

EVALUASI POTENSI PENCAIRAN TANAH (LIQUEFACTION) AKIBAT GEMPA Studi Kasus: Di Bagian Timur Kota Yogyakarta

John Tri Hatmoko¹, Yohannes Lulie¹

¹Dosen Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta

ABSTRAK

Secara Geoteknik, tanah di Yogyakarta merupakan lapisan tanah pasir yang sangat tebal sampai dengan kedalaman 60 meter dari permukaan tanah. Gradasi tanah pasir relatif seragam dengan nilai N-SPT cukup rendah pada daerah dekat permukaan, dan cukup tinggi pada kedalaman-kedalaman tertentu. Muka air tanah terletak pada kedalaman sekitar 12 meter pada musim kemarau dan naik menjadi sekitar 4 sampai 6 meter pada saat musim penghujan. Jenis pelapisan tanah tersebut serta kondisi muka air tanahnya akan sangat mungkin terjadinya peristiwa pencairan tanah (*liquefaction*) pada saat terjadi gempa.

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi potensi *liquefaction* yang kemungkinan besar akan terjadi di bagian timur kota Yogyakarta. Data penelitian ini merupakan data sekunder untuk hasil-hasil pengujian *Cone Penetration Test* (Sondir) dan bor dalam yang diambil dari hasil pengujian tanah pada saat pembangunan kampus Universitas Atma Jaya Yogyakarta di Jl. Babarsari No. 44, yang dilakukan pada tahun 1993 serta pembangunan kampus Universitas Atma Jaya Yogyakarta (FISIPOL) pada tahun 2005. Jumlah data sondir kurang lebih ada 30 hasil pengujian yang dilengkapi dengan kurang lebih 8 data hasil pengujian pengeboran. Sedangkan sifat-sifat fisik sifat-sifat mekanik dilakukan pengujian di Laboratorium Penyelidikan Tanah Fakultas Teknik Universitas Atma Jaya Yogyakarta.

Menurut hasil analisis, *Cyclic Stress Ratio (CSR)* yang diperoleh berdasarkan data gempa yang terjadi dimasa lampau relative kecil dibandingkan dengan harga *Cyclic Resistance Ratio (CRR)* pada setiap kedalaman. Hal ini disebabkan oleh dua hal: yang pertama, rasio percepatan horizontal dengan percepatan gravitasi kecil (0,03; 0,116; 0,123 dan 0,142). kedua, rasio antara tegangan total dan tegangan efektif relative kecil. Jika hasil CRR dan CSR yang diperoleh dibandingkan, tidak ada zona kedalaman tertentu yang menghasilkan angka keamanan lebih kecil dari 1. Dengan demikian, pada masa lampau di kota Yogyakarta tidak pernah terjadi peristiwa *liquefaction*. Namun demikian, dimasa mendatang pada periode 100 tahunan di Yogyakarta dimungkinkan terjadi peristiwa gempa yang cukup besar. Seandainya pada masa mendatang di Yogyakarta terjadi peristiwa gempa besar dengan $M= 8,0$ dan $M= 8,5$, besaran gempa tersebut akan menghasilkan rasio antara percepatan horizontal dan percepatan gravitasi berturut-turut 0,267 dan 0,416, dan akan mengakibatkan terjadinya zona-zona *liquefaction* pada kedalaman antara 0,00 sampai dengan 13,00 meter.

Kata kunci: *liquefaction*, sondir, bor dalam, *Cyclic Stress Ratio (CSR)*, *Cyclic Resistance Ratio (CRR)*.

A. PENDAHULUAN

Secara Geoteknik/geologik pada umumnya tanah di Yogyakarta merupakan lapisan tanah pasir yang sangat tebal sampai dengan kedalaman 60 meter dari permukaan tanah. Gradasi tanah pasir relatif seragam dengan nilai N-SPT cukup rendah pada daerah dekat permukaan, dan cukup tinggi pada kedalaman-kedalaman tertentu.. Muka air tanah terletak pada kedalaman sekitar 12 meter pada musim kemarau dan naik menjadi sekitar 4 sampai 6 meter pada saat musim penghujan. Jenis pelapisan tanah tersebut serta kondisi muka air tanahnya akan sangat mungkin terjadinya peristiwa pencairan tanah (*liquefaction*) pada saat terjadi gempa. Menurut Seed(1966,

1984, 1990); Idriss(1971, 1986, 1990) ; Gupta (1979), potensi terjadinya peristiwa *liquefaction* mempertimbangkan beberapa hal : gradasi tanah pasir, kepadatan relatif, nilai N-SPT, karakteristik getaran dan lain sebagainya.

Penelitian ini mencoba untuk mengevaluasi potensi *liquefaction* yang kemungkinan besar akan terjadi di bagian timur kota Yogyakarta. Data penelitian ini merupakan data sekunder untuk hasil-hasil pengujian *Cone Penetration Test* (Sondir), sedangkan sifat-sifat fisik tanah (berat volume, gradasi, berat jenis, batas-batas konsistensi) dan sifat-sifat mekaniknya dilakukan pengujian di Laboratorium. Data sekunder yang berupa hasil pengujian CPT dan boring, diambil data pada saat pembangunan kampus Universitas Atma Jaya Yogyakarta di Jl. Babarsari No. 44, yang dilakukan pada tahun 1993 serta pembangunan kampus Universitas Atma Jaya Yogyakarta (FISIPOL) pada tahun 2005. Jumlah data sondir kurang lebih ada 30 hasil pengujian yang dilengkapi dengan kurang lebih 8 data hasil pengujian pengeboran (boring). Pengujian sifat-sifat fisik dan mekanik tanah, dilakukan di Laboratorium Penyelidikan Tanah Fakultas Teknik Universitas Atma Jaya Yogyakarta.

Penelitian ini merupakan penelitian data sekunder .Di dalam penelitian ini, metode penelitian dibagi menjadi tiga bagian pokok, yaitu: studi pustaka, pengumpulan data sekunder, pengumpulan data lapangan, pengumpulan data laboratorium, pemilihan model analisis evaluasi, evaluasi hasil dan analisis.

B. TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Review Pustaka

Peristiwa pencairan tanah pada saat terjadi gempa atau yang dikenal dengan peristiwa *liquefaction*, yaitu yang secara geoteknik didefinisikan sebagai kehilangan kuat geser tanah akibat naiknya tekanan air pori yang akan mengakibatkan keruntuhan atau kehancuran struktur yang berdiri di atasnya. Peristiwa tersebut secara visual tampak dengan munculnya lumpur pasir dipermukaan tanah, atau rembesan air melalui rekahan tanah atau bahkan dalam bentuk tenggelamnya struktur di atas permukaan tanah. Studi mengenai peristiwa *liquefaction* ini secara intensif baru ditekuni setelah peristiwa gempa yang terjadi di Alaska (April, 1964) dan gempa yang terjadi di Niigata, Jepang (Juni, 1964).

Gempa yang terjadi di Niigata, Jepang yang terjadi pada tahun 1964 berkekuatan 7,3 skala Richter dengan pusat gempa sekitar 56 kilo meter dari kota Niigata, percepatan gempa maksimum 0,16 kali percepatan gravitasi. Gempa tersebut menyebabkan terjadinya pencairan tanah pasir pada area yang cukup luas. Air mengalir melalui celah-celah tanah dan mendidihkan pair dipermukaan dan menggulingkan gedung-gedung yang berdiri di kota tersebut. (Oshaki, 1966; Seed and Idriss, 1982). Rata-rata bangunan turun sekitar 90 cm pada daerah yang mengalami *liquefaction*. Kota Niigata dialasi oleh pasir dengan ukhuran butir rata-rata 0,20 sampai dengan 0,40 mm (relatif seragam). Karena lapisan tanah yang mengalami *liquefaction* adalah tanah pasir, maka upaya yang dilakukan adalah dengan mencari kepadatan relatif dengan uji SPT. Ternyata daerah dimana nilai N-SPT nya lebih kecil dari 15 memiliki potensi yang cukup besar akan terjadinya peristiwa *liquefaction* (Koizumi, 1966).

Gempa yang terjadi di Alaska, 1964 berkekuatan 8,3 skala Richter. Kerusakan yang terjadi adalah jembatan yang berada sekitar 80 km sampai dengan 120 km dari pusat gempa berupa bergesernya pilar dan pangkal jembatan.Hal tersebut disebabkan oleh

adanya peristiwa *liquefaction*. Terjadi perbedaan penurunan yang cukup besar sehingga menyebabkan terjadinya penggulingan bangunan di atasnya (*Seed, 1968*).

Setelah kedua peristiwa gempa tersebut, penelitian mengenai *liquefaction* dilakukan secara intensif. Pada penelitian ini akan di review perkembangan penelitian mengenai *liquefaction* pada kurun waktu sepuluh tahun terakhir. *Vaid and Thomas (1995)* menguji tanah pasir jenuh didalam triaksial. Perilaku tanah pasir tersebut didalam alat uji triaksial sangat kontraktif pada kepadatan relatif sampai dengan 60%. Hal ini menunjukkan adanya respons anisotropis pada kondisi pembebanan takterdrainase. Pada beban monotonik diikuti peristiwa *liquefaction*, tanah pasir berperilaku mengembang walaupun pada kondisi pembebanan statik sangat kontraktif. Perilaku tanah pasir setelah *liquefaction* menunjukkan kekakuan yang meningkat dengan tidak mempertimbangkan kepadatan relatif ataupun tegangan efektif sebelum pembebanan siklik.

Catherine and McRobert (1995), merevisi kurva tegangan siklik rerata (*cyclic stress ratio, CSR*) vs. $(N)_{60}$ dengan menggunakan harga minimum baru nilai $(N)_{60}$. Garis batas bawah sebagai fungsi dari $(N)_{60}$ diterapkan pada data tanah yang tidak mengalami *liquefaction*, sedangkan garis batas atas diterapkan pada data tanah yang mengalami peristiwa *liquefaction*. Pada penelitiannya dilaporkan bahwa kedua garis tersebut tidak berimpit satu sama lain baik pada tanah pasir bersih maupun pada tanah pasir dengan butiran pengisi. Namun kedua garis tersebut menunjukkan zona-zona dimana *liquefaction* mungkin terjadi. Zona tambahan didefinisikan dimana gempa akan menyebabkan terjadinya fenomena mendidihnya tanah pasir.

Liang, Figueroa, dan Saada (1995) menggunakan konsep energi untuk mendefinisikan potensial *liquefaction* tanah melalui percobaan laboratorium pada tanah pasir. Hasil tes untuk pengujian geser yang dilakukan dengan kepadatan relatif dan tegangan keliling yang berbeda dibandingkan dengan hasil pengujian yang dilakukan pada regangan sinusoidal. Perbandingan tersebut dibantu dengan analisis regresi yang menghasilkan kesimpulan bahwa energi persatuan volume yang dibutuhkan untuk menyebabkan terjadinya *liquefaction* tidak bergantung pada beban dinamik, dan dapat digunakan untuk mengevaluasi potensi *liquefaction* pada tanah yang terjadi akibat gempa.

Youd and Garris(1995) mengevaluasi dan memverifikasi kriteria yang diajukan oleh *Ishihara(1985)* dengan jalan mengujinya terhadap ketebalan yang dihitung pada pada bermacam-macam gempa dan kondisi lapangan. Kesimpulan yang diperoleh adalah: untuk lapangan/tanah yang tidak akan mengalami penyebaran lateral, batas-batas ketebalan yang diusulkan oleh *Ishihara* cukup valid. Namun demikian, untuk jenis-jenis tanah yang kemungkinan akan mengalami penyebaran lateral, pendekatan yang diajukan oleh *Ishihara* nampak tidak valid.

Stark and Olson(1995) mengusulkan penggunaan data sondir untuk mengevaluasi potensi *liquefaction*. Pengujian dilakukan berdasarkan pada 180 kasus-kasus baik yang terjadi *liquefaction* maupun tidak terjadi *liquefaction*. Hubungan antara data sondir yang diusulkan, dikembangkan untuk menggambarkan kasus-kasus yang terjadi di lapangan yang memiliki data sondir. Konversi dari data sondir ke data SPT untuk mengevaluasi potensi *liquefaction* juga diusulkan. Mereka menyimpulkan bahwa nilai sondir nampak lebih baik dalam hal mengevaluasi potensi *liquefaction* dibandingkan dengan nilai N-SPT disebabkan uji sondir lebih standar, mudah direproduksi, dan murah.

Balakrisnan and Kutter (1999) melakukan pemodelan didalam centrifuge untuk mengontrol settlement dan pergerakan lateral tanah akibat terjadinya *liquefaction*. Pemodelan mempresentasikan prototipe lapisan tanah pasir halus dengan kepadatan relatif 50% setebal 9 meter. Diatas lapisan pasir dihampari lempung dengan permukaan bebas. Disebabkan oleh pengaruh interface antara pasir-lempung, pergerakan lateral tanah lempung tidak dapat dikontrol dengan jalan pemadatan tanah pasir. Pengujian-pengujian dimana lebar zona yang dipadatkan hanya 75% dari ketebalan pasir lepas menunjukkan bahwa settlement dan pergerakan lateral relatif dapat terkontrol.

Todorovska and Trifunac (1999) mencoba untuk membuat pendekatan empiris berdasarkan pada motoda energi untuk mengevaluasi bahaya *liquefaction*. Pendekatan yang dibuat bersifat probabilistik dengan mempertimbangkan ketidakpastian kriteria *liquefaction*, dan diharapkan dapat diterapkan pada semua kondisi gempa yang menyebabkan terjadinya *liquefaction*. Contoh-contoh yang diilustrasikan adalah untuk tanah pasir jenuh. Energi pergerakan tanah didekati dengan amplitudo spektrum. Keuntungan dari metode yang dihasilkan adalah bahwa hasil secara langsung merupakan fungsi dari parameter-parameter tana di lapangan.

Amini and Qi (2000) membandingkan perilaku tanah pasir kelanauan homogen dengan tanah pasir kelanauan berlapis pada saat terjadi *liquefaction* dengan kadar lanau serta tegangan keliling yang bervariasi. Pengujian triaksial siklik dilakukan sebanyak 150 macam kontrol tegangan. Kandungan lanau berkisar antara 10-50% dengan tegangan keliling antara 50-250 kPa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tahanan terhadap *liquefaction* hampir tidak ada perbedaan antara tanah homogen dengan tanah berlapis.

Juang and Chen (2001) mengusulkan peresamaan empirik yang relatif baru untuk mengevaluasi tahanan tanah terhadap *liquefaction* berdasarkan pada kecepatan gerak gelombang, dan hasil analisis probabilistik dari pendekatan ini. Database yang berisikan pengukuran kecepatan gelombang di lapangan dan hasil pengamatan lapangan sehubungan dengan *liquefaction* dianalisis secara komprehensif. Hasil persamaan empirik merupakan pendekatan deterministik untuk mengevaluasi tahanan tanah terhadap bahaya *liquefaction*. Berdasarkan pendekatan deterministik tersebut, analisis probabilistik pada kasus-kasus yang ada di dalam data base dijabarkan berdasarkan analisis regresi.

Liu and Stewart (2001) mengembangkan pendekatan empiris dengan analisis regresi yang dapat digunakan untuk mengevaluasi jumlah tegangan siklik uniform (N) dari goncangan gempa sebagai fungsi dari: magnitude, jarak sumber gempa, dan kondisi lapangan. Harga N berdasarkan pada factor-factor yang spesifik yang berkaitan dengan permasalahan *liquefaction* akibat gempa. Database yang digunakan terdiri dari 1528 data lapangan tentang gerakan tanah yang dicatat dari 107 gempa yang berbeda, dengan magnitude berkisar antara : 4,7 sampai dengan 7,6 skala Richter dengan jarak dari pusat gempa berkisar antara 0 sampai dengan 200 km. Hasil pendekatan adalah sebagai berikut: nilai median N yang dekat dengan pusat gempa dapat dievaluasi dengan sempurna, sedangkan koefisien regresi yang direkomendasikan merupakan nilai kesalahan standar.

Lai, S.Y., et. All (2004) membuat model statistik untuk mengevaluasi potensi *liquefaction* dengan menggunakan data *Cone Penetration Test* (Sondir). Sebanyak 399 data sondir dikumpulkan yang terdiri dari 174 data diambil pada saat terjadi gempa di Taiwan, sedangkan 225 data lainnya dikumpulkan dari berbagai sumber. Model

diskriminan yang dikembangkan dari statistika multivariate dengan menggunakan parameter utama : tahanan konus (q_c), dan nilai lekatan (R_f). Hasil penelitian menunjukkan bahwa CRR yang diperoleh lebih besar dari yang diperoleh Olson(1997), namun demikian lebih kecil dari yang diperoleh Robertson and Wride(1997).

Cetin, K.O., et.al(2004) meneliti tentang *liquefaction* yang terjadi disepanjang pantai pada teluk Izmit-Turkey, pada saat terjadi gempa pada tahun 1999. Cetin mendiskusikan hal-hal sebagai berikut: pergerakan tanah yang terjadi setelah gempa; hasil penelitian lapangan dengan boring dan indeks pengujian lapangan; analisis pergerakan lateral dengan menggunakan dua buah pendekatan empiris dan satu buah pendekatan semiempiris, yang pada akhirnya; membandingkan hasil antara pengamatan di lapangan dengan hasil perhitungan mengenai pergerakan tanah. Ketiga model yang digunakan menunjukkan hasil yang tidak konsisten. Metode semiempiris memprediksi terlalu tinggi. Sedangkan dua metode empiris: satu metode overprediksi sedangkan metode yang satunya lagi memprediksi terlalu rendah.

2. Dasar Teori

Pada penelitian ini, metode yang kemungkinan besar digunakan untuk mengevaluasi potensi pencairan tanah (*liquefaction*) adalah metode yang disepakati oleh workshop mengenai CRR oleh NCEER pada tahun 1996 dan tahun 1998, yang dimuat dalam *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, volume 127, Nomor 10, Oktober 2001 halaman 817 – 833*. Workshop tersebut diketuai oleh Youd, T.L., dan Idriss, I.M. Workshop tersebut pada dasarnya mengembangkan *simplified procedure* yang diusulkan oleh Seed dan Idriss, 1971, difokuskan pada analisis ketahanan tanah terhadap bahaya *liquefaction* (CRR).

Pada workshop tersebut ditekankan analisis CRR dengan menggunakan data lapangan yang termasuk didalamnya adalah Standard Penetration Test (SPT), *Cone Penetration Test (CPT)*, pengukuran kecepatan geser (V_s), dan Becker Penetration Test (BPT). Namun demikian, pada penelitian ini tidak mungkin menggunakan dua jenis data pengujian yang terakhir disebut terhubung pengujian-pengujian tersebut belum lazim digunakan di Indonesia. Dengan demikian, penelitian ini akan menggunakan data SPT maupun data sondir.

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sondir Ringan

Hasil pengumpulan data sondir, dapat dilihat pada lampiran Data sondir S.1 sampai dengan S.6 dan S.11 memiliki kemiripan perilaku. Pada kedalaman 0,00 sampai 1,00 meter nilai q_c rendah berkisar antara $30 \text{ kg/cm}^2 - 60 \text{ kg/cm}^2$, pada ketebalan sekitar 0,50 meter dibawahnya (1,00 – 1,50) lapisan tanah keras memiliki nilai tahanan konus (q_c) maksimum mencapai 200 kg/cm^2 . Lapisan tanah dibawahnya (1,50 – 5,80 meter) memiliki tahanan konus berkisar antara 50 sampai dengan 100 kg/cm^2 .

Sondir S.7 sampai dengan S.10 memiliki perilaku sama. Dari permukaan tanah sampai dengan kedalaman sekitar 1,20 meter nilai q_c nya relatif rendah berkisar antara 30 sampai dengan 50 kg/cm^2 . Lapisan dibawahnya (sekitar 0,80 meter) nilai konusnya cukup tinggi (sekitar 200 kg/cm^2). Namun demikian lapisan tanah dari elevasi -2,00 sampai dengan -5,80 nilai konusnya relatif rendah, berkisar antara 15 sampai dengan 75 kg/cm^2 .

Sondir S.12 sampai dengan S.16 dan S.18, memiliki kemiripan perilaku. Mulai dari permukaan tanah sampai dengan kedalaman sekitar 4,50 meter nilai konusnya rendah berkisar antara 50 sampai dengan 60 kg/cm². Lapisan tanah keras dijumpai mulai kedalaman 4,50 meter. S.17, S.19, S.20 dan S.21, mulai permukaan tanah diperoleh nilai konus yang cukup tinggi sampai dengan kedalaman 1,00 meter. Setelahnya, nilai sondir relative rendah sampai dengan kedalaman 5,00 meter.

Posisi muka air tanah cukup tinggi sekitar 3 sampai dengan 4,00 meter, disebabkan pengujian dilakukan pada bulan Nopember. Pada bulan tersebut curah hujan cukup tinggi sehingga akan menaikkan permukaan air tanah. Melihat hasil tersebut, sangat dimungkinkan terjadi likuifaksi mulai dari kedalaman 3,00 meter sampai dengan kedalaman 4,50 meter. Pada kedalaman tersebut, nilai sondir rata-rata cukup rendah dan air tanah pada posisi elevasi 3,00 meter.

SPT dan bor Dalam

Bor dalam dilakukan pada dua titik yaitu DB.1 dan DB.2.. Bor dalam dilakukan sampai dengan kedalaman 25,00 meter. Pada DB.1., semua lapisan didominasi oleh pasir. Kedalaman 0,00 sampa 2,00 meter, pasir kelanauan, lunak sampai dengan sedang warna cokelat muda. Lapisan dibawahnya : 2,00 sampai dengan 4,00 meter, pasir dengan kekuatan sedang warna cokelat abu-abu. Lapisan 4,00 sampai dengan 6,00 meter : pasir sedang-keras dengan warna abu-abu. Dari kedalaman 6,00 sampai dengan 16,00 meter didominasi oleh pasir padat dengan butir halus lanau. Kedalaman 16,00 sampai dengan 21,00 pasir kelanauan dengan kekuatan rendah sampai sedang. Kemudian pada lapisan terakhir (21,00-25,00), pasir sedang sampai keras.

Nilai N-SPT, dari 0,00 sampai dengan 4,00 meter rendah antara 11 sampai dengan 18. Sedangkan lapisan dibawahnya sampai dengan kedalaman 16,00 meter, nilai N-SPT nya cukup tinggi dengan kisaran antara 25 sampai dengan 35. Kedalaman 16,00 sampai dengan 21,00 N-SPT menurun antara 25 sampai dengan 30. Lapisan paling bawah, nilai SPT cukup tinggi antara 30 sampai dengan 35. Bor DB.2, memiliki perilaku mirip dengan DB.1. Melihat nilai N-SPT dan profil tanah yang didominasi oleh tanah pasir, serta permukaan air tanah yang cukup tinggi, potensi likuifaksi akan terjadi pada kedalaman sekitar 3,00 sampai dengan 4,00 meter. Nilai N-SPT yang klebih kecil atau sama dengan 15 sangat berpotensi terjadinya peristiwa liquefaction.

Hasil Pengujian Laboratorium

Pengujian Laboratorium yang dilakukan meliputi: pengujian kadar air, berat volume, berat jenis, analisis saringan dan pengujian geser langsung untuk mencari parameter kuat geser tanah. Hasil pengujian laboratorium adalah sbb:

Hasil analsis saringan untuk tanah sampel, disemua kedalaman, kecuali pada kedalaman 3,00 meter (bor B.5) dan kedalaman 4,00 meter (bor B.4), menunjukkan bahwa , menurut USCS, tanah merupakan tanah pasir bergradasi buruk (SP), dengan $C_u < 6$ dan C_c rata-rata rendah $< 1,00$. Bahkan untuk beberapa kedalaman menunjukkan bahwa tanah adalah tanah pasir bergradasi seragam ($C_u < 3$). Dengan demikian, pada daerah sampel tersebut sangat berpotensi terjadinya liquefaction. Hal ini juga dapat dilihat pada hasil pengujian *Cone Penetration Test* (Sondir), di beberapa kedalaman menunjukkan nilai konus yang lebih kecil dari 60 kg/cm². Pada tanah yang nilai tahanan konusnya lebih kecil dari 60 kg/cm², sangat besar kemungkinannya

untuk terjadinya *liquefaction*. Pengalaman di lapangan menunjukkan bahwa kebanyakan peristiwa *liquefaction* terjadi pada tanah yang berbutir seragam ($C_u < 3$). Sebagai contoh: peristiwa *liquefaction* yang terjadi di Niigata(1964), menunjukkan bahwa kota tersebut dialasi oleh lapisan tanah pasir dengan ukuran butir rerata 0,20 – 0,40 mm (pasir bergradasi seragam).

Analisis Potensi *Liquefaction*

Pada dasarnya analisis *liquefaction* adalah mencari dua parameter utama yaitu: *Cyclic Strtess Ratio* (CSR) yang merupakan tegangan geser siklik yang terjadi akibat gempa dibagi dengan tegangan efektif, dan *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) yang merupakan ketahanan tanah untuk menahan *liquefaction*. Angka keamanan adalah perbandingan antara CRR dengan CSR, jika angka keamanan lebih kecil satu maka terjadi *liquefaction*, dan jika lebih besar atau sama dengan satu, maka tidak terjadi *liquefaction*.

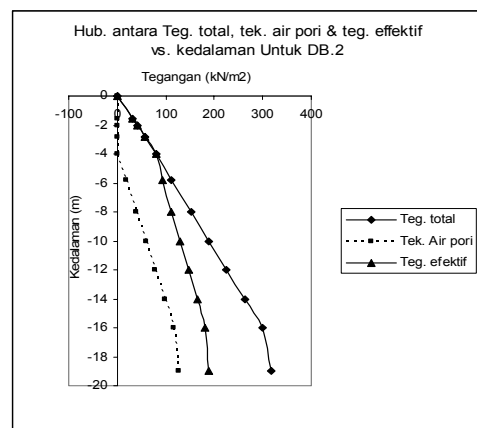
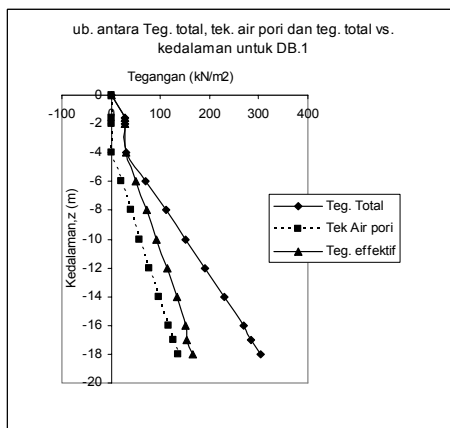
Cyclic Stress Ratio (CSR)

Cyclic Stress Ratio (CSR) dapat dihitung dengan persamaan :

$$CSR = 0,65 \cdot \left(\frac{\sigma_{Vo}}{\sigma_{Vo}'} \right) \cdot \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \cdot r_d$$

Rasio antara tegangan total dengan tegangan efektif dihitung dengan persamaan-persamaan yang ada di dalam teori Mekanika Tanah.

$\gamma_{sat} = \frac{(G_s + e)}{(1 + e)}$, $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \cdot \gamma_w = 9,8kN / m^3$, hasil hitungan seperti terlihat pada gambar 4 dan 5.



Gambar 4. dan 5. Hubungan antara Teg. Total, tek. Air pori & teg. Efektif vs. kedalaman untuk DB.1 dan DB. 2

Percepatan horizontal maksimum akibat gempa (a_{max}), dihitung dengan menggunakan persamaan Liu and Dong,1996, sebagai berikut:

$$a_{max} = a \cdot e^{(b \times M)}. (R + 25)^{-c} \text{ cm/dt}^2$$

$$a = 2,154 \times 106 \times R^{-2,1}$$

$$b = 0,046 + 0,455 \text{ Log } R$$

$$c = 2,515 - 0,486 \text{ Log } R$$

R : jarak episentrum (km)

M : Magnituda gempa

Menurut data dari Direktorat Meteorologi dan Geofisika, mulai tahun 1926 di Yogyakarta terjadi empat peristiwa gempa besar ($M > 6,5$), sebagai berikut:

Pertama terjadi pada tanggal 10 September 1926, $M = 7,2$ dengan $R = 51,91$ km. Kedua terjadi pada tanggal 24 Juni 1958, $M = 6,5$ dengan $R = 133,54$ km, ketiga terjadi pada tanggal 8 Nopember 1974, $M = 7,0$; $R = 54,30$, dan yang keempat terjadi pada tanggal 15 Mei 1979, dengan $M = 6,8$; $R = 43,04$ km. Jika digunakan persamaan diatas, besarnya percepatan maksimum dapat dihitung dengan hasil seperti terlihat pada table berikut.

Tabel 1. Hasil hitungan a_{max} berdasarkan data lampau

No	M	R	a	b	c	a_{max}	a_{max}/g
1	7,2	51,91	538,54	0,8264	1,6814	139,4	0,142
2	6,5	133,54	74,04	1,0132	1,4820	29,45	0,03
3	7,0	54,30	489,97	0,8353	1,6719	113,28	0,116
4	6,8	43,04	798,20	0,7894	1,7209	120,05	0,123

Melihat besarnya percepatan maksimum tersebut, dan sesuai dengan sejarah, di Yogyakarta belum pernah terjadi peristiwa *liquefaction*. Namun demikian perlu diprediksi periode 100 tahunan. Bahwa periode 100 tahunan akan terjadi peristiwa gempa berulang dengan magnitudo yang berbeda. Seandainya peristiwa gempa (1) berulang dengan magnitudo sebesar 8,5; dan peristiwa gempa(3) berulang dengan magnitudo 8,0; maka percepatan gempa maksimum yang dihasilkan adalah sebagai berikut:

Tabel 2. Hasil hitungan a_{max} berdasarkan prediksi 100 tahunan

No	M	R	a	b	c	a_{max}	a_{max}/g
1	8,5	51,91	538,54	0,8264	1,6814	408,10	0,416
2	8	54,30	489,97	0,8353	1,6719	261,16	0,267

Koefisien reduksi kedalaman (r_d) dihitung berdasarkan persamaan Liao & Whitmann, 1986 sebagai berikut:

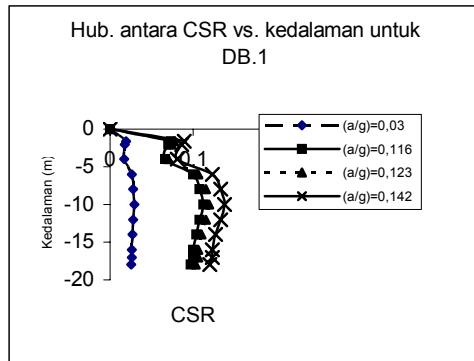
$$r_d = 1,00 = 0,00765 z \quad \dots\dots\dots z < 9,15 \text{ m}$$

$$r_d = 1,174 - 0,0267 z \quad \dots\dots\dots 9,15 < z < 23 \text{ meter}$$

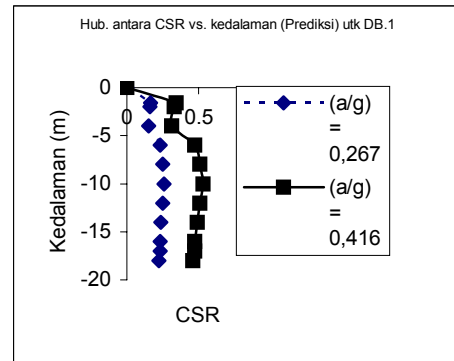
r_d : faktor reduksi kedalaman

z : kedalaman (m)

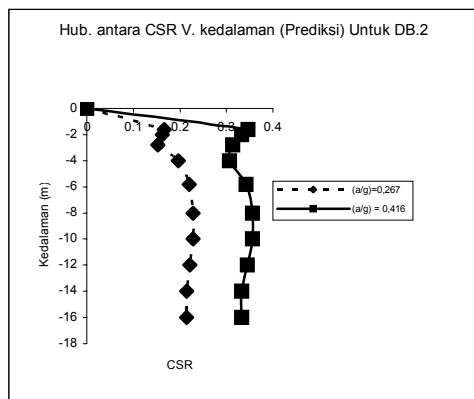
Hasil hitungan dapat dilihat pada table-table berikut:



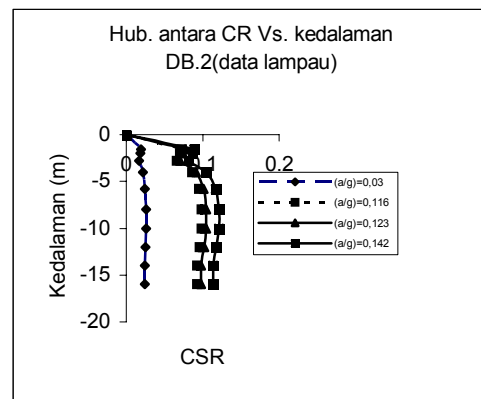
Gambar 6. Hubungan antara CSR vs. Kedalaman untuk DB.1(lampau)



Gambar 7. Hub. antara CSR vs. kedalaman untuk DB.1 (Prediksi)



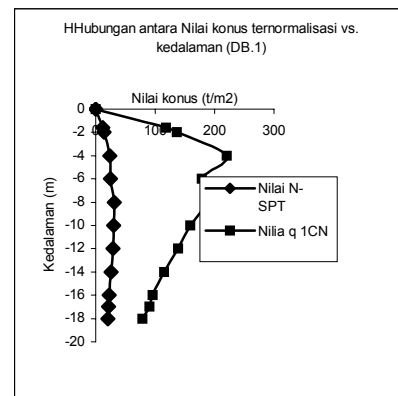
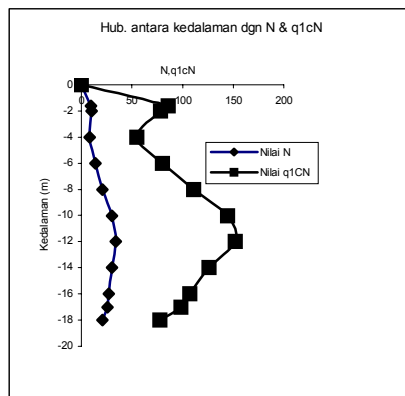
Gambar 8. Hubungan antara CSR vs. Kedalaman untuk DB.2 (lampau)



Gambar 9. Hubungan antara CSR vs. kedalaman untuk DB.2(prediksi)

Cyclic Resistance Ratio (CRR)

Tahanan konus ternormalisasi, (q_{1CN}) dihitung dengan persamaan-persamaan sebagai berikut: $q_c = 5 \times 1,02 \text{ N kg/cm}^2$; N adalah nilai SPT untuk tanah pada kedalaman yang ditinjau, mengingat pada bor dalam tidak ada data langsung mengenai nilai konus (sondir).. $q_{1CN} = C_Q (q_c/Pa) \text{ t/m}^2$, dengan $C_Q = (Pa/\sigma_{vo}')^n$. $Pa = 10 \text{ t/m}^2$; $n = 0,50$ untuk tanah pasir. Hasil hitungan dapat dilihat pada table berikut:



Gambar 10 dan 11. Hubungan antara tahanan konus ternormalisasi vs. kedalaman Untuk DB.2 dan DB1

Konversi nilai konus ternormalisasi tanah q_{1CN} terhadap nilai konus ternormalisasi untuk pasir $(q_{1CN})_{CS}$, digunakan persamaan : $(q_{1CN})_{CS} = Kc. (q_{1CN})$. Namun

demikian, melihat hasil pengujian analisis saringan terlihat bahwa prosentase pasir lebih dari 90%, maka diambil nilai $K_c = 1$. Dengan demikian, nilai $(q_{1CN})_{CS} = (q_{1CN})$.

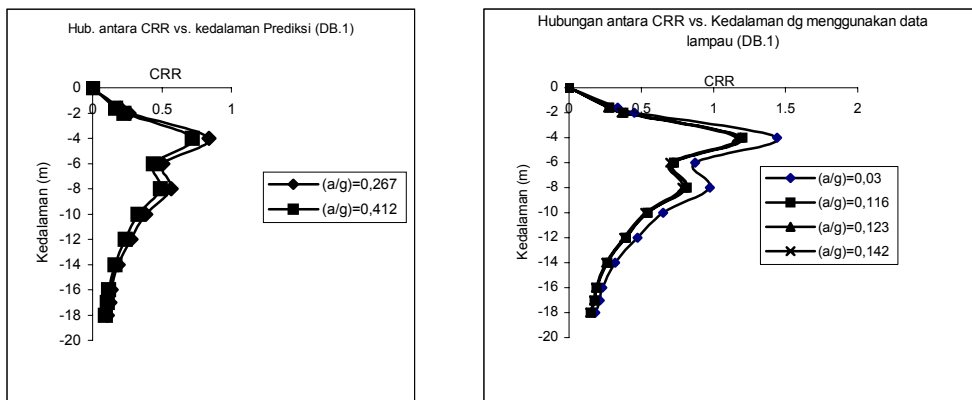
Nilai CRR 7,5 dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Untuk } q_{1CN} < 50 \dots \dots \dots \text{CRR}_{7,5} = 0,833 \{(q_{1CN})_{CS} \times 10^{-3}\} + 0,05 \dots \dots \dots (a)$$

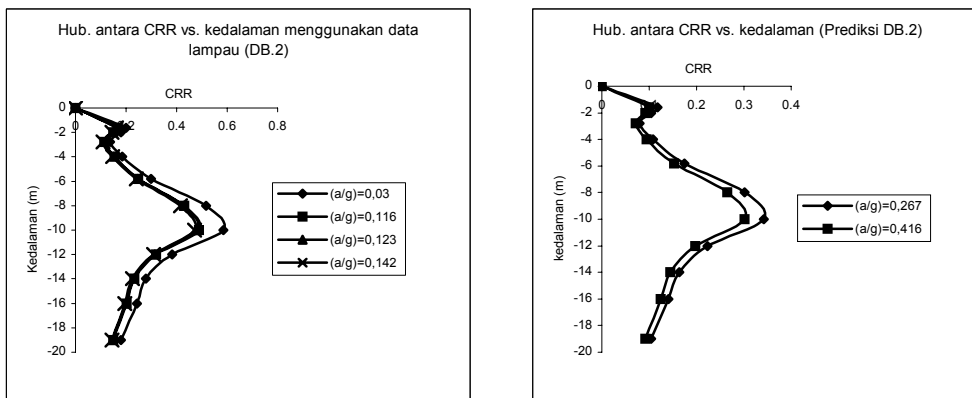
$$\text{Untuk } 50 < q_{1CN} < 160 \dots \dots \dots \text{CRR}_{7,5} = 93 \{(q_{1CN})_{CS} \times 10^{-3}\}^3 + 0,08 \dots \dots \dots (b)$$

Dari hasil pengujian dan analisis diperoleh bahwa nilai konus ternormalisasi semuanya lebih besar dari 50 t/m^2 , maka digunakan persamaan (b). Untuk nilai MSF digunakan rekomendasi dari Idriss, 1997 seperti terlihat pada table 1.

Hasil hitungan CRR dapat dilihat pada table 11 dan 12 serta pada gambar 12 dan 13 berikut:



Gambar 12. Hubungan antara CRR vs. kedalaman (DB.1)

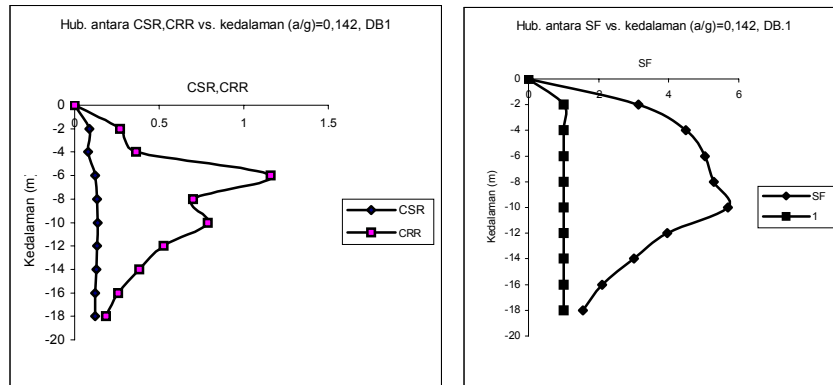


Gambar 13. Hubungan antara CRR vs. kedalaman (DB.2)

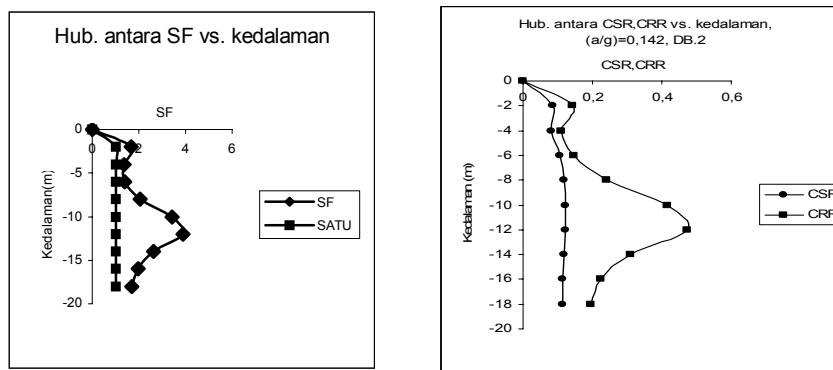
Analisis Potensi Liquefaction

Berdasarkan data yang lampau, harga rasio antara percepatan horizontal maksimum (a_{mx}) dengan percepatan gravitasi (g) relative kecil yaitu : 0,03; 0,116; 0,123, dan 0,142. Angka angka tersebut tentu saja akan menghasilkan CSR yang relative kecil jika dibandingkan dengan harga-harga CRR di hampir semua kedalaman yang ditinjau. Dengan demikian, kemungkinan terjadinya liquefaction akan sangat kecil. Pada analisis ini, data lampau, hanya ditinjau pada rasio percepatan terbesar yaitu : 0,142. Untuk prediksi data yang menghasilkan $(a) = 0,267$ dan 0,416 semuanya dianalisis dengan mempertimbangkan bahwa angka-angka tersebut akan menghasilkan nilai CSR yang cukup besar sehingga kemungkinan terjadinya zona

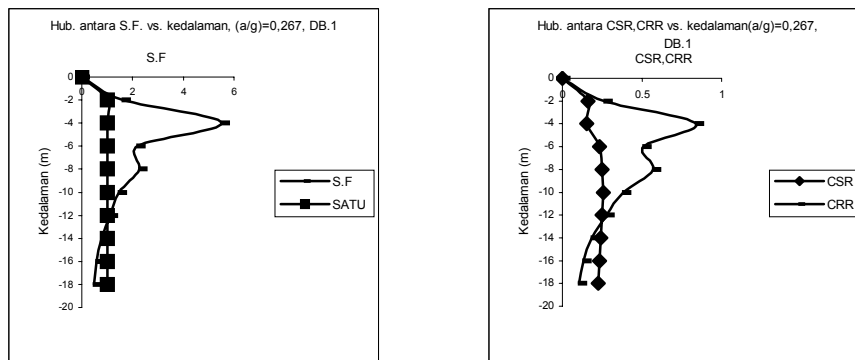
liquefaction sangat besar untuk kedalaman-kedalaman tertentu. Hasil analisis angka keamanan dapat dilihat pada table 13, 14, 15 dan pada gambar 14, 15 dan 16 berikut.



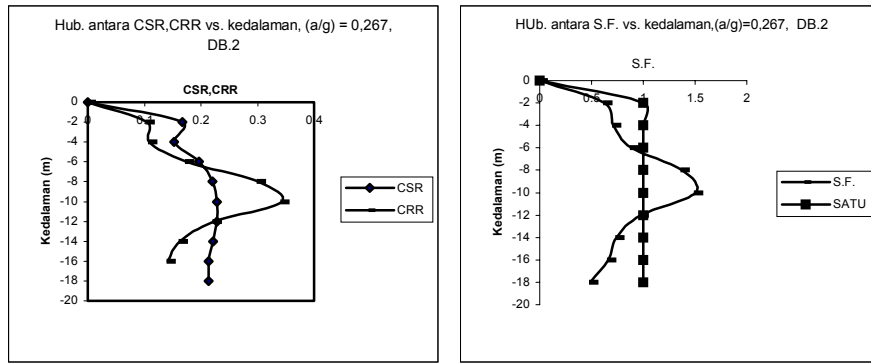
Gambar 14a. Potensi Liquefaction pada DB.1 untuk (a/g) = 0,142



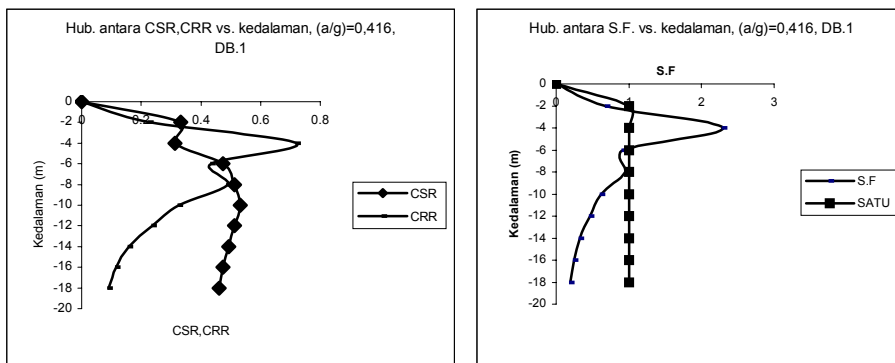
Gambar 14b. Potensi Liquefaction pada DB.2 untuk (a/g) = 0,142



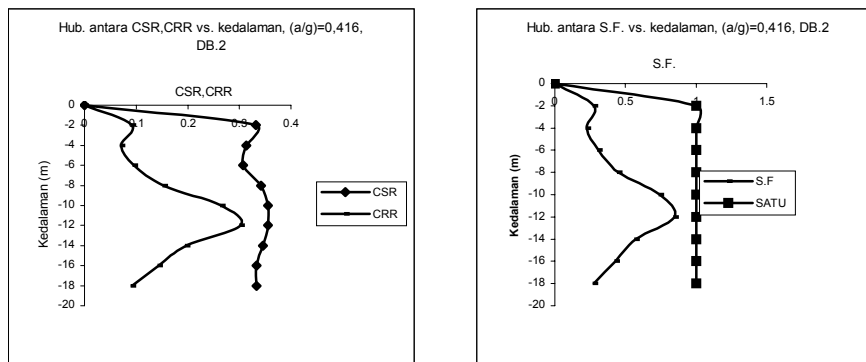
Gambar 15a. Potensi Liquefaction pada DB.1 untuk (a/g) = 0,267



Gambar 15b. Potensi Liquefaction pada DB.2 untuk (a/g) = 0,267



Gambar 16a.. Potensi Liquefaction pada DB.1, untuk (a/g) = 0,416



Gambar 16b. Potensi Liquefaction pada DB.2, untuk (a/g) = 0,416

Cyclic Stress Ratio (CSR) yang dihasilkan berdasarkan data gempa yang terjadi dimasa lampau yaitu : pada tanggal 10 Nopember 1926 (M=7,2); 24 Juni 1958 (M=6,5); 8 Nopember 1974 (M=7,0), dan 15 Mei 1979 (M=6,8) relative kecil dibandingkan dengan harga *Cyclic Resistance Ratio (CRR)* pada setiap kedalaman. Hal ini disebabkan oleh dua hal: yang pertama, rasio percepatan horizontal dengan percepatan gravitasi tidak begitu besar (0,03; 0,116; 0,123 dan 0,142). Angka-angka tersebut diperoleh dengan mempertimbangkan jarak episentrum ke kota Yogyakarta, dan magnitude gempa. Kedua, rasio antara tegangan total dan tegangan efektif relative kecil. Jika hasil CRR dan CSR yang diperoleh dibandingkan, tidak ada zona kedalaman tertentu yang menghasilkan angka keamanan lebih kecil dari 1. Dengan

demikian, pada masa lampau di kota Yogyakarta tidak pernah terjadi peristiwa *liquefaction*. Sebagai contoh hasil analisis potensi *liquefaction* untuk $(a/g) = 0,142$, harga angka keamanan (S.F) minimum yang dihasilkan adalah 1,55 pada data Bor dalam 1 (D.B.1), dan 1,36 untuk data bor dalam 2 (D.B.2).

Jika di Yogyakarta terjadi gempa yang cukup besar dengan $M = 8,0$ dan $M = 8,5$, yang menghasilkan rasio antara (a/g) berturut-turut 0,267 dan 0,416, akan menimbulkan terjadinya *liquefaction* pada zona-zona kedalaman tertentu. Hasil analisis potensi *liquefaction* berdasarkan data yang diprediksi tersebut menghasilkan zona-zona *liquefaction* sebagai berikut. Untuk $(a/g) = 0,267$ DB.1, zona *liquefaction* terjadi pada kedalaman antara 0,00 sampai dengan 13,00., untuk D.B.2, pada kedalaman antara 6,8 sampai 12,00. Untuk $(a/g) = 0,416$, *liquefaction* terjadi pada kedalaman antara 3,00 sampai dengan 6,00 (DB.1), dan disetiap kedalaman pada DB.2.

D. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Dari hasil dan analisis yang telah di tulis didepan, beberapa hal yang dapat disimpulkan adalah:

- Pada bagian timur kota Yogyakarta rata-rata tanah berupa pasir sampai dengan kedalaman 60 meter. Pada musim penghujan permukaan air tanah cukup tinggi berkisar antara 3,00-4,50 meter. Nilai sondir di sekitar permukaan tanah relative rendah.
- Pada kedalaman sampai dengan 4,00 meter, nilai N-SPT cukup rendah berkisar antara 11 sampai dengan 18.
- Hasil pengujian laboratorium menunjukkan bahwa tanah di semua kedalaman merupakan pasir bergradasi jelek (SP), dengan nilai koefisien keseragaman berkisar antara 2,43 sampai dengan 5,00. Sedangkan koefisien gradasinya rata-rata lebih kecil dari 1.
- Dengan menggunakan data peristiwa gempa yang telah terjadi, nilai CSR relative kecil berkisar antara 0,019 sampai dengan 0,138. Nilai tersebut sangat kecil jika dibandingkan dengan harga CRR yang berkisar antara 0,146 sampai dengan 1,44. Sehingga zona *liquefaction* tidak terjadi pada semua kedalaman.
- Dengan menggunakan prediksi 100 tahunan, nilai CSR meningkat untuk semua kedalaman. Nilai tersebut berkisar antara 0,152 sampai dengan 0,532. Sedangkan nilai CRR berkisar antara 0,091 sampai dengan 0,840. Sehingga menimbulkan zona-zona *liquefaction* pada kedalaman-kedalaman antara 0,00 sampai dengan 13,00.

Saran

Profil tanah di bagian Timur kota Yogyakarta merupakan tanah pasir bergradasi jelek (SP) sampai dengan kedalaman kurang lebih 60 meter. Untuk tanah jenis ini, metode perbaikan yang disarankan adalah teknik pemadatan dinamik yang dilakukan dengan menjatuhkan beban berat dari ketinggian tertentu secara berulang ke permukaan tanah. Diharapkan tanah di lapisan yang lebih dalam akan mengalami pemadatan dan reposisi akibat adanya getaran. Teknik lain yang disarankan adalah dengan *injection grouting*. Metode ini akan efektif untuk tanah pasir, namun demikian biaya yang dikeluarkan untuk perbaikan tanah akan sangat besar.

E. DAFTAR PUSTAKA

- 1) Amini, F. ,and Qi,G.Z. (2000):”Liquefaction Testing of Stratified Silty Sand”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 126, No.3, March, 2001, pp.208-217.
- 2) Balakrishnan, A. and Kutter,B.L. (1999):”Settlement, Sliding, and Liquefaction Remediation of Layered Soil”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.125, No. 11, November, 1999, pp.968-978.
- 3) Cetin,O.K., et.all (2004):”Liquefaction-Induced Lateral Spreading at Izmit Bay During the Kocaeli(Izmit)-Turkey Earthquake” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.130, No. 12, December, 2004, pp. 1300-1313.
- 4) Cetin,O.K., et.all (2004):”Standard Penetration Tet-Baed Probabilistic and Deterministic Assessment of Seismic Soil Liquefaction Potential” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.130, No. 12, December, 2004, pp. 1314-1340.
- 5) Das, B.M.:”Fundamental of Soil Dynamic”, Elsevier Science Publishing Company, New York.
- 6) Elgamal, W. Ahmed, et.al. (1996):”Liquefaction of Reclaimed Island in Kobe, Japan” *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122, No.1, January, 1996, pp. 39-49.
- 7) Fear,E.C., and McEoberts, C.E.,(1995):”Reconsideration of Initiation of Liquefaction in Sandy Soils”,. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 121, No.3, March, 1995, pp 249-261
- 8) Juang Hein,C, Chen, J. C.,and Jiang Tao (2001): “Probabilistic Framework for Liquefaction Potential by Shear Velocity,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 127, No.8, August 2001, pp.670-678.
- 9) Guo Tianqiang, and Prakash Shamser (1999): “ Liquefaction of Silts and Silty-Clay Mixtures”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, No.8, August 1999, pp.706-710
- 10) Kramer,L.S.(1996):” Geotechnical Earthquake Engineering”, Prentice-Hall *International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics*, New Jersey Liang,L., et.al.(1995):”Liquefaction Under Random Loading : Unit Energy Approach’ *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 121, No.11, November, 1995, pp 776-781
- 11) Lai,Y.S., et. All (2004):”Discriminant Model for Evaluating Soil Liquefaction Potential Using Cone Penetration Test Data” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 130, No.12, December 2004 ,pp. 1271-1282.
- 12) Liu,H.A., (2001):”Equivalent Number of Uniform Stress Cycles for Soil Liquefaction Analysis”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 127, No.12, December 2001, pp.1017-1026.
- 13) 07458Olsen,R.S., 1997:”Cyclic Liquefaction Based on the Cone Penetration Test, NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils”,

National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, Buffalo, pp.225-276.

- 14) Seed, H.B., and Idriss, I.M. (1971): "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", *Journal of Geotechnical and Foundation Engineering*, ASCE, 97(9), pp.1249-1273.
- 15) Prakash, S. (1981): "Soil Dynamics" McGraw-Hill book company, New York.
- 16) Stark, D.T., and Olson, M.S. (1995): "Liquefaction Resistance Using CPT and Field Case Studies", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 121, No.12, December, 1995, pp 856-878
- 17) Todorovska, M.I. and Trifunac, M.D. (1999): "Liquefaction Opportunity Mapping via Seismic Wave Energy", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, No.12, December 1999, pp.1032-1042.
- 18) Vaid, Y.P., and Tomas, J. (1995): "Liquefaction and Postliquefaction Behavior of Sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 121, No.2, February, 1995, pp 163-173.
- 19) Winterkorn, F.H., and Fang, H.Y. (1975): "Foundation Engineering Handbook", Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- 20) Youd, L.T., and Garris, C.T. (1995): "Liquefaction-Induced Ground Surface Disruption", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 121, No.11, November, 1995, pp 805-813.
- 21) Youd, T.L. et al. (2001): "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from The 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 127, No.8, August 2001, pp.817-833.

KoNTekS 2

Konferensi Nasional Teknik Sipil 2