

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Likuifaksi

Likuifaksi adalah fenomena dimana kekuatan dan kekakuan tanah berkurang dikarenakan gempa atau pergerakan tanah lainnya. Hal ini merupakan suatu proses atau kejadian berubahnya sifat tanah dari keadaan padat menjadi keadaan cair, yang disebabkan oleh beban siklik pada waktu terjadi gempa sehingga tekanan air pori meningkat mendekati atau melampaui tegangan vertikal. Tanah yang mengalami likuifaksi tekanannya lebih tinggi pada dinding penahan yang dapat menyebabkan struktur tersebut menjadi miring atau geser. Gerakan ini dapat menyebabkan penurunan tanah (*settlement*) dan kerusakan struktur pada permukaan tanah. Secara visual peristiwa likuifaksi ini ditandai dengan munculnya lumpur pasir di permukaan tanah berupa semburan pasir (*sand boil*), rembesan air melalui rekahan tanah, atau bisa juga dalam bentuk tenggelamnya struktur bangunan di atas permukaan, penurunan muka tanah dan perpindahan lateral.

Fenomena yang terkait dengan likuifaksi adalah *flow liquefaction* dan *cyclic mobility*. *Flow liquefaction* adalah peristiwa dimana terjadi aliran-aliran tanah. Hal ini terjadi apabila tekanan geser statis yang diperlukan untuk mencapai kesetimbangan pada suatu massa tanah jauh lebih besar dari pada tegangan geser tanah dalam kondisi cair (*liquefied*). Deformasi yang terjadi merupakan akibat dari tekanan geser statik (*static shear stress*). Menurut Widodo (2018) “Pada peristiwa *flow liquefaction* ini, terdapat dua karakteristik yang dapat dilihat yaitu kecepatan aliran dan perpindahan material tanah yang sangat besar”. *Cyclic mobility* merupakan fenomena lainnya yang dapat menyebabkan deformasi permanen yang sangat besar akibat adanya guncangan gempa. Pada fenomena ini, deformasi yang terjadi diakibatkan oleh pembebanan siklik (*cyclic loading*) dan tekanan geser statis (*static shear stress*). Dalam hal ini deformasi yang terjadi adalah deformasi lateral (*lateral spreading*).

Menurut Ayono (2018), ada beberapa faktor yang menyebabkan terjadinya likuifaksi :

1. Kepadatan Tanah

Kepadatan dari tanah pasir dapat dinyatakan dengan nilai *relative density* (*Dr*). Semakin besar nilai *Dr* maka semakin besar tahanannya terhadap likuifaksi. Likuifaksi umumnya terjadi pada tanah yang bergradasi seragam (*uniformly graded soil*). Sementara tanah yang bergradasi baik (*well graded soil*) umumnya mempunyai tahanan terhadap likuifaksi lebih besar dibandingkan dengan tanah yang bergradasi jelek (*poor graded soil*).

2. Umur dari deposit

Semakin tua umur dari deposit tersebut maka semakin besar tahanannya terhadap bahaya likuifaksi. Hal ini disebabkan karena adanya proses sementasi (*cementation*) antar partikel. Tahanan terhadap likuifaksi akan meningkat dengan meningkatnya tegangan efektif. Sebagai akibatnya suatu daerah dimana air mukanya tinggi atau dekat ke permukaan akan lebih mudah mengalami proses likuifaksi dibandingkan dengan daerah dimana muka air terdapat pada posisi yang cukup dalam dari permukaan.

3. Gradasi partikel

Tanah dengan partikel yang berbentuk bundar akan lebih mudah mengalami proses likuifaksi dibandingkan dengan tanah yang partikelnya bersudut. Hal ini disebabkan tanah dengan partikel bundar lebih mudah untuk dipadatkan.

4. Tekanan kekang (*confining pressure*)

Potensi likuifaksi tanah menurun dengan meningkatnya tekanan kekang (*confining pressure*). Sejumlah uji laboratorium menunjukkan bahwa dibutuhkan tegangan yang besar dengan meningkatnya tekanan batas untuk menyebabkan terjadinya likuifaksi pada kondisi pembebanan ulang alik di laboratorium.

5. Intensitas gempa (*the intensity ground shaking*)

Tingkat kerentanan suatu deposit tanah mengalami likuifaksi juga tergantung kepada magnitudo tegangan dan regangan yang diinduksikan oleh gempa bumi yang berhubungan dengan intensitas gempa bumi.

6. Durasi gempa (*duration of ground shaking*)

Durasi gempa merupakan faktor penting untuk menentukan potensi likuifaksi tanah, karena faktor ini menentukan jumlah ulang alik tegangan yang diberikan terhadap tanah untuk menyebabkan likuifaksi pada kondisi pembebanan ulang alik (*cycling loading*) di laboratorium.

2.2 Kekuatan Geser Tanah

Kekuatan geser (*shear strength*) tanah merupakan gaya tahanan internal yang bekerja persatuan luas massa tanah untuk menahan keruntuhan atau kegagalan sepanjang bidang runtuh dalam massa tanah tersebut. Kuat geser tanah tidak tetap pada jenis tanah tertentu. Pada kedalaman yang besar, umumnya tanah lebih kuat daripada di permukaan. Pada tanah urugan, lapisan bawah lebih kuat dari lapisan teratas. Hal ini karena kuat geser tanah bergantung pada tegangan. Kuat geser tanah juga dapat bertambah disebabkan oleh pengaruh alam seperti curah hujan atau pengaruh kegiatan manusia pada lereng. Kekuatan geser yang dimiliki suatu tanah disebabkan oleh :

1. Tanah berbutir halus (kohesif) misalnya lempung, kekuatan geser yang dimiliki tanah disebabkan karena adanya kohesi atau lekatan antara butir – butir tanah (c soil).
2. Pada tanah berbutir kasar (non kohesif), kekuatan geser disebabkan karena adanya gesekan antara butir – butir tanah sehingga sering disebut sudut gesek dalam (ϕ soil).
3. Pada tanah yang merupakan campuran antara tanah halus dan tanah kasar (c dan ϕ soil), kekuatan geser disebabkan karena adanya lekatan dan gesekan antara butir – butir tanah.

2.3 Tanah Yang Berpotensi Terjadi Likuifaksi

Salah satu jenis tanah yang memiliki potensi terjadinya likuifaksi yaitu tanah pasir lepas dan jenuh air. Menurut Towhata (2008), “Likuifaksi terjadi pada tanah yang berpasir lepas (tidak padat) dan jenuh air. Seiring naiknya tekanan air yang diakibatkan oleh guncangan gempa maka tegangan efektif (σ') menjadi bekurang”. Apabila beban siklik terjadi seperti saat gempa bumi, pasir lepas cenderung mengalami penurunan volume, hal ini mengakibatkan

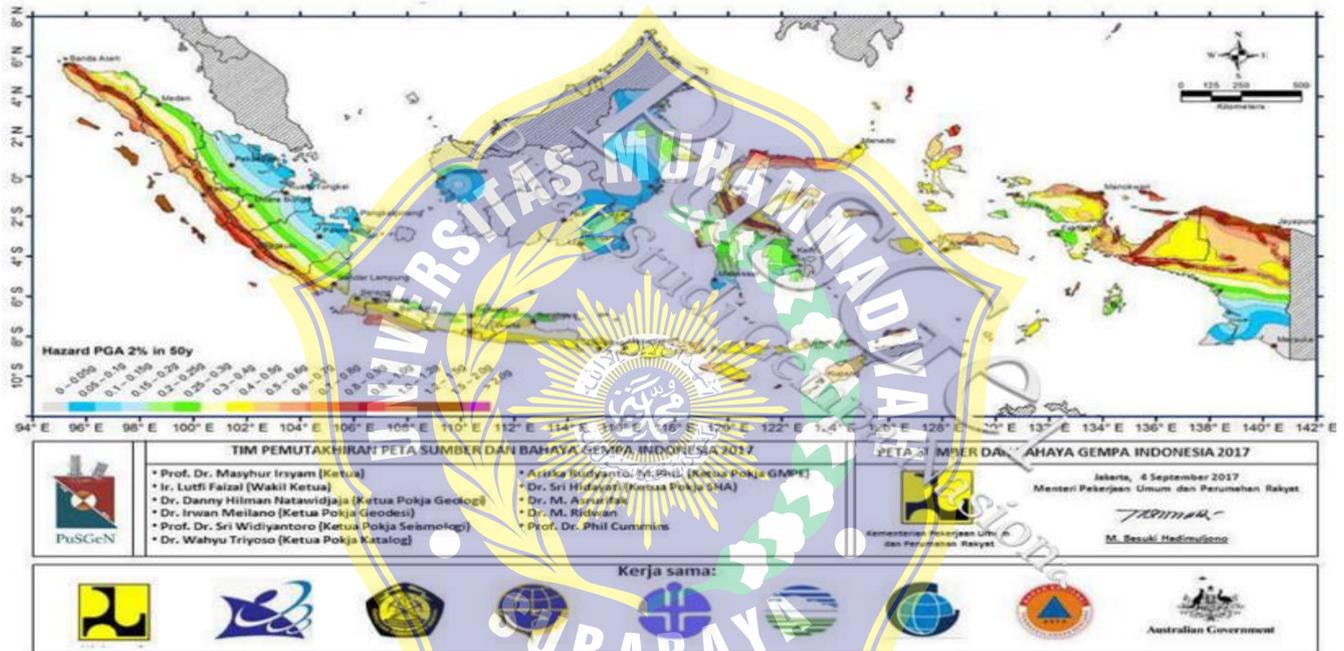
terjadinya peningkatan tekanan air pori dan penurunan kekuatan geser efektif tanah, tekanan air meningkat sehingga terjadi pelunakan dan melemahnya deposit tanah, tanah akan lebih berperilaku sebagai cairan dari pada padat karena kekuatan antar kontak partikel berkurang sehingga menyebabkan likuifaksi. Deposit tanah yang berpotensi terlikuifaksi pada saat terjadinya gempa adalah pasir halus, pasir berlumpur dan pasir biasa.

2.4 Metode Evaluasi Potensi Likuifaksi

Potensi likuifaksi dapat dihitung dengan melakukan uji pembebanan siklik atau dengan mengukur karakteristik tanah dengan uji lapangan *cone penetration test* (CPT) dan *standard penetration test* (SPT). Namun pada penelitian ini, penulis hanya menggunakan data CPT untuk menganalisis terjadinya likuifaksi. Metode yang digunakan penulis untuk analisis potensi likuifaksi dibagi menjadi dua yaitu analisis deterministik dan probabilistik. Dalam analisis deterministik digunakan metode Youd-Idriss (1996), hasil analisis dan evaluasinya berupa kesimpulan terjadi atau tidak terjadinya likuifaksi yang diinterpretasikan melalui besarnya nilai faktor keamanan (FS). Sedangkan untuk analisis probabilistik digunakan metode Cetin (2004), hasil analisis dan evaluasinya berupa kesimpulan besarnya resiko yang dapat terjadi likuifaksi.

2.4.1 Menentukan nilai a_{max}

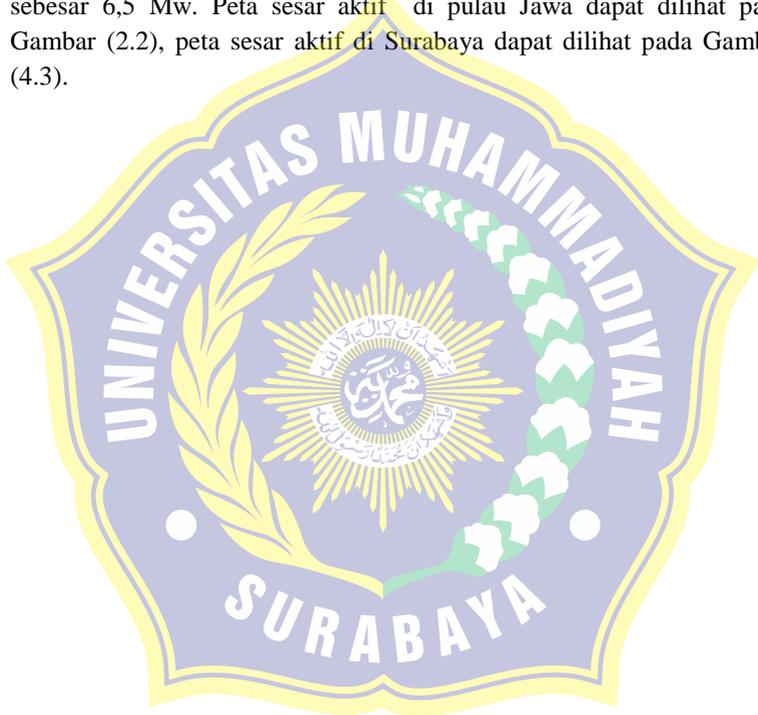
Nilai a_{max} merupakan nilai percepatan tanah maksimum yang terjadi selama gempa bumi. Nilai a_{max} yang digunakan penulis sebesar 0,3 g, berdasarkan Gambar (2.1) peta percepatan puncak di batuan dasar (SB) untuk probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun.

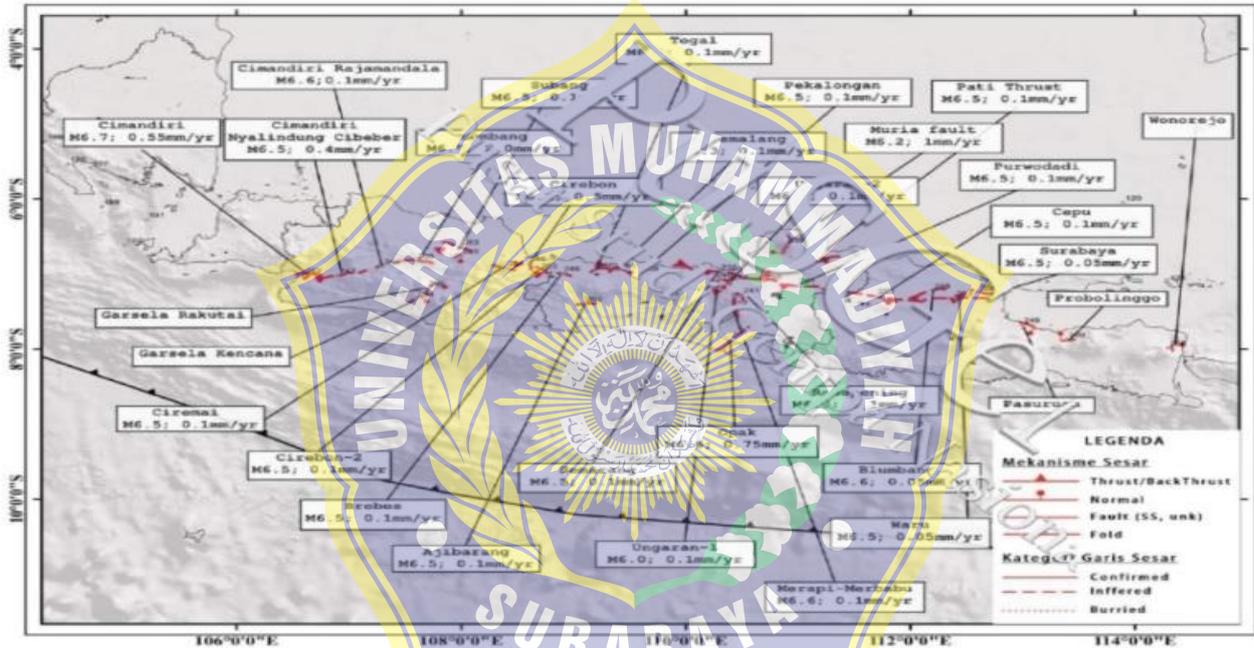


Gambar 2.1 Peta percepatan puncak di batuan dasar (SB) untuk probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun
Sumber : Peta sumber dan bahaya gempa (2017)

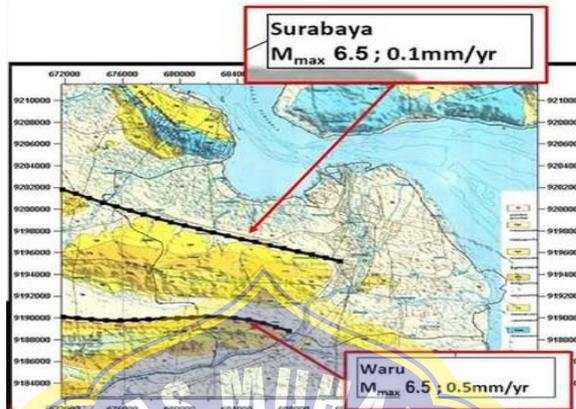
2.4.2 Menentukan nilai Mw

Nilai Mw merupakan ukuran nilai magnitudo dari besarnya gempa bumi. Nilai Mw yang digunakan penulis berdasarkan penelitian dari Pusat Gempa Nasional Kementerian (2017), yang menyatakan ada penambahan sesar aktif di Pulau Jawa yaitu sesar Surabaya dan sesar Waru, ke dua sesar tersebut memiliki potensi gempa sebesar 6,5 Mw. Peta sesar aktif di pulau Jawa dapat dilihat pada Gambar (2.2), peta sesar aktif di Surabaya dapat dilihat pada Gambar (4.3).





Gambar 2.2 Sesar aktif di Pulau Jawa
 Sumber : Pusat Gempa Nasional (2017)



Gambar 2.3 Sesar aktif di Surabaya
 Sumber : Pusat Gempa Nasional (2017)

2.4.3 Berat volume tanah

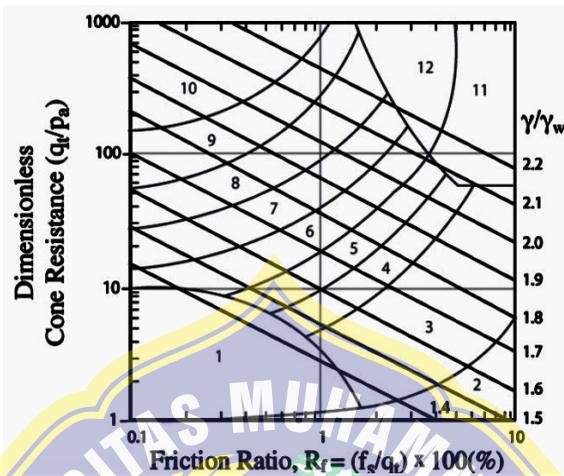
Berat Volume tanah merupakan perbandingan antara berat tanah kering dengan volume pori-pori tanah. Semakin padat suatu tanah semakin tinggi nilai berat volume tanahnya, yang berarti daya serap terhadap air semakin kecil. Nilai berat volume tanah (γ) dapat ditentukan dari Persamaan (2.1) dengan nilai γ/γ_w diperoleh dari grafik Gambar (2.4).

$$\gamma = \frac{\gamma}{\gamma_w} \cdot \gamma_w \quad (2.1)$$

dengan,

γ = Berat volume tanah (kN/m^3)

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



Gambar 2.4 Grafik CPT vs Unit Weight Correlation
 Sumber :Dr.Grow,(Senior Geotechnical Consultant)

2.4.4 Klasifikasi tanah

Klasifikasi tanah ditentukan untuk mengetahui jenis tanah sehingga dapat diketahui nilai ekponen tanah yang terdapat pada lokasi pengeboran. Data CPT tidak dapat menentukan klasifikasi tanah, sehingga klasifikasi tanah ditentukan dengan grafik perilaku tanah seperti yang ditunjukkan pada Gambar (2.4). Kemudian hasil dari grafik tersebut dikorelasikan pada Tabel (2.1) untuk mengetahui klasifikasi tanah berdasarkan zona yang diperoleh.

Tabel 2.1 Klasifikasi tanah berdasarkan zona

Zone	Soil behavior type
1	Sensitive fine grained
2	Organic material
3	Clay
4	Silty clay to clay
5	Clayey silt to silty clay
6	Sandy silt to clayey silt
7	Silty sand to sandy silt
8	Sand to silty sand
9	Sand
10	Gravelly sand to sand
11	Very stiff fine grined
12	Sand to clayey sand

Sumber : P.K. Robertson (1986)

2.4.5 Tegangan total (σ_v)

Tegangan total merupakan tegangan pada lapisan yang diakibatkan oleh beban dari tanah yang ada di atasnya tanpa memperhitungkan tegangan air pori (u). Semakin jauh kedalaman tanah maka semakin besar tegangan vertikal totalnya. Tegangan total (σ_v) dapat dihitung dengan rumus :

$$\sigma_v = h \cdot \gamma \quad (2.2)$$

dengan,

σ_v = tegangan total (kN/m^2)

γ = berat volume tanah (kN/m^3)

h = tinggi muka air tanah diukur dari permukaan tanah (m)

2.4.6 Tekanan air pori tanah (u)

Tekanan air pori tanah disebut juga dengan tekanan netral yang bekerja kesegala arah, yaitu tekanan air yang mengisi rongga di dalam butiran padat. Tanah yang mengalami tekanan mengakibatkan angka pori berkurang dan merubah sifat-sifat mekanika tanah yang lain, seperti menambah tahanan geser. Tekanan air pori pada kedalaman akan berupa tekanan hidrostatis, karena ruang pori diantara butiran saling berhubungan.

$$u = ha \times \gamma_w \quad (2.3)$$

dengan,

u = tekanan air pori tanah (kN/m^2)

ha = jarak antara titik A dan muka air (m)

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

2.4.7 Tegangan efektif (σ'_v)

Tegangan efektif merupakan tegangan pada lapisan tanah yang diakibatkan oleh beban dari tanah yang ada di atasnya dengan memperhitungkan tegangan air pori (u). Tanah yang berada dalam air akan dipengaruhi oleh gaya hidrostatis. Berat tanah yang terendam disebut berat tanah efektif, dan tegangan yang terjadi disebut tegangan efektif.

$$\sigma'_v = \sigma_v - u \quad (2.4)$$

dengan,

σ'_v = tegangan efektif (kN/m^2)

σ_v = tegangan total (kN/m^2)

u = tekanan air pori tanah (kN/m^2)

2.5 Metode Youd-Idriss (1996)

Dalam analisis potensi likuifaksi dengan metode Youd-Idriss (1996) nilai faktor keamanan (FS) evaluasinya hanya berupa kesimpulan terjadi atau tidak terjadinya likuifaksi yang diperoleh dari besarnya nilai FS.

2.5.1 Menentukan nilai r_d

Nilai r_d merupakan koefisien tegangan reduksi, semakin jauh kedalaman tanah nilai tegangan reduksi akan semakin kecil. Nilai r_d dapat di cari dengan persamaan Liao dan Whitman (1986).

untuk $z \leq 9,15$ m;
$$r_d = 1,0 - 0,00765 \cdot z \quad (2.5)$$

untuk $9,15 \leq z \leq 23$ m;
$$r_d = 1,174 - 0,026 \cdot z \quad (2.6)$$

dengan,
 z = kedalaman tanah yang ditinjau (m)

2.5.2 Menentukan nilai Q

Nilai Q adalah nilai CPT tak berdimensi. Pada tanah pasir murni (*clean sand*) nilai eksponen yang sesuai yaitu 0,5. Untuk jenis tanah lempung nilai eksponen $n=1$, jenis tanah lanau atau lanau berpasir nilai $n = 0,5-1$. Dengan persamaan Youd dan Idriss (1996) nilai Q dapat dihitung sebagai berikut :

$$Q = \{ (q_c - \sigma'_v) / Pa \} [(Pa / \sigma'_v)^n] \quad (2.7)$$

dengan,

Q = nilai CPT tak berdimensi

q_c = nilai tahanan ujung konus (kN/m^2)

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

σ_v = tegangan total (kN/m^2)
 P_a = tekanan 1 atm (101,3 KPa)
 n = nilai eksponen jenis tanah

P_a merupakan tekanan 1 atm dengan nilai 101,3 kPa. Dalam buku (*The Atmospheric Pressure Standart*) nilai 101,3 di peroleh dari persamaan di bawah ini :

$$1 \text{ atm} = 1,058 \frac{\text{ton}}{\text{ft}^2} = 1,033 \frac{\text{Kg force}}{\text{cm}^2} = 1,013 \text{ bar} = 101,3 \text{ KPa} \quad (2.8)$$

2.5.3 Menentukan nilai F

F adalah nilai faktor relative karapatan tanah. Untuk menghitung nilai F menggunakan persamaan Youd dan Idriss (1996).

$$F = \{f_s / (q_c - \sigma_v)\} \times 100\% \quad (2.9)$$

dengan,

F = nilai faktor relative kerapatan tanah
 f_s = nilai local friction (kN/m^2)
 q_c = nilai tahanan ujung konus (kN/m^2)
 σ_v = tegangan total (kN/m^2)

2.5.4 Menentukan nilai I_c

Nilai I_c merupakan indeks perilaku tanah. Untuk menghitung nilai I_c digunakan persamaan Youd dan Idriss (1996).

$$I_c = \{(3,47 - \log Q)^2 + (1,22 + \log F)^2\}^{0,50} \quad (2.10)$$

dengan,

Q = nilai CPT tak berdimensi
 F = nilai faktor relatif kerapatan tanah

2.5.5 Menentukan nilai C_q

Nilai C_q merupakan nilai faktor normalisasi tahanan ujung konus. Nilai C_q dapat dihitung dengan persamaan berikut ini :

$$C_q = \left(\frac{p_a}{\sigma'_v} \right)^n \quad (2.11)$$

dengan,

C_q = faktor normalisasi tahanan (kN/m^2)

P_a = tekanan pada 1 atm (101,3 KPa)

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

2.5.6 Menentukan nilai $q_c \text{IN}$

Nilai tahanan ujung terkoreksi yang akan diformulasikan sebagai persamaan berikut Youd dan Idriss (2001).

$$q_c \text{IN} = C_q (q_c / P_a) \quad (2.12)$$

dengan,

$q_c \text{IN}$ = Nilai tahanan ujung terkoreksi (kN/m^2)

C_q = Faktor normalisasi tahanan ujung konus (kN/m^2)

P_a = tekanan pada 1 atm (101,3 Kpa)

2.5.7 Menentukan nilai K_c

Nilai K_c merupakan nilai faktor koreksi untuk karakteristik butiran. Nilai K_c dapat dicari dari persamaan Robertson and Wride (1998).

$$\text{Untuk } I_c \leq 1,64 \text{ maka;} \quad (2.13)$$

$$K_c = 1,0$$

$$\text{Untuk } I_c > 1,64 \text{ maka;} \quad (2.14)$$

$$K_c = -0,403 \cdot I_c^4 + 5,581 \cdot I_c^3 - 21,63 \cdot I_c^2 + 33,75 \cdot I_c - 17,88$$

2.5.8 Menentukan nilai $(q_cIN)_{cs}$

Nilai $(q_cIN)_{cs}$ merupakan nilai ekuivalen normalisasi *clean sand* CPT. Nilai $(q_cIN)_{cs}$ dihitung dengan persamaan berikut :

$$(q_cIN)_{cs} = K_c \cdot q_cIN \quad (2.15)$$

dengan,

$(q_cIN)_{cs}$ = normalisasi *clean sand* CPT (kN/m^2)

K_c = faktor koreksi untuk karakteristik butiran

q_cIN = nilai tahanan ujung terkoreksi (kN/m^2)

2.5.9 Menentukan nilai $CRR_{7,5}$

Nilai $CRR_{7,5}$ dapat dihitung dengan menggunakan metode persamaan Youd - Idriss (2001). Persamaan ini hanya digunakan pada jenis tanah pasir, dan lanau yang memiliki sifat tak jenuh air (non kohesif). Untuk tanah yang jenisnya lempung, dapat dikategorikan tanah jenuh air (kohesif) sehingga perhitungan tidak perlu dilanjutkan (*not applicable*).

$$\text{Jika nilai } (q_cIN)_{cs} < 211 \quad (2.16)$$

$$CRR_{7,5} = \exp\left[\left(\frac{(q_cIN)_{cs}}{540}\right) + \left(\frac{(q_cIN)_{cs}}{67}\right)^2 - \left(\frac{(q_cIN)_{cs}}{80}\right)^3 + \left(\frac{(q_cIN)_{cs}}{114}\right)^4 - 3\right]$$

$$\text{Jika } CRR_{7,5} \text{ nilai } (q_cIN)_{cs} > 211 \quad (2.17)$$

Maka = 2

dengan,

$CRR_{7,5}$ = ketahanan terhadap gempa pada magnitudo 7,5

$(q_cIN)_{cs}$ = normalisasi *clean sand* CPT (kN/m^2)

2.5.10 Menentukan nilai MSF

Nilai MSF (*Magnitude Scalling Factor*) adalah besaran yang menyatakan besarnya energi seismik yang dipancarkan oleh sumber gempa. Seed dan Idriss mendapatkan nilai MSF untuk magnitude lebih kecil dari 7.5 dan magnitude lebih besar dari 7.5 yaitu sebagai berikut :

$$M_w < 7.5, MSF = 10^{2.24} / M_w^{2.56} \quad (2.18)$$

$$M_w > 7.5, MSF = (M_w / 7.5) - 2.56 \quad (2.19)$$

dengan,

M_w = nilai magnitude gempa

MSF = faktor pengali magnitude gempa

2.5.11 Menentukan nilai CRR

Nilai CRR merupakan nilai ketahanan suatu lapisan tanah terhadap tegangan siklik. Untuk menghitung CRR dengan besar magnitude gempa selain 7.5 diperlukan faktor koreksi yang disebut *magnitude scalling factor* (MSF). Nilai CRR dapat dicari dari persamaan Seed (1983).

$$CRR = CRR_{7.5} \cdot MSF \cdot K_{\sigma} \cdot K_{\alpha} \quad (2.20)$$

dengan,

CRR = nilai ketahanan terhadap gempa dengan magnitude lebih besar atau lebih kecil dari 7,5

$CRR_{7.5}$ = ketahanan terhadap gempa pada magnitude 7,5

MSF = faktor pengali magnitude gempa (*magnitude scalling factor*)

K_{σ} = nilai faktor koreksi lapisan tanah akibat tekanan geser statis

K_{α} = nilai faktor koreksi lapisan tanah akibat tekanan normal statis

Untuk variabel $K\sigma$ dan $K\alpha$ dalam perhitungan biasanya hanya dalam kasus khusus sehingga dalam kasus ini $K\sigma$ dan $K\alpha$ bernilai 1.

2.5.12 Menentukan nilai CSR

Nilai CSR merupakan nilai perbandingan antara tegangan geser rata-rata yang diakibatkan oleh gempa dengan tegangan vertikal efektif di tiap lapisan . Nilai CSR dapat dicari dengan persamaan dari Seed-Idriss (1971).

$$CSR = 0,65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) \cdot rd \quad (2.21)$$

dengan,

a_{max} = Percepatan tanah maximum akibat gempa (g)

g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

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

σ'_v = tegangan efektif (kN/m^2)

rd = koefisien tegangan reduksi

Nilai 0.65 adalah *weighing factor* untuk menghitung siklus tegangan uniform yang dibutuhkan untuk menghasilkan kenaikan tekanan air pori yang sama dengan getaran gempa bumi irregular.

2.5.13 Menentukan nilai faktor keamanan (FS)

Nilai FS merupakan nilai faktor keamanan yang menentukan suatu lokasi memiliki potensi terjadi likuifaksi atau tidak. Nilai faktor keamanan dapat dicari dengan persamaan dari Youd-Idriss (2001).

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (2.22)$$

dengan,

FS = faktor keamanan

CRR = *cyclic resistance ratio*

CSR = *cyclic stress ratio*

Menurut persamaan Youd-Idriss (2001), faktor keamanan yang digunakan tidak boleh kurang dari satu, karena jika kurang dari satu maka tanah mengalami likuifaksi :

$$FS = \frac{CRR}{CSR} < 1 \text{ (terjadi likuifaksi)} \quad (2.23)$$

$$FS = \frac{CRR}{CSR} = 1 \text{ (Kondisi kritis)} \quad (2.24)$$

$$FS = \frac{CRR}{CSR} > 1 \text{ (tidak terjadi likuifaksi)} \quad (2.25)$$

2.6 Metode Cetin (2004)

Dalam analisis potensi likuifaksi, faktor aman terhadap likuifaksi biasanya diperkuat dengan adanya analisis probabilitas atau kemungkinan terjadinya likuifaksi. Analisis probabilitas likuifaksi bertujuan untuk memprediksi seberapa besar kemungkinan terburuk akan terjadi likuifaksi di suatu lokasi.

2.6.1 Menentukan nilai rd

Nilai rd merupakan koefisien tegangan reduksi, semakin jauh kedalaman tanah nilai tegangan reduksi akan semakin kecil. Nilai rd dapat di cari dengan persamaan Cetin (2004).

Untuk $z < 20\text{m}$;

$$rd = \frac{\left[1 + \frac{-9,147 - 4,173 \cdot a_{max} + 0,652 \cdot Mw}{10,567 + 0,089 \cdot e^{0,089 \cdot (-z \cdot 3,28 - 7,760 \cdot a_{max} + 78,576)}} \right]}{\left[1 + \frac{-9,147 - 4,173 \cdot a_{max} + 0,652 \cdot Mw}{10,567 + 0,089 \cdot e^{0,089 \cdot (-7,760 \cdot a_{max} + 78,576)}} \right]} \quad (2.26)$$

Untuk $z \geq 20\text{m}$

$$rd = \frac{\left[1 + \frac{-9.147 - 4.173 \cdot amax + 0.652 \cdot Mw}{10.567 + 0.089 \cdot e^{0.089 \cdot (-7.760 \cdot amax + 78.576)}}\right]}{\left[1 + \frac{-9.147 - 4.173 \cdot amax + 0.652 \cdot Mw}{10.567 + 0.089 \cdot e^{0.089 \cdot (-7.760 \cdot amax + 78.567)}}\right]} - 0,0014 \cdot (z.3,28-65) \quad (2.27)$$

2.6.2 Menentukan nilai c

Nilai c merupakan nilai normalisasi eksponen tiap kedalaman, dapat dihitung dengan persamaan Cetin (2004).

$$c = f_1 \cdot \left(\frac{FR}{f_3}\right)^{f_2} \quad (2.28)$$

dimana,

$$f_1 = x_1 \cdot qc^{x_2} \quad (2.29)$$

$$f_2 = -(y_1 \cdot qc^{y_2} + y_3) \quad (2.30)$$

$$f_3 = \text{abs}[\log(10 + qc)]^{z_1} \quad (2.31)$$

Dengan input parameter untuk persamaan tersebut :

$$x_1 = 0,78$$

$$x_2 = -0,33$$

$$y_1 = -0,32$$

$$y_2 = -0,35$$

$$y_3 = 0,49$$

$$z_1 = 1,21$$

2.6.3 Menentukan nilai Cq

Nilai Cq merupakan nilai faktor normalisasi tahanan ujung konus, nilai Cq dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$Cq = \left(\frac{Pa}{\sigma'_v}\right)^c \quad (2.32)$$

dengan,

Cq = faktor normalisasi tahanan ujung konus (MPa)

Pa = tekanan pada 1 atm (101,3 KPa)

c = normalisasi eksponen
 σ'_v = tegangan efektif (kN/m^2)

2.6.4 Menentukan nilai $qc,1$

Nilai $qc,1$ merupakan nilai tahanan ujung konus yang dinormalkan. Nilai $qc,1$ dapat dihitung dengan persamaan :

$$qc,1 = Cq \cdot qc \quad (2.33)$$

dengan,

$qc,1$ = tahanan ujung konus yang dinormalkan (MPa)

Cq = faktor normalisasi tahanan ujung konus (MPa)

qc = nilai tahanan ujung konus (kN/m^2)

2.6.5 Menentukan nilai CSR

Nilai CSR merupakan nilai perbandingan antara tegangan geser rata-rata yang diakibatkan oleh gempa dengan tegangan vertikal efektif di tiap lapisan . Nilai CSR dapat dicari dengan persamaan:

$$CSR = 0,65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) \cdot rd \quad (2.34)$$

dengan,

a_{max} = percepatan tanah maximum akibat gempa (g)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

σ_v = tegangan total (kN/m^2)

σ'_v = tegangan efektif (kN/m^2)

rd = tegangan reduksi

2.6.6 Menentukan nilai PL

Nilai PL adalah nilai probabilitas likuifaksi pada suatu lokasi. Nilai PL menentukan besarnya resiko terjadi likuifaksi. Semakin besar nilai PL semakin besar potensi terjadinya likuifaksi Untuk menentukan nilai probabilitas likuifaksi dapat dihitung dengan distribusi normal

komulativ menggunakan *Microsoft excel* yaitu *NORMSDIST(x,mean,standard_dev,cumulative)*. Berikut ini persamaan untuk menentukan nilai PL :

$$PL = \phi (x) \quad (2.35)$$

dimana,

$$x = \left\{ \frac{[qc,1^{1,045} + qc,1(0.110.FR) + (0.001.FR) + c(1+0.850.FR)] - 7.177.\ln(CSR) - 0.848.\ln(Mw) - 0.002.\ln(\sigma'_v) - 20.923}{1.632} \right\} \quad (2.36)$$

dengan,

PL = nilai probabilitas likuifaksi

qc,1 = tahanan ujung konus yang dinormalkan (MPa)

FR = *friction ratio*

c = normalisasi eksponen

σ'_v = tegangan efektif (kN/m^2)

Mw = nilai magnitudo gempa

2.6.7 Menentukan nilai $\phi^{-1}PL$

Nilai $\phi^{-1}PL$ adalah nilai invers dari probabilitas likuifaksi. Untuk menentukan nilai invers probabilitas likuifaksi dapat dihitung dengan invers distribusi normal kumulatif menggunakan *Microsoft excel* sebagai berikut :

$$\phi^{-1}PL = \text{NORM.S.INV}(\text{probability,mean,standar_dev}) \quad (2.37)$$

2.6.8 Menentukan nilai CRR

Nilai CRR merupakan nilai ketahanan suatu lapisan tanah terhadap tegangan siklik. Dalam metode Cetin (2004) nilai CRR

dengan besar magnitude gempa selain 7.5 Mw tidak diperlukan faktor koreksi. Persamaan untuk mencari nilai CRR sebagai berikut :

$$CRR = \exp \left\{ \frac{qc,1^{1.045} + qc,1(0.110.FR) + (0.001.FR) + c(1+0.850.FR)}{-0.848.\ln(Mw) - 0.002.\ln(\sigma'_v) - 20.923 + 1.632.\phi^{-1}(PL)} \right\} \quad (2.38)$$

dengan,

CRR = *cyclic resistance ratio*

qc,1 = tahanan ujung konus yang dinormalkan (MPa)

FR = *friction ratio*

c = normalisasi eksponen

σ'_v = tegangan efektif (kN/m²)

Mw = nilai magnitude gempa

$\phi^{-1}PL$ = nilai invers PL

2.6.9 Menentukan nilai FS

Nilai FS adalah nilai faktor keamanan untuk menentukan potensi likuifaksi. Dalam metode Cetin (2004) nilai FS dapat dihitung berdasarkan persamaan (2.39).

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (2.39)$$

dengan,

FS = faktor keamanan

CRR = *cyclic resistance ratio*

CSR = *cyclic stress ratio*

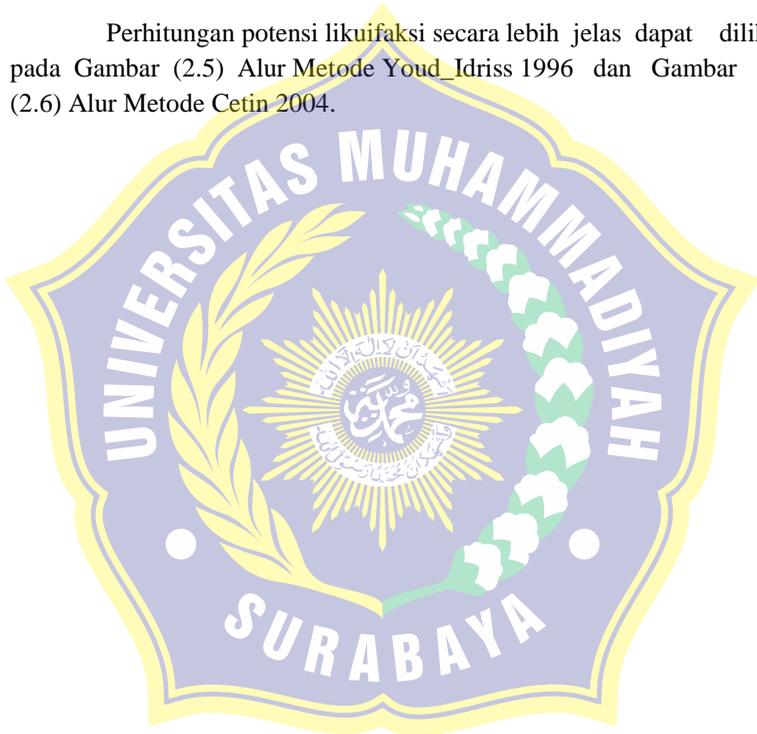
Menurut persamaan Cetin (2004), faktor keamanan (FS) yang digunakan tidak boleh kurang dari satu, karena jika kurang dari satu maka tanah mengalami likuifaksi :

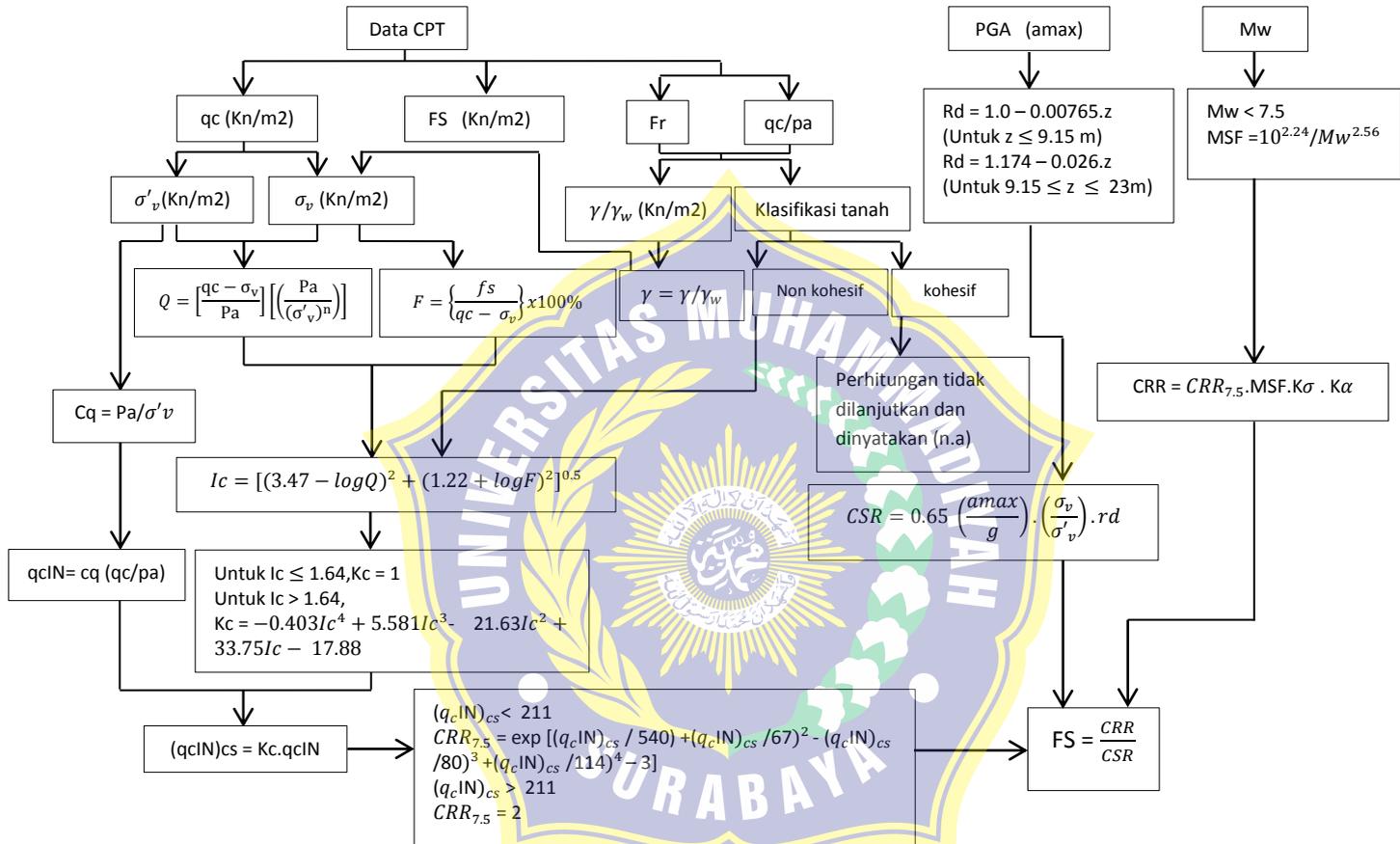
$$FS = \frac{CRR}{CSR} < 1 \text{ (terjadi likuifaksi)} \quad (2.40)$$

$$FS = \frac{CRR}{CSR} = 1 \text{ (Kondisi kritis)} \quad (2.41)$$

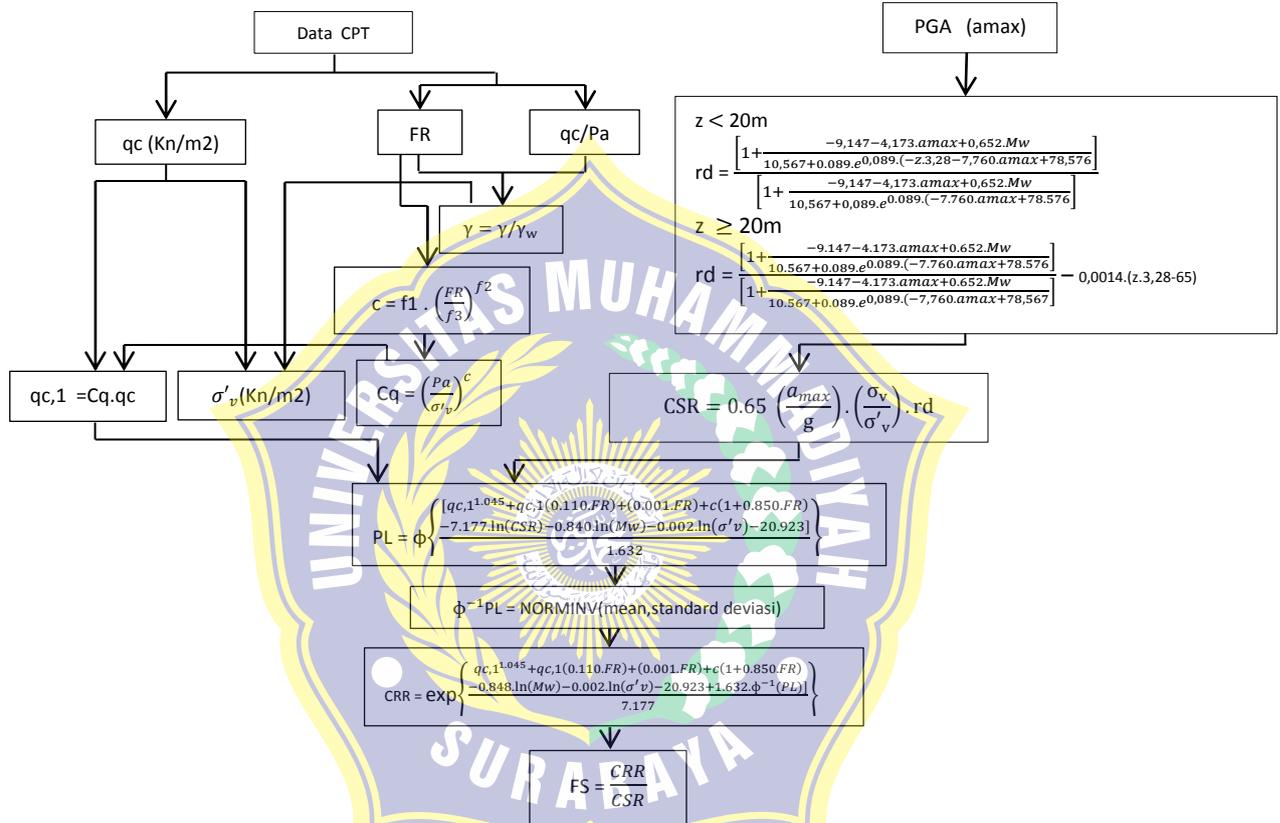
$$FS = \frac{CRR}{CSR} > 1 \text{ (tidak terjadi likuifaksi)} \quad (2.42)$$

Perhitungan potensi likuifaksi secara lebih jelas dapat dilihat pada Gambar (2.5) Alur Metode Youd_Idriss 1996 dan Gambar (2.6) Alur Metode Cetin 2004.





Gambar 2.5 Alur metode Youd-Idriss (1996)



Gambar 2.6 Alur metode Cetin (2004)

Keterangan :

a_{max}	= percepatan tanah maximum akibat gempa (g)
g	= percepatan gravitasi (m/s^2)
σ_v	= tegangan total (kN/m^2)
σ'_v	= tegangan efektif (kN/m^2)
rd	= koefisien tegangan reduksi
γ	= berat volume tanah (kN/m^3)
h	= kedalaman tanah (m)
u	= tekanan air pori tanah (kN/m^2)
γ_w	= berat volume air ($9,81kN/m^3$)
Mw	= nilai momen magnitude gempa bumi
Q	= nilai CPT tak berdimensi
qc	= nilai tahanan ujung konus (kN/m^2)
Pa	= tekanan 1 atm ($101,3$ KPa)
n	= nilai eksponen jenis tanah
F	= nilai faktor relative kerapatan tanah
FR	= nilai <i>friction ratio</i> CPT
$q_c IN$	= nilai tahanan ujung terkoreksi (kN/m^2)
Cq	= faktor normalisasi tahanan ujung konus (kN/m^2)
Pa	= tekanan pada 1 atm ($101,3$ KPa)
$(q_c IN)_{cs}$	= normalisasi <i>clean sand</i> CPT (kN/m^2)
Kc	= faktor koreksi untuk karakteristik butiran
$CRR_{7,5}$	= nilai ketahanan terhadap gempa pada magnitude 7,5
CRR	= nilai ketahanan terhadap gempa dengan magnitude lebih besar atau lebih kecil dari 7,5
MSF	= faktor pengali magnitude gempa (<i>magnitude scaling factor</i>)
$K\sigma$	= nilai faktor koreksi lapisan tanah akibat tekanan geser statis
$K\alpha$	= nilai faktor koreksi lapisan tanah akibat

	tekanan normal statis
q_c, l	= normalisasi tahanan ujung (MPa)
c	= normalisasi eksponen
FS	= faktor keamanan
PL	= probabilitas likuifaksi
$\phi^{-1}PL$	= nilai invers probabilitas likuifaksi

