

**KAJIAN GEOTEKNIK INFRASTRUKTUR UNTUK KOTA PADANG MENGHADAPI
ANCAMAN GEMPA DAN TSUNAMI**



Disusun Oleh:
Prof. Paulus Pramono, Ph.D

Dr. Budijanto Widjaja

Dr. Sylvia Herina

Anastasia Sri Lestari, Ir. MT

Aswin Lim, ST, MSc.Eng

Ir. Siska Rustiani, MT

Stefani Wiguna, ST

Vienti Hapsari, ST., MT

**Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat
Universitas Katolik Parahyangan
2014**

Kajian Geoteknik Untuk Infrastruktur Kota Padang Menghadapi Ancaman GEMPA dan TSUNAMI

Ketua Peneliti : Prof. Paulus P. Rahardjo

*Anggota Peneliti : Ir Anastasia Sri Lestari, MT., Budijanto Wijaya, Ph.D.,
Aswin Liem, M.Sc. Eng., Dr. Ir Sylvia Herina, M.Sc, Ir. Siska Rustiani, MT.,
Stefani Wiguna ST., Vienti Hadsari, ST, M.Sc.*

Abstrak

Latar belakang Gempa 30 September 2009 sebagai “alarm” bagi kota Padang, posisi kota Padang menghadapi resiko bencana dimasa mendatang, khususnya terhadap Gempa megathrust dan Benioff yang berpotensi menimbulkan resiko tsunami dan liquifaksi. Banyaknya bangunan yang gagal akibat liquefaksi, pengalaman beberapa peneliti dalam penanganan kasus di Padang.

Metode kajian berupa site visit ke lokasi, pengumpulan data-data kerusakan kota Padang saat gempa 29 September 2009, data-data geologi dan kegempaan, data bor dan CPT / CPTu, analisis likuifaksi menggunakan konsep NCEER dan perhitungan Liquefaction Potential Index (LPI), pemetaan kerentanan terhadap likuifaksi dan tinjauan bahaya tsunami di kota Padang.

Kesimpulan dan rekomendasi dari studi:

- (1) Tanah dikota Padang lapisan atas didominasi oleh pasir halus yang memiliki konsistensi lepas hingga sedang dan berpotensi mengalami liquefaksi dengan tingkat yang amat tinggi.
 - (2) Masalah keamanan bangunan di Padang, bukan saja akibat dari kondisi bangunan yang buruk, mungkin tidak dirancang dan dilaksanakan terhadap gempa, tetapi kondisi tanah dasar juga memerlukan perhatian khususnya bahaya liquefaksi yang dapat mengakibatkan kegagalan pada pondasi dan selanjutnya dapat mengakibatkan kerusakan pada struktur atas secara langsung
 - (3) Untuk bangunan yang masih survive, maka proteksi yang dapat diterapkan disamping peninjauan dan perkuatan struktur adalah dengan melakukan underpinning atau grout pada lapis tanah pasir dibawah pondasi. Bangunan bangunan yang sudah tidak dapat digunakan karena tingkat kerusakan yang berat maka sebaiknya pondasi dirancang ulang untuk menahan kemungkinan terjadinya potensi liquefaksi misalnya dengan menggunakan pondasi dalam sebagai sub struktur.
 - (4) Zonasi kerentanan terhadap likuifaksi dapat dilakukan berdasarkan Liquefaction Potential Index
 - (5) Mengingat keseluruhan kota Padang terletak pada area yang rendah, maka kerentanan terhadap potensi kerusakan akibat tsunami cukup tinggi, untuk itu disarankan kajian yang lebih mendalam mengenai tsunami diperlukan.
 - (6) Berdasarkan resume hasil analisis LPI terlihat bahwa rata-rata potensi likuifaksi yang terjadi pada kota Padang sangat besar (very high). Dengan besaran settlement yang terjadi berkisar antara 15.5 – 71.2 cm dan besaran lateral displacement yang terjadi berkisar antara 2.9 – 13.5 cm.
 - (7) Direkomendasikan untuk merencanakan tsunami hill atau tempat tempat tinggi ditempat publik yang dapat menyelamatkan masyarakat dari bahaya tsunami. Lokasi tersebut dapat dipilih pada area terbuka yang mudah dijangkau oleh orang orang yang berada disekitarnya
- Kemungkinan lain adalah membuat dinding pertahanan terhadap tsunami (tsunami wall) sepanjang pantai, misalnya dengan memanfaatkan jalan jalan dipinggir pantai seperti diantaranya jalan Samudera

DAFTAR ISI

Abstrak	i
Daftar Isi	ii
Daftar Gambar	iv
Daftar Tabel	vii
Kata Pengantar	viii
1. Pendahuluan	1
2. Kondisi Geologi, Tektonik dan Kegempaan Kota Padang	4
2.1. Geologi	4
2.1.1. <i>Geologi Regional</i>	4
2.2. Geologi Padang dan Sekitarnya.....	5
2.3. Tektonik dan Kegempaan.....	5
2.3.1. <i>Tektonik</i>	5
2.3.2. <i>Kegempaan</i>	7
2.3.3. <i>Percepatan Puncak Gempa</i>	8
3. Kajian Fenomena Likuifaksi	9
3.1. Fenomena Likuifaksi	11
3.1.1. <i>Flow Liquifaction</i>	11
3.1.2. <i>Cyclic Mobility</i>	11
3.2. Kerentanan Likuifaksi	12
3.2.1. <i>Kriteria Historis (Historical Criteria)</i>	12
3.2.2. <i>Kriteria Geologi (Geologic Criteria)</i>	13
3.2.3. <i>Kriteria Komposisi (Compositional Criteria)</i>	13
3.3. Metode Evaluasi Likuifaksi.....	14
3.3.1. <i>Metode Seed Berdasarkan Hasil Uji SPT</i>	16
3.3.2. <i>Metode Shibata dan Teparaksa Berdasarkan Data Sondir</i>	20
3.3.3. <i>Estimasi Penurunan Akibat Likuifaksi</i>	22
3.3.4. <i>Penentuan Indeks Potensi Likuifaksi</i>	23
3.4. Hasil Analisa Likuifaksi	24
3.4.1. <i>Katedral</i>	24
3.4.2. <i>SMP Frater dan SMA Don Bosco</i>	27
3.4.3. <i>Hasil Analisis Liquefaction Potential Index (LPI)</i>	30
4. Pemahaman Tentang Tingkat Kerusakan	31
5. Kajian Gedung-Gedung yang Rusak Akibat Gempa	33
6. Kondisi Kerusakan Bangunan Gedung Milik Keuskupan Padang	33
6.1. Puri Dharma (Kategori : Gedung Utama Rusak Sedang, Gedung Belakang Rusak Total)	33
6.2. Katedral (Kategori : Rusak Berat Namun Dapat Diperbaiki)	37

6.3. Kapel Susteran (Kategori : Rusak Berat)	39
6.4. Susteran SCMM St Leo (Kategori : Rusak Ringan dan Rusak Berat)	42
6.5. Gereja Paroki ex Katedral Tempo Doeloe (Kategori : Rusak Sedang Hingga Berat Namun Masih Dimungkinkan Perbaikan).....	43
6.6. SMA Don Bosco (Kategori : Gedung Lama Rusak Berat, Gedung Baru Rusak Ringan)	46
6.7. SMP Frater (Kategori : Bangunan Sisi Utara Rusak Berat, Bangunan Sisi Selatan Rusak Ringan).....	49
7. Bangunan Umum Yang Rusak Berat	51
Gedung Dinas Prasarana Jalan, Tata Ruang dan Permukiman	53
Sekolah Tinggi Bahasa Asing (STBA)	54
Bangunan Dinas Pengairan	55
Masalah Soft Storeys.....	55
Keruntuhan Struktur Baja.....	57
8. Kesimpulan dan Saran.....	57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Foto Kota Padang dilihat dari Udara (1)	2
Gambar 2. Foto Kota Padang dilihat dari Udara (2)	3
Gambar 3. Lokasi kejadian gempa Padang 30 September 2009 (Sumber : USGS).....	3
Gambar 4. Citra Landsat Band 4,57 tahun 2004 daerah Padang dan sekitarnya, Sumatera Barat....	4
Gambar 5. Peta geologi daerah Padang dan sekitarnya (sumber : LIPI Geoteknologi)	5
Gambar 6. Kondisi tektonik Indonesia Bagian Barat.....	6
Gambar 7. Peta penampang tumbukan utara-selatan, zona Sumatera.....	7
Gambar 8. Peta sebaran kegempaan dan pusat gempa di daerah Padang dan sekitarnya.	8
Gambar 9. Wilayah gempa Indonesia dengan percepatan puncak batuan dasar dengan periode ulang 500 tahun.....	9
Gambar 10. Hubungan antara Magnitude Gempa dengan Jarak Kritis Kejadian Likuifaksi (Sumber : Bureau Reclamation, 1984)	9
Gambar 11. Idealisasi Elemen Tanah di Lapangan Saat Gempa. (Sumber : Seed dan Idriss, 1966)	10
Gambar 12. Variasi Tegangan Geser dari Respon Analisis. (Sumber : Seed dan Idriss, 1966)	10
Gambar 13. Hubungan antara Jarak Epicentral Site dan Momen Magnitude (Sumber : Kramer, 1996)	12
Gambar 14. Ukuran butiran tanah yang rentan mengalami likuifaksi (Sumber : Tsuchida, 1970)	14
Gambar 15. Pengaruh OCR pada Tegangan yang Menyebabkan Likuifaksi Pada Uji Simple Shear (Sumber : Seed dan Peacock, 1971)	15
Gambar 16. Rentang Nilai Faktor Reduksi Tegangan, r_d , terhadap Kedalaman (Sumber : Seed dan Idriss, 1971).....	16
Gambar 17. Hubungan Tegangan Keliling Efektif dengan Nilai C_N (Sumber : Seed et al., 1971)	17
Gambar 18. Hubungan Rasio Tegangan yang Menyebabkan Likuifaksi dengan Normalisasi NSPT pada Pasir Berlanau dengan Magnitude 7.5.(Sumber : Seed et al., 1984).....	18
Gambar 19. .Evaluasi Potensi Likuifaksi dengan Magnitude Gempa yang Berbeda. (Sumber : Seed, 1987)	20
Gambar 20. .Potensi Likuifaksi Berdasarkan CPT (Sumber : Shibata dan Terapaksa, 1987, 1988)	22
Gambar 21. Kurva Untuk Menentukan Post-liquefaction Volumetric Strain, ϵ_v Sebagai Fungsi Dari Faktor Keamanan (Sumber : Ishihara, 1996).....	23
Gambar 22. Tingkatan kekuatan likuifaksi [berdasarkan paper Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12, 2759-2768, 2012].....	24
Gambar 23. Profil gradasi tanah dan nilai SPT di lokasi Katedral.	25
Gambar 24. Gradasi tanah pada kedalaman 1.0 – 10.0 m.....	25
Gambar 25. Gradasi tanah pada kedalaman 11.0-19.0 m.....	26
Gambar 26. Gradasi tanah pada kedalaman 22.0 – 32.0 m.....	26

Gambar 27. Hasil analisa likuifaksi pada daerah Katedral	27
Gambar 28. Profil gradasi tanah dan nilai SPT di lokasi SMP Frater.....	28
Gambar 29. Gradasi tanah pada kedalaman 1.0 – 10.0 m.....	28
Gambar 30. Gradasi tanah pada kedalaman 11.0 – 26.0 m.....	29
Gambar 31. Gradasi tanah pada kedalaman 27.0 – 34.0 m.....	29
Gambar 32. Hasil analisa likuifaksi pada daerah SMP Frater.....	30
Gambar 33. Gedung Utama Puri Dharma Katedral, bagian depan	34
Gambar 34. Kerusakan sedang pada struktur.....	34
Gambar 35. Kolom kolom yang mengalami kerusakan, namun masih mungkin diperbaiki dan diperkuat	35
Gambar 36. Pola Kerusakan tipikal joint pada kolom-balok	35
Gambar 37. Kerusakan pada dinding, bersifat non-struktural	35
Gambar 38. Kerusakan pada struktur tangga dan plat lintel	36
Gambar 39. Gedung Puri Dharma Katedral, bagian belakang, rusak total	36
Gambar 40. Gedung Puri Dharma Katedral, bagian belakang, rusak total	36
Gambar 41. Gereja Katedral dari depan tidak nampak kerusakan serius.....	37
Gambar 42. Kerusakan total pada dinding dibelakang altar	37
Gambar 43. Nampak gejala pergeseran dan amblesan di sekitar dinding dekat altar	38
Gambar 44. Retakan diagonal (akibat differential settlement) dan amblesan menunjukkan gejala penurunan akibat cyclic mobility tanah pasiran dibawah bangunan	38
Gambar 45. Kerusakan pada bagian belakang Katedral	38
Gambar 46. Site Visit di Katedral Padang oleh tim teknis Unpar.....	39
Gambar 47. Kapel susteran tempo doeloe.....	40
Gambar 48. Keadaan kapel susteran saat ini.....	40
Gambar 49. Tampak Kapel Susteran, Kerusakan parah dibagian belakang	40
Gambar 50. Kerusakan dibagian altar parah tetapi dinding depan utuh karena lebih kaku oleh keberadaan struktur balkon.....	41
Gambar 51. Pergeseran Lateral kolom dan dinding terlihat dari misalignment tembok.....	41
Gambar 52. Susteran SCMM, kerusakan utama adalah pada keruntuhan atap dari ruang makan...42	42
Gambar 53. Bangunan perpustakaan rusak total	42
Gambar 54. Penyembulan lantai, kemungkinan terjadi akibat tekanan air pori pada lapisan pasir yang mengalami liquifaksi saat gempa	43
Gambar 55. Bangunan gereja paroki, nampak kerusakan terutama retakan dinding	44
Gambar 56. Kerusakan di lantai dua, dinding hancur tetapi kolom relatif masih baik	44
Gambar 57. Disisi kiri bangunan, dinding bergeser keluar dan kerangka atap baja tergeser keluar dari kolom. Lantai masih menumpu diatas balok	44
Gambar 58. Kolom luar yang memikul rangka atap bergeser, kolom dalam masih tegak	45
Gambar 59. Kondisi Pondasi masih aman meskipun terdapat pengelupasan plesteran.....	45

Gambar 60. Kolom masih tegak tetapi terdapat retakan pada kolom, perlu diperkuat	45
Gambar 61. Pola Kerusakan gedung SMA Don-Bosco	46
Gambar 62. Kerusakan dinding di lantai pertama dan kedua gedung SMA Don Bosco	46
Gambar 63. Kerusakan di bagian tengah kolom, merupakan fenomena khusus.....	47
Gambar 64. Kerusakan kolom dibagian tengah menunjukkan pola geser	47
Gambar 65. Kondisi balok masih lurus dan utuh	47
Gambar 66. Disisi dalam, kerusakan kolom relatif tidak seberat kolom luar	48
Gambar 67. Kerusakan dinding di area hall bawah	48
Gambar 68. Kondisi gedung SMA Don Bosco, dilihat dari belakang	48
Gambar 69. Gedung belakang masih baru, merupakan persembahan para alumni Don Bosco, masih dalam kondisi baik dengan retakan minor saja. Perbaikan relatif ringan.....	48
Gambar 70. Keadaan Gedung SMP, sebagian besar kursi sudah dikeluarkan.....	49
Gambar 71. Kondisi kerusakan gedung disisi utara, kolom tertohok keluar	49
Gambar 72. Kerusakan kolom dibagian dalam	50
Gambar 73. Kerusakan kolom pada perbatasan tangga dan kerusakan dinding di lantai dasar.....	50
Gambar 74. Kerusakan di area perpustakaan, lantai terujung turun mengikuti kolom	50
Gambar 75. Buku buku dari perpustakaan masih berserakan	51
Gambar 76. Kerusakan akibat geser pada dinding dan kerusakan plafond.....	51
Gambar 77. Daerah daerah yang terdeteksi mengalami likuifaksi (sumber : Hakam 2009)	52
Gambar 78. Beberapa lokasi studi yang ditinjau dan lokasi data soil tests.....	52

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Nilai Pendekatan dari ΔN_1 (Seed , 1987)	19
Tabel 2. Faktor Koreksi bila $M \neq 7.5$ (Sumber : Seed, 1982)	20
Tabel 3. Liquefaction Potential Index (LPI)	31
Tabel 4. Settlement dan Lateral Displacement.....	31

PENGANTAR

Secara umum kerusakan akibat gempa yang terjadi pada tanggal 30 September 2009 di kota Padang adalah cukup berat. Dari hasil survey dan informasi berbagai pihak, kerusakan terbesar terjadi di daerah pusat kota. Tim Studi Unpar melakukan tinjauan pada beberapa lokasi gempa khususnya fasilitas gereja, sekolah dan rumah sakit yang merupakan bagian dari Keuskupan Padang dan Yayasan Prayoga pada tahun 2009 hingga 2010. Gempa tersebut memberikan warning tentang bahaya gempa untuk masa mendatang karena peristiwa serupa dapat terulang lagi.

Berdasarkan asumsi bahwa :

- Gempa 30 September 2009 sebagai “alarm” bagi kota Padang
- Posisi kota Padang menghadapi resiko bencana dimasa mendatang, khususnya thd Gempa megathrust dan Benioff yang berpotensi menimbulkan resiko tsunami dan liquifaksi
- Banyaknya bangunan yang gagal akibat liquefaksi
- Pengalaman beberapa peneliti dalam penanganan kasus di Padang

Maka pada kesempatan ini dirasakan bahwa pemulihan kota Padang yang relatif sudah memiliki kegiatan ekonomi telah mencapai kondisi normal dimana persiapan untuk menghadapi gempa dimasa mendatang sudah diperlukan. Untuk itu tim peneliti tahun 2014 mengusulkan untuk membuat kajian tentang kesiapan kota Padang selaras dengan harapan Pemerintah agar aspek kesiapan menghadapi bencana dikedepankan. Data yang dahulu pernah dikumpulkan, dicari kembali dan dipelajari sambil melakukan pengamatan di kota Padang. Dari pengalaman yang lalu, disamping kerusakan akibat getaran gempa, tim peneliti juga mempelajari bahwa banyak gedung di kota Padang juga mengalami kerusakan akibat peristiwa liquefaksi. Oleh karena itu dalam kajian ini maka kajian liquefaksi mendapatkan perhatian. Untuk itu data soil test dan data tambahan soil test dilakukan.

Laporan ini baru merupakan bagian pertama dari keseluruhan yang belum selesai. Bagian tentang tsunami belum tersentuh dan masih dalam tahap pengumpulan data, diharapkan dalam waktu dekat sebelum akhir tahun telah dapat diselesaikan. Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Unpar khususnya melalui LPPM yang telah memberikan dukungan finansial untuk dapat terlaksananya penelitian/pengabdian masyarakat ini. Juga pada berbagai pihak yang telah membantu mempersiapkan bahan bahan dan rujukan.

Bandung, 25 November 2014

Prof . Paulus P. Rahardjo, ketua tim merangkap anggota

Ir Anastasia Sri Lestari, MT, bendahara merangkap anggota

Budijanto Wijaya, Ph.D , anggota

Aswin LIEM, ST., M.Sc. Eng., sekretaris merangkap anggota

Ir. Siska Rustiani, MT, anggota

Dr. Ir Sylvia Herina, M.Sc, anggota

Stefani Wiguna, ST, anggota

Vienti Hadsari, anggota

Kajian Geoteknik Infrastruktur untuk Kota Padang Menghadapi Ancaman GEMPA dan TSUNAMI

Disiapkan oleh Tim Teknis Universitas Katolik Parahyangan - Bandung

1. Pendahuluan

Secara umum kerusakan akibat gempa yang terjadi pada tanggal 30 September 2009 di kota Padang adalah cukup berat. Dari hasil survey dan informasi berbagai pihak, kerusakan terbesar terjadi di daerah pusat kota. Tim Studi Unpar melakukan tinjauan pada beberapa lokasi gempa khususnya fasilitas gereja, sekolah dan rumah sakit yang merupakan bagian dari Keuskupan Padang dan Yayasan Prayoga.

Jika dilihat dalam radius 200 km dari epicenter gempa dengan magnitude (M) 7.9 SR (informasi awal gempa Padang 30 September 2009 adalah 7.6 SR dan telah dikoreksi oleh USGS menjadi 7.9 SR), maka dapat dilihat beberapa lokasi kerusakan berat akibat gempa. Tentunya yang lebih dekat dengan epicenter akan mengalami kerusakan yang lebih parah dibandingkan yang terjadi pada lokasi lebih jauh. Dengan teori ilmu dinamik dapat diperkirakan besarnya akselerasi yang terjadi di batuan dasar dan rambatannya di permukaan bumi. Misalkan dengan menggunakan rumus Donovan, maka dari hasil analisis dapat disimpulkan bahwa tanah lunak akan terjadi akselerasi yang lebih besar, sedangkan pada daerah berbukit akselerasi yang terjadi hampir sama dengan akselerasi pada batuan dasar. Hal inilah yang biasanya dijadikan acuan oleh para ahli teknik sipil dalam memperkirakan besarnya kerusakan yang akan timbul jika terjadi gempa.

Daerah yang mengalami kerusakan paling parah terjadi pada daerah yang terdiri dari endapan, baik aluvial maupun endapan vulkanik yang berasal dari letusan gunung berapi. Dapat dilihat bahwa daerah-daerah yang mengalami kerusakan paling parah adalah daerah :

- dekat dengan energi yang dilepaskan
- kualitas / kekuatan bangunan kurang baik

Pada daerah dekat dengan perbukitan justru kerusakan infrastruktur terjadi karena longsor. Data yang dimiliki tim studi Unpar menunjukkan bahwa di kota Padang lapisan tanah di permukaan berupa tanah lunak atau tanah pasiran dalam kondisi loose atau medium. Bila tanah pasiran tersebut berada dibawah air, maka pada gempa besar diatas tersebut dapat mengalami liquifaksi atau peristiwa pembuburan tanah pasir jenuh saat gempa. Tetapi hal ini masih perlu untuk diverifikasi di lapangan. Sejauh ini di beberapa daerah di kota Padang terjadi liquifaksi yang menyebabkan tanah kehilangan daya dukungnya dan pondasi mengalami penurunan.

Tingkat kerusakan akibat gempa tergantung kepada kedekatan dengan sumber gempa, kondisi tanah dan kualitas bangunan atau infrastruktur yang ada diatasnya. Berdasarkan informasi setempat pada saat survey di lapangan, getaran gempa dirasakan baik dalam arah mendatar

maupun dalam arah vertikal. Dari data dan informasi, gempa Padang Pariaman ini dirasakan hingga pantai timur Sumatera, bahkan Singapura, hal mana menunjukkan bahwa getaran yang dirambatkan cukup dahsyat. Kerusakan terutama terjadi terhadap hunian penduduk, bangunan-bangunan, struktur dan infrastruktur. Guncangan yang timbul pada saat gempa utama telah menyebabkan banyak kerusakan terhadap struktur bangunan yang kondisinya memang lemah, sedangkan gempa susulan tidak menimbulkan kerusakan yang berarti.

Gempa tersebut juga mengakibatkan terjadinya kerusakan pada bangunan-bangunan infrastruktur yang cukup vital, terutama bangunan publik seperti sekolah dan rumah sakit. Hal ini mempengaruhi tingkat kesulitan dalam proses evakuasi pada saat gempa terjadi maupun pada saat distribusi bantuan dilakukan.

Dari uraian diatas maka dapat disimpulkan :

- Gempa 30 September 2009 sebagai “alarm” bagi kota Padang
- Posisi kota Padang menghadapi resiko bencana dimasa mendatang, khususnya thd Gempa megathrust dan Benioff yang berpotensi menimbulkan resiko tsunami dan liquifaksi
- Banyaknya bangunan yang gagal akibat liquefaksi
- Pengalaman peneliti dalam penanganan kasus di Padang

Mengingat Undang undang Kebencanaan telah memberikan arahan untuk kita lebih mempersiapkan diri menghadapi bencana, maka penelitian ini bertujuan untuk :

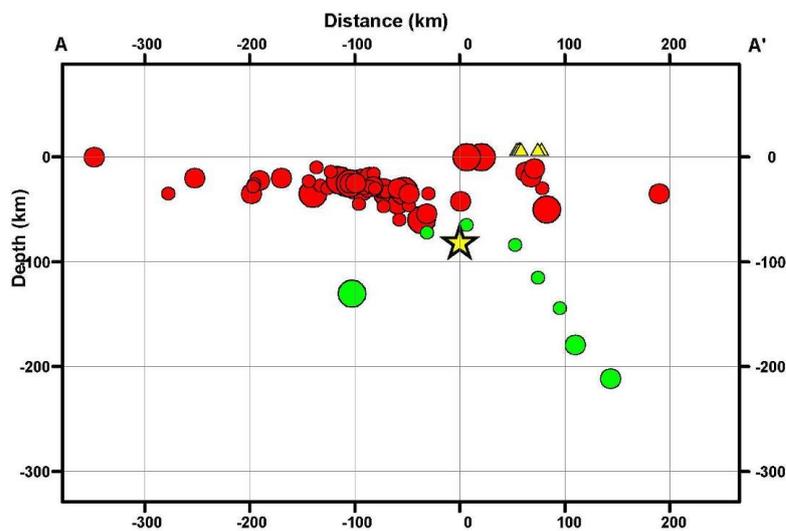
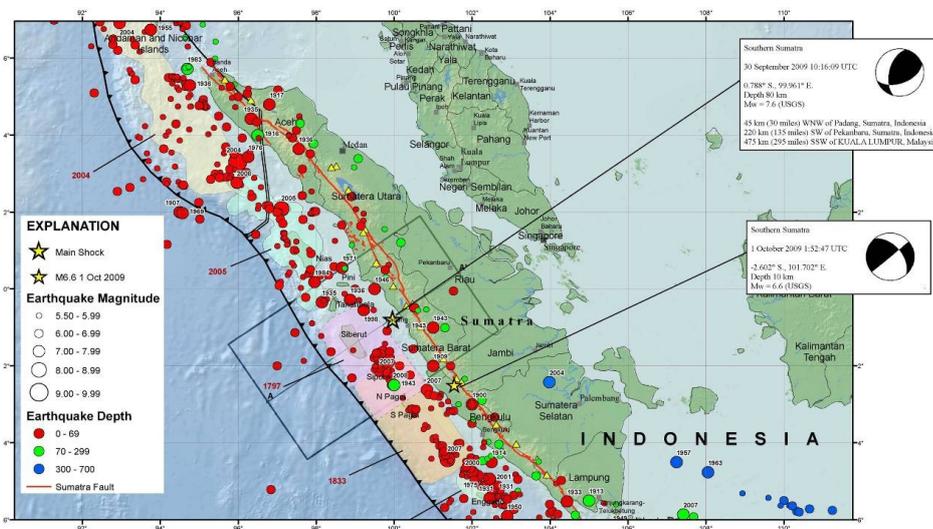
- (1) Melakukan kajian Geologi dan Kegempaan kota Padang
- (2) Melakukan pengambilan sampel baik dilapangan maupun di laboratorium
- (3) Melakukan uji lapangan berupa Standard Penetration Test (SPT) dan Uji sondir dengan pengukuran tekanan air pori (CPTu)
- (4) Melakukan peninjauan kerusakan di kota Padang pada saat sesudah gempa dan kondisi bangunan bangunan pada umumnya saat ini.
- (5) Melakukan kajian efek gempa terhadap kondisi tanah, khususnya liquefaksi
- (6) Memberikan rekomendasi pengaruh kondisi tanah pada bangunan bangunan yang ada
- (7) Memberikan rekomendasi kepada pemerintah daerah penanganan gempa dan tsunami
- (8) Memberikan zonasi kerentanan terhadap gempa dan tsunami



Gambar 1. Foto Kota Padang dilihat dari Udara (1)



Gambar 2. Foto Kota Padang dilihat dari Udara (2)



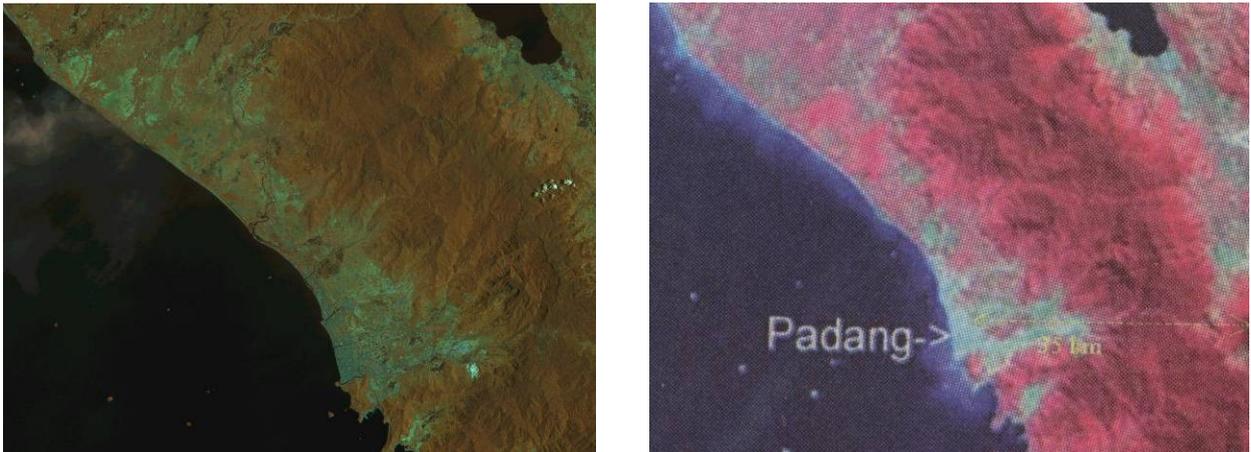
Gambar 3. Lokasi kejadian gempa Padang 30 September 2009 (Sumber : USGS)

2. Kondisi Geologi, Tektonik dan Kegempaan Kota Padang

2.1. Geologi

2.1.1. Geologi Regional

Tatanan fisiografi daerah Padang dan sekitarnya merupakan daerah paparan delta yang berhadapan dengan endapan laut terbuka yang dibatasi oleh graben berupa patahan-patahan di bagian timur dan barat yang berarah hampir barat laut – tenggara. Zona ini dicirikan seri endapan kuarter yang terdiri dari endapan pantai, endapan *swamp*, endapan aluvial. Dataran tersebut terpisah oleh laut terbuka dan pematang pantai yang bagian belakangnya terbentuk rawa-rawa pantai sebagai endapan *swamp*.

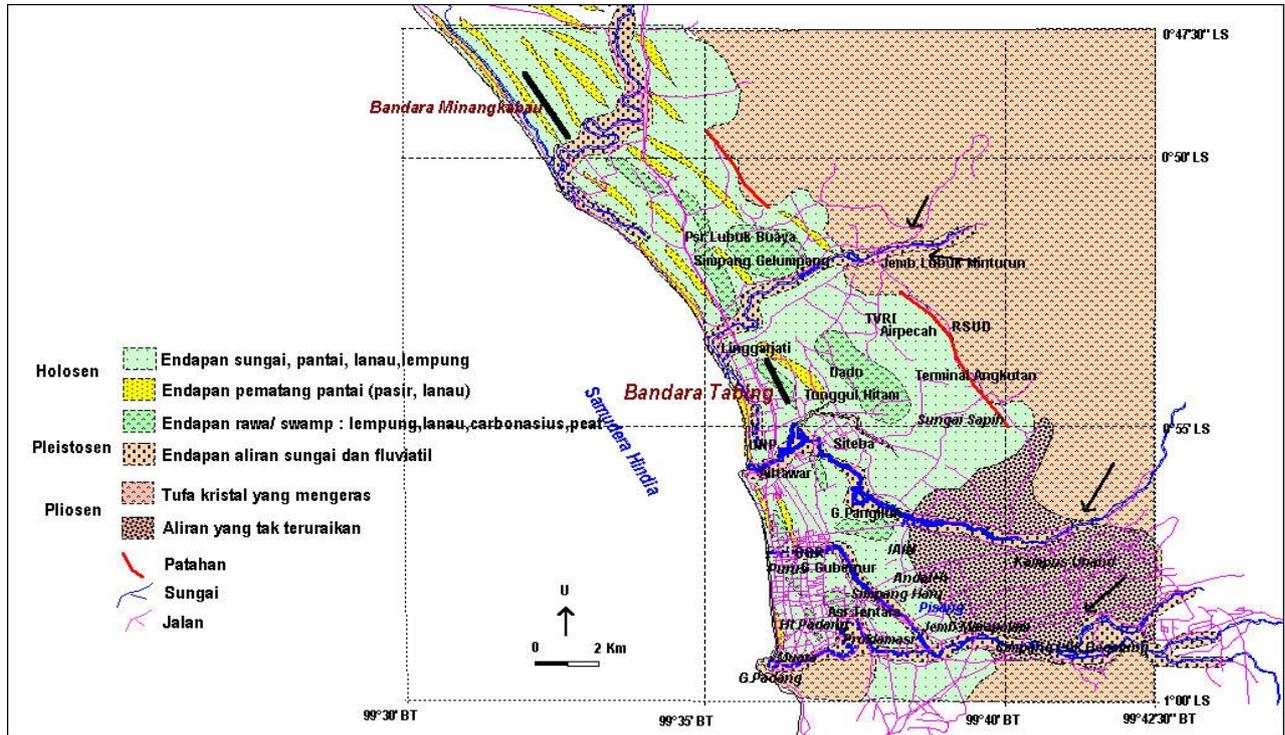


Gambar 4. Citra Landsat Band 4,5,7 tahun 2004 daerah Padang dan sekitarnya, Sumatera Barat

Gambar 2-1 memperlihatkan susunan batuan yang dimulai dari tua ke muda. Batuan tertua di daerah ini dimulai dari Formasi Batugamping Rabu yang terdiri dari batugamping, lempungan, silikaian dan terdapat anggota Batugamping Terumbu berumur Mesozoik. Diatasnya diendapkan Formasi Longa yang terdiri dari serpih, sedimen turbidit, gamping tipis sisipan berumur Mesozoik. Selanjutnya secara selaras diendapkan Kompleks Indrapuri berupa melange tektonik, serpentin, ultra mafik, batuan beku. Diatasnya diendapkan secara tidak selaras diendapkan Formasi Meucampli yang terdiri dari batupasir mikaan, konglomerat, batulanau, batugamping, berumur Miosen Bawah. Selanjutnya diatasnya diendapkan secara selaras Formasi Peunasu yang terdiri dari batupasir mikaan, batulanau, serpih, batulumpur, batugamping terumbu. Selanjutnya diatasnya diendapkan Formasi Indrapuri yang terdiri dari endapan undak tua, kerikil, pasir. Diatasnya diendapkan secara tidak selaras diendapkan Formasi Seulimeaim yang terdiri dari batupasir tufaan, batugamping dan konglomerat. Diatasnya secara tidak selaras diendapkan batuan gunungapi Lamteubu yang terdiri dari batuan gunungapi andesit, dasit, tufa dan aglomerat. Diatasnya secara tidak selaras diendapkan endapan lahar aliran. Selanjutnya secara tidak selaras diatasnya diendapkan pematang pantai berupa pasir lepas dan endapan aluvium yang sekarang masih aktif berupa lempung, lanau, pasir, kerikil.

Struktur geologi yang berkembang di daerah Padang umumnya berupa patahan/sesar mendatar dengan arah baratlaut - tenggara dan timurlaut – baratdaya, beberapa diantaranya berarah hampir utara – selatan dan barat – timur. Patahan tersebut dapat menghasilkan suatu zona blok faulting.

2.2. Geologi Padang dan Sekitarnya



Gambar 5. Peta geologi daerah Padang dan sekitarnya (sumber : LIPI Geoteknologi)

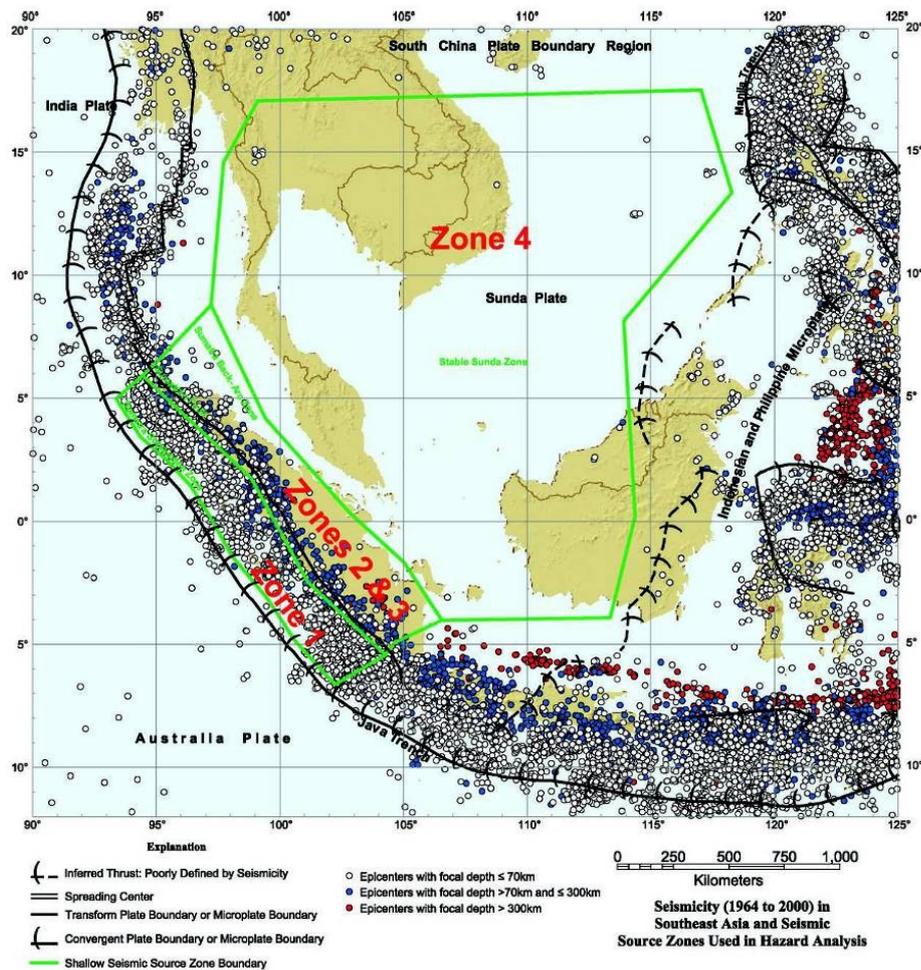
Geologi Padang dan sekitarnya merupakan endapan dataran pantai Holosen yang berhadapan dengan endapan laut terbuka yang dibagian timur dibatasi oleh graben berupa patahan-patahan yang berarah hampir barat laut - tenggara. Dicitrakan oleh endapan kuarter yang terdiri dari endapan pematang pantai, endapan *swamp*, dan endapan aluvial. Dataran tersebut terpisah oleh laut terbuka dan pematang pantai yang bagian belakangnya terbentuk rawa-rawa pantai sebagai endapan *swamp*. Gambaran geologi pesisir ini dicirikan oleh endapan pasir yang lepas, kerikil dengan ketidakmenerusan lapisan lanau dan lempung dan beberapa tempat jenuh air, dimana sebaran pematang pantai sisi barat laut lebih dominan yang ditafsirkan sebagai zona sumber endapannya (Gambar 5).

2.3. Tektonik dan Kegempaan

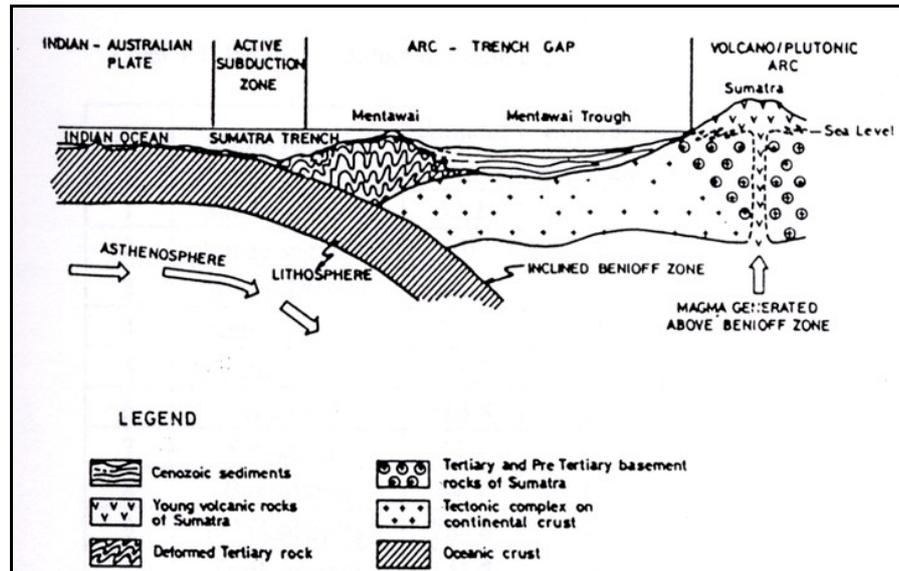
2.3.1. Tektonik

Wilayah pantai barat Sumatera dan sekitarnya merupakan wilayah yang memiliki kerentanan bahaya gempabumi yang tinggi karena wilayah ini berada ± 250 km sebelah timur zona subduksi Sumatera yang bergerak sekitar 40 s/d 70 mm per tahun (Natawijaya dkk, 2003). Daerah perbatasan lempeng ini merupakan zona seismisitas yang aktif, sehingga banyak terjadi gempa bumi tektonik yang diakibatkan oleh tumbukan antar lempeng tersebut.

Dengan demikian proses tektonik yang terjadi di daerah Sumatera saat ini didominasi oleh terjadinya tumbukan antara lempeng Hindia dengan busur kepulauan Sumatera. Juga proses tektonik yang terjadi di daratan pulau Sumatera. Dari Gambar 6, terlihat bahwa sepanjang pantai barat Sumatera, pantai selatan Jawa, selatan Bali, merupakan daerah yang dekat dengan batas antar lempeng. Letak yang berdekatan dengan batas antar lempeng ini mengakibatkan daerah-daerah tersebut rawan terhadap aktivitas seismik yang ditimbulkan oleh pergeseran antar lempeng. (Gambar 7).



Gambar 6. Kondisi tektonik Indonesia Bagian Barat.

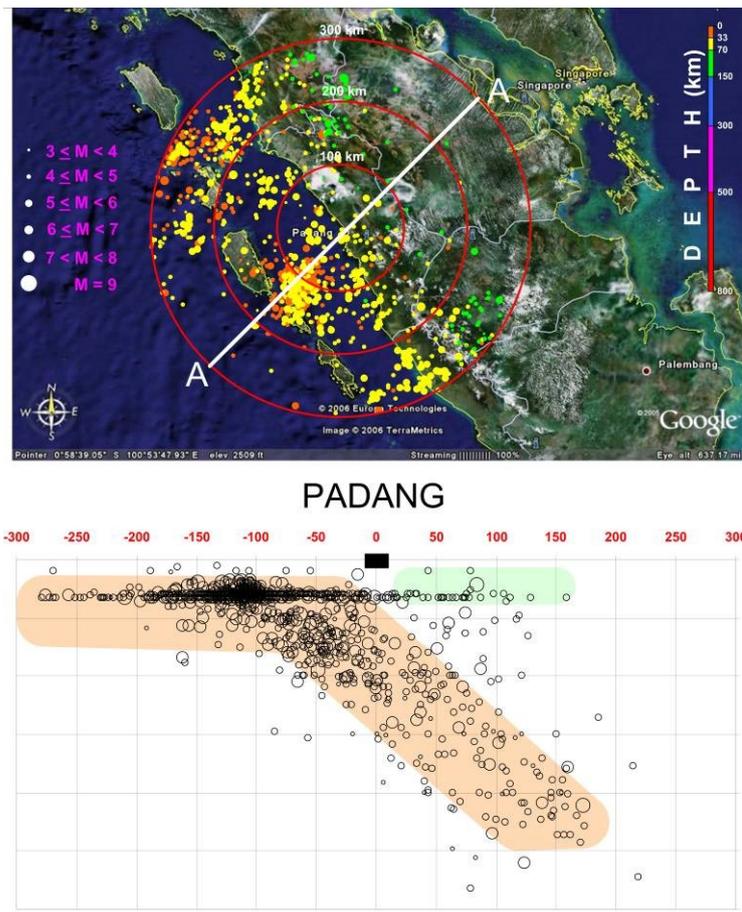


Gambar 7. Peta penampang tumbukan utara-selatan, zona Sumatera

2.3.2. Kegempaan

Sepanjang pantai barat Sumatera, pantai selatan Jawa, selatan Bali merupakan bagian busur kepulauan daerah ini paling sering diguncang gempa bumi. Gempabumi tersebut umumnya berkekuatan 4 – 6 skala Richter, beberapa diantara berkekuatan > 6 pada skala Richter. Berdasarkan sebaran, kekuatan dan kedalaman serta hubungan dengan kejadian, Pulau Sumatera dapat dikenal ada dua sumber gempa bumi yaitu dari zona tumbukan antar lempeng (jalur penunjaman) dan jalur daratan, dimana yang sering terjadi pada jalur tunjaman (Petersen, M.D dkk, 2004 dan Natawidjaja, D, 2003). Aktifitas kegempaan di daerah Padang dan sekitarnya pada radius 300 km dapat dilihat pada Gambar 8.

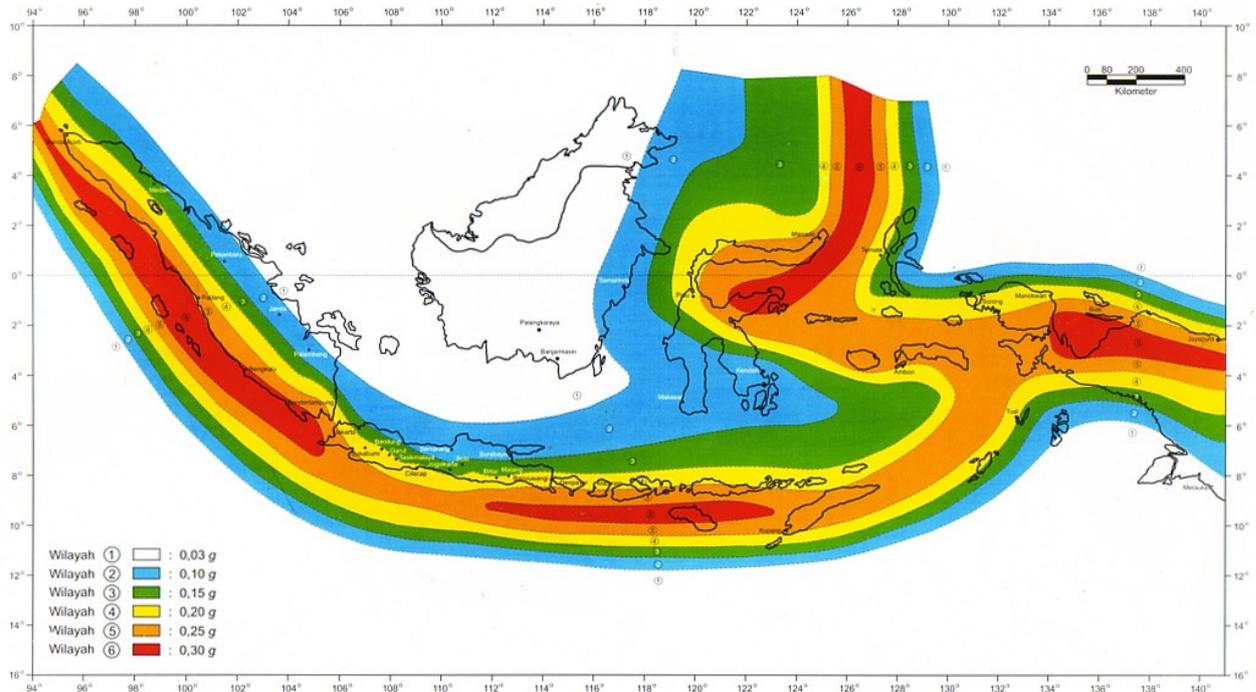
Berdasarkan laporan USGS, kejadian gempa Padang pada tanggal 30 September 2009 jam 17:16:09 tersebut bersumber di 0.788°LS , 99.961°BT dengan kedalaman fokus 80 km dan hanya berjarak 45 km dari kota Padang. Sehubungan lokasi sumber gempa yang relatif dalam, diperkirakan kejadian gempa tersebut berada pada plat Australia dan bukan pada permukaannya. Kejadian gempa yang pernah terjadi di daerah subduction tersebut umumnya terjadi pada kedalaman kurang dari 50 km. Akibat sumber gempa yang relatif dalam ini maka tingkat kerusakan yang terjadi juga cukup meluas.



Gambar 8. Peta sebaran kegempaan dan pusat gempa di daerah Padang dan sekitarnya.

2.3.3. Percepatan Puncak Gempa

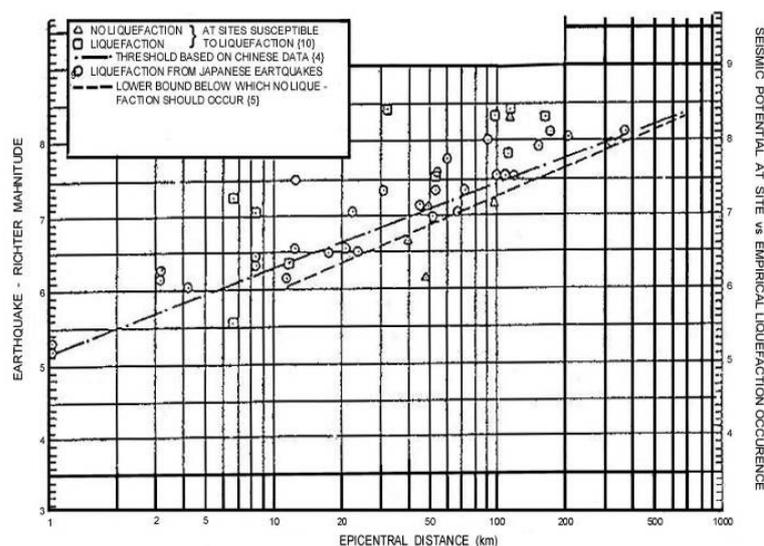
Salah satu faktor yang penting diketahui dalam analisis likuifaksi adalah percepatan gempa di batuan dasar. Berdasarkan SNI 03 – 1726 – 2002 diketahui bahwa untuk wilayah Indonesia ditetapkan terbagi dalam 6 wilayah gempa seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9. Berdasarkan gambar tersebut diketahui bahwa kota Padang berada pada wilayah 5 dimana percepatan puncak pada batuan dasar sebesar 0.25 g. Pada kejadian gempa Padang 30 September 2009 diinformasikan bahwa percepatan puncak yang terjadi mencapai 0.28 g. Pada kajian analisa likuifaksi akan dilakukan analisa menggunakan percepatan gempa 0.28 g.



Gambar 9. Wilayah gempa Indonesia dengan percepatan puncak batuan dasar dengan periode ulang 500 tahun

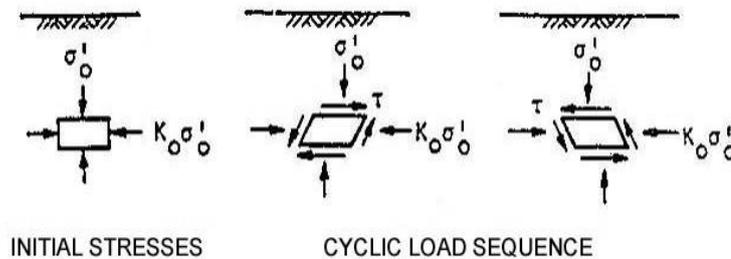
3. Kajian Fenomena Likuifaksi

Peristiwa gempa di Niigata dan Alaska pada tahun 1964 yang menyebabkan banyak kerusakan merupakan awal dari studi likuifaksi. Berdasarkan hasil pemantauan gempa yang menyebabkan terjadinya likuifaksi, dapat ditarik suatu hubungan antara besaran gempa dan jarak kritis suatu daerah terhadap episentrum yang dapat mengalami likuifaksi. Hubungan tersebut ditampilkan oleh US Bureau of Reclamation seperti Gambar 10.

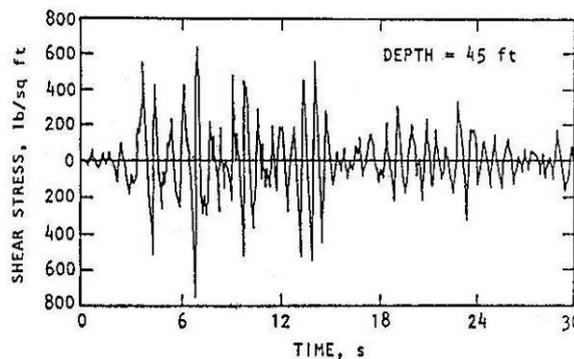


Gambar 10. Hubungan antara Magnitude Gempa dengan Jarak Kritis Kejadian Likuifaksi (Sumber : Bureau Reclamation, 1984)

Penyebab utama terjadinya likuifaksi pada saat gempa adalah karena terjadinya peningkatan tekanan air pori (excess pore water pressure) akibat tegangan siklik (tegangan geser bolak-balik) dalam getaran tanah. Tegangan siklik ini terjadi karena perambatan ke atas dari gelombang geser yang berasal dari pusat pelepasan energi. Jadi elemen tanah dibayangkan mengalami tegangan geser secara berturut-turut seperti diilustrasikan pada Gambar 11. Tegangan geser tersebut secara alamiah sesungguhnya bersifat acak, tetapi bersifat siklik (bolak-balik). Gambar 12 menunjukkan variasi tegangan geser terhadap waktu dari hasil respon analisis perambatan gelombang gempa pada suatu lapis.



Gambar 11. Idealisasi Elemen Tanah di Lapangan Saat Gempa. (Sumber : Seed dan Idriss, 1966)



Gambar 12. Variasi Tegangan Geser dari Respon Analisis. (Sumber : Seed dan Idriss, 1966)

Akibat dari tegangan siklik tersebut maka struktur tanah pasir akan cenderung mengecil volumenya, tetapi karena peristiwanya terjadi secara amat cepat, maka pengecilan volume dicegah (air tidak sempat keluar dari pori-pori tanah) sehingga terjadi pengalihan tegangan tersebut kepada air pori dan pengurangan tegangan kontak antar partikel tanah. Bila tegangan air pori tersebut mendekati harga tegangan total elemen tanah pada kedalaman yang ditinjau, maka elemen tersebut akan mengalami deformasi yang besar. Secara teoritis deformasi ini tidak terbatas (terjadi pengaliran). Pada tanah pasir yang lepas maka kondisi tersebut akan lebih cepat dicapai.

Proses likuifaksi tanah pasir dengan cara di atas dapat terjadi pada lapisan pasir dengan kombinasi antara kepadatan relatif tanah dan tegangan keliling serta getaran yang tertentu. Zona seperti ini dapat terjadi dekat permukaan maupun pada suatu kedalaman tergantung kondisi pasir dan tingkat getaran akibat gempa. Tetapi pencairan lapis atau pasir dapat saja terjadi karena pengaliran air oleh peristiwa pencairan yang terjadi pada lapis di bawahnya.

3.1. Fenomena Likuifaksi

Pada tanah non-kohefif yang jenuh, kecenderungan penurunan dan peningkatan beban pada kondisi tak teralir disebabkan karena terjadinya pemadatan akibat meningkatnya tekanan air pori dan menurunnya tegangan efektif. Fenomena likuifaksi yang dihasilkan dari proses ini dapat dibagi menjadi 2 bagian yaitu flow liquifaction dan cyclic mobility.

Kenyataan yang terjadi di lapangan, terjadinya flow Liquifaction lebih sedikit frekuensinya dibandingkan dengan cyclic mobility tetapi mempunyai pengaruh yang lebih besar. Cyclic mobility dapat terjadi pada jenis dan keadaan tanah yang luas, dan memberikan tingkat kerusakan dari tingkat yang kecil sampai sangat besar. Pada pembahasan berikutnya pengertian likuifaksi meliputi kedua hal ini.

3.1.1. Flow Liquifaction

Flow liquifaction menghasilkan pengaruh yang sangat besar pada setiap terjadinya likuifaksi dan semua hal yang berhubungan dengan kejadian ini yang mengakibatkan terjadinya ketidakstabilan yang disebut flow failure. Flow liquifaction dapat terjadi karena tegangan geser yang diperlukan untuk keseimbangan massa tanah (tegangan geser statik) lebih besar daripada kekuatan geser tanah pada keadaan cair. Singkatnya deformasi besar terjadi karena flow liquifaction akibat tegangan geser statik. Tegangan siklik akan secara mudah membuat tanah menjadi keadaan yang tidak stabil, dimana kekuatannya akan segera menurun akibat tegangan statik yang menyebabkan terjadinya flow failure. Keruntuhan flow liquifaction ditandai dengan perubahan yang tiba-tiba dari keadaan awalnya, kecepatan pengembangan yang terjadi dan terjadi jarak yang besar antar material tanah yang tidak berpindah.

3.1.2. Cyclic Mobility

Fenomena yang lain adalah cyclic mobility yang dapat mengakibatkan deformasi permanen yang besar selama guncangan gempa bumi. Perbedaan yang jelas dengan flow liquifaction yaitu cyclic mobility terjadi jika tegangan geser statik lebih kecil dari kekuatan geser tanah dalam keadaan cair. Deformasi yang dihasilkan dari keruntuhan cyclic mobility akan bertambah selama guncangan gempa bumi dan deformasi ini terjadi akibat tegangan geser siklik dan statik. Deformasi yang sering disebut sebagai lateral spreading (sebaran lateral) ini dapat terjadi pada tanah yang memiliki kemiringan atau pada tanah datar yang berdekatan dengan sumber air. Jika terdapat struktur bangunan, lateral spreading dapat mengakibatkan kerusakan yang sangat besar.

Peristiwa khusus dari cyclic mobility adalah level-ground liquifaction. Level ground liquifaction yang besar dapat terjadi akibat adanya pergerakan yang acak yang sering disebut sebagai ground oscillation (osilasi tanah) selama guncangan gempa dan hanya mengakibatkan perubahan lateral tanah yang kecil. Keruntuhan level-ground liquifaction disebabkan karena adanya aliran air yang terjadi selama gempa yang meningkatkan tekanan air pori. Keruntuhan level ground liquifaction dapat terjadi setelah guncangan permukaan berhenti. Tanda-tanda terjadinya keruntuhan level ground liquifaction yaitu meningkatnya penurunan dalam arah vertikal, penggenangan pada dataran yang rendah dan terjadinya sand boil.

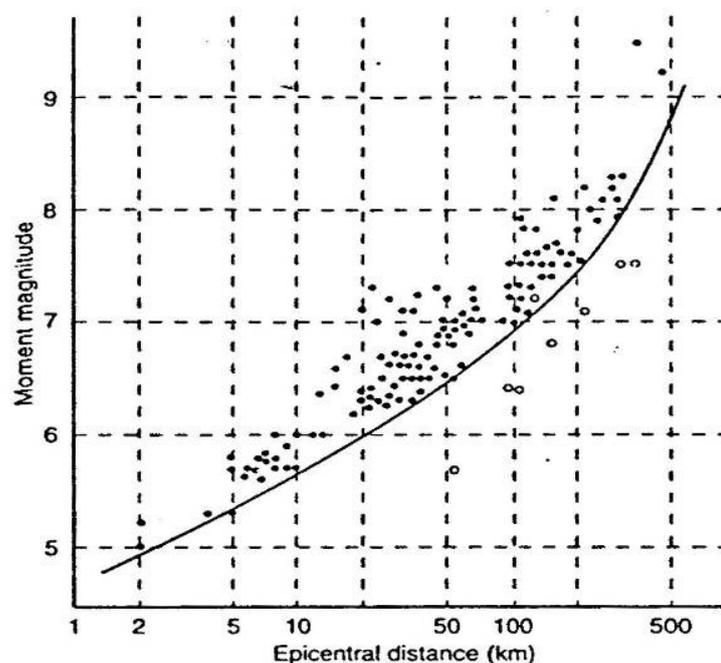
3.2. Kerentanan Likuifaksi

Tidak semua tanah rentan terhadap likuifaksi, untuk itu langkah pertama dalam mengevaluasi bahaya likuifaksi adalah mengevaluasi kerentanan terhadap likuifaksi. Jika sebagian tanah tidak bersifat rentan (susceptible), bahaya likuifaksi tidak ada dan evaluasi bahaya likuifaksi dapat diakhiri. Jika tanah bersifat rentan analisis likuifaksi dan pengaruhnya harus di perhatikan. Ada beberapa kriteria yang dapat digunakan dalam mengevaluasi kemudahan terjadinya likuifaksi dan beberapa perbedaan untuk flow likuifaksi dan cyclic mobility. Hal ini termasuk sejarah (historical), geologi (geologic) dan komposisi (compositional)

3.2.1. Kriteria Historis (Historical Criteria)

Informasi mengenai perilaku likuifaksi didapat dari penyelidikan di lokasi setelah terjadinya gempa, yang mana menunjukkan bahwa likuifaksi seringkali terjadi pada tempat yang sama dimana tanah dan kondisi air tanah tidak berubah. (Youd, 1984). Sejarah likuifaksi dapat digunakan untuk mengidentifikasi keadaan daerah yang spesifik atau kondisi tanah umum yang dapat menunjukkan kerentanan terhadap likuifaksi pada gempa yang akan terjadi. Youd (1991) menggambarkan sejumlah contoh dimana bukti sejarah likuifaksi digunakan untuk membuat peta kerentanan likuifaksi.

Penyelidikan di lokasi setelah terjadinya gempa juga menunjukkan bahwa efek likuifaksi terbatas pada suatu zone dalam jarak tertentu dari sumber gempa. Ambraseys (1988) mengumpulkan data gempa dangkal di seluruh dunia untuk memperkirakan batas jarak epicentral dimana likuifaksi tidak nampak pada gempa dengan magnitude yang berbeda. Jarak epicentral dimana likuifaksi dapat diperkirakan akan bertambah dengan meningkatnya magnitude. Hubungan yang ditunjukkan pada Gambar 13 tidak menjamin bahwa likuifaksi tidak terjadi pada jarak yang lebih besar, tetapi dapat membantu untuk memperkirakan bahaya likuifaksi pada suatu daerah.



Gambar 13. Hubungan antara Jarak Epicentral Site dan Momen Magnitude (Sumber : Kramer, 1996)

3.2.2. Kriteria Geologi (Geologic Criteria)

Lapisan tanah yang rentan terhadap likuifaksi berada dalam daerah geologi yang relatif terbatas (Youd 1991). Daerah lapisan, daerah hidrologi dan umur lapisan mempunyai efek kerentanan terhadap likuifaksi (Youd and Hoose, 1977).

Proses geologi akan membagi tanah pada distribusi ukuran butiran yang seragam dan menjadikannya sebagai lapisan pada keadaan lepas yang menghasilkan lapisan tanah dengan tingkat kerentanan terhadap likuifaksi yang tinggi. Akibatnya lapisan fluvial dan lapisan colluvial serta aeolian jika dalam keadaan jenuh akan sangat rentan mengalami likuifaksi. Likuifaksi biasanya diamati dalam lapisan alluvial-fan, alluvial plain, beach, terrace, playa dan estuarine, tetapi tidak selalu terjadi pada lapisan tersebut. Kerentanan dari lapisan yang lebih tua untuk mengalami likuifaksi pada umumnya lebih rendah daripada lapisan yang lebih muda. Tanah dengan usia holocene akan lebih rentan mengalami likuifaksi daripada tanah dengan umur pleistocene, walaupun demikian tingkat kerentanan akan menurun dalam usia holocene. Likuifaksi pada lapisan pleistocene jarang terjadi.

Likuifaksi hanya terjadi pada tanah jenuh, sehingga kedalaman muka air tanah akan mempengaruhi kerentanan terhadap likuifaksi. Kerentanan terhadap likuifaksi akan menurun dengan bertambah dalamnya muka air tanah, dan pengaruh likuifaksi secara langsung dapat diamati di lapangan dimana muka air tanah berada beberapa meter dari permukaan tanah. Di daerah dimana level muka air tanah berfluktuasi (berubah) secara jelas, bahaya likuifaksi juga akan berubah.

Lapisan tanah yang dibuat oleh manusia harus mendapat perhatian. Timbunan lepas, seperti timbunan yang tidak dikompaksi sangat mudah untuk mengalami likuifaksi.

3.2.3. Kriteria Komposisi (Compositional Criteria)

Peristiwa likuifaksi memerlukan peningkatan tekanan air pori, sehingga kerentanan terhadap likuifaksi akan dipengaruhi oleh komposisi karakteristik yang mempengaruhi perilaku perubahan volume. Komposisi karakteristik untuk mempertahankan perubahan volume yang besar sangat berhubungan dengan kerentanan terhadap likuifaksi. Karakteristik ini meliputi ukuran, bentuk dan gradasi partikel.

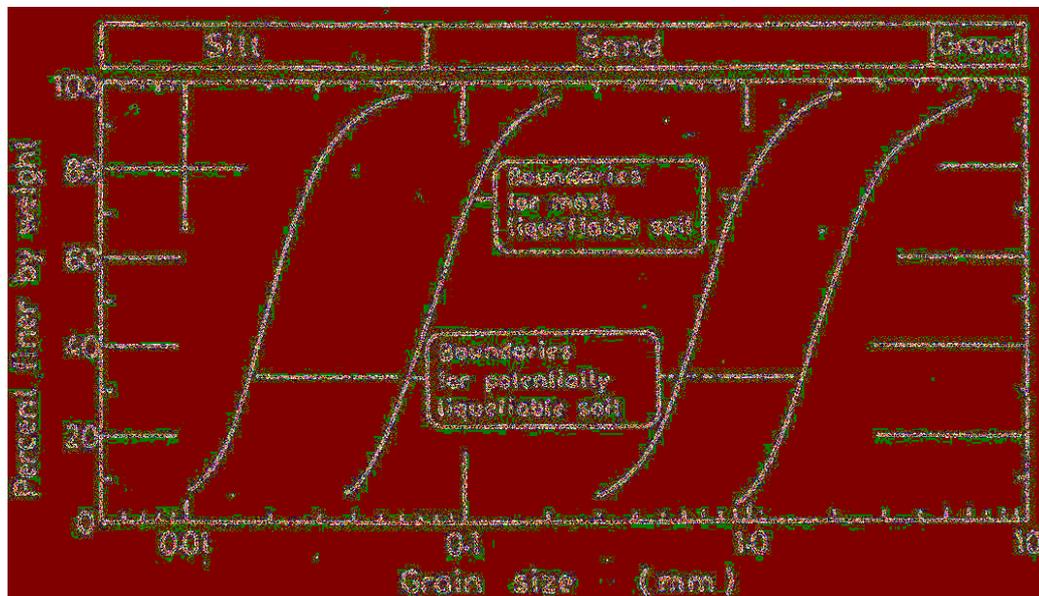
Selama bertahun-tahun, pemikiran tentang terjadinya likuifaksi hanya terbatas pada tanah pasir. Tanah dengan butiran yang lebih halus tidak mampu secara langsung meningkatkan tekanan air pori yang besar sehubungan dengan likuifaksi dan tanah dengan butiran yang lebih kasar terlalu permeabel untuk menahan tekanan air pori secara menyeluruh selama proses likuifaksi.

Likuifaksi dari tanah lanau yang non plastis telah diteliti oleh Ishihara (1984, 1985) di laboratorium maupun di lapangan dan menunjukkan bahwa karakteristik plastisitas memberikan indikasi lebih baik daripada ukuran butiran sendiri dalam pengaruhnya terhadap kerentanan terhadap likuifaksi daripada tanah berbutiran halus. Ada 4 Chinese criteria (Wang, 1979) yang menyebabkan tanah rentan terhadap likuifaksi yaitu

- Persen lebih halus dari $0.005 \text{ mm} \leq 15 \%$
- Liquid limit, $LL \leq 35 \%$

- Natural Water Content $\geq 0.9 LL$
- Liquidity Index ≤ 0.75 .

Disamping Chinese criteria diatas, Tsuchida (1970) mengemukakan sebuah chart gradasi ukuran butiran tanah untuk memperkirakan kerentanan tanah yang mengalami likuifaksi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 14. Ukuran butiran tanah yang rentan mengalami likuifaksi (Sumber : Tsuchida, 1970)

3.3. Metode Evaluasi Likuifaksi

Seed et al. (1971) mempergunakan cyclic triaxial dan simple shear test untuk mensimulasikan reaksi tanah di lapangan menjadi pembebanan siklik. Pengamatan menunjukkan bahwa deformasi besar yang dialami oleh tanah terjadi setelah adanya peningkatan tekanan pori (Δu) yang mengakibatkan penurunan tegangan efektif keliling (σ_3') ke nilai yang rendah. Jika peningkatan tekanan pori tersebut hampir menyamai tegangan keliling, maka tanah tersebut dapat dikatakan telah mencapai keadaan likuifaksi.

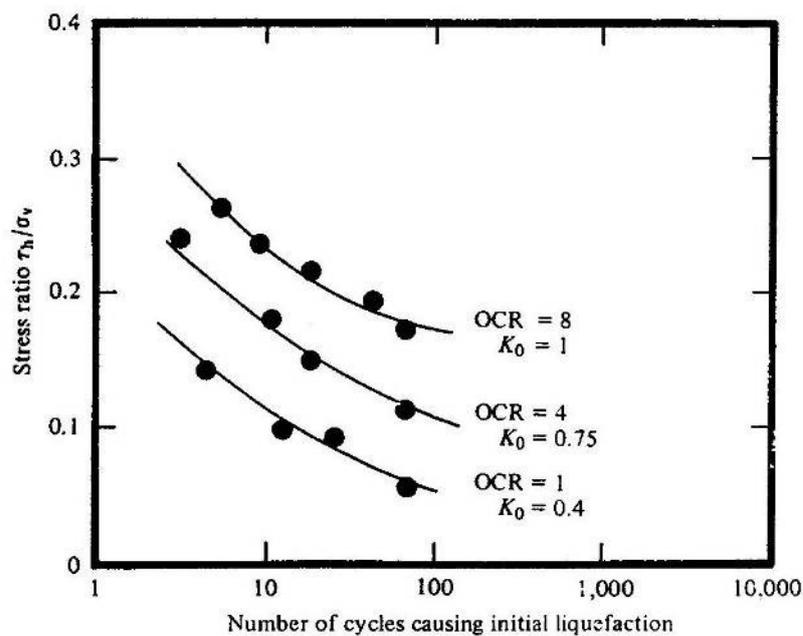
Seed menemukan suatu parameter sederhana untuk mengungkapkan karakteristik tanah dalam pembebanan siklik, yaitu ratio rata-rata dari tegangan geser siklik, τ_{av} yang diperoleh dari hasil pembebanan siklik pada permulaan tegangan vertikal efektif, σ_o' . yang juga disebut rasio tegangan siklik, τ_{av}/σ_o' (cyclic stress ratio). τ_{av}/σ_o' diperlukan untuk mengetahui kedalaman lapisan tanah yang ikut terpengaruh, kedalaman permukaan tanah dan intensitas getaran.

Tahanan geser siklik tanah adalah tegangan geser siklik yang diperlukan untuk mengakibatkan likuifaksi. Konsep dasar dari metode ini ialah membandingkan tegangan geser siklik yang diperoleh dari uji laboratorium yang menyebabkan terjadinya likuifaksi, τ_{av}/σ_o' dengan tegangan geser siklik yang timbul di lapangan akibat gempa, τ_l/σ_o' . Daerah dimana $\tau_l/\sigma_o' > \tau_{av}/\sigma_o'$ merupakan daerah terjadinya likuifaksi.

Valera dan Donovan (1977) menyatakan bahwa metode evaluasi likuifaksi dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kategori yaitu :

1. Metode perhitungan sederhana, dimana tegangan geser siklik yang berhubungan dengan kandungan tanah, jumlah siklus tegangan dan distribusinya terhadap waktu.
2. Metode yang hanya memperhitungkan tegangan siklik tanah yang berhubungan dengan kandungan tanah dengan menggunakan analisa responsi tanah.
3. Metode empiris berdasarkan data lapangan.

Metode pertama dan kedua di atas memerlukan data uji laboratorium hubungan rasio tegangan siklik dengan jumlah siklus tegangan yang menyebabkan likuifaksi atau jumlah siklus regangan yang dibutuhkan (Gambar 15). Perbandingan dari tegangan siklik di lapangan dengan tegangan siklik yang menyebabkan likuifaksi atau jumlah regangan siklik di laboratorium memberikan suatu cara untuk mengevaluasi faktor keamanan terhadap likuifaksi.



Gambar 15. Pengaruh OCR pada Tegangan yang Menyebabkan Likuifaksi Pada Uji Simple Shear (Sumber : Seed dan Peacock, 1971)

Contoh sederhana dari metode pertama diperlihatkan oleh Seed dan Idriss (1971) dengan mempergunakan hasil uji laboratorium yang berdasarkan beban siklik sejenis yang disimulasikan dengan kekakuan tanah dalam pembebanan siklik yang tak beraturan akibat gempa. Data hasil percobaan tersebut diharapkan dapat memperlihatkan gaya perlawanan tanah terhadap likuifaksi dengan memberikan respon jumlah siklus beban yang dibutuhkan.

Metode kedua mempergunakan analisa respon tanah untuk mendapatkan nilai τ_{av} , berdasarkan teori perambatan gelombang satu dimensi yang memperhitungkan hubungan tegangan geser dinamik dan distribusi serta variasinya terhadap waktu.

Metode ketiga berbeda dengan kedua metode terdahulu. Metode ini mempergunakan hasil uji In Situ yang memperlihatkan karakteristik tanah dimana respon tanah terjadi terhadap pembebanan

siklik dengan membandingkan potensi likuifaksi yang diteliti dengan tanah yang mengalami likuifaksi. Metode ini biasanya menggunakan Standard Penetration Test (SPT) dan Cone Penetration Test (CPT).

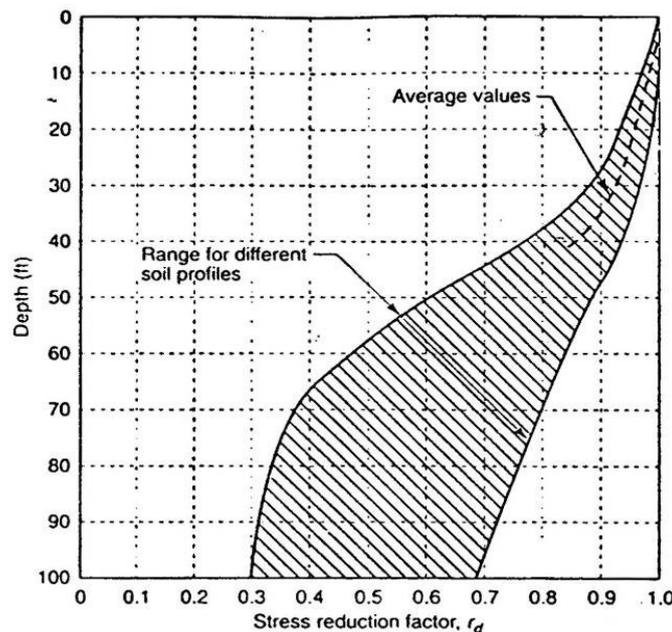
3.3.1. Metode Seed Berdasarkan Hasil Uji SPT

Seed et al. (1971, 1979, 1984) yang pertama kali menyatakan adanya hubungan antara rasio tegangan siklik dan jumlah pukulan (N-SPT). Perhitungan tegangan geser yang menyebabkan likuifaksi pada setiap kedalaman dapat mempergunakan persamaan sebagai berikut :

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

dimana :

- amax = percepatan horizontal maksimum permukaan tanah
- γ = berat jenis tanah
- h = kedalaman di bawah permukaan tanah
- r_d = faktor reduksi kedalaman tanah
- g = gaya gravitasi bumi



Gambar 16. Rentang Nilai Faktor Reduksi Tegangan, r_d , terhadap Kedalaman (Sumber : Seed dan Idriss, 1971)

Bilangan 0.65 merupakan angka yang diusulkan Seed sebagai angka maksimum yang dipergunakan untuk menghitung tegangan rata-rata. Faktor reduksi kedalaman tanah, r_d , merupakan penunjuk bahwa tanah bersifat deformable dan bukan bersifat rigid (kaku). Rentang nilai r_d dari 1 pada permukaan tanah hingga 0.5 pada kedalaman kurang lebih 100 ft (30m) di bawah permukaan tanah (Gambar 16) karena kolom bersifat deformable maka tegangan geser

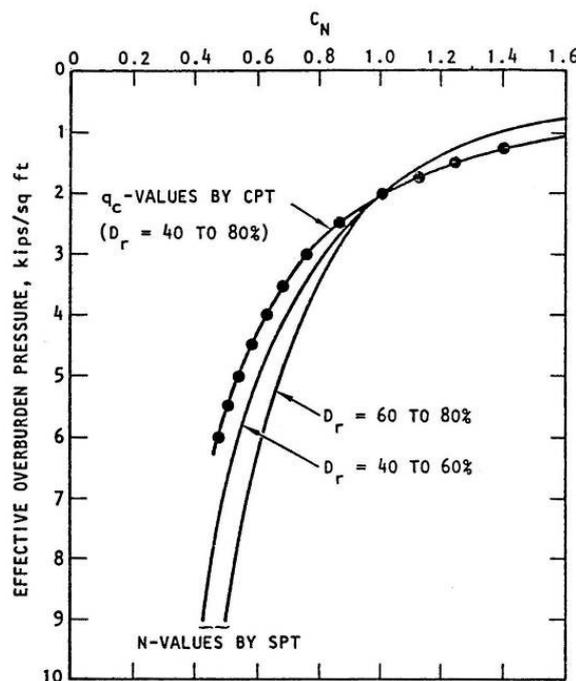
yang sebenarnya terjadi pada kedalaman h adalah $(\tau_{\max})_d$ sebesar hasil perhitungan dengan analisa respon dan lebih kecil dari $(\tau_{\max})_r$ sehingga dapat dinyatakan dengan :

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

Susbskrip r menunjukkan rigid sedangkan Susbskrip d menunjukkan deformable. Perhitungan secara analisa untuk harga r_d untuk berbagai variasi gempa dan kondisi tanah memberikan kurva pada Gambar 16. Sehingga bila tegangan geser dinormalisasi dengan tegangan keliling pada kedalaman yang di evaluasi diperoleh:

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

dimana $\sigma_0' =$ tegangan keliling efektif pada kedalaan yang ditinjau.



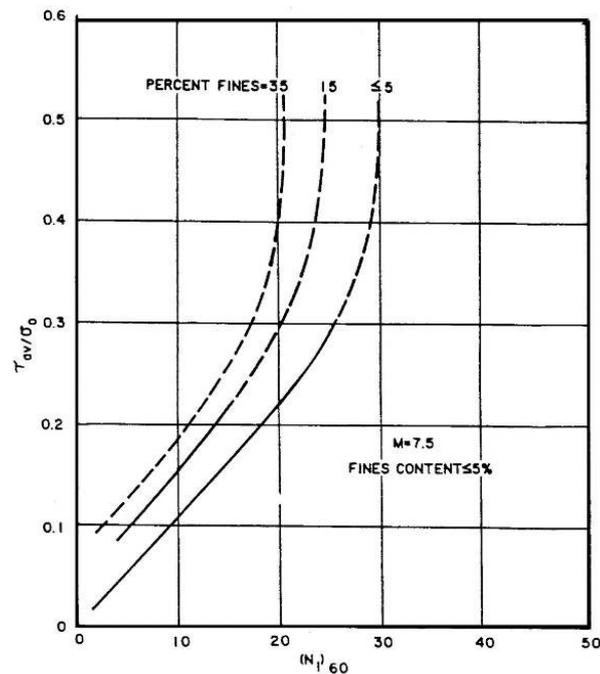
Gambar 17. Hubungan Tegangan Keliling Efektif dengan Nilai C_N (Sumber : Seed et al., 1971)

Tahanan geser siklik tanah diperoleh dari kurva likuifaksi yang berdasarkan data di lapangan. Pada awal perkembangan hubungan rasio tegangan siklik dan N-SPT diasumsikan bahwa segala faktor yang mempengaruhi tanah akibat pembebanan siklik juga diperlihatkan pada N-SPT sehingga nilai N-SPT dipergunakan sebagai index gaya perlawanan likuifaksi. Seed mempergunakan gaya perlawanan penetrasi, N_1 untuk mengeliminasi pengaruh batas tekanan, dengan mendefenisikan N_1 sebagai nilai N-SPT pada saat tegangan keliling efektif 96 kPa. Seed juga mengusulkan faktor koreksi terhadap tegangan keliling efektif, C_N berdasarkan data Marcuson dan Bieganousky (1977) yang diperoleh dari hasil penelitian pada Waterways Experiment station seperti yang diperlihatkan pada Gambar 17. Nilai N_1 dapat ditulis sebagai berikut :

$$N_1 = C_N N_{(lapangan)}$$

Untuk menstandarisasi variasi energi yang dihasilkan oleh berbagai jenis hammer, maka dipergunakan rasio energi sebesar 60 %, $(N_1)_{60}$. Pemilihan nilai 60 % berdasarkan jenis hammer yang aman dan sering dipergunakan.

Berdasarkan data dari gempa Miyagiken-Oki yang dikumpulkan oleh Tokimatsu dan Yoshimi untuk pasir berlanau ($D_{50} < 0.15$ mm), Seed dan Idriss menyimpulkan bahwa tanah pasiran bersih lebih mudah mengalami likuifaksi dari pada tanah pasir berlanau. Seed mengusulkan suatu kurva batas tanah yang mengalami tahanan perlawanan standard penetrasi, N_1 , untuk pasir dengan $D_{50} > 0.25$ mm mendekati untuk pasir berlanau ($D_{50} < 0.15$ mm) ditambah 7.5. Dengan demikian batas nilai yang dipergunakan untuk tanah pasir dapat digunakan oleh tanah lanau dengan cara menambahkan nilai 7.5 pada nilai N_1 . Seed memperbaiki kurva yang diusulkannya dengan memperhatikan jumlah kandungan butir halus yang terdapat di dalam tanah pasiran seperti yang diperlihatkan oleh Gambar 18.



Gambar 18. Hubungan Rasio Tegangan yang Menyebabkan Likuifaksi dengan Normalisasi NSPT pada Pasir Berlanau dengan Magnitude 7.5. (Sumber : Seed et al., 1984)

Korelasi dari residual strength dan N-SPT juga memperhitungkan jumlah butir halus yang terkandung dalam pasir. Diketahui bahwa dalam kondisi dimana tekanan air pori dan kepadatan relatif yang sama, gaya perlawanan pasir berlanau lebih kecil dari pada pasir bersih. Untuk mengoreksi perbedaan tersebut Seed memberi suatu persamaan yang dipergunakan pada tanah pasir berlanau agar menghasilkan suatu nilai yang sama dengan tanah pasir bersih :

$$(N_1)_{\text{efektif}} = (N_1)_{\text{lapangan}} + \Delta N_1$$

dimana nilai N_1 tergantung jumlah butiran halus yang terkandung di tanah pasir berlanau. Nilai ΔN_1 dapat diperoleh dari Tabel 1 dengan catatan nilai tersebut merupakan suatu pendekatan karena butiran halus memiliki karakteristik yang berbeda.

Tabel 1. Nilai Pendekatan dari ΔN_1 (Seed , 1987)

Kandungan Butir Halus (%)	ΔN_1
10	1
25	2
50	4
75	5

Berdasarkan kondisi tersebut untuk megevaluasi potensi likuifaksi dengan metode Seed dapat dilakukan dengan langkah-langkah berikut :

1. Hitung σ'_0 dan σ_0

dimana σ'_0 = tegangan vertikal efektif titik yang ditinjau

σ_0 = tegangan vertikal titik yang ditinjau

2. Tentukan r_d dengan menggunakan formula :

$$r_d = 1 - 0.015 z$$

atau dengan menggunakan kurva pada Gambar 16.

3. Hitung rasio tegangan yang disebabkan oleh gempa dengan Persamaan :

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

4. Hitung faktor koreksi C_N dengan menggunakan persamaan berikut:

$$C_N = \frac{1.7}{0.7 + \sigma'_0}$$

5. Tentukan nilai $(N_1)_{efektif}$.

6. Tentukan $\frac{\tau_l}{\tau'_o}$ dengan menggunakan Gambar 18.

7. Bila $M \neq 7.5$ maka $\frac{\tau_l}{\tau'_o}$ harus dikoreksi dengan formula sebagai berikut :

$$\left(\frac{\tau_l}{\sigma'_0} \right)_{M=a} = K \times \left(\frac{\tau_l}{\sigma'_0} \right)_{M=7.5}$$

dimana K = faktor koreksi magnitude (lihat Tabel 2)

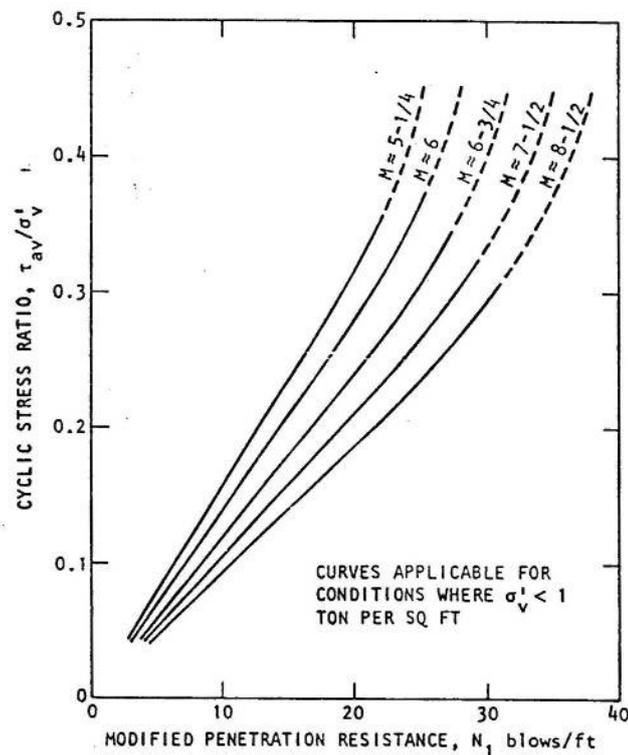
8. Hitung FK dengan menggunakan persamaan berikut :

$$FK = \frac{\left(\frac{\tau}{\sigma_o'}\right)_l}{\left(\frac{\tau}{\sigma_o'}\right)}$$

Jika $FK > 1$ tidak Likuifaksi, $FK < 1$ likuifaksi.

Tabel 2. Faktor Koreksi bila $M \neq 7.5$ (Sumber : Seed, 1982)

Magnitude (M)	Faktor Koreksi (K)
5.25	1.5
6	1.32
6.75	1.13
7.5	1
8.5	0.89



Gambar 19. Evaluasi Potensi Likuifkasi dengan Magnitude Gempa yang Berbeda. (Sumber : Seed, 1987)

3.3.2. Metode Shibata dan Teparaksa Berdasarkan Data Sondir

Shibata dan Teparaksa (1987, 1988) mengusulkan metode evaluasi berdasarkan data sondir yang tersedia di lapangan. Data tersebut dikumpulkan dari beberapa kejadian gempa dimana tersedia data hasil uji sondir yang cukup representatif. Gambar 20 menunjukkan korelasi antara perlawanan ujung sondir yang sudah dinormalisir q_{c1} dan rasio tegangan siklik τ/σ'_o 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. Hitung tegangan vertikal total (σ_o) dan efektif (σ'_o)
2. Hitung faktor koreksi kedalaman (r_d)
3. Hitung rasio tegangan siklik yang terjadi di lapangan dengan menggunakan formula dari Tokimatsu dan Yoshimi yaitu :

$$\frac{\tau}{\sigma'_o} = 0.1(M-1) \frac{a_{maks}}{g} \frac{\sigma_o}{\sigma'_o} r_d$$

dimana :

M adalah besaran gempa

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

4. Hitung Faktor koreksi C_1

$$C_1 = \frac{1.7}{0.7 + \sigma'_o}$$

5. Hitung koreksi sondir (q_{c1})

$$q_{c1} = C_1 \times q_c$$

dimana q_c adalah harga perlawanan ujung sondir.

6. Hitung Faktor Koreksi C_2

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

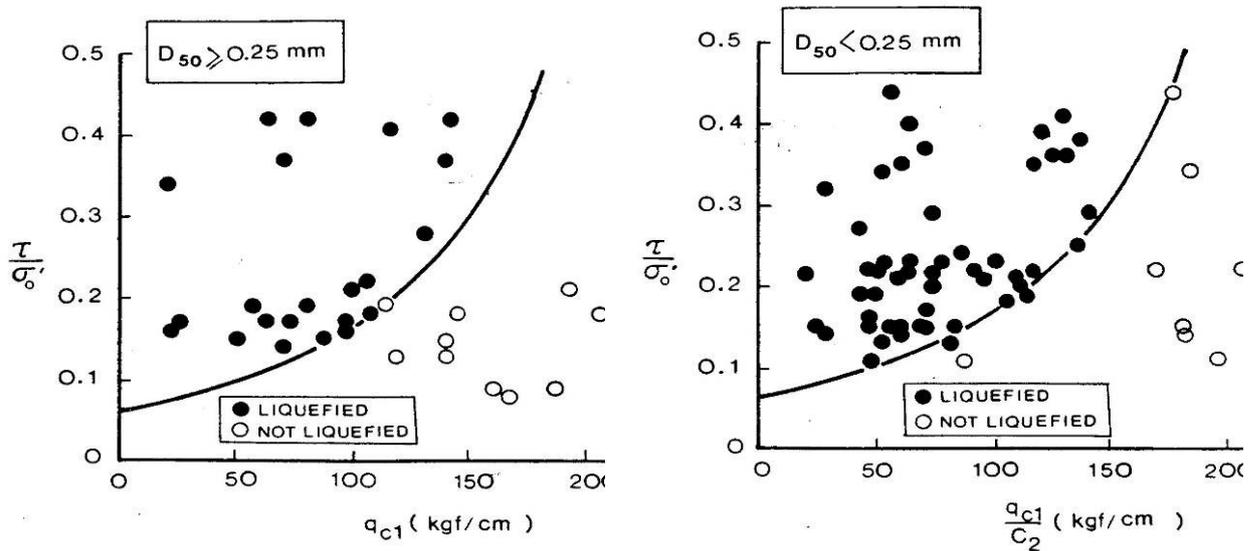
Untuk $D_{50} < 0.25$, $C_2 = D_{50}/0.25$

7. Hitung tegangan siklik akibat gempa dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\left(\frac{\tau}{\sigma'_o} \right)_l = 0.1 + 0.2 \left\{ \frac{(q_{c1}/C_2) - 50}{250 - (q_{c1}/C_2)} \right\}$$

8. Hitung Faktor Keamanan (FK).

Jika $FK > 1$ tidak Likuifaksi, $FK < 1$ likuifaksi.



Gambar 20. .Potensi Likuifaksi Berdasarkan CPT (Sumber : Shibata dan Terapaksa, 1987, 1988)

3.3.3. Estimasi Penurunan Akibat Likuifaksi

Estimasi penurunan akibat likuifaksi dapat dilakukan berdasarkan Metode Ishihara menggunakan kurva hubungan antara faktor keamanan (FK), N_{SPT} , q_c , D_r dan post-liquefaction volumetric strain ϵ_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 $N_{1(60)}$
- Tentukan ϵ_v dengan menggunakan Gambar 21
- Hitung penurunan dengan menggunakan formula :

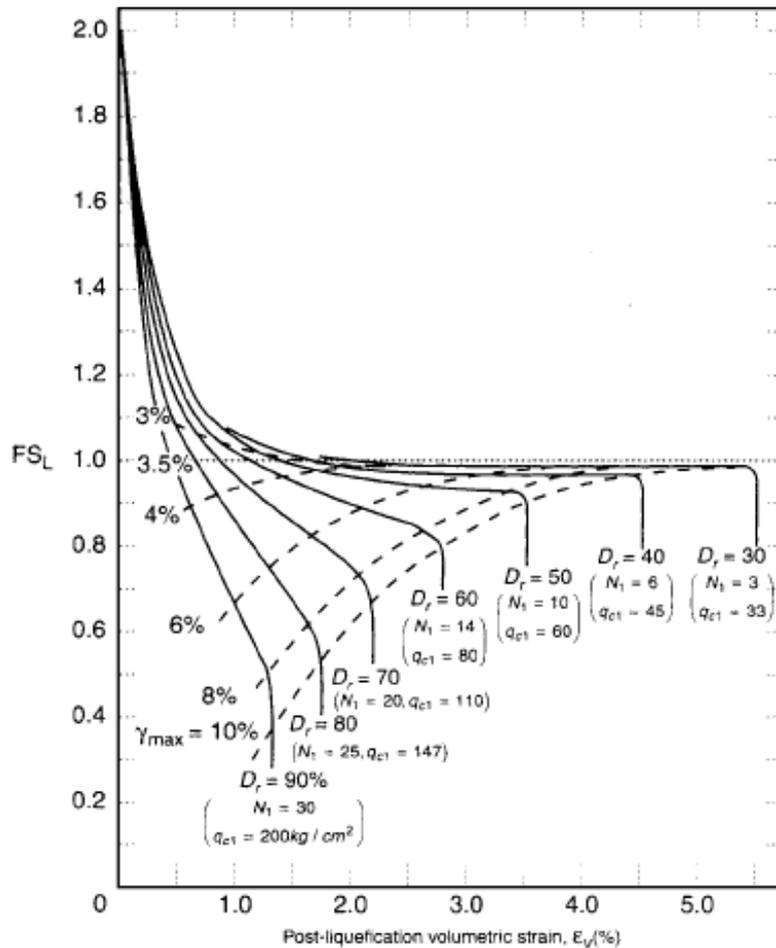
$$S = \sum \epsilon_v \times \Delta h$$

dimana :

S = penurunan maksimum permukaan tanah

Δh = tebal sub lapis

ϵ_v = post-liquefaction volumetric strain (%)



Gambar 21. Kurva Untuk Menentukan Post-liquefaction Volumetric Strain, ϵ_v Sebagai Fungsi Dari Faktor Keamanan (Sumber : Ishihara, 1996)

3.3.4. Penentuan Indeks Potensi Likuifaksi

Liquefaction potential index (LPI) adalah sebuah parameter yang bernilai tunggal untuk mengevaluasi daerah potensi terjadinya likuifaksi. LPI di sebuah situs dihitung dengan mengintegrasikan faktor keamanan (FK) sepanjang kolom tanah sampai kedalaman 20 m. Fungsi beban ditambahkan untuk memberikan berat lebih ke lapisan permukaan tanah. LPI diusulkan oleh Iwasaki et al (1978, 1982) yang diungkapkan sebagai berikut :

$$LPI = \int_0^{20} F(z) \cdot w(z) dz$$

Dimana z adalah kedalaman dari titik tengah lapisan tanah (0 s/d 20 m) dan dz adalah diferensial dari penambahan kedalaman. Faktor beban, $w(z)$ dan faktor keamanan, $F(z)$, dapat dihitung seperti yang dijelaskan berikut ini :

$$F(z) = 1 - FS \text{ for } FS < 1.0$$

$$F(z) = 0 \text{ for } FS \geq 1.0$$

$$w(z) = 10 - 0.5z \text{ for } z < 20 \text{ m}$$

$$w(z) = 0 \text{ for } z > 20 \text{ m}$$

Untuk profil tanah dengan kedalaman kurang dari 20 m, LPI dapat dihitung menggunakan rumus berikut (Luna and Frost, 1998) :

$$LPI = \sum_{i=1}^n \omega_i F_{Si} \text{ for } F_{Si} < 1.0$$

dengan,

$$F_i = 1 - F_{Si} \text{ for } F_{Si} < 1.0$$

$$F_i = 0 \text{ for } F_{Si} \geq 1.0$$

Dimana H_i adalah ketebalan tiap lapisan tanah; n adalah nomor lapisan; F_i adalah faktor keamanan untuk lapisan $-i$; ω_i adalah faktor beban ($= 10-0.5 z_i$); dan z_i adalah ketebalan lapisan $-i$ (m).

Berdasarkan nilai LPI, untuk penilaian kualitatif, dapat dilihat pada Gambar 22.

LPI	Iwasaki et al. (1982)	Luna and Frost (1998)	MERM (2003)
LPI = 0	Very low	Little to none	None
0 < LPI < 5	Low	Minor	Low
5 < LPI < 15	High	Moderate	Medium
15 < LPI	Very high	Major	High

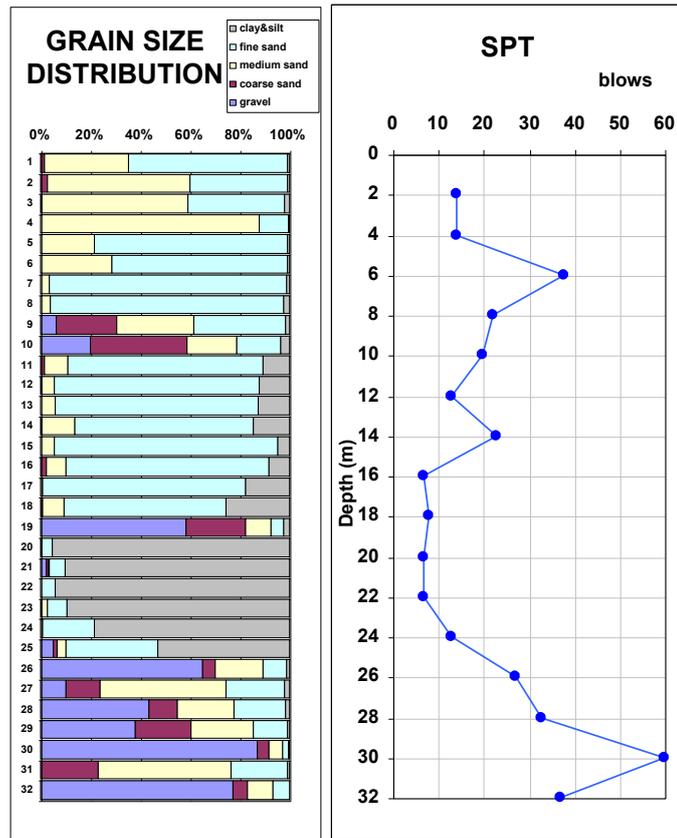
Gambar 22. Tingkatan kekuatan likuifaksi [berdasarkan paper Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12, 2759-2768, 2012]

3.4. Hasil Analisa Likuifaksi

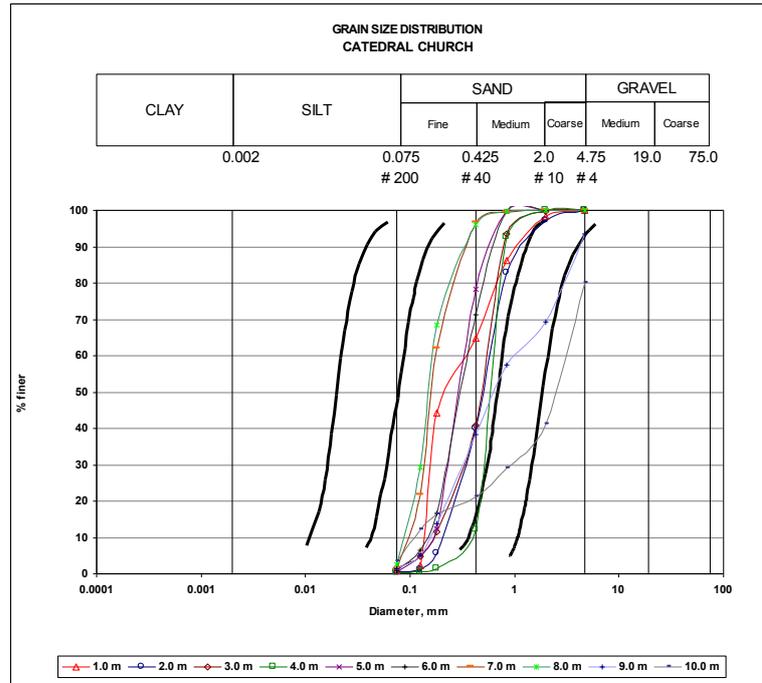
Berdasarkan data-data pengujian lapangan dan laboratorium yang telah dilakukan pada beberapa lokasi, berikut ini akan disampaikan hasil analisa dan penurunan yang terjadi akibat fenomena likuifaksi.

3.4.1. Katedral

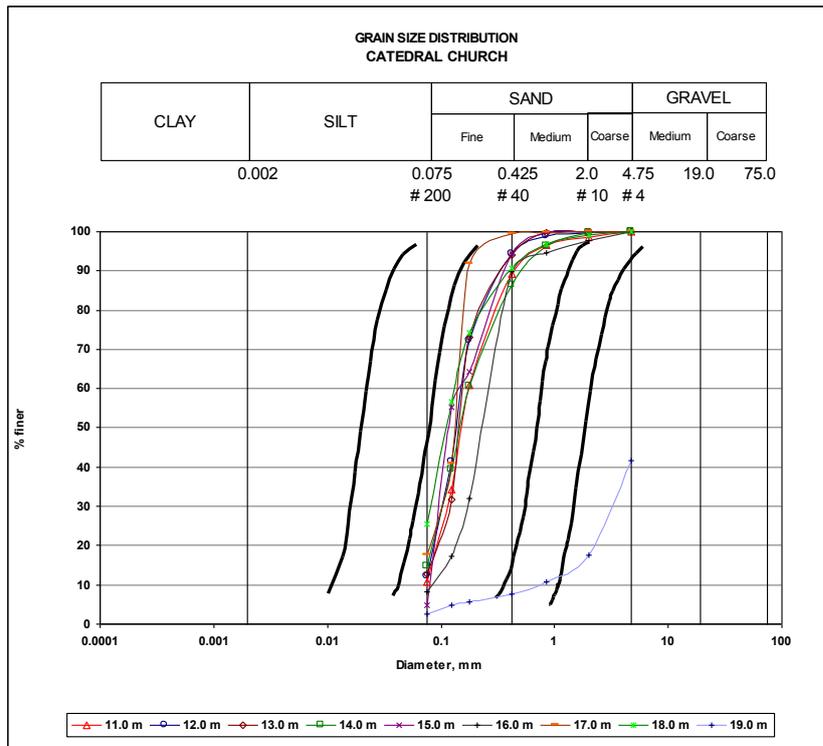
Pada gedung katedral telah dilakukan 1 titik pemboran hingga kedalaman 32.0 m dengan profil nilai SPT dan gradasi tanah seperti pada Gambar 23. Pengujian ukuran butiran yang dilakukan di laboratorium memperlihatkan bahwa hingga kedalaman 18.0 m didominasi material pasir halus dan medium. Apabila digunakan chart Tsuchida, 1970 maka dapat diketahui bahwa hingga kedalaman 18.0 m masuk kedalam golongan rentan mengalami likuifaksi (Gambar 24, Gambar 25 dan Gambar 26). Pada kedalaman berkisar 18 – 25 m didominasi material lempung dan silt yang cenderung tidak likuifaksi. Kedalaman 25 m hingga akhir pemboran didominasi material gravel. Berdasarkan kejadian fenomena likuifaksi yang telah terpublikasi diketahui bahwa pada kedalaman ini sudah tidak terjadi likuifaksi. Disamping itu juga, pada kedalaman ini sudah didominasi material gravel dimana diperkirakan tekanan air pori eksese yang terjadi akibat gempa dapat segera terdisipasi.



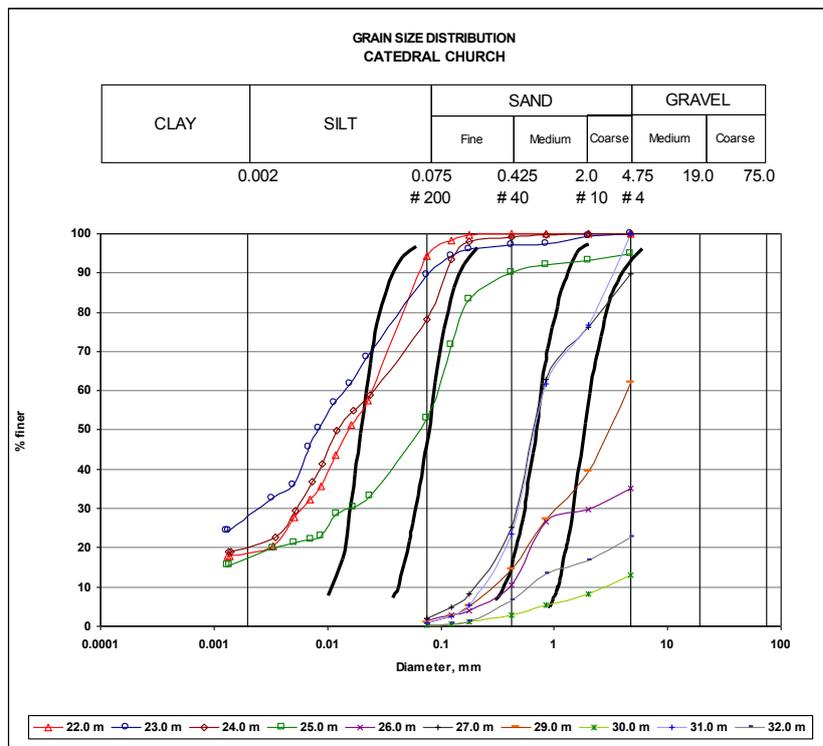
Gambar 23. Profil gradasi tanah dan nilai SPT di lokasi Katedral.



Gambar 24. Gradasi tanah pada kedalaman 1.0 – 10.0 m



Gambar 25. Gradasi tanah pada kedalaman 11.0-19.0 m



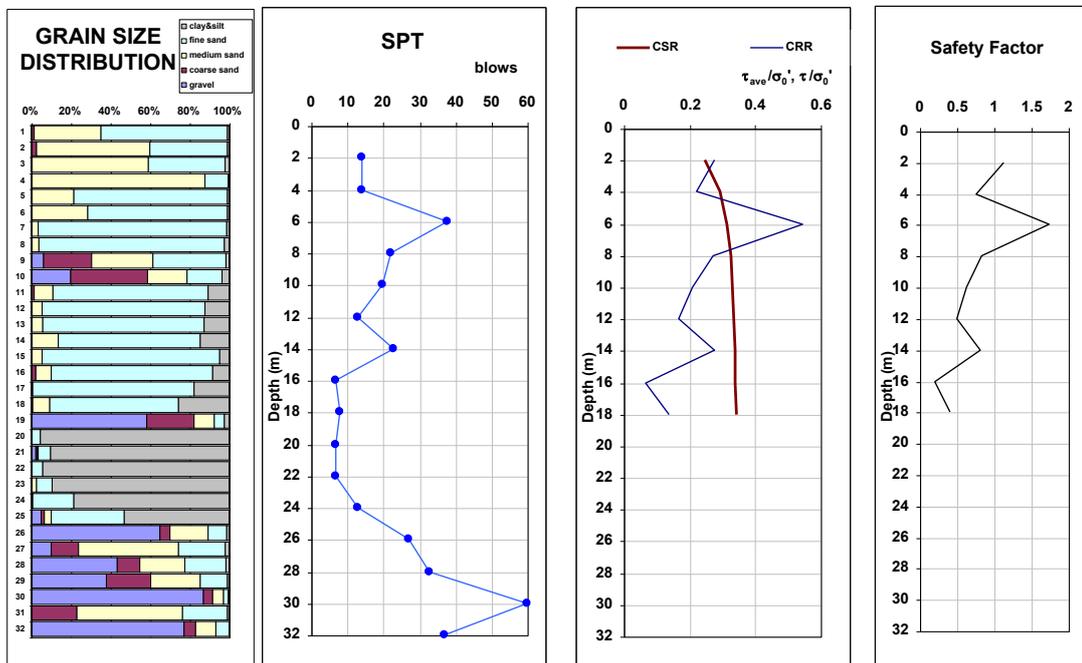
Gambar 26. Gradasi tanah pada kedalaman 22.0 – 32.0 m

Berdasarkan data-data tersebut maka diketahui bahwa potensi likuifaksi hingga kedalaman 18.0 m menyebabkan terjadinya settlement berkisar 46 cm.

Liquefaction Analysis (Seed Method)

Client	: Tim Pembangunan Gereja Katedral	Date	:
Company	: Tim Pembangunan Gereja Katedral	Sounding No.:	
Project	: Cathedral Church-Padang	Depth	: 32 m
Project No.:		GWL	: 1 m

M = 7.6 SR
 a max = 280.0 gal
 Sett total = 46.3 cm

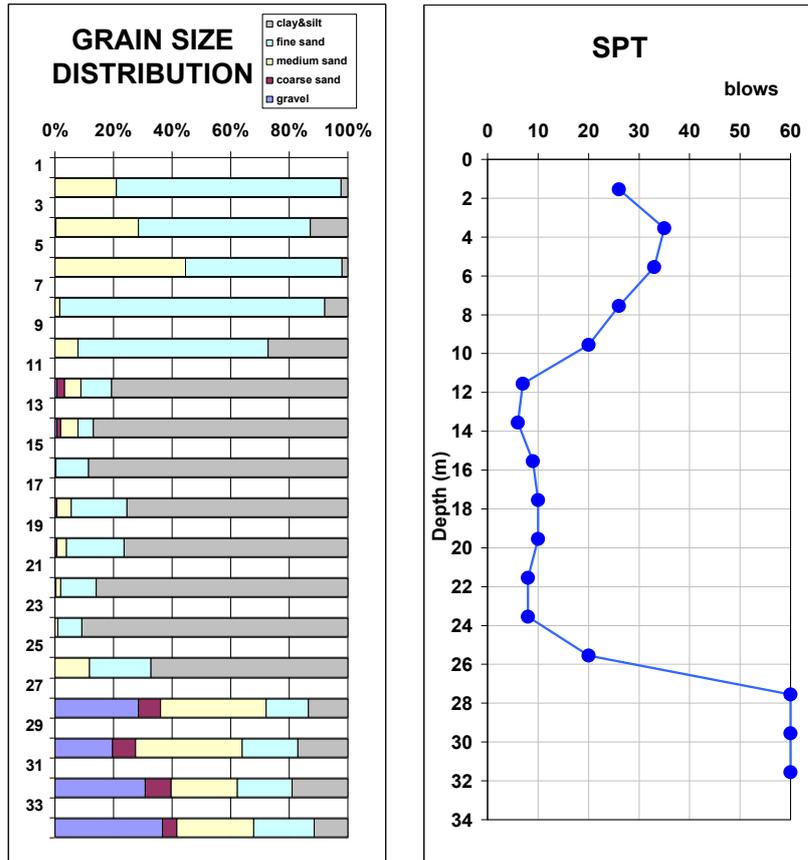


Gambar 27. Hasil analisa likuifaksi pada daerah Katedral

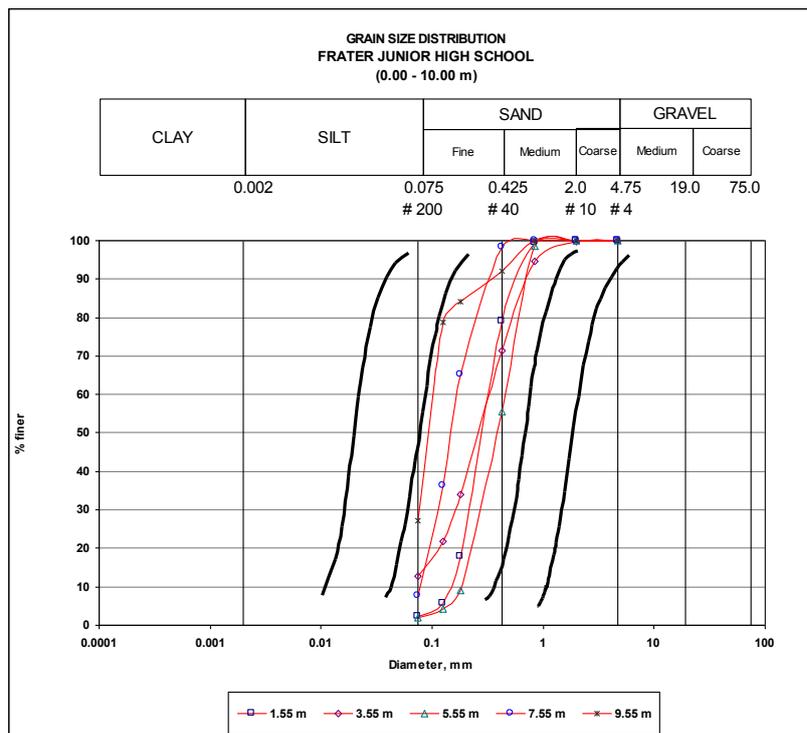
3.4.2. SMP Frater dan SMA Don Bosco

Pada lokasi SMP Frater juga telah dilakukan 1 titik pemboran hingga kedalaman 35.0 m yang dilakukan oleh Dinas Prasarana Jalan, Tata Ruang dan Permukiman Sumatera Barat. Profil grain size dan nilai SPT dapat dilihat pada Gambar 28 dimana hingga kedalaman 11.0 m pertama didominasi lapisan pasir dengan nilai SPT berkisar 20 – 35. Di bawah lapisan ini dijumpai lapisan lanau bercampur pasir. Kandungan butiran halus yang lolos saringan #200 pada lapisan ini berkisar 90 – 70 %. Lapisan ini dijumpai hingga kedalaman 26.0 m dengan nilai SPT berkisar 6 – 8. Lapisan ketiga adalah lapisan pasir kelanuan bercampur dengan gravel dengan konsistensi sangat keras dimana nilai SPT > 60.

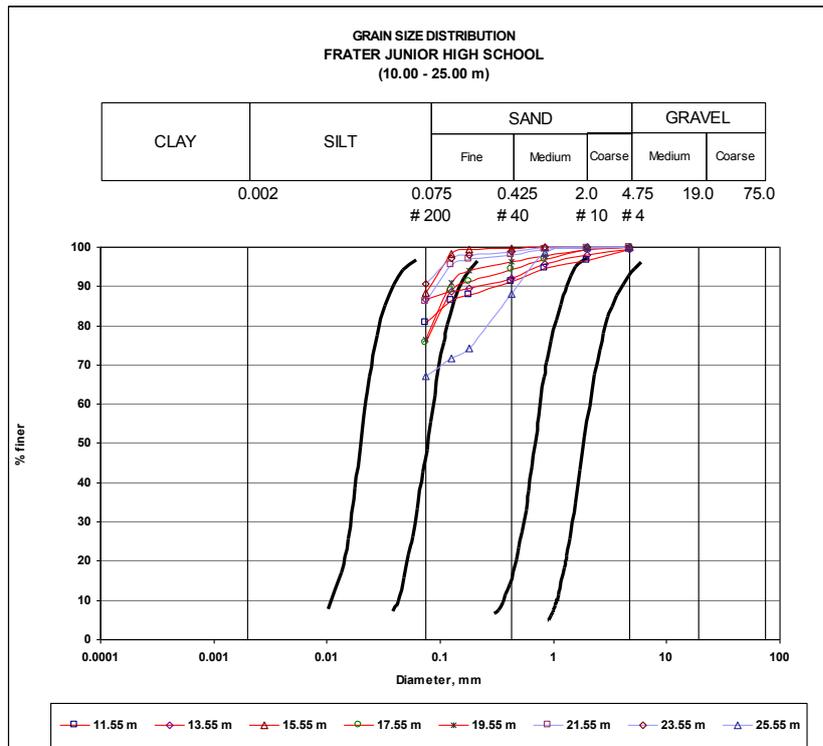
Distribusi ukuran butiran tanah pada masing-masing lapisan tersebut dapat dilihat pada Gambar 29 hingga Gambar 31. Gambar 29 memperlihatkan bahwa lapisan hingga kedalaman 11.0 m tersebut rentan mengalami likuifaksi. Namun sehubungan konsistensi tanah yang medium-dense maka lapisan ini dengan percepatan gempa puncak 0.28 g tidak mengalami likuifaksi. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 32 dimana nilai FK pada lapisan tersebut > 1.



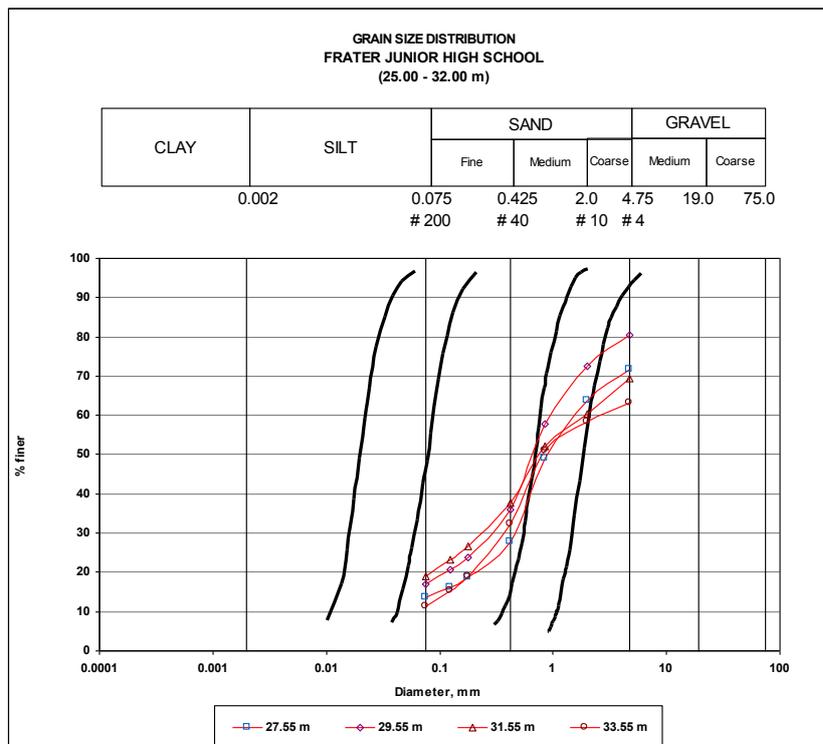
Gambar 28. Profil gradasi tanah dan nilai SPT di lokasi SMP Frater.



Gambar 29. Gradasi tanah pada kedalaman 1.0 – 10.0 m



Gambar 30. Gradasi tanah pada kedalaman 11.0 – 26.0 m

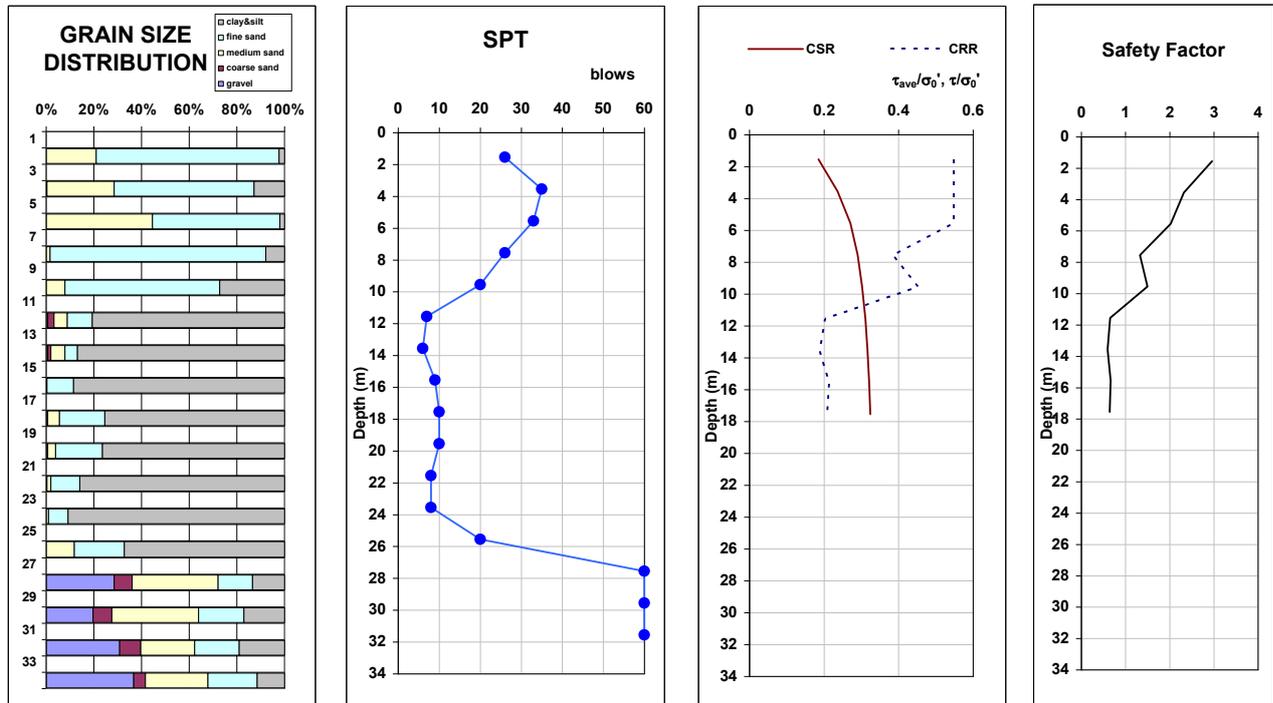


Gambar 31. Gradasi tanah pada kedalaman 27.0 – 34.0 m

Liquefaction Analysis (Seed Method)

Client :		Date :	
Company :		Sounding No. :	
Project :	Frater Junior High School	Depth :	34 m
Project No. :		GWL :	2 m

M = 7.6 SR
 a max = 280.0 gal
 Sett total = 36.1 cm



Gambar 32. Hasil analisa likuifaksi pada daerah SMP Frater

Gambar 32 memperlihatkan lapisan yang mengalami likuifaksi adalah pada kedalaman 11.0 – 20.0 m. Walaupun kandungan fine content nya cukup besar dimana menurut Chinese Criteria tidak mengalami likuifaksi, namun sehubungan konsistensi tanah yang soft to medium maka dengan menggunakan metode Seed, lapisan ini ternyata juga mengalami likuifaksi. Besarnya settlement yang terjadi akibat lapisan ini mencapai 47.0 cm.

3.4.3. Hasil Analisis Liquefaction Potential Index (LPI)

Nilai LPI dihitung dengan asumsi besaran magnitude 7.9 SR dan besaran a_{max} 280 gal. Dari nilai LPI, Iwasaki (1982) yang didapat maka dapat disimpulkan kualifikasi potensi terjadinya likuifaksi seperti berikut :

Tabel 3. Liquefaction Potential Index (LPI)

No.	Lokasi	Borlog	LPI	Level
1	Gereja Katedral	B-1	16.07	Very high
2	Rumah Sakit – Jl. Yos Sudarso	DB-I	15.88	Very high
3		DB-II	6.24	High
4		DB-III	6.92	High
5	Hotel Ambacang	DB-1	26.74	Very high
6		DB-2	38.70	Very high
7		DB-3	20.64	Very high
8	Vihara	DB-1	63.30	Very high
9		DB-2	16.41	Very high
10	Gereja GISI	DB-1	20.62	Very high

Dari hasil analisis juga didapati besaran settlement dan lateral displacement yang dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Settlement dan Lateral Displacement

No.	Lokasi	Borlog	Settlement [cm]	Lateral Displacement [cm]
1	Gereja Katedral	B-1	45.5	10.2
2	Rumah Sakit – Jl. Yos Sudarso	DB-I	16	3.2
3		DB-II	21.3	4.1
4		DB-III	15.5	3.6
5	Hotel Ambacang	DB-1	47.1	5.8
6		DB-2	61.4	19
7		DB-3	41.3	8.5
8	Vihara	DB-1	71.2	13.5
9		DB-2	40.7	3.1
10	Gereja GISI	DB-1	30.1	2.9

Berdasarkan resume hasil analisis LPI pada Tabel 3 terlihat bahwa rata-rata potensi likuifaksi yang terjadi pada kota Padang sangat besar (very high). Dengan besaran settlement yang terjadi berkisar antara 15.5 – 71.2 cm dan besaran lateral displacement yang terjadi berkisar antara 2.9 – 13.5 cm.

4. Pemahaman Tentang Tingkat Kerusakan

Bangunan dapat dikategorikan berdasarkan fungsinya, misalnya sebagai bangunan-bangunan komersial, bangunan pendidikan, bangunan hunian, tempat ibadah, bangunan instansi pemerintah dan lain-lain. Pengelompokan ini penting ditinjau dari segi fungsi bangunan untuk mendukung penanganan bencana. Umumnya bangunan-bangunan itu direncanakan dengan baik. Disamping itu kerusakan bangunan menurut kacamata teknik sipil dikelompokkan menjadi 2 (dua) jenis bangunan:

- Bangunan Terencana (*Engineered Buildings*)

Pada umumnya bangunan terencana adalah bangunan-bangunan publik, seperti rumah sakit, sekolah, gereja, bangunan pemerintah, dll. Bangunan-bangunan ini direncanakan dengan keamanan amat tinggi karena fungsinya sangat vital pada saat terjadi bencana. Bangunan dengan perencanaan adalah bangunan yang memenuhi syarat-syarat teknis baik dalam kekuatan

maupun mutunya. Bangunan ini pada umumnya direncanakan oleh ahli teknik sipil dan dilaksanakan dengan pengawasan dan pengendalian mutu.

- Bangunan Tidak Terencana (*Non-Engineered Buildings*)

Pada umumnya bangunan tidak terencana adalah rumah tinggal atau bangunan milik pribadi penduduk yang umumnya sulit dikontrol kualitasnya. Dalam banyak hal bahkan bangunan-bangunan tersebut umumnya sudah berumur tua dan sudah tidak memenuhi syarat kekuatan maupun kelayakan teknis. Jenis bangunan ini adalah yang paling banyak mengalami kerusakan berat. Tim kajian teknis Unpar mencoba untuk mengumpulkan data kerusakan bangunan khususnya milik Keuskupan Padang dan Yayasan Prayoga

Akibat gempa yang terjadi di Padang Pariaman pada tanggal 30 September 2009 terjadi kerusakan pada bangunan-bangunan publik dan hunian. Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) mendefinisikan tingkat kerusakan bangunan menjadi tiga kategori, yaitu: rusak berat; rusak sedang; dan rusak ringan. Pendefinisian kategori tersebut diantaranya bertujuan untuk mengestimasi kebutuhan bantuan dari pemerintah untuk rehabilitasi pasca gempa. Definisi tingkat kerusakan berdasarkan BNPB adalah sebagai berikut:

1. Rusak Berat

Kriteria kerusakan: Bangunan roboh atau sebagian besar komponen struktur rusak.

Uraian:

- Bangunan roboh total
- Sebagian besar struktur utama bangunan rusak
- Sebagian besar dinding dan lantai bangunan patah/retak
- Secara fisik kondisi kerusakan > 70%
- Komponen penunjang lainnya rusak total
- Membahayakan/beresiko difungsikan
- Perbaikan dengan rekonstruksi

2. Rusak Sedang

Kriteria kerusakan: Bangunan masih berdiri, sebagian kecil komponen struktur rusak, dan komponen penunjangnya rusak.

Uraian:

- Bangunan masih berdiri
- Sebagian kecil struktur utama bangunan rusak
- Sebagian besar komponen penunjang lainnya rusak
- Relatif masih berfungsi
- Secara fisik kondisi kerusakan 30% - 70%
- Perbaikan dengan rehabilitasi

3. Rusak Ringan

Kriteria kerusakan: Bangunan masih berdiri, sebagian komponen struktur retak (struktur masih bisa difungsikan)

Uraian:

- Bangunan masih berdiri

- Sebagian kecil struktur bangunan rusak ringan
- Retak-retak pada dinding plesteran
- Sebagian kecil komponen penunjang lainnya rusak
- Masih bisa difungsikan
- Secara fisik kerusakan < 30%

5. Kajian Gedung-Gedung yang Rusak Akibat Gempa

Untuk penanganan gedung gereja di Keuskupan Padang dan sekolah sekolah dibawah naungan Yayasan Prayoga disarankan berdasarkan beberapa prinsip sebagai berikut :

- Untuk katedral dan kapel susteran, mengingat memiliki nilai historis yang penting, maka bangunan tersebut harus dibangun kembali persis sama dengan kondisi semula. Material yang digunakan dapat di modifikasi, namun kenampakan secara arsitektural tetap perlu dipertahankan
- Untuk bangunan sekolah dan rumah sakit, karena merupakan bangunan publik yang penting, maka perlu diperiksa kekuatannya (misalnya menggunakan pengujian ultrasonik dan Schmid Hammer test) dan pengukuran vertikalitas serta rata air pada balok balok, kemudian dilakukan perkuatan. Hal mana adalah untuk menjaga image masyarakat pemakai agar merasa aman
- Untuk bangunan yang rusak ringan, pada prinsipnya dapat langsung digunakan dengan suatu perbaikan yang bersifat minor

Untuk bangunan umum yang lain, dalam penelitian ini diambil gedung gedung yang rusak berat atau rusak total maka direkomendasikan untuk dibangun ulang dengan kaidah kaidah kegempaan dengan penyelidikan tanah secukupnya. Ada kemungkinan pembangunan ulang sesuai dengan kondisi pragempa atau dengan rupa yang lain yang tentu saja membutuhkan perijinan dari pihak yang berwenang

6. Kondisi Kerusakan Bangunan Gedung Milik Keuskupan Padang

6.1. Puri Dharma (Kategori : Gedung Utama Rusak Sedang, Gedung Belakang Rusak Total)

Puri Dharma berupa struktur beton, terdiri dari tiga lantai, digunakan sebagai tempat untuk retreat. Gedung Bangunan Depan mengalami kerusakan dengan tingkat sedang, namun gedung bagian belakang praktis rusak total dan sedang dalam tahap pembersihan.



Gambar 33. Gedung Utama Puri Dharma Katedral, bagian depan

Untuk gedung utama yang didepan, meskipun dinding yang ada mengalami retakan, namun bagian utama struktur kolom dan balok masih baik. Gambar 34-a) menunjukkan kondisi kolom dan balok yang masih baik, kecuali pada joint antara kolom dan balok. Terdapat beberapa kolom yang mengalami kerusakan (Gambar 34-b) tetapi masih dapat diperbaiki. Meskipun belum diperiksa, namun kemungkinan hanya karena jarak sengkang kurang rapat dan mutu beton pada joint antara kolom dan balok tidak cukup kuat. Perbaikan dapat dilakukan dengan cara membuat perkuatan pada joint, misalnya dengan memasang siku baja di keempat sudut kolom tersebut. Pada saat perbaikan, balok balok perlu di dukung terlebih dahulu dengan penopang.

Kerusakan pada dinding adalah non-struktural, untuk mana dinding tersebut dapat dibongkar dan selanjutnya diganti dengan bahan yang lebih ringan untuk mengurangi beban pada struktur bangunan. Kerusakan pada tangga antara lantai satu dan dua, dalam hal ini tangga yang rusak dapat dibongkar, kemudian dibuat tangga baru. Untuk mengurangi resiko, tangga baru bisa dibuat dari baja dan di support dari bawah. Plat lintel yang ada memberatkan, sebaiknya dibongkar saja dan tidak dibuat kembali.



Gambar 34. Kerusakan sedang pada struktur



Gambar 35. Kolom kolom yang mengalami kerusakan, namun masih mungkin diperbaiki dan diperkuat



Gambar 36. Pola Kerusakan tipikal joint pada kolom-balok



Gambar 37. Kerusakan pada dinding, bersifat non-struktural



Gambar 38. Kerusakan pada struktur tangga dan plat lintel



Gambar 39. Gedung Puri Dharma Katedral, bagian belakang, rusak total



Gambar 40. Gedung Puri Dharma Katedral, bagian belakang, rusak total

6.2. Katedral (Kategori : Rusak Berat Namun Dapat Diperbaiki)

Gereja Katedral dari luar tidak nampak kerusakan yang serius kecuali salib diatas atap yang terlihat rebah dan retakan dinding serta beberapa genteng melorot. Namun kerusakan besar justru terjadi pada dinding di belakang altar



Gambar 41. Gereja Katedral dari depan tidak nampak kerusakan serius



Gambar 42. Kerusakan total pada dinding dibelakang altar

Kerusakan dinding di belakang altar adalah karena guncangan gempa dalam arah horisontal. Meskipun dinding belakang terbuat dari pasangan batu bata yang tebal, namun adukan pengikat berupa mortar kapur dan tras tidak memiliki kemampuan menahan geser. Disamping itu, diduga

terjadi pergeseran pondasi dalam arah lateral ke belakang dan kesamping seperti diperlihatkan pada Gambar 43. Ada kemungkinan pergeseran terjadi karena pondasi dangkal atau sumuran berada diatas tanah pasir yang mengalami kehilangan kekuatan gesernya akibat cyclic mobility saat gempa yang mengakibatkan penurunan (amblesan) sehingga menyebabkan dinding runtuh karena terjadi eksentrisitas dengan pondasi dan dorongan lateral oleh gempa



Gambar 43. Nampak gejala pergeseran dan amblesan di sekitar dinding dekat altar



Gambar 44. Retakan diagonal (akibat differential settlement) dan amblesan menunjukkan gejala penurunan akibat cyclic mobility tanah pasir dibawah bangunan



Gambar 45. Kerusakan pada bagian belakang Katedral



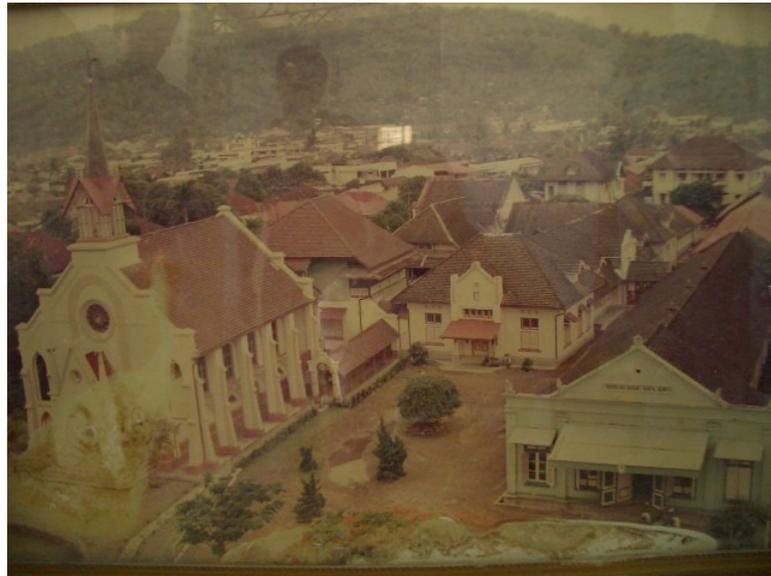
Gambar 46. Site Visit di Katedral Padang oleh tim teknis Unpar

Rekomendasi perbaikan untuk Gereja Katedral adalah :

- Penanganan darurat dengan cara membersihkan semua berangkal dibelakang altar, memeriksa kondisi atap dan plafond lalu menutup plafond kembali secepatnya. Lalu dengan menutup bagian belakang altar, *ada kemungkinan* katedral dapat dipakai untuk keperluan misa sambil perbaikan dijalankan bertahap, namun pada saat misa tidak boleh ada kerja.
- Membuat gambar kembali Gereja Katedral sesuai dengan kondisi awal dengan mempertahankan bentuk arsitektural sesuai semula dan melakukan penyelidikan geoteknik untuk memastikan desain pondasi yang benar
- Untuk melakukan pekerjaan, sebaiknya dilakukan penutupan untuk melindungi umat dari debu
- Perbaikan dimulai dengan dinding dan pintu serta jendela. Mengingat dinding dibelakang altar luas dan tinggi, sebaiknya diberi perkuatan kolom kolom beton dan balok beton untuk memperkaku struktur. Penonjolan balok dan kolom hanya dibelakang bangunan
- Khusus untuk pondasi, mengingat kondisi tanah yang berpotensi mengalami liquefaksi maka salah satu tindakan yang harus dilakukan adalah dengan melakukan grout sedalam 20 m pada setiap titik pondasi

6.3. Kapel Susteran (Kategori : Rusak Berat)

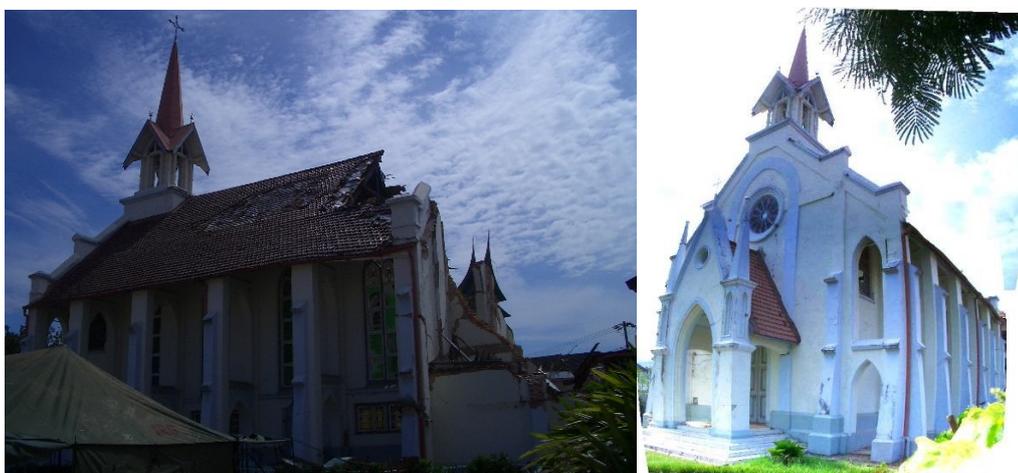
Kapel susteran terletak di Jalan Gereja no dibangun kurang lebih 124 tahun yang lalu dan pada bulan Juli 2010 akan berusia 125 tahun dimana sudah direncanakan ada suatu acara peringatan. Dari foto tempo doeloe, nampak bahwa tidak terdapat perubahan yang signifikan dari bangunan bangunan yang ada. Kerusakan total pada SD Agnes yang sekarang sudah diratakan dengan tanah.



Gambar 47. Kapel susteran tempo doeloe



Gambar 48. Keadaan kapel susteran saat ini



Gambar 49. Tampak Kapel Susteran, Kerusakan parah dibagian belakang



Gambar 50. Kerusakan dibagian altar parah tetapi dinding depan utuh karena lebih kaku oleh keberadaan struktur balkon

Bangunan ini juga memiliki nilai historis yang amat tinggi dan harus dipertahankan sesuai kondisi awal. Kerusakan utama adalah pada dinding di belakang altar dan retakan retakan pada dinding sisi kanan dan kiri. Namun pergeseran nampak pada dinding terhadap posisi pondasinya.



Gambar 51. Pergeseran Lateral kolom dan dinding terlihat dari misalignment tembok

Rekomendasi untuk kapel susteran hampir menyerupai katedral, adalah :

- Membuat gambar kembali kapel sesuai dengan kondisi awal dengan mempertahankan bentuk arsitektural sesuai semula

- Perbaikan dimulai dengan pembersihan bagian belakang kapel dan melakukan penyelidikan geoteknik untuk memastikan desain pondasi yang benar
- Mengingat dinding dibelakang altar luas dan tinggi, sebaiknya diberi perkuatan kolom kolom beton dan balok beton untuk memperkaku struktur. Penonjolan balok dan kolom hanya dibelakang bangunan
- Dinding yang mengalami pergeseran harus dibongkar dan dibangun kembali secara bertahap.
- Kolom kolom bila perlu diperkuat dengan struktur beton yang "disembunyikan" agar tidak mengubah arsitektural kapel
- Perbaikan sebaiknya menggunakan sistem renovasi secara bertahap dengan mempertahankan bagian bagian yang masih mungkin layak. Disarankan sudah selesai sebelum Juli 2010.

6.4. Susteran SCMM St Leo (Kategori : Rusak Ringan dan Rusak Berat)

Susteran SCMM St Leo memiliki 3 bangunan utama, yaitu susteran, termasuk didalamnya ruang makan dan dapur, asrama dan perpustakaan. Dari ketiga bangunan tersebut susteran mengalami kerusakan ringan kecuali pada ruang makan dimana seluruh atap runtuh sedangkan perpustakaan mengalami kerusakan total.



Gambar 52. Susteran SCMM, kerusakan utama adalah pada keruntuhan atap dari ruang makan



Gambar 53. Bangunan perpustakaan rusak total

Rekomendasi untuk susteran SCMM adalah sebagai berikut :

- Bangunan masih dapat digunakan. Kerusakan ringan berupa retakan retakan dinding dapat diperbaiki, demikian pula beberapa genteng yang mengalami pergeseran dan jatuh
- Ruang makan harus dibangun kembali atap nya, sedangkan strukturnya relatif masih baik
- Asrama Putri relatif masih dalam kondisi baik dan kerusakan ringan. Bagian yang rusak di dapur dapat diperbaiki seperti semula dan penyembulan lantai dapat diperbaiki dengan membongkar lantai dan meratakan kembali atau sementara bila dibiarkan tidak mengganggu operasional sehari hari
- Bangunan perpustakaan praktis harus dibangun kembali. Untuk itu perlu pertimbangan apakah dibangun sama dengan sebelumnya atau sekaligus dibangun gedung perpustakaan yang baru.



Gambar 54. Penyembulan lantai, kemungkinan terjadi akibat tekanan air pori pada lapisan pasir yang mengalami liquifaksi saat gempa

6.5. Gereja Paroki ex Katedral Tempo Doeloe (Kategori : Rusak Sedang Hingga Berat Namun Masih Dimungkinkan Perbaikan)

Gereja Paroki yang terletak disebelah kapel susteran juga termasuk bangunan historis yang harus dipertahankan kondisinya khususnya nilai nilai arsitekturalnya. Menurut informasi, dahulu gereja paroki ini tidak lain adalah katedral Padang. Bangunan ini terbuat dari pasangan batu bata dan terdiri dari dua lantai. Merupakan bangunan dengan bentang lebar. Atapnya menggunakan struktur baja.

Kerusakan utama adalah keretakan dinding dinding dan retakan pada kolom. Kolom terbuat dari pasangan bata yang tebal. Ada bagian kolom yang miring dan perlu dibongkar tapi tidak semua kolom parah sehingga masih memungkinkan untuk perbaikannya. Gambar 25 memperlihatkan kondisi kerusakan dari luar. Bangunan masih berdiri tetapi pihak Univ Bung Hatta mengategorikan sebagai rusak total.



Gambar 55. Bangunan gereja paroki, nampak kerusakan terutama retakan dinding



Gambar 56. Kerusakan di lantai dua, dinding hancur tetapi kolom relatif masih baik



Gambar 57. Disisi kiri bangunan, dinding bergeser keluar dan kerangka atap baja tergeser keluar dari kolom. Lantai masih menumpu diatas balok

Dari Gambar 57, Gambar 58 dan Gambar 59 dapat disimpulkan bahwa sistem struktur atap tidak menyatu dengan sistem struktur kolom dan balok yang memikul lantai dua, sehingga nampak ada dua buah kolom dimana yang satu tegak dan kolom yang lain bergeser. Kondisi kolom dalam relatif masih baik.

Pondasi bangunan tidak diketahui, untuk mana perlu informasi keamanan dari pondasi. Diluar bangunan tampaknya pasangan plesteran terkelupas dari pondasi, tetapi tidak mengganggu struktur pondasi itu sendiri. Sebaiknya diselidiki type pondasi dan kondisi tanah untuk pengamanannya.



Gambar 58. Kolom luar yang memikul rangka atap bergeser, kolom dalam masih tegak



Gambar 59. Kondisi Pondasi masih aman meskipun terdapat pengelupasan plesteran



Gambar 60. Kolom masih tegak tetapi terdapat retakan pada kolom, perlu diperkuat

Rekomendasi untuk gereja paroki adalah :

- Merupakan bangunan historis sehingga harus dipertahankan bentuk arsitekturalnya

- Bangunan rusak sedang, kolom kolom dan balok relatif masih cukup baik dan dapat diperbaiki dengan perkuatan secara bertahap.
- Bagian dinding yang telah bergerak keluar dapat dibongkar, namun lebih dulu sebaiknya ada penopang ke balok. Dinding yang retak juga dapat di bongkar dan dibangun kembali dengan material yang lebih kuat tetapi lebih ringan.
- Perlu digambar ulang dengan perkuatan yang diperlukan, namun harus diperhatikan juga kondisi pondasi dan kondisi tanah.

6.6. SMA Don Bosco (Kategori : Gedung Lama Rusak Berat, Gedung Baru Rusak Ringan)

SMA Don Bosco adalah konstruksi beton empat lantai yang relatif masih baru. Pola kerusakan cukup parah karena kolom sudah tidak vertikal lagi. Walaupun balok beton umumnya masih utuh, namun amat beresiko. Dari Gambar 63, nampak bahwa kerusakan kolom paling parah di lantai terbawah dan demikian juga dari kerusakan dinding, bagian bawah paling besar tingkat kerusakannya, sedangkan dinding di lantai 4 tidak rusak. Dua kolom teratas juga nampak relatif masih utuh.



Gambar 61. Pola Kerusakan gedung SMA Don-Bosco



Gambar 62. Kerusakan dinding di lantai pertama dan kedua gedung SMA Don Bosco



Gambar 63. Kerusakan di bagian tengah kolom, merupakan fenomena khusus



Gambar 64. Kerusakan kolom dibagian tengah menunjukkan pola geser



Gambar 65. Kondisi balok masih lurus dan utuh



Gambar 66. Disisi dalam, kerusakan kolom relatif tidak sehebat kolom luar



Gambar 67. Kerusakan dinding di area hall bawah



Gambar 68. Kondisi gedung SMA Don Bosco, dilihat dari belakang



Gambar 69. Gedung belakang masih baru, merupakan persembahan para alumni Don Bosco, masih dalam kondisi baik dengan retakan minor saja. Perbaikan relatif ringan

6.7. SMP Frater (Kategori : Bangunan Sisi Utara Rusak Berat, Bangunan Sisi Selatan Rusak Ringan)

Gedung SMP berada tidak jauh dari SMA Don Bosco, berupa struktur beton tiga lantai dengan bentuk L. Kerusakan amat serius di bagian utara gedung sedangkan di selatan masih baik, kecuali retakan dinding dan kerusakan ringan pada joint antara kolom dan balok. Kegagalan terutama pada kolom persis pada joint lantai satu antara kolom dan balok.



Gambar 70. Keadaan Gedung SMP, sebagian besar kursi sudah dikeluarkan



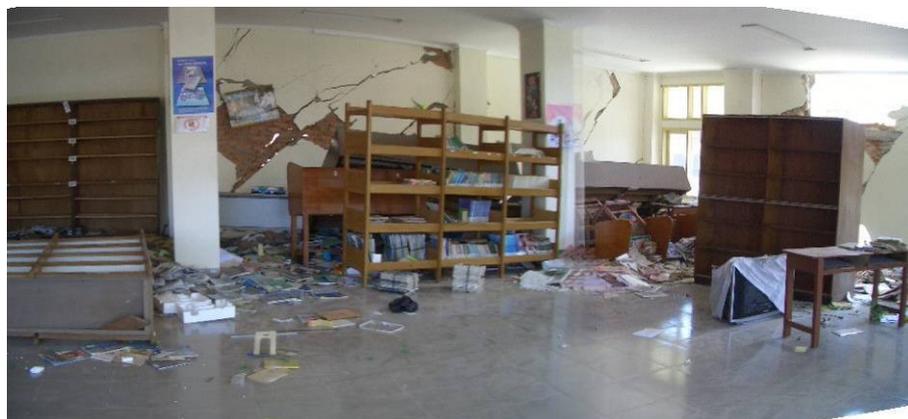
Gambar 71. Kondisi kerusakan gedung disisi utara, kolom tertohok keluar



Gambar 72. Kerusakan kolom dibagian dalam



Gambar 73. Kerusakan kolom pada perbatasan tangga dan kerusakan dinding di lantai dasar



Gambar 74. Kerusakan di area perpustakaan, lantai terujung turun mengikuti kolom



Gambar 75. Buku buku dari perpustakaan masih berserakan



Gambar 76. Kerusakan akibat geser pada dinding dan kerusakan plafond

Rekomendasi untuk gedung SMP Frater:

- Bangunan disisi utara mulai dari tangga sudah tidak layak digunakan dan sebaiknya dirobohkan
- Bangunan disisi selatan masih layak digunakan hanya mengalami kerusakan non struktural. Dapat digunakan setelah melalui suatu perbaikan dengan memperkuat terutama kolom kolom dan joint pada kolom. Untuk perkuatan balok, sebaiknya diputuskan sesudah dilakukan uji ultrasonik untuk memastikan bahwa kondisi bangunan masih baik
- Mengingat sekolah adalah bangunan publik, sebaiknya perkuatan dibuat over-design dan bilamana perlu dilakukan uji pembebanan statik dengan memberikan beban beban hidup dengan air setinggi 30 atau 40 cm atau setara dengan 300 – 400 kg/m² dan di monitor lendutan bila ada sesudah perkuatan diberikan

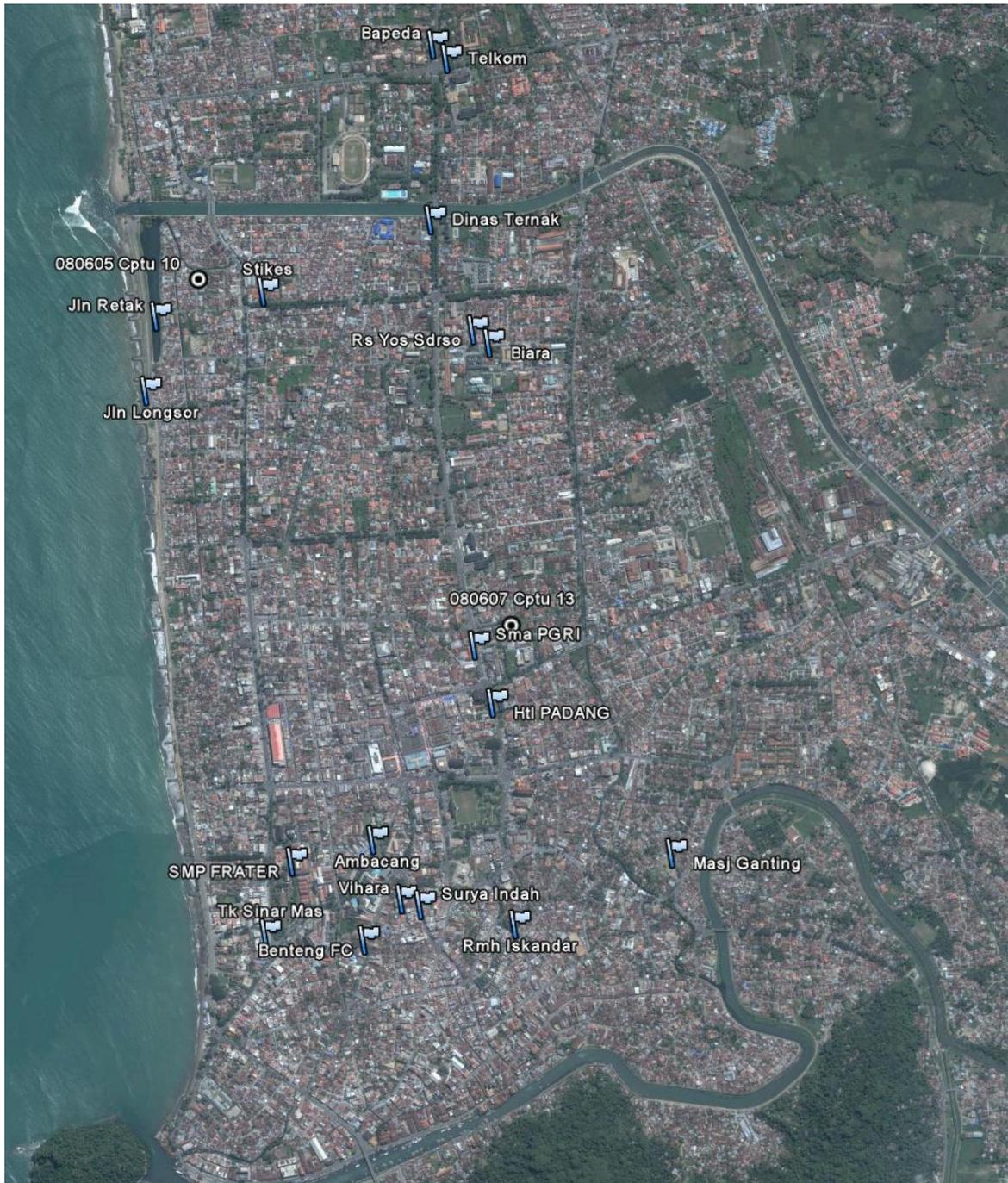
7. Bangunan Umum Yang Rusak Berat

Bagian ini membahas kerusakan bangunan umum yang di teliti pada saat kunjungan pasca gempa :



(Hakam, 2009)

Gambar 77. Daerah daerah yang terdeteksi mengalami likuifaksi (sumber : Hakam 2009)



Gambar 78. Beberapa lokasi studi yang ditinjau dan lokasi data soil tests

Gedung Dinas Prasarana Jalan, Tata Ruang dan Permukiman



Sekolah Tinggi Bahasa Asing (STBA)



Bangunan Dinas Pengairan



Masalah Soft Storeys





Keruntuhan Struktur Baja



8. Kesimpulan dan Saran

Dari kajian ini dapat disimpulkan

- (1) Tanah di kota Padang lapisan atas didominasi oleh pasir halus yang memiliki konsistensi lepas hingga sedang dan berpotensi mengalami liquefaksi dengan tingkat yang amat tinggi.
- (2) Masalah keamanan bangunan di Padang, bukan saja akibat dari kondisi bangunan yang buruk, mungkin tidak dirancang dan dilaksanakan terhadap gempa, tetapi kondisi tanah dasar juga memerlukan perhatian khususnya bahaya liquefaksi yang dapat mengakibatkan kegagalan

pada pondasi dan selanjutnya dapat mengakibatkan kerusakan pada struktur atas secara langsung

- (3) Untuk bangunan yang masih survive, maka proteksi yang dapat diterapkan disamping peninjauan dan perkuatan struktur adalah dengan melakukan underpinning atau grout pada lapis tanah pasir dibawah pondasi. Bangunan bangunan yang sudah tidak dapat digunakan karena tingkat kerusakan yang berat maka sebaiknya pondasi dirancang ulang untuk menahan kemungkinan terjadinya potensi liquefaksi misalnya dengan menggunakan pondasi dalam sebagai sub struktur.
- (4) Zonasi kerentanan terhadap likuifaksi dapat dilakukan berdasarkan Liquefaction Potential Index
- (5) Mengingat keseluruhan kota Padang terletak pada area yang rendah, maka kerentanan terhadap potensi kerusakan akibat tsunami cukup tinggi, untuk itu disarankan kajian yang lebih mendalam mengenai tsunami diperlukan.
- (6) Berdasarkan resume hasil analisis LPI terlihat bahwa rata-rata potensi likuifaksi yang terjadi pada kota Padang sangat besar (very high). Dengan besaran settlement yang terjadi berkisar antara 15.5 – 71.2 cm dan besaran lateral displacement yang terjadi berkisar antara 2.9 – 13.5 cm.
- (7) Direkomendasikan untuk merencanakan tsunami hill atau tempat tempat tinggi ditempat publik yang dapat menyelamatkan masyarakat dari bahaya tsunami. Lokasi tersebut dapat dipilih pada area terbuka yang mudah dijangkau oleh orang orang yang berada disekitarnya
- (8) Kemungkinan lain adalah membuat dinding pertahanan terhadap tsunami (tsunami wall) sepanjang pantai, misalnya dengan memanfaatkan jalan jalan dipinggir pantai seperti diantaranya jalan Samudera