

# PROSEDUR ANALISIS LIQUEFACTION DENGAN MENGGUNAKAN METODE SEMI EMPIRIS

Rini Kusumawardani

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang (UNNES)  
Kampus Unnes Gd E4, Sekaran, Gunungpati, Semarang 50229 email: rini\_kusumawardani@yahoo.com

**Abstract:** *Liquefaction is defined as a phase of soil transition; a form of transformation from solid to liquefied state in such condition of poor drainage during a cyclic loading. This transformation is triggered by the pore water pressure accumulation, which then decreases the effective stress of soil and thus reaches a ruptured condition. The escalating pore water pressure in an undrained loading circumstance is the main factor of all phenomena of liquefaction. The previous studies considered only the sand or deposits of sand that are possible to give the affect of liquefaction. But the earthquake in Mexico (1985) revealed that the deposits of clay could also instigate liquefaction. It stimulates researchers to observe comprehensively the characteristics of clay latent as a set of liquefaction.*

**Keywords :** *liquefaction, SPT and CPT test, earthquake*

**Abstrak:** Liquefaction didefinisikan sebagai perubahan fase tanah dari fase padat menjadi fase cair diakibatkan karena kondisi drainasi yang tidak bagus ketika diberikan beban siklik. Perubahan ini dipicu adanya peningkatan tekanan air pori sehingga mengakibatkan terjadinya penurunan tekanan efektif tanah dan akhirnya mencapai kondisi keruntuhan tanah. Peningkatan tekanan air pori dalam keadaan tidak terdrainasi adalah penyebab utama terjadinya fenomena liquefaction. Penyelidikan-penyelidikan sebelumnya hanya menyatakan bahwa fenomena liquefaction hanya terjadi pada tanah pasir atau deposit tanah. Tetapi gempa bumi di Mexico (1985) menunjukkan bahwa deposit tanah lempung juga bias menjadi pemicu liquefaction. Hal tersebutlah yang menjadi pemicu para peneliti untuk menganalisis secara menyeluruh tentang liquefaction yang bias dipicu oleh keberadaan tanah lempung pada suatu lapisan tanah.

**Kata kunci :** liquefaction, uji SPT dan CPT, gempa bumi

## PENDAHULUAN

Gempa bumi yang terjadi di Nigata, Jepang dan gempa “ Great Alaska “ Amerika pada tahun 1964, merupan titik awal bagi para peneliti untuk mengetahui lebih dalam mengenai fenomena *liquefaction*. Dari beberapa kejadian gempa bumi yang diiringi dengan fenomena *liquefaction* menunjukkan bahwa *liquefaction* dapat menyebabkan kerusakan yang sangat luar biasa, tidak hanya pada struktur bangunan saja, tetapi juga bisa merusak jembatan, jalan, dermaga maupun pelabuhan.

Menurut Marcuson (1978), *liquefaction* didefinisikan sebagai berubahnya sifat-sifat tanah granular, dari yang bersifat *solid* menjadi *liquid*. Arti kata *liquid* bukanlah berubahnya tanah menjadi air, tetapi diartikan sebagai

perubahan sifat tanah yang cenderung seperti air. Hal tersebut disebabkan karena adanya peningkatan tekanan air pori dalam tanah. Perlu ditekankan bahwa samapi saat ini, penelitian yang ada menunjukkan bahwa fenomena *liquefaction* hanya terjadi pada tanah dengan kondisi jenuh dengan kondisi *undrained*. Lebih detailnya adalah terjadi pada tanah lepas ataupun tanah granular setengah padat dengan kondisi drainasi yang jelek, misalnya pasir berlanau atau pasir dan kerikil yang terkekang oleh lapisan *impermeable*. Lebih dari dua puluh tahun, banyak peneliti tertarik untuk mengetahui lebih dalam tentang *liquefaction*, Beberapa penelitian yang sudah pernah dilakukan hal-hal apa antara lain, mulai dari identifikasi tentang jenis dan sifat tanah yang

dapat mengalami *liquefaction*, perhitungan tentang *safety factor* dari *liquefaction* dan pengaruhnya terhadap kerusakan struktur, serta perhitungan kerugian yang terjadi sebagai salah satu dampak *liquefaction*.

Penelitian tentang cara mengidentifikasi *liquefaction* telah banyak dilakukan, diantaranya dengan menggunakan pendekatan metode semi empiris oleh Seed (1982). Kemudian Liao (1988) mencoba menganalisis menggunakan pendekatan probabilitas dengan metode distribusi kepadatan, ataupun Peng Un (2004) mencoba dengan menggunakan analisis numerik ataupun Oki (1994) berusaha meneliti fenomena *liquefaction* dengan metode elemen hingga. Pada penelitian ini, penulis memberikan informasi mengenai cara mengidentifikasi *liquefaction* melalui pendekatan analisis eksperimental dengan berbagai metode terutama uji eksperimental *in situ*.

**RASIO TEGANGAN SIKLIK (*Cyclic Stress Ratio, CSR*) dan RASIO TAHANAN SIKLIK (*Cyclic Resistance Ratio, CRR*)**

Evaluasi mengenai potensial terjadinya *liquefaction* yang terjadi dapat dilakukan dengan membandingkan antara pengukuran beban akibat gempa dan ketahanan tanah terhadap *liquefaction* dengan nilai sebanding. Pengukuran beban gempa didefinisikan sebagai pengaruh gempa terhadap lapisan tanah. Sedangkan tahanan tanah terhadap *liquefaction* cenderung diartikan sebagai ketahanan tanah yang sedang diobservasi terhadap gempa yang atau akan terjadi. Penyelidikan tanah di lapangan yang sering dilakukan dalam kasus gempa bumi adalah *Standard Penetration Test* (SPT) dan *Cone Penetration Test* (CPT).

**EVALUASI RASIO TEGANGAN SIKLIK (CSR)**

Pengaruh gempa terhadap lapisan tanah dapat diekspresikan sebagai Rasio Tegangan Cyclic (CSR). Perhitungan dari rasio tegangan cyclic dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan oleh Seed dan Idris (1971) di bawah ini :

$$CSR = (\tau_{av} / \sigma'_{vo}) = 0.65(a_{max} / g)(\sigma_{vo} / \sigma'_{vo})r_d \dots\dots\dots (1)$$

dengan :

$a_{max}$  = puncak dari kurva percepatan horizontal pada permukaan tanah yang timbul akibat adanya gempa bumi (m/s<sup>2</sup>);

$g$  = percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>);

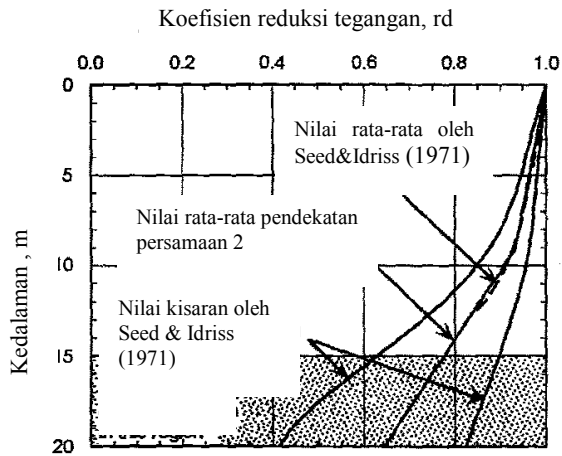
$\sigma_{vo}$  and  $\sigma'_{vo}$  = tegangan total dan efektif dari overburden (kPa);

$r_d$  = koefisien reduksi tegangan.

Koefisien terakhir yang disebut sebagai koefisien reduksi tegangan dapat didefinisikan sebagai kelenturan dari profil tanah yang terkena gempa. Beberapa pendekatan juga digunakan untuk menggali lebih dalam tentang nilai dari koefisien tersebut. Seed dan Idriss (1971) menawarkan kisaran angka tertentu yang dapat digunakan pada Gambar 1 sebagai koefisien reduksi tegangan, sedangkan Blake (1996) memberikan persamaan khusus yang kemudian dipergunakan oleh peserta workshop NCEER (2001) seperti yang ada di bawah ini :

$$r_d = \frac{(1.000 - 0.4113z^{0.5} + 0.04052z + 0.001753z^{1.5})}{(1.000 - 0.4177z^{0.5} + 0.006205z^{1.5} + 0.001210z^2)} \dots\dots\dots (2)$$

dengan  $z$  adalah kedalaman tanah di bawah permukaan menggunakan satuan meter.



**Gambar 1.** Nilai koefisien reduksi tegangan oleh Seed dan Idriss (1971)

### EVALUASI KETAHANAN LIQUEFACTION (CRR)

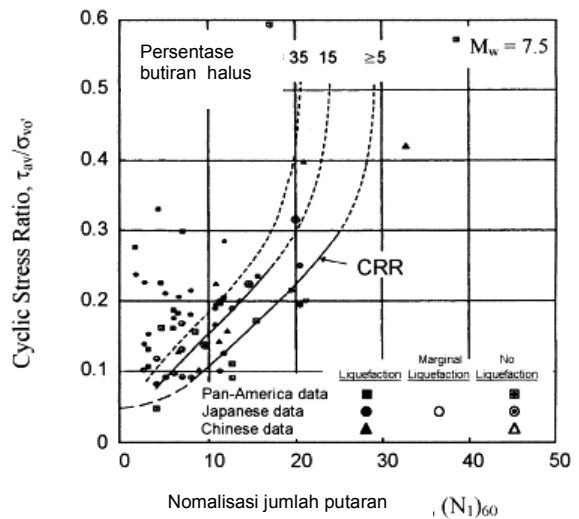
Istilah Rasio Tahanan Cyclic (CRR) dapat diartikan sebagai kemampuan dari tanah untuk dapat melawan *liquefaction*. Beberapa uji *in-situ* geoteknik yang sering digunakan untuk menganalisis kemampuan tanah melawan *liquefaction* adalah misalnya *Standard Penetration Test* (SPT) dan *Cone Penetration Test* (CPT).

#### *Standard Penetration Test* (SPT)

Merupakan uji *in situ* dengan sistem dinamis, di mana didesain untuk menyediakan informasi mengenai properti tanah yang biasa diperlukan pada penyelidikan tanah di bidang *geotechnical engineering*. Hasil utamanya adalah petunjuk tentang nilai kepadatan tanah. Prosedur pelaksanaan uji ini dapat dilihat di *British Standard BS EN ISO 22476 – 3* dan *ASTM D 1586*.

Kriteria untuk evaluasi ketahanan *liquefaction* dengan menggunakan SPT terus

berkembang sampai dekade ini. Saat ini kriteria yang digunakan adalah grafik hubungan antara CSR dan  $(N_t)_{60}$  yang dapat dilihat pada Gambar 2.  $(N_t)_{60}$  dapat didefinisikan sebagai jumlah putaran alat SPT yang telah dinormalisasi dengan tekanan overburden yang nilainya mendekati 100 kPa (1 ton/sqft) dan rasio efisiensi energi pukulan sebesar 60% (Seed, 2001). Dengan menggunakan Gambar 2 di bawah ini, membantu kita untuk memprediksikan nilai CSR. Nilai-nilai yang ada di dalam kurva tersebut merupakan kompilasi data gempa terdahulu dengan skala magnitude berkisar sekitar nilai 7,5 dan baik pernah ataupun belum terjadi *liquefaction* di area tersebut.



**Gambar 2.** Kurva SPT pada tanah pasir murni dengan magnitude gempa 7,5. Data diambil dari Sejarah Kasus *Liquefaction* (NCEER, 2003)

Seperti dikatakan di atas, bahwa grafik di atas hanya dapat digunakan pada skala magnitude 7,5. Sedangkan untuk nilai magnitude selain 7,5, harus menggunakan skala factor nilai CRR yang berfungsi untuk menormalisasi besar magnitude gempa selain 7,5 yang kemudian dapat disesuaikan dengan perhitungan yang ada.

**Berdasarkan kurva SPT pasir murni**

NCEER (2001) merekomendasikan untuk menggunakan nilai 0,5 jika data yang akan dianalisis terdapat di bagian bawah kurva pasir murni. Hal tersebut diambil dengan melakukan perpanjangan garis kurva sampai pada nilai koordinat  $(N_t)_{60}$  sama dengan nol. Raunch (1998) dalam workshop NCEER (2001) memberikan persamaan di bawah ini untuk memberikan pendekatan pada nilai tersebut di atas,

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_t)_{60}} + \frac{(N_t)_{60}}{135} + \frac{50}{[10 \cdot (N_t)_{60} + 45]^2} - \frac{1}{200} \dots \dots \dots (3)$$

Persamaan tersebut di atas hanya bias digunakan untuk  $(N_t)_{60} < 30$ . Untuk  $(N_t)_{60} \geq 30$ , tanah granular terlalu padat atau dapat dikatakan termasuk jenis tanah yang tidak akan mengalami liquefaction.

**Pengaruh butiran halus**

Pada Gambar 2 di samping, Seed (1971) menganalisis nilai kurva CRR untuk berbagai tanah yang kemungkinan terdapat butiran halus yang persentasenya berbeda-beda, sehingga dapat dikatakan bahwa kurva tersebut hanya cocok sebagai analisis awal untuk memprediksikan terjadinya fenomena liquefaction.

Di tahun yang sama, Seed (1971) memberikan pendekatan empiris yang bertujuan untuk memberikan kemudahan bagi para insinyur geoteknik untuk melakukan perhitungan komputasi dengan menggunakan persamaan (4) di berikut ini:

$$(N_t)_{60cs} = \alpha + \beta(N_t)_{60} \dots \dots \dots (4)$$

dengan  $\alpha$  dan  $\beta$  adalah koefisien yang ditemukan dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\alpha = 0 \text{ untuk } FC \leq 5\% \dots \dots \dots (5a)$$

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

$$\alpha = 5.0 \text{ untuk } FC \geq 35\% \dots \dots \dots (5c)$$

$$\beta = 1.0 \text{ untuk } FC \leq 5\% \dots \dots \dots (5d)$$

$$\beta = [0.99 - (FC^{1.5} / 1.000)] \text{ untuk } 5\% < FC < 35\% \dots \dots \dots (5e)$$

$$\beta = 1.2 \text{ untuk } FC \geq 35\% \dots \dots \dots (5f)$$

**Koreksi lainnya**

Penambahan koreksi pada SPT akibat beberapa faktor dapat dilihat pada Tabel 2 di bawah ini, diantaranya adanya rasio energi pukulan, pengaruh jumlah butiran, panjang rod dan cara pengambilan sampel. Persamaan di bawah digunakan sebagai acuan adanya berbagai faktor koreksi di atas.

$$(N_t)_{60} = N_m C_N C_E C_B C_R C_S \dots \dots (6)$$

dengan :

- $N_m$  = hasil pengukuran ketahanan penetration standar;
- $C_N$  = normalisasi factor  $N_m$ ;
- $C_E$  = koreksi untuk rasio pukulan (ER);
- $C_B$  = factor koreksi untuk diameter lubang;
- $C_R$  = factor koreksi untuk panjang rod;
- $C_s$  = koreksi untuk sampel dengan atau tanpa garis batas.

**Tabel 2.** Beberapa faktor koreksi yang mempengaruhi pengujian SPT

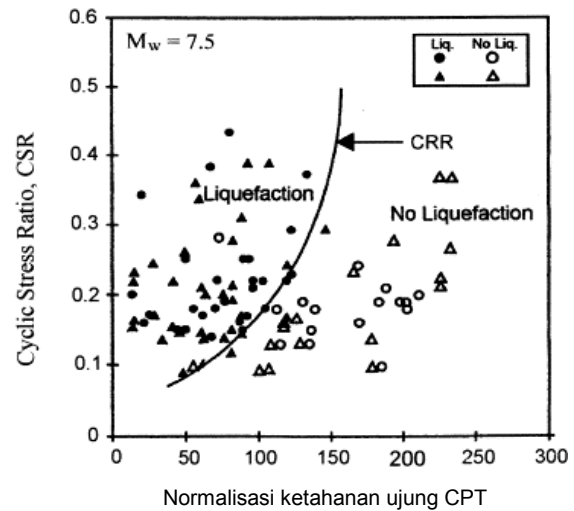
Faktor	Variabel peralatan	Istilah	Koreksi
Tekanan overburden	-	$C_N$	$(P_a/\sigma'_{v0})^{0.5}$
Tekanan overburden	-	$C_N$	$C_N \leq 1.7$
Rasio energi	Donut hammer	$C_E$	0.5 – 1.0
asio energi	Safety hammer	$C_E$	0.7 – 1.2
Rasio energi	Automatic – trip donut – type hammer	$C_E$	0.8 – 1.3
Diameter lubang bor	65 – 115 mm	$C_B$	1.0
Diameter lubang bor	150 mm	$C_B$	1.05
Diameter lubang bor	200 mm	$C_B$	1.15
Panjang rod	< 3 m	$C_N$	0.75
Panjang rod	3 – 4 m	$C_R$	0.8
Panjang rod	4 – 6 m	$C_R$	0.85
Panjang rod	6 – 10 m	$C_R$	0.95
Panjang rod	10 – 30 m	$C_R$	1.0
Metode sampling	Standard	$C_S$	1.0
Metode sampling	Pengambilan sampel tanpa garis batas	$C_S$	1.1 – 1.3

### Cone Penetration Test (CPT)

Uji Cone Penetration Test juga merupakan salah satu uji *in situ* (di tempat) yang sering digunakan oleh insinyur geoteknik dengan fungsinya untuk menentukan properti tanah serta dapat memberikan informasi mengenai stratigrafi dari lapisan tanah yang sedang dianalisis.

Robertson dan Wride (1998) memberikan bentuk kurva yang dapat digunakan secara langsung untuk menentukan nilai CRR tanah

murni ( $\leq 5\%$ ) dari hasil uji CPT seperti ilustrasi pada Gambar 3 berikut ini.



**Gambar 3.** Kurva yang direkomendasikan untuk perhitungan CRR dari CPT (Robertson and Wride)

Kurva ini hanya bisa digunakan untuk besar magnitude gempa bumi 7,5. Berdasarkan kurva tersebut rasio ketahanan cyclic digambarkan dengan satuan tanpa dimensi dan dinormalisasi dengan tahanan CPT  $q_{c1N}$ . Data-data yang terdapat dalam kurva tersebut diambil dari kasus *liquefaction* atau *non liquefaction* yang pernah terjadi pada kasus gempa sebelumnya, kemudian diambil garis CRR yang merupakan garis batas yang memisahkan antara daerah terkena dampak *liquefaction* dan daerah tanpa efek *liquefaction*.

Robertson dan Wride (1998) memberikan persamaan di bawah ini sehingga dapat dihitung secara empiris nilai CRR, di mana hasil dari persamaan tersebut merupakan pendekatan dari kurva pada Gambar 4.

$$\begin{aligned}
 \text{If } (q_{c1N}) < 50 \quad CRR_{7.5} &= 0.833[(q_{c1N})_{CS} / 1000] + 0.05 \\
 &\dots\dots\dots (7a)
 \end{aligned}$$

If  $50 \leq (q_{c1N}) < 160$   $CRR_{7.5} = 0.833[(q_{c1N})_{CS}/1000] + 0.05$   
 ..... (7b)

dengan  $(q_{c1N})$  adalah normalisasi tahanan *clean sand cone* (atm).

**Normalisasi tahanan penetrasi cone**

Dalam pelaksanaan uji *in situ* CPT, dalam hasilnya perlu dilakukan normalisasi tahanan penetrasi *cone* dengan anggapan ada beberapa faktor eksternal yang dapat mengganggu kevalidan hasilnya. Untuk normalisasi tersebut dapat digunakan persamaan (8) dan (9) di bawah ini.

$q_{c1N} = C_Q (q_c / P_a)$  ..... (8)

dengan :

$C_Q = (P_a / \sigma_{v0})^n$  ..... (9)

dan dengan :

$C_Q$  = factor normalisasi untuk tahanan penetrasi *cone*;

$P_a$  = tekanan 1 atm;

$N$  = variasi exponent yang tergantung pada tipe tanah.;

$q_c$  = resistance tahanan cone pada tanah yang diselidiki yang diukur pada ujung konus.

Dalam perhitungan tahanan penetrasi cone, hal terpenting yang harus dilakukan adalah variabel *lc*. Hasil perhitungan tergantung dari variabel tersebut di mana hanya menggunakan dua patokan nilai yang berbeda untuk perhitungannya yaitu  $lc \leq 2,6$  dan  $lc \geq 2,6$ . Selain variable tersebut di atas, jenis tanah juga akan memberikan efek pada proses perhitungan, dan dari persamaan di bawah, akan dapat dihitung nilai dari *lc*:

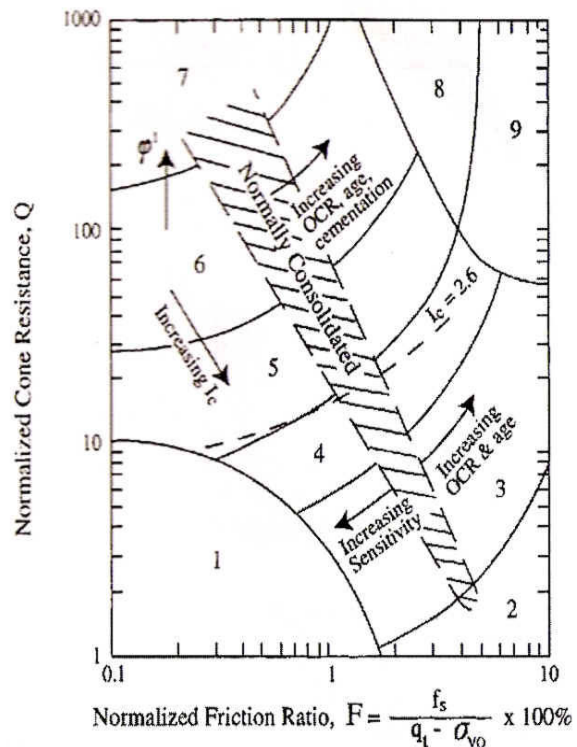
$I_c = [(3.47 - \log Q)^2 + (1.22 + \log F)^2]^{0.5}$   
 ..... (10)

dengan :

$Q = [(q_c - \sigma_{v0}) / P_a] [(P_a / \sigma_{v0})^n]$

$F = [f_s / (q_c - \sigma_{v0})] \times 100\%$

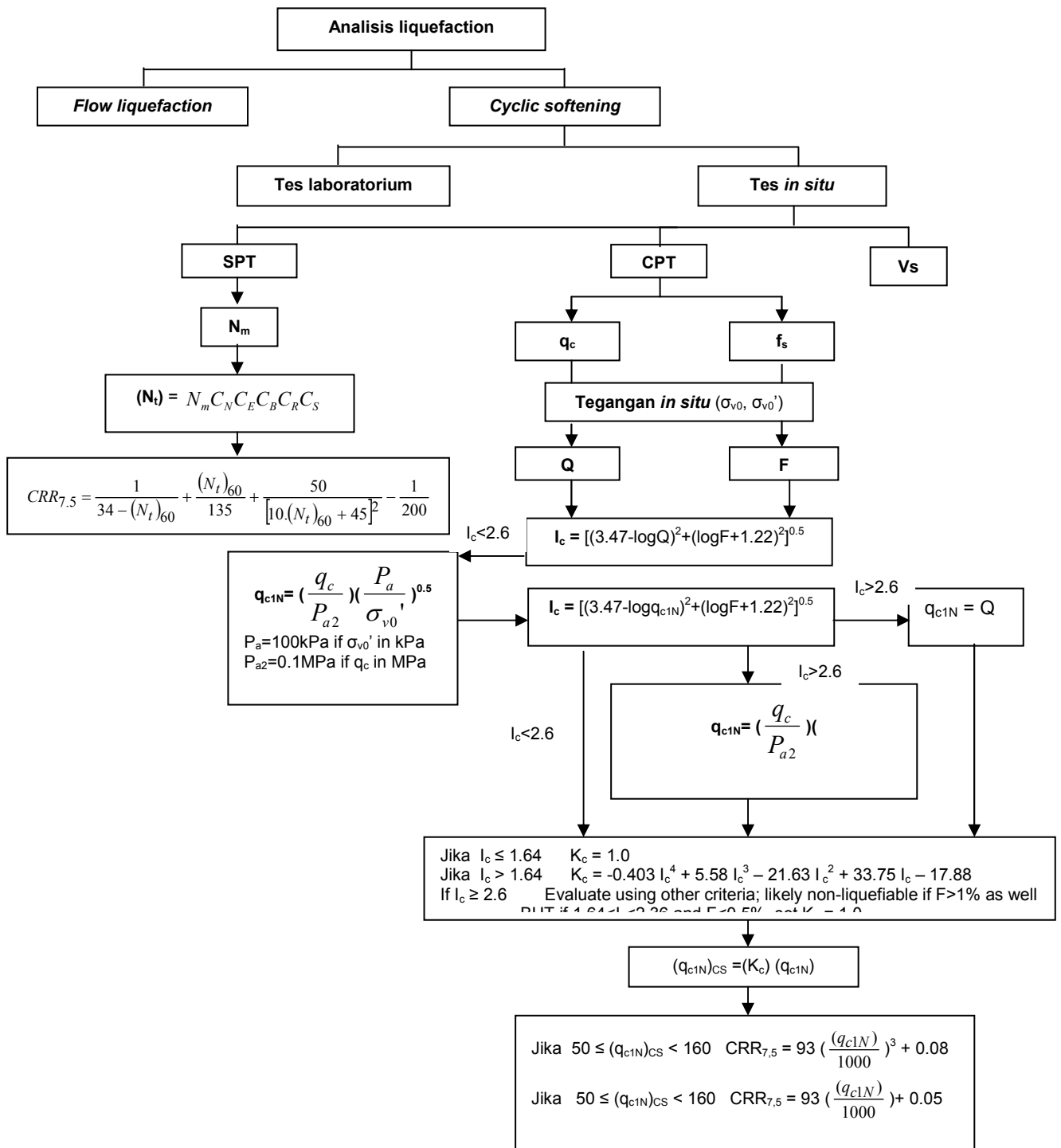
di mana *n* adalah variabel yang tergantung dari jenis tanah. Untuk tanah lempung, nilai *n* adalah 1,0; untuk tanah pasir nilai *n* sebesar 0,5, dan untuk tanah lanau ataupun pasir berlanau digunakan nilai antara 0,5 dan 1,0. Robertson dan Wride (1998) membuat grafik pada Gambar 4 sebagai dasar perkiraan jenis



- 1. Sensitive fine grained sand to silty sand
- 2. Organic soils – peats dense sand
- 3. Clays – silty clay to clay to clayey sand\*
- 4. Silt mixtures – clayey silts to silty clayey gained\*
- 5. Sand mixtures – silty sand to sandy silty
- 6. Sands-clean
- 7. Gravelly sand to
- 8. Very stiff sand
- 9. Very stiff, fine

\*Heavily overconsolidated or cemented

**Gambar 4.** CPT Kurva penentuan jenis tanah – (Robertson, 1990)



**Gambar 5.** Bagan alir analisis potensial liquefaction berdasarkan tes uji *in situ*

## PENUTUP

Analisis mengenai fenomena liquefaction dapat dilakukan dengan berbagai cara. Salah satunya dengan menggunakan tes *in situ*. Dalam forum tentang evaluasi mengenai tanah liquefily yang dihadiri oleh ilmuwan geoteknik (NCEER) menyimpulkan bahwa metode *in situ* merupakan analisis awal yang sebaiknya dilakukan oleh para insiyur dalam menentukan kemungkinan terjadinya fenomena tersebut.

Pengujian SPT dan CPT lebih cenderung digunakan oleh para praktisi dikarenakan kemudahan mobilitas alat tersebut di area yang akan dianalisis, karena area tersebut biasanya merupakan deposit tanah yang cenderung kecil daya dukungnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- Andrews, D. C. A. and Martin, G. R., 2000. *Criteria for liquefaction of silty soils. 12th* Auckland: World Conference on Earthquake Engineering, Proceedings.
- Andrus, R.D., and Stokoe, K.H., 1997. *Liquefaction Resistance Based On Shear Wave Velocity*. Proc. NCEER workshop on evaluation of liquefaction resistance of soils, National Centre for Earthquake Engineering Resistance, New York: State University of New York, Buffalo, pp. 89-128.
- ATC, 1985. *Earthquake Damage Evaluation Data For California*. California: ATC-13, Advanced Technology Council. Redwood City.
- Chi, Y.Y., Ou Ting; L., 2003. *A Study Probabilistic Evaluation Of Soil Liquefaction*. Journal Soil Dynamic and Earthquake Engineering pp.1-39
- Idriss, I. M. 1, and Boulanger ,R. W., 2004. *Semi-empirical Procedures for Evaluating Liquefaction Potential During Earthquakes*. California: Proc of 11th International Conference on Soil Dynamics & Earthquake Engineering (ICSDEE) and The 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (ICEGE), Barkeley, pp. 32-56.
- Johansson, J.,2000. *Soil Liquefaction Web Site*. Washington D.C.: Departement of Civil Engineering, University of Washington. <http://www.ce.washington.edu>
- Jay, C.C., et. al., 2004. *Application Of Taiwan Earthquake Loss Estimation System (TELES) On Seismic Disaster Simulation Website*. Taipei: National Centre for Research on Earthquake Engineering.
- Kramer, S.L., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall civil engineering and mechanics series, 653 pages
- Liao SSC, et.al., 1988. *Regression Model For Evaluating Liquefaction Probability*. Journal Geotechnical Engineering (114),pp.389-411.
- Marcuson, W.F., III, 1978. *Definition of Term Related to Liquefaction*. Journal of Geotechnical Engineering (104), pp 1197-2000.
- Oki F., et.al., 1994. *FEM-FDM Coupled Liquefaction Analysis of A Porous Soil Using An Elasto-Plastic Model*. Netherlands: Applied Scientific Research, Vol.52, No. 3, pp 209-245.
- Peng Un, et.al., 2004. *Parcyclic: Finite Element Modelling Of Earthquake Liquefaction Response On Parallel Computers*. Canada: 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake, Vancouver, B.C., paper No. 361.
- Robertson, P.K., and Wride, C.E., 1998. *Evaluation Cyclic Liquefaction Potential Using The Cone Penetration Test*. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 35, pp 442-459.
- Santruckova, H., 2008. *Liquefaction Analysis For Belle Plaine Site*. Master thesis, Université Joseph Fourier-Grenoble INP.
- Seed, R.B. et.al., 2001. *Recent Advances In Soil Liquefaction Engineering And Seismic Site Response Evaluation*. California:



Paper No SPL-2, University of California, Berkeley, pp 1-45.

- Seed, H. B. *et.al.*, 1985. *Influence Of SPT Procedures In Soil Liquefaction Resistance Evaluations*. Journal of Geotechnical Engineering, 111(12), 1425-1445.
- Seed, H. B. *et.al.*, 1984. *The Influence Of SPT Procedures In Soil Liquefaction Resistance Evaluation*. California: Earthquake Engineering Research Center Report No. UCB/EERC-84/15, University of California at Berkeley.
- Seed, H.B., and Idriss I.M., 1982. *Ground Motion And Soil Liquefaction During Earthquake*. California: Earthquake Engineering Research Institute Monograph, Oakland.
- Seed, H.B., and Idriss I.M., 1971. *Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 97, pp. 1249-1273
- Spring, 2004. *Notes On The Standard Penetration Test*. Advanced Engineering Geology & Geotechnics, University of Missouri.
- Youd, T.L. *et.al.*, 2001. *Liquefaction Resistance Of Soil: Summary Report From The 1996 NCEER And 1998 NCEER/NSF Workshop On Evaluation Of Liquefaction Resistance Of Soil*. Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering, Vol 127, NO 10, pp. 817-833.
- Youd, T.L., and Perkins, D.M., 1978. *Mapping Liquefaction-Induced Ground Failure Potential*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 104, No. 4, April 1978, pp. 433-446.

