



# SEMINAR NASIONAL 2007

WORKSHOP & KONTES BANGUNAN TAHAN GEMPA  
27-28 APRIL 2007

## KULIAH UMUM

"PERANCANGAN BANGUNAN TAHAN GEMPA"

SESI

II

PEMBICARA : PAULUS P RAHARDJO, Ir, MSCE, Ph.D., Prof.  
TOPIK : ASPEK GEOTEKNIK PADA PERANCANGAN  
BANGUNAN TAHAN GEMPA



Kuliah Umum  
Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil  
Universitas Katolik Parahyangan  
Bandung, 30 Maret 2007

# **GEMPA & REKAYASA SIPIL**

**OLEH:  
PAULUS P. RAHARDJO**

# GEMPA BUMI DAN REKAYASA SIPIL

Paulus P. Rahardjo

Universitas Katolik Parahyangan



## PENDAHULUAN

Dalam kurun waktu lima ratus tahun ini lebih dari 7 juta jiwa manusia menjadi korban gempa dan berjuta-juta lainnya telah menderita akibat kehilangan sumber-sumber penting dalam hidupnya (pekerjaan, rumah, cacat badaniah, dan lain-lain) dan juga kerusakan ekonomi yang ditimbulkan oleh gempa. Bencana gempa ini menimbulkan keprihatinan yang mendalam pada para ahli dan praktisi berbagai disiplin ilmu sehingga termotivasi untuk melaksanakan berbagai penelaahan untuk mengurangi dampak akibat gempa tersebut.

Pada saat ini berjuta-juta orang di dunia ini hidup dalam resiko gempa. Beberapa ratus ribu jiwa, bermilyar dolar AS dan infrastruktur telah menjadi korban kerusakan akibat gempa. Bahkan ekonomi suatu negara dapat dipertaruhkan dalam resiko gempa ini. Gempa telah terjadi selama berjuta-juta tahun dan akan terus berlangsung. Indonesia merupakan daerah gempa yang aktif karena sebagian besar daerah teritorial Indonesia terletak pada pertemuan dari 2 jalur gempa utama, yaitu jalur gempa Sirkum Pasifik dan jalur gempa Alpide-Transasiatic, oleh karena itu memiliki resiko yang besar mengalami bencana alam gempa.

Rekayasa gempa merupakan pengetahuan yang amat luas, mencakup aspek geologi, seismologi, geoteknik, rekayasa struktur, analisis resiko, dan berbagai aspek teknis yang lain. Dalam praktek, rekayasa gempa juga membutuhkan pertimbangan pertimbangan sosial, ekonomi dan politik. Rekayasa gempa berkaitan dengan efek gempa kepada manusia dan lingkungannya serta metode untuk mengurangi pengaruh pengaruh tersebut. Rekayasa gempa termasuk ilmu pengetahuan yang masih muda, banyak diantara hal-hal dan pengetahuan tersebut baru diketahui sekitar 30 - 40 tahun yang lalu. Kebanyakan para ahli gempa (dari disiplin ilmu teknik sipil) masuk kedalam disiplin ilmu ini dari latar belakang rekayasa struktur dan geoteknik, untuk itu pengetahuan tentang kegempaan ini bermanfaat sebagai pengantar bagi mereka yang mempelajari rekayasa gempa untuk teknik sipil.

Meskipun merugikan, kejadian gempa telah membuka tabir mengenai isi bumi ini dan menerangkan beberapa aspek penting misalnya seperti adanya inti dasar bumi yang bersifat padat. Oleh karena itu dalam bahasan ini dipelajari cara-cara pengukuran getaran gempa dan interpretasi dari perambatan gelombang gempa.

Studi mengenai gempa sesungguhnya telah dimulai berabad-abad yang lalu. Catatan mengenai gempa di Jepang dan didaerah Mediterania timur diperoleh sejak tahun 1600. Di Amerika Serikat, catatan gempa mungkin baru mulai 200 tahun yang lalu. Catatan ringkas ini dimaksudkan untuk memberikan gambaran singkat mengenai pengetahuan dasar gempa, penggunaan istilah-istilah yang lazim dalam gempa, peristiwa gempa bumi tektonik dan pola penyebaran lempeng tektonik, cara-cara menentukan perioda ulang (*return period*) gempa, cara mengevaluasi bencana gempa, masalah kegempaan (*seismicity*) di Indonesia, dan secara khusus hubungan gempa dengan dinamika tanah.

## PENCATATAN GEMPA

Sepanjang usia geologi bumi ini, gempa telah terjadi dimana-mana. Beberapa catatan gempa jaman dahulu kala ditemukan. Di Cina, misalnya para peneliti menemukan catatan gempa pada tulisan di kuil. Diantaranya yang cukup lama adalah pada tahun 1831 SM didapatkan catatan tentang getaran bumi di Gunung Taishan, propinsi Shandong. Tetapi catatan tentang gempa baru lebih lengkap sejak 780 tahun SM pada waktu periode dinasti Zhou di Cina Utara.

Dari catatan gempa tersebut yang cukup rinci, penelaahan modern tentang gempa bumi dapat dibuat misalnya distribusi kerusakan dan dengan demikian juga dapat diperkirakan besaran gempa. Salah satu contoh adalah gempa San-ho pada tanggal 2 September 1679 (didekat Beijing) yang amat besar itu disebutkan pada catatan di sejumlah kota (121 kota). Pada saat para peneliti membandingkan deskripsi kerusakan bangunan, rekahan bumi dan kejadian yang lain, dapat disimpulkan bahwa gempa San-ho itu mempunyai mempunyai besaran yang hampir sama dengan gempa di San Francisco tahun 1906.

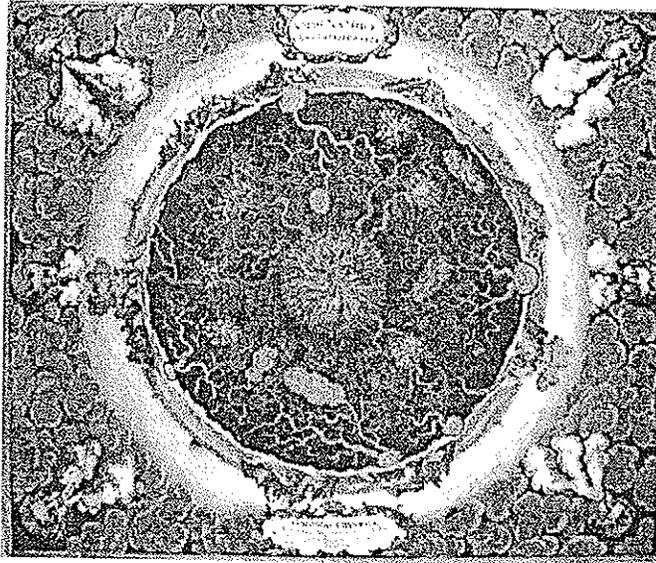
## GEMPA DAN KERUSAKAN BANGUNAN SIPIL

Banyak catatan gempa tentang kerusakan bangunan pada Jaman Pertengahan (Medieval Times) melalui gambaran artis, guratan pada blok kayu, surat surat, buku harian dan lain lain. Tetapi hubungan antara geologi dan gempa berkembang sangat lambat. Era baru timbul pada abad 18 dibawah pengaruh kuat dari tulisan *Sir Isaac Newton* tentang gelombang dan mekanika. Bukunya yang terkenal dinamai *Principia Mathematica*, yang menjelaskan suatu perumusan yang mampu menggambarkan tentang kejadian-kejadian alam, termasuk gempa. Hukum alam yang ia kemukakan tentang gerak memberikan teori secara fisis yang diperlukan untuk menjelaskan perambatan gelombang gempa, dan *Hukum Gravitasi*-nya menerangkan dasar-dasar tentang gaya-gaya yang membentuk bumi.

Sejak saat itu (pertengahan abad 18), banyak teori dikemukakan oleh para ilmuwan dan insinyur yang menggunakan teori mekanika Newton mempublikasikan diskusi-diskusi yang mengasosiasikan gempa dengan gelombang melalui batuan dan bumi. Diskusi ilmiah tersebut (baik melalui tulisan maupun lisan) telah menarik perhatian yang besar tentang efek geologi dari gempa, termasuk longsor, gerakan tanah, perubahan muka air laut dan kerusakan bangunan. Misalnya beberapa pengamat mengatakan bahwa struktur diatas tanah lembek pada umumnya mengalami kerusakan lebih besar daripada struktur yang berada diatas tanah keras. Orang-orang yang tertarik mengenai gempa kemudian membuat catatan dan daftar tentang kejadian-kejadian gempa didunia, diantaranya adalah yang dilakukan oleh *K.E.A. Von Hoff*.

Penelaahan ilmiah tentang gempa semakin kritis sejak peristiwa gempa di semenanjung Iberia tanggal 1 Nopember 1755. Kejadian ini diamati oleh berbagai ilmuwan di Eropa karena efek gempa dirasakan sampai ke Portugal dan Spanyol. Lisbon mengalami kerusakan berat dan diperkirakan jumlah penduduk yang tewas akibat gempa tersebut di kota itu mencapai 60.000 jiwa. Banyak yang meninggal karena diterjang tsunami yang mencapai ketinggian 9 - 12 m diatas muka air laut tertinggi yang membanjiri seluruh kota. Penelitian modern kemudian membuktikan bahwa gempa Lisbon itu bersumber pada suatu tempat sejauh ratusan kilometer dari kota itu pada suatu struktur geologi yang disebut sebagai *East Atlantic Rise*. Gempa Lisbon ini merupakan sumber inspirasi terbesar untuk pendekatan modern mengenai gempa. Seorang ilmuwan Inggris bernama *John Michell* (1724-1793) menulis makalah tentang gempa tahun 1760 dimana ia menerangkan getaran gempa itu dengan menggunakan Mekanika Newton. Dalam tulisan itu dikatakan bahwa gempa dirambatkan keatas oleh suatu

gelincir antara batuan yang letaknya jauh dari permukaan bumi. Michell menjelaskan bahwa kecepatan gelombang gempa dapat diukur dengan mengetahui saat tiba gelombang tersebut dari dua lokasi yang berbeda. Ia menyimpulkan bahwa gempa Lisbon dirambatkan pada kecepatan 500 m/det. Meskipun kesimpulan itu tidak tepat tetapi penjelasan Michell ini sangat mendekati fenomena yang sebenarnya.



**Gbr. 1 Pandangan tentang interior bumi oleh Athanasius Kircher (1678)**

**(bumi digambarkan sebagai bola solid dengan saluran saluran magma yang keluar sebagai gunung api)**

Gempa adalah suatu kejadian yang tidak dapat dihindarkan oleh manusia. Namun demikian bencana akibat gempa dapat kita kurangi dengan :

1. Memberikan informasi kepada masyarakat mengenai fenomena gempa, masalah-masalah yang dapat terjadi akibat gempa dan cara-cara menanggulangi bencana yang dapat ditimbulkannya.
2. Melakukan studi mengenai gempa, mengidentifikasi daerah yang berpotensi mengalami kejadian gempa.
3. Mendesain bangunan sipil tahan gempa.

Studi dari kacamata teknik sipil dan penjelasan ilmiah yang lebih intensif mengenai masalah gempa ini baru dilakukan setelah peristiwa gempa di Nobi tahun 1891 dan gempa di San Francisco tahun 1906 yang menelan korban yang cukup besar. Dalam kedua peristiwa gempa tersebut, banyak sekali bangunan-bangunan gedung, jembatan, dam dan irigasi yang hancur dan tidak dapat diperbaiki lagi. Dari peristiwa tersebut timbul suatu kesadaran bahwa struktur yang dibuat tidak saja harus direncanakan terhadap gaya vertikal, tetapi juga gaya horisontal.

Gempa berikutnya yang membawa bencana besar adalah peristiwa gempa Kanto di Jepang pada tahun 1923 dimana banyak fasilitas modern hancur. Disamping itu gempa tersebut disertai dengan peristiwa kebakaran besar di Yokohama dan Tokyo yang merenggut 140.000 jiwa manusia. Peristiwa ini memberikan pelajaran kepada disiplin ilmu teknik sipil bahwa desain bangunan yang fleksibel harus menyertakan teori vibrasi.

Peristiwa gempa yang lain adalah yang terjadi hampir bersamaan, yaitu di Niigata, Jepang dan di Alaska, USA pada tahun 1964. Pada kedua peristiwa tersebut disadari bahwa

kerusakan berat pada bangunan sipil dapat terjadi akibat keruntuhan tanah (*ground failure*), terutama pada peristiwa mencairnya lapisan pasir jenuh akibat beban siklik yang umum disebut '*liquefaction*'. Peristiwa ini mendorong studi lebih intensif pada para sarjana teknik sipil untuk mempelajari respon dinamik tanah.

Bencana alam gempa, khususnya dengan sumber yang berasal dari dasar laut, juga telah menimbulkan gelombang tsunami yang dahsyat seperti yang terjadi di Aceh dan Sumatera Utara tanggal 26 Desember 2004, dan yang baru-baru ini terjadi di Pangandaran tanggal 18 Juli 2006 sehingga menjadi tantangan bagi para praktisi teknik sipil untuk meneliti lebih lanjut cara-cara mitigasi terhadap tsunami tersebut.

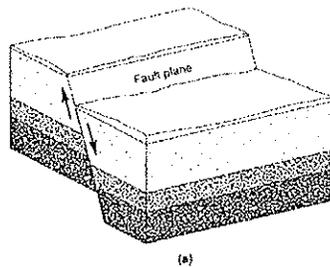
## PATAHAN / SESAR

Dari definisi kejadian gempa yang telah diuraikan terdahulu, maka dapat disimpulkan bahwa patahan/sesar yang ditemukan dipermukaan batuan dasar merupakan bidang lemah dimana sumber gempa sering terjadi.

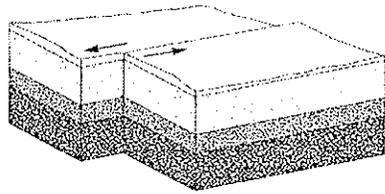
Jenis-jenis pergerakan pada sesar dapat berupa pergerakan *dip-slip* (pergeseran atas bawah) disebut sesar normal atau sesar naik atau berupa *strike-slip* (pergeseran lateral) yang sering juga disebut sesar mendatar.

Dari hasil pengamatan lapangan maka tipe sesar terbagi atas :

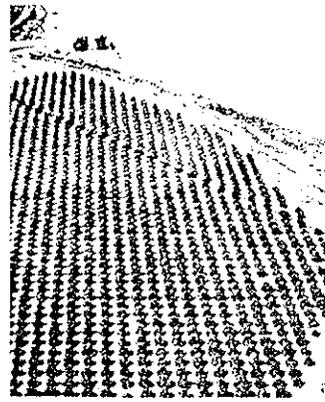
- Sesar mendatar dengan pergerakan utama mendatar (*strike slip fault*), hampir selalu disebabkan oleh gaya tektonik yang menimbulkan gempa bumi. Contoh Sesar San Andreas di California dan Sesar Semangko di Sumatera.
- Sesar normal dengan pergerakan vertikal disebabkan oleh gaya tarikan horisontal.
- Sesar naik (*reverse*) dengan pergerakan vertikal disebabkan oleh gaya tekan horisontal.



Gbr. 2. Sesar Normal dan Contoh Sesar Normal di Nevada

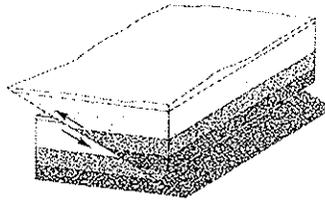


(a)



(b)

**Gbr. 3. Sesar Mendatar dan ilustrasi offset dari deretan pohon pada gempa di Imperial Valley akibat Sesar Mendatar**



**Gbr. 4. Sesar naik**

Dalam perencanaan bangunan sipil, seorang desainer harus mempertimbangkan pengaruh dari adanya sesar terhadap keamanan bangunannya. Suatu permasalahan yang sering dihadapi adalah menentukan apakah sesar yang ditemukan dalam pondasi bangunannya berpotensi aktif atau tidak. Hal ini menentukan anggapan-anggapan yang harus dipertimbangkan dalam perencanaan.

Menurut United States Atomic Commission, suatu sesar disebut aktif atau berpotensi aktif bila mempunyai tanda-tanda sebagai berikut :

- Jika sesar pernah mengalami alihan/pergeseran satu kali dalam 35.000 tahun atau berulang kali dalam waktu 500.000 tahun.
- Jika sesar terletak di daerah dimana sering tercatat gempa bumi yang dapat membuktikan adanya hubungan langsung struktur dengan sesar tersebut
- Jika sesar mempunyai hubungan struktur dengan sesar aktif yang tersebut dalam a dan b.

Dengan membandingkan survai yang dilakukan sebelum dan sesudah gempa, kadang-kadang dapat ditemukan bahwa permukaan bumi telah mengalami perpindahan baik dalam arah vertikal maupun horisontal.

Cara-cara mengukur pergerakan kerak bumi diantaranya dengan metode triangulasi dengan mempergunakan tiga titik stasioner dipermukaan tanah dan pengukuran berdasarkan *bench-mark*.

Menurut pengalaman, pergerakan kerak bumi nampak lebih kerap dikaitkan dengan gempa dangkal, dimana pusat gempunya kurang dari kedalaman 20 km dan biasanya dengan energi setidaknya  $10^{22}$  ergs.

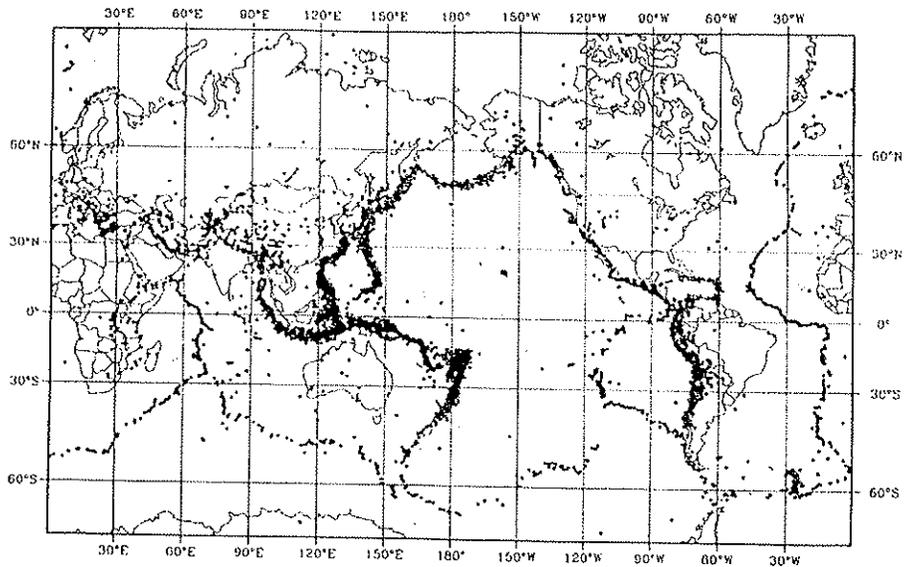


Gbr. 5. Sesar di Corinth Canal, Yunani (foto L.Weiss)

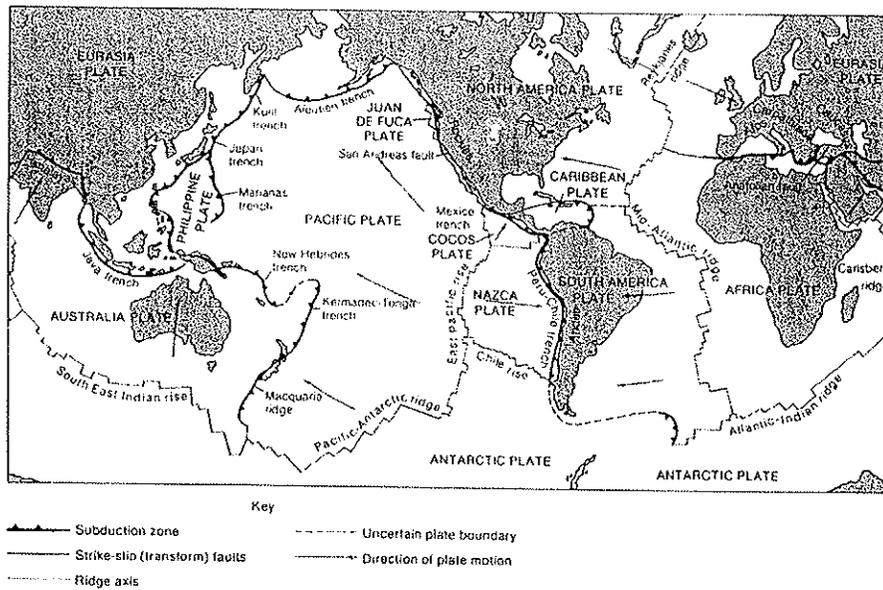
Pergerakan sesar aktif dapat menyebabkan pengulangan gempa pada lokasi yang sama seperti misalnya sesar di Cornith Canal (Yunani) yang berupa batuan sedimen muda. Pada singkapan sesar yang tingginya 70 m terlihat offset sebesar 10 m. Gempa-gempa besar terjadi di Corinth pada tahun 227 SM, 551 SM, 1858, 1928 dan terakhir 24 Februari 1981. Dalam gempa-gempa yang terakhir tercatat rekahan sesar sepanjang 5 km dan adanya slip vertikal hingga 0.7 m.

### **EPICENTER GEMPA DAN PELAT TEKTONIK**

Gambar 6 menunjukkan titik-titik pusat gempa dangkal dengan magnitude  $M > 5$  yang terjadi di seluruh dunia. Dari penjelasan terdahulu dapat disimpulkan bahwa lokasi tersebut merupakan perbatasan dari pergerakan antara pelat-pelat tektonik. Sesungguhnya perbatasan pelat tektonik disimpulkan dari data tersebut seperti diperlihatkan pada gambar 7.



**Gbr. 6. Peta Episenter Gempa Dunia dengan M>5 (sumber: USGS)**



**Gbr. 7. Perbatasan Pelat-Pelat Tektonik didasarkan pada Peta Episenter Gempa**

## GEMPA BUMI TEKTONIK

Gempa Bumi yang terutama menimbulkan masalah bagi teknik sipil adalah gempa bumi tektonik, karena gempa ini menimbulkan kerusakan dalam skala yang amat luas. Gempa bumi ini terjadi karena energi yang terakumulasi pada kulit bumi tidak dapat ditahan lagi oleh batuan di permukaan bumi sehingga terjadi gelincir antara dua permukaan.

Salah satu model yang paling lama untuk menjelaskan peristiwa gempa ini dikemukakan oleh REID & LAWSON. Teorinya dikenal dengan nama Teori Pantulan Kenyal

atau *Elastic Rebound Theory*. Reid & Lawson berusaha menerangkan kejadian gempa berdasarkan kejadian gempa pada patahan/sesar San Andreas di San Francisco dengan gejala-gejala sebagai berikut :

- Suatu gempa bumi terjadi kalau lapisan kulit bumi (*lithosphere*) patah melalui suatu bidang yang disebut sesar.
- Sebelum suatu gempa bumi terjadi, biasanya didahului oleh peningkatan regangan elastik secara perlahan-lahan pada kedua sisi sesar.
- Pada waktu gempa bumi terjadi, kedua sisi itu bergeser satu terhadap yang lain dengan arah berlawanan dan besarnya sebanding dengan energi regangan yang bekerja pada sesar.

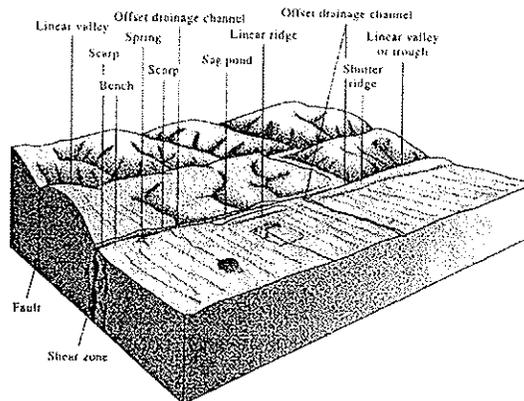
Namun demikian dari model tersebut dibutuhkan tiga buah persyaratan untuk dapat menimbulkan gempa bumi, yaitu perlu dibuktikan :

- adanya gerak relatif dalam kerak bumi
- adanya peningkatan tegangan (*stress generation*)
- terjadinya pelepasan tegangan (*stress-strain*)

Ketiga persyaratan itu tidak dijelaskan oleh Reid & Lawson, sedangkan menurut Brune (1977) teori itu hanya dapat dijelaskan dengan :

- pengetahuan lebih mendalam tentang mekanisme terjadinya regangan dan tegangan dalam kulit bumi.
- adanya rayapan dalam kerak bumi.

Teori Reid & Lawson dibuktikan dari fenomena gempa yang terjadi di California dimana terlihat banyak offset pada sungai-sungai yang mengalir ke arah barat (Gambar 8). Pusat-pusat gempa yang tercatat pada gempa Loma Prieta tanggal 17 Oktober 1989 berada seluruhnya pada daerah sesar San Andreas. Akibat dari pergerakan sesar tersebut terjadi lipatan-lipatan kulit bumi yang membentuk pegunungan di perbatasan Nevada dan California.



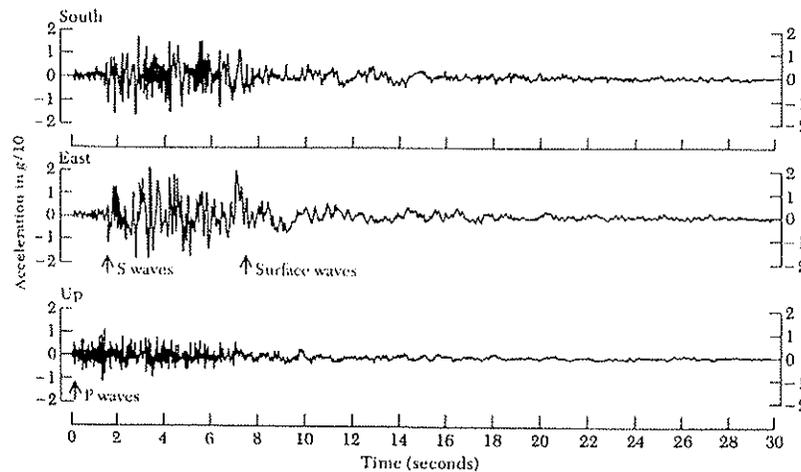
**Gbr. 8. Bentuk Rupa Bumi sepanjang Sesar San Andreas (Sumber Vedder & Wallace, 1972)**

## GELOMBANG GEMPA DAN GETARAN GEMPA

Pada saat gempa, kejadian ini tidak hanya berupa getaran di bumi, tetapi juga disertai dengan berbagai fenomena yang lain. Fenomena yang cukup penting dari sudut tinjauan teknik adalah getaran gempa (*seismic tremor*), gerakan kerak bumi (*crustal movements*), patahan (*faulting*) dan gelombang laut (*tsunamis*).

Getaran yang dicatat pada alat seismograf dapat menunjukkan pola getaran yang disebabkan oleh gempa. Getaran seperti ini misalnya ditunjukkan oleh gambar 9. Pada umumnya getaran tersebut dimulai dengan amplitudo yang kecil selama beberapa waktu kemudian getaran yang besar berlangsung sampai teredam kembali.

Macam-macam gelombang yang dirambatkan oleh getaran dalam bumi adalah gelombang badan (*body wave*) dan gelombang permukaan (*surface wave*).



**Gbr. 9. Contoh rekaman seismograf**

## KERUSAKAN AKIBAT GEMPA BUMI

Pada saat terjadi gempa bumi, gelombang gempa dirambatkan dari sumber kejadian ke permukaan bumi. Pada saat gelombang ini mencapai permukaan, maka terjadilah getaran getaran bumi yang berlangsung selama beberapa detik sampai beberapa menit.

Kekuatan dan lamanya getaran pada suatu lokasi tertentu, tergantung dari besaran dan jaraknya ke pusat gempa serta tergantung karakteristik tanah dari lokasi itu sendiri. Pada lokasi di dekat pusat gempa, getaran itu dapat mengakibatkan kerusakan berat pada struktur sipil di atasnya.

Meskipun mayoritas gelombang itu dirambatkan melalui batuan, tetapi bagian terakhir pada saat mencapai permukaan adalah melalui lapisan tanah, dan karakteristik tanah tersebut akan merupakan "penyaring" dari gelombang gempa. Salah satu peranan penting dari ilmu geoteknik adalah melakukan evaluasi dari pengaruh kondisi tanah lokal terhadap getaran gempa.

### Kerusakan struktural

Pemandangan yang mengerikan akibat gempa adalah keruntuhan struktur struktur sipil (gedung, jalan, dermaga, tower, jembatan dan lain-lain). Selama bertahun-tahun berbagai kalangan melakukan usaha-usaha untuk mengatasi bangunan agar tahan gempa. Hal mana pada umumnya dilakukan melalui peraturan-peraturan bangunan. Pada awal perkembangan metode rancangan struktur tahan gempa adalah dengan menggantungkan secara khusus pada kekuatan struktur, tetapi pendekatan modern ternyata memerlukan pertimbangan baik kekuatan maupun daktilitas.

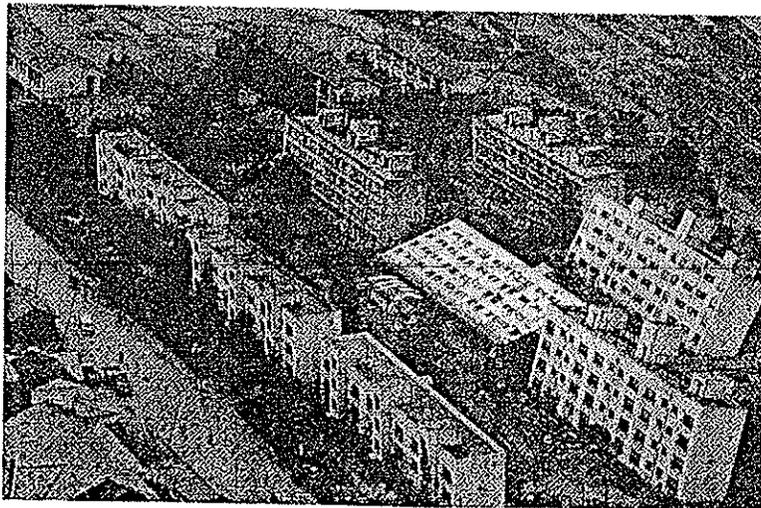
Gambar 10 memperlihatkan kerusakan struktural total pada bangunan rumah sakit Juarez di Mexico City pada gempa Mexico tahun 1985 yang terletak diatas lapisan tanah lembek yang amat dalam.



Gbr. 10. Kerusakan total struktur bangunan rumah sakit Juarez pada gempa Mexico, 1985

### Liquifaksi

Contoh tragis pada kerusakan akibat gempa bumi adalah terjadinya pembuburan pada tanah yang sering disebut *liquifaksi*. Pada peristiwa ini, getaran akibat gempa menyebabkan naiknya tekanan air pori di dalam tanah sehingga tanah kehilangan kuat gesernya dan dengan demikian kehilangan daya dukungnya. Tanah akan mengalir kepermukaan menyebabkan bangunan terangkat atau tenggelam setelah peristiwa itu. Karena peristiwa ini terjadi pada pasir yang jenuh, maka pada umumnya daerah yang mengalami liquifaksi adalah disekitar sungai atau pantai.



Gbr. 11. Keruntuhan daya dukung tanah pada pondasi di Apartemen Kawagishi-cho, Niigata

Contoh klasik dari peristiwa liquifaksi adalah pada gempa di Niigata 1964 dan gambar 11 menunjukkan hilangnya daya dukung tanah yang mengakibatkan kegagalan pondasi dangkal pada apartemen Kawagishi-cho.

Fenomena liquifaksi biasanya disertai dengan *sand-boil* dipermukaan tanah. Adanya *sand-boil* ini menunjukkan bahwa dibawah permukaan tanah terjadi tekanan air pori yang sangat tinggi.

### Longsor

Gempa yang kuat dapat mengakibatkan longsor pada lereng lereng yang labil maupun pada konstruksi tanah yang baru. Longsor ini terutama dominan dimana tanah lapis permukaan berada dalam keadaan lepas .

### Kegagalan Struktur Penahan dan Dermaga

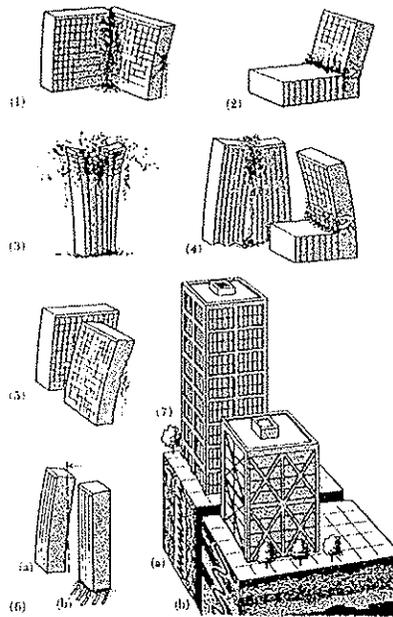
Turap berjangkar, dermaga dan struktur penahan tanah yang lain dapat mengalami kerusakan fatal akibat beban horisontal yang tidak diperhitungkan pada saat perencanaan. Kerusakan yang paling menonjol adalah di daerah pantai atau pelabuhan. Pada gempa Great Hanshin yang terjadi di Kobe baru-baru ini (1995), hampir seluruh fasilitas di pelabuhan Kobe dan Roko Island musnah akibat liquifaksi tanah pasir jenuh.



Gbr. 12. Kerusakan total bangunan penahan tanah (foto S.L. Kramer, 1996)

### Kerusakan pada infrastruktur kota

Sebuah jaringan fasilitas infrastruktur seperti jaringan telepon dan listrik, jaringan air minum bahkan sampai jalan raya dan jalan kereta api merupakan fasilitas penunjang yang utama untuk melayani kebutuhan manusia. Kerusakan jaringan ini akan berakibat amat parah pada masyarakat pasca gempa.



**Gbr. 13 Pengaruh getaran gempa terhadap bangunan tinggi**

### **Tsunami**

Tsunami adalah fenomena dipermukaan bumi dimana air laut naik akibat pergerakan dasar laut dalam arah vertikal. Pada umumnya saat di laut, tinggi gelombang hanya berkisar 1.0 m, tetapi bilamana gelombang laut ini masuk ke daratan yang dangkal dan menyempir maka akan terjadilah tsunami.

Gelombang laut yang paling menghancurkan tidak disebabkan oleh angin tetapi oleh pergerakan dasar laut. Tsunami adalah gelombang besar dan panjang yang disebabkan oleh gempa bumi (gempa laut), letusan gunung berapi maupun longsor. Istilah tsunami sering digunakan secara salah untuk mengartikan “gelombang pasang” karena kejadian tersebut tidak memiliki hubungan apapun dengan pasang-surut di laut. Salah satu keunikan tentang gelombang yang menakutkan ini adalah karena tidak dapat terlihat pada jarak kejauhan di laut mengingat ketinggian gelombang yang relatif kecil dibandingkan dengan kedalaman laut. Adalah panjang gelombang (jarak puncak ke puncak gelombang) yang menyebabkan kecepatan dan energi tsunami yang luar biasa. Bila seseorang berada di tepi pantai melihat gelombang tsunami, terlihat seperti kenaikan permukaan laut di atas elevasi pasang, kemudian tiba-tiba mundur kembali jauh di bawah permukaan air laut terendah – hanya berbalik sementara dan kemudian menerjang pantai dengan ketinggian yang luar biasa. Dampak dari kejadian ini pada daerah pantai yang berpenduduk padat dapat merupakan suatu bencana yang luar biasa.

Pada tahun 1896, pada saat tsunami terjadi pada pantai Sanriku, timur laut Pulau Honshu di Jepang, yang pertama terlihat oleh orang-orang adalah laut membuat suara berdesis seolah laut dihisap jauh ke bawah batas pasang-surut. Untuk beberapa saat terjadi suatu kesunyian yang aneh. Kemudian, dengan suatu suara menggelegar, air laut kembali menghantam pantai dengan ketinggian mencapai 25 meter dan masuk ke dalam daratan menenggelamkan 30.000 orang dan menghancurkan seluruh perkampungan. Kurang dari satu jam sebelumnya, suatu gempa telah terjadi di dasar laut pada jarak 700 km sebelah timur laut Sanriku – memberikan suatu indikasi seberapa cepat gelombang tersebut bergerak.

### Skala Intensitas Tsunami

Intensitas tsunami dinyatakan dalam 6 skala yang ditandai oleh tinggi gelombang yang sering disebut run-up. Soloviev (1978) memberikan deskripsi sebagai berikut.

Skala intensitas tsunami menurut Soloviev

Intensitas	Tinggi Run-up	Deskripsi Tsunami	Frekuensi Kejadian di Laut Pasifik
I	0,5 m	Amat kecil. Gelombang sangat lemah dan hanya terdeteksi pada catatan pasang-surut.	1 kali tiap 4 bulan
II	1 m	Kecil . Gelombang terlihat oleh orang yang tinggal di sekitar pantai dan mengenal keadaan laut. Pada pantai yang datar gelombang tersebut mudah terlihat.	1 kali tiap 4 bulan
III	2 m	Agak besar. Umumnya terlihat. Pada pantai yang landai terjadi banjir. Perahu kecil terdorong ke Pantai. Kerusakan ringan dialami oleh bangunan dekat pantai. Pada daerah muara arus sungai berbalik hingga beberapa jauh kearah daratan	1 kali tiap 8 bulan
IV	4 m	Besar. Terjadi banjir di daerah pantai. Penggerusan ringan pada tanah. Tanggul rusak. Bangunan ringan dekat pantai rusak. Bangunan permanen mengalami kerusakan kecil. Perahu besar terhempas ke daratan atau terbawa ke laut. Pantai terkotori oleh debris yang mengapung.	1 kali per tahun
V	8 m	Amat besar. Seluruh pantai tergenang. Dermaga dan struktur berat dekat laut rusak. Bangunan ringan hancur. Penggerusan dasyat pada tanaman di darat. Pantai dikotori oleh benda mengapung, ikan dan binatang-binatang laut. Dengan perkecualian kapal besar, semua perahu terdampar ke daratan atau terhempas ke lautan. Muara mengalami pengikisan berat. Manusia tenggelam dan gelombang disertai suara gemuruh.	1 kali per 3 tahun
VI	16 m	Menghancurkan. Semua struktur bangunan mengalami kerusakan total atau sebagian untuk jarak beberapa jauh dari daratan. Banjir di pantai cukup dalam. Kapal-kapal besar mengalami kerusakan. Pohon-pohon tercabut atau hancur oleh gelombang. Jumlah kematian pada penduduk pantai luar biasa banyak.	1 kali per 10 tahun

### **Tsunami di laut pasifik**

Tsunami di laut pasifik adalah sangat umum karena kebanyakan gempa di dunia terjadi pada rantai sirkum pasifik. Daerah yang paling rawan tsunami adalah Jepang (kata tsunami berasal dari bahasa Jepang yang berarti gelombang pelabuhan), Hawaii, Alaska, Indonesia, India, Srilanka dan daerah pantai Pasifik Amerika Selatan. Suatu tsunami dapat menghantam garis pantai sepanjang laut pasifik dimana 80 % dari kejadian gempa berasal. Konfigurasi dari garis pantai menentukan seberapa serius kerusakan yang dapat disebabkan oleh tsunami. Jepang dalam sejarah selama 1200 tahun mengalami lebih dari 70 kali tsunami yang merusak dan merenggut lebih dari 100.000 jiwa di Jepang. Sungguh sangat ironis, angka kematian ini dilampaui oleh hanya satu kali kejadian gempa di Aceh yang terjadi pada 26 Desember 2004. Hal ini menunjukkan kesiapan negara-negara berkembang dalam menghadapi gempa yang sangat rendah dibandingkan persiapan yang dilakukan oleh negara maju seperti Jepang.



**Gbr. 14. Kerusakan bangunan di Banda Aceh (Sumber: Gatra No. 10 Tahun XII, 22 Januari 2004)**



**Gbr. 15. Kerusakan bangunan dan infrastruktur di Meulaboh mencapai 80 %  
(Sumber: PilarNo.01/Th. VIII/10-16 Januari 2005)**

# **PENGARUH KONDISI TANAH TERHADAP GETARAN BUMI PADA SAAT GEMPA**

**OLEH:  
PAULUS P. RAHARDJO**

# PENGARUH KONDISI TANAH TERHADAP GETARAN BUMI PADA SAAT GEMPA



Oleh : Dr. Ir. Paulus P. Rahardjo, MSCE  
(Universitas Katolik Parahyangan)

## I. PENDAHULUAN

Kerusakan akibat gempa dapat dipengaruhi oleh karakteristik tanah setempat. Hal ini terutama menjadi jelas bilamana kerusakan tersebut diakibatkan oleh deformasi, gerakan atau dapat pula oleh longsor tanah. Sebagai contoh, lapisan pasir yang lepas dapat mengalami pemampatan akibat getaran bumi sehingga permukaan tanah dapat turun dan selanjutnya dapat terjadi perbedaan penurunan (*differential settlement*) yang mengakibatkan keruntuhan bangunan.

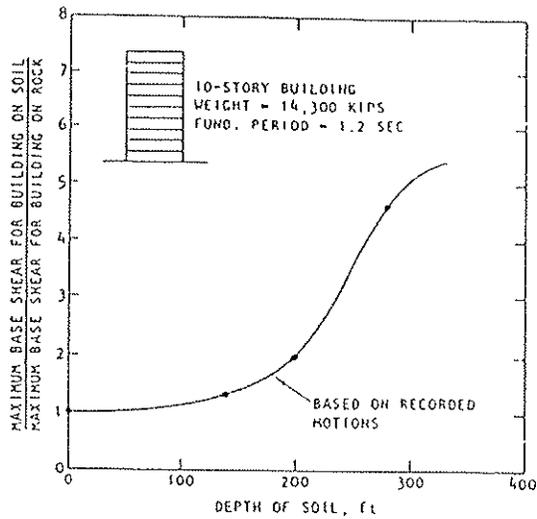
Dalam kasus dimana lapisan pasir lepas tersebut penuh air, kejadian pemampatan diatas tidak dapat segera terjadi seketika sehingga dapat menyebabkan peningkatan tekanan air pori yang besar yang menyebabkan proses pembuburan tanah (*liquifaksi*). Kerusakan akibat *liquifaksi* telah menyebabkan kehancuran banyak sekali bangunan sipil seperti misalnya pada gempa Niigata (1964), gempa Flores (1992) dan gempa Kobe (1995). Kombinasi beban dinamik dan peningkatan tekanan air pori pada lapisan lempung lembek dan pasir juga telah menyebabkan longsor yang amat besar dan luas pada gempa Alaska (1964) yang dikenal sebagai longsor Turnagain Heights di Anchorage. Longsor akibat gempa itu meluas sepanjang pantai lebih dari 3 km dan menyeberang ke daratan sejauh kurang lebih 300 m. Rata-rata permukaan tanah turun 10.0 m sesudah longsor besar tersebut.

Dalam kasus kerusakan akibat gerakan tanah seperti diuraikan diatas, pengaruh kondisi tanah langsung terlihat. Tetapi pengaruh kondisi tanah terhadap pola getaran pada bangunan diatasnya yang berasal dari karakteristik getaran gempa yang dirambatkan ke permukaan bumi oleh lapisan tanah tersebut tidak terlalu mudah dimengerti

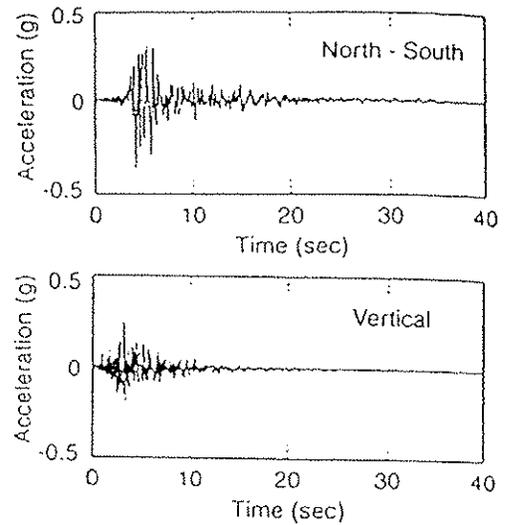
terutama bila bangunan rusak sedang tanah dibawahnya tetap stabil sesudah gempa.

Wood (1968) telah mempresentasikan fakta tentang pengaruh pelapisan tanah pada intensitas getaran yang merusak secara berbeda pada peristiwa gempa San Francisco 1906. Sejak saat itu studi pengaruh kondisi tanah pada intensitas gempa yang merusak dipelajari. Sayangnya sekali belum ada catatan gempa yang mendukung. Baru pada 25 tahun kemudian, rekaman gempa diperoleh cukup andal yang menjelaskan pengaruh getaran di permukaan bumi oleh jenis dan pelapisan tanah yang berbeda. Akselerasi gempa yang terjadi di permukaan tanah ternyata berbeda-beda bila medium yang merambatkan gelombang berbeda. Disamping itu untuk kondisi tanah yang sama ternyata pola kerusakan bangunan gedung juga berbeda bila tinggi bangunan berbeda.

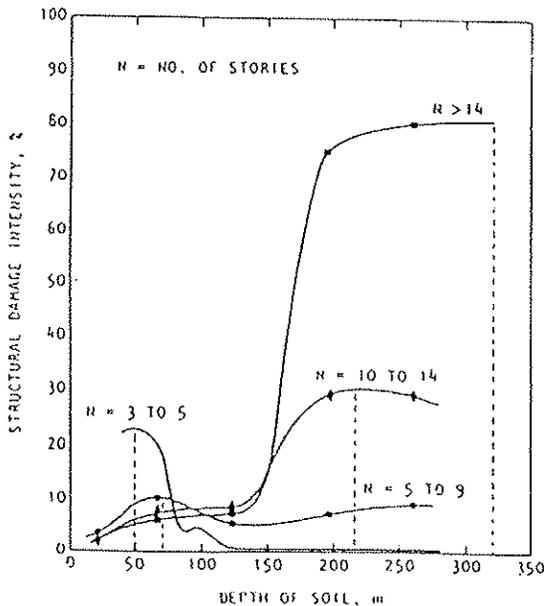
Gb. 1.1 menunjukkan bahwa pada ketebalan tanah yang berbeda, dibawa bangunan terjadi rasio geseran yang berbeda bila kedalaman tanah berbeda sedangkan pada gempa Caracas (1964) kerusakan bangunan bervariasi tergantung tinggi lantai gedung dan kedalaman atau kedalaman tanah (Gb. 1.2.). Bangunan 3 – 5 lantai misalnya mengalami kerusakan lebih parah bila ketebalan tanah berkisar 50 – 70 mm. Dapat disimpulkan bahwa lapisan tanah memberikan pengaruh terhadap karakteristik getaran bumi dan pada kerusakan bangunan meskipun karakteristik bangunan ikut menentukan pola kerusakannya. Oleh sebab itu pengaruh kondisi tanah lokal pada pola getaran bumi dan pada kerusakan bangunan perlu dipertimbangkan dalam desain seismik.



Gb.. 1.1 : Pengaruh kedalaman tanah dengan max. base shear pada gempa San Francisco, 1957

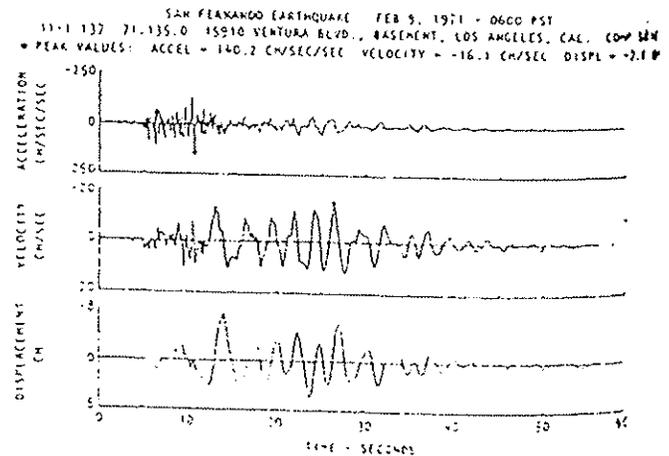


Gb.. 2.1 : Contoh rekaman accelerograph



Gb.. 1.2 : Hubungan antara kerusakan struktur dengan ketebalan tanah pada gempa Caracas 1967

Tiap-tiap komponen akselerasi horisontal dapat diintegrasikan terhadap waktu sehingga diperoleh kecepatan bumi (ground velocity) di lokasi alat perekam (stasiun gempa) dan kemudian juga riwayat peralihannya (time history of displacement) seperti ditunjukkan pada Gb.. 2.2.



Gb.. 2.2 : Contoh hasil integrasi percepatan untuk menghitung riwayat kecepatan dan peralihan

## 2. PENGARUH KONDISI TANAH PADA GETARAN BUMI

### 2.1. Karakteristik Gempa

Informasi mengenai karakteristik getaran bumi (ground motion) akibat gempa dapat diperoleh dari rekaman percepatan gempa (accelerograph records) dari gempa-gempa terdahulu. Gb. 2.1, menunjukkan salah satu contoh rekaman percepatan gempa bumi setelah diplot ulang. Pada umumnya catatan gempa ini menunjukkan riwayat percepatan dalam dua atau tiga arah.

Dari catatan atau rekaman tersebut maka dapat dikatakan karakteristik suatu gempa dalam beberapa besaran sebagai berikut :

- Percepatan (akselerasi) maksimum
- Kecepatan maksimum
- Peralihan maksimum
- Durasi (lamanya) getaran

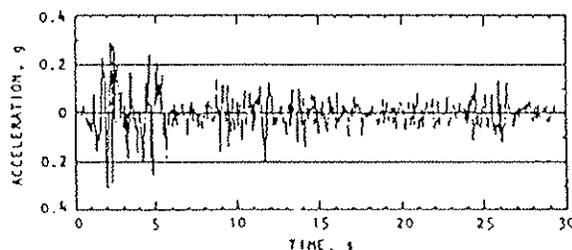
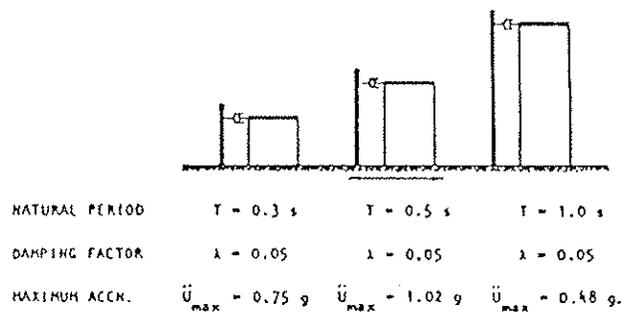
Besaran-besaran diatas merupakan karakteristik penting dari gempa tetapi belum menunjukkan intensitas dari pengaruh getarannya yang juga tergantung frekuensi getaran. Sebagai contoh awalnya suatu gempa mempunyai akselerasi yang amat tinggi tetapi berlangsung dengan amat singkat,

maka kerusakan yang disebabkan oleh besaran ini mungkin kecil. Sebagai ilustrasi, pada gempa Parkfield California (27 Juni 1996), percepatan maksimum yang ditimbulkan cukup besar, yaitu 0.5 g. Tapi karena berlangsung amat singkat, kerusakan yang ditimbulkan relatif kecil. Sebaliknya gempa dengan percepatan yang rendah tetapi berlangsung lama dapat membahayakan struktur misalnya pada gempa Mexico (Juli 1957) yang memiliki percepatan hanya 0.05 – 0.1 g tetapi mempunyai frekuensi dan durasi yang besar, telah menyebabkan bangunan bertingkat roboh.

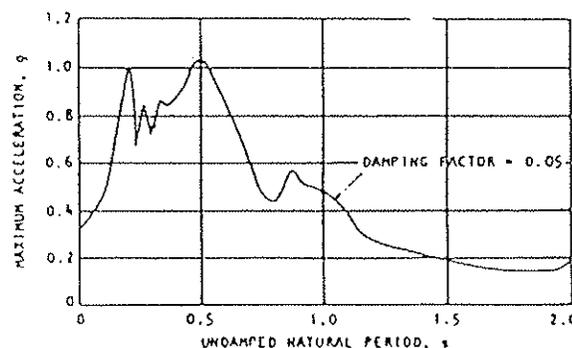
## 2.2. Respon Spektra

Kombinasi pengaruh dari amplitudo percepatan komponen frekuensi dan durasi dan kondisi tanah terhadap suatu struktur disebut *respon spectra* (Housner, 1952, Hudson, 1956, 1979), yaitu suatu plot yang menunjukkan respon maksimum yang ditimbulkan oleh getaran bumi pada sistem getaran berderajat tunggal pada berbagai periode dasar (fundamental period) sistem tersebut.

Gb. 2.3. melukiskan tiga struktur sederhana dengan masing-masing mempunyai periode dasar gempa 0.3, 0.5 dan 1.0 detik. Besarnya percepatan yang terjadi pada struktur tersebut dengan faktor redaman 5% dapat berbeda-beda antara 0.75 g, 1.02 g dan 0.48 g. Dari contoh ini menjadi jelas bahwa percepatan maksimum yang dapat dialami oleh struktur pada kondisi gempa dan kondisi tanah yang sama dipengaruhi oleh periode dasar dari struktur.



ACCELEROGRAM, EL CENTRO, CALIFORNIA EARTHQUAKE, MAY 18, 1940 (N-S COMPONENT)



ACCELERATION RESPONSE SPECTRUM, EL CENTRO GROUND MOTIONS

Gb. 2.3 : Evaluasi respon spektra percepatan (sumber : Seed & Idirss, 1982)

Grafik yang menunjukkan percepatan maksimum yang “terinduksi” pada struktur sederhana dalam suatu rentang periode dasar disebut respon spektra akselerasi. Grafik semacam ini untuk gempa El Centro ditunjukkan oleh Gb. 2.4., demikian pula hal yang sama dapat disajikan untuk kecepatan yang terjadi pada struktur.

Untuk suatu getaran bumi, hubungan percepatan spektral ( $S_a$ ) dan kecepatan spektral ( $S_v$ ) untuk suatu struktur dengan derajat kebebasan tunggal (single degree of freedom system) yang mempunyai periode  $T$  dapat dinyatakan sebagai berikut :

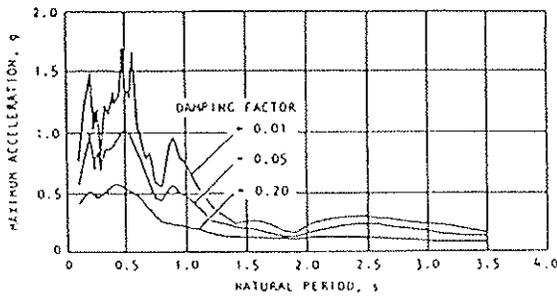
$$S_v \approx \frac{T}{2\pi} \cdot S_a$$

Persamaan diatas berlaku untuk  $0 < T < 5$  detik sehingga pengubahan respon spektra kecepatan

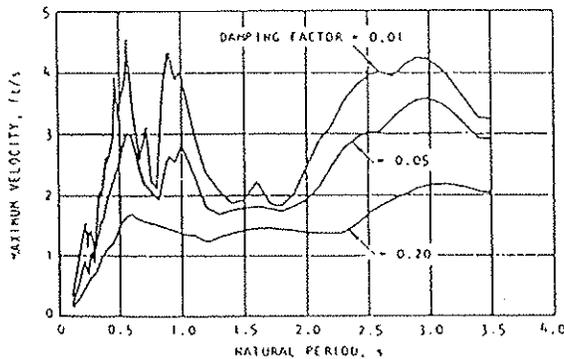
menjadi spektra akselerasi dapat mudah dilakukan, demikian pula sebaliknya.

$$V_{maks} = W \cdot \frac{S_a}{g}$$

Dimana W adalah berat struktur dan  $S_a$  adalah akselerasi spektral pada periode dasar struktur tersebut dan  $g =$  gravitasi.



Gb. 2.4.a : Respon spektra akselerasi pada gempa El Centro, 1940 (Seed & Idriss, 1982)



Gb. 2.4.b : Respon spektra kecepatan pada gempa El Centro, 1940 (Seed & Idriss, 1982)

Sekarang dapat dimengerti bahwa riwayat getaran bumi pada suatu lokasi dapat dikarakterisasikan dengan respon spektra. Jadi perbedaan riwayat getaran pada berbagai tempat dapat dievaluasikan dengan membandingkan respon spektra masing-masing. Selain itu yang lebih penting adalah bahwa dengan respon spektra dapat dievaluasikan besarnya gaya lateral maksimum pada struktur yang dikenai beban gempa. Bila struktur tersebut berperilaku sebagai sistem getaran berderajat tunggal, maka percepatan maksimum (dan dengan demikian gaya horisontal) yang bekerja dapat langsung ditentukan berdasarkan informasi mengenai periode dasar struktur. Bilamana struktur tersebut memiliki sistem getaran berderajat tinggi maka respon maksimum akibat gempa dapat dievaluasi berdasarkan berbagai modulus perilakunya. Umumnya modulus yang pertama adalah yang memberikan pengaruh terbesar.

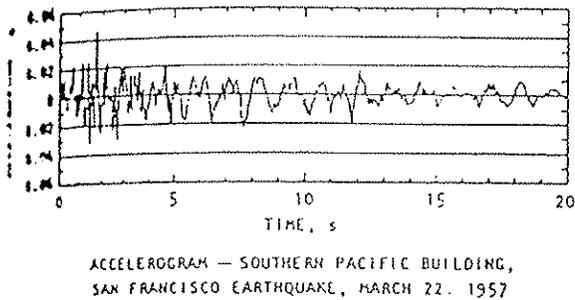
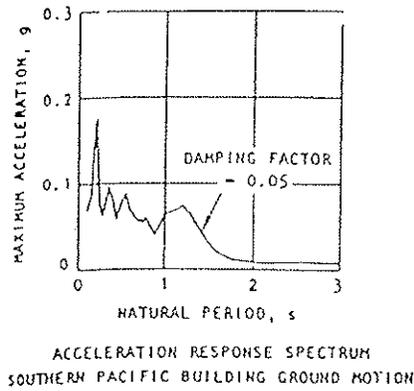
Geser di dasar bangunan (base-shear) untuk struktur dapat diperkirakan dengan persamaan

Hubungan diatas masih dapat diberlakukan dengan cukup baik untuk struktur bertingkat meskipun respon spektra akselerasi diturunkan berdasarkan sistem getaran berderajat tunggal.

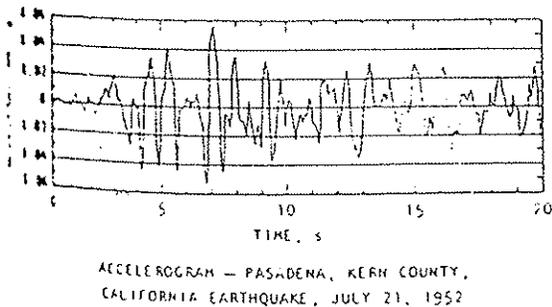
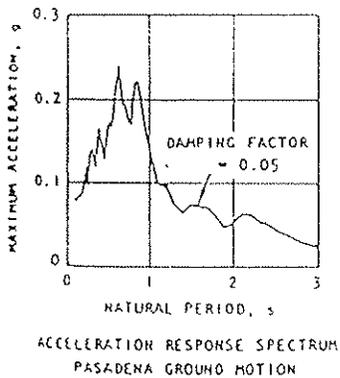
Dapat disimpulkan bahwa parameter gempa yang mempengaruhi gaya horisontal pada struktur adalah percepatan spektral  $S_a$ . Oleh sebab itu bentuk respon spektra untuk suatu gempa merupakan faktor utama yang menentukan gaya lateral pada berbagai bangunan sipil.

Gb. 2.5. memberikan ilustrasi yang jelas bahwa pada dua getaran gempa yang hampir sebanding ternyata respon spektra yang dihasilkan berbeda. Kedua gempa yang digunakan untuk contoh diatas adalah gempa San Francisco 1957 dan yang kedua adalah gempa di Kern County California, 1952.

Percepatan maksimum kedua gempa tersebut hampir sama tetapi bila suatu bangunan mempunyai periode dasar 0.9 detik, percepatan maksimum yang diberikan oleh gempa San Francisco hanya 0.04 g sedangkan oleh gempa Kern County dapat mencapai 0.2 g.



Gb. 2.5.a : Akselerogram dan respon spektra percepatan pada gempa San Francisco, 1957



Gb. 2.5.b : Akselerogram dan respon spektra percepatan pada gempa Kern County, 1952

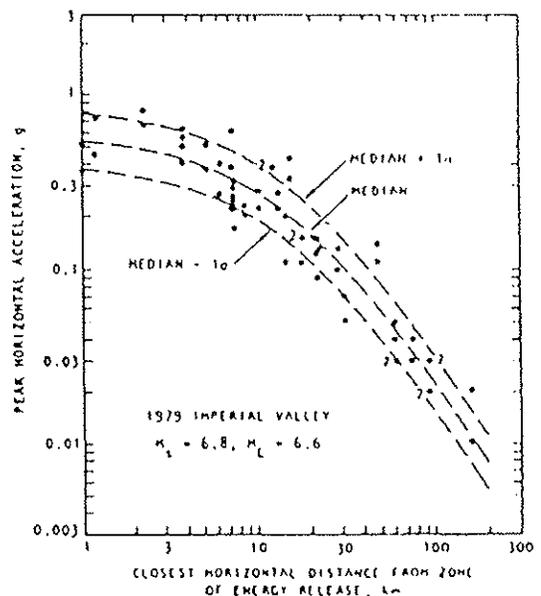
### 2.3. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Getaran Bumi

Karakteristik getaran bumi pada suatu lokasi dipengaruhi oleh beberapa faktor :

1. Besaran gempa
2. Jarak dari lokasi ke sumber pelepasan energi
3. Karakteristik geologi batuan yang merambatkan gelombang gempa
4. Mekanisme sumber gempa
5. Pengaruh interferensi gelombang yang berhubungan dengan arah dan kecepatan gelincir sesar (fault rupturing)
6. Kondisi tanah local

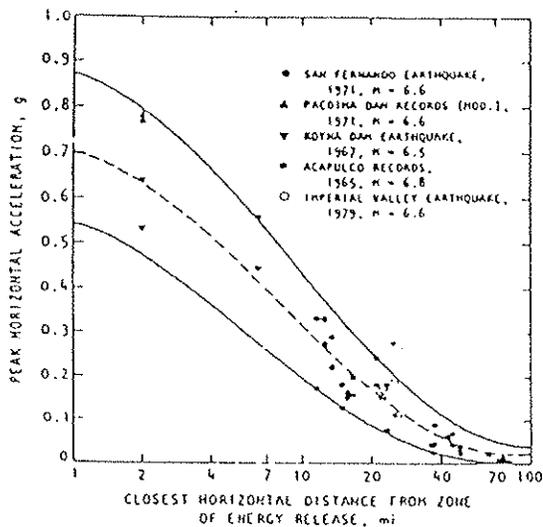
Pengaruh dari faktor-faktor ini ada yang mudah dimengerti, ada juga yang tidak. Pengaruh secara rinci seperti mekanisme sumber gempa dan geologi batuan dimana lintasa perambatan gelombang gempa terjadi sukar dimengerti kecuali dalam konsep umum saja.

Variasi intensitas getaran bumi terhadap jarak dari sumber gempa (attenuasi) telah dipelajari cukup lama. Data aktual yang terekam dengan baik adalah saat gempa Imperial Valley di California (1979) dimana patahan sesar berkisar 35 km dan di dekat daerah tersebut terpasang cukup banyak instrument. Meskipun data agak acak tetapi polanya cukup jelas. Daru data tersebut diplot hubungan antara besarnya percepatan maksimum terhadap jarak episentral gempa dan diperoleh kurva attenuasi.

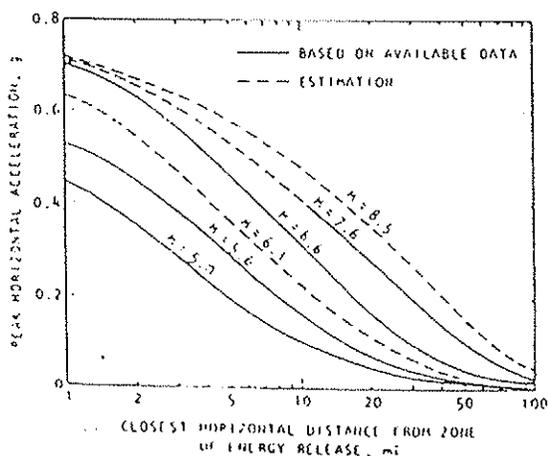


Gb. 2.6 : Analisis regresi percepatan maksimum pada gempa Imperial Valley (1979), Seed & Idriss, 1982

Data tersebut dikembangkan lebih luas oleh Seed & Idriss untuk gempa dengan magnitude  $M = 6.6$  dan ternyata cukup konsisten (Gb. 2.7). Data ini berlaku untuk batuan.



Gb. 2.7.a : Percepatan maksimum pada batuan untuk gempa dengan besaran  $M = 6.6$

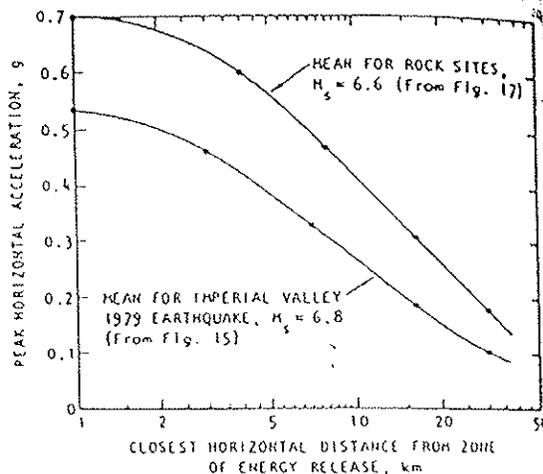


Gb. 2.7.b : Percepatan maksimum pada batuan (sumber : Seed & Idriss, 1982)

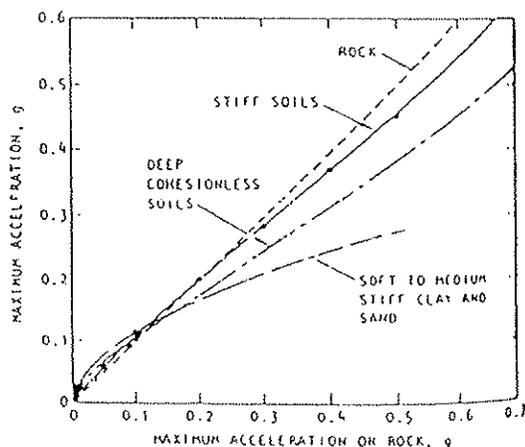
## 2.4. Pengaruh Kondisi Tanah pada Getaran Bumi

### 2.4.1 Percepatan Maksimum

Pengaruh kondisi tanah terhadap percepatan maksimum dapat ditentukan dengan membandingkan percepatan yang terukur di permukaan dengan percepatan yang terekam pada batuan. Gb. 2.9. menunjukkan perbandingan tersebut. Untuk gempa di Imperial Valley dimana terdapat lapisan tanah lembek cukup tebal.



Gb. 2.9. : Perbandingan kurva atenuasi pada batuan pada gempa Imperial Valley 1979



Gb. 2.10. : Hubungan antara percepatan maksimum pada batuan dan pada kondisi tanah local (sumber : Seed & Idriss, 1982)

Perbandingan tersebut menyatakan bahwa percepatan yang terukur pada batuan lebih besar daripada percepatan yang terjadi di permukaan tanah. Penelitian lebih lanjut menambahkan bahwa hal diatas benar untuk percepatan yang lebih besar dari 0.1 g, sebaliknya pada tingkat percepatan yang lebih rendah, keadaan menjadi sebaliknya.

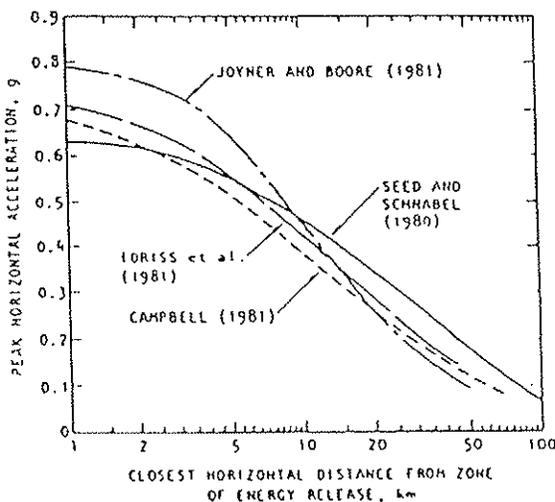
Berdasarkan studi yang lebih mendalam untuk harga-harga relative percepatan maksimum di permukaan, maka Seed & Idridd (1982) merekomendasikan untuk membedakan 4 jenis deposit (lapisan) yang berbeda.

1. Batuan
2. Lapisan tanah keras (termasuk pasir padat dan tanah lempung keras hingga 60 m)
3. Lapisan tanah pasir yang lebih dalam dari 75 m
4. Lapisan lempung lembek hingga medium atau pasir lepas

Perbedaan respon percepatan pada keempat kategori diatas ditunjukkan oleh Gb. 2.11. Untuk kategori 2 (lapis tanah keras) perbedaan akselerasi dengan di batuan tidak signifikan, bahkan para praktisi menganggap secara esensial sama.

Gb. 2.11. : Korelasi antara percepatan maksimum pada batuan dan percepatan maksimum di permukaan tanah berdasarkan 4 klasifikasi tanah dan batuan (sumber : Seed & Idriss 1982)

Perkiraan percepatan maksimum harus dikaitkan dengan fungsi atenuasi yang memperhitungkan jarak lokasi ke sumber pelepasan energi. Untuk gempa dengan skala Richter  $M_s = 7.5$ , beberapa peneliti (Seed & Schnabel 1980, Campbell 1981, Idriss et al 1982, dan Joyner & boore, 1981) telah memberikan data yang sangat konsisten.



Gb. 2.12. : Kurva atenuasi dari beberapa peneliti

Data tersebut khususnya diperoleh pada gempa dangkal di bagian barat Amerika Serikat. Kesesuaiannya untuk di Indonesia belum diteliti sehingga penggunaannya harus memperhitungkan kondisi setempat.

#### 2.4.2 Kecepatan Maksimum di Permukaan

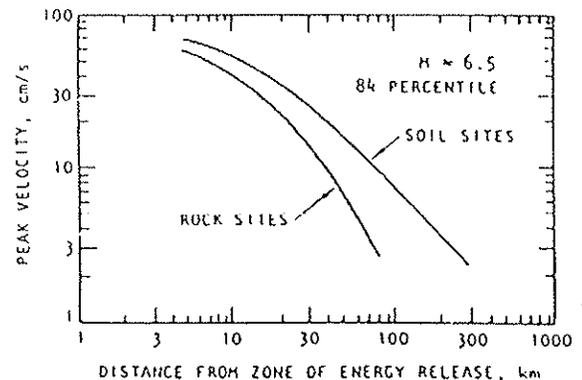
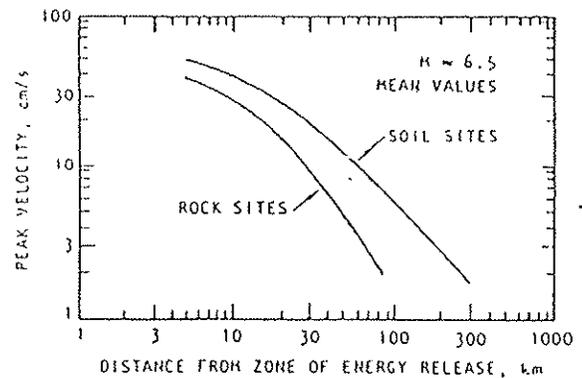
Dengan cara yang sama dimana percepatan diplot terhadap jarak episentral sebagai kurva atenuasi, harga kecepatan maksimum juga dapat dihitung untuk menentukan atenuasi kecepatan. Suatu studi seperti ini dilakukan oleh Sadigh (1979) dan diperoleh hasil seperti

ditunjukkan oleh Gb. 2.13 untuk gempa dengan  $M_s = 6.5$ . Dalam hal ini, kondisi tanah dapat merupakan faktor yang signifikan (data dari Sadigh menunjukkan besarnya kecepatan di permukaan tanah dapat mencapai 2 x lipat lebih besar daripada di batuan). Dengan membandingkan kecepatan dan percepatan dari fungsi atenuasi masing-masing maka dapat dihitung rasio kedua besaran pada jarak episentral 50 km sebagai berikut :

Tabel 1 : Perbandingan kecepatan vs kecepatan rata-rata pada jarak episentral 50 km

Kondisi Tanah / Batuan	$V_{max} / a_{max}$ (cm/det/g)
Batuan	55
Tanah padat/kaku (< 60 m)	110
Tanah padat/kaku (> 60 m)	135

Perbandingan nilai yang besar ini pertama-tama dikemukakan oleh Newmark et al (1973) dan merupakan faktor yang sangat perlu untuk diperhitungkan dalam desain struktural sipil di permukaan tanah.

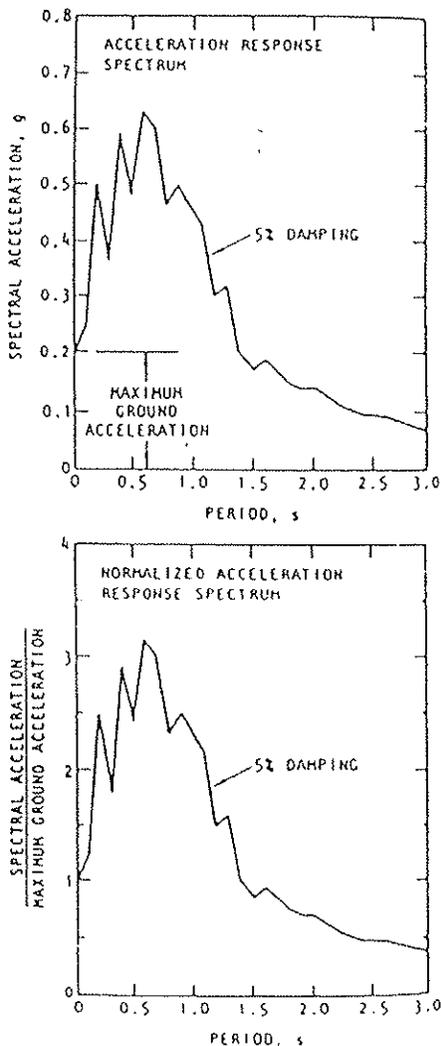


Gb. 2.13. : Variasi kecepatan maksimum terhadap jarak untuk kondisi lapangan yang berbeda (sumber : Sadigh et al., 1979)

### 3. PENGEMBANGAN RESPON SPEKTRA

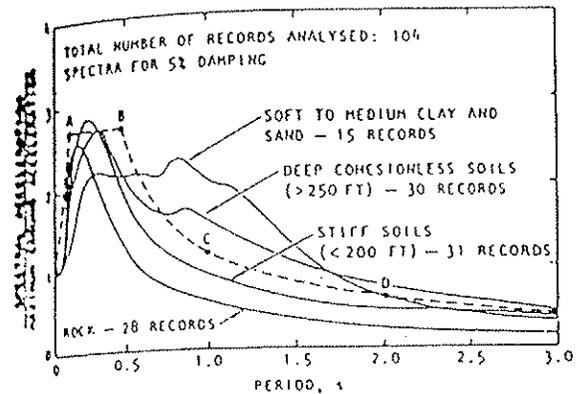
Dari semua karakteristik getaran bumi akibat gempa, yang paling dipengaruhi kondisi tanah adalah bentuk dari respon spektra. Oleh karena itu untuk menyatakan pengaruh berbagai kondisi tanah, dalam desain bangunan sipil selalu digunakan respon spektra.

Untuk mengembangkan bentuk respon spektra yang representatif dari sekelompok gempa pertama - gempa ditentukan respon spektra ternormalisasi (normalized acceleration spectrum) untuk masing - masing kelompok tersebut. Sebuah respon spektra ternormalisasi diperoleh dengan membagi ordinat respon spektra ternormalisasi selalu dimulai dengan nilai 1.0.



Gb. 3.1. : Penentuan respon spektra akselerasi yang ternormalisasi (sumber : Seed & Idriss, 1982)

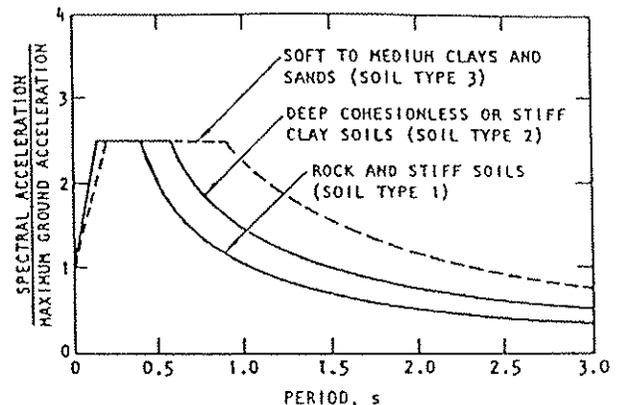
Studi ini dilakukan oleh Seed & Idriss (1982) untuk 4 klasifikasi jenis tanah/batuan yang telah ditentukan terdahulu. Studi ini dilakukan untuk faktor redaman sebesar 5% dengan hasil sebagaimana ditunjukkan oleh Gb.3.2.



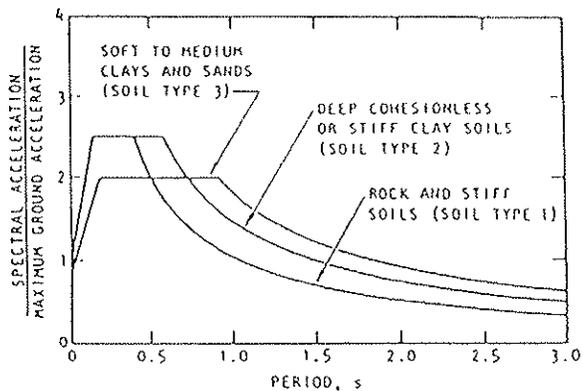
Gb. 3.2. : Respon spektra ternormalisasi rata-rata (sumber : Seed & Idriss, 1982)

Dari studi di atas nampak bahwa untuk tanah lempung lembek hingga medium memberikan proporsi yang panjang pada komponen periode. Untuk keperluan praktek, maka pada umumnya respon spektra ternormalisasi tersebut disederhanakan bentuknya misalnya untuk kondisi tanah kaku dan padat digunakan penyederhanaan bentuk seperti garis-garis patah pada Gb. 3.2 (A-B-C-D).

Bentuk respon spektra akselerasi yang diusulkan oleh Seed & Idriss (1982) diberikan pada Gb. 3.3 dimana dari 4 klasifikasi tanah sebelumnya disederhanakan lagi menjadi 3 jenis klasifikasi saja. EPA menentukan respon spektra yang sedikit berbeda dan lebih menyerupai hasil studi Seed & Idriss sebelumnya.



Gb. 3.3. : Respon spektra akselerasi untuk berbagai jenis tanah & batuan (sumber : Seed & Idriss, 1982)



Gb. 3.4. : Respon spektra akselerasi untuk gedung yang diusulkan oleh EPA

#### 4. PENENTUAN GETARAN BUMI UNTUK PERANCANGAN

Dalam banyak kasus, karakteristik getaran bumi dimana sebuah struktur hendak dirancang dapat dispesifikasikan dengan menggunakan respon spektra, sedangkan untuk analisis lain digunakan riwayat percepatan (time history of acceleration). Apapun yang akan digunakan untuk menggambarkan getaran bumi, amat penting untuk membedakan dua buah macam getaran bumi yang sama sekali berbeda :

1. Getaran bumi maksimum yang dapat ditahan oleh sebuah struktur dengan faktor keamanan yang mencukupi. Getaran bumi ini harus mencerminkan kondisi seismik dimana struktur yang akan dibangun akan mengalami tingkat kerusakan yang dapat diterima. Kategori ini dapat disebut getaran gempa berdasarkan tingkat keamanan. Besaran ini tergantung kepada kegempaan (seismisitas) dari daerah, probabilitas kejadian pada sepanjang masa usia bangunan dan tingkat resiko yang dapat diterima.
2. Tingkat getaran yang harus dimasukkan ke dalam analisis yang digunakan oleh seorang insinyur untuk memberikan panduan dalam mengevaluasi keamanan suatu struktur. Getaran ini, yang sering disebut parameter (getaran) gempa rencana (design earthquake motion) yang tergantung kepada pilihan gempa rencana yang dapat ditahan oleh struktur, tetapi juga parameter ini harus tergantung

kepada pertimbangan faktor-faktor lain seperti:

- a. Metode analisis yang akan digunakan
- b. Konservatisme prosedur analisis
- c. Tingkat redaman untuk analisis dengan memperhitungkan tingkat kerusakan yang dapat diterima
- d. Kedalaman pembedaan dari struktur di dalam tanah dan kemungkinan memasukkan variasi getaran bumi terhadap kedalaman.
- e. Pengaruh interaksi tanah-struktur
- f. Sifat material yang digunakan untuk analisis
- g. Kombinasi pembebanan dan atau komponen getaran bumi yang digunakan untuk analisis
- h. Karakteristik kekuatan struktur dan konsekuensi dari pembebanan seketika yang melampaui kekuatan bahan
- i. Daktilitas struktur
- j. Tingkat kerusakan yang dapat diterima

Pembedaan antara kedua jenis getaran gempa di atas amat penting sebab kualitas dari individu yang menangani kedua getaran tersebut amat berbeda.

Untuk pendekatan pertama dibutuhkan pengetahuan geologi kegempaan, kegempaan, gempa kuat dan persyaratan sosial. Pendekatan kedua membutuhkan pengetahuan tentang gempa kuat, respon tanah, karakteristik material, prosedur analitik, prosedur desain, dan yang terpenting adalah pengalaman yang berkaitan dengan tingkat kinerja (level performance) dari struktur yang berbeda-beda pada saat gempa dan kriteria desain yang diajukan.

#### REFERENSI

- Housher, G.W/, 1952, "Behaviour of Structures During Earthquakes," prosiding EERI, Berkeley.
- Hudson, D.E., 1956, "Response Spectrum Techniques in Engineering Seismology," Proc. First World Conference on Earthquake Engineering, Berkeley, CA.
- Newmark, N.M., Consulting Engineering Services, 1973, "A Study of Vertical and Horizontal Earthquake Spectra," Directorate of Leasing, U.S. Atomic Energy Commission, Washington D.C.

Seed, H.B., Idriss, I.M., 1982, "Ground Motions and Soil Liquefaction during Earthquake," Earthquake Engineering Research Centre, California.

Wood, H.O., 1908, "Distribution of Apparent Density in San Francisco," in The California Earthquake of April 18, 1906, Report of the State Earthquake Investigation Commission, Carnegie Institution of Washington, D.C.

**PETA GEMPA MIKROZONASI DAN  
ANALISA RESPON DINAMIK  
BEBERAPA DAERAH TIPIKAL  
KOTA BANDUNG**

**OLEH:  
PAULUS P. RAHARDJO  
RANDY J. HIDAYAT  
THEO F. NAJOAN**

# PETA GEMPA MIKROZONASI DAN ANALISIS RESPON DINAMIK BEBERAPA DAERAH TIPIKAL KOTA BANDUNG

Paulus P. Rahardjo\*  
Randy J. Hidayat\*  
Theo F. Najoa\*\*

## ABSTRAK

Perilaku tanah oleh beban gempa dalam bentuk perambatan gelombang geser amat dipengaruhi oleh karakteristik tanah lokal. Penelitian ini bertujuan melakukan mikrozonasi kota Bandung berdasarkan usulan Najoa (1987) yang membagi daerah menjadi 4 zona berdasarkan nilai perioda dominan lapisan tanah. Untuk penyusunan peta zonasi digunakan data pemboran pada berbagai lokasi di kota Bandung. Analisis respon dinamik berdasarkan perambatan gelombang satu arah digunakan untuk verifikasi. Hasilnya menunjukkan bahwa mikrozonasi yang dilakukan tersebut sedikit menyimpang dari hasil analisis dan masih perlu dikaji lebih lanjut, namun demikian dapat digunakan untuk pengembangan awal.

## Pendahuluan

Hasil pencatatan pergerakan tanah akibat gempa bumi menunjukkan bahwa meskipun pada daerah yang terbatas, untuk kondisi tanah yang berbeda menimbulkan pengaruh yang besar terhadap pola kerusakan. Pola kerusakan ini dipengaruhi oleh karakteristik amplitudo dan frekuensi pergerakan dipermukaan tanah. Respon dinamik tanah selama terjadinya guncangan gempa, merupakan cara yang terukur untuk menyatakan perilaku tersebut.

Pada peta zona seismik untuk Indonesia yang dikembangkan oleh Najoa (1987), daerah Bandung terletak pada zona seismik dengan koefisien zona = 1.0. Koefisien zona ini berguna untuk menghitung percepatan gempa maksimum dipermukaan tanah.

Dalam perancangan suatu bangunan yang membutuhkan analisis dinamik, biasanya diperlukan ragam percepatan gempa desain. Data ini sulit diperoleh di Indonesia karena sangat jarang hasil pencatatan akselerograf.

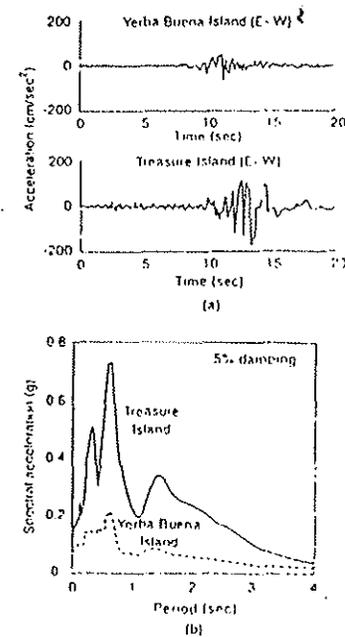
## Pengaruh Kondisi Tanah Setempat

Kondisi tanah setempat dapat mempengaruhi karakteristik penting dari getaran dipermukaan

tanah : amplitudo, frekuensi dan durasinya. Besarnya pengaruh ini tergantung kepada sifat tanah dan ketebalannya, topografi dan karakteristik gempanya. Hal ini dapat diilustrasikan dengan cara teoretik maupun dari hasil pengukuran di lapangan.

Contoh dari hasil pengukuran ditunjukkan oleh Seed et al. (1990) pada saat gempa Loma Prieta (19 Oktober 1989) yaitu pada pengukuran akselerasi di Yerba Buena Island (YBI) dan Treasure Island (TI) dimana YBI terletak di atas batuan sedangkan TI merupakan lokasi yang berada di atas lapisan tanah pasir lepas hasil reklamasi setebal 13,7 m. Meskipun kedua lokasi tersebut berada pada jarak yang sama dengan sumber gempa tetapi akselerasi yang terukur amat jauh berbeda. Percepatan puncak pada YBI tercatat 0.06 g pada arah timur barat dan 0.03 g pada arah utara selatan, sedangkan pada TI tercatat 0.16 g dan 0.11 g.

Gambar 1 menunjukkan dengan jelas hasil pengukuran tersebut. Gb. 1.a. menunjukkan riwayat percepatan (acceleration time history) dan gb. 1.b. memperlihatkan ragam percepatannya.



Gb. 1 Getaran dipermukaan tanah pada gempa Loma Prieta di lokasi Yerba Buena Island dan Treasure Island (sumber Seed et al. 1990)

Perbandingan antara percepatan yang terjadi pada batuan dan dipermukaan tanah dapat diperkirakan

pai sangat lembek, lempung-kelanauan, dan lempung kadang-kadang ditemukan juga sifat-sifat kerikil. Tebal lapisan ini antara 0-180 m.

4. *Hasil vulkanik muda yang tidak terdiferensiasi.* Sebagian besar lapisan ini terdapat di daerah menuju manglayang. Berdasarkan penyelidikan di lapangan bagian ini terdiri dari tuffaceous sand, lava, lapilli, konglomerat vulkanik dan breccia vulkanik. Tebal lapisan ini antara 0 sampai lebih dari 100m.
5. *Formasi Cikapundung.* Formasi ini terletak di sepanjang sungai Cikapundung dibagian Utara dari kota Bandung. Formasi ini terdiri dari konglomerat vulkanik dan breccia yang terinterkalasi oleh aliran lava andesit dari gunung Tangkubanparahu dan tuff. Formasi ini menutupi daerah Utara mulai dari Dago sampai daerah Timur Ciparungpung dan Pasir Pangentran. Sedangkan batas sebelah Selatan hampir sejajar dengan jalan utama antara Cibiru dan Cicaheum. Ketebalan formasi ini antara 0-350 m.

### Kegempaan

Informasi mengenai kegempaan, dari suatu daerah, merupakan salah satu bagian yang penting dalam pertimbangan teknik gempa pada suatu daerah, misalnya untuk pembuatan desain spektra. Dasar data seismisitas diberikan dalam daftar kejadian gempa lengkap dengan lokasi dan magnitudenya, yang diperoleh dari stasiun pencatatan gempa.

Berdasarkan peta zona seismik untuk desain bangunan air tahan gempa (NAJOAN, 1987).

Bandung terletak pada zona yang mempunyai koefisien zona sama dengan 1. Pada zona 3, gempa bumi yang sering terjadi adalah gempa bumi dengan magnitude 7 atau lebih kecil. Berdasarkan peta zona seismik untuk desain bangunan air tahan gempa (NAJOAN, 1987), dapat dihitung nilai percepatan gempa maksimum di permukaan tanahnya ( $a_g$ ) dengan menggunakan persamaan :

$$a_g = z \times a_c \quad (1)$$

dimana :

$a_g$  = percepatan gempa maksimum di permukaan tanah (gal)

$z$  = Koefisien Zona dari tabel 2

$a_c$  = Percepatan gempa dasar dari tabel 3

Tabel 2 Koefisien Zona Seismik

Zona	Koefisien Zona
A	2,72
B	2,11
C	1,56
D	1,00
E	0,56

Tabel 3 Percepatan Gempa Dasar

T (tahun)	$a_c$ (gal)
20	85
100	165
500	225
1000	275

Untuk gempa dengan perioda ulang 20 tahun percepatan gempa maksimum di permukaan tanah bernilai 0,087g, untuk gempa dengan perioda ulang 100 tahun nilai percepatannya adalah 0,163g, untuk gempa dengan perioda ulang 500 tahun nilai percepatannya adalah 0,23g dan untuk gempa dengan perioda ulang 1000 tahun nilai percepatannya adalah 0,281g. Nilai percepatan tersebut belum dikoreksi berdasarkan jenis tanah setempat, sesuai persamaan :

$$a_d = b_1 (a_g)^{b_2} \quad (2)$$

atau

$$a_d = b_1 (z \times a_c)^{b_2} \quad (3)$$

dimana :

$a_d$  = Percepatan gempa desain hasil koreksi pengaruh jenis tanah setempat (gal)

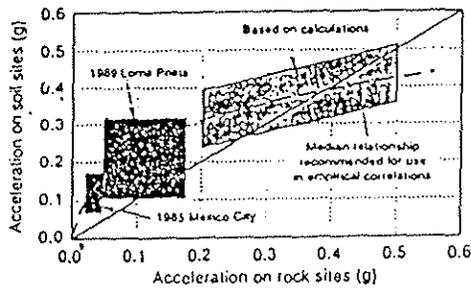
$b_1, b_2$  = Konstanta tergantung jenis tanah setempat dan diperoleh dari tabel 4

$Z$  = Faktor zona

Tabel 4. Konstanta untuk Korelasi Perlapisan Tanah Setempat

Jenis Batuan Dasar	$T_s$ (detik)	$b_1$	$b_2$
Batuan	$T_s < 0,25$	2,761	0,714
Aluvium Tua	$0,25 < T_s < 0,50$	0,869	1,054
Aluvium	$0,50 < T_s < 0,75$	1,564	0,889
Aluvium Lembek	$T_s > 0,75$	0,292	1,319

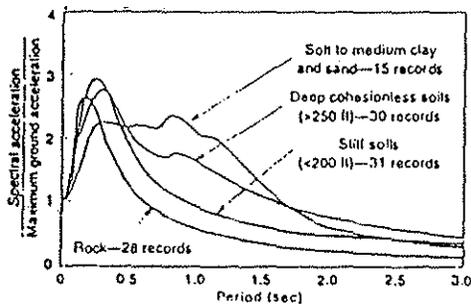
dengan kurva oleh Idriss (1990).



Gb. 2 : Perkiraan hubungan kecepatan puncak pada batuan dan pada tanah (sumber Idriss, 1990)

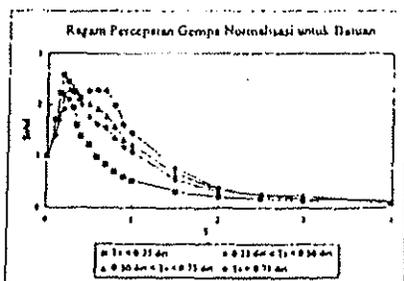
### Ragam Percepatan Gempa Normalisasi

Ragam percepatan gempa normalisasi (average normalised response spectra) diperoleh dengan cara membagi nilai ragam percepatan gempa dengan percepatan gempa maksimum yang tercatat. Seed et al (1976) membagi ragam percepatan gempa normalisasi menjadi 4 kelompok tergantung jenis tanahnya, yaitu 1. batuan (rock), 2. tanah teguh (stiff soils), 3. tanah berbutir (deep cohesionless soil) dan 4. tanah lembek (soft to medium clay). Gambar 3 menunjukkan ragam percepatan gempa normalisasi tersebut.



Gb. 3: Ragam percepatan gempa normalisasi (sumber Seed et al., 1976)

Ragam percepatan gempa menurut Najoan (1987) adalah sbb.:



Gb. 4. Ragam percepatan gempa normalisasi (sumber : Najoan, 1987)

### Perilaku Dinamik Tanah

Sifat-sifat dinamik tanah berpengaruh besar terhadap respon dinamik tanah. Sifat tersebut diantaranya adalah hubungan tegangan regangan tanah Kurva tegangan vs. regangan pada gambar 4 diperoleh dari uji siklik pada contoh tanah. Parameter modulus geser dan redaman dapat diperoleh dari kurva tersebut (lihat penjelasan Rahardjo, 1995)

Untuk analisis dalam penelitian ini tidak dilakukan uji laboratorium dan parameter diperoleh dari korelasi empirik.

### Geologi Kota Bandung

Sedimen yang terdapat di kota Bandung dan daerah sekitarnya berumur dari pleistocene sampai sekarang. Sebagian besar daerah Bandung tertutup oleh hasil letusan gunung berapi kecuali daerah Selatan, yang banyak terdapat danau, sehingga banyak terdapat hasil endapan sungai.

Berdasarkan studi yang dilakukan oleh BAR I (1989), urutan stratigrafi di daerah Bandung studi dapat dibagi menjadi (tabel 3).

1. *Endapan sungai*, jenis lapisan ini terdiri atas lempung, lanau, pasir, kerikil, dan bongkahan material yang belum terkonsolidasi. Jenis lapisan ini sebagian besar terdeposit di sepanjang sungai Citarum, dan terdistribusi di daerah Tenggara pada peta. Ketebalan lapisan ini antara 0-7 m.
2. *Formasi Cikidang*, merupakan hasil letusan dari gunung Tangkubanparahu. Lapisan ini terletak diantara dua lembah sungai, yaitu sungai Cikulong dan sungai Cikawari yang terletak di sebelah barat-laut dari daerah studi. Jenis lapisan ini terdiri dari tugg, breccia vulkanik, konglomerat vulkanik, aliran lava basalt dan scoria. Formasi ini menutupi sebagian besar daerah Barat-laut dari daerah studi.
3. *Formasi Cibereum dan Kosambi*, Formasi Cibereum terdapat di daerah Barat bagian tengah dari daerah studi dan sedikit di bagian Selatan. Lapisan ini terdiri dari lapisan utama/ permukaan yaitu lempung coklat kemerah-merahan sampai coklat tua pada lapisan permukaan, dan lapisan yang lebih dalam yaitu breccia vulkanik. Formasi Kosambi terdapat di bagian Selatan sepanjang arah Timur-barat dan di bagian Barat dari daerah studi. Lapisan ini terdiri dari lempung, lanau, claystone, siltstone, dan sandstone dari endapan lacustrine. Di sebelah Timur Lapisan ini mengandung lempung-pasiran yang lembek sam-

Untuk perioda ulang yang tidak disebutkan di atas, nilai percepatannya dapat dihitung dengan cara interpolasi.

### Sifat-sifat Teknik Lapisan Tanah Bandung

Berdasarkan hasil analisa distribusi ukuran butiran jenis tanah di daerah perkotaan, menunjukkan bahwa pada umumnya merupakan jenis tanah pasir kelemungan atau lempung kelanauan. Sehingga jenis tanah yang umumnya ditemukan di kota Bandung, digambarkan sebagai lapisan lempung kelanauan dan lempung kepasiran, lanau kepasiran dan lanau kelemungan.

Kedalaman muka air tanah di daerah Utara pada umumnya  $\pm 7,5$  m, sedangkan untuk daerah Selatan kurang dari 7,5 m.

Kandungan air untuk berbagai jenis tanah nilainya bervariasi. Untuk jenis tanah lempung kelanauan lembek sampai lempung kandungan airnya antara 35-74%, sedangkan untuk jenis tanah lempung mempunyai nilai 60-100%, umumnya untuk jenis tanah lempung lembek pada daerah endapan sungai mempunyai nilai 50-220%.

Nilai kepadatan untuk semua jenis tanah endapan di daerah Bandung adalah sekitar 1,26 - 1,77 ton/m<sup>3</sup>.

### Peta Gempa Mikrozonansi Kota Bandung dan Sekitarnya

Berdasarkan penggolongan jenis pelapisan tanahnya (Tabel 4), daerah Bandung dapat dibagi dalam zona-zona, yang ditentukan berdasarkan nilai perioda dominan lapisan tanahnya.

Hal ini didasarkan pada studi yang telah dilakukan dengan menggunakan data-data tanah, yaitu berupa data hasil sondir dan SPT yang telah dilakukan.

Penentuan nilai perioda dominan yang merupakan dasar penentuan jenis batuan dasar ini didapat dengan menggunakan rumus empiris berdasarkan nilai N dari hasil percobaan SPT. Untuk lapisan tanah dipakai konsep "Rock-like Material", yaitu material yang sifat-sifat teknisnya dianggap sesuai dengan batuan (rock). Konsep "Rock-like Material" didasarkan pada kriteria cepat rambat gelombang geser, dimana material yang mempunyai cepat rambat gelombang geser ( $V_s > 280$  m/det), dianggap mempunyai karakteristik dan tegangan yang sesuai dengan batuan.

Langkah-langkah pembuatan peta gempa mikrozonasi, adalah sebagai berikut :

1. Dari data SPT, pengeboran dan sondir yang berhasil dikumpulkan, tentukan lokasinya pada peta.

2. Masing-masing data lapisan tanah disederhanakan dulu dengan metoda OHSAKI & SAKAGUCHI (1972), kemudian dihitung nilai perioda dominan ( $T_s$ ) dengan menggunakan persamaan

$$T_s = 1,25 T_g \quad (4)$$

dimana :

$T_s$  = Perioda dominan dari perlapisan tanah dengan regangan besar waktu terjadi gempa (dlk)

$T_g$  = Perioda dominan dari perlapisan tanah dengan regangan kecil (detik)

Berdasarkan nilai perioda dominannya maka perlapisan tanah tersebut dapat digolongkan menurut jenis batuan dasarnya.

3. Pembuatan kontur dibuat berdasarkan nilai perioda dominan perlapisan tanah. Nilai perioda dominan yang dijadikan kontur adalah 0,25, 0,50 dan 0,75 detik.
4. Berdasarkan kontur perioda dominan ini, dapat dibagi menjadi zona-zona. Zona 1, yaitu zona yang nilai perioda dominannya  $< 0,25$  detik, zona 2 mempunyai nilai perioda dominan antara 0,50 - 0,75 detik dan zona 4 mempunyai nilai perioda dominan  $> 0,75$  detik.
5. Untuk masing-masing zona dihitung nilai percepatan gempa terkoreksi dengan menggunakan persamaan 2. Untuk keperluan desain, ragam percepatan gempa penormalan (Gbr. 4) yang dibuat oleh NAJOAN (1987), dapat dipergunakan pada peta gempa mikrozonasi ini.
6. Peta ini dapat dipergunakan untuk perencanaan bangunan dengan memperhitungkan beban gempa. Caranya adalah dengan menentukan lokasi dimana bangunan yang akan dibangun. Berdasarkan peta gempa mikrozonasi dapat ditentukan zona dari lokasi bangunan tersebut, nilai percepatan gempa terkoreksi dipermukaan tanah dan ragam percepatan gempa penormalan.

Dari hasil analisa, maka daerah Bandung dapat dibagi menjadi 4 zona (Gbr. 5.) adalah sebagai berikut :

1. *Zona Batuan*, zona ini meliputi sebagian besar kota Bandung dengan batas sebelah Utara adalah daerah Geger-kalong dan Dago pakar, sebelah timur adalah Cisaranten dan sebelah Selatan adalah jalan tol panci. Zona batuan ini umumnya mempunyai kedalaman tanah keras sekitar 5-9 m. Yang dimaksud dengan kedalaman tanah keras adalah kedalaman tanah yang mempunyai nilai  $N > 50$  blow/ft berdasarkan percobaan SPT.



2. *Zona Aluvium Tua*, tanah pada zona ini mempunyai nilai perioda dominan antara 0,25 - 0,50 detik. Daerah yang termasuk dalam zona ini adalah daerah Dago pakar dan Gegerkalong sebelah utara sampai sebelah barat yaitu sebagian daerah Cimindi dan Cibeureum, di sebelah selatan meliputi daerah Margahayu, Citamiang, Cijeunjing dan Cigantiri kemudian membelok ke sebelah Timur yaitu daerah Cisaranten, Sindanglaya dan sebagian daerah Cicadas.
3. *Zona Aluvium*, zona ini mempunyai nilai perioda dominan 0,50 - 0,75 detik dan kedalaman tanah keras sampai kedalaman sekitar 30 m belum tercapai. Pada daerah studi, zona ini hanya terdapat di daerah Ujung Berung, Cibiru dan sebagian daerah Cijawura.
4. *Zona Aluvium Lembek*, zona ini pada daerah studi hanya terdapat di sebelah Tenggara, yaitu daerah Rancabolang, Cipamokolan, sebagian Cijawura dan Bodogol. Zona ini mempunyai nilai perioda dominan > 0,75 detik. Nilainya n dari tanah pada daerah ini relatif kecil, sampai kedalaman  $\pm$  30 m, nilai N-SPT nya hanya berkisar 0,5 vblows/ft. Sedangkan untuk kedalaman > 30 m nilai N sekitar 20 blows/ft.

#### ANALISIS RESPONS DINAMIK PADA 4 DAERAH TIPIKAL ZONA DI KOTA BANDUNG

Perilaku tanah akibat guncangan gempa yang merambat dari batuan dasar berupa gelombang geser, dipengaruhi oleh sifat dan kondisi tanah lokal. Untuk mempelajarinya, tingkah laku peralipisan tanah selama terjadinya gempa bumi dapat dilakukan dengan model matematik satu dimensi menggunakan program komputer SHAKE (SCHNABEL, P., LYSMER, J., dan SEED, H.B., 1972).

Analisis respons dinamik untuk di kota Bandung dan sekitarnya dilakukan pada 4 lokasi. Sebelum melakukan analisis diperlukan beberapa data awal yaitu :

1. Pemilihan guncangan gempa
2. Pemilihan model lapisan tanah
3. Pemilihan parameter dinamik tanah.

Hasil analisa respons dinamik digunakan sebagai pembanding dengan hasil yang diperoleh peta gempa mikrozonasi yang diperoleh sebelumnya.

#### Pemilihan Jenis Guncangan Gempa

Data akselerograf yang tercatat di kota Bandung sampai sekarang belum pernah ada, sehingga untuk melakukan analisa respons dinamik perlu dipilih akselerograf dari lokasi lain di Indonesia atau negara lain. Pemilihan guncangan gempa harus disesuaikan dengan perlapisan tanah setempat di kota Bandung, yaitu perioda dominan dari akselerograf yang dipilih. Ini dapat dilakukan dengan menggunakan cara SEED & KIEFER (1969) dengan langkah-langkah sebagai berikut :

1. Dipilih 2 buah akselerograf untuk analisis yaitu
  - a. Gempa Bali (1979)
  - b. Gempa Taft E-W (1964)
2. Hitung spektra percepatan gempa untuk mendapatkan perioda dominan ( $T_1$ )
3. Dilakukan penskalaan agar gempa yang digunakan sebagai masukan untuk analisa sesuai dengan keadaan perlapisan tanah setempat, menggunakan persamaan :

$$\Delta t_2 = \frac{T_p}{T_1} \times \Delta t_1 \quad (5)$$

dimana :

$T_1$  = Perioda dominan dari hasil pencatatan pergerakan gempa (detik)

$T_p$  = Perioda dominan dari pergerakan baserock

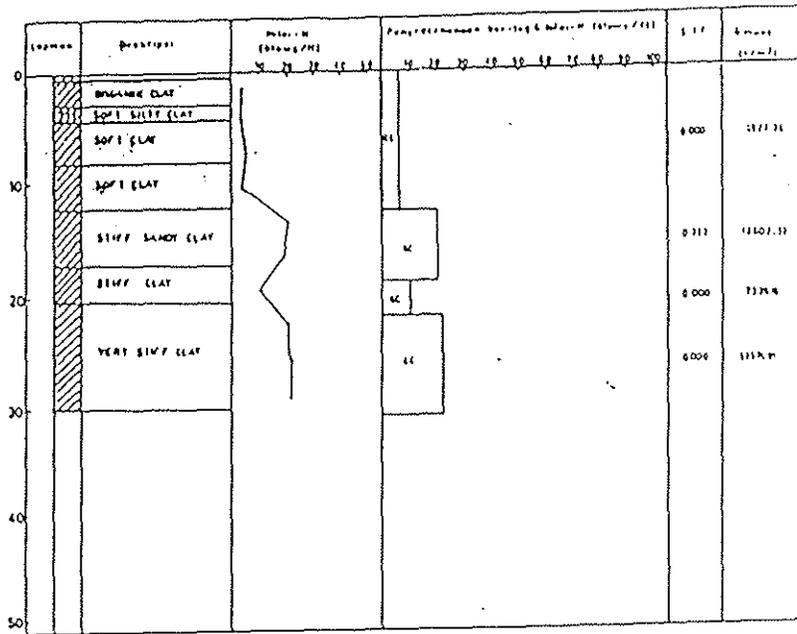
$\Delta t_1$  = selang waktu dari hasil pencatatan

$\Delta t_2$  = selang waktu dari pergerakan baserock

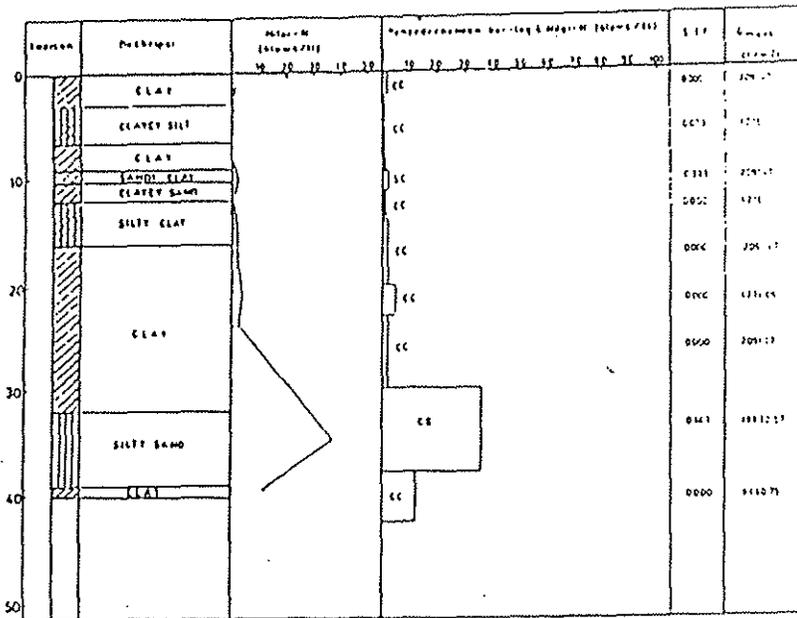
Tabel 5 Parameter yang dibutuhkan untuk Menskala-kembali Berdasarkan Pencatatan Gempa yang sudah ada

Parameter	Satuan	Harga
M	.	7
Jarak sesar	km	30
Kedalaman pusat gempa	km	30
ad	(g)	0,138
$T_p$	detik	0,35
Durasi ( $t_0$ )	detik	26





Gbr. 6c. Pemodelan Lapisan Tanah untuk Lokasi 3



Gbr. 6d. Pemodelan Lapisan Tanah untuk Lokasi 4

**Tabel 6 Karakteristik Guncangan Gempa untuk Analisa**

Jenis Gempa	$a_{maks}$ (g)	$t_{maks}$ (det)	$\Delta t_1$ (det)	$T_1$ (det)	$\Delta t_2$ (det)
G. Bali (1979)	0,4881	25,17	0,02	0,5	0,014
G. Taft E-W (1964)	0,1448	2,90	0,02	0,1	0,07

**Pemilihan Model Lapisan Tanah**

Untuk melakukan analisa dinamik di daerah Bandung, dipilih 4 lokasi yang berbeda berdasarkan penggolongan jenis perlapisan tanahnya, yang diperoleh dari pemboran (SPT) dan CPT.

Berdasarkan penggolongan jenis perlapisan tanah, daerah Bandung dibagi menjadi 4 zona, yaitu :

- Zona Batuan ( $T_s < 0,25$  detik)
- Zona Aluvium Tua ( $0,25 < T_s < 0,50$  detik)
- Zona Aluvium ( $0,50 < T_s < 0,75$  detik)
- Zona Aluvium Lembek ( $T_s > 0,75$  detik)

Setiap zona diwakili oleh 1 profil perlapisan tanah.

Untuk zona batuan dipergunakan contoh lapisan tanah dari jalan Lembong (kantor Telepon), selanjutnya disebut dengan lokasi 1 (Gbr. 6a).

Untuk zona Aluvium Tua dipergunakan contoh lapisan tanah dari jalan Gegerkalong (Kantor Sentral Telepon Otomat), selanjutnya disebut lokasi 2 (Gbr. 6b).

Untuk zona Aluvium dipergunakan contoh lapisan tanah dari jalan Cijawura (Kantor Sentral Telepon Otomat), selanjutnya disebut lokasi 3 (Gbr. 6c).

Untuk zona Aluvium Lembek dipergunakan contoh lapisan tanah dari jalan tol panci bagian timur (nilai  $T_s = 1,3517$ ), selanjutnya disebut lokasi 4 (Gbr. 6d).

Untuk perhitungan data lapisan tanah tersebut, terlebih dulu disederhanakan dengan menggunakan metoda OHSAKI.

**Pemilihan Parameter Dinamik Tanah**

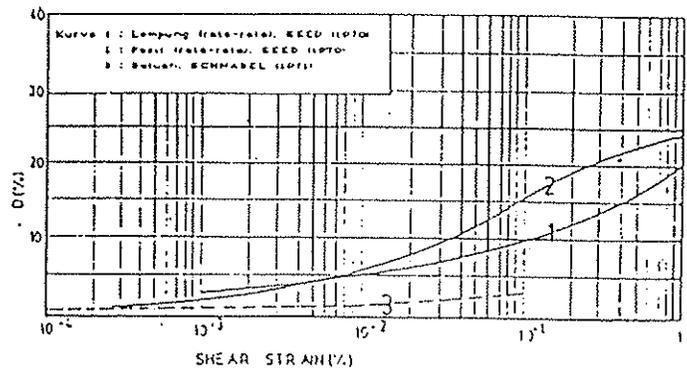
Parameter dinamik tanah yang diperlukan dalam analisa adalah modulus geser dan faktor redaman. Untuk parameter modulus geser sukar didapat maka digunakan rumus empiris berdasarkan nilai N-SPT yang dikembangkan oleh OHSAKI & IWASAKI (1972), yaitu :

$$G_{maks} = 1218 N^{0,78} \text{ (Tabel 7)}$$

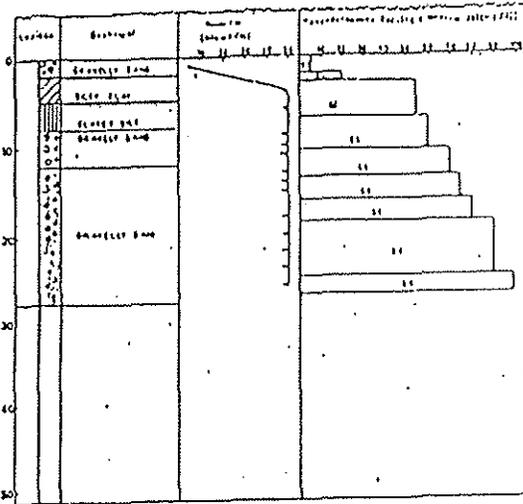
**Tabel 7 Hubungan antara Nilai N dengan  $G_{maks}$**

Peneliti	Jenis Tanah	$G_{maks}$ (ton/m <sup>2</sup> )
IMAI & YOSHIMURA (1970)	semua jenis tanah	$1000 N^{0,78}$
OHIBA & TORIUM (1970)	semua jenis tanah	$1220 n^{0,62}$
OSHAKI & IWASAKI (1972)	semua jenis tanah	$1218 n^{0,78}$
HARA dkk (1974)	kohesif	$1580 n^{0,668}$
IMAI (1977)	semua jenis tanah	$1200 n^{0,787}$

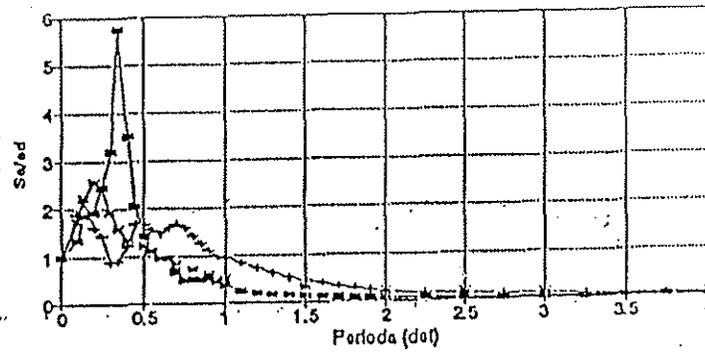
Faktor redaman nilainya diambil antara 2-5%. Data lain yang dibutuhkan adalah hubungan antara  $G/G_{maks}$  vs  $\gamma$ , dan  $D_{maks}$  vs  $\gamma$ , yang didapat dari Gambar 7.



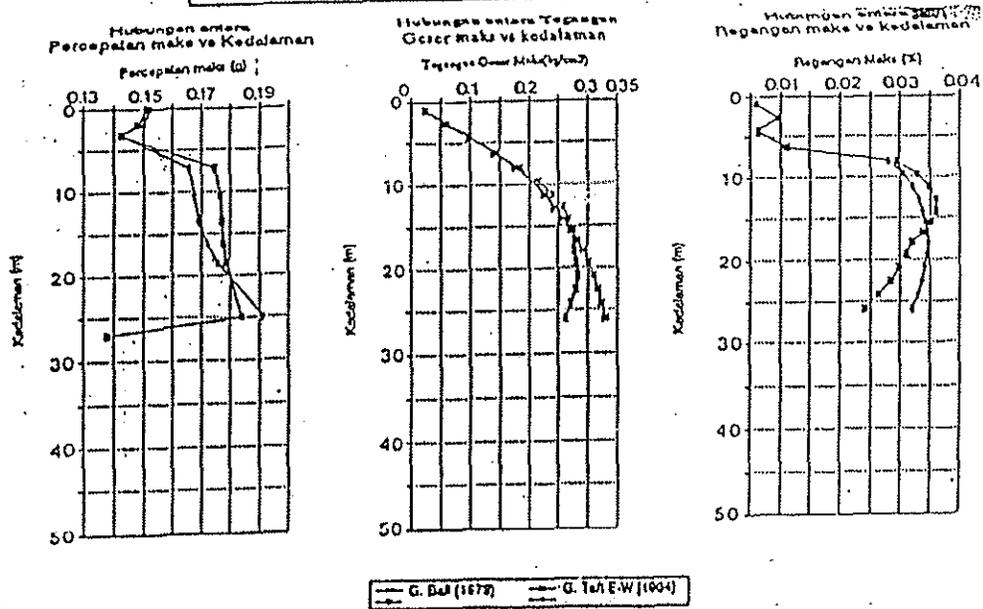
**Gbr. 7 Hubungan antara  $G/G_{maks}$  vs  $\gamma$  dan  $D$  vs  $\gamma$  untuk berbagai jenis tanah (NAJOAN, 1978).**



Ragam Percepatan Gempa Pnormalan untuk Lokasi 1 ( $D=5\%$ )

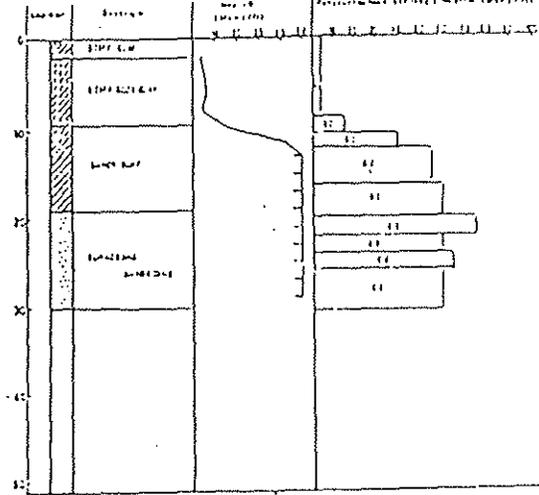


— G. Bali (1979)    - - - G. Tali E-W (1994)    -▲- Pola zona seismik

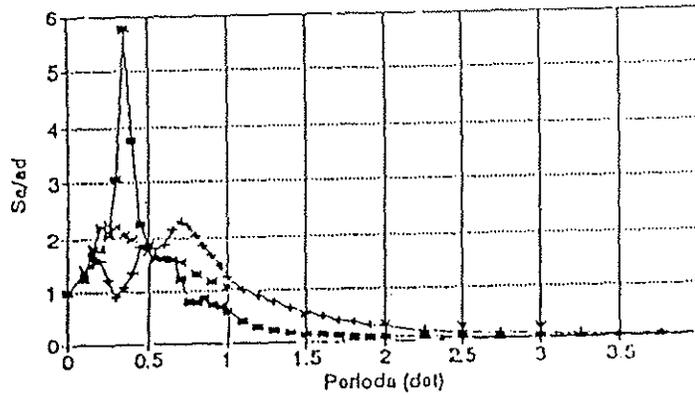


— G. Bali (1979)    - - - G. Tali E-W (1994)

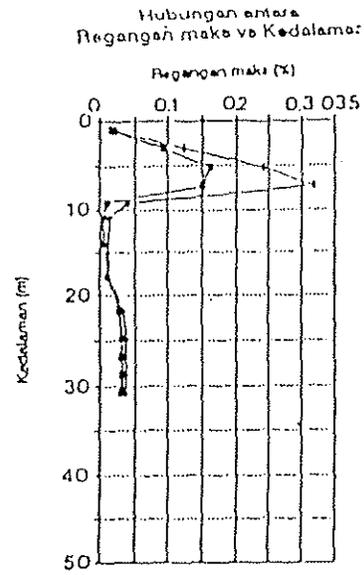
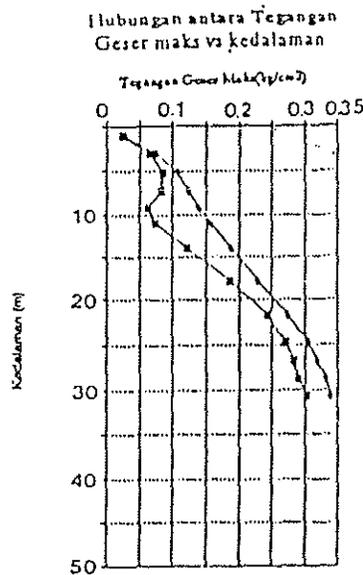
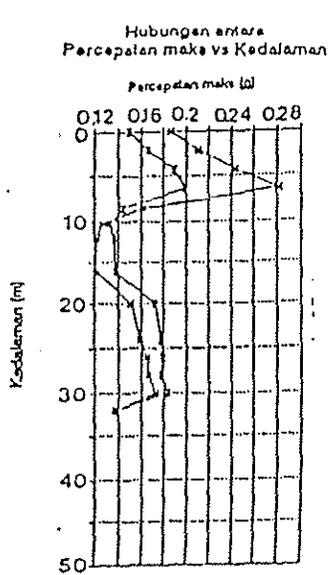
Gbr. 8a. Hasil Analisa Respons Dinamik Lapisan Tanah pada Lokasi 1



Ragam Percepatan Gempa Penormalan untuk Lokasi 2 (D = 5%)

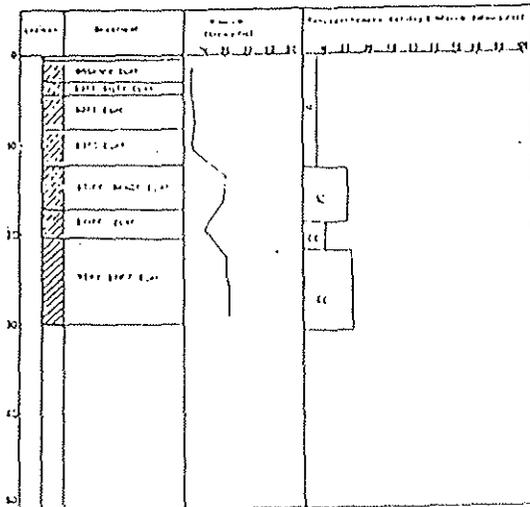


—●— G. Bal (1979)    - - - ■ - - - G. Taft E-W (1961)    ····· ▲ ····· Peta zona seismik

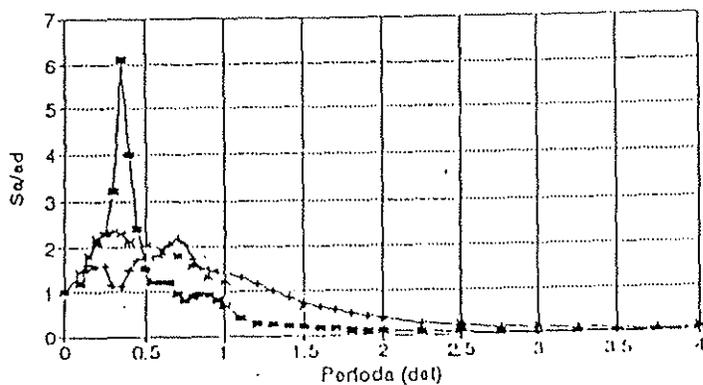


—●— G. Bal (1979)    - - - ■ - - - G. Taft E-W (1961)

Gbr. 8b. Hasil Analisa Respons Dinamik Lapisan Tanah pada Lokasi 2.

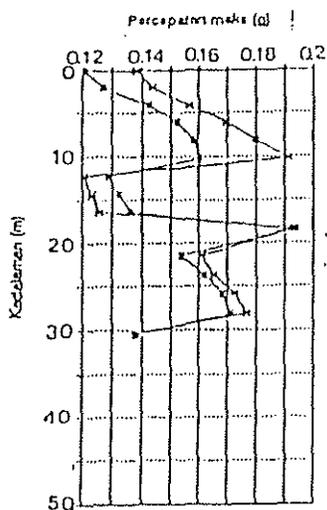


Ragam Percepatan Gempa Penormalan untuk Lokasi 3 (D = 5%)

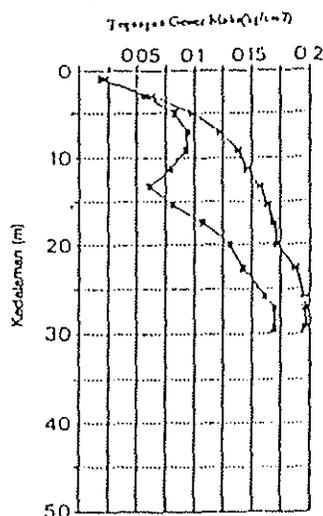


— G. Bal (1979) — G. Tah E-W (1964) — Peta zona solsmik

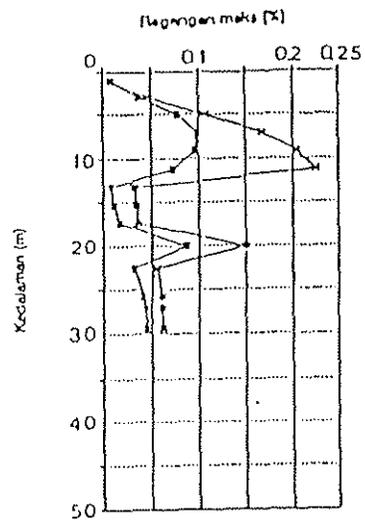
Hubungan antara Percepatan maks vs Kedalaman



Hubungan antara Tegangan Geser maks vs kedalaman

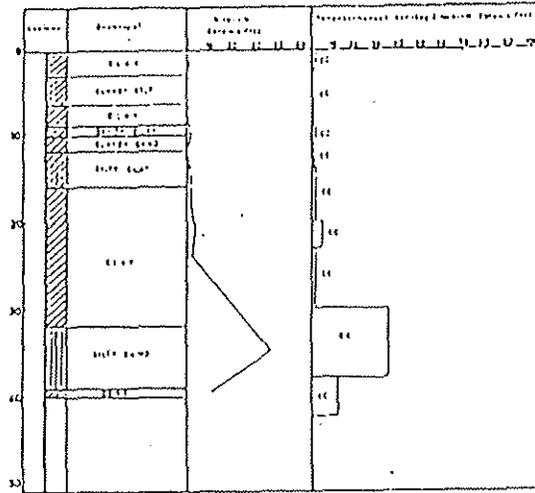


Hubungan antara Regangan maks vs Kedalaman

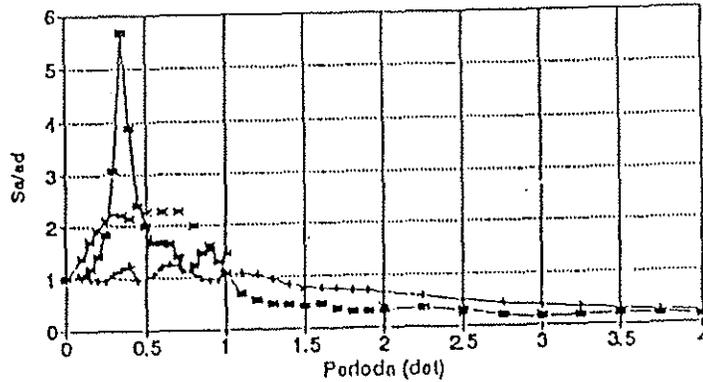


— G. Bal (1979) — G. Tah E-W (1964)

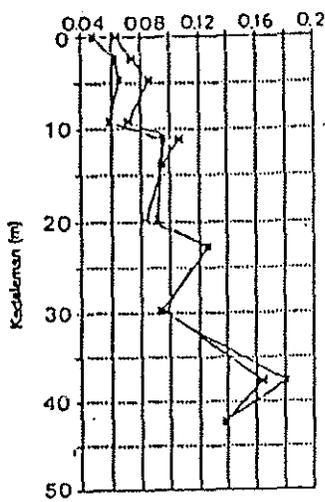
Gbr. 8c. Hasil Analisa Respons Dinamik Lapisan Tanah pada Lokasi 3



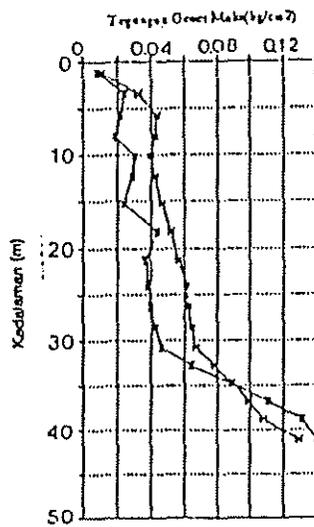
Ragam Percepatan Gempa Penormalan untuk Lokasi 4 (D=5%)



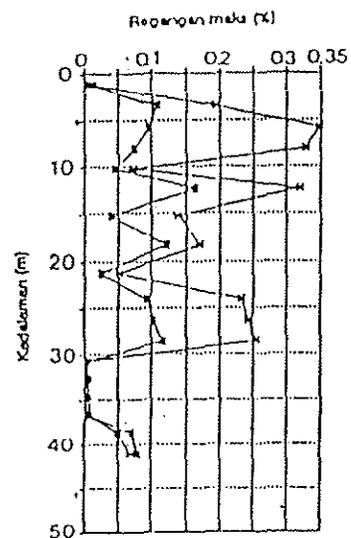
Hubungan antara Percepatan maks vs Kedalaman



Hubungan antara Tegangan Geser maks vs kedalaman



Hubungan antara Regangan maks vs Kedalaman



— G. Bali (1979)    — G. Tati E-W (1984)

Gbr. 8d. Hasil Analisa Respons Dinamik Lapisan Tanah pada Lokasi 4

## Pembahasan Hasil Analisa Respons Dinamik

Dari hasil analisa yang dilakukan pada 4 zona di kota Bandung dan sekitarnya, maka dapat dievaluasi hasil-hasil sebagai berikut :

### Percepatan Maksimum dari Lapisan Tanah yang Terjadi

Pada Gbr. 8 ditampilkan hasil analisa dinamik dari 4 zona di kota Bandung. Hubungan antara percepatan maksimum dari lapisan tanah terhadap kedalaman. Percepatan maksimum yang terjadi disini adalah untuk gempa bumi dengan perioda ulang 100 tahun. Nilai percepatan yang didapat dari analisa respons dinamik agak berbeda jika dibandingkan dengan nilai percepatan gempa disain terkoreksi dari peta zona seismik, untuk perioda ulang yang sama.

### Respons Spektra

Berdasarkan hasil yang didapat dari analisa dinamik lapisan tanah dengan menggunakan SHAKE untuk 4 lokasi yang berbeda dengan masing-masing menggunakan 2 guncangan gempa masukan, akan ditampilkan keluarannya dalam bentuk respons spektra dari percepatan relatifnya dengan nilai faktor redaman 5%. Masing-masing lokasi diidentifikasi dengan nomor dari 1-4 (Gbr. 8a - 8d).

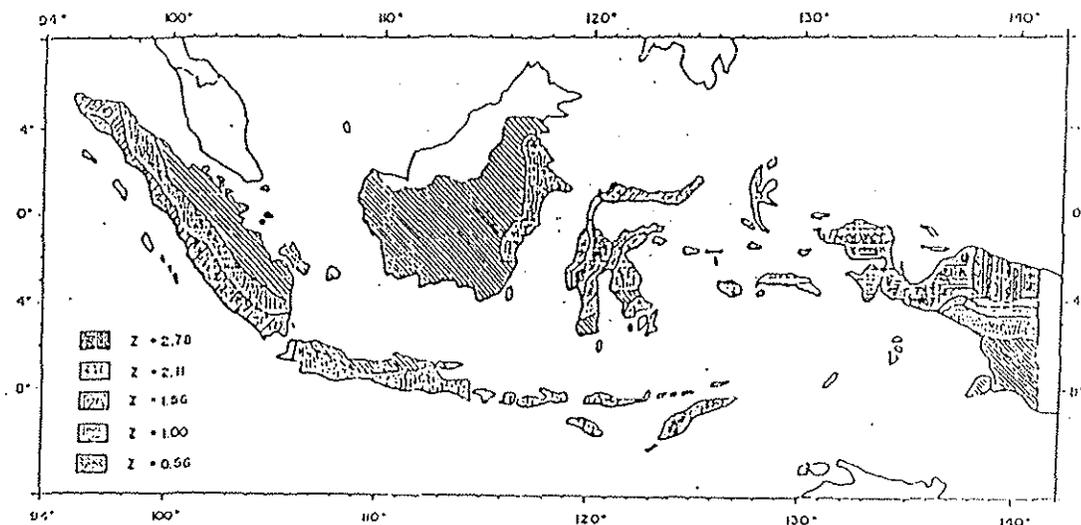
Untuk ragam percepatan gempa penormalan untuk faktor redaman 5%, akan dibandingkan dengan ragam percepatan gempa penormalan berdasarkan usulan Pedoman Penentuan Beban Gempa untuk Perencanaan Bangunan Pengairan dan Bendungan Tahan Gempa (NAJOAN, 1987) yang dapat dilihat pada Gbr. 9.

Dari ketiga macam ragam percepatan gempa penormalan (Gbr. 8) didapat nilai perioda predominan untuk masing-masing zona (tabel 8).

Tabel 8. Nilai Perioda predominan (detik dari Ragam Percepatan Gempa Penormalan (D=5%). T = 100 tahun.

Analisa	Lokasi 1	Lokasi 2	Lokasi 3	Lokasi 4
G. Bali (SHAKE)	0,35	0,35	0,35	0,35
G. Taft (SHAKE)	0,15	0,70	0,70	0,40
Peta Resiko gempa (NAJOAN, 1987)	0,20	0,25	0,30	0,60

Nilai amplifikasi dari ragam percepatan gempa penormalan untuk lokasi dapat dilihat pada Tabel 9.



Gbr. 9. Peta Zona Seismik untuk Perencanaan Bangunan Tahan Gempa

**Tabel 9. Faktor Amplifikasi dari masing-masing Ragam Percepatan Gempa Penormalan (D=5%)**

Analisa	Lokasi 1	Lokasi 2	Lokasi 3	Lokasi 4
G. Bali (SHAKE)	5,7426	5,7665	6,1098	5,6792
G. Taft (SHAKE)	2,1514	2,3008	2,1785	1,2309
Peta Resiko Gempa (NAJOAN)	2,57	2,26	2,35	2,28

Dari nilai di atas dapat dilihat karakteristik gempa memberikan nilai amplifikasi yang berbeda untuk masing-masing jenis gempa. Untuk nilai amplifikasi dari cara sederhana didapat dari rekaman 227 kumpulan akselogram dari Jepang, yang mempunyai nilai magnitute 4,5-8,0 dan dengan kedalaman fokus kurang dari 60 km.

### Hubungan antara Tegangan Geser Maksimum Terhadap Kedalaman

Dalam analisa respons dinamik lapisan tanah, dihitung pula tegangan maksimum yang terjadi pada setiap kedalaman (Gbr. 8)

Dapat dilihat dari Gbr. 8, bahwa tegangan maksimum yang terjadi dipengaruhi oleh kedalaman dan modulus gesernya. Makin dalam makin besar pula tegangan maksimum yang terjadi. Sedangkan hubungannya dengan modulus gesernya adalah makin besar nilai modulus geser dari lapisan tanah tersebut, makin kecil tegangan geser maksimum yang terjadi.

### Regangan Maksimum dari Lapisan Tanah yang Terjadi

Hubungan antara regangan maksimum yang dapat terjadi untuk setiap kedalaman tanah dapat dilihat pada Gbr. 8. Dari hasil analisa dinamik dapat dilihat bahwa regangan yang terjadi pada lapisan tanah di daerah studi akibat gempa bumi adalah relatif kecil, yaitu antara 0-0,35%.

### Nilai Periode predomnan dari Lapisan Tanah

Dari analisa respons dinamik dapat dihitung pula nilai dari periode predomnan dari lapisan tanah (Ts). Hasil tersebut agak berbeda dengan nilai yang didapat dari perhitungan nilai periode predomnan yang telah dihitung sebelumnya, berdasarkan nilai N- SPT dari lapisan tanah tersebut (Tabel 10)

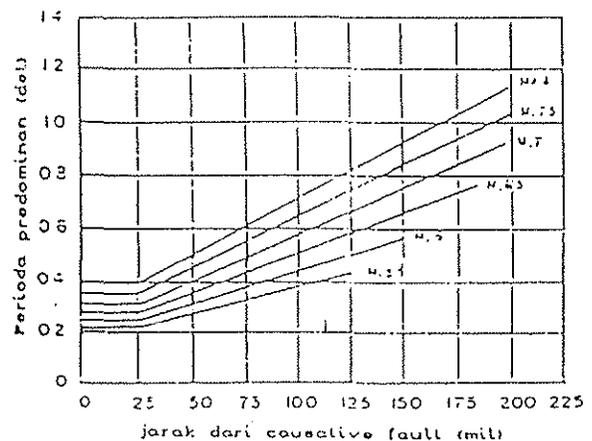
**Tabel 10 Nilai Periode Predominan (detik) dari Lapisan Tanah**

Analisa	Lokasi 1	Lokasi 2	Lokasi 3	Lokasi 4
G. Bali (SHAKE)	0,49	0,62	0,95	1,68
G. Taft (SHAKE)	0,49	0,67	1,08	1,78
Peta Gempa Mikrozonasi	0,0913	0,3032	0,5218	1,3517

Perbedaan tersebut disebabkan karena pada analisa dinamik nilai periode predomnan untuk batuan adalah 0,35 detik (berdasarkan Gbr. 10). Sedangkan dari cara sederhana nilai periode predomnan dari batuan nilainya adalah < 0,25 detik.

Dari hasil tersebut di atas dapat dilihat bahwa nilai periode predomnan dari lokasi 1 ke lokasi 4 membesar.

Berdasarkan data bor-log dan SPT menunjukkan bahwa lapisan tanah dari lokasi 1 adalah paling keras, kemudian lokasi selanjutnya makin lembek. Jadi nilai periode predomnan makin kecil, jika lapisan tanah semakin keras.



**Grb. 10. Periode Predominan untuk Percepatan Maksimum pada Batuan (Seed, Idriss dan Kiefer, 1969)**

### Kesimpulan & Saran

1. Berdasarkan mikrozonasi terhadap zona gempa, daerah Bandung dan sekitarnya dapat dibagi menjadi 4 zona, yaitu zona 1 dengan nilai periode predomnan < 0,25 detik, zona 2 dengan nilai periode predomnan antara 0,25-0,50 detik, zona 3 dengan nilai periode predomnan antara 0,50-0,75 detik, dan zona 4 dengan nilai periode predomnan > 0,75 detik.

Dari peta tersebut dapat juga disimpulkan bahwa, untuk perluasan daerah pemukiman dan perkotaan yang aman adalah ke sebelah Barat yaitu daerah Cigondewah, Cimindi dan Cimahi. Sehubungan dengan beroperasinya jalan tol Panci, maka daerah disepanjang jalan tersebut akan mengalami perkembangan fisik sebagai sarana penunjangannya. Pada peta zona gempa, jalan tol panci sebelah Timur, yaitu sekitar daerah Cipamokolan, termasuk dalam zona 4. Berdasarkan percobaan penetrasi ke dalam tanah, lapisan tanah di daerah tersebut mempunyai kedalaman tanah keras yang cukup dalam.

2. Percepatan gempa maksimum hasil analisa dinamik agak berbeda nilainya dengan percepatan gempa desain terkoreksi yang didapat dari peta gempa mikrozonasi kota Bandung dan sekitarnya. Yaitu pada zona 1 dan 4.
3. Hasil analisa dinamik yang dilakukan di 4 lokasi di daerah studi, menunjukkan bahwa sifat dan kondisi tanah lokal pada suatu daerah sangat mempengaruhi respons lapisan tanah tersebut pada waktu terjadinya gempa bumi.
4. Setiap gempa mempunyai karakteristik sendiri-sendiri, sehingga respons yang terjadi juga berbeda. Hal ini dapat dilihat dari hasil analisa dinamik dengan menggunakan 2 data guncangan gempa (akselerograf) yang berbeda. Ragam percepatan gempa penormalan yang dihasilkan akibat kedua gempa tersebut berbeda. Begitu pula jika dibandingkan dengan ragam percepatan gempa penormalan yang didapat dari peta zona seismik.
5. Dalam penggunaan peta gempa mikrozonasi untuk perencanaan suatu bangunan perlu berhati-hati. Terutama dalam perencanaan suatu bangunan tinggi atau bangunan dengan resiko tinggi. Disamping penggunaan peta gempa mikrozonasi, perlu diadakan analisa respons dinamik dengan menggunakan beberapa macam data guncangan gempa yang berbeda untuk mengontrol hasilnya.

#### Referensi

- BAR'I ENDANG RACHMAT**, 1989, "Engineering Geology of the City of Bandung, West Java - Indonesia," Master Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok.
- FUGUEROA, J.J.**, 1960, "Some Consideration About the Effect of Mexican Earthquake," Proc. 2<sup>nd</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Japan, Volume. III, pp 1553-1561.
- GUTENBERG, B & RICHTER, C.F.**, 1956, "Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration," Bull of The Seismological Society of Amerika, Volume. 46, pp 105-145.
- HARA, A.K., OHTA, T, NIW, M., TANAKA, S. & BANNO. T.**, 1974, " Modulus & Shear of Cohesive Soils," Soil and Foundation, Volume. 14, no. 3, pp 1-12.
- IDRISS, I.M.**, 1990, "Response of Soft Soil Sites during Earthquakes, Prosiding, H. Bolton Seed Memorial Symposium, "Bitech Publishers, Canada, vol. 2, pp. 273-289.
- IMAI, T.**, 1977, "P-wave & S- wave Veloceties of the Ground in Japan," Proc. 9<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics & Foundation Engineering, Tokyo, Japan, Volume. 2, pp 257-260.
- KANAI, K.**, 1952, " Relation Between th Nature of Surface Layer and the Amplitude of Earthquake Motion," Earthquake Research Institute, Tokyo University, Volume. 30, pp 31-37.
- KEIFER, F.W., SEED, H.B. & IDRIS, I.M.**, 1970, "Analysis of Earthquake Ground Motion fo Japanese Sites," Bull. of Seismological Society of Amerika, Volume. 60, pp 2057-2070.
- LAKSMININGRUM, A.S.**, 1983, " Diskusi Perioda Ulang dan Percepatan Gempa di Beberapa Tempat di Indonesia," Kapita Selekta, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung.
- NAJOAN, T.F.**, 1978, "Effect of Soil Conditions on Ground Response in The Jakarta Area, " Master Thesis, Asian Institute of Technology.
- NAJOAN, T.F.**, 1987, "Catatan Kuliah Teknik Gempa," Pendidikan Pasca Sarjana Teknik Pengajaran, BIPOWERED, Bandung.
- OHBA, S. & TORIUMI, I.**, 1970, "Research on Vibrational Caharacteristic of Soil Deposit in Osaka, " Part 2 : "On Velocities of Wave Propagation and Predominant Periods of Soil Deposits", Abstract, Technical Meeting of Architecture.
- OHSAKI, Y. & SAKAGUCHI, O.**, 1973, " Major Types of Soil in Urban Areas in Japan," Soil and Foundation, Volume. 13, no. 2, pp 49- 56.
- OHSAKI, Y. & SAKAGUCHI, .O.**, 1973, "on Dynamic Shear Moduli and Poissons Ration of Soil Deposits, "Soil and Foundation, Volume. 13, no. 2, pp 49-65.
- SCHNABEL, SEED, H.B. & LYSMER, J.**, 1971, "Modification of Seismograf Record for Effect of Local Soil Condition, "Report no. EERC 71-8, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

30 EERI/VIII 1997  
SCHNABEL, SEED, H.B. & LYSMER, J., 1972, "SHAKE, a Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontal Layered Sites, " Report no EERC 71-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

SEED, H.B. & IDRIS, I.M. 1969, "influence of Soil Condition on Ground Motion During Earthquake, "Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Volume. 95, No. SM1, pp 99-137.

SEED, H.B., MURARKA, R., LYSMER J., IDRIS I.M., 1976, "Relationships of Maximum Acceleration, Maximum Velocity, Distance from Source and Local Site Conditions for Moderately Strong Earthquakes", Bulletin of The Seismological Society of America, Vol 66, no. 4, pp. 1323-1342.

SEED, H.B., UGAS, C., LYSMER, J., 1976, "Site Dependent Spectra for Earthquake Resistant Design, "Bulletin of The Seismological Society, vol 66, pp.221-243.

SEED, R.B., DICKENSON, S.E., REIMER, M.F., BRAY, J.D., SITAR, N., MITCHELL, J.K., IDRIS, I.M., KAYEN, R.E., KROPP, A., HARDER, L.F., AND POWER, M.S., 1990, "Preliminary Report on The Principal Geotechnical Aspects of The October 17, 1989 Loma Prieta Earthquake," Report UCB/EERC-90/05," Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley.

US DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 1977, "Guidelines for CONE PENETRATION TEST Performance and Design".

Kuliah Umum  
Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil  
Universitas Katolik Parahyangan  
Bandung, 30 Maret 2007

# **TAHANAN SIKLIK PADA PASIR KELANAUAN**

**OLEH:  
PAULUS P. RAHARDJO**

# TAHANAN SIKLIK PADA PASIR KELANAUAN

OLEH

DR. IR. PAULUS P. RAHARDJO  
Universitas Katolik Parahyangan



abstrak:

Perilaku tanah pasiran akibat gempa merupakan kunci yang penting untuk menjelaskan kejadian di permukaan tanah yang kita lihat secara visual dalam peristiwa gempa tsb. Peristiwa yang dimaksud adalah timbulnya rekahan dan pengaliran pasir kepermukaan tanah yang dibarengi dengan penurunan permukaan tanah. Peristiwa tsb. menyebabkan struktur atau bangunan diatas permukaan tanah mengalami keruntuhan atau kehilangan daya dukungnya dan dikenal dengan nama *liquefaction*.

Kebanyakan studi terdahulu telah menekankan kepada perilaku tak terdrainase dari pasir bersih bergradasi seragam yang dikenai beban siklik. Baru sekitar tahun 1980, perhatian diberikan untuk pasir yang mengandung butiran halus. Kesulitan yang dirasakan dengan pasir lanauan dan pasir lempungan adalah masalah pembuatan sampel untuk mendapatkan kepadatan yang konsisten.

Penelitian ini ditujukan untuk mendapatkan gambaran mengenai respon tanah pasir lanauan terhadap beban siklik sebagaimana disimulasikan dari beban gempa. Telah dimengerti bahwa parameter kepadatan relatif tidak dapat lagi diterapkan pada tanah pasiran yang mengandung lebih dari 15 % butiran halus. Untuk penelitian ini digunakan dua buah sampel yang masing masing mempunyai kandungan butir halus (lanau) sebesar 40% dan 25% dengan sifat lanau yang tidak plastis. Sampel dibuat dengan cara kompaksi dan dengan bubur tanah (slurry) yang dikonsolidasikan. Sebelum pengujian sampel dijenuhkan lebih dahulu dengan kombinasi back-pressure dan pengaliran gas CO<sub>2</sub> kedalam sampel. B value mencapai diatas 0,98 atau pembuatan sampel diulang.

Pengujian dilakukan pada tegangan keliling 70, 100 dan 140 kPa dengan OCR = 1 dan OCR = 2 untuk sampel yang dibuat dengan slurry. Dari hasil uji ini dan perbandingan dengan uji yang lain, secara umum dapat dikatakan bahwa tegangan keliling tidak berpengaruh terhadap rasio tahanan siklik (cyclic resistance ratio) sedangkan cara pembuatan benda uji amat berpengaruh terhadap hasil uji.

## Pendahuluan

Salah satu penyebab kehancuran struktur dan bangunan sipil lainnya yang cukup dramatis akibat gempa adalah terjadinya peristiwa pencairan tanah pasiran yang jenuh yang dikenal dengan istilah "liquefaction". Secara visual peristiwa ini tampak dalam *sand boils* atau munculnya lumpur pasir di permukaan tanah atau rembesan air melalui rekahan tanah atau peristiwa tenggelamnya struktur bangunan diatas tanah serta penurunan permukaan tanah. Bangunan yang "tenggelam" itu akan amblas, miring atau bergerak kesamping.

Teknik untuk mengevaluasi keamanan terhadap keruntuhan katastrofis dari tanah (pasiran) akibat gempa seperti itu membutuhkan pengetahuan mengenai tahanan siklik tanah yang disebut juga potensi liquefaction. Hingga tahun 1980 penelitian laboratorium terutama memperhatikan khususnya tanah pasir bersih dengan gradasi seragam dan kurangnya informasi mengenai karakteristik tahanan siklik pasir yang mengandung butiran halus. Hal ini adalah karena adanya kesulitan pembuatan sampel secara konsisten pada pasir berlempung atau berlanau. Tulisan ini bermaksud untuk mengetengahkan hasil penelitian tahanan siklik pada tanah pasir lanauan dan membandingkannya dengan hasil uji yang lain.

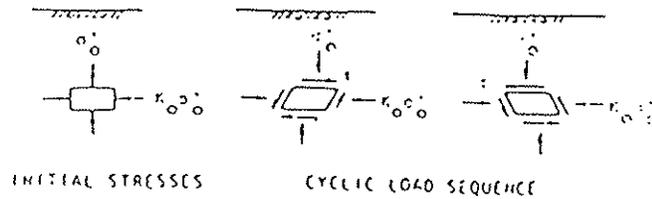
### Mekanisme terjadinya Pencairan Tanah Pasiran saat Gempa

Penyebab utama terjadinya pencairan tanah pasiran saat gempa telah dimengerti sejak lama setidaknya secara kualitatif. Bila lapisan pasir jenuh air mengalami getaran, maka massa tersebut akan cenderung untuk memadat atau volumenya akan mengecil; bila dalam proses tsb. air dalam pori pori tanah pasir tidak dapat berdrainase, maka kecenderungan pasir untuk memadat mengakibatkan kenaikan tekanan air pori, dan bila tekanan air pori meningkat terus hingga menyamai tegangan total dalam elemen tanah, maka tegangan efektifnya menjadi nol dan pasir akan kehilangan kekuatan gesernya sehingga akan berperilaku seperti cairan kental yang mengalir.

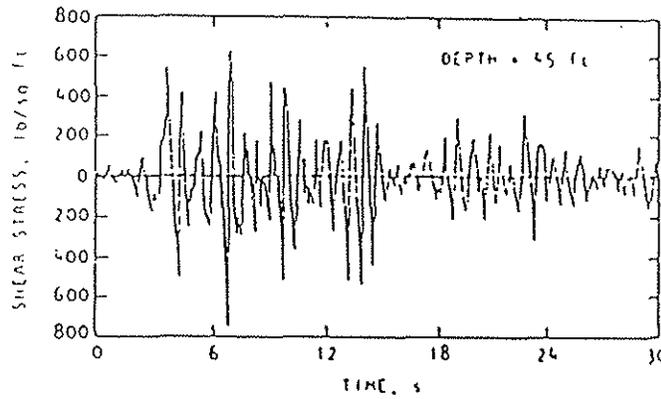
Secara kuantitatif, umumnya sekarang dimengerti bahwa sebab utama terjadinya peristiwa pencairan tanah pasiran saat gempa adalah peningkatan tekanan air pori berlebih (*excess pore water pressure*) akibat tegangan siklik (tegangan geser bolak balik) yang berasal dari gelombang gempa yang dirambatkan dalam tanah.

Gambar 1.(a) menunjukkan secara skematis kondisi elemen tanah yang mengalami tegangan geser yang berasal dari perambatan gelombang geser tsb. Tegangan geser itu sesungguhnya secara alamiah bersifat acak, tetapi bersifat siklik (bolak balik).

Gambar 1.(b) menunjukkan variasi tegangan geser terhadap waktu yang diperoleh dari hasil response analysis perambatan gelombang gempa pada suatu lapis tanah.



(a) Idealized field loading conditions



Gb. 1(a) Idealisasi elemen tanah dilapangan saat gempa  
 (b) Variasi tegangan geser dari response analysis  
 (sumber : Seed dan Idriss, 1966)

Sebagai akibatnya, maka struktur tanah pasir tsb. akan cenderung mengecil volumenya; tetapi karena peristiwanya terjadi secara amat cepat, maka kecenderungan untuk memadat dicegah (air tidak sempat keluar dari pori pori tanah) sehingga terjadi pengalihan tegangan tsb. kepada air pori dan lebih lanjut menyebabkan pengurangan tegangan kontak (dinamakan juga tegangan efektif) antara partikel tanah pasir. Bila tegangan air pori tsb. mendekati tegangan total elemen tanah pada kedalaman yang ditinjau, maka elemen tsb. akan mengalami deformasi yang besar. Secara teoritis deformasi ini tidak terbatas (terjadi pengaliran). Pada tanah pasiran yang lepas maka kondisi tsb. akan lebih cepat tercapai.

Proses pencairan tanah pasir dengan cara diatas dapat terjadi pada lapisan tanah pasir dengan kombinasi antara kepadatan relatif tanah dan tegangan keliling dan getaran tertentu. Zona seperti itu dapat terjadi dekat permukaan maupun pada suatu kedalaman tergantung kondisi tanah, besarnya tegangan keliling dan karakteristik getaran. Tetapi pencairan lapis atas pasir dapat saja terjadi karena pengaliran air oleh peristiwa pencairan yang terjadi pada lapis dibawahnya.

## Prinsip Umum Evaluasi Potensi Liquefaction

Potensi liquefaction pada suatu lapis tanah dapat ditentukan dari kombinasi sifat sifat tanah, faktor lingkungan dan karakteristik gempa. Faktor faktor spesifik yang dapat disebutkan disini diantaranya :

Sifat sifat tanah : - *Modulus geser (dynamic shear modulus)*  
- *Sifat redaman (damping characteristics)*  
- *Karakteristik butiran*  
- *Kepadatan*

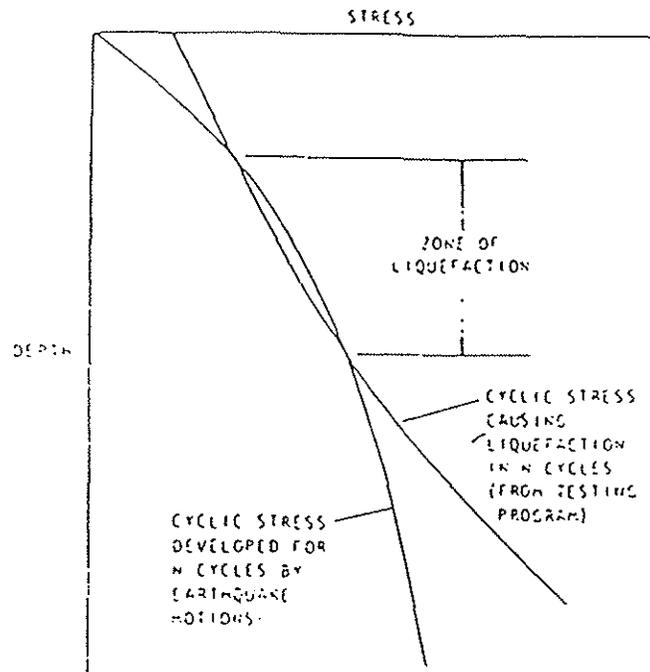
Faktor lingkungan : - *Cara pembentukan tanah*  
- *Riwayat geologis (aging, sementasi)*  
- *Koefisien tekanan tanah lateral*  
- *Kedalaman air tanah*  
- *Tegangan keiling*

Karakteristik gempa : - *Intensitas getaran*  
- *Lama getaran*  
- *Besar dan arah getaran*

Beberapa faktor diatas tidak dapat ditentukan secara langsung, tetapi pengaruhnya dapat dimasukkan kedalam prosedur evaluasi dengan melakukan uji pembebanan siklik atau dengan mengukur karakteristik tanah dengan uji lapangan. Dengan mengacu kondisi tsb. maka cara atau prosedur evaluasi potensi liquefaction pada dapat mengikuti pola sbb. :

1. Penentuan tegangan geser siklik akibat gempa pada tiap kedalaman tanah dengan cara mengkonversikan sejarah pembebanan akibat gempa yang tidak beraturan tsb. menjadi jumlah ekivalen siklus tegangan. Dengan cara ini maka intensitas getaran di bumi, lama getaran dan variasi tegangan geser terhadap kedalaman dapat ikut diperhitungkan.
2. Penentuan tegangan geser siklik dengan cara uji laboratorium maupun uji lapangan yang mengakibatkan liquefaction sesuai dengan beban yang telah ditentukan pada langkah 1. Pada uji laboratorium dapat dilakukan uji triaxial siklik atau uji simple shear dengan melakukan koreksi penyesuaian kondisi lapangan seperlunya. Tegangan geser yang diperlukan untuk mengakibatkan liquefaction ini disebut juga *tahanan geser siklik*. kemudian di plot sebagai fungsi dari kedalaman seperti diperlihatkan pada gambar 2.
3. Membandingkan tegangan geser yang terjadi di lapangan akibat gempa ( $\tau_v$ ) terhadap tahanan geser siklik ( $\tau_c$ ) sebagai tegangan geser lawan. Zona dimana

harga  $\tau_v > \tau_i$  merupakan daerah yang berpotensi mengalami liquefaction saat gempa. Secara skematis cara evaluasi seperti ini ditunjukkan oleh gb. 2



Gambar 2 : Metoda Untuk Menentukan Potensi Liquefaction  
(sumber : Seed dan Idriss, 1982)

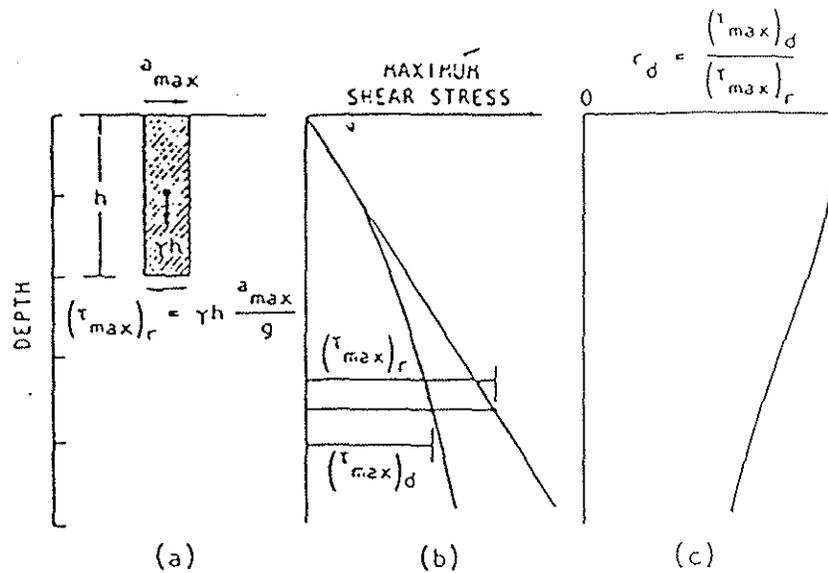
### Cara Sederhana Evaluasi Tegangan Geser Akibat Gempa

Tegangan geser yang terjadi pada suatu kedalaman lapis tanah saat gempa terutama terjadi karena perambatan gelombang geser dalam arah vertikal. Kenyataan ini dapat digunakan untuk menganalisis secara sederhana besarnya tegangan geser tsb. (Seed dan Idriss, 1971).

Bila sebuah kolom tanah diatas suatu elemen pada kedalaman h berperilaku sebagai massa yang kaku (rigid body), tegangan geser maksimum pada elemen tanah tsb. dapat dihitung sbb.:

$$(\tau_{max})_r = \frac{\gamma h}{g} \cdot a_{max}$$

dimana  $a_{max}$  adalah percepatan maksimum dipermukaan tanah,  $\gamma$  adalah berat isi tanah dan  $g$  adalah gravitasi bumi. Subskrip r untuk menunjukkan bahwa kolom tsb. adalah massa yang rigid. Gambar 3 menunjukkan prosedur ini.



Gambar 3; Prosedur sederhana untuk menentukan tegangan geser di lapangan  
(sumber : Seed dan Idriss, 1982)

Tetapi karena kolom tanah sesungguhnya adalah tidak kaku melainkan bersifat deformabel maka tegangan geser yang sebenarnya terjadi pada kedalaman h adalah  $(\tau_{max})_d$  sebesar hasil perhitungan dengan response analysis dan lebih kecil daripada  $(\tau_{max})_r$  sehingga dapat dinyatakan dengan :

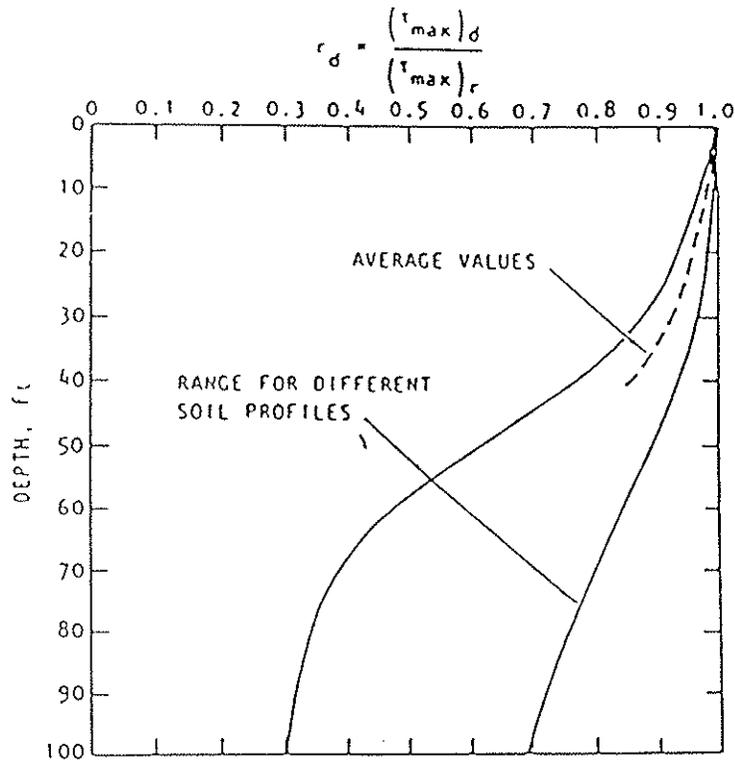
$$(\tau_{max})_d = r_d \cdot (\tau_{max})_r$$

dimana  $r_d$  adalah koefisien reduksi tegangan yang nilainya lebih kecil dari 1.0. Variasi nilai nilai tegangan tegangan tsb. mempunyai pola seperti ditunjukkan oleh gambar 3 dimana harga koefisien reduksi tegangan  $r_d$  semakin kecil terhadap kedalaman tanah.

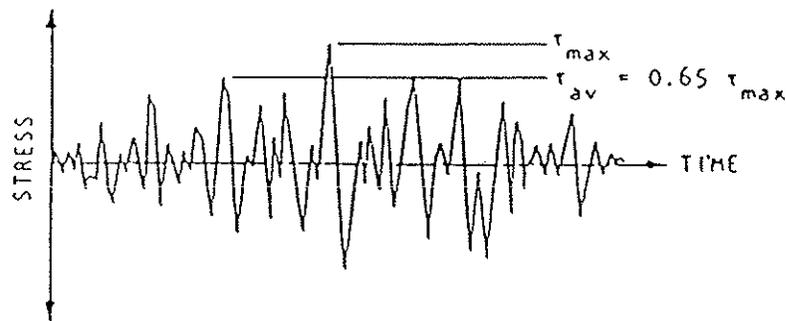
Perhitungan secara analitis untuk harga  $r_d$  untuk berbagai variasi gempa dan kondisi tanah memberikan kurva pada gambar 4. Tampak bahwa pada lapis kurang dari 15 m dari permukaan tanah, relatif keacakan hasil analisis tidak begitu besar dan pengambilan harga rata rata umumnya akan memberikan kesalahan kurang dari 5%. Dengan demikian tegangan geser maksimum cukup akurat bila dihitung dengan formula sbb.:

$$\tau_{max} = \frac{\gamma h}{g} \cdot a_{max} \cdot r_d$$

Riwayat tegangan geser terhadap waktu (time history of shear stresses) yang sebenarnya dari suatu titik pada kedalaman yang ditinjau pada saat gempa memiliki bentuk yang tidak beraturan seperti ditunjukkan oleh gambar 5.



Gambar 4 : Rentang Harga  $r_d$  terhadap kedalaman

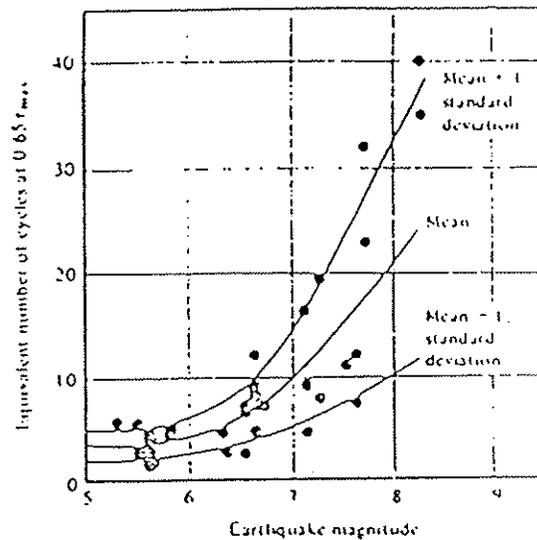


Gambar 5 : Riwayat tegangan geser terhadap waktu  
(sumber Seed dan Idriss, 1982)

Untuk itu perlu ditentukan suatu tegangan geser ekuivalen rata rata untuk penyederhanaan perhitungan. Dengan memberikan pembobotan pada masing masing siklus tegangan dan berdasarkan data uji laboratorium, penentuan harga ekuivalen itu telah dilakukan oleh Seed dengan mengambil harga  $\tau_{ave}$  sebesar 65% dari harga  $\tau_{max}$  sehingga untuk keperluan praktis dapat diambil sbb.:

$$\tau_{av} \approx 0.65 \frac{\gamma h}{g} \cdot a_{max} \cdot r_d$$

Banyaknya siklus tegangan ekuivalen tergantung daripada lamanya getaran gempa dan besaran gempa. Angka representatif menurut Seed adalah sbb.:



Gambar 6: Angka ekuivalen tegangan seragam untuk berbagai gempa (sumber Seed et al., 1975)

Penggunaan angka diatas dengan tegangan geser yang ditentukan pada persamaan terdahulu memberikan prosedur yang sederhana untuk mengevaluasi tegangan pada kedalaman yang berbeda pada gempa manapun dimana harga percepatan maksimum dipermukaan dapat diketahui.

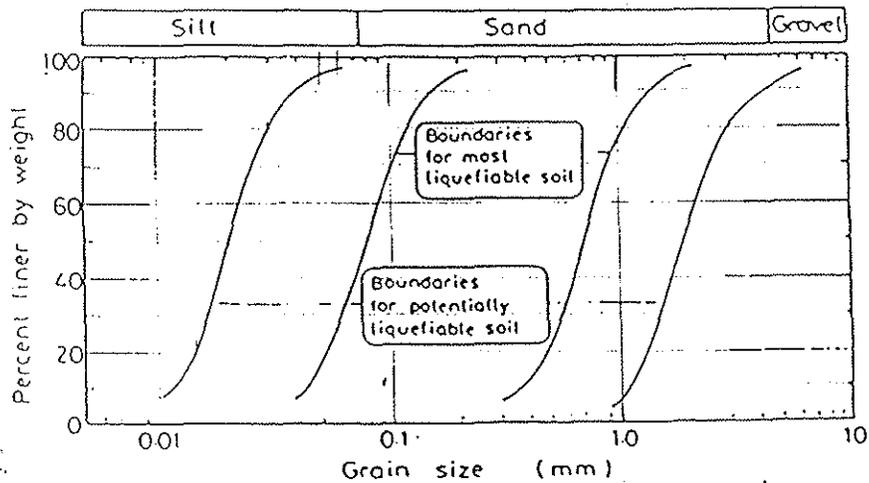
#### Identifikasi Jenis Tanah

Hasil studi di lapangan menunjukkan bahwa deposit tanah pasiran memberikan identifikasi jenis tanah yang paling mudah mengalami pencairan saat gempa. Studi tsb. telah memberikan informasi tentang jenis jenis tanah yang berpotensi mencair tsb. dan memberi petunjuk untuk mengembangkan berbagai korelasi sifat tanah dengan hasil pengukuran di lapangan maupun di laboratorium.

Berdasarkan studi terdahulu, telah dianjurkan oleh para peneliti bahwa pasir bersih lebih mudah mengalami peningkatan tekanan air pori akibat beban siklik daripada pasir berlanau atau pasir berlempung. Juga, didapatkan kenyataan bahwa tanah dengan plastisitas yang lebih tinggi lebih sulit mengalami liquefaction. Faktor faktor lain yang penting sehubungan dengan fenomena liquefaction pada saat

gempa adalah kepadatan tanah, amplitudo dan arah getaran, riwayat tegangan (stress history) dari tanah, ukuran, bentuk, fabric dan gradasi partikel, tegangan keliling dan umur deposit.

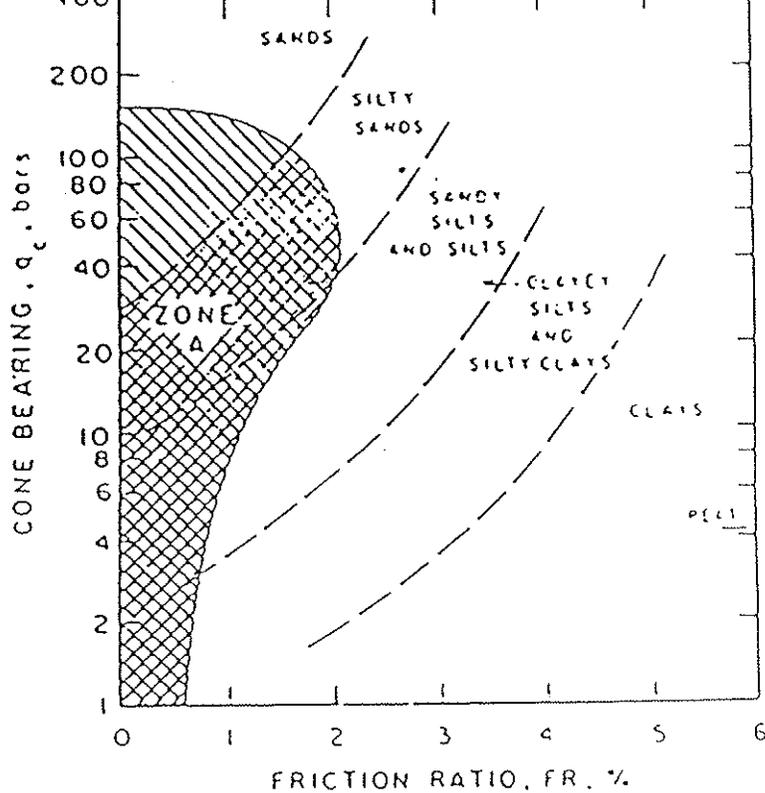
Kriteria paling sederhana untuk mengidentifikasi tanah yang dapat mengalami liquefaction adalah karakteristik ukuran butiran. Berdasarkan gradasi tanah, Tsuchida (1970) mengusulkan batas-batas distribusi ukuran butiran yang peka terhadap liquefaction seperti ditunjukkan pada gambar 7. Batas bawah dari ukuran partikel menunjukkan pengaruh adanya butiran halus yang menurunkan kecenderungan tanah memadat saat mengalami getaran. Butir halus yang plastis membuat butir pasir lebih sulit menggelincir antara partikel, tetapi butir halus yang tidak plastis tidak akan memberikan pengaruh apa-apa. Batas atas dari ukuran partikel di-asosiasikan dengan sifat butir kasar yang permeabel sehingga saat gempa dapat terjadi pelepasan tekanan air pori secara partial.



Gb. 7 : Identifikasi tanah yang berpotensi mengalami liquefaction  
(sumber : Tsuchida, 1970)

Pengamatan oleh Tokimatsu dan Yoshimi (1983) memberikan fakta bahwa lebih dari separoh material tanah yang mengalami liquefaction jatuh pada rentang kandungan butir halus kurang dari 5% dan tak ada tanah pasir yang mengandung lempung lebih dari 20% dapat mengalami liquefaction. Suatu studi oleh Seed dan Idriss (1981) menguatkan pendapat tsb. Sementara Finn (1982) menganjurkan berdasarkan studi di China bahwa indeks plastisitas mungkin dapat merupakan parameter indikator yang kuat untuk memperkirakan ketahanan tanah terhadap liquefaction. Dari studinya, Finn menganjurkan bahwa harga indeks plastisitas = 10 merupakan ambang dari kemungkinan tidak terjadinya liquefaction.

Berdasarkan hasil uji lapangan, Robertson et al. (1985) menyusun suatu chart hasil uji sondir untuk mengidentifikasi tanah yang peka terhadap liquefaction yang jatuh pada kategori daerah A (bagian diarsir) dari gambar 8.

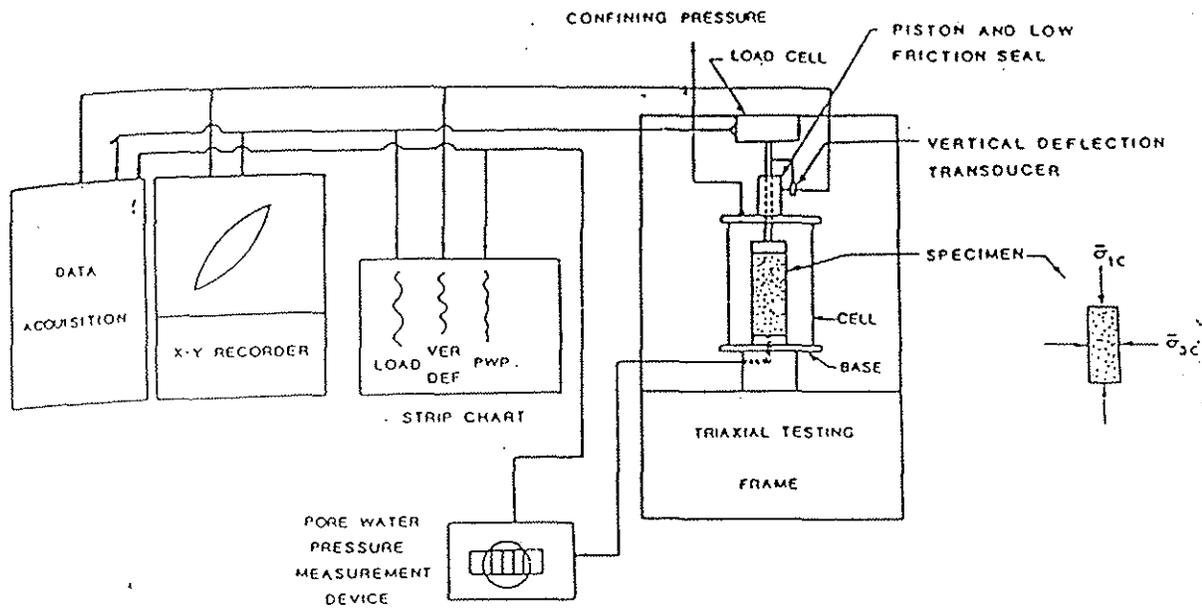


Gambar 8: Klasifikasi tanah untuk identifikasi potensi liquefaction dari uji sondir  
(sumber : Robertson & Campanella, 1983)

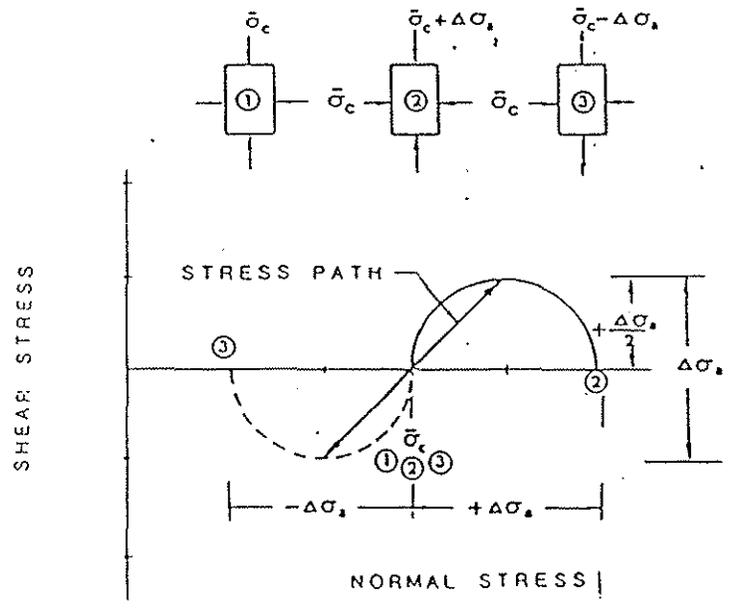
### Uji Triaxial Siklik

Dalam uji triaxial siklik, sampel tanah dimasukkan kedalam sel dimana sampel tsb. dijenuhkan terlebih dahulu dan dikonsolidasikan oleh tegangan keliling yang besarnya ditentukan. Untuk uji ini, suatu beban aksial siklik diberikan kepada sampel secara beraturan (dengan amplitudo dan frekuensi tetap) dan sementara itu dilakukan pengukuran terhadap tekanan air pori dan deformasi aksial dari sampel bersamaan dengan tiap siklus beban. Setelah sejumlah siklus beban tertentu, tekanan air pori akan meningkat sampai kurang lebih sama dengan tegangan keliling dan pada saat itu deformasi dari sampel akan eksesif.

Pada kebanyakan uji triaxial siklik, pembebanan dilakukan secara stress-controlled, dimana pada pengujian tsb. *tegangan aksial* dikendalikan. Secara skematis alat uji triaxial siklik ditunjukkan oleh gambar 9 dan kondisi pembebanan dan lintasan tegangan yang terjadi sebagaimana dinyatakan oleh diagram Mohr dijelaskan oleh gambar 10. Akibat pembebanan siklik tsb. pada bidang yang menyudut 45 derajat terhadap horisontal akan terjadi tegangan geser bolak balik yang besarnya adalah separuh dari tegangan deviator siklik. Kunci dari esensi diagram tsb. adalah bahwa pada bidang tersebut, besarnya tegangan normal dipertahankan tetap, yaitu sebesar tegangan keliling atau tegangan sel.

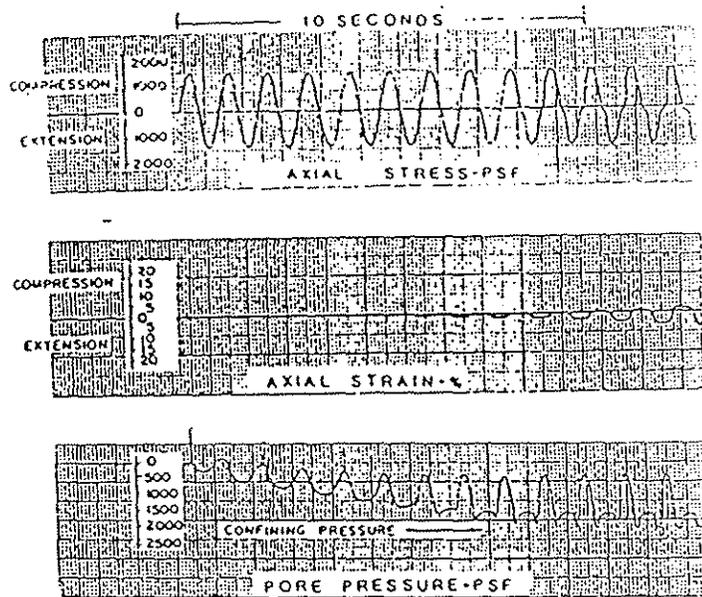


Gb. 9 : Skema alat uji triaxial siklik



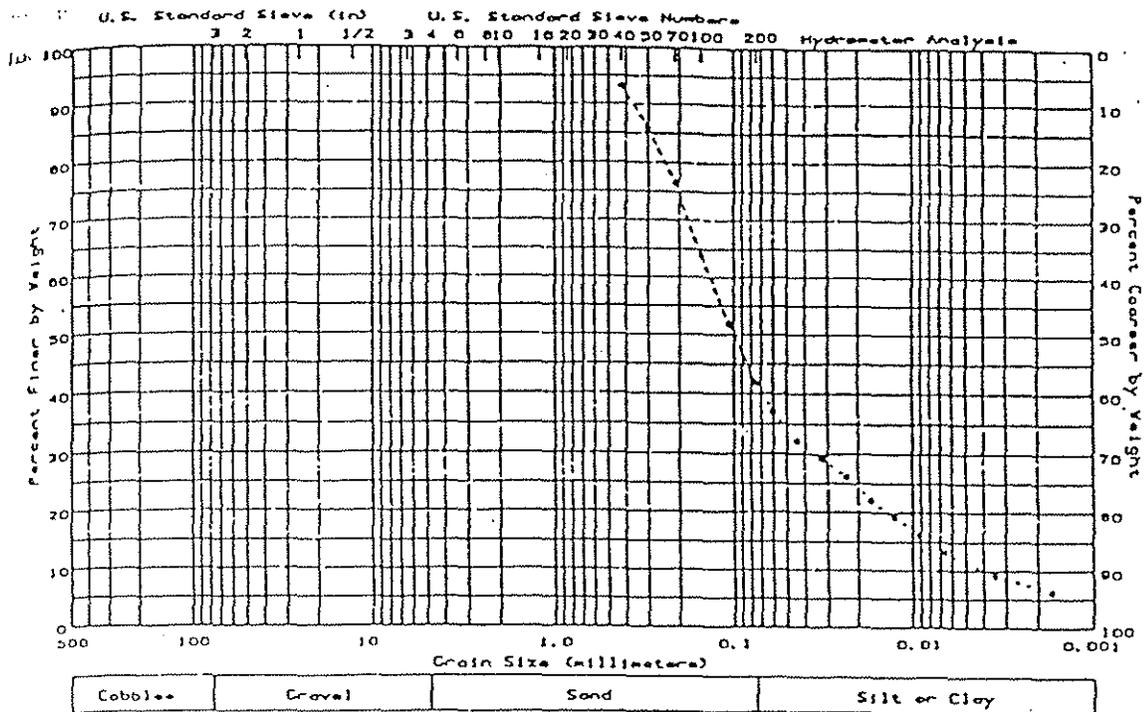
Gb. 10 : Representasi tegangan pada uji triaxial

Hasil tipikal dari uji triaxial siklik ditunjukkan oleh gambar 11. Pada gambar tsb, dapat terbaca bahwa beban aksial diberikan sebesar 1500 psf ( $\approx 0.75 \text{ kg/cm}^2$ ). Tekanan air pori meningkat terus bersamaan dengan siklus beban dan pada siklus ke 7 atau 8 didapatkan tekanan air pori telah menyamai tegangan keliling sehingga nampak bahwa sampel mulai mengalami deformasi yang cukup berarti. Pada kondisi ini dikatakan bahwa sampel mengalami liquefaction pada siklus ke 7. Uji ini diulangi untuk tegangan aksial yang berbeda dan hasil akhir untuk beberapa sampel diplot sebagai hubungan antara besarnya rasio tegangan siklik (cyclic stress ratio) terhadap banyaknya siklus beban hingga liquefaction. Rasio tegangan siklik dimaksud adalah perbandingan antara tegangan geser maksimum ( $1/2 \Delta\sigma_1$ ) terhadap tegangan keliling atau tegangan sel ( $\sigma_3$ ).

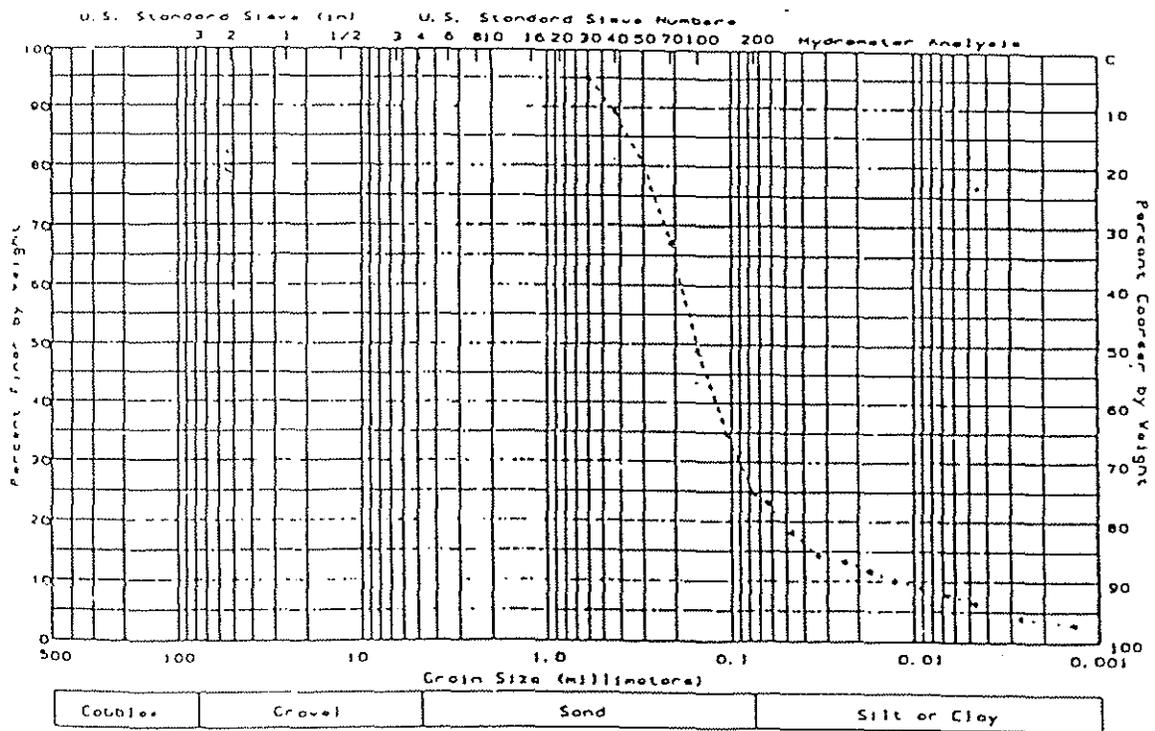


Gambar 11 : Hasil tipikal uji triaxial siklik

Pada penelitian ini, dua buah pasir kelanauan diambil untuk pengujian. Pasir lanauan dari Yatesville mempunyai kandungan lanau sebesar 40% dan pasir lanauan dari Pepper's Ferry mengandung 25% lanau. Kedua contoh tanah tsb. mempunyai sifat non-plastis. Gradasi kedua jenis tanah tsb. ditampilkan dalam gambar 12(a) dan 12(b). Bentuk kurva gradasi kedua contoh tanah hampir mirip. Meskipun pasir Peppers' Ferry mempunyai kandungan butir halus lebih rendah, tetapi ukuran butir rata-ratanya yang dapat dicerminkan dari  $D_{50}$  ternyata lebih rendah sedikit daripada pasir Yatesville. Tetapi kedua sampel memiliki ukuran butir rata-rata mendekati 0.1 mm.



Gambar 12(a) : Gradasi pasir Yatesville



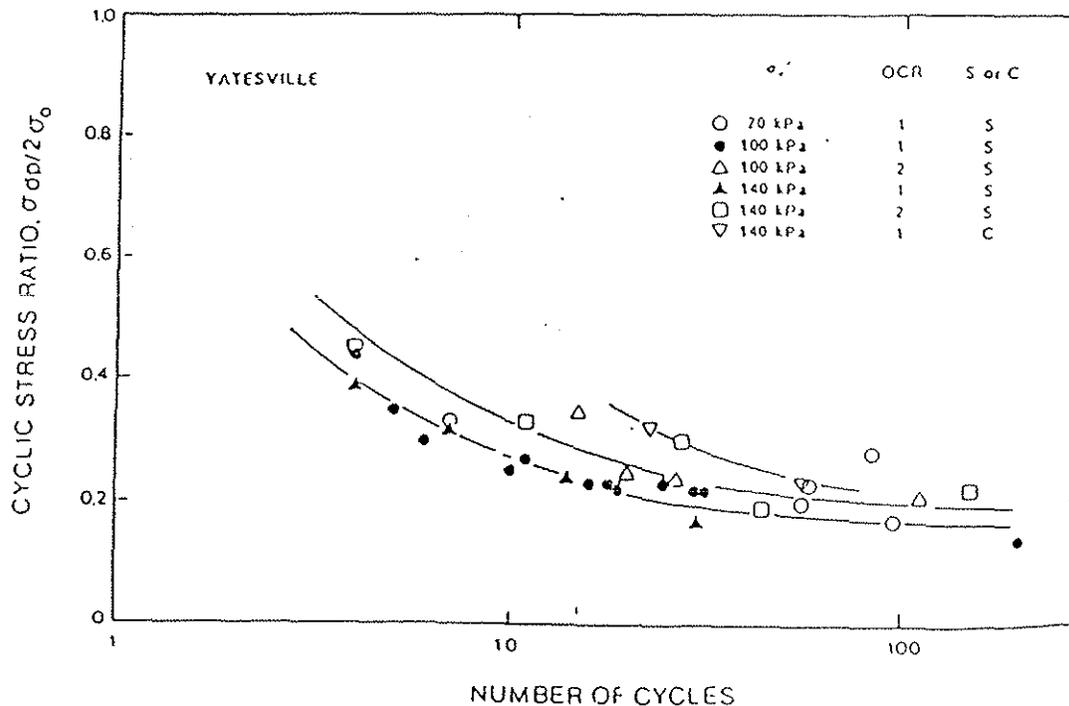
Gb. 12 (b) : Gradasi Pasir Peppers' Ferry

Sampel dari pasir Yatesville disiapkan dengan dua cara yaitu dengan mengkonsolidasikan dengan batch-consolidometer dan dengan memadatkan dengan alat kompaksi mini Harvard, sehingga kedua sampel memiliki angka pori yang relatif sama. Sedangkan pasir Pepper's Ferry disiapkan hanya dengan konsolidasi saja. Tegangan keliling diberikan dengan tiga buah variasi yaitu 70, 100 dan 140 kPa. Pada pasir Yatesville, pengujian dilakukan secara lebih intensif karena merupakan bagian dari penelitian besar yang lain. Jumlah pengujian untuk pasir Yatesville meliputi 37 sampel dan untuk pasir Pepper's Ferry sebanyak 9 sampel saja. Seluruh uji dilakukan dengan beban sinusoidal dengan frekuensi 0.5 Hz. Kriteria keruntuhan ditentukan berdasarkan terjadinya pencapaian tekanan air pori sebesar tegangan keliling atau bila sampel mengalami deformasi atau regangan sebesar 2.5%.

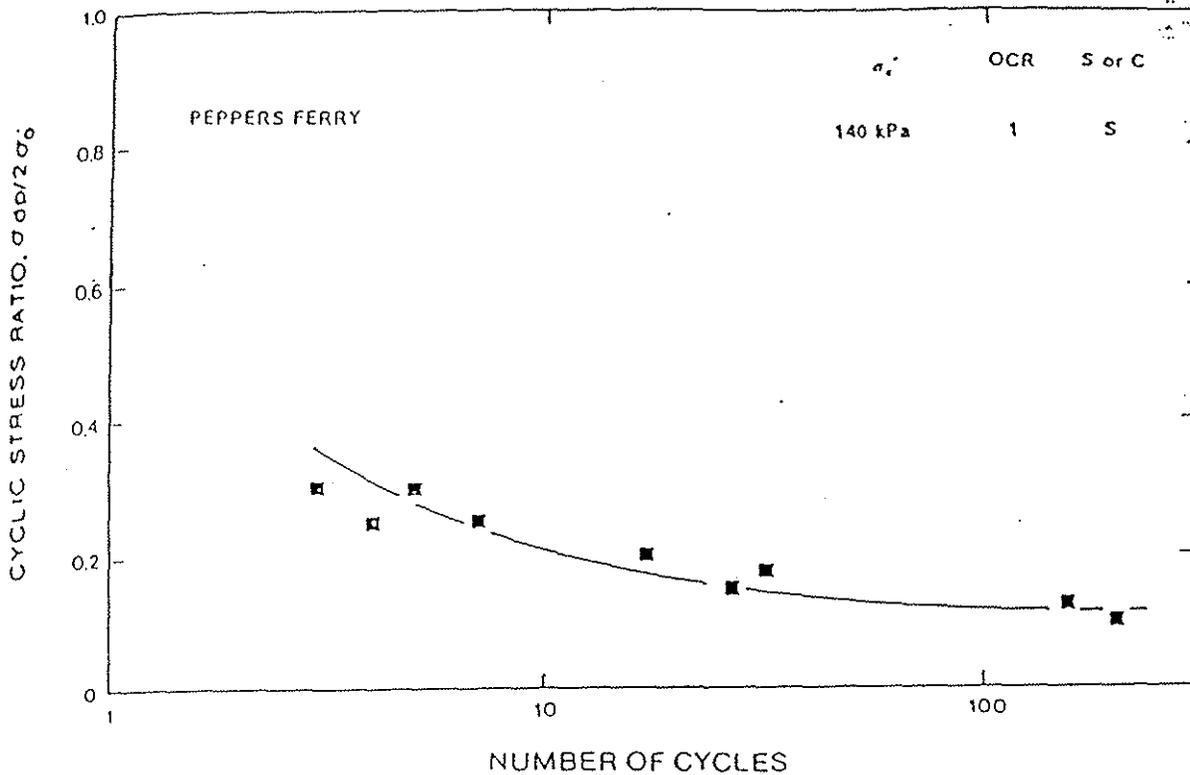
### Hasil Uji dan Diskusi

Hasil uji pada pasir Yatesville dan pasir Peppers' Ferry ditunjukkan oleh gambar 13 dan gambar 14. Dengan menormalisir tegangan deviator siklik, dapat dilihat bahwa pengaruh tegangan sel dapat dikatakan tidak berarti, dengan perkataan lain maka tahanan geser siklik hampir berbanding lurus dengan tegangan sel.

Sampel yang dibuat dengan kompaksi ternyata menunjukkan tahanan siklik yang lebih tinggi, begitu pula halnya dengan nilai OCR; semakin meningkat OCR terdapat kecenderungan bahwa sampel juga lebih kokoh. Pasir Peppers Ferry yang relatif mengandung butir halus lebih kecil memberikan tahanan siklik yang lebih rendah.



Gambar 13. : Hasil uji triaxial siklik pasir Yatesville



Gambar 14 : Hasil uji triaxial siklik pasir Peppers' Ferry

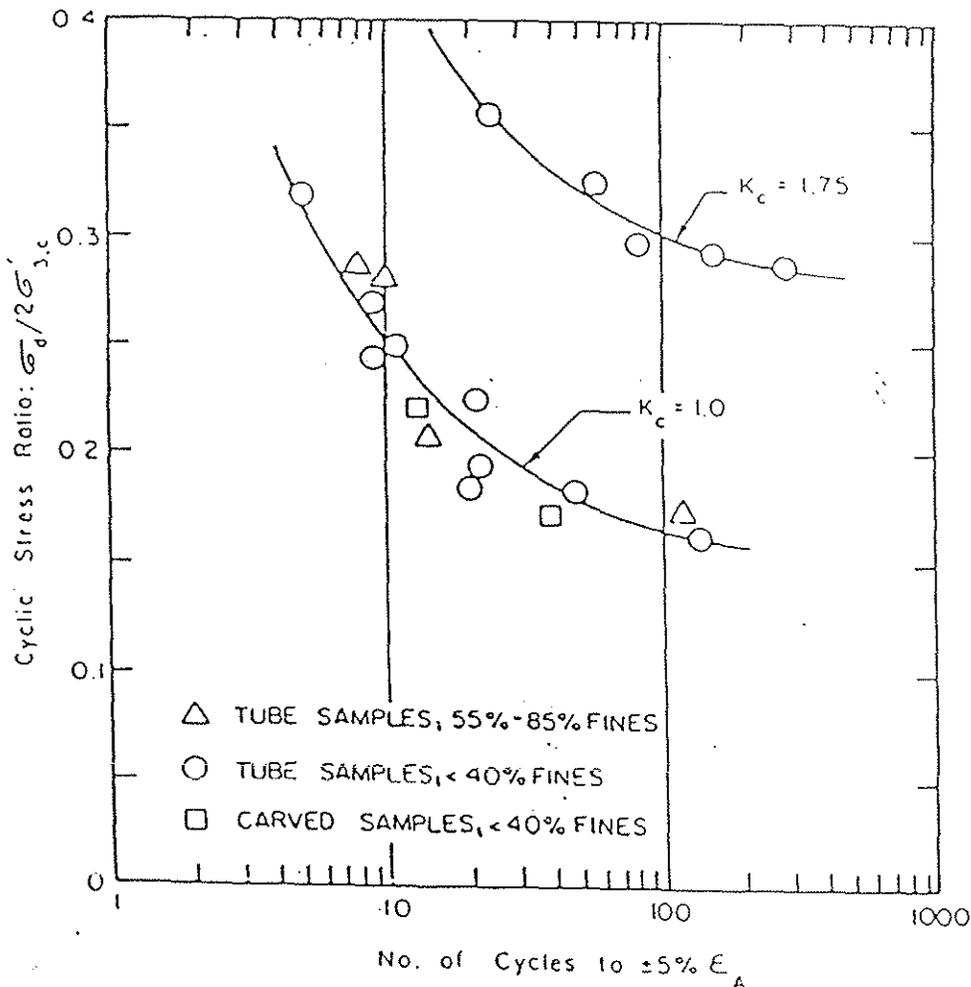
Untuk membandingkan perilaku pasir kelanauan dibawah beban siklik dengan pasir bersih dan pasir lainnya, diambil sampel hasil uji triaxial siklik oleh Hsing dan Seed (1988) dan hasil uji pada pasir bersih oleh Sweeney (1987).

Data dari Hsing dan Seed terdiri dari contoh tanah tak terganggu dari Lower San Fernando Dam dengan kandungan butir halus berkisar antara 5% - 85%. Dari 25 sampel yang diuji, 5 sampel adalah lanau pasiran dengan plastisitas rendah dan sisanya pasir kelanauan. Kebanyakan sampel dikonsolidasikan secara isotropis dan lainnya secara anisotropis dengan nilai  $K_0 = 1.75$ . Hal ini adalah untuk menyesuaikan kondisi dilapangan mengingat sampel telah mempunyai tegangan geser awal akibat adanya embankment dam. Hasil penelitian Hsing dan Seed diberikan oleh gambar 15 dimana tampak bahwa tahanan siklik dari tanah mengikuti kecenderungan yang normal. Sebagaimana diharapkan, tanah yang dikonsolidasikan secara anisotropis memberikan tahanan siklik yang lebih besar. Pada 15 siklus, harga rasio tahanan siklik untuk tanah yang dikonsolidasikan isotropis adalah 0.221 sedangkan untuk sampel yang dikonsolidasikan anisotropis memberikan tahanan siklik 0.38, ini berarti suatu peningkatan sebesar lebih dari 70%.

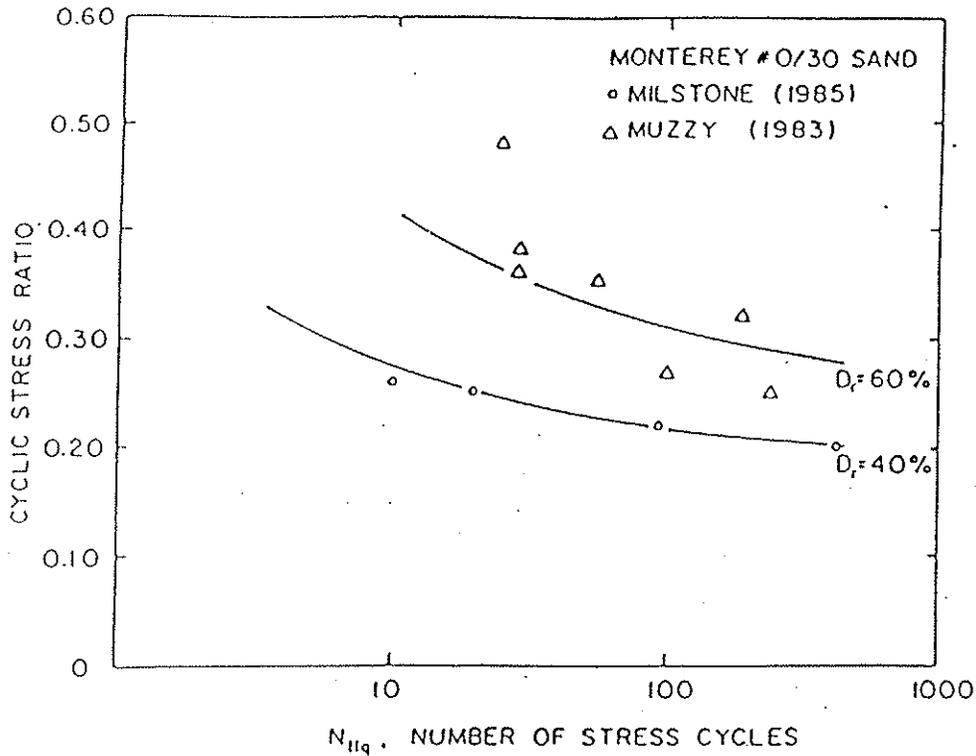
Uji triaxial siklik pada pasir bersih dilakukan oleh Milstone (1985) dan Muzzy(1983) pada pasir Monterey # 0/30. Sampel ini dipersiapkan dengan cara

pluviasi sehingga mencapai kepadatan relatif sebesar 40% dan 60%. Pasir ini dipelajari oleh Sweeney (1987) untuk mengembangkan korelasi tahanan siddik terhadap uji sondir. Hasil uji tsb. ditampilkan oleh gambar 16.

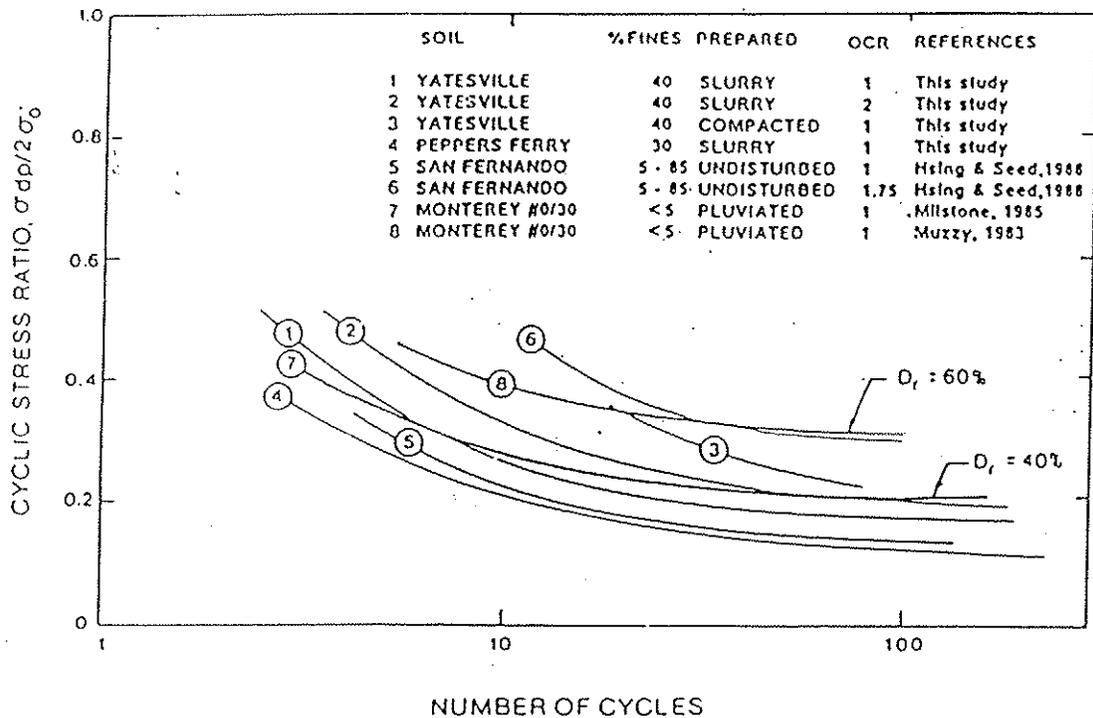
Pengamatan komparatif dari uji triaxial tersebut disatukan pada gambar 17. Untuk mempermudah, semua hasil uji diplotkan dalam skala yang sama dan diberi nomor sebagaimana tercantum dalam legenda. Suatu perbandingan secara langsung tentu saja sukar karena sampel diatas tidak dipersiapkan dengan cara yang sama, sedangkan dari studi ini didapatkan bahwa cara pembuatan sampel dapat berpengaruh besar pada hasilnya.



Gambar 15 : Hasil uji triaxial siklik dari Lower San Fernando Dam  
(sumber : Hsing dan Seed, 1988)



Gambar 16 : Hasil uji triaxial siklik pada pasir bersih  
 (sumber Sweeney, 1987)



Gambar 17: Perbandingan hasil uji triaxial siklik pada pasir bersih dan pasir lanauan

Dari gambar 17 nampak bahwa sampel pasir lanauan menunjukkan kecenderungan serupa dengan pasir bersih. Sesungguhnya sampel dari San Fernando dan bahkan menunjukkan satu kurva untuk berbagai kandungan butir halus. Hal ini memberi indikasi bahwa tahanan siklik lebih tergantung pada bentuk butir dan asal usul geologis.

## Kesimpulan

Studi ini telah menjelaskan perilaku tanah pasir kelanauan dibawah beban siklik, dimana hasil uji pada pasir kelanauan tidak dapat dikatakan selalu mempunyai tahanan siklik yang lebih tinggi sebagaimana biasanya diasumsikan demikian. Untuk kandungan butir halus yang tidak plastis setidaknya dapat dikatakan bahwa pengaruh prosentase butir halus bukan suatu indikasi utama.

Cara pembuatan sampel mempengaruhi hasil uji sehingga hal ini menimbulkan kesulitan untuk mengaitkan dengan kondisi di lapangan, karena sekalipun dicapai suatu kepadatan yang sama, namun karakteristiknya ternyata berbeda.

## Daftar Pustaka

Hsing, L.J., and Seed, R.B., "*A critical Investigation of Factors Affecting Seismic Pore Pressure Generation and Post Liquefaction Flow Behavior of Saturate Soils*", Geotechnical Engineering Research Report No. SU/GT/88-011 Departemen Teknik Sipil, Universitas Stanford, 1988

Rahardjo, P.P., "*Laboratory Study of The Undrained Behavior of Silty Sands* Laporan Riset, Departemen Teknik Sipil, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1989

Rahardjo, P.P. "*Evaluation of Liquefaction Potential of Silty Sands based on Cone Penetration Test*", Disertasi Doktor, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1989

Robertson P.K., Campanella, RG, "*Liquefaction Potential of Sands Using the CPT*", Jurnal ASCE divisi Geoteknik, vol. 111, no. GT3, 1985

Seed, H.B. dan Idriss, "*Simplified Procedure for Evaluating Liquefaction Potential*", Jurnal Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1971

Seed, H.B. dan Idriss, "*Ground Motion and Soil Liquefaction during Earthquakes*", Seri monograp, Earthquake Engineering Research Institute, 1982

Kuliah Umum  
Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil  
Universitas Katolik Parahyangan  
Bandung, 30 Maret 2007

# **GEJALA LIQUIFAKSI DI BANDA ACEH PADA GEMPA 26 DESEMBER 2004**

**OLEH:  
PAULUS P. RAHARDJO  
YUNAN HALIM  
FAISAL R. SALEH  
EKO SUBOWO  
ADRIN TOHARI**

Paulus P. Rahardjo, Yunan Halim, Faisal R. Saleh  
*Universitas Katolik Parahyangan*

Eko Subowo, Adrin Tohari  
*Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI*



**ABSTRAK:** Pusat perhatian para peneliti dan masyarakat pada Gempa di Nangroe Aceh Darussalam umumnya berpusat pada peristiwa tsunami yang dahsyat dan membawa banyak korban serta kerusakan infrastruktur dan lingkungan. Sedikit perhatian ditujukan kepada peristiwa liquefaksi. Dengan magnitudo yang demikian besar, gejala liquefaksi menjadi sangat mungkin terjadi karena baik besaran akselerasi permukaan tanah akibat gempa maupun kondisi tanah memiliki kecenderungan berpotensi terjadinya liquefaksi.

Penelitian ini menggunakan pendekatan beberapa metode empirik untuk analisis potensi liquefaksi dan beberapa fenomena yang tampak secara visual di lapangan. Metode empirik didasarkan pada hasil pembaran dan uji sondir mekanis maupun CPTU di beberapa lokasi. Besaran akselerasi diperkirakan dari besaran gempa dan publikasi dari USGS. Hasil analisis memberikan informasi bahwa beberapa daerah mengalami liquefaksi pada saat gempa dan bahkan memperburuk erosi akibat gelombang balik tsunami kearah laut. Di darat didapati adanya bangunan yang miring akibat kehilangan daya dukung tanah.

## 1 PENDAHULUAN

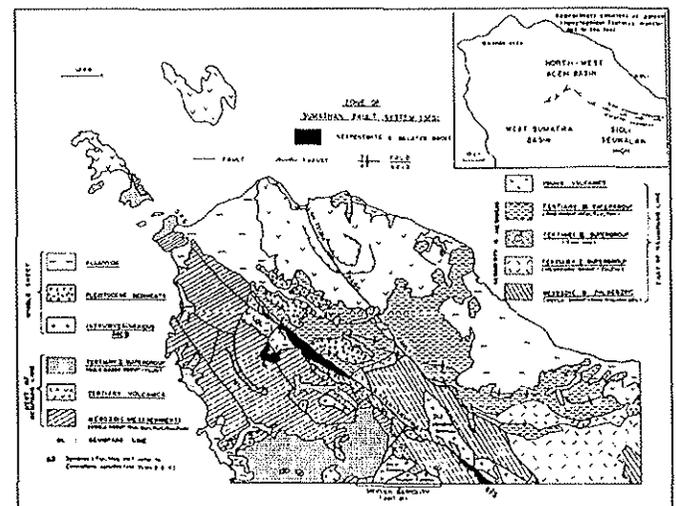
Gempa Sumatra-Andaman ( $M_w = 9.0$ ) yang terjadi pada tanggal 26 Desember 2004 berjarak 259 km dari kota Banda Aceh. Episenter gempa tersebut berada di  $3.3^\circ$  LU dan  $95.98^\circ$  BT pada kedalaman 30 km dibawah dasar laut yang merupakan daerah pertemuan lempeng Indo-Australia dengan Lempeng Eurasia. Gempa yang disertai tsunami ini telah membawa banyak korban serta kerusakan infrastruktur dan lingkungan. Sedemikian dahsyatnya dampak tsunami tersebut membuat sedikit perhatian yang ditunjukkan pada efek lain yang dapat ditimbulkan oleh gempa.

Salah satu penyebab kehancuran struktur dan bangunan sipil lainnya akibat gempa disamping dapat menimbulkan tsunami adalah liquefaksi. Secara visual peristiwa ini tampak sebagai sand boil atau munculnya lumpur pasir di permukaan tanah. Fenomena lain akibat likuifaksi adalah terjadinya pergerakan tanah dalam arah horizontal, rembesan air melalui rekahan tanah, tenggelamnya struktur atau bangunan di atas permukaan, penurunan muka tanah, tanah yang bergolak, retaknya jalan, runtuhnya tanggul dan lereng. Pada bangunan yang tenggelam, strukturnya biasanya amblas, miring atau bergerak ke samping, yang dapat juga mengakibatkan keruntuhan bangunan tersebut.

## 2 KONDISI GEOLOGI DAN PELAPISAN TANAH BANDA ACEH

### 2.1 Kondisi Geologi

Berdasarkan peta geologi (Pusitbang Geologi-Bandung), kota Banda Aceh berada pada lapisan Alluvium yang berumur Holocene. Pada umumnya lapisan ini mengandung material gravel, pasir, lanau, lumpur dan bercampur dengan serpihan kulit kerang.



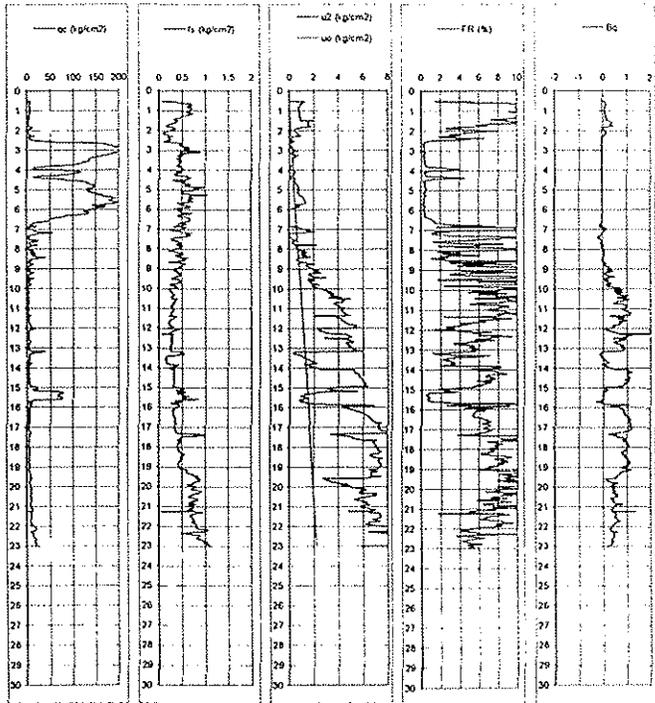
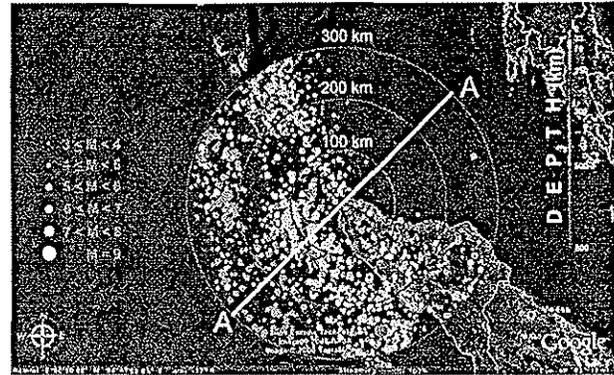
Gambar 1. Peta Geologi Banda Aceh (Puslitbag Geologi, 1983)

## 2.2 Pelapisan Tanah

Pada umumnya pelapisan tanah di dekat pantai diawali lapisan endapan lempung atau lumpur setebal 0.5 – 2.5 m. Lapisan ini diduga merupakan material yang dibawa oleh gelombang tsunami. Dibawah lapisan tersebut ditemukan lapisan pasir dengan konsistensi medium hingga padat setebal 2.0 – 6.0 m yang kemudian disusul lapisan lempung lunak hingga medium dengan sisipan lensa pasir. Hasil uji tipikal yang menunjukkan pelapisan tanah tersebut dapat dilihat seperti pada Gambar 2.

Client	Pusat Penelitian Geoteknologi UPI	PROBE No.	4548	Date	Coordinate		
Company	Pusat Penelitian Geoteknologi UPI	Type	Clamping	26 Jul 06	C	0	0
Project	PENELITIAN LIQUIFAKSI ACEH	Q	0.509	10 cm <sup>2</sup>	Depth	23.02 m	
Project No.	UGD / CPTU 02	S	0.012	150 cm <sup>2</sup>	Penetration	0.5 m	
Comments				Water Table	0.5 m		

Barat dengan panjang surface rupture 79.5 km, slip-rate 10 mm/tahun dan segmen Aceh yang berada di sebelah Timur dengan surface rupture 210.2 km dan slip-rate 10 mm/tahun (Katili).

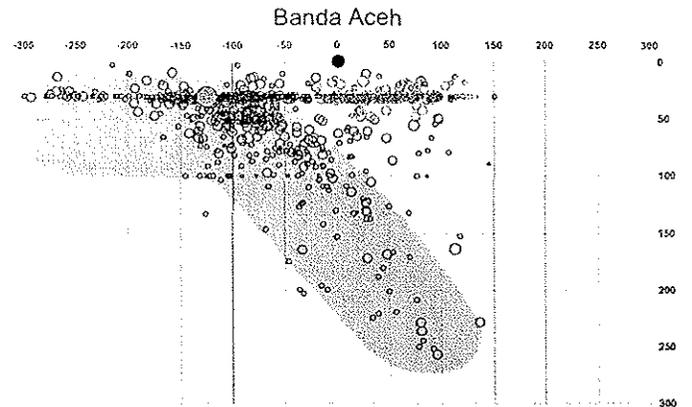


Gambar 2. Hasil tipikal pengujian CPTU di Banda Aceh

Dari data tersebut tampak bahwa lumpur setebal 2 m dijumpai di permukaan tanah, lalu didapati lapisan pasir medium setebal 5.0 m. Lapisan di bawahnya berupa tanah lunak.

## 3 SEISMISITAS BANDA ACEH

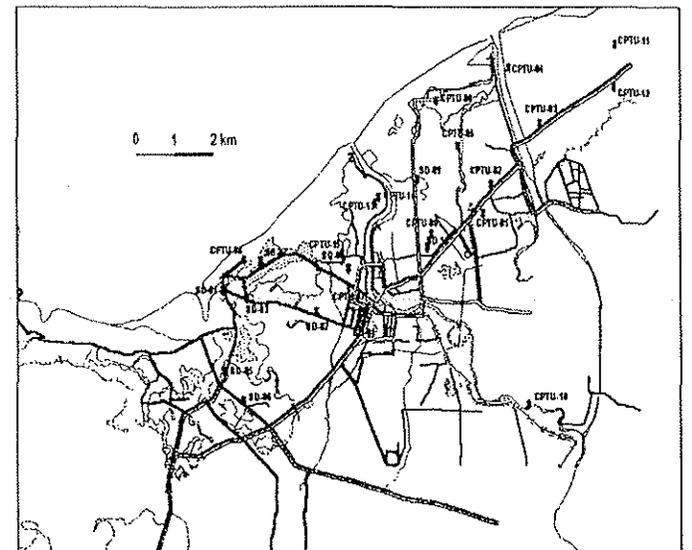
Sumber kegempaan di wilayah Banda Aceh dapat dikelompokkan dalam 2 zona yaitu zona subduksi dan zona sesar sumatra (Gambar 3). Zona subduksi merupakan daerah pertemuan lempeng Indo-Australia yang bergerak ke arah Timur Laut relatif terhadap Lempeng Eurasia dengan kecepatan 60 – 70 mm/tahun. Zona sesar sumatra merupakan sesar-sesar aktif yang terdiri dari 14 sesar yang signifikan dengan panjang 1600 km. Kota Banda Aceh sendiri cenderung dipengaruhi 2 segmen sesar aktif yaitu segmen Le Teuba dan segmen Aceh. Segmen Le Teuba yang berada di sebelah



Gambar 3. Peta dan profil sejarah kegempaan di sekitar Aceh (data USGS)

## 4 PENYELIDIKAN GEOTEKNIK

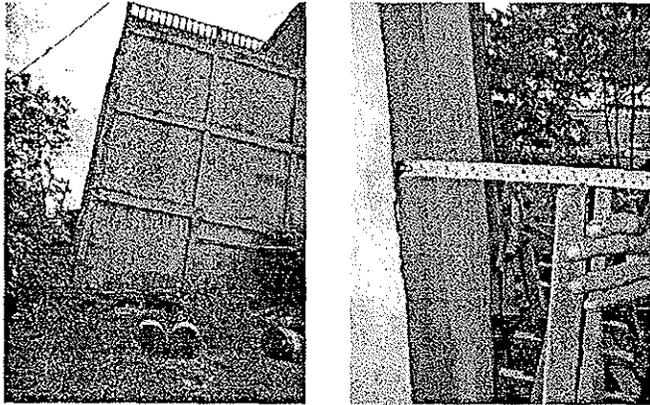
Untuk mengetahui gejala liquifaksi di Aceh akibat gempa tanggal 26 Desember 2006 dilakukan 15 titik pengujian CPTU, 10 titik pengujian CPT dan 4 titik pemboran berikut SPT



Gambar 4. Lokasi titik penyelidikan geoteknik.

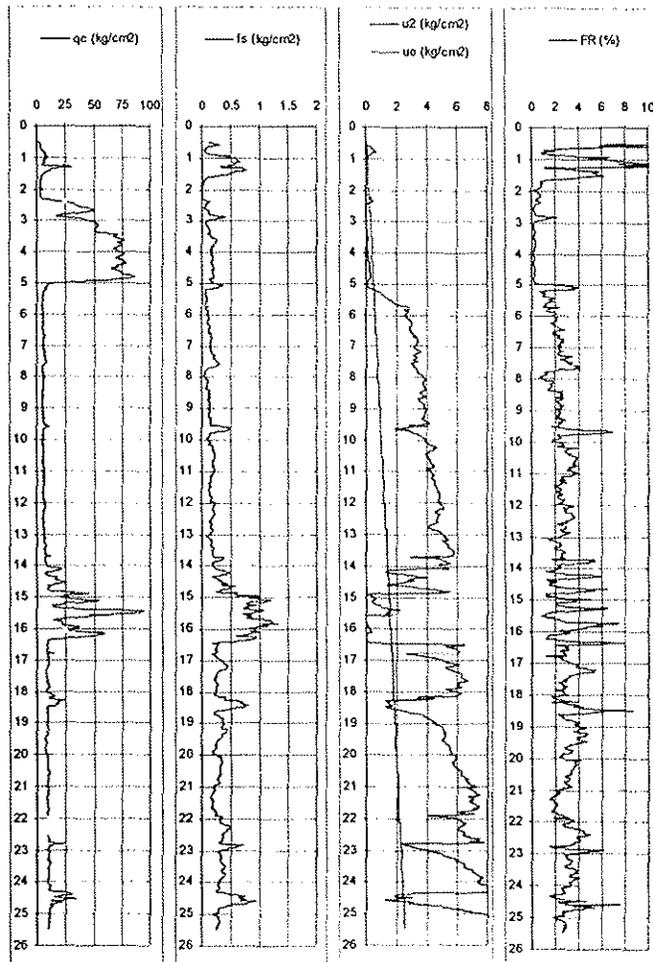
## 5 DAMPAK LIQUIFAKSI DI ACEH

Dampak liquifaksi di Aceh cenderung sudah tidak kelihatan sehubungan dengan dasyatnya gelombang tsunami yang terjadi. Meskipun demikian pada beberapa lokasi masih ditemukan efek likuifaksi misalnya yang menyebabkan miringnya bangunan seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Bangunan miring akibat liquifaksi.

Pada daerah ini dilakukan pengujian CPTU yang menunjukkan bahwa pada kedalaman 2.0 – 5.0 m merupakan lapisan pasir dengan konsistensi padat (Gambar 6).



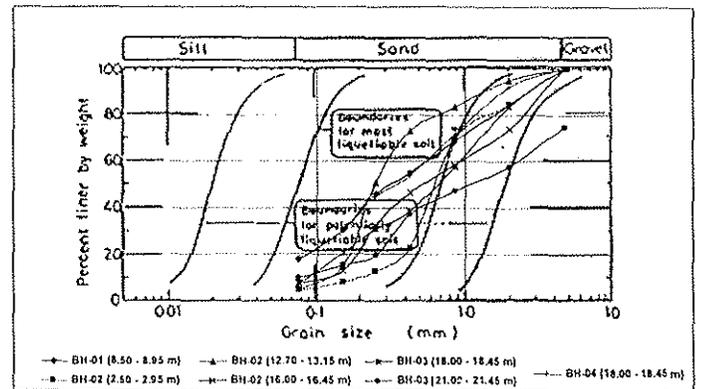
Gambar 6. Pengujian CPTU di lokasi bangunan miring.

Melihat profil CPTU diatas dapat dipasukan bahwa fenomena liquifaksi yang terjadi menyebabkan differential settlement pada pondasi bangunan tersebut.

## 6 IDENTIFIKASI POTENSI LIQUIFAKSI

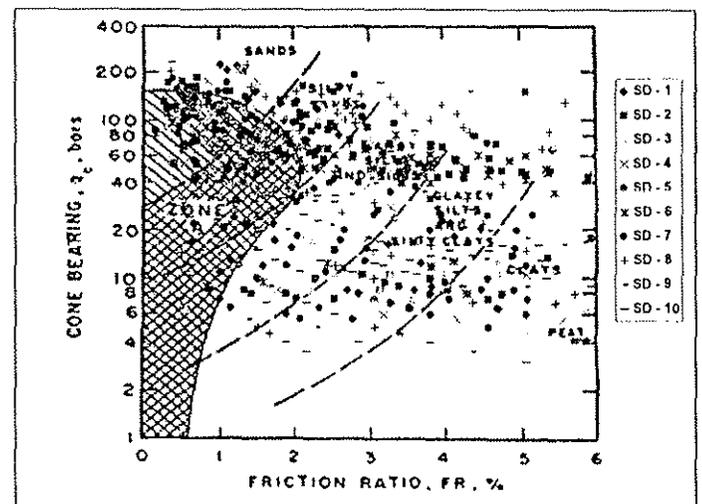
Ada beberapa cara yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi jenis tanah yang memiliki potensi liquifaksi antara lain berdasarkan distribusi butiran tanah (Tsuchida, 1970) atau dengan menggunakan korelasi tahanan ujung dengan friction ration (Robertson et. Al, 1985).

Berdasarkan distribusi butiran seperti ditunjukkan pada Gambar 7, diketahui bahwa material tanah di Banda Aceh cenderung mengandung material pasir. Hal ini mengindikasikan tanah di Banda Aceh tergolong mudah mengalami liquifaksi. Namun faktor konsistensi atau kepadatan tanah juga sangat menentukan sehingga informasi gradasi saja belum memadai.



Gambar 7. Distribusi ukuran butiran daerah Banda Aceh

Salah satu cara untuk mengetahui konsistensi tanah adalah dengan menggunakan data CPT atau CPTU. Robertson et al (1985) telah menyusun suatu chart untuk mengidentifikasi potensi liquifaksi seperti yang diperlihatkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Identifikasi potensi liquifaksi berdasarkan data CPT

Tanah yang paling berpotensi likuifaksi adalah tanah yang berada didaerah yang diarsir (Zona A). Terlihat pada Gambar 8 ada beberapa bagian dari seluruh titik pengujian CPT mekanis yang berpotensi likuifaksi.

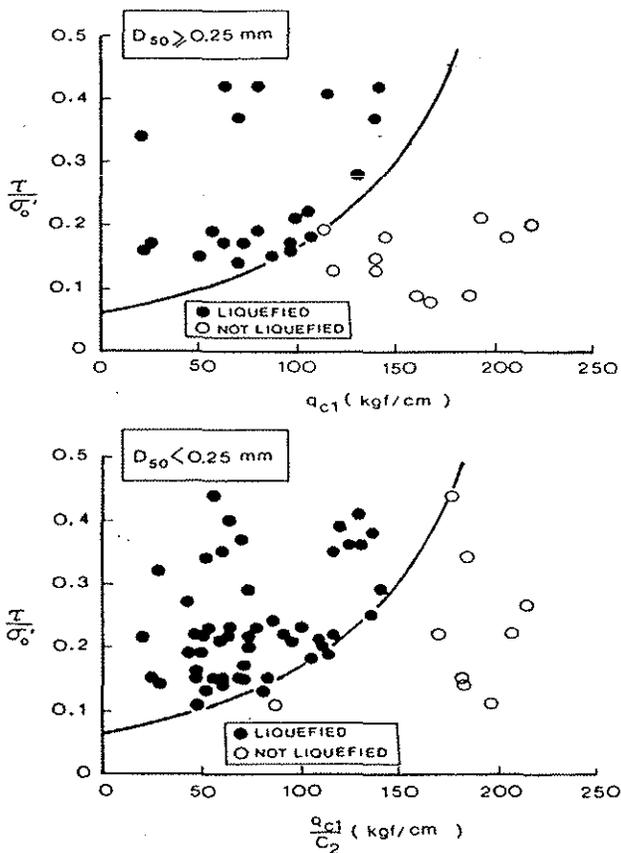
## 7 PENENTUAN PERCEPATAN GEMPA

Gempa Sumatra-Andaman dengan magnitudo gempa,  $M_w = 9.0$  berjarak hiposentrum 261 km dari kota Banda Aceh. Apabila digunakan persamaan atenuasi dari Donovan (1992) maka akan diperoleh percepatan gempa di batuan dasar sebesar 45 gal.

Berdasarkan SNI-1726-2002, diketahui kota Banda Aceh berada pada wilayah gempa 4. Pada kondisi tanah lunak pada wilayah gempa 4 diketahui faktor amplifikasi pada kondisi tanah lunak sama dengan 1.7.

Hasil pengujian geoteknik yang telah dilakukan di Banda Aceh menunjukkan pada kedalaman 30 m dari permukaan tanah dapat dikategorikan sebagai tanah lunak. Maka dengan percepatan di batuan dasar 45 gal dan faktor amplifikasi 1.7 diperoleh percepatan di muka tanah sebesar 76.5 gal. Nilai ini yang digunakan dalam analisis likuifaksi dan evaluasi penurunan.

## 8 ANALISIS POTENSI LIQUIFAKSI



Gambar 9. Potensi Likuifaksi Berdasarkan CPT (Shibata dan Teparaksa, 1987, 1988)

Analisis potensi likuifaksi dilakukan dengan metode Shibata dan Teparaksa (1987,1988) berdasarkan data CPT yang tersedia di lapangan. Data tersebut dikumpulkan dari beberapa kejadian gempa dimana tersedia data hasil uji sondir yang cukup representatif. Gambar 9 menunjukkan korelasi antara perlawanan ujung sondir yang sudah dinormalisir  $q_{c1}$  dan rasio tegangan siklik  $\tau/\sigma'_0$  yang terjadi di lapangan.

Metode ini berlaku baik untuk pasir bersih maupun untuk pasir kelanauan. Kurva ini memberi pengertian bahwa untuk harga perlawanan sondir yang sama, ketahanan terhadap likuifaksi adalah jauh lebih besar pada pasir kelanauan karena adanya kandungan butir halus.

Prosedur analisis adalah sebagai berikut :

1. Menentukan besaran akselerasi dan magnitudo gempa di lokasi studi.
2. Hitung tegangan vertikal total ( $\sigma_0$ ) dan efektif ( $\sigma'_0$ ).
3. Hitung faktor koreksi kedalaman ( $r_d$ ) dengan menggunakan persamaan :

$$r_d = 1 - 0.0015 z \quad (1)$$

Dimana  $z$  = kedalaman (m)

4. Menentukan rasio tegangan siklik yang terjadi di lapangan dengan menggunakan formula dari Tokimatsu dan Yoshimi yaitu :

$$\frac{\tau_{ave}}{\sigma'_0} = 0.1(M - 1) \frac{a_{maks}}{g} \frac{\sigma_0}{\sigma'_0} r_d \quad (2)$$

dimana :

$M$  adalah besaran gempa

$a_{maks}$  adalah percepatan gempa maksimum di permukaan tanah (g)

5. Menentukan tahanan siklik
  - (a). Hitung Faktor koreksi  $C_1$

$$C_1 = \frac{1.7}{0.7 + \sigma'_0} \quad (3)$$

- (b). Hitung koreksi sondir ( $q_{c1}$ )

$$q_{c1} = C_1 \times q_c \quad (4)$$

dimana  $q_c$  adalah harga perlawanan ujung sondir.

- (c). Hitung Faktor Koreksi  $C_2$

Untuk  $D_{50} > 0.25$ ,  $C_2 = 1$

Untuk  $D_{50} < 0.25$ ,  $C_2 = D_{50}/0.25$

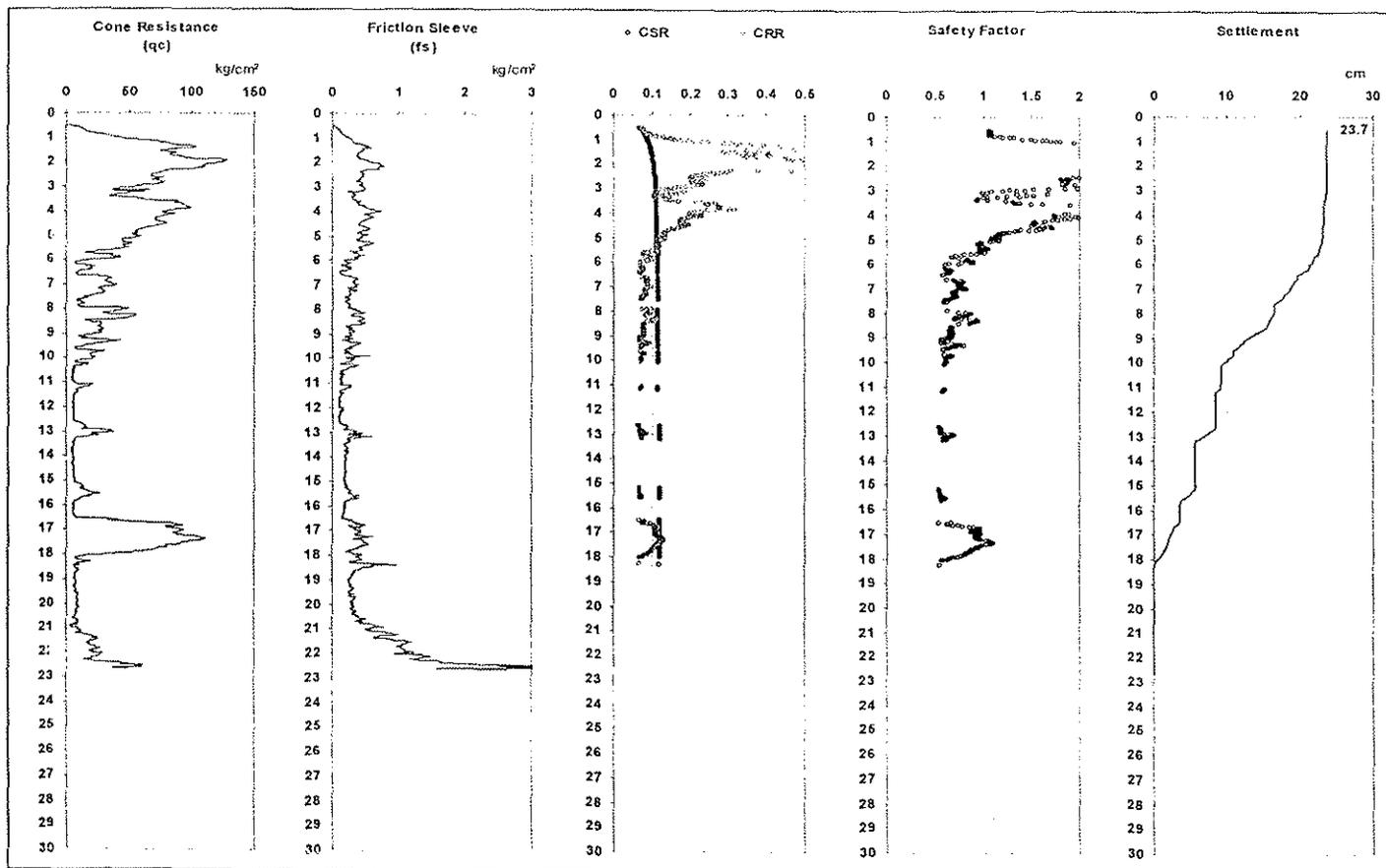
- (d). Hitung tahanan siklik akibat gempa dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\left(\frac{\tau}{\sigma_o'}\right)_l = 0.1 + 0.2 \left\{ \frac{(q_{cl}/C_2) - 50}{250 - (q_{cl}/C_2)} \right\} \quad (5)$$

6. Hitung Faktor Keamanan (FK).

$$FK = \frac{\left(\frac{\tau}{\sigma_o'}\right)_l}{\left(\frac{\tau_{ave}}{\sigma_o'}\right)} \quad (6)$$

Dari hasil evaluasi potensi liquifaksi pada 15 titik CPTU dan 10 titik CPT didapati pada umumnya seluruh titik pengujian menunjukkan adanya gejala liquifaksi. Lapisan pasir yang berada dipermukaan tanah praktis tidak mengalami liquifaksi. Hal ini dikarenakan konsistensi tanah yang relatif padat yang ditandai dengan nilai tahanan ujung,  $q_c > 100 \text{ kg/cm}^2$ . Hasil tipikal analisis liquifaksi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Hasil tipikal evaluasi potensi liquifaksi di Aceh

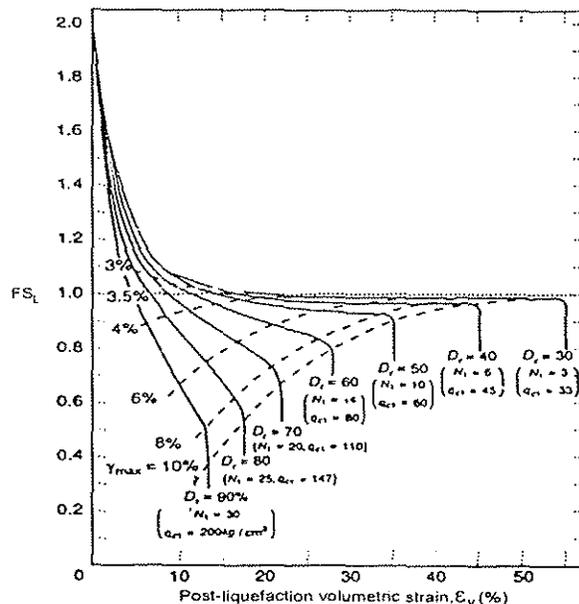
9 PREDIKSI PENURUNAN

Menurut laporan setempat terjadi penurunan tanah di beberapa lokasi namun tidak dilakukan pengukuran.

Estimasi penurunan dilakukan berdasarkan Metode Ishihara menggunakan kurva hubungan antara faktor keamanan (FK),  $N_{SPT}$ ,  $q_c$ ,  $D_r$  dan post-liquefaction volumetric strain  $\epsilon_v$  (%).

Perkiraan penurunan permukaan tanah pada saat gempa dengan menggunakan Metode Ishihara didasarkan kepada prosedur sebagai berikut :

- FK berdasarkan hasil perhitungan potensi likuifaksi dari metode Seed data SPT.
- Tentukan nilai  $N_{I(60)}$
- Tentukan  $\epsilon_v$  dengan menggunakan Gambar 11.



Gambar 11. Kurva Untuk Menentukan Post-liquefaction Volumetric Strain,  $\epsilon_v$  Sebagai Fungsi Dari Faktor Keamanan (Ishihara, 1996).

• Hitung penurunan dengan menggunakan formula :

$$S = \sum \varepsilon_v \times \Delta h \quad (7)$$

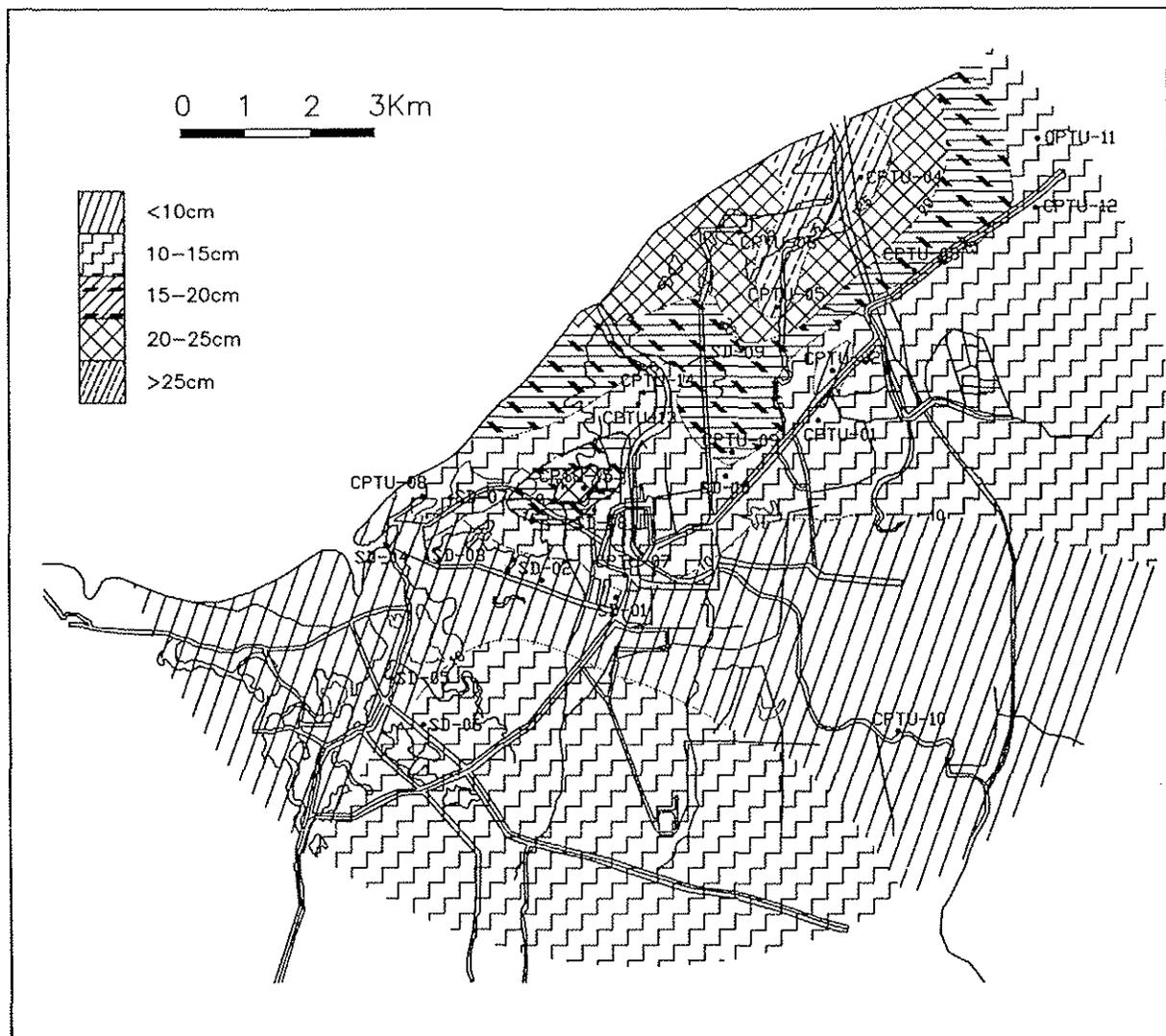
dimana S = penurunan maksimum permukaan tanah

$\Delta h$  = tebal sub lapis

$\varepsilon_v$  = post-liquefaction volumetric strain (%)

Setelah mengevaluasi potensi liquifaksi yang terjadi maka dengan metode Ishihara dapat diprediksi potensi penurunannya. Data faktor keamanan untuk perhitungan penurunan diambil dari hasil perhitungan evaluasi potensi liquifaksi berdasarkan metode Shibata Teparaksa.

Hasil perhitungan menunjukkan penurunan yang terjadi bervariasi dari 2.0 – 28.0 cm yang tersebar di kota Banda Aceh seperti Gambar 12.



Gambar 12. Evaluasi penurunan akibat liquifaksi di Aceh

## 10 KESIMPULAN DAN SARAN

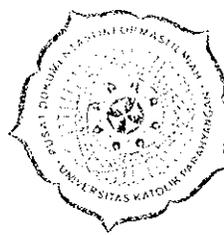
### 10.1 Kesimpulan

- Gejala liquifaksi terjadi di kota Banda Aceh walaupun efek-efek dari liquifaksi tersebut sudah banyak tidak terlihat akibat tersapu gelombang tsunami.
- Dampak liquifaksi yang terjadi pada umumnya berada daerah endapan aluvium yang terletak hampir di seluruh kota Banda Aceh
- Akibat gempa 26 Desember 2004 diperkirakan terjadi penurunan akibat liquifaksi yang

besarnya bervariasi dari 2.0 – 28.0 cm. Penurunan yang terbesar terjadi di daerah timur kota Banda Aceh

### 10.2 Saran

- Disadari penyelidikan geoteknik untuk mendukung penelitian gejala liquifaksi yang terjadi di Banda Aceh masih terbatas. Mungkin perlu dilakukan kerjasama dengan peneliti yang lain sehingga dapat digunakan untuk membantu pemerintah daerah Banda Aceh dalam merencanakan tata ruang kota.



- Ishihara, Kenji, Soil Behaviour in Earhquake Geotechnics, Oxford Science Publications, Oxford, 1996.
- Kramer Steven L., Geotechnical Earhquake Engineering, Prentice Hall , New Jersey, 1996.
- Rahardjo, P. P. dan Meilinda, Lyna, Prediction of Liquefaction Induced Settlement Based on Cone Penetration Test Data, Prosiding, Internastional Conference om Im Situ Measurement of Soil Properties an Case Histories, pp.461-466, Graduate Program Parahyangan Catholic University, Bandung, 2001.
- Robertson, P.K., dan Campanella, R.G., Liquefaction Potensial of Sands Using the CPT, Jurnal ASCE Divisi Geoteknik, vol. 111, no. GT3, 1985.
- Robertson, P.K., dan Wride, C.E., Evaluation of Cyclic Liquefaction Potensial Based on the CPT, Seismic Behaviour of Ground and Geotechnical Structures, Balkema, Rotterdam, 1997
- Seed, H. Bolton dan Idriss I.M., Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potensial, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 97, No. SM9, pp.1249-1274, September, 1971.
- Sianto, Paulus, Prediksi Tekanan Air Pori Ekses dan Penuurunan Akibat Likuifaksi Pada Tanah Pasir saat Gmpa, Tesis, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung, 2002.
- Tsuchida, H., Prediction and Countermeasure Against the Liquefaction in Sand Deposits, Abstract of the Seminar in the Port and Harbor Research Institute, Japanese, pp. 3.1-3.33, 1970.

Kuliah Umum  
Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil  
Universitas Katolik Parahyangan  
Bandung, 30 Maret 2007

**RESPON SEISMIK  
PONDASI DANGKAL PADA TANAH  
YANG BERPOTENSI LIQUIFAKSI**

**OLEH:  
PAULUS P. RAHARDJO**

## Respon Seismik Pondasi Dangkal Pada Tanah Yang Berpotensi Liquefaksi

Paulus P. Rahardjo<sup>1</sup>

### Abstrak

Analisis potensi liquefaksi berdasarkan data hasil uji lapangan (khususnya SPT dan CPT) umumnya digunakan untuk mengevaluasi respon seismik dari tanah pasir jenuh. Hasil analisis tersebut memberikan informasi mengenai kedalaman lapisan yang diperkirakan akan mengalami liquefaksi pada saat gempa. Namun demikian aplikasi lebih lanjut dari hasil analisis untuk menentukan respon pondasi dangkal belum banyak ditelaah untuk kepentingan evaluasi keamanan pondasi. Makalah ini membahas pengaruh liquefaksi terhadap perilaku pondasi yang dapat merupakan masukan penting bagi penyusunan peraturan perancangan pondasi bangunan sipil. Disamping data empirik dari Gempa Niigata (1964) dan Gempa Luzon (1990), makalah ini mengemukakan cara rasional untuk memperkirakan penurunan pondasi pada tanah yang mengalami liquefaksi dengan menggunakan state parameter.

Kata kata kunci : Respon seismik, liquefaksi, state parameter, penurunan tanah

### 1. Pendahuluan

Salah satu kerusakan berat yang ditimbulkan oleh gempa terhadap pondasi bangunan adalah penurunan permukaan tanah dan pergerakan lateral dari lapisan tanah yang mengalami liquefaksi. Pada pondasi dangkal, kegagalan bangunan dapat disebabkan oleh penurunan pondasi sebagai akibat daripada penurunan permukaan tanah pada saat lapisan pasir mengalir ke permukaan bersama dengan peningkatan air pori. Pada pondasi dalam, kegagalan tiang dapat disebabkan karena penurunan kekuatan geser tanah yang drastis pada saat peristiwa liquefaksi disamping pergerakan lateral dari material yang mengalami liquefaksi.

Paper ini mencoba mengusulkan cara evaluasi penurunan tanah yang berpotensi mengalami liquefaksi dengan pendekatan dari konsep state parameter.

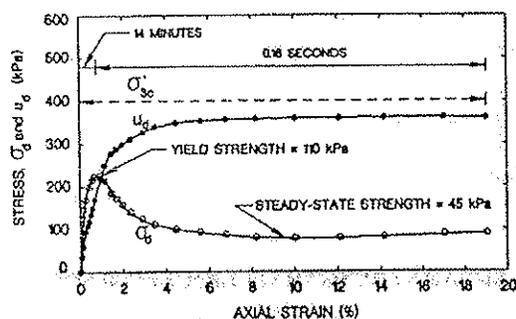
### 2. Kuat Geser dari Tanah yang Mengalami Liquefaksi

Pada tahap awal saat konsep liquefaksi diperkenalkan oleh Seed (1967), diasumsikan bahwa peristiwa liquefaksi terjadi akibat peningkatan tekanan air pori sehingga tanah kehilangan kekuatannya. Hal ini kemudian dibantah oleh Poulos (1981) dan Castro (1969) yang memperkenalkan adanya kekuatan geser residual. Konsep yang mula-mula dipahami sebagai aliran Barat (University of California, Berkeley) itu kemudian direvisi kembali oleh Seed yang membenarkan bahwa pada saat liquefaksi kuat geser tanah masih dapat diperhitungkan (1987).

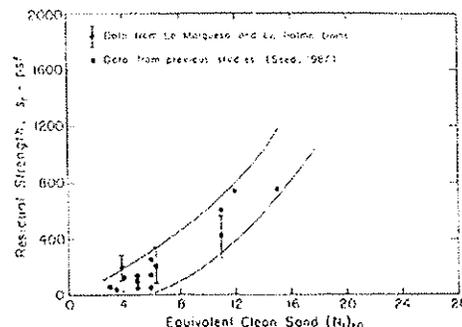
Istilah istilah yang digunakan dalam pengertian kuat geser tanah yang mengalami liquefaksi dikenal diantaranya steady state shear strength (Castro, 1969;

Poulos, 1981, 1985), residual shear strength (Seed, 1987) atau critical strength (Stark & Mesri, 1992).

Studi mengenai kuat geser residual ini terbagi atas 3 kelompok besar, yaitu yang mendasarkan kepada konsep teoritis, studi laboratorium, dan studi kasus di lapangan. Untuk kasus di lapangan diantaranya dapat digunakan korelasi antara kuat geser residual dengan NSPT oleh Seed (1987), sedangkan untuk studi laboratorium, Rahardjo (1989) memberikan korelasi kuat geser residual dengan state parameter.



Gbr. 1. Hubungan tegangan - regangan pada pasir lepas yang menunjukkan adanya kuat geser residual (Sumber : Castro, 1969)



Gbr. 2. Perkiraan kuat geser residual dari NSPT (Sumber : Seed, 1987)

<sup>1</sup> Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil Universitas Katolik Parahyangan

### 3. Daya Dukung Pondasi Dangkal

Pada dasarnya daya dukung tanah untuk pondasi dangkal sangat ditentukan oleh kekuatan geser tanah. Kurva yang diberikan oleh Seed (Gbr. 2) dapat digunakan untuk memperkirakan daya dukung pondasi di atas tanah yang mengalami likuifaksi. Namun demikian, bilamana lapisan tanah yang mengalami likuifaksi pada saat gempa berada pada suatu kedalaman yang cukup jauh dari dasar pondasi, daya dukung tanah mungkin tidak menurun secara drastis walaupun secara keseluruhan akan terjadi penurunan yang signifikan terhadap perilaku pondasi. Fenomena ini tidak dapat dikesampingkan begitu saja, karena berdasarkan pengalaman faktual di lapangan, akan terjadi perbedaan penurunan yang dapat mengakibatkan kerusakan struktur yang cukup parah.

Bilamana lapisan tanah yang mengalami likuifaksi berada jauh dari dasar pondasi (lebih besar dari 6 kali lebar pondasi) maka dapat diasumsikan bahwa daya dukung tanah tidak perlu ditinjau tetapi penurunan pondasi harus diperhitungkan. Sebaliknya bilamana lapisan yang mengalami likuifaksi berada di dekat dasar pondasi, reduksi terhadap daya dukung maupun penurunan perlu dipertimbangkan.

### 4. Penurunan Pondasi Pada Tanah Yang Mengalami Likuifaksi

Kerusakan kerusakan pada pondasi dangkal telah didokumentasikan secara baik pada beberapa gempa diantaranya Gempa Niigata (1964), Gempa Luzon di Filipina yang merusak total Kota Dagupan (1990), dan Gempa Kobe (1995). Pada gempa di atas, tercatat percepatan maksimum di permukaan mencapai nilai sekitar 0.2 g (Kishida, 1966; Ohsaki, 1966; Seed & Idriss, 1967; Tokimatsu et. al, 1991; Adachi et. al, 1992; dan Ishihara et. al, 1993, 1995).

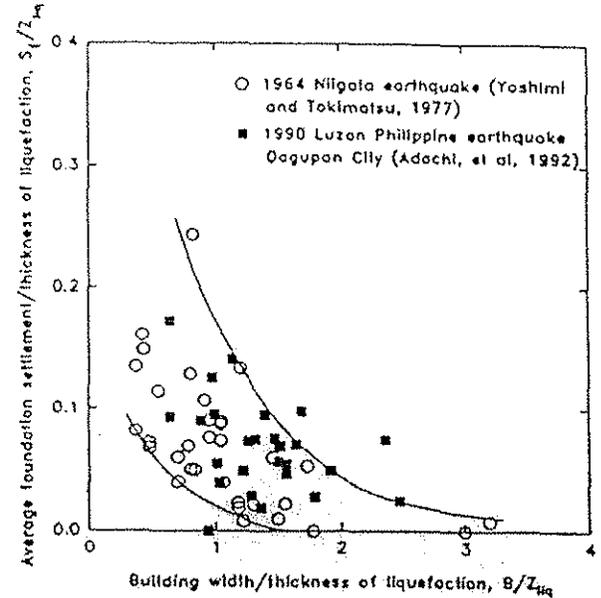
Adachi et. al (1992) melakukan penyelidikan di kota Dagupan, Filipina pada daerah yang mengalami gempa pada tahun 1990 dan mencatat besarnya penurunan permukaan tanah sebesar 0.25 m hingga 2.50 m pada 30 buah bangunan yang mengalami kerusakan. Kebanyakan bangunan tersebut berdiri di atas pondasi dangkal di atas tanah pasir halus yang mempunyai gradasi seragam. Nilai SPT di daerah tersebut berkisar antara  $N_{SPT} = 0 - 20$  dan ketebalan dari lapisan pasir yang mengalami likuifaksi berkisar antara 6 - 10 m

Penelitian Tokimatsu et. al (1991) menyimpulkan bahwa kebanyakan bangunan di kota Dagupan terdiri dari 2 - 4 lantai di atas pondasi dangkal dan penurunan terutama terjadi pada titik titik sudut bangunan. Hasil observasi ini menunjukkan pentingnya efek tegangan keliling yang diberikan oleh lantai dasar bangunan kepada tanah. Kerusakan struktur yang paling besar terutama terjadi pada bangunan yang mempunyai pondasi telapak yang mendukung kolom secara individual tanpa pengakuan dengan sloof.

Bangunan bangunan baru dengan pondasi menerus maupun pondasi rakit pada umumnya mengalami

perbedaan penurunan dan hingga secara relatif lebih kecil. Kesimpulan serupa juga telah diperoleh dari studi yang dilakukan pada bangunan struktur beton pada Gempa Niigata, 1964 (Oshaki, 1966; Yoshimi & Tokimatsu, 1977).

Pengaruh dari lebar lantai bangunan terhadap penurunan pondasi rata rata di atas tanah yang mengalami likuifaksi ditampilkan oleh Liu & Dobry (1997) sebagaimana dapat dilihat pada Gbr. 3. yang mencakup data data dari Gempa Niigata & Gempa Luzon.



Gbr. 3. Pengaruh tebal lapisan yang mengalami likuifaksi terhadap penurunan pondasi (Sumber : Liu & Dobry, 1997)

Data di atas memberikan suatu kecenderungan yang jelas dari besarnya penurunan yang dinormalisasi,  $S_d/Z_{liq}$  terhadap rasio dari lebar bangunan terhadap tebal lapisan yang mengalami likuifaksi,  $B/Z_{liq}$ . Kenyataan ini telah diketahui oleh Yoshimi & Tokimatsu (1977) pada Gempa Niigata dan telah divalidasi pada Gempa Luzon oleh Adachi et. al (1992).

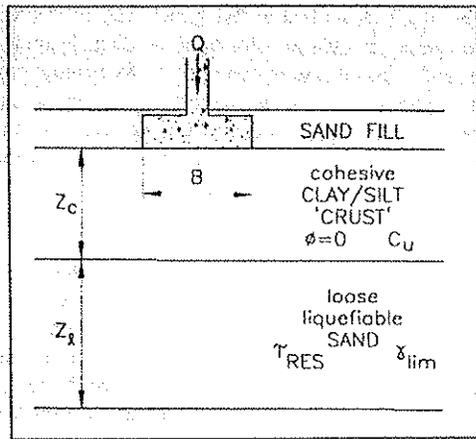
Respon seismik dari pondasi dangkal pada tanah pasir yang jenuh akibat dari peristiwa likuifaksi merupakan fenomena yang kompleks. Simulasi analitis masih berada pada tahapan penelitian dan hingga tahun 1997 metode umum untuk mengevaluasi penurunan pondasi untuk seluruh jenis tanah belum tersedia. Liu & Dobry (1997) mencoba melakukan studi dengan menggunakan centrifuge dan memberikan kesimpulan yang memverifikasi data Niigata maupun data Luzon.

Apabila pada lapisan atas terdapat tanah kohesif maka faktor keamanan untuk pondasi dangkal dapat dihitung dengan cara Naesgaard et. al (1998) sebagai berikut :

$$FS = \frac{\{2 Z_c \times c_u + 5.14 S_{ur} \times B\}}{Q_s}$$

dimana :

- FS = faktor keamanan pondasi saat gempa
- $Z_c$  = tebal lapisan tanah kohesif
- $S_{ur}$  = kuat geser residual



Gbr. 4. Pondasi dangkal pada tanah yang berpotensi mengalami likuifaksi (Sumber : Naesgaard et. al, 1998)

Kerusakan struktur bangunan akibat penurunan pondasi dangkal dapat dikategorikan menurut hasil penelitian Kishida (1996) yang ditampilkan pada

Tabel 1. Kerusakan pondasi akibat Gempa Niigata (Sumber : Kishida, 1996)

Classification	Maximum Settlement (mm)	Tilting Angle (degrees)	Damage to Foundations
I	0 - 200	0.0 - 0.3	None
II	200 - 500	0.3 - 1.0	Slight
III	500 - 1000	1.0 - 2.3	Intermediate
IV	> 1000	> 2.3	Heavy

## 5. Penggunaan State Parameter Untuk Memperkirakan Penurunan Pondasi Pada Saat Gempa

### 5.1. Steady State Line (SSL) & State Parameter

Rahardjo (1989) mendapatkan bahwa kuat geser residual merupakan fungsi daripada kondisi awal kepadatan tanah dan tegangan keliling pada suatu elemen tanah. Konsep ini dimulai oleh Been & Jefferies (1985, 1987) yang memperkenalkan state parameter sebagai gambaran untuk menjelaskan kondisi suatu specimen yang dimaksudkan oleh Rahardjo di atas.

Pengertian state parameter sama sekali baru dan barangkali belum dikenal di Indonesia ini. Oleh karena itu dalam bagian ini penulis akan mencoba memperkenalkan parameter ini secara ringkas.

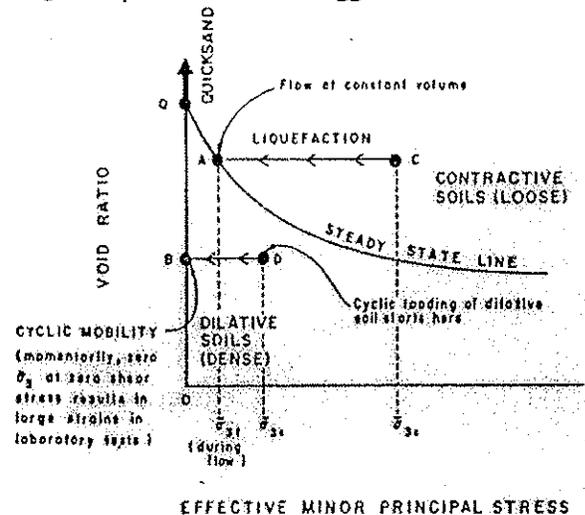
Menurut pengamatan beberapa peneliti (Lee, 1965; Lade, 1972; Been & Jefferies, 1985), kepadatan relatif maupun void ratio tidaklah mencukupi untuk menunjukkan karakteristik tanah kepasiran. Been & Jefferies (1985) telah menanjurkan bahwa tingkat tegangan (stress level) harus diikutsertakan dalam analisis perilaku tanah kepasiran. Dalam suatu penelitian terhadap perilaku tanah kepasiran, mereka mendapatkan bahwa dengan kombinasi kepadatan dan

dapat serupa bilamana kondisi pengujian dapat menjamin proximity (kedekatan) yang sama terhadap suatu garis unik merupakan ciri khas material tanah tersebut yang disebut dengan Steady State Line (SSL). Proximity terhadap SSL inilah yang kemudian disebut dengan state parameter yang didefinisikan sebagai beda rasio rongga (void ratio) antara keadaan awal tanah pasir terhadap SSL pada tegangan efektif rata rata,  $\sigma'_m$  yang sama.

Istilah steady state pertama kali diperkenalkan oleh Castro (1969), Casagrande (1975), dan Poulos (1981) dalam rangkaian studi mengenai likuifaksi. Menurut Casagrande, di bawah beban geser, tanah yang mengalami likuifaksi membentuk 'struktur mengalir' (flow structure) dimana posisi relatif dari butiran tanah pasir secara konstan berubah ubah dalam suatu cara yang menyebabkan perlawanan yang minimum. Perilaku ini ditunjukkan oleh Castro (1969) di laboratorium dan disebut keadaan steady state.

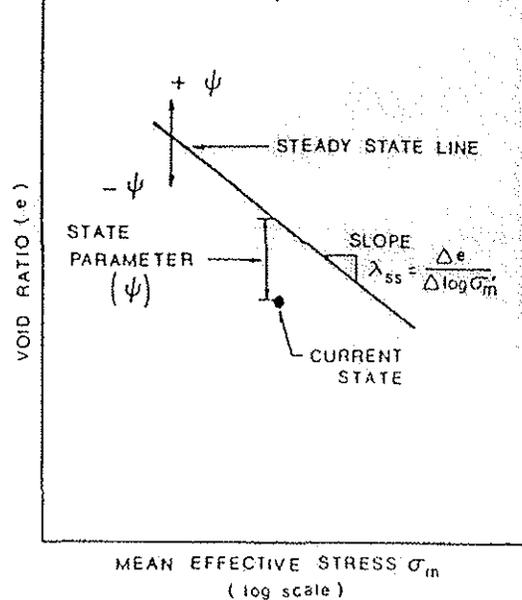
Konsep 'steady state' sendiri diturunkan dari pengertian rasio rongga kritis (critical void ratio) yang mula mula diperkenalkan oleh Casagrande. Dalam ide tersebut pada rasio rongga kritis, tanah pasiran dapat mengalami deformasi yang besar tanpa mengalami perubahan volume. Pada saat itu tanah mengalami deformasi geser dalam keadaan 'drained', pasir lepas akan mengalami kompresi sampai mencapai rasio rongga kritis. Tetapi dalam kondisi 'undrained', kecenderungan pengecilan volume itu tidak terjadi sehingga akibatnya muncul dalam bentuk naiknya tekanan air pori dan penurunan tegangan efektif.

Pada tahun 1975 Casagrande mengusulkan bahwa pada saat pembebanan undrained, tegangan efektif pada pasir lepas berkurang hingga mencapai Steady State Line (SSL) seperti ditunjukkan oleh Gbr. 5. Pada gambar tersebut nampak bahwa tanah semula mempunyai tegangan efektif,  $\sigma'_{3c}$ , kemudian oleh pembebanan undrained, tegangan efektif ini menurun hingga mencapai tegangan  $\sigma'_{3f}$  pada SSL tanpa mengalami perubahan rasio rongga.



Gbr. 5. Perilaku undrained dari tanah non-koheisif yang jenuh (Sumber : Castro, 1977)

tanah mengalir pada volume tetap ini secara unik menentukan Steady State Line (SSL). Pengertian ini dipergunakan oleh Casagrande et. al dengan dalil bahwa peristiwa liquifaksi dan mengalirnya tanah adalah karena proses penurunan tegangan efektif dengan harga akhir yang bergantung rasio rongga saat itu. Steady State Line (SSL) didefinisikan sebagai tempat kedudukan dari semua titik pada koordinat ruang rasio rongga vs tegangan efektif, dimana massa tanah mengalami deformasi dengan kondisi volume dan tegangan efektif yang konstan. Bila pembebanan diberikan kepada tanah, setelah regangan yang cukup besar, tanah akan mencapai satu titik pada Steady State Line (SSL). Garis ini merupakan garis yang unik untuk suatu jenis tanah tertentu dan tidak bergantung kepada struktur tanah mula mula, lintasan pembebanan (loading path) maupun kecepatan pembebanan (strain-rate) (Poulos, 1981; Castro et. al, 1982; dan Poulos et. al, 1985).



Gbr. 6. Pengertian state parameter  
(Sumber : Rahardjo, 1989)

Deformasi pada steady state didefinisikan oleh Poulos (1981) sebagai keadaan dimana massa tanah secara kontinu berdeformasi pada volume tetap, tegangan efektif tetapi dan tegangan geser tetap. Kondisi ini hanya tercapai apabila semua orientasi partikel telah mencapai keadaan steady sempurna sehingga tegangan geser yang dibutuhkan untuk melanjutkan deformasi tersebut adalah konstan.

Menurut konsep steady state ini maka kuat geser steady state (undrained steady state shear strength),  $S_{us}$  dan tegangan efektif tanah semata mata hanya bergantung kepada rasio rongganya. Jadi dalam hal ini tidak peduli apakah pembebanan dilakukan secara monotonik atau siklik, keadaan yang sama akan tercapai.

Dalam tulisan ini tidak akan dibahas sama sekali penggunaan steady state untuk masalah liquifaksi, melainkan untuk mengamati perilaku tanah berdasarkan parameter yang diturunkan dengan SSL. Casagrande telah menggunakan SSL ini untuk membedakan antara tanah yang kontraktif (terletak di sebelah kanan SSL) dan tanah yang dilatif (terletak di sebelah kiri SSL). Tetapi tidak dilakukan kuantifikasi terhadap kedekatan (proximity) dari keadaan awal tanah tersebut terhadap SSL. Sejauh pengamatan penulis, baru Been & Jefferies (1985) yang pertama mengkuantifikasikan proximity ini dengan sebutan state parameter,  $\psi$ . Pengertian ini ditunjukkan oleh Gbr. 6 dimana harga  $\psi$  tersebut didefinisikan sebagai jarak dari rasio rongga keadaan awal tanah tersebut dengan SSL pada tegangan efektif rata rata yang sama.

Keuntungan daripada konsep ini adalah bahwa tekanan air pori, kekuatan geser tanah, dan potensi liquifaksi dapat diperkirakan secara lebih rasional. Disamping itu perkembangan baru menunjukkan bahwa state parameter dapat diperkirakan berdasarkan hasil uji insitu diantaranya dengan hasil uji sondir.

## 5.2. Penentuan State Parameter Menggunakan Data Sondir

Studi pada sel kalibrasi (calibration chambers) oleh Been & Jefferies (1987), Rahardjo (1989, 1995), dan lain lain menunjukkan bahwa ada korelasi yang sangat erat antara tahanan ujung sondir dengan state parameter. Hasil penelitian Been & Jefferies (1988) menyimpulkan bahwa state parameter dapat dikorelasikan dengan persamaan berikut :

$$\psi = - \frac{1}{[8.1 - \ln \lambda_{ss}]} \cdot \ln \left[ \frac{\left( \frac{q_c - \sigma_m}{\sigma_m'} \right)}{\left( 8 + \frac{0.55}{\lambda_{ss} - 0.01} \right)} \right]$$

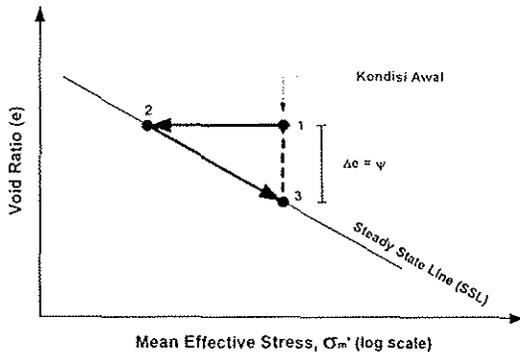
Persamaan di atas dapat digunakan untuk memperkirakan state parameter dari hasil uji sondir. Parameter yang diperlukan disamping hasil uji sondir adalah nilai koefisien tekanan tanah at rest ( $K_o$ ) dan besarnya kemiringan dari kurva steady state line ( $\lambda_{ss}$ ). Dari sudut praktis, bilamana kedua parameter itu tidak diketahui, Rahardjo (1989) mengusulkan pendekatan dengan asumsi  $K_o = 0.5$  dan nilai  $\lambda_{ss}$  diambil sebagai berikut :

Tabel 2. Nilai  $\lambda_{ss}$  untuk pendekatan pada berbagai ukuran butir pasir (Sumber : Rahardjo, 1989)

$D_{50}$ (mm)	$\lambda_{ss}$
$\leq 0.15$	0.15
0.15 - 0.25	0.10
$\geq 0.25$	0.05

Dalam makalah ini diusulkan bahwa perkiraan penurunan permukaan tanah pada saat gempa didasarkan kepada prosedur sebagai berikut :

- Tentukan daerah yang mengalami liquifaksi (zona liquifaksi).
- Tentukan profil state parameter dari tanah berdasarkan hasil uji sondir.
- Hitung penurunan maksimum dari permukaan tanah dengan mengasumsikan bahwa pada saat gempa tekanan air pori timbul sehingga mereduksi tegangan efektif tanah sampai pada kondisi steady state (Lintasan 1 – 2). Selanjutnya perubahan angka pori tanah terjadi sebagai akibat lintasan sepanjang SSL kembali kepada tegangan efektif mula mula (Lintasan 2 – 3).



Gbr. 7. Konsep perubahan volume akibat peristiwa liquifaksi

- Penurunan total dihitung sebagai berikut :

$$S = \sum \frac{\psi}{(1 + e)} \cdot \Delta h$$

dimana :

- S = penurunan maksimum permukaan tanah
- e = angka pori awal
- $\Delta h$  = tebal sub lapis
- $\psi$  = state parameter

Dengan konsep di atas maka hasil perhitungan penurunan adalah valid bilamana proses kembalinya tegangan efektif pada elemen tanah terjadi sepanjang steady state line (SSL), sebab hal inilah yang mendasari asumsi dari perubahan volume tanah.

## 6. Studi Kasus Gempa Flores, Maumere, 1992

### 6.1. Latar Belakang Geologi dan Stratigrafi Lapisan Tanah Kota Maumere dan Daerah Sekitarnya

Kota Maumere terletak di dataran pantai Pulau Flores sebelah Utara. Kandungan batumannya banyak mengandung kerakal dan kerikil, andesit, basal serta granit, pasir, lumpur, dan lanau yang terendapkan dalam lingkungan sungai dan pantai. Satuan ini menindih secara tak selaras batuan yang lebih tua. Sedangkan daerah sekitarnya antara Maumere dan Wajo tersebar jenis batuan lava, breksi, aglomerat, dan tufa pasiran.

dan andesit horeblenda, kelabu muda sampai abu tua, menyudut sampai menyudut tanggung, umumnya berukuran antara 3 – 25 cm. Perekat breksi, tufa pasiran yang mudah lepas.

Tufa pasiran, putih kotor, kelabu muda sampai kekuningan, berbutir halus sampai kasar, umumnya bersusunan andesit. Bagian atas lebih bersifat batu apung, repih, lapisan tak jelas, terlihat hampir mendatar. Sedangkan bagian bawah bersifat tufa dan lebih padat, peralihan nyata dengan kemiringan 10° - 150° dan di beberapa tempat berstruktur silang. Daerah ini merupakan hasil gunung api tua.

Struktur geologi yang terdapat di lembar Ende adalah lipatan, sesar dan kelurusan. Kota maumere dilewati oleh kelurusan yang mempunyai arah Barat Daya – Timur Laut. Kemungkinan besar kelurusan itu adalah sesar, namun baik di lapangan maupun pada citraan SLAR tidak ada kesan yang jelas.

### 6.2. Kondisi Kegempaan di Maumere

Hery Harjono (geoteknologi LIPI) dalam laporan khusus mengemukakan bahwa; gempa pada sesar Flores menunjukkan Konvergensi Selatan. Gempa Flores pada tahun 1992 ini terjadi pada kedalaman fokus 33 km dengan Magnitudo 6.8 skala Richter (berdasarkan gelombang badan, belakangan dikoreksi M = 7.2) atau 7.5 berdasarkan gelombang permukaan, dengan pusat gempa di Laut Flores dengan koordinat 8.2° LS 122° BT kira kira 40 km ke arah Barat Daya dari kota Maumere. Gempa ini juga disertai pula dengan tsunami yang mengancurkan daerah bagian Utara Flores setinggi 15 m. Mekanisme kegempaan untuk gempa gempa dangkal di Pulau Bali dan Flores menunjukkan arah slip vector ke Utara dengan estimasi sesar naik condong 30° ke Selatan. Hasil penting analisis yang dilakukan pakar geodinamika menunjukkan bahwa kegempaan utama berasal dari mekanisme murni sesar naik dengan proyeksi horisontal slip vector semuanya berarah Utara 10°. Arah slip ini menunjukkan identik dengan arah konvergensi antara lempengan Indian Ocean – Eurasia.

Berdasarkan data Gempa Flores yang didapatkan dari USGS (United State Geological Survey) tanggal 12 Desember 1992 lalu diperkirakan telah timbul jalur patahan atau sesar baru sepanjang 100 km dengan lebar 50 km di Laut Flores. Beda ketinggian atau slip antara kedua lempeng rekahannya 1.20 m. Jalur patahan yang mengarah Barat Daya – Timur Laut ini menyebabkan kenaikan relatif Pantai Maumere dan beberapa bagian Utara Pantai Pulau Flores. Namun di bagian Tenggara di permukaan dasar laut mengalami penurunan 0.50 m yang ditunjukkan oleh penurunan permukaan Pulau Babi.

### 6.3. Sifat Teknis Lapisan Tanah di Maumere

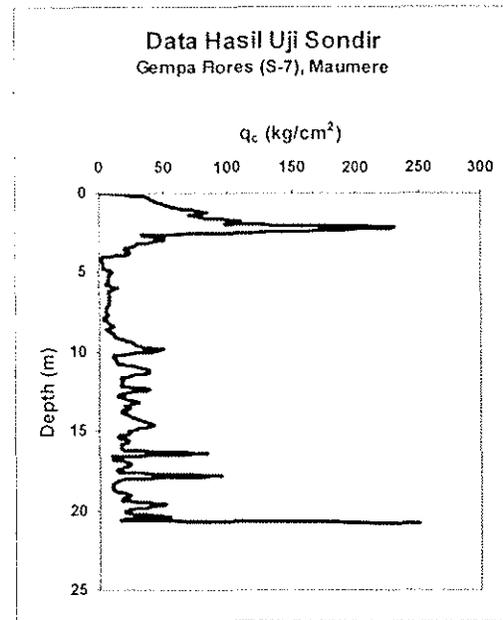
Analisis hasil distribusi butiran jenis tanah di perkotaan merupakan jenis tanah yang rata rata mengandung pasir, sehingga jenis tanah yang ditemukan di kota Maumere digambarkan sebagai lempung kepasiran,

Kedalaman muka air tanah di daerah Ota pada umumnya mencapai 1.25 - 1.50 m sedangkan untuk daerah Selatan lebih dari 12.50 m. Kandungan untuk berbagai jenis tanah bervariasi, untuk jenis tanah lanau kelembungan kandungan airnya antara 50.7% - 53.4%, sedangkan untuk tanah lempung kekerikilan mempunyai nilai 33% - 34.5%, umumnya untuk tanah kepasiran pada daerah Maumere mempunyai nilai 25.2% - 29.2%.

#### 6.4. Evaluasi Potensi Liquefaksi Wilayah Kota Maumere dan Contoh Kasus

Studi mengenai potensi liquefaksi di wilayah Maumere telah dilakukan oleh Najoan et. al (1994) dan Rahardjo et. al (1994). Pada makalah ini hanya akan ditampilkan studi kasus pada sebuah titik bor dan sebuah titik sondir untuk ilustrasi pada perhitungan potensi liquefaksi dan perkiraan penurunan tanah akibat liquefaksi.

Dalam contoh kasus ini dipergunakan data bor BH-7 dan data sondir CPT-7 yang masing masing dilakukan oleh Puslitbang Pengairan, Bandung dan PT. Testana



Gbr. 8. Data Sondir CPT-7, Maumere

Kedalaman (m)	Pemerian Tanah	Klasifikasi Tanah	Muka Air Tanah	$N_{PT}$	$D_{50}$	% Finer
	Pasir Lanauan, bercampur kerikil, urai.					
2	Pasir, kelabu tua, berbutir pasir halus-sedang, agak padat.	Dark Grey/Sand		8	0.24	5.3
3	3.45-3.80 m : berwarna kelabu muda.	Dark Grey/Sand		14	0.23	4.9
5	Lanau Pasiran, ada fragmen koral, lembek.	Grey/Silty Sand		3	0.17	16.9
6	Pasir, kelabu muda, bercampur pecahan kerang berukuran pasir kasar d 2 cm dan fragmen koral, urai.	Grey/Sand		1	0.08	49
8	Lanau Pasiran, kelabu muda, bercampur pecahan terumbu koral berukuran 2 - 4 cm, lembek.	Grey/Clayey Sandy Silt		2	0.02	73.1
9		Grey/Gravelly Silty Sand		1	0.28	32.4
11	Pasir Lanauan, kelabu muda, bercampur pecahan terumbu koral berukuran pasir kasar d 6 cm, teguh.	Grey/Silty Sandy Gravel		6	0.45	32.1
13	Pasir, berbutir sedang- kasar, urai, kelabu muda.	Light Grey/Silty Sand		34	0.18	30.1
15	Lanau Pasiran, berukuran pasir kasar, teguh, sangat kaku, bercampur terumbu koral, kelabu muda.	Grey/Gravelly Sandy Silt		14	0.28	36.7
17	Lanau Pasiran, kelabu muda, bercampur pecahan terumbu koral, berukuran pasir kasar, kerakil, teguh, sangat kaku. Pada kedalaman 17 m terdapat fragmen batu gamping koral, d 4.5 - 9.5 cm.	Light Grey/Silty Sand		51	0.26	23.6
19		Light Grey/Silty Sand		11	0.32	29.8
21		Light Grey/Gravelly Silty Sand		6	0.67	19.4
23		Light Grey/Silty Sand		49	0.32	29.1
	Pasir, sedang- kasar +kerikil, agak padat.					
25	Lanau Pasiran, kelabu, bercampur pecahan batu gamping berukuran pasir kasar d 3cm.	Light Grey/Gravelly Sand		29	1.11	14.4
27	Pasir Lanauan, kelabu muda berbutir pasir kasar.	Light Grey/Silty Sand		19	0.19	30.7
29	Lanau Pasiran, terdapat fragmen batu gamping d 7.5 cm, kerikil.	Light Grey/Silty Sandy Gravel		>50	1.30	

Gbr. 9. Hasil pemboran teknik BH-7, Maumere, Flores

Pada saat uji, kondisi tersebut di atas tampak lapisan pasir mempunyai konsistensi sangat lepas khususnya pada bagian bawah, pada kedalaman > 4.50 m.

BH-7 memperlihatkan hasil yang cukup konsisten dengan data sondir dimana lapisan tanah didominasi oleh tanah pasir lanuan dan tanah lanau pasiran yang mempunyai ukuran butir halus hingga kasar. Pada beberapa kedalaman bercampur dengan terumbu koral atau fragmen batu sehingga pada kedalaman tertentu memberikan nilai SPT yang sangat tinggi.

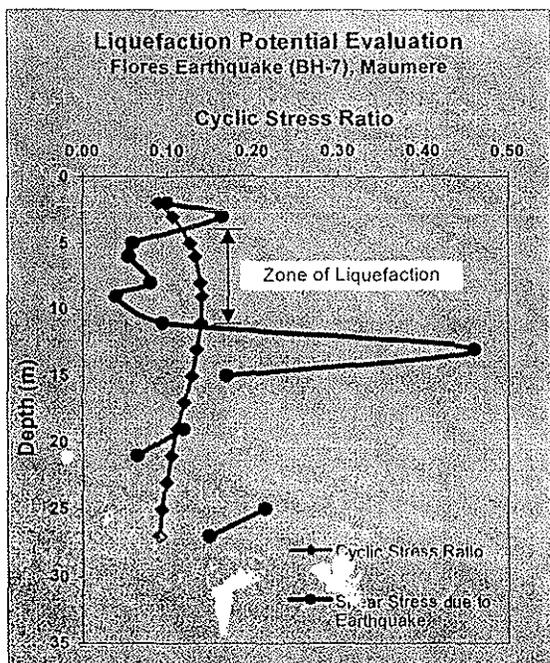
Berbagai metode untuk mengevaluasi potensi liquifaksi menggunakan data bor dan SPT dikemukakan beberapa peneliti. Salah satu cara populer adalah Metode Seed yang membandingkan tahanan siklik ( $\tau_c$ ) dan tegangan geser rata rata di lapangan ( $\tau_{av}$ ). Pada umumnya kedua besaran itu dinormalisasi dengan tegangan efektif ( $\sigma_0'$ ). Nilai rasio tahanan siklik diperoleh dari hubungan empirik yang diturunkan oleh Seed et. al (1984) sedangkan rasio tegangan geser dihitung untuk setiap interval kedalaman dengan formula :

$$\frac{\tau_{av}}{\sigma_0'} = 0.65 \cdot \frac{\sigma_0}{\sigma_0'} \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot r_d$$

dimana :

- $\sigma_0$  = tegangan total
- $\sigma_0'$  = tegangan efektif
- $a_{max}$  = percepatan maksimum
- $g$  = percepatan gravitasi
- $r_d$  = koreksi sifat deformasi tanah

Hasil analisis evaluasi potensi liquifaksi dengan Metode Seed ditunjukkan pada Gbr. 10.



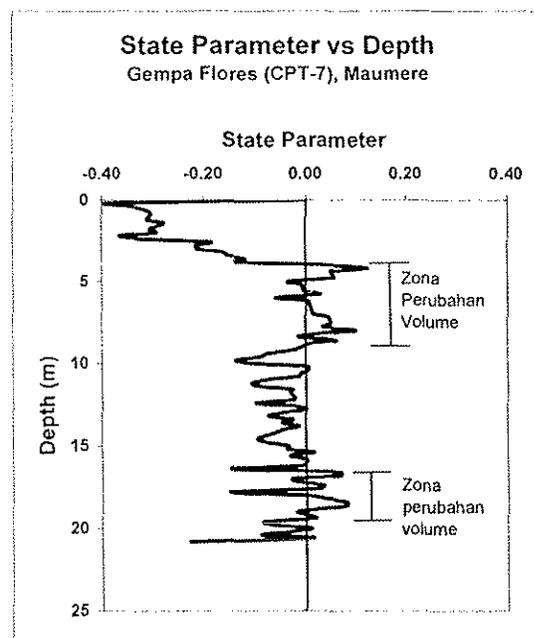
Gbr. 10. Zona liquifaksi berdasarkan Metode Seed

Pada hasil analisis tersebut terlihat bahwa zona liquifaksi setebal 6.50 m terjadi pada kedalaman 4.50 m - 11.0 m. Menurut data empirik dari Niigata dan Gempa Luzon (Liu et. al, 1997) maka suatu bangunan

18.0 cm.

Nilai state parameter yang diperkirakan berdasarkan hasil uji sondir diberikan pada Gbr. 11. Pada perhitungan ini diasumsikan nilai  $K_0 = 0.5$  dan rasio ronggal rata rata  $e = 0.8$ . Nilai state parameter positif berarti kepadatan tanah berada di kanan SSL sehingga lapisan tanah tersebut berpotensi mengalami perubahan volume sesudah atau pasca gempa. Kedalaman tanah yang dimaksud adalah pada elevasi -4.5 m s/d - 9.0 m dan sedikit pada lapisan bagian bawah Hasil analisis berdasarkan data sondir CPT-7 menggunakan cara yang diusulkan pada makalah ini adalah 14.61 cm. Baik Metode Seed (dengan  $N_{SPT}$ ) maupun metode ini memberikan konsistensi yang cukup baik.

Meskipun cara analisis dengan state parameter ini belum divalidasi dengan data lapangan, metode ini menawarkan cara yang rasional dan komparabel dengan metode lain yang ada. Oleh karena itu pada masa yang akan datang dapat dipertimbangkan untuk dipergunakan dalam memperkirakan besarnya penurunan tanah yang berpotensi mengalami liquifaksi.



Gbr. 11. Nilai state parameter berdasarkan CPT-7

## 7. Kesimpulan dan Saran

- Pada dasarnya ada 2 (dua) kategori respon sesmik pondasi dangkal pada tanah yang berpotensi mengalami liquifaksi yaitu reduksi terhadap daya dukung tanah dan penurunan. Dalam kasus dimana zona liquifaksi cukup tebal, maka penurunan tanah dapat merupakan problem yang signifikan terhadap kegagalan pondasi.
- Cara perhitungan penurunan tanah menggunakan state parameter yang diusulkan dalam makalah ini menjanjikan suatu pendekatan yang cukup rasional sehingga layak dipertimbangkan untuk perkiraan penurunan tanah pada saat gempa.

