



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Profesor I Wayan Sengara

**PERAN DAN APLIKASI PEMODELAN
GEOTEKNIK DALAM MENDUKUNG
DISAIN BANGUNAN DI INDONESIA**

22 Desember 2017
Aula Barat Institut Teknologi Bandung

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung
22 Desember 2017

Profesor I Wayan Sengara

**PERAN DAN APLIKASI PEMODELAN
GEOTEKNIK DALAM MENDUKUNG
DISAIN BANGUNAN DI INDONESIA**



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Hak cipta ada pada penulis

Judul: PERAN DAN APLIKASI PEMODELAN GEOTEKNIK DALAM
MENDUKUNG DISAIN BANGUNAN DI INDONESIA
Disampaikan pada sidang terbuka Forum Guru Besar ITB,
tanggal 22 Desember 2017.

Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

UNDANG-UNDANG NOMOR 19 TAHUN 2002 TENTANG HAK CIPTA

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama **7 (tujuh) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah)**.
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama **5 (lima) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)**.

Hak Cipta ada pada penulis
Data katalog dalam terbitan

I Wayan Sengara
PERAN DAN APLIKASI PEMODELAN GEOTEKNIK DALAM MENDUKUNG
DISAIN BANGUNAN DI INDONESIA
Disunting oleh I Wayan Sengara

Bandung: Forum Guru Besar ITB, 2017
vi+100 h., 17,5 x 25 cm
ISBN 978-602-6624-10-9
1. Geoteknik 1. I Wayan Sengara

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan yang Maha Kuasa, Maha Pengasih dan Maha Penyayang, atas berkat dan rahmatNya, naskah orasi ilmiah ini dapat diselesaikan. Penulis menyampaikan penghargaan dan rasa hormat serta terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pimpinan dan anggota Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung, atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk menyampaikan orasi ilmiah ini pada Sidang Terbuka Forum Guru Besar yang terhormat ini.

Orasi ilmiah ini berjudul: **“Peran dan Aplikasi Pemodelan Geoteknik dalam Mendukung Disain Bangunan di Indonesia”**. Orasi ilmiah ini disampaikan sebagai salah satu bentuk pertanggungjawaban akademik dan komitmen penulis dalam Ilmu Geoteknik di lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung. Orasi ilmiah ini ditulis sebagai cerminan bagaimana peran dan perkembangan ilmu geoteknik dalam turut mendukung pembangunan dan pengurangan risiko kegagalan infrastruktur di Indonesia.

Dalam orasi ilmiah ini dibahas kebutuhan pembangunan yang berkelanjutan, perkembangan ilmu pemodelan geoteknik, serta perannya dalam mendukung optimalisasi disain khususnya bangunan gedung dan infrastruktur di Indonesia. Peran Kelompok Keilmuan Geoteknik Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan – Institut Teknologi Bandung dalam mendukung pendidikan, penelitian, dan pengabdian masyarakat bidang pemodelan geoteknik menjadi suatu tantangan ke depan untuk

dapat memberikan kontribusi maksimal untuk pembangunan di Indonesia.

Semoga tulisan ini dapat memberikan wawasan, manfaat dan inspirasi bagi para pembaca sekalian dalam menjawab tantangan ke depan untuk bersama-sama mendukung pembangunan infrastruktur secara optimal demi kemajuan dan kemandirian bangsa Indonesia..

Bandung, 22 Desember 2017

I Wayan Sengara

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
1. PENDAHULUAN	1
2. GAMBARAN UMUM PEMBANGUNAN INFRASTRUKTUR DI INDONESIA	4
2.1 Kebutuhan Pembangunan Gedung dan Infrastruktur	4
2.2 Gambaran Anggaran Pembangunan Infrastruktur di Indonesia	6
2.3 Gambaran Umum Kerusakan Infrastruktur akibat Gempa	7
2.4 Perlunya Aplikasi Hasil Riset dan Inovasi Disain	10
3. PERKEMBANGAN PEMODELAN GEOTEKNIK	11
3.1 Model Konvensional (Klasik)	11
3.2 Model Numerik Pegas	13
3.3 Model Tanah Kontinum dan Interaksi Tanah-Struktur	16
4. KEGIATAN DAN RISET PEMODELAN GEOTEKNIK	19
4.1 Riset Pemodelan Geoteknik dan Interaksi Tanah-Struktur di ITB	20
4.2 Riset Sistem Fondasi Tiang-Rakit (<i>Piled-Raft</i>)	23
4.3 Riset Parameter Kompresibilitas Tanah Lempung Jakarta	29
4.4 Pengembangan Alat Truly Triaxial	31
4.5 Riset Pemodelan Geoteknik-Gempa	33

5. APLIKASI RISET ILMU PEMODELAN GEOTEKNIK DAN RISET TERKAIT PENGURANGAN RISIKO KEGAGALAN BANGUNAN	39
5.1 Analisis Fondasi, Penurunan Bangunan, dan Kriteria Beban Gempa	39
5.2 Analisis Interaksi Tanah-Struktur Galian-Dalam	42
5.3 Kerjasama Keilmuan Terkait: Analisis Terkait Risiko Kegagalan Bangunan Akibat Beban Gempa dan Tsunami	43
6. TANTANGAN KE DEPAN MENUJU KEMANDIRIAN PEMBANGUNAN INFRASTRUKTUR DI INDONESIA	57
6.1 Perkembangan Terkini dalam Ilmu Pemodelan Geoteknik	57
6.2 Tantangan ke Depan Menuju Kemandirian	63
7. PENUTUP	67
8. UCAPAN TERIMA KASIH	70
DAFTAR PUSTAKA	73
CURRICULUM VITAE	87

PERAN DAN APLIKASI PEMODELAN GEOTEKNIK DALAM MENDUKUNG DISAIN BANGUNAN DI INDONESIA

1. PENDAHULUAN

Konstruksi bangunan dan infrastruktur yang melibatkan dukungan bidang ilmu Teknik Sipil dan Geoteknik sudah dimulai sejak peradaban manusia di dunia pada tahun Sebelum Masehi. Beberapa konstruksi teknik sipil ini antara lain adalah: bangunan *Pyramids* di Mesir (2700-2500 SM), tembok *Great Wall* dan sistem irigasi *Li Ping* di China (220 SM), jembatan Julius Caesar's yang menyebrangi sungai *Rhine* (55 SM). Selanjutnya, beberapa bangunan sistem irigasi di Arizona AS dibangun tahun 600 SM, dan sistem tanggul pengendali air di Belanda dibangun tahun 1000 SM. Di Indonesia sendiri candi Prambanan dan Borobudur dibangun pada abad ke-8 dan ke-9 SM.

Ilmu teknik sipil sendiri baru dimulai pada tahun 1750an di Perancis dan masyarakat profesi teknik sipil pertama berdiri tahun 1771. Perguruan tinggi teknik sipil pertama berdiri tahun 1819 di Amerika Serikat dan sarjana teknik sipil pertama kali diberikan oleh *Rensselaer Polytechnic Institute* di tahun 1835. *Technische Hoogeschool Bandoeng* (THS), yang menjadi Institut Teknologi Bandung saat ini, berdiri tahun 1920.

Sejak bangunan teknik sipil ini ada, dukungan bidang ilmu geoteknik sesungguhnya telah diharapkan perannya dalam mendukung pembangunan infrastruktur teknik sipil tersebut. Ilmu geoteknik mulai

dengan lahirnya ilmu mekanika tanah tahun 1920. Di Indonesia sendiri praktis ilmu geoteknik baru berkembang beberapa tahun setelah tahun 1920 dan dimulai di THS atau di Institut Teknologi Bandung.

Indonesia adalah negara berkembang yang masih memerlukan banyak konstruksi bangunan/infrastruktur dalam beberapa dasawarsa ke depan untuk pembangunan yang berkelanjutan. Bangunan/infrastruktur ini meliputi prasarana hunian (permukiman, gedung tinggi, reklamasi), prasarana transportasi (jalan dan jembatan panjang antar pulau, terowongan), prasarana irigasi pertanian, pembangkit energi (tenaga air, gas, uap, panas bumi, dsb), prasarana tambang dan migas termasuk bangunan lepas pantai. Investasi yang perlu ditanam Pemerintah dalam pembangunan berkelanjutan ini relatif besar dalam menyerap anggaran negara di tengah-tengah perjuangan keras Indonesia mengurangi kemiskinan menuju kemakmuran bangsa.

Pada satu sisi, Indonesia berpotensi terhadap kejadian alam seperti gempa, tsunami, dan longsor, yang mengancam infrastruktur dan berpotensi memberikan risiko bencana pada masyarakat. Pada sisi lainnya, kondisi ekonomi Indonesia membatasi terwujudnya konstruksi dengan tingkat kerentanan yang rendah. Oleh karena itu, ada tantangan dan tuntutan untuk mewujudkan kualitas bangunan/infrastruktur yang optimum dalam aspek keselamatan (*safety*) dan penghematan biaya (*cost effectiveness*) dalam konstruksi. Peran ilmu rekayasa geoteknik secara umum diperlukan dalam mewujudkan bangunan /infrastruktur yang optimum serta memiliki ketahanan terhadap berbagai ancaman kejadian

alam. Diperlukan solusi terhadap analisis, disain, dan konstruksi geoteknik yang optimum pula.

Riset dan pengembangan serta aplikasi ilmu rekayasa geoteknik khususnya spesialisasi pemodelan tanah/geoteknik dan interaksi tanah-struktur diperlukan dalam mendukung konstruksi bangunan dan infrastruktur terkait aspek geotekniknya.

Dalam konteks ini, orasi ilmiah ini mengetengahkan peran ilmu pemodelan geoteknik dalam mendukung disain dan upaya pengurangan risiko kegagalan bangunan di Indonesia. Topik ini adalah untuk mendukung visi terwujudnya bangunan/infrastruktur yang optimum melalui dukungan pemodelan geoteknik dan analisis interaksi tanah-struktur dalam upaya pengurangan risiko kegagalan bangunan di Indonesia. Dalam orasi ilmiah ini disajikan gambaran skala dan biaya pembangunan infrastuktur di Indonesia, gambaran terhadap risiko kegagalan bangunan khususnya akibat gempa bumi. Selanjutnya, peran ilmu pemodelan geoteknik akan disampaikan melalui perkembangan ilmu pemodelan geoteknik, riset yang dilakukan khususnya di ITB dan juga perkembangan riset terkini. Berbagai aplikasi hasil riset bidang pemodelan geoteknik dan bidang ilmu terkait dalam mendukung disain disampaikan untuk selanjutnya dapat melihat tantangan ke depan dalam menyelesaikan permasalahan pembangunan serta strategi-strategi yang diperlukan untuk mendukung kemandirian pembangunan dalam persaingan global.

2. GAMBARAN UMUM PEMBANGUNAN INFRASTRUKTUR DI INDONESIA

2.1 Kebutuhan Pembangunan Infrastruktur di Indonesia

Pembangunan infrastruktur menjadi salah satu prioritas saat ini di Indonesia. Berbagai macam upaya telah dilakukan untuk mendorong infrastruktur ini, salah satunya adalah dengan dibentuknya Komite Persiapan Percepatan Infrastruktur Prioritas (KPPIP) dan juga dikuatkan dengan adanya peraturan pemerintah terkait percepatan pelaksanaan proyek strategis nasional tersebut melalui Peraturan Pemerintah Nomor 58 Tahun 2017.

Pembangunan infrastruktur diasumsikan mampu meningkatkan daya saing Indonesia, karena infrastruktur yang handal merupakan kunci utama dalam meningkatkan daya saing global Indonesia (Hadimuljono, 2017). Menurut KPPIP, tahun 2017 ini diarahkan pada pembangunan infrastruktur, karena penyediaan infrastruktur dirasakan lambat akibat adanya berbagai kendala (www.kppip.go.id). Pertumbuhan infrastruktur dan kontribusi terhadap PDB di Indonesia mencapai 4,73% per September 2015, padahal idealnya adalah sebesar 7% (Dirjen PUPR, 2017), agar dapat menjadi negara maju pada tahun 2025. Pembangunan infrastruktur mencakup: sumber daya air, bina marga, cipta karya, dan permukiman.

Indonesia saat ini banyak dilanda kemacetan lalu lintas, terutama pada kawasan menuju kota-kota besar. Salah satu infrastruktur penunjang yang perlu digalakkan adalah pembangunan prasarana transportasi: jalan

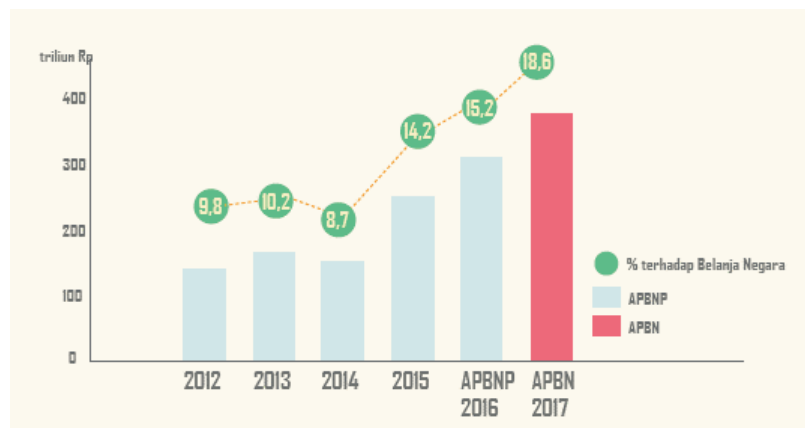
raya, kereta api, sungai, laut, dan udara. Berbagai prioritas pembangunan prasarana transportasi sedang dan terus harus dilaksanakan di seluruh wilayah Indonesia secara merata. Sementara ini, ketersediaan jalan dan jembatan di Indonesia dinilai belum cukup memadai.

Infrastruktur lainnya adalah terkait sumber daya air, cipta karya, dan permukiman, seperti bendungan, pipa air minum, instalasi pembuangan, tempat pembuangan sampah akhir, rumah-susun, cagar budaya, dan sebagainya. Tahun 2014, Indonesia memiliki 209 buah bendungan (Kementrian PUPR, 2015; 2016), dan saat ini sudah mencapai 286 buah bendungan. Total daya tampung bendungan tersebut sekitar 15 Miliar m³ (BPIW PUPR, 2017). Bendungan tersebut sudah dimanfaatkan untuk PLTA meskipun pemanfaatannya belum mencapai 7%. Begitu juga untuk kapasitas tampung air dan pemanfaatan airnya belum mencapai angka 10% dari total kebutuhan air irigasi teknis (BPIW PUPR, 2017).

Pada sektor permukiman, dalam rangka memenuhi kebutuhan masyarakat (terutama masyarakat berpenghasilan rendah) akan tempat tinggal, seiring dengan pertumbuhan penduduk yang tinggi, maka pemerintah menyediakan rumah susun sewa (rusunawa). Hingga tahun 2014, pemerintah sudah membangun sebanyak 408 tower block (TB) rumah-susun dengan kapasitas 3.122 unit (Kementrian PUPR, 2015). Jumlah ini dapat menampung sekitar 45.896 jiwa. Di tahun 2019 diharapkan pembangunan rusunawa ini dapat mencapai 500.000 unit (BPIW PUPR, 2017).

2.2 Gambaran Anggaran Pembangunan Infrastruktur di Indonesia

Pembangunan infrastruktur perlu memberikan kontribusi terhadap Pendapatan Bruto Domestik (PBD). Oleh karena itu, untuk meningkatkan pembangunan di bidang infrastruktur, pemerintah sudah meningkatkan anggaran untuk infrastruktur dalam APBN 2017. Di tahun 2017 ini anggaran untuk infrastruktur mencapai 18,6% dari total APBN Indonesia. Hal ini mengalami peningkatan yang cukup signifikan dibandingkan perubahan APBN (APBNP) di tahun 2016 yang hanya 15,2% dari total APBN seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Menurut Dirjen Anggaran (2016), kenaikan anggaran tersebut dialokasikan untuk mencapai sasaran pembangunan 836 km jalan dan 10.198 meter jembatan, pembangunan 13 bandara, pengembangan fasilitas 61 pelabuhan laut, serta pembangunan jalur kereta api dan pembangunan terminal penumpang.



Gambar 1. Alokasi anggaran pembangunan infrastruktur
(Sumber: Dirjen Anggaran, 2016)

Tahun 2010, penduduk perkotaan kurang lebih 54% dan akan meningkat hingga 68% di tahun 2025 nanti (Kirmanto, 2011). Pertambahan ini seringkali tidak diimbangi dengan penyediaan prasarana perumahan dan perkotaan yang baik. Penyediaan bangunan rumah permukiman vertikal (rumah-susun) murah akan menjadi suatu kebutuhan kota-kota besar di Indonesia. Selama 4 tahun dari tahun 2010 hingga 2014, telah dibangun sekitar 18.000 unit dalam sekitar 800 *tower block* (Kementerian PUPR, 2015). Jumlah unit rumah-susun ini dapat menampung sekitar 140 ribu jiwa. Di tahun 2017, sekitar 5.000 unit rumah-susun juga direncanakan dibangun di Jakarta (www.kppip.go.id), mengingat pembangunan ini dianggap merupakan proyek strategis pemerintah. Selain itu, pembangunan gedung tinggi lainnya untuk perkantoran untuk memfasilitasi perkembangan kota-kota besar menjadi kebutuhan yang terus akan meningkat. Menurut Dirjen Anggaran 2016, alokasi dana bagi pembangunan perumahan di Indonesia adalah sekitar 2,3% dari total APBN.

2.3 Gambaran Umum Kerusakan Infrastruktur akibat Gempabumi

Demi pembangunan yang berkelanjutan, konstruksi infrastruktur di Indonesia harus ditujukan untuk tahan terhadap gempa (*earthquake resistance*). Indonesia merupakan negara yang berpotensi tinggi terhadap kejadian gempabumi. Sebagian besar infrastruktur di Indonesia berada pada lokasi yang rawan *hazard* gempa (Surahman dkk., 2008), serta berpotensi memberikan risiko bencana pada masyarakat. Terlebih lagi, sebesar 18,6% dari total APBN dialokasikan untuk pembangunan infrastruktur.

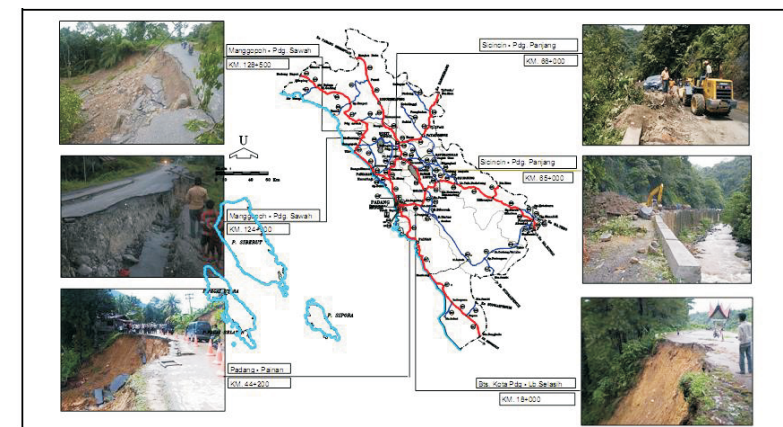
Kerugian akibat kerusakan infrastruktur pasca bencana gempa bumi di Indonesia relatif tinggi. Beberapa laporan hasil survey kerusakan bangunan pasca bencana gempa bumi dan tsunami telah dilakukan oleh Pusat Mitigasi Bencana-ITB (Gempa dan tsunami Aceh 2004, Gempa Nias 2005, Gempa Yogyakarta 2006, Gempa Sumatra Barat dan Jawa Barat 2009). Gambar 2 dan Gambar 3 menunjukkan beberapa kegagalan bangunan dan infrastruktur akibat gempa.

Gempa Yogyakarta tahun 2006 mencatat beberapa kerusakan non-struktur maupun kerusakan struktur pada bangunan tinggi (*engineered-building*). Gempa Sumatra Barat 2009 telah menyebabkan lebih dari 700 bangunan rusak berat dan sekitar 2.000 bangunan mengalami rusak sedang dan ringan (BNPB, 2009). Secara umum, hasil studi model kerusakan bangunan akibat gempa yang dilakukan oleh PMB-ITB menunjukkan relatif tingginya tingkat kerentanan bangunan di Indonesia (Sengara et.al., 2013). Selain juga, *hazard* getaran gempa yang terjadi lebih tinggi dari standar bangunan saat konstruksi bangunan tersebut dilaksanakan. Studi oleh Foraliza (2017) juga mengidentifikasi adanya risiko bencana infrastruktur jalan dalam proses pengembangan model penilaian risiko bencana gempa bumi untuk ruas jalan nasional di Indonesia.

Mempertimbangkan hal tersebut di atas, perlu adanya suatu upaya untuk meningkatkan ketahanan bangunan dan infrastruktur terhadap gempa bumi, sehingga risiko bencana dapat dikurangi. Di satu sisi memang kondisi ekonomi Indonesia membatasi terwujudnya konstruksi



Gambar 2. Gambaran kerusakan bangunan hasil survey gempa Yogyakarta tahun 2006 dan Sumatra Barat 2009. (Sumber: Laporan hasil survey pasca bencana gempa, dalam Sengara et al., PMB-ITB 2006, 2009)



Gambar 3. Gambaran kondisi kerusakan jalan akibat gempa Sumatera Barat tahun 2009. (Sumber: Laporan Bina Marga PUPR 2009 dalam Sengara et al., PMB-ITB, 2009)

dengan tingkat kerentanan yang rendah, sehingga ada tantangan dan tuntutan untuk mewujudkan kualitas bangunan/infrastruktur yang optimum dalam aspek keselamatan (*safety*) dan penghematan biaya (*cost effectiveness*) dalam konstruksi, dua aspek yang selalu perlu diperjuangkan.

2.4 Perlunya Aplikasi Hasil Riset dan Inovasi Disain

Pesatnya konstruksi bangunan dan besarnya investasi dalam infrastruktur di Indonesia memerlukan dukungan dari berbagai aspek terkait. Dukungan dari aspek geoteknik sangatlah diperlukan untuk keamanan bangunan serta juga dari optimalisasi biayanya. Suatu inovasi dalam bidang ilmu geoteknik akan memberikan dampak yang signifikan dalam optimalisasi biaya konstruksi. Selanjutnya, jika berbagai ketidakpastian yang ada dalam proses disain suatu bangunan dapat diminimalkan, demikian pula apabila metoda-metoda analisis baru dapat ditemukan dan dikembangkan, maka secara tidak langsung akan ada kontribusinya terhadap penurunan biaya konstruksi.

Penemuan dan inovasi pada metoda analisis dan disain baru perlu didukung dengan suatu investasi riset dalam bidang ilmu geoteknik. Penguasaan ilmu dan kontribusi hasil riset ilmu geoteknik dari Perguruan Tinggi seperti ITB diharapkan menjadi ujung tombak dalam memberikan solusi-solusi masalah geoteknik di Indonesia. Penguasaan ilmu dan teknologi bidang geoteknik seperti metoda analisis dan disain terbaru dari hasil riset terkini di dunia maupun hasil riset sendiri di ITB perlu

dengan cepat dapat disebarluaskan dalam bentuk pendidikan dan pengajaran kepada mahasiswa. Lulusan yang menguasai ilmu bidang geoteknik terkini dalam memberikan dukungan disain bangunan merupakan ukuran dari efektifnya kontribusi riset dalam aplikasi permasalahan pembangunan infrastruktur di Indonesia. Selain itu, hasil riset dan inovasi perlu dengan cepat diproses dalam suatu mekanisme sebagai acuan dalam standar-standar nasional yang mengatur keselamatan publik, pengurangan risiko kegagalan bangunan, namun secara tidak langsung pula memberikan kesempatan untuk optimalisasi disain di sisi lainnya, untuk penghematan anggaran biaya pembangunan.

3. PERKEMBANGAN ILMU PEMODELAN GEOTEKNIK DAN INTERAKSI TANAH-STRUKTUR

Solusi dalam masalah rekayasa geoteknik menuntut dihasilkannya suatu prediksi respon tegangan dan deformasi yang akurat. Prediksi respon ini haruslah merepresentasikan berbagai variabel yang terlibat pada suatu bangunan geoteknik. Variabel yang ada meliputi perilaku *non-linear*, *elasto-visco-plastic*, adanya pengaruh sejarah geologi, keberadaan air-tanah dan tekanan air-pori tanah, geometri, interaksi tanah-struktur bangunan, dan sebagainya.

3.1 Model Konvensional (Klasik)

Perkembangan ilmu pemodelan geoteknik, khususnya pemodelan hubungan tegangan-regangan tanah (*constitutive model of soils*) telah dimulai sejak awal Ilmu Mekanika Tanah klasik yang dikembangkan oleh

Prof. Karl Terzaghi (*father of Soil Mechanics*) sejak tahun 1918. Ilmu Mekanika Tanah klasik yang teori-teorinya telah baku menggunakan pendekatan metoda keseimbangan batas (*limiting equilibrium method*). Metoda ini telah berkembang sejak awal dikembangkan tahun 1920-an, sehingga terlahirlah teori perhitungan seperti: daya dukung fondasi aksial dan lateral, tekanan lateral tanah pada dinding penahan, stabilitas lereng, dan sebagainya. Teori ini telah menjadi bagian dari kuliah dasar mahasiswa Teknik Sipil di seluruh dunia, telah memberikan suatu landasan dan salah satu persyaratan utama untuk kelulusan sarjana Teknik Sipil. Pengetahuan tentang ilmu mekanika bahan bangunan (beton, baja, kayu) dan mekanika tanah, telah memberi bekal yang cukup mendasar untuk seorang sarjana Teknik Sipil secara umum.

Dalam disain aspek geoteknik, maka stabilitas haruslah terjaga dari aspek kuat geser (*shear-strength*) tanah yaitu daya dukung (*bearing capacity*) dan dari aspek deformasinya (penurunan dan pergerakan lateral) bangunan. Teori mekanika tanah klasik tidak secara langsung mengkaitkan hubungan tegangan-regangan seperti layaknya suatu pemodelan material, dan deformasi diprediksi tidak secara bersamaan dengan daya dukungnya. Deformasi diprediksi dengan menggunakan pendekatan lain, umumnya menggunakan teori elastisitas. Pendekatan klasik ini, karena demi untuk kemudahan dan keperluan praktis, barangkali tanpa kita sadari telah menghilangkan *sense engineering* kita tentang hubungan tegangan-regangan tanah yang sifatnya *non-linear* dan *elasto-plastik*. Terlepas dari kekurangannya, metoda keseimbangan batas

ini telah begitu populer dan telah berhasil untuk memberikan kontribusi terhadap disain dan konstruksi berbagai bangunan geoteknik.

Dengan pesatnya pembangunan infrastruktur dan gedung, dan kompleksnya masalah dalam praktek yang melibatkan material tanah dan interaksinya dengan struktur, maupun pembebanan akibat gempa bumi, serta juga tuntutan akan disain hemat (*cost-effectiveness*), maka ilmu Mekanika Tanah klasik tidaklah cukup atau belumlah lengkap dalam memberikan dukungan pada pemecahan masalah disain bangunan Teknik Sipil secara umum. Sebagai tuntutan akan kompleksnya permasalahan dalam praktek ini, diperlukan solusi yang lebih representatif dari metoda-metoda mekanika tanah klasik. Pemodelan geoteknik berkembang dari pemodelan tanah sebagai pegas sampai penerapan mekanika continuum model tanah *non-linear elasto-plastic* dalam suatu solusi metoda numerik beda-hingga, elemen-hingga, dan metoda-metoda numerik lainnya.

3.2 Model Numerik Pegas

Kebutuhan akan solusi atau prediksi respon yang mengintegrasikan antara tegangan dan deformasi dimulai dengan pemodelan material tanah sebagai pegas (*spring*), mengikuti perkembangan dalam pemodelan struktur bangunan. Pada awalnya, material tanah dimodelkan sebagai pegas linear-elastik untuk memudahkan komputasi. Pemodelan pegas dalam suatu solusi numerik ini, telah berkembang seiring dengan berkembangnya metoda matrix untuk solusi model struktur (Wang, 1970).

Beberapa solusi dengan metoda matrix telah dikembangkan oleh Bowles, 1974, misalnya untuk solusi balok di atas fondasi elastis, respon lateral fondasi tiang, dan sebagainya. Pemodelan ini telah memberikan kemudahan kepada praktisi dalam mendisain suatu bangunan yang melibatkan interaksi tanah-struktur. Hal ini dikarenakan, prediksi gaya-gaya dalam didapatkan secara relatif mudah, sekaligus juga besarnya deformasi yang terjadi, sehingga analisis ini dapat menunjukkan pemenuhan terhadap kriteria-kriteria desain yang disyaratkan.

Metoda numerik seperti beda hingga (*finite-difference-method, FDM*) dan elemen hingga (*finite-element-method, FEM*) mulai juga diperkenalkan melalui pendekatan tanah sebagai pegas ini. Pendekatan ini telah berhasil untuk memberikan solusi persamaan diferensial partial (PDE) eliptik, parabolik, dan hiperbolik yang secara umum mengontrol solusi masalah-masalah geoteknik. Perkembangan lebih lanjut adalah pemodelan tanah sebagai pegas *non-linear* dan *elastic-perfectly plastic*. Pendekatan ini telah berkembang seiring dengan perkembangan dalam pemodelan material tanah non-linear dari hasil-hasil test laboratorium, test skala kecil, maupun test lapangan seperti test fondasi tiang (*field load test*). Metoda prediksi daya dukung fondasi tiang dan perpindahan: t-z, q-z, p-y (Reese et al., 1968) dalam solusi numerik FDM material tanah *non-linear* telah secara luas digunakan oleh praktisi geoteknik saat ini.

Permasalahan analisis dan disain dalam geoteknik sering melibatkan pembebanan dinamik seperti getaran mesin dan pembebanan siklik akibat gempabumi. Solusi numerik PDE hiperbolik yang mengontrol

rambatan gelombang tegangan dalam tanah telah dikembangkan. Model tanah dengan perilaku modulus dan redaman *non-linear* telah diterapkan dalam analisis rambatan gelombang gempa dalam perangkat lunak seperti SHAKE (Schanabel et al., 1997) dan NERA (Bardet and Tobita, 2001). Perangkat lunak ini saat ini telah menjadi salah satu andalan dalam analisis respon spesifik site (*site-specific response analysis, SSRA*) secara luas.

Solusi masalah interaksi tanah-struktur respon dinamik dengan pemodelan tanah sebagai pegas berkembang di awal tahun 1970 an, saat para peneliti struktur, geoteknik dan gempa tertantang dalam perancangan bangunan tahan gempa secara lebih baik. Hal ini akibat dari kenyataan banyaknya bangunan gedung yang mengalami kerusakan dan kegagalan akibat gempa. Selain itu, juga saat mulainya perencanaan fasilitas pusat energi tenaga nuklir di dunia. Pada awalnya, metoda analisis yang dikembangkan masih terbatas pada pemodelan tanah sebagai pegas *linear* dalam analisis solusi domain frekuensi. Dengan model tanah dan struktur yang *linear*, maka superposisi respon dapat dilakukan dalam domain frekuensi serta penggabungan interaksi inersial dan kinematik dari sistem tanah-struktur (Wolf, 1985). Metoda solusi ini kurang tepat untuk material geoteknik yang *non-linear* dan juga beban gempa yang melibatkan regangan yang tinggi, di mana respon tanah sudah *non-linear*. Perkembangan lebih lanjut adalah metoda analisis yang mengintegrasikan pemodelan tanah *non-linear*, ketergantungan modulus dan redaman tanah pada frekuensi (*frequency-dependency*) dalam solusi

domain waktu (*time-domain*). Metoda analisis ini dikembangkan oleh Wolf (1988).

Berbagai hasil riset dan aplikasi terkini tentang interaksi tanah-fondasi-struktur dengan model tanah sebagai pegas ini telah dikompilasi dalam publikasi oleh Orense et al., (2009) sebagai hasil dari lokakarya *Soil-Foundation-Structure Interaction*. Analisis numerik, observasi setelah gempa, maupun model alat *centrifuge* sebagai respon tanah-fondasi-struktur telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Namun demikian, interaksi dinamik model pegas, meski sudah melibatkan interaksi inersial dan kinematik, tetap tidak sepenuhnya dapat memodelkan tanah sebagai kontinum, sehingga solusi ini masih perlu diperbaiki untuk mendapatkan respon tanah-struktur yang lebih representatif.

3.3 Model Tanah Kontinum dan Interaksi Tanah-Struktur

Model pegas tidaklah representatif memodelkan tanah yang secara alamiah merupakan suatu yang menerus berupa kontinum (*continuum*). Karakterisasi dari perilaku material tanah dan batuan merupakan hal yang sangat vital dalam prediksi respons dari bangunan dan struktur geoteknik. Oleh karenanya, sejak dahulu banyak model-model tanah telah diusulkan dan dikembangkan. Model-model ini didasarkan pada teori elastisitas, *hyper-elastisitas*, *hypo-elastisitas*, *plastisitas* dan *visco-plastisitas*, bahkan sampai struktur mikro dan mekanika kerusakan (*damage-mechanics*) (Desai, 2005).

Material tanah dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti: kondisi

lapangan (*in-situ*), perubahan volume, lintasan tegangan, kondisi jenuh tidak jenuh, alir-nirair (*drained-undrained*), *microcracking*, *softening*, *degradasi* modulus dan kekuatan, serta instabilitas mikro-struktur seperti likuifaksi (*liquefaction*). Beberapa model yang telah dikembangkan memperhitungkan satu atau beberapa dari karakteristik tanah tersebut. Pemodelan tanah sebagai kontinum mengacu pada kriteria keruntuhan material berdasarkan teori plastisitas secara umum seperti *Von-Mises* (1913), *Tresca*, *Drucker-Prager* (1950), dan *Mohr-Coulomb* (yang dikembangkan sejak awal tahun 1900an sampai tahun 1960an). Ilmu pemodelan tanah berkembang lebih lanjut untuk merepresentasikan hubungan tegangan-regangan tanah secara lebih baik.

Model hiperbolik *Duncan-Chang* (1970) menerapkan kriteria keruntuhan *Mohr-Coulomb* dalam suatu formulasi hubungan tegangan-regangan tanah *non-linear* dalam suatu solusi elemen hingga dengan perangkat lunak *SOILSTRUCT* di *University of California-Berkeley, USA* (Clough and Duncan, 1969-1970). Perkembangan ini telah memberikan suatu awal penerapan mekanika *continuum* dalam solusi masalah-masalah kompleks geoteknik dan interaksi tanah-struktur. Teori plastisitas material telah lebih lanjut mendorong perkembangan pemodelan tanah. Model yang didasarkan pada konsep *Critical State* telah menghasilkan model *Cam-Clay* (1963-1968) dan *Modified Cam-Clay* (1968) serta model *Lade-Duncan* (1975).

Model-model *continuum* yang didasarkan baik pada teori elastisitas *non-linear* maupun plastisitas di atas telah diimplementasikan dalam

solusi elemen hingga dalam bentuk *software* untuk keperluan baik untuk riset (*ANSYS, ABAQUS, ADINA*, dsb. nya) maupun komersial untuk aplikasi (*PLAXIS, MIDAS, LUSAS, DIANA*, dsb. nya). Beberapa *software* ini telah dilengkapi juga dengan analisis yang melibatkan interaksi tanah-struktur, sehingga dapat diterapkan untuk analisis kompleks baik 2-Dimensi maupun 3-Dimensi.

Pembebanan dinamik gempa dalam bangunan geoteknik dan interaksi tanah-struktur merupakan suatu mekanisme yang sangat kompleks. Pemodelan dan solusi terhadap masalah ini terus berkembang. Solusi numerik model tanah *non-linear elasto-plastic* perlu dilengkapi dengan model hubungan tegangan-regangan tanah akibat beban dinamik. Model rambatan gelombang gempa dari batuan dasar ke permukaan tanah dengan pendekatan *continuum* dalam suatu solusi elemen hingga atau elemen batas (*boundary-element*) merupakan tantangan tersendiri dalam pemodelan geoteknik. Dengan pemodelan *continuum* yang dikombinasi dengan model konstitutif hubungan tegangan-regangan-waktu *non-linear*, telah terbuka solusi pemecahan berbagai masalah geoteknik untuk respon dinamik beban gempa.

Selanjutnya, dalam hal analisis respon dinamik akibat beban gempa, aplikasi dari beberapa *software* terkini terbatas karena kesulitan dalam memodelkan modulus redaman tanah *non-linear elasto-plastic* dalam integrasi solusi numerik respon tegangan-regangan-waktu. Terlebih juga untuk analisis likuifaksi, pendekatan tegangan efektif untuk memperhitungkan penambahan tekanan air pori (*excess pore-water pressure*) akibat

beban gempa tidak dapat dilakukan dengan analisis tegangan total seperti aplikasi program *SHAKE* atau *NERA*. Solusi pendekatan dengan degradasi modulus akibat pertambahan tekanan air pori ini telah diusulkan oleh Olsen (2007) sehingga dapat dimanfaatkan untuk solusi respon dinamik pendekatan tegangan total analisis respon *site-specific* kawasan potensi likuifaksi.

Walau kompleksitas perilaku tanah ini tidak sepenuhnya dapat dimodelkan dengan baik, perkembangan riset dan solusi numerik telah dibangun dalam solusi elemen hingga dan beda hingga dalam beberapa *software* model tanah *continuum* yang telah disebutkan sebelumnya. *Software* seperti *FLAC (Itasca Consulting Group Inc., 2007)* memberikan kemudahan perbaikan untuk analisis respon *site-specific* 2-D atau 3-D serta analisis dinamik bangunan geoteknik dengan model modulus dan redaman tanah *non-linear*. Demikian pula, saat ini beberapa *software* (*DIANA dan PLAXIS*) dapat melakukan analisis likuifaksi dengan telah diimplementasikannya hubungan tegangan-regangan tanah pasir jenuh air, dengan pendekatan tegangan efektif menggunakan model tanah pasir berbasis teori plastisitas, yaitu model *UBC-Sand* (Beaty and Byrne, 2011).

4. KEGIATAN RISET PEMODELAN GEOTEKNIK

Pengembangan serta dukungan ilmu rekayasa geoteknik dalam mewujudkan konstruksi yang optimum serta yang juga dapat mendukung memecahkan masalah-masalah pengurangan risiko kegagalan bangunan di Indonesia dipertimbangkan masih minim. Dalam

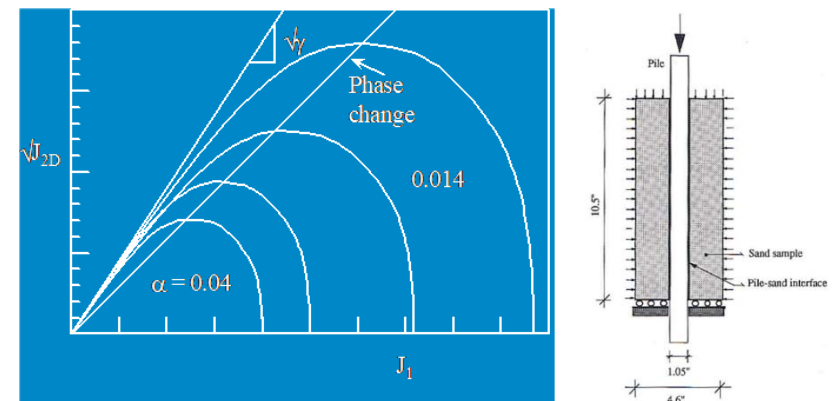
hal ini, dukungan riset pemodelan tanah dalam analisis geoteknik dan interaksi-tanah-struktur (dengan mengintegrasikan perkembangan pemodelan tanah terkini dalam suatu analisis tegangan-deformasi dengan komputasi numerik) akan dapat menawarkan solusi yang lebih handal dan akurat (*robust*). Bidang spesialisasi pemodelan geoteknik dan interaksi-tanah-struktur diperlukan dalam pengembangan ilmu geoteknik untuk mendukung analisis, disain, dan konstruksi bangunan geoteknik, termasuk untuk upaya-upaya PRB (gempa, longsor, tsunami, dsb) di Indonesia, serta antisipasi solusi aspek geoteknik terkait masalah proteksi kawasan pantai akibat global *climate change* seperti *sea-level rise*, dan sebagainya.

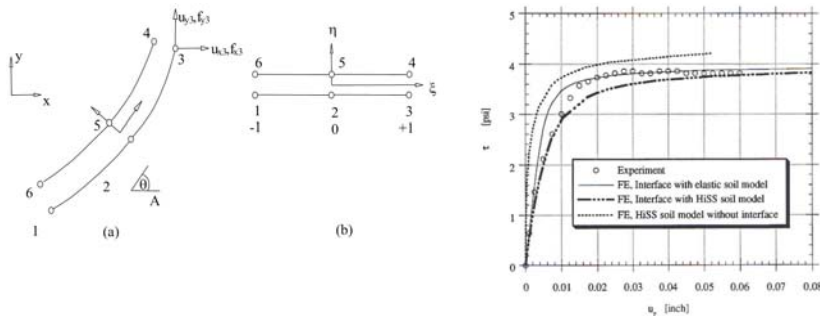
Spesialisasi bidang keilmuan pemodelan geoteknik ini mendukung pengembangan pendidikan/ perkuliahan S1, S2, dan S3, serta mendukung peta jalan (*roadmap*) riset Kelompok Keilmuan Rekayasa Geoteknik (KKRG) - FTSL-ITB dan di Laboratorium Geoteknik-Pusat Rekayasa Industri (PRI) - ITB, yang juga terkait langsung dengan bidang prioritas riset ITB, yaitu bidang pengembangan wilayah, infrastruktur, dan lingkungan. Selain itu juga mendukung usulan fokus riset ITB. Pengembangan spesialisasi keilmuan ini termasuk dalam rangka mewujudkan kontribusi ITB dalam pembangunan nasional di Indonesia.

4.1 Riset Pemodelan Geoteknik dan Interaksi Tanah-Struktur di ITB

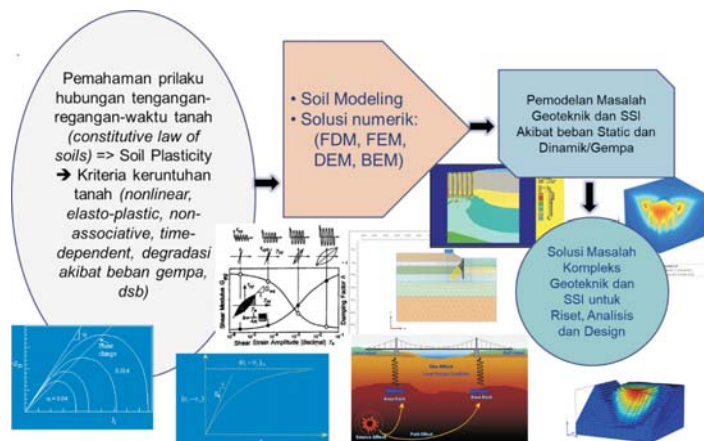
Riset pemodelan geoteknik dan interaksi tanah-struktur di ITB diarahkan pada penerapan model tanah sebagai *continuum non-linear*

elasto-plastik dalam solusi elemen hingga, khususnya untuk pembebanan statik. Pada tahun 1992, penelitian ini telah berhasil memodelkan secara experimental dan numerikal, model interface tanah-fondasi tiang dalam solusi model tanah *non-linear* dan interface elasto-plastik. Suatu program komputer *NLSSIP* (*non-linear soil-structure interaction program*) yang mengintegrasikan model elasto-plastik tanah dan interface berhasil dikembangkan di *University of Wisconsin-Madison* (Sengara and Rahman, 1992). Model tanah *non-linear* dan model konstitutif interface tanah-struktur elasto-plastik *Hierarchical Single Surface (HiSS)* Desai et al (1987) dan model interface Plesha et al. (1989) telah diadopsi dan diimplementasi ke dalam program elemen hingga *NLSSIP* (Sengara and Rahman, 1992). Program computer ini merupakan rintisan program komputer *non-linear* elasto-plastik saat itu, sebelum program geoteknik komersial tersedia. Gambar 4 menunjukkan hasil pemodelan interface tanah-fondasi hasil penelitian ini. Penggunaan program ini untuk riset pemodelan geoteknik, khususnya interaksi tanah-fondasi di ITB dilakukan melalui beberapa





Gambar 4. Model non-linear elasto-plastik interface tanah-fondasi tiang
(Sengara, 1992)



Gambar 5. Ilustrasi kegiatan penelitian pemodelan geoteknik beserta teknik komputasinya

penelitian Hibah Bersaing dan Hibah Tim DIKTI. Gambar 5 memberikan ilustrasi kegiatan penelitian pemodelan geoteknik beserta teknik komputasinya.

Bidang keilmuan ini merupakan motivasi yang kuat untuk kami kembangkan lebih lanjut di KKRG dalam rangka memberikan kontribusi solusi dalam industri konstruksi teknik sipil (geoteknik). Pengembangan lebih lanjut harus dapat menjawab tantangan dan tuntutan pembangunan secara nasional. Dalam kaitan itulah, riset-riset dan kegiatan yang dilakukan di KKRG, telah diarahkan untuk memanfaatkan spesialisasi keilmuan ini pada masalah-masalah geoteknik nyata di Indonesia.

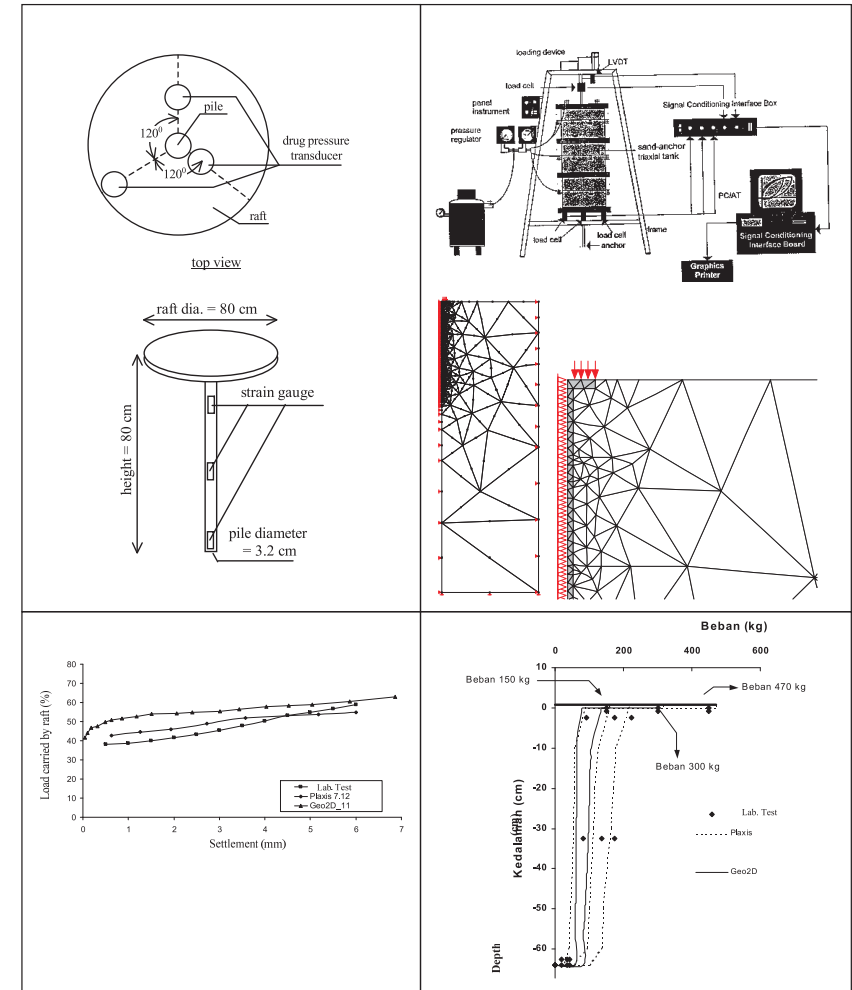
Penelitian bidang pemodelan geoteknik telah dilaksanakan melalui beberapa grant penelitian internal LPPM-ITB, Dikti (Hibah Bersaing, URGE-Hibah Tim), dan Ristek (Riset Unggulan Terpadu). Penelitian ini juga dilakukan selanjutnya secara kolaborasi di dalam KKRG dan Laboratorium Geoteknik - Pusat Rekayasa Industri (PRI) melalui pembimbingan mahasiswa S1, S2, dan S3. Beberapa hasil penelitian dalam bidang pemodelan geoteknik dan interaksi tanah-struktur telah kami publikasikan dalam journal dan proceeding beberapa seminar/konferensi baik nasional maupun internasional (model interface tiang-tanah, sistem fondasi *piled-raft*, dsb.). Diseminasi hasil riset juga telah kami lakukan dalam beberapa permintaan untuk menjadi pembicara (beberapa pembicara utama) dalam suatu seminar dan konferensi, baik nasional maupun internasional.

4.2 Riset Sistem Fondasi Tiang-Rakit (*Piled-Raft*)

Penelitian yang dilakukan adalah tentang mekanisme transfer beban pada fondasi tiang-rakit (*piled-raft*) melalui beberapa penelitian mahasiswa S2 dan S3. Suatu model test skala kecil pada tiang tunggal dan

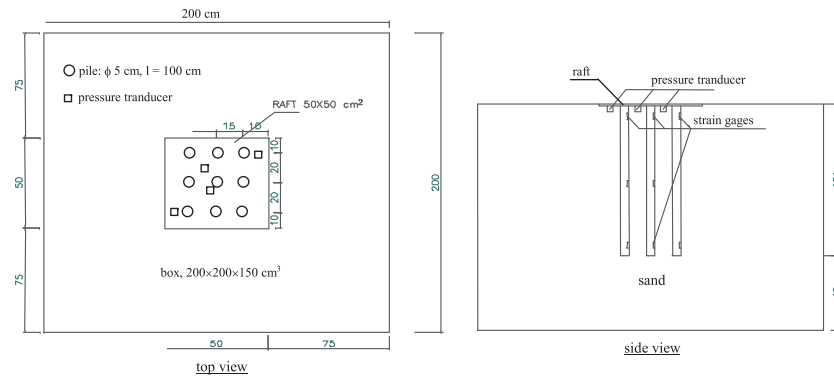
kelompok di laboratorium telah dilakukan. Model tiang skala kecil dilengkapi dengan pemasangan strain-gage pada rakit dan pada fondasi tiangnya, untuk mengukur besarnya regangan dan tegangan yang terjadi pada masing-masing elemen fondasi. Pemodelan elemen hingga juga dilakukan untuk memprediksi besarnya transfer tegangan yang terjadi menggunakan program yang dikembangkan sendiri dengan pemodelan elasto-plastik interface tanah-fondasi tiang (Gambar 6 dan Gambar 7).

Hasil riset piled-raft pada tanah pasir menunjukkan bahwa dapat dilakukan optimasi design fondasi tiang dengan sebagian beban bangunan dibebankan pada rakit dengan variasi 20-50%, tergantung jarak antar fondasi tiang dan kekakuan relatif tiang-raft-tanah. Riset pada tanah lempung mengindikasikan adanya reduksi beban yang dipikul oleh raft dengan variasi 10-30% dengan adanya proses konsolidasi lapisan tanah di antara dan di bawah fondasi tiang (Gambar 8). Penelitian lanjutan juga dilakukan untuk mempelajari mekanisme transfer beban pada sistem fondasi cakar-ayam (Gambar 9). Hasil riset ini menghasilkan beberapa *design-chart* yang dapat dijadikan sebagai pedoman dalam disain fondasi piled-raft. Hasil penelitian telah dipublikasikan pada beberapa konferensi dan journal, baik nasional maupun internasional. Hasil penelitian *piled-raft* ini berhasil diaplikasikan pada design fondasi *piled-raft* Gedung 50 lantai Amartapura di Tangerang (Sengara et al., 2001) (Gambar 10). Selain itu, program yang dikembangkan telah diaplikasikan pula untuk prediksi dan verifikasi hasil *load-test* beberapa disain fondasi gedung tinggi di Jakarta (Gambar 11).

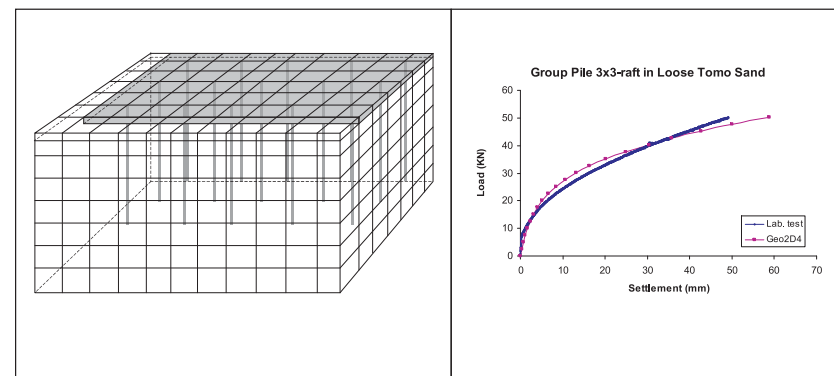


Gambar 6. Model fondasi skala kecil piled-raft tunggal, model elemen hingga, dan hasil perbandingan eksperimen dan prediksi analisis (Sengara et al., 1999)

(Sengara et al., 1999)

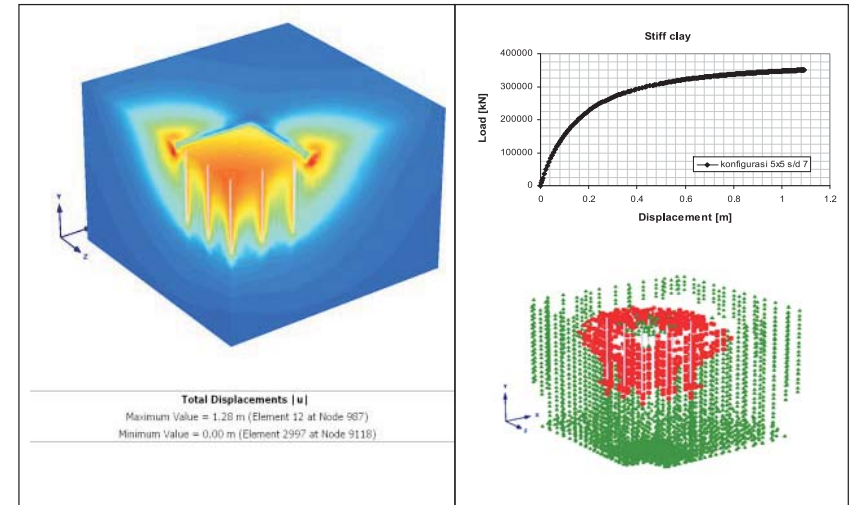


(a)

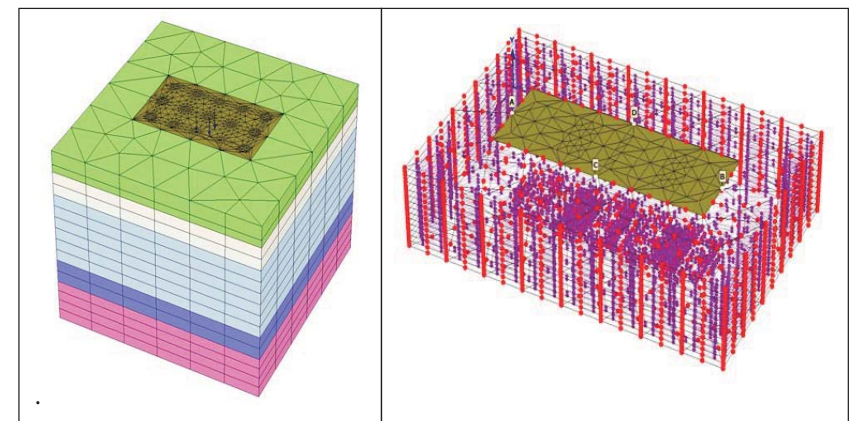


(b)

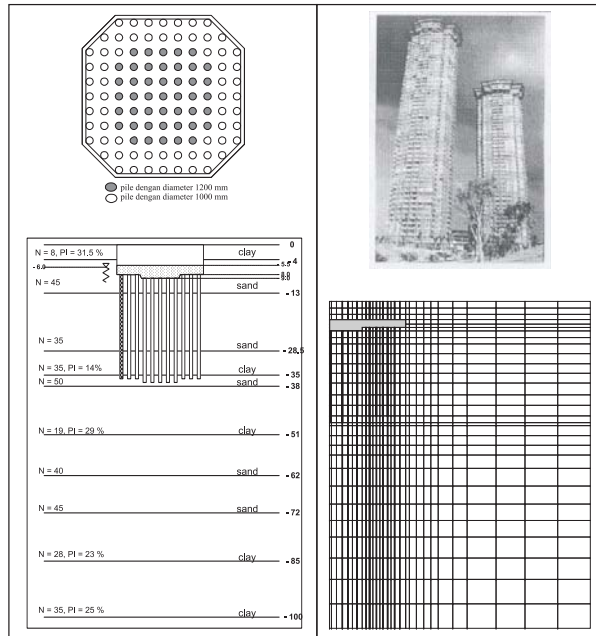
Gambar 7. (a) Model experimental skala kecil laboratorium pile-raft kelompok; (b) Model elemen hingga dan perbandingan hasil eksperimen dan prediksi (Sengara et al., 2001; Sengara and Roesyanto, 1999)



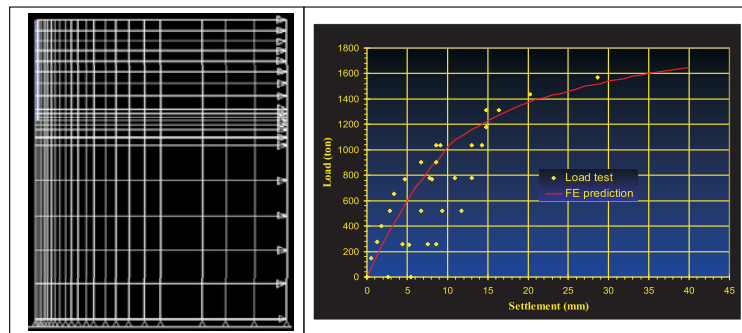
Gambar 8. Model 3-D elemen hingga piled-raft, model tanah lempung non-linear (Thesis Magister Kardiansjah, 2011)



Gambar 9. Model 3-D elemen hingga fondasi cakar-ayam model tanah non-linear (Thesis Magister Dea Pertiwi, 2011)



Gambar 10. Aplikasi model interface pada fondasi piled-raft 50 lantai Gedung Amartapura (Sengara et al., 2001)



Gambar 11. Aplikasi model interface pada load test fondasi bored-pile (Sengara and Roesyanto, 2002)

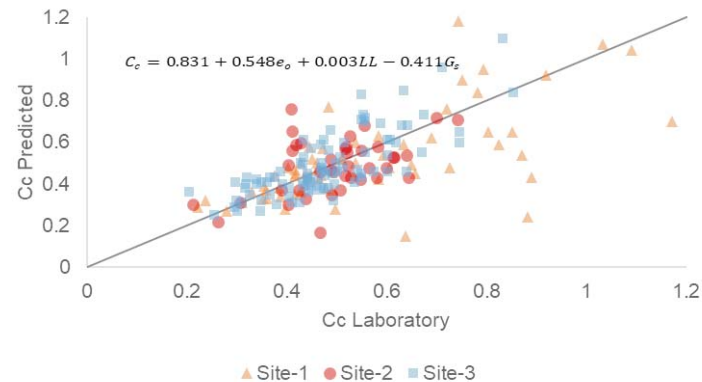
4.3 Riset Parameter Kompresibilitas Tanah Lempung Jakarta

Pembangunan gedung tinggi di Jakarta semakin pesat dan semakin tinggi mengejar rencana pembangunan gedung super-tinggi 90 sampai lebih dari 100 lantai. Salah satu perhatian pada disain dan konstruksi gedung super-tinggi adalah penurunan (*settlement*) bangunan gedung tersebut selama masa layannya sekitar 50-75 tahun. Penelitian tentang kompresibilitas tanah lempung Jakarta khususnya lapisan di bawah 30-100 meter dalam kaitannya dengan penurunan gedung-tinggi Jakarta telah dipublikasi dalam konferensi Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia (HATTI) oleh Toha dan Sengara (2009). Studi yang dilakukan memberikan rekomendasi terhadap parameter-parameter penting kompresibilitas tanah (C_c , C_r , p_c' , dan OCR). Hasil studi memberikan temuan bahwa penggunaan metoda langsung dalam estimasi parameter kompresibilitas yang dilakukan di dalam praktek di Jakarta cenderung tidak konservatif. Kesulitan dalam pengambilan sample tanah tidak terganggu pada kedalaman di bawah 30 m menyebabkan adanya keterbatasan dalam rekomendasi yang diberikan.

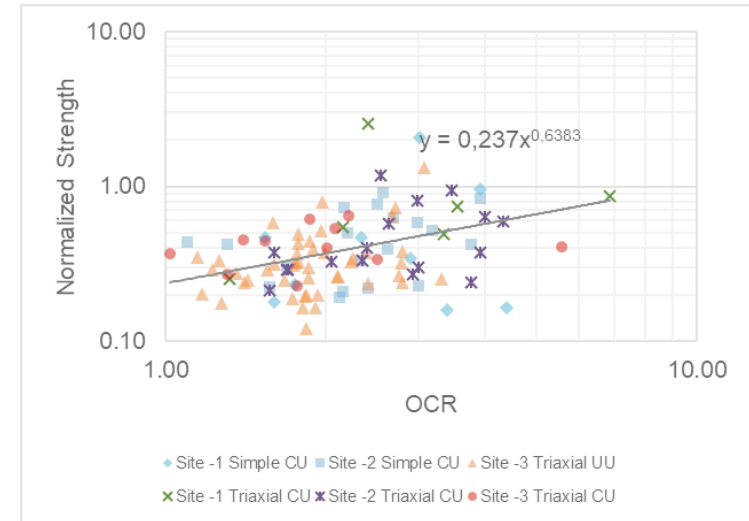
Suatu studi lanjutan dilakukan oleh penulis dan tim dengan pengumpulan sampel-sampel tanah tidak terganggu sampai kedalaman 300m yang dipertimbangkan mewakili *deep-clay deposit* Jakarta. Data tanah diambil dari hasil penyelidikan tanah beberapa gedung tinggi dan rencana gedung super-tinggi di Jakarta. Data-data tanah baik hasil test lapangan maupun laboratorium, telah memberikan suatu database parameter kompresibilitas tanah yang cukup dengan evaluasi nilai

parameter ambang atas dan bawah. Penelitian kompresibilitas lapisan tanah pada kedalaman ini belum pernah diteliti sebelumnya. Walau dengan data-data yang masih terbatas karena kesulitan pelaksanaan dan keterbatasan biaya untuk pengambilan tanah lapisan dalam ini, hasil penelitian telah memberikan rekomendasi awal serta korelasi empiris spesifik antara beberapa parameter design kompresibilitas tanah yang dapat menjadi acuan untuk analisis perhitungan penurunan gedung tinggi di Jakarta.

Gambar 12 menunjukkan data-data hasil test laboratorium dan prediksi parameter kompresibilitas. Hasil riset memberikan perumusan korelasi parameter kuat geser tanah dan kompresibilitas $C_u/\sigma'_{vc} = S(OCR)^m$, dengan nilai $S=0.237$ dan $m=0.6383$ seperti ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 12. Data-data hasil test laboratorium dan prediksi parameter kompresibilitas *deep-clay deposit* Jakarta



Gambar 13. Perumusan korelasi parameter kuat geser dan kompresibilitas *deep-clay deposit* Jakarta

4.4 Pengembangan Alat Truly Triaxial

Pemodelan tanah memerlukan dukungan peralatan laboratorium untuk dapat mengetest sample tanah dan meneliti respon hubungan tegangan-regangan tanah. Hubungan tegangan-regangan tanah ini perlu diteliti dalam berbagai respon kondisi level tegangan, lintasan tegangan, dan tekanan air pori. Respon ini tidak bisa didapatkan dari alat test laboratorium triaxial standar, namun hanya bisa didapatkan dari suatu alat Truly Triaxial. Laboratorium Mekanika Tanah di bawah KKR-FTSL ITB telah berhasil membuat alat Truly Triaxial yang pertama di Indonesia, seperti ditunjukkan pada Gambar 14. Pembuatan alat ini atas

hasil kerjasama KKRG dengan Prof. Jeffry Budiman dari Illinois Institute of Technology, Chicago, USA.



Gambar 14. Alat Truly Triaxial hasil pengembangan Laboratorium Mekanika Tanah - FTSL – ITB

Beberapa mahasiswa S-2 telah menggunakan alat Truly Triaxial ini untuk riset tentang perilaku kuat geser dan modulus tanah terhadap berbagai lintasan tegangan. Hasil penelitian menunjukkan adanya pengaruh lintasan tegangan pada respon kuat geser dan modulus tanah. Temuan ini memberikan masukan tentang pentingnya pengembangan atau modifikasi model tanah yang ada untuk dapat memperhitungkan lintasan tegangan (*stress-path dependency*) agar didapatkan solusi permasalahan geoteknik dan interaksi tanah-struktur yang lebih representatif.

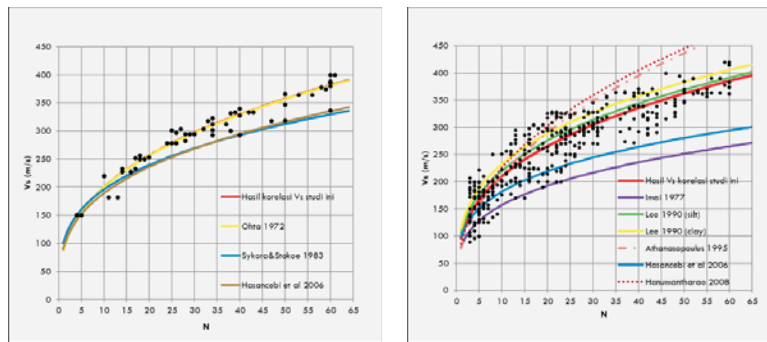
4.5 Riset Pemodelan Geoteknik-Gempa

- *Riset Korelasi Vs*

Kecepatan gelombang geser merupakan salah satu parameter dinamik yang sangat penting untuk kebutuhan analisis *site response*. Penentuan kecepatan gelombang geser dapat dilakukan melalui pengukuran langsung maupun dengan menggunakan pendekatan korelasi. Korelasi untuk memprediksi kecepatan gelombang geser telah banyak dikembangkan oleh para peneliti sebelumnya namun kemampuan prediksi dari masing-masing persamaan korelasi bervariasi antara suatu lokasi dengan lokasi lain. Dalam studi ini dilakukan analisis untuk mendapatkan persamaan korelasi dengan menggunakan data properti tanah dengan nilai kecepatan gelombang geser hasil uji SDH dan SASW.

Penelitian difokuskan untuk mencari suatu hubungan korelasi antara nilai N dengan V_s hasil pengukuran yang dikumpulkan dari lokasi penelitian di Jakarta. Korelasi dibedakan berdasarkan kriteria jenis tanah yaitu: semua jenis tanah, tanah lempung, dan tanah pasir. Suatu analisis regresi non linier dilakukan untuk mendapatkan persamaan korelasi. Hasil dari analisis regresi menunjukkan bahwa terdapat suatu hubungan antara N dengan V_s yang dinyatakan dalam suatu bentuk persamaan korelasi. Metode pengukuran lapangan sangat mempengaruhi terhadap persamaan korelasi yang dihasilkan. Persamaan korelasi yang dihasilkan kemudian dibandingkan dengan korelasi-korelasi sebelumnya sebagai verifikasi terhadap kemampuan prediksi dari persamaan korelasi.

Persamaan korelasi yang diperoleh dari hasil penelitian ini cukup baik, berada dalam rentang prediksi korelasi dari penelitian sebelumnya (Gambar 15). Tidak diperoleh korelasi dari hasil uji sondir/CPT. Korelasi dari hasil S_u lab perlu studi lebih lanjut dengan menggunakan data yang lebih banyak.



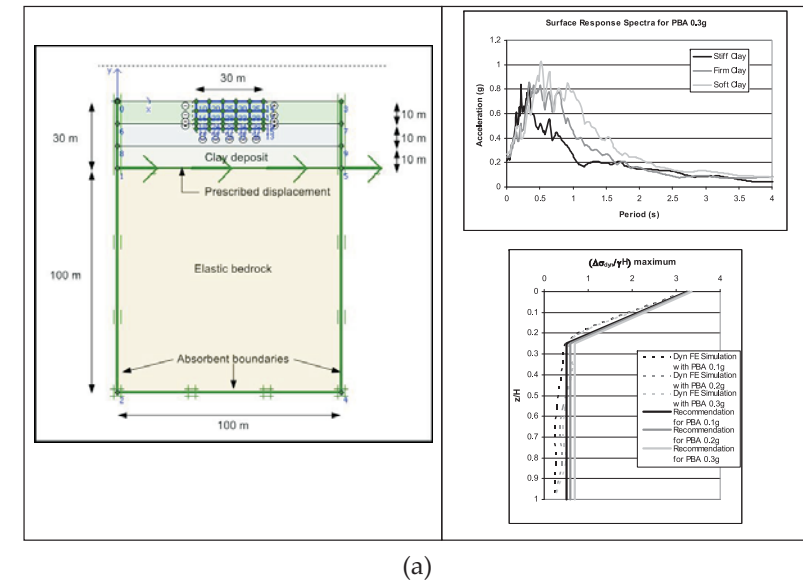
Gambar 15. Riset korelasi V_s dari data SASW, SDH, dan N-SPT (Jayasaputra dan Sengara, 2010)

- **Pemodelan Tekanan Lateral Dinding Basement**

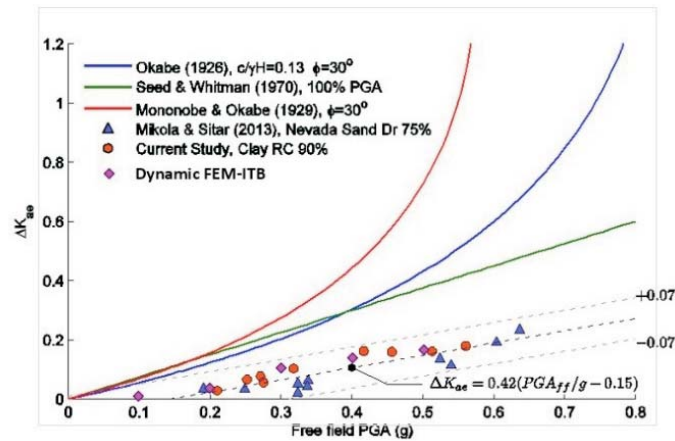
Konstruksi basement ruang bawah tanah untuk prasarana parkir dan stasiun MRT terus akan terus meningkat di masa mendatang. Riset tentang tekanan lateral pada dinding basement akibat beban seismik dilakukan dengan memberikan simulasi getaran gempa langsung pada batuan dasar. Getaran diberikan untuk merepresentasikan baik sumber subduksi maupun patahan dangkal dengan intensitas dan durasi gempa yang bervariasi. Selain itu, klasifikasi site dan kedalaman basement juga

divariasi untuk merepresentasikan kondisi yang dapat terjadi dalam praktek. Analisis rambatan gelombang 2-Dimensi dengan modulus dan redaman *non-linear* serta interaksi tanah-struktur basement dimodelkan untuk mendapatkan respon distribusi tekanan lateral pada dinding.

Hasil simulasi menyatakan bahwa distribusi tekanan lateral tidaklah linear sebagai fungsi kedalaman basement seperti teori yang sudah diterapkan sebelumnya. Beberapa hasil riset ini, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 16 telah dipublikasi dalam beberapa konferensi internasional (Sengara and Sumiartha, 2002; Wijayanto and Sengara, 2008). Hasil riset ini memberikan kecenderungan hasil yang mirip dengan hasil pengamatan pada eksperimen di laboratorium menggunakan alat *centrifuge* yang dilakukan oleh Sitar and Wagner, 2016. Verifikasi dari riset



(a)



(b)

Gambar 16. (a) Hasil riset distribusi tekanan lateral seismic pada dinding basement (Wijayanto dan Sengara, 2008); (b) Verifikasi SSI dynamic FEM-ITB

yang dilakukan Sitar and Wagner ini dilakukan melalui simulasi dynamic FEM di ITB seperti yang ditunjukkan pada Gambar 16 (b) (Sengara dan Silaban, 2017).

Riset lebih lanjut untuk memprediksi besarnya beban seismik dari basement ke dalam fondasi tiang suatu gedung tinggi juga dilakukan. Dengan mempertimbangkan berbagai variabel dan ketidakpastian yang ada dengan suatu pemodelan tanah non-linear elasto-plastik serta interaksi tanah-struktur basement dan fondasi tiang.

- **Stabilitas Lereng Beban Dinamik**

Analisis respon riwayat-waktu pada berbagai masalah geoteknik akibat beban gempa telah bisa dilakukan saat ini dengan model modulus

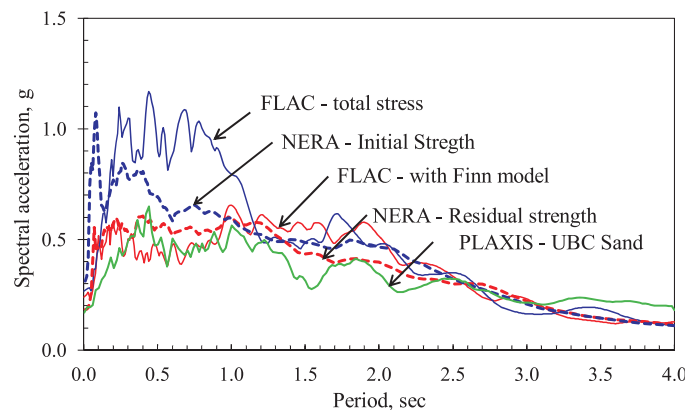
dan redaman Rayleigh (α, β) tanah *non-linear*. Riset stabilitas lereng akibat beban seismik dengan simulasi analisis respon riwayat-waktu menitikberatkan pada respon lereng dengan variasi tinggi lereng, klasifikasi-site, karakteristik dan intensitas beban gempa. Riset ini mengembangkan korelasi antara angka keamanan dari hasil analisis statik-ekivalen dan respon deformasi dari hasil analisis riwayat-waktu. Hasil riset memberikan rekomendasi koefisien statik-ekivalen $k_h = 0.38-0.4$ (Frantan dan Sengara, 2017), lebih kecil dari nilai 0.5 yang biasa digunakan dalam praktek selama ini.

- **Analisis Prediksi Spektral-Respon Non-Linear Kawasan Likuifaksi**

Kawasan bangunan yang lapisan bawah permukaannya terdapat pasir lepas jenuh air termasuk kawasan reklamasi akan berpotensi terhadap bahaya likuifaksi, yang dapat menyebabkan kegagalan bangunan. Upaya untuk mengamankan bangunan pada kawasan ini memerlukan suatu kajian potensi likuifaksi dan spesifikasi/kriteria design seismik yang memperhitungkan adanya likuifaksi. Riset kajian untuk menyusun prosedur praktis dalam analisis respon site-spesifik potensi likuifaksi telah dibuat dan dipublikasi (Sengara et al., 2016). Kajian ini dimulai dari metoda standar pendekatan tegangan total menggunakan perambatan gelombang 1-D program NERA, yang dimodifikasi dengan mereduksi modulus geser akibat adanya kenaikan air pori beban siklus gempa (Olsen, 2007). Model rambatan gelombang 2-D dilakukan dengan model modulus dan redaman non-linear seperti pada halnya NERA,

namun dapat dilakukan pendekatan baik tegangan total maupun efektif menggunakan program FLAC (Itasca Consulting Group, Inc., 2007). Sesuai dengan perkembangan terkini, selanjutnya digunakan pula pendekatan tegangan efektif model konstitutif *UBC-Sand* (Beatty and Byrne, 2011). Hasil analisis ditunjukkan pada Gambar 17, yang membandingkan ketiga metoda analisis yang digunakan. Prosedur dalam analisis ini dapat menjadi acuan untuk pengembangan spectra disain kawasan rawan likuifaksi.

Diseminasi dan publikasi beberapa hasil riset pemodelan geoteknik-gempa yang telah disampaikan di atas telah penulis lakukan dalam beberapa permintaan untuk menjadi pembicara (beberapa pembicara utama) dalam suatu seminar dan konferensi, baik nasional maupun internasional (www.aargi.org).



Gambar 17. Perbandingan spektral respon dari hasil analisis NERA, FLAC, dan PLAXIS (Sengara et al., 2016)

5. APLIKASI RISET ILMU PEMODELAN GEOTEKNIK DAN RISET TERKAIT PENGURANGAN RISIKO KEGAGALAN BANGUNAN

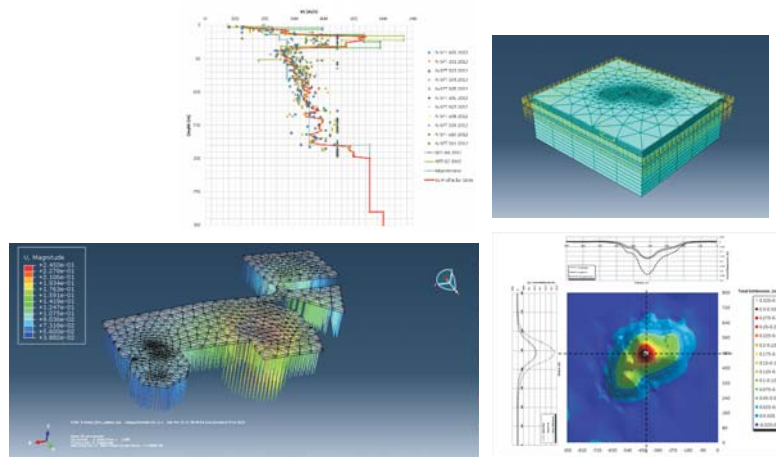
Beberapa hasil riset yang telah disampaikan di atas telah dilakukan untuk menunjukkan peran dan aplikasi ilmu pemodelan geoteknik dalam disain bangunan di Indonesia. Interaksi ITB dan industri menjadi salah satu tujuan kegiatan riset ITB dalam upaya dapat menjawab tantangan permasalahan konstruksi bangunan dan infrastruktur di Indonesia. Dalam kaitan ini, untuk sinergi kegiatan penelitian dan aplikasinya, kegiatan beberapa kerjasama telah dilakukan dengan masyarakat industri konstruksi, tambang, dan migas di Indonesia. Selain itu, telah dilaksanakan kerjasama dengan beberapa instansi, perusahaan Konsultan, baik BUMN maupun swasta.

5.1 Analisis Fondasi, Penurunan Bangunan, dan Kriteria Beban Gempa

Kemajuan dalam pemodelan tanah dan komputasi telah cukup berhasil memecahkan masalah kompleks geoteknik dan interaksi tanah-struktur dalam aplikasi seperti fondasi dan penurunan bangunan. Analisis dan disain dalam geoteknik sudah melangkah lebih maju sebagai alternatif metoda analisis keseimbangan batas yang selama ini masih digunakan oleh para praktisi. Disain fondasi gedung tinggi dan super-tinggi (di atas 70 lantai) di daerah perkotaan merupakan tantangan tersendiri untuk dapat memberikan konstruksi yang aman dan hemat biaya.

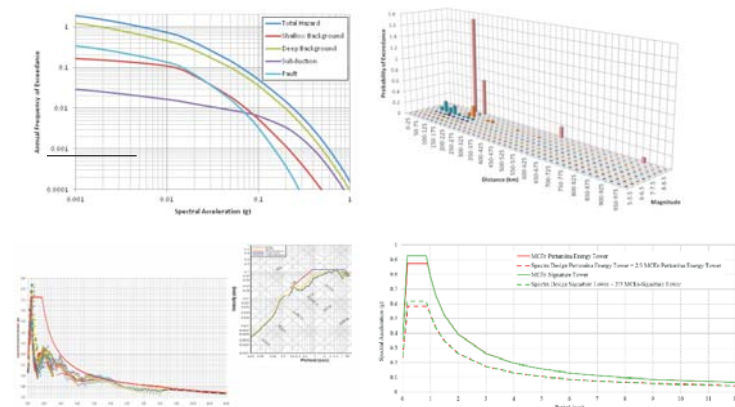
Suatu aplikasi pemodelan geoteknik menggunakan model tanah *non-*

linear elasto-plastic Mohr Coulomb, Hardening Soil, dan Modified CamClay, dengan komputasi elemen hingga dilakukan untuk analisis rencana fondasi gedung super-tinggi di Jakarta yang melibatkan lapisan tanah lempung sangat dalam (*deep-clay deposit*). Oleh karenanya penurunan bangunan menjadi salah satu kekhawatiran dari suatu disain bangunan gedung tinggi. Pemodelan lapisan tanah sampai kedalaman 200 meter telah dilakukan untuk tanah lempung Jakarta. Test-test laboratorium yang cukup mendetail telah pula dilakukan untuk keperluan pemodelan lapisan-lapisan tanahnya. Model elemen hingga 2-D dan 3D juga dilakukan sehingga dapat direkomendasikan distribusi besarnya penurunan bangunan secara representatif. Gambar 18 menunjukkan profil lapisan tanah deposit-dalam (*deep-clay deposit*), model elemen hingga 3-D fondasi, dan hasil prediksi penurunan bangunannya (Sengara et al., 2015c).



Gambar 18. Profil lapisan tanah deposit-dalam (*deep clay deposit*), model elemen hingga 3-D fondasi dan hasil prediksi penurunan bangunan (Sengara et al., 2015c).

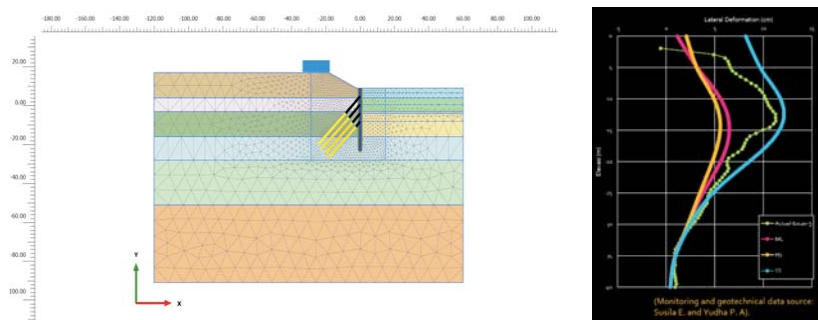
Suatu bangunan gedung tinggi atau super-tinggi membutuhkan suatu analisis yang komprehensif sampai analisis dan disain berbasis kinerja (*performance based design, PBD*) untuk mengecek kinerja bangunan terhadap beban gempa. Dalam analisis dan disain struktur PBD, diperlukan analisis yang mengintegrasikan analisis hazard seismik probabilistik (PSHA) dan analisis respon spesifik site (SSRA), serta pengembangan input getaran tanah (*time-history ground-motions*). Kemajuan terkini dalam PSHA, SSRA, dan input getaran-tanah ini telah diaplikasikan dalam pengembangan design kriteria beberapa bangunan tinggi dan rencana bangunan super-tinggi di Jakarta. Keperluan akan data profil kecepatan rambat gelombang dan kedalaman batuan dasar dilakukan dengan pengeboran dan juga test *downhole* seismik dan survey micro-tremor. Gambar 19 menunjukkan proses dan hasil analisis SSRA tersebut. Prosedur analisis ini dapat menjadi acuan dalam pengembangan kriteria design seismic suatu bangunan yang memerlukan PBD di Indonesia.



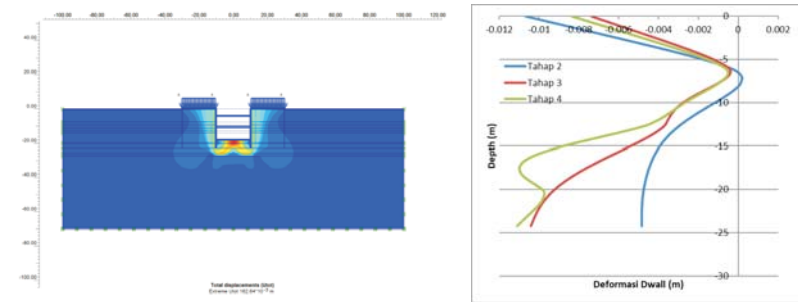
Gambar 19. Proses pengembangan spektra disain dalam analisis PSHA dan SSRA

5.2 Analisis Interaksi Tanah-Struktur Galian-Dalam

Aplikasi disain bangunan yang melibatkan konstruksi bertahap seperti galian-dalam bangunan gedung dan satasiun MRT bawah tanah, memerlukan suatu pemodelan geoteknik yang relatif kompleks. Keperluan akan pembangunan bawah tanah yang meningkat memerlukan suatu metoda disain model tanah nonlinear dan teknik komputasi yang cepat. Suatu aplikasi pemodelan galian-dalam konstruksi bertahap dari atas ke bawah (*top-down construction*) menggunakan model tanah *non-linear elasto-plastic Mohr Coulomb*, *Hardening Soil*, dan *Modified CamClay*, dengan komputasi elemen hingga dilakukan untuk beberapa kasus bangunan. Model galian bertahap pada konstruksi basement 7-level suatu bangunan gedung di Jakarta dan model stasion MRT-Jakarta ditunjukkan pada Gambar 20 dan Gambar 21 (Sengara et al., 2015c).



Gambar 20. Model elemen hingga galian-dalam basement dan hasil analisisnya (Sengara et al., 2015)



Gambar 21. Model elemen hingga Stasion MRT Jakarta dan respon deformasi hasil analisisnya

5.3 Kerjasama Keilmuan Terkait: Analisis Terkait Risiko Kegagalan Bangunan Akibat Beban Gempa dan Tsunami

Penelitian bidang pemodelan geoteknik dan interaksi tanah-struktur ini kami juga telah arahkan untuk aplikasi pada bidang geoteknik-gempa. Dalam kaitan ini, beberapa kerjasama penelitian melalui LPPM-ITB dengan instansi pemerintah (Ristek, BNPB, Pemda DKI, Pemda Jawa Barat) dan juga organisasi dan universitas internasional (*ADPC-USAID*, *AusAID-AIFDR*, *Kyoto University*, dan terakhir dengan *Australia National University*). Kerjasama ini juga untuk mengintegrasikan penelitian KKRK, KKRS, PRI, dan Pusat Penelitian Penelitian Mitigasi Bencana (PPMB)-ITB, dan Kelompok Keilmuan serta Pusat terkait lainnya di ITB.

Keseluruhan bentuk riset dan kerjasama di atas juga telah diintegrasikan dalam pendidikan dan penelitian S1, S2, dan S3. Beberapa hasil riset penelitian telah dipublikasikan dan didesiminasikan pada pertemuan ilmiah Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia (HATTI),

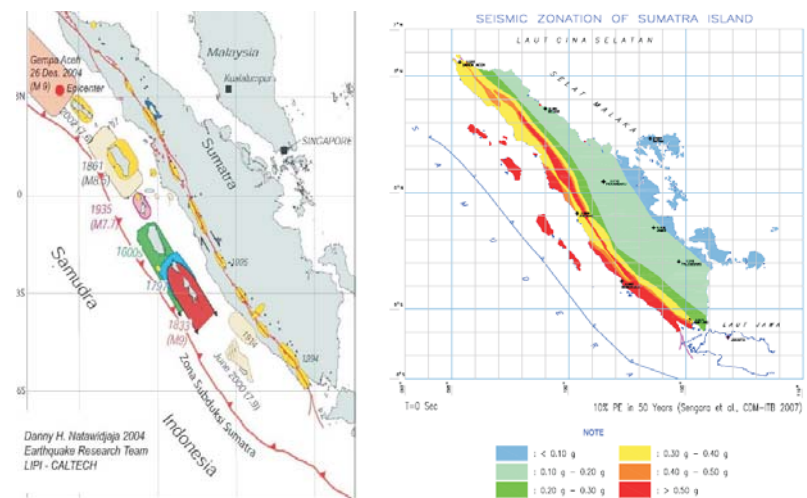
Himpunan Ahli Konstruksi Indonesia (HAKI), Asosiasi Ahli Rekayasa Kegempaan Indonesia (AARGI), dan beberapa asosiasi internasional.

5.3.1 Hazard Gempa dan Tsunami

Penulis turut memberikan kontribusi dalam penyempurnaan peta gempa Indonesia melalui Riset Unggulan Terpadu tentang PSHA Pulau Sumatra mulai tahun 2006, dengan adanya penelitian pemetaan lempeng tektonik dan patahan Pulau Sumatra yang dilakukan oleh Sieh and Natawidjaja (2000) dan Natawidjaja, 2002 di California Institute of Technology. Riset ini juga mendapat dukungan dari Dr. Wahyu Triyoso sebagai ahli seismologi. Penelitian yang menjadi thesis Sdr. Ir. Hendarto telah menghasilkan peta nilai spektral percepatan gempa Pulau Sumatra untuk periode getaran gempa 0.2 dan 1.0 detik, serta T=0 detik (PBA) (Sengara et al., 2008), untuk periode ulang 2% dan 10% kemungkinan terlewati, yang ditunjukkan pada Gambar 22.

Gempa dan tsunami dahsyat Aceh M9.3 Desember 2004 telah menyebabkan ratusan ribu nyawa manusia menjadi korban dan kerugian harta benda serta keruntuhan/kerusakan bangunan yang sangat besar. Pada Maret 2005 terjadi gempa M8.6 Nias yang menyebabkan ribuan korban jiwa dan ratusan keruntuhan/kekrusakan bangunan. Rehabilitasi dan rekonstruksi mengambil anggaran pembangunan negara yang luar biasa. Dalam kaitan ini, penulis mendapat tugas dari ITB untuk memimpin tim survey rekonesans untuk melakukan kajian dan mengevaluasi keruntuhan dan kerusakan bangunan pasca gempa Aceh

dan Nias ini. Survey yang telah dilakukan mengidentifikasi aspek-aspek kegempaan dan aspek-aspek rekayasa geoteknik untuk dapat dijadikan sebagai *lesson learned* terhadap suatu kejadian bencana dasyat pada abad ini. Hasil-hasil survey dan kajian hasil survey telah disampaikan kepada Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) dan juga kepada Badan Rehabilitasi dan Rekonstruksi (BRR) NAD-Nias.

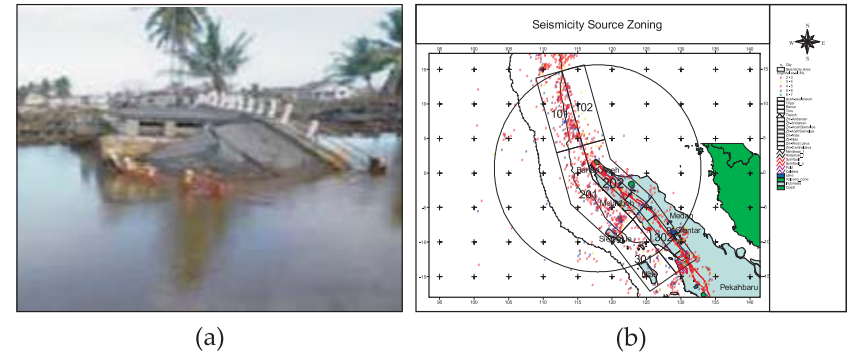


Gambar 22 (a) Peta elemen tektonik lempeng dan ringkasan seismologi gempa-gempa besar Pulau Sumatra (Natawidjaja, 2002; 2005); (b) Peta hazard gempa Pulau Sumatra dengan 10% kemungkinan terlewati dalam 50 tahun, untuk nilai spektral pada T=0 sec (PBA) (Sengara et al., 2008)

Hasil survey dan kajian gempa dan tsunami Aceh telah pula dipublikasikan dalam beberapa journal dan konferensi baik nasional maupun internasional, diantaranya dalam *journal Earthquake Spectra* –

2006 Special Publication Great Sumatra 2004 Earthquake (Sengara et al., 2006) dan The Tenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, di Bangkok (Sengara and Hendarto, 2006). Gambar 23 menunjukkan hasil survey dan kajian gempa Aceh 2004.

Rehabilitasi dan rekonstruksi ini memerlukan suatu dukungan kriteria *hazard* gempa dan tsunami. Suatu studi kasus untuk mengembangkan kriteria design dari pembangunan kawasan pantai telah dilakukan oleh penulis dan rekan-rekan peneliti di PMB-ITB. Suatu analisis rintisan probabilistik terintegrasi gempa dan tsunami telah dilakukan. Kajian dan riset ini bertujuan untuk menghasilkan peta mikrozonasi seismik dan tsunami sebagai dasar dalam penentuan kriteria disain seismik dan tsunami. Peneliti tsunami Dr. Hamzah Latief dan Prof. Syahril B. Kusuma mendukung penelitian ini dan bersama telah memberikan rekomendasi hasil simulasi tsunami berupa prediksi tinggi dan distribusi rendaman tsunami di masa depan dalam suatu pendekatan probabilistik. Tabel 1 dan Gambar 24 (a) dan (b) menunjukkan beberapa hasil penelitian ini. Hasil rekomendasi ini telah disampaikan kepada BNPB dan sebagai masukan kepada BRR NAD-Nias dalam kurun waktu 2005-2010, untuk kriteria design dan perencanaan wilayah rehabilitasi dan rekonstruksi NAD. Hasil riset ini telah berhasil pula dipublikasikan dalam *Proceedings of the 2nd Internasional Conference on Geotechnical Disaster Mitigation and Rehabilitation 2008 (GEDMAR2008)* (Sengara et al., 2008).

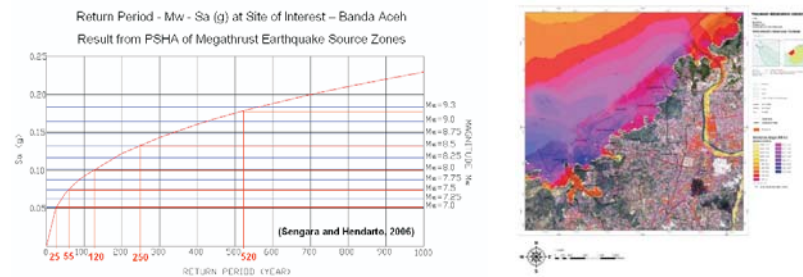


Gambar 23 (a) Likuiifikasi yang menyebabkan kegagalan fondasi (b) Zoning sumber seismik yang merepresentasikan zona subduksi dan patahan Sumatra dalam radius 500 km dari kota Banda Aceh

Dari hasil riset awal Pulau Sumatra, selanjutnya penulis turut berkontribusi dan dipercaya sebagai Wakil Ketua dalam penyusunan revisi peta *hazard* gempa Indonesia 2010 yang dipimpin oleh Prof. Masyhur Irsyam. Melalui PMB-ITB, penulis turut dalam mengkoordinasikan dan mengintegrasikan anggota Tim yang terdiri atas berbagai ahli (geofisika, seismologi, geodesi, dan geoteknik di ITB). Dalam proses ini, selain dari Departemen PUPR; Kementerian Ristek, BNPB, dan *Australia-Indonesia Facilities for Disaster Reduction (AIFDR)* turut pula memberikan dukungan dalam menyelesaikan peta *hazard* gempa Indonesia ini sampai akhirnya diresmikan secara nasional tahun 2010 (Irsyam et al., 2010). Peta revisi *hazard* gempa Indonesia 2010, yang merupakan acuan dan masukan untuk merevisi peraturan bangunan tahan gempa Indonesi 2002 untuk gedung, dan juga untuk revisi peraturan tahan gempa untuk bangunan jembatan dan bangunan air.

Tabel 1. Summary on results of tsunami wave propagation modeling (Sengara et al., 2008)

Scenario	Moment Magnitude	Return Period (years)	Tsunami Height at Case-Study Site (m)
1	9.3	520	9.2
2	8.5	250	7.2
3	8.0	120	3.4
4	7.5	55	1.5
5	7.0	25	0.5



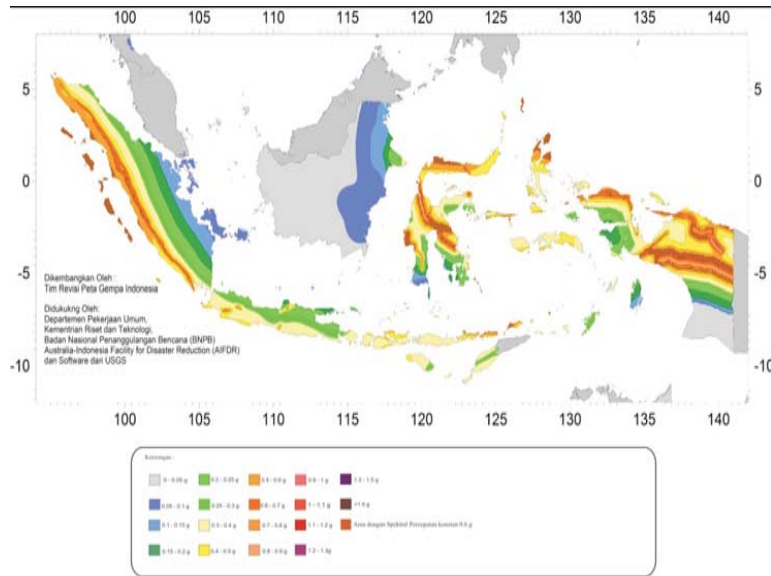
Gambar 24 (a) Kurva hazard ; (b) Salah satu skenario rendaman tsunami pada kawasan pantai Meuraxa-Banda Aceh ($M_w=8.0$), periode ulang 120 tahun) (Sengara et al., 2008)

5.3.2 Risk-Targeted Ground Motions Bangunan Gedung

Perkembangan baru dalam penyusunan kriteria design seismik bangunan berkembang dengan pesatnya penelitian, khususnya di Amerika. Ditemukan bahwa kriteria menggunakan *hazard* gempa sebagai dasar tidaklah tepat, karena keruntuhan bangunan dengan kriteria *hazard* yang sama (*uniform hazard criteria*) ternyata memberikan risiko

keruntuhan yang tidak sama. Oleh karenanya berkembanglah ketentuan baru menggunakan kriteria risiko (*uniform risk criteria*), yang perlu melibatkan karakteristik fragilitas (*fragility*) dari bangunan, dalam proses untuk mengembangkan peta yang disebut sebagai *risk-targeted maximum considered earthquake* (MCE_R), sebagai modifikasi dari peta *hazard* gempa Indonesia 2010.

Dalam kaitan ini, penulis mendapat kesempatan untuk mengkoordinasi pengembangan peta MCE_R dengan acuan ASCE-SEI-7-10 (2010), untuk revisi Peraturan Bangunan Tahan Gempa Indonesia 2012 untuk Gedung (SNI-1726-2012). Suatu proses integrasi kurva-*hazard* (*hazard-curves*) yang dikembangkan dari peta hazard gempa 2010 dan kurva-fragilitas (*fragility-curves*) bangunan gedung. Kurva fragilitas bangunan gedung Indonesia mengacu pada kurva fragilitas generik dengan parameter utama fragilitas (standar deviasi log-normal, β) spesifik Indonesia, yang diusulkan oleh Sidi (2011) dari hasil analisis *hazard* dan angka keamanan berbasis probabilitas (*hazard analysis and probability-based factor of safety*). Peta MCE_R berhasil diselesaikan dengan bantuan program komputer yang penulis kembangkan sendiri bersama Sdr. Andri Mulia, dengan mengacu pada pengembangan peta MCE_R Amerika Serikat, yang dikembangkan oleh Luco (2007). Perhitungan MCE_R ini dilakukan untuk seluruh Indonesia yang meliputi 96,000 cells untuk dua nilai spektral $T=0.2$ detik dan $T=1.0$ detik. Gambar 25 menyajikan peta MCE_R untuk Indonesia yang telah diacu dalam SNI-1726-2012 (Sengara et al., 2011).



Gambar 25. Parameter gerak tanah Risk-Targeted Maximum Considered Earthquake (MCER) percepatan respon spektral Indonesia (5% Critical Damping, Site-Class B, untuk S_1 , $T=1.0$ detik (Sengara et al., 2011a)

Pengembangan peta MCER ini juga menjadi bagian dari riset yang didukung oleh *IMHERE Project B.2C FTSL-ITB*. Hasil riset dan pengembangan peta telah dipublikasikan dalam International sebagai bentuk pertanggungjawabannya juga publikasi ilmiah telah diterbitkan dalam *12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP12)*, di Vancouver, Canada (Sengara et al., 2012; 2015). Selain itu telah berhasil pula dikembangkan *software* SPECTRAIndo untuk memudahkan pemakai SNI-1726-2012 dalam menentukan kriteria disain spektra untuk bangunan gedung, dengan

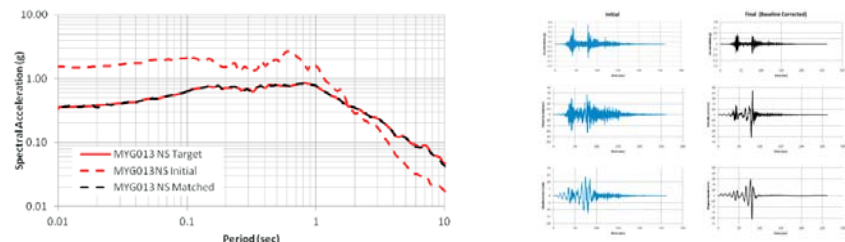
hanya memasukkan koordinat global atau nama Kota dan klasifikasi site. Saat ini, revisi peta gempa Indonesia 2017 telah secara resmi dikeluarkan (Irsyam et al., 2017). Proses untuk revisi peta MCE_R Indonesia juga akan dilakukan sebagai masukan revisi mendatang dari Peraturan Bangunan Tahan Gempa untuk Gedung.

5.3.3 *Input Ground Motions* untuk Analisis Berbasis Kinerja

Suatu analisis atau disain berbasis kinerja (*performance-based design*, *PBD*), baik dalam analisis struktur maupun geoteknik menjadi suatu keperluan dalam praktek disain bangunan di masa mendatang untuk dapat mengevaluasi kinerja disain bangunan secara lebih baik. Dalam PBD ini diperlukan *input* getaran tanah dalam bentuk *time-history* (*time-history input ground motions*) sebagai representasi beban gempa. Dengan beban gempa dalam bentuk *time-history* ini, maka kinerja bangunan dapat disimulasi terhadap getaran gempa. Suatu prosedur pengembangan *time-history* ini memerlukan suatu kajian yang saksama dengan mengacu pada kriteria peta MCE_R , dengan pertimbangan Indonesia tidak memiliki data rekaman getaran gempa yang mencukupi untuk keperluan disain ini, walau saat ini telah dipasang sekitar 500 *accelerometers* oleh BMKG, namun pengumpulan datanya memerlukan waktu, sehingga data rekaman gempa perlu diacu dari gempa di negara lain yang lebih maju.

Suatu prosedur yang telah mengacu pada perkembangan terkini di dunia telah dibuat untuk pengembangan *time-history* dengan teknik *matching* spektral (*spectral-matching*), untuk design bangunan gedung

khususnya dan juga bangunan penting secara umum di Indonesia (Sengara et al., 2012, 2015). Prosedur ini dapat diacu untuk keperluan praktis disain bangunan yang melibatkan PBD. Prosedur ini telah diacu secara praktis untuk disain beberapa gedung tinggi dan rencana gedung super tinggi di Jakarta, serta juga untuk disain jembatan panjang yang menggunakan isolasi seismik. Gambar 26 menunjukkan salah satu contoh hasil pengembangan input *time-history* getaran gempa dengan teknik *spectral-matching* untuk disain gedung tinggi di Jakarta.



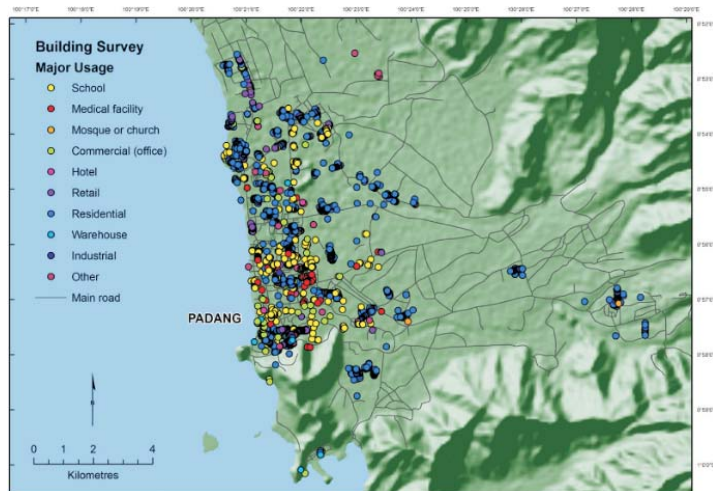
Gambar 26. Typical hasil *spectral-matching* untuk input *time-history* disain bangunan tahan gempa

5.3.4 Riset Kerentanan Bangunan dan Fatalitas Korban Jiwa Akibat Gempabumi

Beberapa kejadian bencana gempabumi di Indonesia telah terjadi dalam 10-15 tahun terakhir ini. Bencana gempa besar tersebut adalah Gempa dan tsunami Aceh (2004), Nias (2005), Yogyakarta (2006), Sumatra Barat dan Jawa Barat 2009. Banyak keruntuhan dan kerusakan bangunan serta korban jiwa yang telah terjadi akibat bencana gempa ini. Hal ini

menunjukkan tingginya kerentanan bangunan dan hunian di Indonesia. Keberadaan lempeng tektonik dan patahan aktif dan riset potensi gempa di Indonesia menunjukkan bahwa kejadian gempa di Indonesia akan terus berlangsung sepanjang masa. Jikalau tidak dilakukan suatu langkah-langkah upaya pengurangan risiko bencana yang tepat dan strategis, maka jumlah korban jiwa akan terus bertambah dan devisa negara akan terus terkuras akibat bencana gempa di masa depan.

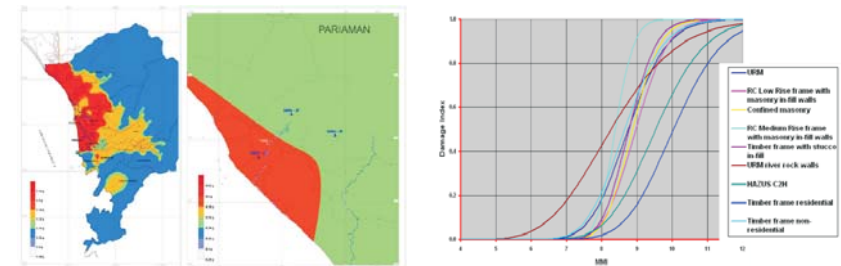
Salah satu upaya untuk mengurangi korban jiwa dan kerugian akibat bencana gempa adalah identifikasi risiko dan mengurangi kerentanan bangunan. Riset tentang survey bangunan pasca bencana gempa dan pengembangan model kerentanan bangunan telah dilakukan di ITB di bawah koordinasi penulis dan Dr. Made Suarjana. Riset ini didukung oleh BNPB dan AIFDR. Kegiatan telah melibatkan survey terhadap sekitar 4000 bangunan pasca gempa M7.6 Sumatra Barat 2009 (Gambar 27). Bangunan yang diteliti meliputi bangunan/fasilitas kesehatan, sekolah, dan hunian. Penelitian melibatkan para ahli bangunan, praktisi, dan mahasiswa, baik Indonesia maupun Internasional, tidak kurang dari 60 peneliti dan surveyor. Suatu riset tentang identifikasi type, distribusi spatial, dan level kerusakan bangunan pada suatu kejadian bencana gempa sebagai laboratorium alam telah dilakukan. Riset ini dilakukan secara sistematis dan terintegrasi, sebagai suatu rintisan pengembangan model kerentanan bangunan di Indonesia.



Gambar 27. Sebaran lokasi survey kerusakan bangunan saat gempa Sumatra Barat 2009 (Sengara et al., 2010)

Riset lanjutan telah dilakukan dengan pengumpulan data-data kerusakan bangunan akibat dari gempa Nias (2005), gempa Yogyakarta (2006), dan gempa Jawa Barat (2009). Riset ini juga melibatkan suatu proses mikrozonasi seismik untuk mengidentifikasi distribusi besarnya percepatan gempa (*PGA*) dan intensitas getaran dalam *Modified Mercally Intensity (MMI)* untuk mengorelasikan level kerusakan bangunan dan besarnya getaran yang menyebabkannya. Dalam hal ini, penelitian distribusi dari profil geoteknik lapisan-lapisan tanah untuk mengidentifikasi profil kecepatan rambat gelombang (*shear-wave velocity*) untuk prediksi amplifikasi seismik dari batuan dasar ke permukaan tanah juga telah dilakukan untuk pengembangan peta mikrozonasi seismik. Gambar

28(a) menunjukkan peta mikrozonasi seismik *PGA* dan *MMI* akibat gempa Sumatra Barata. Dari distribusi spasial seismik ini dihasilkan suatu korelasi spesifik antara level kerusakan bangunan dengan *MMI*. Gambar 28(b) menunjukkan sebagian hasil riset model kerentanan bangunan. Riset nyang dilaksanakan tahun 2009-2013 ini telah berhasil menerbitkan 2 buku yang dapat dapat dimanfaatkan dalam suatu proses kajian risiko bencana gempa di Indonesia untuk mengidentifikasi risiko bencana dan merumuskan suatu langkah-langkah pengurangan risikonya.



Gambar 28. (a) Mikrozonasi seismik akibat gempa Sumatra Barat 2010 (b) Kurva benchmark hasil riset model kerentanan bangunan (Sengara et al., 2010)

5.3.5 Riset Fatalitas Korban Jiwa Akibat Gempa

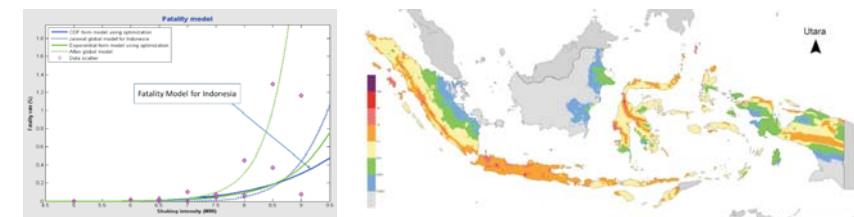
Penelitian korban jiwa (fatalitas) akibat gempa bumi telah dilakukan pula di Pusat Mitigasi Bencana-ITB dengan data-data jumlah dan distribusi spasial korban jiwa yang telah terjadi akibat bebepa kejadian bencana gempa di Indonesia akhir-akhir ini. Data jumlah dan distribusi spasial korban jiwa akibat dari gempa Nias (2005), gempa Yogyakarta (2006), gempa Sumatra Barat (2009), dan gempa Jawa Barat (2009) telah

dikumpulkan dari berbagai sumber oleh Tim Peneliti PMB-ITB. Rasio jumlah korban jiwa terhadap jumlah populasi terpapar per km² (*fatality-rate*) dalam korelasinya dengan getaran gempa secara spatial (peta mikrozonasi seismik Gambar 28a) dirumuskan dalam suatu persamaan eksponensial yang dikembangkan dari model fatalitas generik global: $R(I) = 10^{(aI-b)}$ (Allen et al., 2009), di mana R : fatality-rate dan I adalah intensitas getaran gempa dalam MMI.

Model fatalitas awal untuk Indonesia telah berhasil dikembangkan dengan perumusan $R(I) = 10^{(aI-b)}$, dengan parameter $a=0.622$ and $b=8.033$. Perbandingan model yang dikembangkan dengan model fatalitas global ditunjukkan pada Gambar 29(a). Model fatalitas ini telah dimanfaatkan untuk mengembangkan skenario korban jiwa akibat kejadian gempa untuk seluruh wilayah Indonesia. Selanjutnya, skenario yang dikembangkan didasarkan pada potensi 10% kemungkinan kejadian gempa dalam kurun waktu 50 tahun dengan memanfaatkan peta gempa Indonesia 2010 (Irsyam et al., 2010) dan amplifikasi seismik dari data korelasi kemiringan topografi versus kecepatan rambat gelombang (V_{s30}), (sumber Allen and Wald, 2007), yang dikembangkan dalam Sengara et al., 2012 untuk seluruh Indonesia. Hasil yang didapatkan disajikan pada Gambar 29(b), yaitu peta fatality-rate dalam jumlah korban per km² untuk seluruh wilayah Indonesia yang meliputi Kabupaten/Kota (Sengara et al., 2012). Hasil riset memberikan temuan 30% dari Kabupaten/Kota di Indonesia memiliki potensi jumlah korban jiwa yang tinggi (1-10)/km² dan 5-10% memiliki potensi jumlah korban jiwa yang

sangat tinggi.

Riset ilmiah lebih lanjut telah berhasil pula dilakukan untuk memperbaiki model fatalitas ini dengan pendekatan *Bayesian*. Hasil penelitian telah berhasil dipublikasi dalam *Journal Geology Society of London, Geohazards in Indonesia, Earth Science for Disaster Reduction* (Sengara et al., 2017).



Gambar 29. (a) Hasil model fatalitas awal (b) Peta prediksi korban jiwa dalam jumlah korban per km² (Sengara et al., 2012)

6. PERKEMBANGAN TERKINI DAN TANTANGAN KE DEPAN MENUJU KEMANDIRIAN PEMECAHAN MASALAH REKAYASA GEOTEKNIK DI INDONESIA

6.1 Perkembangan Terkini dalam Ilmu Pemodelan Geoteknik

Material tanah dan batuan sebagai material alam begitu kompleks, sehingga sangat sulit untuk dapat menangkap keseluruhan perilakunya dalam suatu pemodelan matematis ataupun numerik. Terlebih seandainya keseluruhan perilaku tersebut dimodelkan sebagai suatu model yang terintegrasi (*unified and general models*). Demikian juga dalam interaksinya dengan struktur, masih merupakan suatu tantangan dalam

pemodelan geoteknik di masa depan dalam dunia digital komputasi yang sudah canggih saat ini. Di bawah ini disampaikan sekilas tentang beberapa perkembangan baru di dunia dalam pemodelan geoteknik.

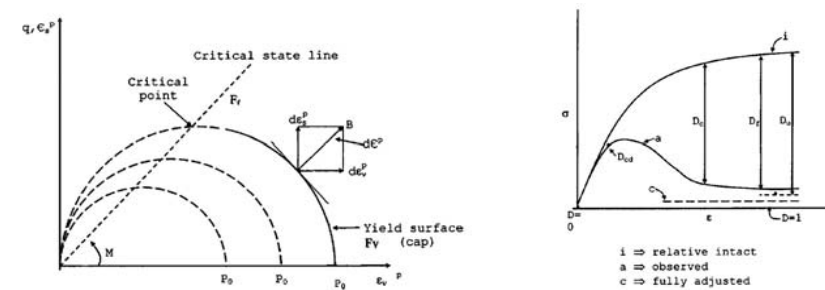
- **Hubungan Tegangan-Regangan Tanah Damage Mechanics**

Pengembangan model interface antara tanah-tiang dikembangkan lebih lanjut oleh Jensen et al., (2001), dalam penelitian model *distinct-element method* (DEM), interface tanah-struktur dalam suatu simulasi kerusakan particle (*particle-damage*), seiring dengan perkembangan *damage-mechanics*. Studi *micro* dan *damage mechanics* ini merupakan suatu langkah maju dalam penelitian pemodelan interface tanah-struktur dalam suatu simulasi model DEM, yang di masa mendatang bisa diaplikasikan dalam pemodelan interface tanah-struktur untuk berbagai masalah interaksi tanah-struktur. Pemodelan dilakukan baik secara experimental maupun secara numerik.

Pengembangan model pasca model *critical state* (1968) yang bersifat umum dan terunifikasi (*general and unified model*) terus dikembangkan oleh beberapa peneliti seperti Lade and Wang (2003) dan Desai, 2005. Model terkini berupaya untuk menyatukan berbagai perilaku tanah dalam bentuk model umum dan terunifikasi *Disturbed State Concept* (DSC), yang terdiri atas kondisi utuh-relatif (*relative intact*, RI) dan termodifikasi-penuh (*fully-adjusted*, FA-c), dengan suatu fungsi gangguan (*disturbance*, D) yang bernilai 0-1, seperti ditunjukkan dalam Gambar 30.

Riset pengembangan model tanah *non-associative* MIT-S1 juga

dilakukan dan identifikasi 16 parameter tanahnya dilakukan di NTUST-Taiwan. Identifikasi dilakukan dengan *Multi-Objective Particle Swarming Optimization* (Mulia, 2012). Prediksi model memberikan suatu respon hubungan tegangan-regangan dan perubahan volume-tekanan konsolidasi yang sangat baik dengan hasil test laboratorium.



Gambar 30. Unified Disturbed State Concept (DSC) model (Desai, 2005)

- **Riset Pengembangan Metoda Analisis Likuifaksi**

Penelitian kejadian likuifaksi terkini akibat beberapa kejadian gempa dengan magnitude besar ($M > 8$) dengan durasi panjang telah dilakukan oleh Kramer and Greenfield (2017) dengan mengacu pada kejadian likuifaksi akibat gempa Tohoku 2011. Metoda prediksi potensi likuifaksi terdahulu yang dikembangkan berdasarkan gempa-gempa dengan magnitude yang lebih kecil dan juga dengan durasi yang lebih pendek, ternyata tidak sesuai lagi dan perlu diperbaharui berdasarkan hasil penelitian pasca gempa Tokoku. Suatu ukuran intensitas (*Intensity Measure*, IM) baru telah dikembangkan untuk analisis potensi likuifaksi

yang melibatkan gempa besar dan durasi panjang. Hal ini menunjukkan bahwa penelitian terkini dengan data-data baru telah melahirkan temuan suatu metoda prediksi baru yang dapat mengurangi ketidakpastian dan dapat memperdiksi kerusakan secara lebih akurat yang dapat dilakukan dalam suatu analisis dan disain berbasis kinerja (*performance-based*). Dengan prediksi yang lebih akurat, di masa depan diharapkan perkiraan kerugian (losses) akibat gempa juga akan lebih pasti, sehingga optimasi-optimasi dalam disain dan konstruksi dapat dilakukan.

- **Model Eksperimental dengan Alat Centrifuge**

Simulasi numerik dari model persamasalah geoteknik perlu diuji dalam suatu simulasi eksperimental di laboratorium. Simulasi yang paling baik untuk ini adalah menggunakan alat *Centrifuge*. Penggunaan alat centrifuge dengan penerapan gaya centrifugal yang cukup besar dapat men-skalakan model skala-kecil di laboratorium menjadi skala yang mendekati dimensi sesungguhnya. Selain itu, untuk keperluan pemodelan masalah geoteknik atau interaksi tanah-struktur yang melibatkan beban seismik, maka alat *centrifuge* ini dapat dilengkapi dengan *shaking-table* di dalamnya. Experimen dengan alat *Centrifuge* ini handal karena model mudah di repetisi dan di reproduksi. Suatu model dan solusi numerik akan dapat diverifikasi aplikasinya kalau dapat memprediksi respon tegangan dan deformasi pada bangunan, sesuai hasil simulai alat *Centrifuge*. Gambar 31 menunjukkan alat *Centrifuge* di University of California at Davis, USA.



Gambar 31. Alat Centrifuge di University of California Davis-USA (Sitar, 2016)

- **Mitigasi Bahaya Likuifaksi**

Penelitian terkini tentang teknik mitigasi likuifaksi telah dilakukan di *University of Northeastern-Boston, USA* oleh Yegian et al., (2007) dan Nababan (2015). Inovasi mitigasi likuifaksi ini dikenal dengan nama *Induced Partial Saturation (IPS)*, yang pada awalnya diusulkan oleh Yegian et al., (2007). Inovasi ini adalah dengan menginjeksi cairan kimia yang menghasilkan gelembung gas pada pori pasir jenuh, yang berfungsi untuk mengurangi atau bahkan menghilangkan potensi likuifaksi. Teknik mitigasi ini telah diuji di laboratorium skala besar pada *laminar-box* menggunakan fasilitas @NEES di *Univeristy of New York, Buffalo*. Selain itu, verifikasi telah didukung juga dengan pengujian di lapangan. Dengan IPS, pengujian telah dapat menunjukkan pengurangan derajat kejenuhan dari 100% menjadi 90%. Teknik ini dapat menjadi salah satu solusi mitigasi likuifaksi di masa depan.

- *Knowledge-Based Expert System, Neural Network, Neural Inference System, dan Internet of Things*

Permasalahan dalam rekayasa geoteknik sedemikian kompleks dengan berbagai ketidakpastiannya dan juga informasi dan data yang kurang lengkap. Dalam berbagai kasus, maka peran ahli geoteknik dengan pengetahuan dan pengalamannya menjadi sangat menentukan solusi permasalahan yang terkadang berisiko dan melibatkan keselamatan bangunan, dan secara tidak langsung pada biaya pekerjaan konstruksi. Riset terkini berupaya untuk membangun suatu sistem-ahli berbasis pengetahuan (*knowledge-based-expert-system, KBES*), dengan integrasi berbagai pengetahuan dalam bidang ilmu rekayasa geoteknik untuk membantu memecahkan masalah-masalah kompleks dalam praktek geoteknik, baik dalam tahapan disain maupun dalam tahapan konstruksi suatu proyek. Beberapa teknik terkini yang dikembangkan dalam sistem ini meliputi penerapan jaringan-syaraf tiruan (*neural-network*), *evolusionary fuzzy neural inference system (EDNIS)*. KBES sejenis EDNIS (Cheng et al., 2008), adalah salah satu sistem yang dapat melakukan penalaran dengan prinsip mengimitasi manusia dengan nalurinya. EDNIS ini mengkombinasikan algoritma genetik (*genetic-algorithm*), logika bayangan (*fuzzy-logic*), dan syaraf-tiruan dalam memfasilitasi pengambilan keputusan ahli geoteknik. Algoritma genetik dapat dimanfaatkan dalam optimasi parameter-parameter, logika bayangan dalam melakukan pendekatan dan presisi penalaran syaraf-tiruan ini dimanfaatkan dalam proses pembelajaran dan *curve-fitting*.

Proses pengembangan KBES sejenis EDNIS perlu dikalibrasi dalam suatu kasus nyata dalam proses design dan kontruksi bangunan geoteknik.

6.2 Tantangan ke Depan Menuju Kemandirian

Saat ini, kebutuhan prasarana transportasi jalan di atas tanah lunak, jembatan panjang, MRT perkotaan dan sebagainya menjadi salah satu prioritas dalam pembangunan. Demikian pula, di kota-kota besar, reklamasi menjadi salah satu pilihan pengembangan kawasan. Dukungan keilmuan geoteknik perlu mencakup kegiatan riset, pendidikan dan pengajaran serta diseminasi pengetahuan kepada masyarakat profesi, sehingga masyarakat dapat secara langsung menikmati hasil riset dan pengembangan keilmuan ini. Pendidikan teknik sipil tingkat sarjana (S-1) dan tingkat Pasca-Sarjana (S-2) untuk menghasilkan lulusan yang berkualitas dan bisa bersaing secara regional dan global menjadi suatu tuntutan ke depan. Khususnya untuk pengembangan pengajaran ilmu geoteknik adalah, pembaharuan kurikulum pengajaran dari teori mekanika tanah klasik menjadi klasik+aplikasi numerik komputasi dengan dukungan laboratorium komputasi yang memadai.

Demikian pula, program penelitian S-3, khususnya juga untuk peningkatan kualitas dosen-dosen di Universitas di seluruh Indonesia, perlu mendapat dukungan dari Pemerintah dan juga Industri untuk bersama-sama berkomitmen agar ilmu rekayasa geoteknik di Indonesia dapat terus dikembangkan dan dapat mengikuti perkembangan rekayasa geoteknik di dunia serta juga dapat mewujudkan inovasi-inovasi sebagai

kontribusi terhadap tuntutan pembangunan nasional.

Selain itu, diseminasi pengetahuan baru kepada para praktisi teknik sipil dan rekayasa geoteknik, masih dirasakan sangat kurang. Pengetahuan baru rekayasa geoteknik masih terbatas diseminasinya di Pulau Jawa. Penyebarluasan pengetahuan melalui publikasi, kursus singkat, seminar, dan konferensi melalui kerjasama dengan himpunan ahli atau asosiasi profesi dan perguruan tinggi daerah masih perlu ditingkatkan sehingga tercapai pemerataan penguasaan pengetahuan di seluruh Indonesia. Peningkatan pendidikan dan pembaharuan kurikulum Pasca-Sarjana yang disesuaikan dengan kebutuhan pembangunan infrastruktur nasional perlu secara berkala untuk ditinjau.

Kemampuan untuk mengembangkan metoda analisis pemodelan geoteknik secara lebih akurat dalam kaitan dengan ancaman hazard gempa merupakan tantangan tersendiri di Indonesia. Beberapa kejadian gempa besar di Indonesia akhir-akhir ini (Aceh 2004, Nias 2005, Yogyakarta 2006, Sumatra Barat dan Jawa Barat, 2009) telah menyebabkan banyak korban jiwa dan banyak sekali kerusakan bangunan dan infrastruktur. Di negara lain pada 10-20 tahun terakhir ini juga telah banyak terjadi gempa dengan skala besar yang juga telah menyebabkan kerugian yang tidak kalah besarnya. Berbagai penelitian telah dilakukan dengan melakukan survey kerusakan bangunan dan juga penelitian-penelitian terkait pemutakhiran metoda analisis serta juga pemodelan geoteknik akibat beban gempa seperti analisis potensi likuifaksi.

Dalam kaitan ini, dalam upaya pengembangan ilmu rekayasa

geoteknik di ITB, ada tantangan ke depan yang perlu mendapat dukungan KKRG, Institusi dan Pemerintah serta Industri untuk mewujudkan kontribusi ilmu pemodelan geoteknik khususnya dalam pembangunan nasional. Beberapa tantangan secara lebih spesifik tersebut di antaranya adalah:

- a. Secara berkelanjutan mengikuti perkembangan terkini di dunia dan berkontribusi dalam pengembangan model konstitutif tanah (*non-linear, visco-elasto-plastic, non-associative, damage mechanics*, dan sebagainya) melalui kerjasama riset, partisipasi aktif dan publikasi dalam konferensi nasional/internasional asosiasi ahli, serta terus aktif dalam keanggotaan Technical Committee terkait, dsb.
- b. Meneruskan riset yang intensif untuk solusi berbagai masalah geoteknik yang kompleks termasuk interaksi tanah-struktur melalui pemodelan *nonlinear elasto-plastic*, serta mengembangkan teknik-teknik solusi kreatif dan strategis seperti pengembangan berbagai kurva design, baik untuk beban statik maupun beban dinamik (gempa).
- c. Memberikan dukungan dalam riset-riset seperti: pemodelan perambatan gelombang gempa 2-D atau 3-D (*pengaruh basin*) dan yang melibatkan interaksi-tanah-struktur, *load and resistance factor design (LRFD)*, analisis untuk disain berbasis kinerja (*performance-based design*), secara berkelanjutan mengembangkan *risk-targeted ground motions*, dan aspek-aspek lainnya untuk penyempurnaan Peraturan Bangunan (*Building Codes*), untuk mendukung upaya PRB di

Indonesia.

- d. Mengembangkan laboratorium dengan kelengkapan alat *Centrifuge* dan *shaking-table* (*Center of Centrifuge*) di Indonesia, untuk simulasi model geoteknik, baik untuk pembebanan statik maupun dinamik.
- e. Mengembangkan fasilitas laboratoirum komputasi untuk riset berupa *cyber-infrastructures*, *software*, fasilitas *clouds computing* dan sebagainya.
- f. Melakukan kolaborasi riset yang lebih intensif dengan KKRS untuk aspek-aspek interaksi tanah-struktur, termasuk pengembangan model kerentanan untuk struktur bangunan/infrastruktur dan *lifelines* dalam mendukung identifikasi dan kajian risiko bencana di Indonesia.
- g. Memberikan dukungan spesialisasi keilmuan dalam Lembaga Riset dan Pengembanagn terkait di Indonesia dan memperluas jejaring kerjasama riset dengan pusat-pusat riset terkemuka di luar negeri (misalnya dengan NEES atau sejenisnya, Laboratorium *Center of Centrifuge* di negara maju, dsb.nya).

Khususnya di ITB, semua ini memerlukan komitmen KKRG dan perlunya menjalin kerjasama riset dengan berbagai pihak terkait. Upaya untuk mendapatkan hibah-hibah penelitian perlu digalakkan melalui instansi terkait dan industri di Indonesia dan luar negeri. Masyarakat luas akan dapat mengambil manfaat langsung dari riset yang dikembangkan antara lain berupa dukungan-dukkungan: aplikasi solusi-solusi hasil riset

untuk konstruksi bangunan yang lebih optimum, dukungan terhadap penyempurnaan *building codes*, dan pengurangan risiko bencana.

Pemerintah Indonesia perlu lebih banyak investasi untuk riset dan pengembangan di Perguruan Tinggi dan Lembaga Penelitian dalam upaya untuk mengamankan pembangunan infrastruktur ke depan. Saat ini dipertimbangan bahwa riset dan pengembangan di Indonesia relatif kurang dibandingkan dengan negara-negara lain yang lebih maju. Tanpa adanya riset dan pengembangan maka optimasi dalam disain dan konstruksi tidak dapat dilakukan secara optimal.

7. PENUTUP

Orasi ilmiah ini telah memberikan gambaran secara umum kebutuhan pembangunan infrastruktur di Indonesia. Indonesia sebagai negara kepulauan dengan kebutuhan pembangunan infrastruktur yang luar biasa ke depan menuntut dukungan Ilmu Rekayasa Teknik Sipil pada umumnya dan Ilmu Rekayasa Geoteknik pada khususnya. Pemodelan Geoteknik sebagai salah satu bagian Ilmu Rekayasa Geoteknik perlu menunjukkan peran yang lebih besar dalam mununjang pembangunan tersebut. Peran ilmu pemodelan geoteknik diperlukan dalam upaya untuk dapat memberikan suatu dukungan analisis dan disain geoteknik yang optimal dari kebutuhan disain bangunan dan infrastuktur secara keseluruhan. Optimal yang dimaksud dalam hal ini adalah dalam upaya memberikan jaminan keselamatan publik di satu sisi dan juga ekonomis (*cost-effectiveness*) di sisi yang lain.

Perkembangan ilmu pemodelan geoteknik yang relatif pesat akhir-akhir ini telah memberikan suatu kemudahan dalam proses disain berbagai permasalahan rekayasa geoteknik sehingga permasalahan kompleks aspek geoteknik dalam design dan konstruksi bangunan dapat diselesaikan dengan lebih mudah dan lebih cepat, sehingga optimasi design dapat ditingkatkan. Simulasi numerik permasalahan kompleks geoteknik dan interaksi tanah-struktur dapat dilakukan dengan dukungan data-data dan parameter geoteknik yang memadai.

Penguasaan bidang ilmu pemodelan geoteknik memerlukan suatu komitmen untuk dapat mentransfer pengetahuan tersebut kepada mahasiswa dalam proses pendidikan di Perguruan Tinggi yang nantinya diharapkan menjadi seorang professional yang kompetitif dalam bidangnya. Selanjutnya perkembangan baru perlu diserap dan dikembangkan lebih lanjut melalui keikutsertaan dalam konferensi-konferensi nasional/internasional serta kerjasama riset, pengembangan laboratorium dan penelitian lapangan. Bidang keilmuan yang ada perlu didiseminasi secara luas kepada masyarakat profesi dan pengguna agar manfaatnya secara aktual dan cepat dapat diaplikasikan dalam menunjang pembangunan nasional.

Berbagai kegiatan terkait pendidikan, riset, aplikasi, publikasi dalam kegiatan ilmiah dan profesi terkait bidang keilmuan telah saya sampaikan dalam orasi ilmiah ini. Semua hal ini adalah sekilas merupakan refleksi dari perjalanan karier akademik saya selama kurang lebih 30 tahun menjadi dosen di ITB.

Ke depan saya berharap dengan teguh dan konsisten, secara berkelanjutan dapat menjalankan fungsi akademik pendidikan-pengajaran, penelitian, dan pengabdian masyarakat sesuai komitmen ke depan yang saya canangkan sebagai Guru Besar. Hal ini menuntut keberlanjutan menjalin kerjasama penelitian dan publikasi dalam upaya pengembangan ilmu yang saya tekuni untuk mendukung pendidikan dan penelitian di ITB. Melakukan regenerasi dan pembinaan pada rekan-rekan dosen yang lebih muda.

Pada akhirnya, saya berharap secara keseluruhan pengukuhan saya sebagai Guru Besar ITB dapat memperkokoh Kelompok Keilmuan Rekayasa Geoteknik-Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan - ITB untuk tetap unggul secara nasional dan mendukung lebih terwujudnya ITB sebagai *World Class University*. Secara berkelanjutan pula, mengidentifikasi kebutuhan masyarakat dan menunjukkan kontribusi bidang ilmu secara tepat dan efektif. Dukungan pemerintah dan swasta/industri dalam bentuk berbagai kerjasama dengan ITB sangat diharapkan untuk bersama-sama dapat menunjukkan peran masing-masing dalam mendukung pembangunan nasional Indonesia di masa mendatang. Semoga orasi ilmiah ini dapat memberikan manfaat dan inspirasi bagi para hadirin sekalian dalam menjawab tantangan ke depan untuk bersama-sama mendukung pembangunan infrastruktur secara optimal demi kemajuan dan kemandirian bangsa Indonesia.

8. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis memanjatkan puji syukur kedahapan Tuhan Yang Maha Kuasa, hanya atas segala karunia yang dilimpahkanNya atas capaian saya sampai saat ini. Penulis mengucapkan penghargaan dan terimakasih kepada yang terhormat Rektor dan Pimpinan ITB, Pimpinan dan seluruh Anggota Forum Guru Besar ITB, atas kesempatan yang diberikan kepada saya untuk menyampaikan orasi ilmiah ini di hadapan para hadirin sekalian pada forum yang terhormat ini.

Ucapan terimakasih yang setinggi-tingginya saya sampaikan kepada para pembimbing, dosen, dan guru saya yang telah dengan tulus ikhlas telah mendidik dan membimbing saya mulai dari SD sampai tingkat Doktor. Ucapan terimakasih juga saya sampaikan kepada seluruh senior saya dan juga kolega saya di lingkungan Institut Teknologi Bandung khususnya pada Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Program Studi Teknik Sipil, dan Kelompok-Keahlian Geoteknik serta Pusat Rekayasa Industri dan Pusat Mitigasi Bencana, yang telah memberikan bimbingan dan juga kerjasama yang baik selama ini, sehingga saya dapat mencapai posisi Guru Besar. Secara khusus saya menyampaikan terimakasih dan penghargaan kepada Alm Prof. Sosrowinarso dan Dr. F.X. Toha selaku pembimbing akademik saya saat menyelesaikan Program Sarjana di ITB. Penghargaan setinggi-tingginya juga saya sampaikan kepada Alm. Prof. Peter J. Bosscher dan Professor Tuncer B. Edil yang telah membimbing saya dengan tulus sehingga dapat meraih gelar MSCE dan Ph.D. di University of Wisconsin-Madison, USA.

Ucapan terimakasih juga saya tujukan kepada Prof. Ade Safrudin dan selaku Dekan Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan dan juga kepada semua Pembantu Dekan serta Ketua Prodi Teknik Sipil yang senantiasa telah selalu memberikan dukungan. Penghargaan khusus kepada Prof. Azis Jayaputra, Prof. Masyhur Irsyam, Prof. Adang Surahman, Prof. Ade Safrudin, dan Prof. Sri Widianoro dari ITB serta Prof. Chaidir Makarim dari Universitas Tarumanegara yang telah memberikan rekomendasi untuk promosi Guru Besar saya. Tidak lupa juga kepada Prof. Widiadnyana Merati dan Prof. Bambang Budiono, serta rekan-rekan senior di Prodi Teknik Sipil ITB yang telah memberikan bimbingan dan panutan kepada saya. Juga kepada seluruh rekan-rekan senior saya di lingkungan ITB yang senantiasa telah memberikan dukungan atas keberhasilan saya meraih jabatan Guru Besar.

Dukungan kerjasama riset telah diberikan oleh kolega dosen senior dan junior saya di lingkungan Kelompok Keilmuan Geoteknik sangat saya hargai, sehingga terbentuk kolaborasi riset yang baik termasuk pembimbingan mahasiswa S1, S2, dan S3. Publikasi paper hasil penelitian tidak bisa lepas dari dukungan seluruh asisten akademik dan seluruh mahasiswa bimbingan saya. Dukungan dan kerja kerasnya sangat saya hargai. Selanjutnya tidak lupa saya mengucapkan terimakasih kepada teknisi laboratorium dan juga seluruh karyawan FTSL, Prodi Teknik Sipil, KK-Geoteknik, Pusat Rekayasa Industri dan Pusat Penelitian Mitigasi Bencana ITB yang telah senantiasa mendukung kelancaran dalam pendidikan, penelitian, dan pengabdian pada masyarakat yang saya jalani

selama ini.

Saya tidak lupa pula menyampaikan terimakasih atas dorongan spiritual yang selalu diberikan oleh Kelompok Dharma Purana dan Banjar-Pura Wira Satya Dharma, Bandung Timur.

Pada kesempatan ini, penulis dengan rasa hormat menyampaikan terimakasih yang tak terhingga kepada kedua orang tua saya alm Ayahanda Ketut Subandi dan alm Ibunda Made Taman, yang dengan kasih sayangnya yang tanpa pamrih dan tulus tiada hingga selalu berkorban untuk putranya ini, suatu perjuangan yang luar biasa, jauh lebih dari perjuangan yang telah saya jalani selama ini. Selanjutnya penghargaan tak terhingga kepada semua kakak-kakak kandung saya yang telah turut membesarkan saya dan tanpa henti terus memberikan dukungan lahir bathin, serta doa demi keberhasilan adik bungsunya ini.

Seluruh kegiatan dan capaian saya sampai saat ini tidak akan terwujud tanpa dukungan tanpa kenal lelah dan tanpa pamrih dari istri saya tercinta Ni Ketut Dhami Sengara. Pengorbanan dan cinta kasihnya tiada tara dalam saya menjalani kegiatan akademik mulai saat tugas belajar sampai selama di ITB ini. Kepada ketiga putra-putri kami Gde Hari A. Sengara, Made Wisnu W. Sengara, dan Nyoman Hapsari T. Sengara, mereka telah menjadi inspirasi dan motivasi dan menjaga semangat hidup saya dalam tetap mengabdikan dan berkarya sampai capaian Guru Besar ini.

Terakhir, kembali rahmat dan puji syukur saya panjatkan ke hadapan

Tuhan yang Maha Kuasa, Ida Sang Hyang Widhi Wasa, atas anugrah wara nugrahnya atas semua yang telah saya lakukan dan capai sampai saat ini, kiranya saya tetap dapat diberi kesehatan, lindungan, dan pengayaan budi pekerti untuk tetap dapat berkarya dan mengabdikan lebih banyak untuk masyarakat dan keluarga.

DAFTAR PUSTAKA

- Allen, T.I., Wald, D.J., Earle, P.S., Marano, K.D., Hotovec, A.J., Lin, K., and Hearne, M.G., (2009), *"An Atlas of ShakeMaps and Population Exposure Catalog for Earthquake Loss Modelling"*, US Geological Survey.
- Allen, T.I. and Wald, D.J., (2007), *"Topographic Slope as a Proxy for Seismic Site-Conditions (VS30) and Amplification Around the Globe"*, Open-File Report 2007-1357, 69 p., U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- American Society of Civil Engineers Standards, ASCE SEI-7-10, (2010), *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, Structural Engineering Institute ASCE, Virginia, USA.
- Beatty, M.H. and Byrne, P.M., (1998), *"An Effective-stress Model for Predicting Liquefaction Behavior of Sand,"* in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III, P. Dakoulas, M. Yegian, and R. Holtz, Eds., ASCE, Geotechnical Special Publication 75, Vol. 1, pp. 766-777.
- Beatty, M.H. and Byrne, P.M., (2011), *"UBC-Sand Constitutive Model Version 904ar."*, Itasca UDM Web Site, page 69.
- BNPB, (2009), *Laporan Harian PUSDALOPS BNPB 2 Oktober 2009*,

<<https://bnpb.go.id/uploads/migration/pubs/303.pdf>>

BPIW, (2015), *Analisa Manfaat dan Analisa Input-Output Pembangunan Infrastruktur PUPR*, <<https://www.bpiw.pu.go.id>>

BPIW, (2016), *Buku Tahunan Badan Pengembangan Infrastruktur Wilayah 2016*.

Brandon, T.L., and Valentine, R. J., (2017), *Geotechnical Frontiers 2017, Geotechnical Materials, Modeling, and Testing*, Selected Papers from Sessions of Geotechnical Frontiers 2017, Orlando-Florida, Geo-Institute of the American Society of Civil Engineers.

Cheng, M.Y., Tsai, H.C., Ko, C.H., and Chang, W.T., (2008), *“Evolutionary Fuzzy Neural Inference System for Decision Making in Geotechnical Engineering”*, Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE.

Desai, C.S., (2005), *“Constitutive Modeling for Geologic Materials: Significance and Directions”*, International Journal of Geomechanics, ASCE, June.

Dirjen Bina-Marga-PUPR, (2017), *“Acceleration of Highway Networks Development In Indonesia”*, PPT presentation, International Conference on “Advancement of Pile Technology and Pile Case Histories”, Bali, September 25 – 27.

Dirjen Anggaran, (2016), *Informasi APBN 2017 – APBN yang lebih Kredibel dan Berkualitas di Tengah Ketidakpastian Global*.

Foralisa, M., (2017), *“Pengembangan Model Penilaian Risiko Bencana Gempabumi untuk Ruas Jalan Nasional di Indonesia”*, Disertasi S3, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung.

Hadimuljono, M.B., (2017), *“Terobosan dalam Pembangunan Infrastruktur untuk Mengejar Ketertinggalan”*, Orasi Ilmiah, Peringatan 97 Tahun Pendidikan Tinggi Teknik di Indonesia 1920-2017, Institut Teknologi Bandung.

Helwani, S., (2007), *Applied Soil Mechanics with ABAQUS Applications*, John Wiley and Sons, Inc., New Jersey.

Indonesian Seismic Building Codes, SNI-1726-2012, (2012), Indonesian Department of Public Work.

Irsyam, M., Sengara, IW., Aldiamar, F., Widiyantoro, S., Triyoso, W., Natawijaya, D.H., Kertapati, E., Meilano, I., Asrurifak, M., Ridwan, M., Suhardjono, (2010):

(a) *Ringkasan Hasil Studi Tim Revisi Peta Gempa Indonesia 2010*, Laporan Tim Revisi Peta Gempa Indonesia kepada Menteri Pekerjaan Umum, Juli.

(b) *Development of Seismic Hazards Map of Indonesia for Revision of SNI 03-1726-2002*, (2010), *A Summary Report submitted to Australia-Indonesia Facility for Disaster Reduction (AIFDR) and Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB)*, Institute for Research and Community Services, Institut Teknologi Bandung.

Itasca Consulting Group, Inc., (2007), *“FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) Version 7.0,”* Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, Minn. [Online].

Jayasaputra, U. dan Sengara, IW., (2010), *“Studi Korelasi Empiris untuk*

Menentukan Shear Wave Velocity Tanah dengan Menggunakan Data SASW, Seismic Downhole, dan Data Penyelidikan Tanah,” Laporan Hasil Penelitian, Laboratorium Geoteknik, Pusat Rekayasa Industri-Institut Teknologi Bandung.

Jaiswal, K.S., D.J. Wald, P.S. Earle, K.A. Porter and M. Hearne., (2009). Earthquake Casualty Models within the USGS Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response (PAGER) System. *Second International Workshop on Disaster Casualties*, University of Cambridge, UK.

Jensen, R.P., Plesha, M.E., Edil, T.B., Bosscher, P.J., and Kahla, N.B., (2001), *“DEM Simulation of Particle Damage in Granular Media—Structure Interfaces”*, The International Journal of Geomechanics Volume 1, Number 1, 21–39.

Kementrian PUPR, (2015), *Informasi Statistik Infrastruktur Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat 2015.*

Kertapati, E, K. (1999), *“Probabilistic Estimates of the Seismic Ground Motion Hazard in Indonesia”*, Proceeding of National Conference on Earthquake Engineering, a Conference organized by Indonesian Earthquake Engineering Association, Bandung.

Kirmanto, D., (2011), *Pembangunan Perumahan dan Permukiman harus Prioritaskan MBR.* <http://www.pu.go.id/main/view_pdf/6443>

Kramer, S.L. and Greenfield, M.W., 2017, *“Effects of Long-Duration Motions on Soil Liquefaction Hazards”*, Proceedings of 16th

International Conference on Earthquake Engineering, Santiago-Chile.

Lade, P.V. and Wang, Q., (2003), *“Closure to Analysis of Shear Banding in True Triaxial Tests on Sand”*, Journal of Engineering Mechanics, American Society of Civil Engineers, April.

Luco, N., Ellington, B.R., Hamburger, R.O., Hooper, J.D., and Kimball, J.K., (2007), *“Risk-Targeted versus current Seismic Design Maps for Conterminous United States”*, SEAOC 2007 Convention Proceedings.

Mahin, S., 2017, *“Resilience by Design: A Structural Engineering Perspective”*, Proceedings of 16th International Conference on Earthquake Engineering, Santiago-Chile.

Mulia, A., (2012), *“Identification of Soil Constitutive Model Parameters using Multi-objective Particle Swarming Optimization”*, Master Thesis, Geotechnical Engineering, Department of Civil and Construction Engineering, National Taiwan University Science and Technology, Taiwan.

Nababan, F.R.P., (2015), *“Development and Evaluation of Induced Partial Saturation (IPS), Delivery Method and Its Implementation in Large Laboratory Specimens and in the Field”*, Ph.D. Dissertation, Northeastern University, Boston-USA.

Natawidjaja, D.H., (2002), *“Neotectonics of Sumatra Faults”*, Ph.D Thesis, California Institute of Technology, USA.

NEHERP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures, FEMA P-750/2009 Edition, Building Seismic Safety

- Council, Washington D.C.
- Olsen, P.A., (2007), *"Shear Modulus Degradation of Liquefying Sand: Quantification and Modelling"*, Brigham Young University – Provo.
- Orense, R.P., Chouw, N., and Pender, M.J., (2010), Soil-Foundation-Structure Interaction, Selected Papers from the Workshop on Soil-Foundation-Structure Interaction (SFSI 09), CRP Press Taylor & Francis, A Balkema Book, London.
- Sengara, IW., and Rahman, M.A., (1992), *"Documentation of Non-linear Soil-Structure Interaction Program (NLSSIP)"*, Manual, Geotechnical Engineering Division, University of Wisconsin-Madison, USA.
- Sengara, IW., (1992), *"Finite Element and Experimental Study of Soil-Structure Interfaces"*, Ph.D. Dissertation, Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison-USA.
- Sengara, IW. and Co-Researchers, (1999), *"Experimental and Elasto-Plastic Finite Element Studies for Integrated Analysis of Soil-Structure Interaction in Sand and Clay,"* Research Report-Graduate Team Research Grant Batch II 1996-1998, Directorate General of Higher Education.
- Sengara, IW., (1999), *"Analisis Elemen Hingga untuk Transfer Beban pada Sistem Pondasi Pile-Raft Tunggal"*, Seminar Metoda Elemen Hingga, Jurusan Teknik Mesin ITB, Bandung.
- Sengara, IW. and Co-Researchers, (2001), *"Experimental and Finite Element Studies of Load Transfer Mechanism at Piled-Raft Foundation System"*

- Research Report-Graduate Team Research Grant Batch IV 1999-2000, Directorate General of Higher Education.
- Sengara, IW., Sukamta, D., Purba, Al., and Irsyam, M., (2001), *"Analisis Tegangan-Deformasi Non-Linier Pondasi Gedung Amartapura Sebagai Sistem Piled-Raft"*, Proceeding Seminar PILE-2001, Universitas Parahyangan, Bandung.
- Sengara, IW. and Roesyato, (2002), *"Stress-Deformation Analysis of Piled-Raft Foundation System using Non-Linear Soil Model"*, Proceedings of International Conference on Advancement in Design, Construction, Construction Management and Maintenance of Building Structures, Denpasar-Bali.
- Sengara, IW. and Sumiarta, P., (2002), *"Soil-Structure-Interaction FE Analysis to Derive Seismic Design Lateral Load Distribution for Basement Wall in Clay"*, Proceedings of International Conference on Advancement in Design, Construction, Construction Management and Maintenance of Building Structures, Denpasar-Bali.
- Sengara, IW., Darmawan, S., Sadisun, I., Suharwanto, Hendarto, dan Audia, (2006), Laporan Kajian dan Survey Lapangan Pasca Bencana Gempabumi Yogyakarta, Satuan Tugas Penanggulangan Bencana DIY dan Jateng, Lembaga Penelitian dan Pengabdian pada Masyarakat (LPPM)-ITB.
- Sengara, IW., Puspito, N., Kertapati E., and Hendarto, (2006), *"Survey of Geotechnical Engineering Aspects of the December 2004 Great Sumatra Earthquake and Indian Ocean Tsunami and the March 2005"*

Nias-Simeulue Earthquake”, *Earthquake Spectra Journal*, Special of *Great Sumatra 2004 Earthquake*, Volume 22, Pages 495-509, Earthquake Engineering Research Institute, Allen Press.

Sengara, IW., and Hendarto, (2006), *“Ground Motion Anallysis of Mega Aceh Earthquake and Some Potential Geotechnical Engineering Issues”*, Proceeding of the Tenth East-Asia Pacific Conference on Sstructural Engineering and Construction, Bangkok-Thailand, pp 257-264.

Sengara, IW., Merati, G.W., Widiyantoro, S., Natawidjaja, D.H., Triyoso, W., Meilano, I., Kertapati, E., Sumiarta, P., Hendarto, (2009), *Laporan Final Investigasi Probabilistik bahaya Gempabumi yang Terintegrasi Untuk Pemetaan Zonasi Gempa Indonesia dan Rekomendasi Parameter Desain Gempabumi (Pulau Sumatra, Jawa, dan Nusa Tenggara)*, dipersiapkan untuk Kementerian Riset dan Teknologi, Pusat Mitigasi Bencana-Institut Teknologi Bandung.

Sengara, IW., Hendarto, Sumiarta, P., Natawidjaja, D.H., and Triyoso, W., (2008), *“Probabilistic Seismic Hazard Mapping for Sumatra Island”*, Proceedings, International Conference on Earathquake Engineering and Disaster Mitigation (ICEEDM), Jakarta-Indonesia.

Sengara, IW., Suarjana, M., Betham, D.; Corby, N.; Edwards, M; Griffith, M.; Wehner, M.; Weller, R., (2010), *The 30th September 2009 West Sumatra Earthquake, Padang Region Damage Survey*, *GeoScience Australia*, Record, 2010/44, GeoCat 70863, Research Report, Center for Disaster Mitigation, Institut Teknologi Bandung.

Sengara, IW., Latief, H., and Kusuma, S.B., (2010), *“Probabilistic Seismic and*

Tsunami Hazard Analysis for Design Criteria Development of A Coastal Area in City of Banda Aceh”, *Geomechanics and Geoengineering - An International Journal* ISSN: 1748-6033, Volume 5, Issue 1, 2010, Pages 57 – 68.

Sengara, IW., Irsyam, M., Merati, G.W., Sidi, I.D., M., Mulia, A., Suarjana, M., and Asrurifak, M., (May, 2011a), *Development and Calculation of Risk Targeted Earthquake Ground Motion for Input to Indonesian Seismic Design Criteria for Buildings*, Research Report, Geotechnical Engineering Division, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Institut Teknologi Bandung.

Sengara, IW., Irsyam, M., Sidi, I.D., Merati, G.W., Pribadi, K.S., Suarjana, M., and Edwards, M., (2011b), *“Some Recent Efforts in Earthquake Hazard and Risk Analysis for Disaster Risk Reduction in Indonesia”*, Invited Speech and Proceedings of the 2nd International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation (2nd ICEEDM), Conference organized by Indonesian Earthquake Engineering Association, Surabaya-East Java.

Sengara, IW., Mulia, A., Sunendar H., and Mariani, A., (May, 2011), *Research Report on Use of 2010 Indonesian Seismic Hazard Map with Seismic Amplification Factors to Update National Level Indonesian Earthquake Disaster Risk Index Analysis*, Center for Disaster Mitigation, Institut Teknologi Bandung.

Sengara, IW., Masyhur, I., Merati, G.W., Sidi, I.D., Suarjana, M., Mulia, A., Yulman, M.A., Hutabarat, D., (2012), *“Development MCER (Risk-*

Targeted Maximum Considered Earthquake) through investigation of hazard and fragility curve”, *Research Report – IMHERE Project B.2C FTSL, Institut Teknologi Bandung*.

Sengara, IW., (2012), “*Investigation on Risk-Targeted Seismic Design Criteria for a Highrise Building in Jakarta-Indonesia*”, 15th World Conference on Earthquake Engineering (15thWCEE), Lisboa.

Sengara, IW., Suarjana, M., Adiputra, I., Sagala, S., (2012), “*Development of Empirical Earthquake Fatality Model for Indonesia*”, Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, 24-28 September 2012, Lisboa-Portugal, ISBN: 978-1-63439-651-6.

Sengara, IW., Suarjana, M., Edwards, M., Ryu, H., Rahmanusyairi, W., Adiputra, I., Wahdiny, I., Utami, A., Mariany, A., Yulman, M.A., and Novianto, B., (2013), *Research on Earthquake Vulnerability/Damage Modeling for Buildings in Indonesia*, Research Report, Research Center for Disaster Mitigation, Institut Teknologi Bandung.

Sengara, IW., Irsyam, M., Sidi, I.D., Mulia, A., Asrurifak, M., and Hutabarat, D., (2015a), “*Development of Earthquake Risk-Targeted Ground Motions for Indonesian Earthquake Resistance Building Code SNI 1726-2012*”, 12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, ICASP12, Vancouver, Canada.

Sengara, IW., Yulman, M.A., and Mulia, A., (2015b) “*Seismic Time History Ground Motions for Specific Site in Jakarta*” Special Issue of Jurnal Teknologi : Geotechnical and Earthquake Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, 81310 UTM Johor Bahru, Johor, Malaysia E-ISSN

2180-3722.

Sengara, IW., Sumiarta, P., Yulman, M.A., Yugantoro, A., Mulia, A., Sihombing, M., and Fathonah, W., (2015c), “*Geotechnical Analyses and Performance of Some Highrise Buildings in Jakarta*”, Keynote Speech, Proceedings Pertemuan Ilmiah Tahunan dan Kongress Geoteknik Indonesia, Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia (HATTI), Jakarta.

Sengara, IW., Nababan, F.R.P., Sumiarta, P., and Mulia, A., (2016), “*Site-Specific Response Analysis on Liquefiable Sand Deposit*”, Proceedings, 3rd International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation (3rdICEEDM), Conference organized by Indonesian Earthquake Engineering Association, Denpasar-Bali.

Sengara, IW., Sidi, I., Merati, G.W., Mulia, A., (2017), “*Sensitivity Analysis on Seismic Risk-Coefficients for Input to Indonesian Earthquake Resistance Building Code*”, Proceedings of 16th International Conference on Earthquake Engineering, Santiago-Chile.

Sengara, IW., Suarjana, M., Yulman, A., Gashemi, H., and Ryu, H., (2017), “*Empirical Fatality Model for Indonesia Based on a Bayesian Approach*”, Journal of the Geological Society-London, Geohazards in Indonesia: Earth Science for Disaster Risk Reduction, pp. 179-187.

Sengara, IW., Roesyanto, Krisnanto, S., Jayaputra, A. A., and Irsyam, M., Accepted to be published in 2018, “*Bearing Capacity and Settlement Study on Small-Scale Piled-Raft Groups in Sand*”, Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA.

- Sharma, Y., Purohit, D.G., and Sharma, S., (2017), *"Applicability Aspects of Geoinformatics in Geotechnical Engineering"*, American Journal of Engineering Research (AJER), e-ISSN: 2320-0847 p-ISSN : 2320-0936 Volume-6, Issue-10, pp-71-75.
- Sitar, N. and Wagner, N., (2016), *"Seismic Earth Pressures on Deep Stiff Walls"*, Proceedings of the 3rd International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation 2016 (ICEEDM-III 2016), Conference organized by Indonesian Earthquake Engineering Association, Denpasar, Bali
- Sidi, I.D., (April, 2011), *"Hazard Analysis and Probability Based Factor of Safety"*, Research Report, Structural Engineering Division, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Institut Teknologi Bandung.
- Sieh, K. and Natawidjaja, D., (2000), *"Neotectonic of the Sumatra Fault Indonesia"*, Journal of Geophysical Research, Vol. 105, No. B12, 28295-28326.
- Surahman, A., Sengara, IW., and Merati, G.W., (2008), *"Probabilistic Seismic Hazard Assessment and Structural Performance Against Seismic Actions"*, Proceedings, International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation (ICEEDM), Jakarta-Indonesia, ISBN: 978-979-17551-0-8, Jakarta, April 14-15, Paper ID: ICEEDM-007KS.
- Stewart, J.P., Archuleta, R.J., and Power, M.S., (2008), *Earthquake Spectra*, The Professional Journal of the Earthquake Engineering Research Institute, Special Issue on the Next Generation Attenuation Project, Volume 24, Number 1.

- Toha, F.X. dan Sengara, IW., (2009), *"Consolidation Settlement of Deep Clay Layers under High Rise Building in Jakarta"*, Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan XIII 2009 HATTI; HATTI-Universitas Udayana-PU-LPJK, Denpasar, Bali.
- Wijayanto, N. and Sengara, IW., (2008), *"Soil-Basement Structure Interaction Analysis on Dynamic Lateral Earth Pressure on Basement Wall"*, Proceedings of the International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation (ICEEDM), Jakarta-Indonesia.
- Wijanto, S., Merati, G.W., Sengara, IW., and Andriono, T., (2017), *"Best Practice in Seismic Design of Tall to Mega Tall Building Structures in Indonesia"*, Proceedings of 16th International Conference on Earthquake Engineering, Santiago-Chile.
- Wolf, J.P., (1985), *Dynamic Soil-Structure Interaction*, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall.
- Wolf, J.P., (1988), *Soil-Structure Interaction Analysis in Time-Domain*, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall.
- World Bank Report, (2009), *Indonesia's Risk to Natural Disasters, Report of a National Risk Assessment Study*, Jakarta.
- Yegian, M. K., Eseller-Bayat, E., Alshawabkeh, A., and Ali, S., (2007), *"Induced-Partial Saturation for Liquefaction Mitigation: Experimental Investigation"*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133.4, pp.372-380.
- <https://kppip.go.id/proyek-strategis-nasional/e-sektor-perumahan/>

<http://www.aargi.org>

http://www.pu.go.id/main/view_pdf/9331

<http://www.kppip.go.id>

CURRICULUM VITAE



Nama : **I WAYAN SENGARA**
Tmpt. & tgl. lhr. : Bali, Singaraja, 12 Agustus 1962
Alamat kantor : Jalan Ganesha 10 Bandung
Nama Istri : Ni K. Dhami Sengara
Nama Anak : 1. I Gde Hari A. Sengara
2. I Made Wisnu W. Sengara
3. Ni Nyoman Hapsari T.
Sengara

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

- Doctor of Philosophy (Ph.D.), bidang Teknik Sipil-Geoteknik, University of Wisconsin-Madison, USA, 1992.
- Master of Science Engineering Mechanics (MSEM), bidang Engineering Mechanics, University of Wisconsin Madison, USA, 1989.
- Master of Science Civil and Enviromental Engineering (MSCE), bidang Geoteknik University of Wisconsin Madison, USA, 1988.
- Sarjana Teknik Sipil (Ir.), Institut Teknologi Bandung (ITB), 1985.

II. RIWAYAT KERJA di ITB

- Staf Pengajar Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan ITB, 1986 - Sekarang
- Ketua Program Studi Magister Geoteknik FTSP-ITB, 1994 – 2002
- Kepala Laboratorium Geoteknik, Pusat Rekayasa Industri-ITB, 2004 – Juli 2017

- Kepala Pusat Mitigasi Bencana-ITB, 2007 - 2011
- Ketua Kelompok Keilmuan Rekayasa Geoteknik, 2010 -2012

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

- CPNS, III/A, tmt 18 Pebruari 1986.
- Penata Muda, III/A, tmt 11 Juli 1993
- Penata Muda TK 1, III/B, tmt 1 April 1997
- Penata, III/C, tmt 1 Oktober 1999
- Penata Tk.I, III/D, tmt 1 April 2002
- Pembina IV/A, tmt 1 Oktober 2008
- Pembina Tk.I, IV/B, tmt 1 Oktober 2010

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

- Asisten Ahli Madya, tmt 11 Oktober 1993
- Asisten Ahli, tmt 11 September 1995
- Lektor Muda, tmt 1 Pebruari 1998
- Lektor, tmt 1 Oktober 2001
- Lektor Kepala, tmt 1 Mei 2008
- Profesor/Guru Besar, tmt 1 April 2017

V. PENGHARGAAN

- Sutedjo Award for Academic Achievement, Institut Teknologi Bandung, Rektor ITB, 1985
- Satyalancana Karya Satya X Tahun Presiden RI, 2003
- Satyalancana Karya Satya XX Tahun Presiden RI 2010

- Penghargaan Pengabdian XXV Tahun ITB Rektor ITB, 2011

VI. SERTIFIKASI

- Sertifikasi Dosen, 2010, Kementerian Pendidikan Nasional
- Sertifikat Keahlian Ahli Geoteknik Utama No Registrasi: 1.2.216.1.031.09.1005577, Lembaga Pengembangan Jasa Konstruksi Nasional, Ditetapkan di Jakarta 11 Maret 2014
- Pelaku Teknis Bangunan, Surat Ijin Pelaksana Teknis Bangunan (SIPTB) Geoteknik, Dinas Pengawasan dan Penertiban Bangunan Provinsi DKI Jakarta No. 0854/P/G-A/DPPB/I-2011

VII. KEANGGOTAAN DAN JABATAN PROFESI

- Ketua Bidang Kerjasama Profesi dan Penelitian, Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia (HATTI), 2016-sekarang.
- President, Asosiasi Ahli Rekayasa Kegempaan Indonesia (AARGI), 2012-sekarang.
- Board of Director, *International Association for Earthquake Engineering* (IAEE), 2008 - 2016.
- National Delegate of Indonesian Earthquake Engineers Association to the International Association for Earthquake Engineering (IAEE), 2002 to 2008.
- Anggota Tim Penasehat Konstruksi Bangunan (TPKB) DKI-Jakarta, 1997 – to date.
- Wakil Ketua, Team-9, Pengembangan Peta Hazard Gempa Indonesia 2010, Department Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2009-2010.

- Anggota, Revisi SNI-1726-2012, Peraturan Bangunan Tahan Gempa untuk Gedung, 2011-2012.
- Anggota, *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, 1992-Sekarang
- Anggota, *Earthquake Engineering Research Institute (EERI)*
- Anggota, *International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE)* 2007-sekarang.
- Member, Technical Committee (TC-39) on Geotechnical Engineering for Coastal Disaster Mitigation and Rehabilitation, *International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2006- to date.

VIII. KEGIATAN PENELITIAN

Hibah Bersaing (*Competitive Research*)

- **Sengara, IW.** dan Co-Researchers, (1999), "Experimental and Elasto-Plastic Finite Element Studies for Integrated Analysis of Soil-Structure-Interaction in Sand and Clay," Research Report-Graduate Team Research Grant Batch II 1996-1998, Directorate General of Higher Education.
- **Sengara, IW.** and Co-Researchers, (2001), "*Experimental and Finite Element Studies of Load Transfer Mechanism at Piled-Raft Foundation System*" Research Report-Graduate Team Research Grant Batch IV 1999-2000, Directorate General of Higher Education.
- **Sengara, IW.,** Hendarto, Sumiarta, P., Natawidjaja, D.H., and Triyoso, W., (2007), "*Seismic Hazard and Zonation of Sumatera Island Using 3-D Seismic Source Zoning*" Research Report RUT XII to Institute for research and Community Service - ITB and to

Indonesian Ministry of Research and Technology, Center for Disaster Mitigation, Institut Teknologi Bandung

- Darmawan S., **Sengara, IW.,** Handayani G., (2007) "*Pengembangan Typical dan Pedoman Desain Rumah Tinggal Tahan Gempa Indonesia Dengan Verifikasi Simulasi Alat Meja Getar dan Numerik Elemen Hingga*" Program Insentif Riset Terapan 2007, Pusat Mitigasi Bencana, LPPM ITB
- **Sengara, IW.,** (2009) "*Investigasi Bahaya Gempa Bumi Metoda Probabilistik Terintegrasi Untuk Daerah Wisata Pulau Bali Sebagai Masukan Dalam Upaya Mitigasi Bencana*" Hibah Kompetitif Penelitian Nasional Batch II Tahun 2009, LPPM – ITB
- **Sengara, IW.,** Wijayanto, N., Sumiarta, P., Hendarto, (2009) "*An Integrated Seismic Hazard Investigation for City Bandung*" Research Fund by The Asahi Glass Foundation 2009, LPPM – ITB
- **Sengara, IW.,** Suarjana, M., Krishna S.P., Sagala, S., Rahmanusyairi, W. Adiputra, I., Yulman, M.A., Mariany, A., Utami, A., Wahdiny, I., Novianto, B., (2013), "*Development of Earthquake Fatality Model As a Function of MMI for Indonesia*", Penelitian dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) dan Australia-Indonesia Facility for Disaster Reduction (AIFDR), Disaster Risk Reduction Research Grants, LPPM – ITB.

Hibah Penelitian (*Research Award*)

- **Sengara, IW.,** Hendarto, Natawidjaja, D.H., Triyoso, W., Sumiarta, P., (2005-2008), "*Analisa Hazard Gempa dan Zonasi Pulau Sumatera, Metode Probabilistik dengan metode Sumber Gempa 3-Dimensi untuk masukan dalam Peraturan Bangunan Tahan Gempa Indonesia*", Ketua Tim Peneliti, Kementerian RISTEK.

- **Sengara, IW.**, Suarjana, M., Betham, D.; Corby, N.; Edwards, M; Griffith, M.; Wehner, M.; Weller, R., (2010), *The 30th September 2009 West Sumatra Earthquake, Padang Region Damage Survey, GeoScience Australia*, Hibah Penelitian dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) dan Australia – Indonesia Facility for Disaster Reduction (AIFDR), Research Center for Disaster Mitigation-LPPM-ITB.
- **Sengara, IW.**, Irsyam, M, Merati, G.W., Sidi, I.D., M., Mulia, A., Suarjana, M., and Asrurifak, M., (May, 2011a), (2011), *“Development of MCER (Risk-Targeted Maximum Considered Earthquake) Through Investigation of Hazard and Fragility Curve”*, Ketua Tim IMHERE Project B2C FTSL-ITB, Program Hibah Penelitian RGR2-2.3.1.
- **Sengara, IW.**, Suarjana, M., Edwards, M., Ryu, H., Rahmanusyairi, W., Adiputra, I., Wahdiny, I., Utami, A., Mariany, A., Yulman, M.A., and Novianto, B., (2013), *Research on Earthquake Vulnerability/Damage Modeling for Buildings in Indonesia*, Hibah Penelitian dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), dan Australia-Indonesia Facility for Disaster Reduction (AIFDR), Research Center for Disaster Mitigation-LPPM-ITB.

IX. PUBLIKASI (2008-2017)

- **Sengara, IW.**, Roesyanto, Krisnanto, S., Jayaputra, A. A., and Irsyam, M., Accepted to be published, *“Bearing Capacity and Settlement Study on Small-Scale Piled-Raft Groups in Sand”*, Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA.
- **Sengara, IW.**, Sidi, I.D., Merati, G.W., and Mulia, A., (2017),

“Sensitivity Analysis on Seismic Risk-Coefficients for Input to Indonesian Earthquake Resistance Building Code”, Proceeding of the 16th World Conference on Earthquake Engineering, 16WCEE, Santiago-Chile, January 9th to 13th 2017, Paper No 421 Registration Code: S-D1463138443

- Wijanto, S., Merati, G.W., **Sengara, IW.**, and Andriono, T., (2017), *“Best Practice in Seismic Design of Tall to Mega Tall Building Structures in Indonesia”*, Proceeding of the 16th World Conference on Earthquake Engineering, 16WCEE 2017, Santiago-Chile, January 9th to 13th 2017, Paper No 421 Registration Code: S-D1463138443
- **Sengara, IW.**, Suarjana, M., Yulman, A., Gashemi, H., and Ryu, H., (2017), *“Empirical Fatality Model for Indonesia Based on a Bayesian Approach”*, Journal of the Geological Society-London, Geohazards in Indonesia: Earth Science for Disaster Risk Reduction, pp. 179-187.
- **Sengara, IW.**, Irsyam, M., Sidi, I., Mulia, A., Asrurifak, M., Hutabarat, D., (2016), *“Development Risk Coefficient for Input to New Indonesian Seismic Building Codes”* Journal Engineering and Science Technology Institut Teknologi Bandung, Vol. 48, No.1, 2016, pp. 49-65, E-ISSN:2338-5502
- **Sengara, IW.**, Nababan, F., Sumiarta, P., Mulia, A., (2016), *“Site Specific Response Analysis on Liquefiable Sand Deposit”*, Proceeding of 3rd International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation (3rdICEEDM), Conference organized by Indonesian Earthquake Engineering Association, Denpasar-Bali, 1-2 August 2016
- **Sengara, IW.**, Yulman, M.A., Sumiarta, P., Mulia, A., (2016),

"Development on Risk-Based Seismic Design Criteria and Ground Motions for High-Rise Buildings in Jakarta", Keynote Speech, Proceeding of the 3rd International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation (3rdICEEDM), Conference organized by Indonesian Earthquake Engineering Association, Denpasar-Bali, 1-2 August 2016.

- Herry, P., **Sengara, IW.**, Djunaidy, M., (2016), *"Numerical Simulation of Dynamic Compaction to Evaluate Liquefaction Potential at Northern-Jakarta Coast Reclamation"*, Proceeding of the 3rd International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation (3rdICEEDM), Conference organized by Indonesian Earthquake Engineering Association, Denpasar-Bali, 1-2 August 2016.
- Foralisa, M.T., Pribadi, K.S., Wibowo, S., **Sengara, IW.**, *"Development of Earthquake Risk Assessment Model for Roads in Indonesia"*, (2016), Proceeding of the 3rd International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation (3rdICEEDM), Conference organized by Indonesian Earthquake Engineering Association, Denpasar-Bali, 1-2 August 2016.
- Merati, G.W., Sukamta, D., and **Sengara, IW.**, (2016) *"Seismic Design Enforcement Process of High-Rise Building in Jakarta"*, Keynote Speech, Proceeding of the 3rd International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation (3rdICEEDM), Conference organized by Indonesian Earthquake Engineering Association, Denpasar-Bali, 1-2 August 2016.
- **Sengara, IW.**, Sumiarta, P., Yulman, M.A., Yugantoro, A., Mulia, A., Sihombing, M., and Fathonah, W., (2015), *"Geotechnical*

Analyses and Performance of Some Highrise Buildings in Jakarta', Keynote Speech, Proceedings Pertemuan Ilmiah Tahunan dan Kongress Geoteknik Indonesia, Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia (HATTI), Jakarta 24-25 November 2015 ISBN: 978-602-17221-3-8.

- **Sengara, IW.**, Irsyam, M., Sidi, I.D., Mulia, A., Asrurifak, M., and Hutabarat, D., (2015), *"Development of Earthquake Risk-Targeted Ground Motions for Indonesian Earthquake Resistance Building Code SNI 1726-2012"*, 12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, ICASP12, Vancouver, Canada.
- **Sengara, IW.**, Yulman, M.A., and Mulia, A., (2015), *"Seismic Time-History Ground Motions for Specific Site in Jakarta"* Special Issue of Jurnal Teknologi : Geotechnical and Earthquake Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, 81310 UTM Johor Bahru, Johor, Malaysia E-ISSN 2180-3722.
- Hadinata, F., **Sengara, IW.**, and Damanhuri, E., (2015), *"Study of Shear Strength of Artificial Waste With Material and Specific Composition of Indonesia"*, Proceedings of the International Conference on Waste Management & Environment 2015, Paradigm Transformation in Waste Management towards a Greener Environment, 20-22 August 2015.
- **Sengara, IW.**, Suarjana, M., Edwards, M., Ryu, H., Rahmanusyairi, W., Adiputra, I., Wahdiny, I., Utami, A., Mariany, A., Yulman, M.A., and Novianto, B., (2013), *Research on Earthquake Vulnerability/Damage Modeling for Buildings in Indonesia*, Research Report, Research Center for Disaster Mitigation, Institut

Teknologi Bandung.

- **Sengara, IW.,** Suarjana, M., Adiputra, I., Sagala, S., (2012), *“Development of Empirical Earthquake Fatality Model for Indonesia”*, Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, 24-28 September 2012, Lisboa-Portugal, ISBN: 978-1-63439-651-6.
- **Sengara, IW.,** (2012) *“Investigation on Risk Targeted Seismic Design Criteria for High Rise Building in Jakarta Indonesia”*, Proceeding of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, 24-28 September 2012, Lisbon-Portugal, ISBN: 978-1-63439-651-6.
- **Sengara, IW.,** Masyhur, I., Merati, G.W., Sidi, I.D., Suarjana, M., Mulia, A., Yulman, M.A., Hutabarat, D., (2012), *“Development MCER (Risk-Targeted Maximum Considered Earthquake) through investigation of hazard and fragility curve”*, *Research Report – IMHERE Project B.2C FTSL, Institut Teknologi Bandung.*
- **Sengara, IW.,** Mulia, A., Sunendar H., and Mariani, A., (May, 2011), *Research Report on Use of 2010 Indonesian Seismic Hazard Map with Seismic Amplification Factors to Update National Level Indonesian Earthquake Disaster Risk Index Analysis*, Center for Disaster Mitigation, Institut Teknologi Bandung.
- **Sengara, IW.,** Irsyam, M., Sidi, I.D., Merati, G.W., Pribadi, K.S., Suarjana, M., Edwards, M., (2011), *“Some Recent Efforts in Earthquake Hazard and Risk Analysis for Disaster Risk Reduction in Indonesia”*, Invited Speech, Proceedings of the Second International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation (2nd ICEEDM), Seismic Disaster Risk Reduction and Damage Mitigation for Advancing Earthquake

Safety of Structures, Conference organized by Indonesian Earthquake Engineering Association, Surabaya Indonesia, 19-20 July, 2011.

- **Sengara, IW.,** Latief, H., and Kusuma, S.B., (2010), *“Probabilistic Seismic and Tsunami Hazard Analysis for Design Criteria Development of A Coastal Area in City of Banda Aceh”*, Geomechanics and Geoengineering - An International Journal, ISSN: 1748-6033, Volume 5, Issue 1, 2010, Pages 57 – 68
- Makruf, L.L., Irsyam, **M., Sengara, IW.,** Hendriyawan, (2010), *“Hazard Deaggregation for Indonesia”* Jurnal Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan ITB, Vol.17, No.3 Desember 2010, SK Terakreditasi No.83/DIKTI/Kep/2009 ISSN 0853-2982
- **Sengara, I W.,** Putra, H.G., Hakam, A., Sumiarta, P., and Abuhuroyroh, K.M., (2009), *“Reconnaissance Survey Findings and Some Geotechnical Earthquake Engineering Aspects of West Java and West Sumatra Disaster”*, Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan XIII, Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia - Universitas Udayana, Denpasar, Bali, 5-6 Nopember 2009 ISBN: 978-979-96668-7-1
- Toha, F.X. and **Sengara, IW.,** (2009), *“Consolidation Settlements of Deep Clay Layers under High Rise Building in Jakarta”*, Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan XIII, Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia - Universitas Udayana, Denpasar, Bali, 5-6 Nopember 2009 ISBN: 978-979-96668-7-1
- **Sengara, IW.,** (2009), *“Development of Earthquake Scenario for Three Different Sites Within City of Jakarta”*, Earthquake Geotechnical Engineering Satellite Conference XVIIth International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering. 2-3, 10, 2009,

Alexandria, Egypt

- **Sengara, IW.**, Hakam, A., Putra, H.G., Sudinda, T., Sukamdo, P., (2009), *"Seismic Hazard Zoning for West Sumatra Microzonation of City of Padang"*, Proceedings of the International Symposium on Geo-informatics and Zoning for Hazard Mapping, Kyoto Tersa, 3-4 December, 2009, Kyoto-Japan.
- **Sengara, IW.**, (2008), *"Seismic Hazard and Microzonation for A District in Banda Aceh City Post 2004 Great Sumatra Earthquake"*, the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, October 12 - 17, 2008.
- **Sengara, IW.**, Hendarto, Sumiarta, P., Natawidjaja, D., Triyoso, W., (2008), *"Probabilistic Seismic Hazard Mapping for Sumatera Island"*, Proceedings of International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation (ICEEDM08), Conference organized by Indonseian Earthquake Engineering Association, Jakarta, 14-15 April 2008, ISBN 978-979-17551-0-8.
- **Sengara, IW.**, Sukamta, D., Sumiarta, P., (2008), *"Site Response Analysis for Seismic Design of a 48-Storey Tower Building in Jakarta"* Proceeding International Conference on Eartquake Engineering and Disaster Mitigation (ICEEDM08), Conference organized by Indonseian Earthquake Engineering Association , 14-15 April 2008, ISBN 978-979-17551-0-8
- Suarjana, M., **Sengara, IW.**, (2008), *"Lesson Learned from Yogya and Aceh Recovery Program"*, Proceedings 14th World Conference on Earthquake Engineering, 12 - 17 October 2008, Beijing, China.
- Apriadi, D., **Sengara, IW.**, Sumiarta, P., Pipatpongsa, T., (2008), *"Two Dimensional Finite Element Simulation of Natural Soft Clay*

Deposit Response due to Earthquake" The 1st Thailand-Japan International Academic Conference (TJIA 2008), Fron Research to Sustainable Development Thai Students' Association in Japan under Royal Patronage (TSAJ) ISBN 978-974-312-139-5.

