktu konsolidasi

#### **2.4.3 Pencegahan Likuifaksi**

Potensi likuifaksi muncul pada kondisi tanah pasiran *loose* dan jenuh. Dengan melakukan penggetaran yang dilakukan oleh *vibro probe* pada proses *vibro*

*compaction* mengakibatkan tanah pasiran *loose* tadi bisa semakin memadat sehingga potensi likuifaksi bisa berkurang pada daerah yang diberi perkuatan *stone column*. Proses densifikasi ini akan meningkatkan nilai N-SPT dan kepadatan relatif tanah. Penggetaran oleh *vibro probe* dengan teknik *bottom feed* diilustrasikan pada gambar berikut.



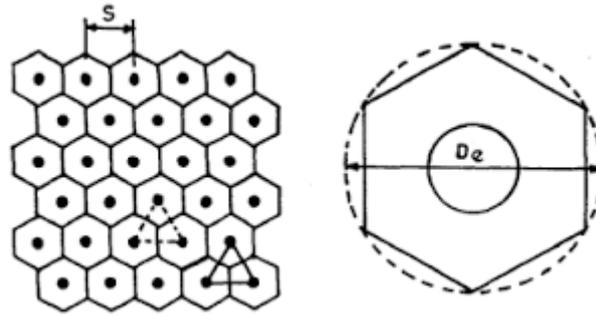
**Gambar 2. 8 Teknik *Bottom Feed* pada *Stone Column* (Google Image : [https://www.researchgate.net/figure/Bottom-Feed-method-of-stone-column-construction\\_fig2\\_237529862](https://www.researchgate.net/figure/Bottom-Feed-method-of-stone-column-construction_fig2_237529862))**

#### 2.4.4 Analisis Metode *Stone Column*

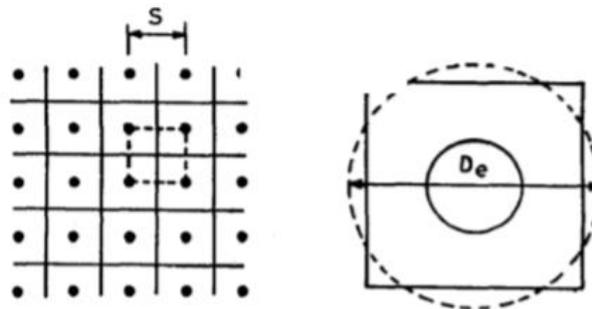
Dalam perencanaan *stone column* melibatkan tiga parameter umum yang harus ditentukan terlebih dahulu, yaitu :

1. Konfigurasi pemasangan *stone column*

Konfigurasi pemasangan *stone column* umumnya terdiri dari konfigurasi *Triangular* dan *Square*.



Gambar 2. 9 Konfigurasi pemasangan *stone column* triangular (Ramadhan 2011)



Gambar 2. 10 Konfigurasi pemasangan *stone column* square (Ramadhan 2011)

2. Diameter *stone column*

Untuk ukuran diameter *stone column* ditentukan berdasarkan kebutuhan seberapa efektif diameter yang dibutuhkan.

3. Jarak atau spasi antar *stone column*

Jarak atau spasi pusat ke pusat *stone column* disesuaikan dengan kebutuhan untuk mendapatkan desain yang efektif.

Dimana penentuan diameter dan spasi *stone column* dilakukan secara “*trial and error*”. Analisis dilakukan berdasarkan metode FHWA, sehingga dapat diketahui besar nilai *area replacement ratio* atau rasio pergantian luas ( $a_s$ ) yang nantinya digunakan untuk menentukan kenaikan nilai N-SPT setelah pemasangan *Stone Column*.

#### 2.4.4.1 Metode Evaluasi nilai FS'

Pada tahap awal, setelah menentukan tiga parameter umum, dilanjutkan dengan mencari nilai  $D_e$ , menggunakan persamaan dengan ketentuan sebagai berikut.

$$D_e = 1.05 * S \quad , \text{ untuk konfigurasi } \textit{Triangular} \quad (2.18)$$

$$D_e = 1.13 * S \quad , \text{ untuk konfigurasi } \textit{Square} \quad (2.19)$$

Dimana  $S$  adalah jarak antar *Stone Column*.

Selanjutnya adalah menentukan rasio pergantian luas *stone column* ( $a_c$ ) dan rasio pergantian luas tanah ( $a_s$ ) menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$a_s = \frac{A_s}{A} \quad (2.20)$$

$$a_c = \frac{A - A_s}{A} \quad (2.21)$$

Dimana :

$A$  = luas penampang *unit cell*

$A_s$  = luas penampang *stone column*

Tahap berikutnya adalah mendapat harga perbandingan antara luas *total unit cell* dengan luas *stone column* ( $A/A_s$ ) menggunakan persamaan berikut.

$$A_s = \frac{1}{4} \pi D^2 \quad (2.22)$$

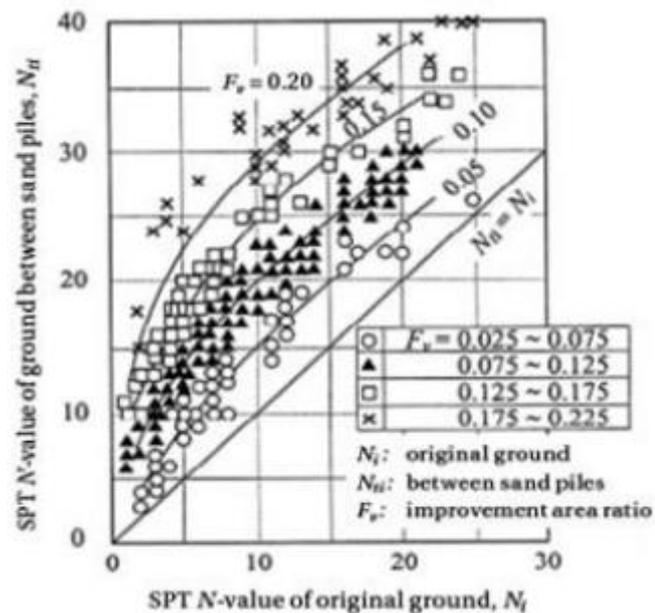
$$A = \frac{1}{4} \pi D_e^2 \quad (2.23)$$

Dimana :

$D$  = diameter *stone column*

$D_e$  = diameter ekivalen

Tahap berikutnya analisis peningkatan N-SPT tanah diantara *stone column* yang diakibatkan oleh getaran *vibroprobe* yang digambarkan oleh grafik hubungan kenaikan N-SPT dengan *area replacement ratio* ( $a_s$ ). penggunaan grafik ini pada desain *stone column* merupakan adaptasi dari metode perbaikan tanah *sand compaction pile*. Grafik yang dimaksud adalah sebagai berikut.



Gambar 2. 11 Grafik hubungan kenaikan N-SPT dengan nilai  $a_s$  (Kitazume 2004)

N-SPT tanah diantara *stone column* ini kemudian akan digunakan dalam perhitungan CRR kembali untuk mendapatkan nilai tahanan tanah perbaikan terhadap Likuifaksi sehingga akan menghasilkan nilai  $FS'$ . Dimana  $FS'$  merupakan besarnya faktor keamanan setelah pemasangan *stone column*.

Pada tahap terakhir yaitu melakukan pengecekan apakah peningkatan angka keamanan sudah sesuai dengan yang diinginkan yaitu  $FS' > 1.1$  supaya tanah dalam kondisi yang aman. Apabila kenaikan nilai  $FS'$  belum mencukupi, maka spesifikasi *stone column* diganti dengan memperkecil jarak antar *stone column*, memperbesar diameter *stone column* ataupun dengan mencoba mengganti pola pemasangan *stone column*. Prosedur desain *stone column* kemudian dijalani kembali seperti sebelumnya hingga mencapai angka keamanan yang diinginkan.

#### **2.4.4.2 Metode Evaluasi *Settlement* akibat Pemasangan *Stone Column***

Selain dapat meningkatkan daya dukung tanah, penggunaan *stone column* sebagai metode perbaikan tanah juga diharapkan bisa mereduksi besar penurunan yang terjadi akibat dari likuifaksi. Dalam perencanaannya, di lapangan diasumsikan penurunan yang terjadi pada *stone column* dan tanah yang diperkuatnya dianggap sama besar secara bersamaan, oleh karena itu akan terjadi penumpukan dan distribusi tegangan yang diterima *stone column* dan tanah yang diperkuat (Sihombing 2012). Berdasarkan metode FHWA, besarnya faktor penumpukan tegangan ( $n$ ) berkisar antara 2-5.

Pada tahap pertama adalah mendapatkan nilai rasio menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$\mu_c = \frac{1}{[1+(n-1)*a_s]} \quad (2.24)$$

$$\mu_s = \frac{n}{[1+(n-1)*a_s]} \quad (2.25)$$

Tahap kedua adalah menentukan nilai *Initial Effective Stress* ( $\sigma_o$ ), *Stress in Stone Column* ( $\sigma_s$ ), dan *Stress in Cohesive Soil* ( $\sigma_c$ ) menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$\sigma_o = (h * \gamma_{sat}) + (h * (\gamma_{sat} - \gamma_w)) \quad (2.26)$$

$$\sigma_s = \sigma_3 (1 + \sin\phi_s)/(1 - \sin\phi_s) \quad (2.27)$$

$$\sigma_3 = 9 * N_c \quad (2.28)$$

$$\sigma_s = q_{ult} = c * N_c \quad (2.29)$$

$$\sigma_c = 5 * c \quad (2.30)$$

$$\sigma_c \leq \mu_c \sigma = \mu_c \left( \frac{\sigma_s}{\mu_s} \right) \quad (2.31)$$

Pada tahap ketiga adalah menentukan nilai dari *Area of Stone Column* ( $A_s$ ), *Area Total* ( $A$ ), dan *Area of Cohesive Soil* ( $A_c$ ) menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$A_s = \frac{1}{4} \pi D^2 \quad (2.32)$$

$$A = A_s/A \quad (2.33)$$

$$A_c = A - A_s \quad (2.34)$$

Kemudian pada tahap keempat adalah menentukan nilai dari  $P_{ult}$  dan  $P_{all}$  menggunakan persamaan berikut.

$$P_{ult} = \sigma_s A_s + \sigma_c A_c \quad (2.35)$$

$$P_{all} = P_{ult}/SF \quad (2.36)$$

Tahap kelima yaitu menentukan nilai dari *Loading Apply in Unit Cell* ( $\sigma$ ) dan kembali menghitung nilai  $\sigma_c$  menggunakan persamaan berikut

$$\sigma = P_{all}/A \quad (2.37)$$

$$\sigma_c \leq \mu_c \sigma \quad (2.38)$$

Sehingga, pada tahap terakhir kita bisa menentukan besar *settlement* yang terjadi setelah pemasangan *stone column* akibat terjadinya likuifaksi menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$S_t = H \left( \frac{c_c}{1 + e_o} \right) \log \left( \frac{\sigma_o + \sigma_c}{\sigma_o} \right) \quad (2.39)$$

## 2.5 Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian terdahulu yang berhubungan mengenai Likuifaksi serta metode *Stone Column*, antara lain :

1. Dalam penelitian berjudul “*Prediction of liquefaction potential study at Bantul Regency the province of special region of Yogyakarta Indonesia*” (Hatmoko et all 2015) , diketahui bahwa analisis mengenai potensi adanya likuifaksi di Kabupaten Bantul, dengan mengambil sampel tanah di empat lokasi di Kabupaten Bantul. Data tanah yang diperoleh dianalisis menggunakan metode yang dikembangkan oleh Pusat Penelitian Rekayasa Gempa Nasional (NCEER), sehingga menghasilkan nilai CRR, CSR serta

FS. Pada kesimpulannya, dari keempat lokasi tersebut potensi akan terjadinya likuifaksi rata-rata pada saat  $\frac{a_{max}}{g} = 0.15$  , dengan variasi kedalaman terjadinya berkisar 10 hingga 30 meter dibawah permukaan tanah.

2. Dalam penelitian berjudul “Analisis Penggunaan *Stone Column* Pada Daerah Berpotensi Likuifaksi Studi Kasus Proyek *Airstrip* Tanjung Ulie, Halmahera, Maluku Utara” (Ramadhan 2011) , diketahui bahwa penelitian ini menganalisis potensi likuifaksi yang terjadi di studi kasus dan menggunakan *stone column* untuk penanggulangannya. Dengan metode analisis deterministik menggunakan *software* SHAKE2000 dan *software* NERA. Sedangkan untuk perencanaan menggunakan metode Priebe (1995). Pada kesimpulannya tanah pada lokasi studi kasus tersebut pada umumnya berjenis *loose sand* yang ditemui pada kedalaman 0 hingga 20 meter, dan faktor keselamatan meningkat setelah pemasangan *stone column* dengan konfigurasi pola segitiga sama sisi, diameter 1.4 dan spasi 2.6 sehingga menghasilkan lapisan tanah yang aman dari bahaya likuifaksi.
3. Dalam penelitian berjudul “Studi Potensi Likuifaksi Di Daerah Zona Patahan Opak patalan Bantul, Jogjakarta” (Soebowo et all 2007) , diketahui bahwa penelitian ini menganalisis tentang potensi likuifaksi di Opak Patalan Bantul, Yogyakarta. Analisis likuifaksi dan penurunan menggunakan metode Ishihara dan yoshimine (1990), dengan nilai Faktor Keamanan diambil hasil evaluasi potensi likuifaksi (metode Seed, 1997 dan Suzuki, 1997) dan menggunakan *software* LIQUIT. Pada kesimpulannya, kemunculan muka air tanah dangkal, kondisi lapisan pasir lepas dan

gambaran kegempaan di daerah lapisan sedimen bawah permukaan ini mudah mengalami terjadi likuifaksi serta penurunan lapisan tanah bervariasi antara 2 hingga 10 cm, dengan penurunan terbesar ( $>10$  cm) terjadi pada daerah bagian tengah Patalan.

4. Dalam penelitian berjudul “Analisis Potensi Likuifaksi Dengan Menggunakan Nilai Spt (Studi Kasus : Jembatan Ir. Soekarno Manado)” (Warouw et al 2019) , diketahui bahwa penelitian ini menganalisis adanya potensi likuifaksi menggunakan nilai N-SPT dengan membandingkan nilai *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) yang adalah nilai tahanan tanah untuk menahan Likuifaksi dengan nilai *Cyclic Stress Ratio* (CSR) yang merupakan rasio tegangan siklik yang terjadi pada tanah akibat gempa dan dapat menyebabkan Likuifaksi terjadi. Pada kesimpulannya, nilai percepatan gempa dipermukaan tanah maksimum pada lokasi studi kasus adalah 0.622g yang dimana daerah tersebut harus memperhatikan bahaya gempa dan bahaya terjadinya Likuifaksi, serta bertambahnya Moment Magnitude ( $M_w$ ) gempa mengakibatkan nilai *Cyclic Resistance Ratio* semakin kecil, sehingga dapat memperbesar potensi terjadinya Likuifaksi. Analisa potensi likuifaksi dengan variasi  $M_w = 8.5$  dan 9 berpotensi likuifaksi di lapisan I (0 m - 10 m).
5. Dalam penelitian berjudul “Analisis Potensi Likuifaksi Dari Data Cpt dan Spt Dengan Studi Kasus Pltu Ende Nusa Tenggara Timur” (Ikhsan 2011) , diketahui bahwa penelitian ini menganalisis adanya potensi likuifaksi menggunakan interpretasi data CPT dan SPT di lokasi studi kasus. Pada kesimpulannya, dari hasil evaluasi tahanan tanah terhadap likuifaksi dengan

dua metode yaitu CPT dan SPT, didapatkan bahwa analisis menggunakan metoda CPT lebih kritis dibandingkan metoda SPT. Selain itu potensi likuifaksi juga tergantung pada gradasi butiran, dengan nilai  $C_u$  dan  $C_c$  yang memiliki potensi likuifaksi yaitu  $C_u < 15$  dan  $C_c \leq 1$ ,  $C_c \geq 3$ .

6. Dalam penelitian berjudul “Studi Parameter Perencanaan *Stone Column* untuk Perbaikan *Bearing Capacity and Settlement* pada Tanah Lempung” (Sihombing 2015), diketahui bahwa dalam studi parameter pada penelitian tersebut ingin melihat bagaimana hubungan dari masing-masing parameter yang diperhitungkan dalam perhitungan perencanaan *stone column* dengan metode FHWA terhadap peningkatan kapasitas daya dukung serta penurunan yang terjadi. Pada kesimpulannya, penggunaan *stone column* pada tanah lempung dapat meningkatkan dan memperbaiki masalah daya dukung tanah dan penurunan yang terjadi. Selain itu, untuk analisis sudut geser material *stone column* ( $\phi$ ), bahwa dengan nilai  $\phi = 30, 35$  tidak terlalu efektif meningkatkan daya dukung tanah. Nilai sudut geser yang efektif adalah berkisar antar 40-50 derajat.