



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Profesor Indra Djati Sidi

**KEAMANAN DAN KEANDALAN
GEDUNG SUPER TINGGI
TERHADAP BAHAYA GEMPA
DI INDONESIA**

28 Juli 2018
Aula Barat Institut Teknologi Bandung

**Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung**
28 Juli 2018

Profesor Indra Djati Sidi

**KEAMANAN DAN KEANDALAN
GEDUNG SUPER TINGGI
TERHADAP BAHAYA GEMPA
DI INDONESIA**



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Hak cipta ada pada penulis

Judul: KEAMANAN DAN KEANDALAN GEDUNG SUPER TINGGI
TERHADAP BAHAYA GEMPA DI INDONESIA
Disampaikan pada sidang terbuka Forum Guru Besar ITB,
tanggal 28 Juli 2018.

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

Indra Djati Sidi
KEAMANAN DAN KEANDALAN GEDUNG SUPER TINGGI
TERHADAP BAHAYA GEMPA DI INDONESIA
Disunting oleh Indra Djati Sidi

Bandung: Forum Guru Besar ITB, 2018
vi+46 h., 17,5 x 25 cm
ISBN 978-602-6624-17-8
1. Rekayasa Struktur 1. Indra Djati Sidi

KATA PENGANTAR

Saya sampaikan rasa syukur ke hadirat ilahi rabbi Allah SWT karena atas izin, kasih, dan sayangNya naskah orasi ilmiah ini dapat diselesaikan dan insya Allah akan disampaikan dalam sidang terbuka Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung, pada hari Sabtu tanggal 28 Juli 2018, bertempat di Aula Barat ITB.

Saya menyampaikan penghargaan, hormat, dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Ketua dan para anggota Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung yang telah memberikan kesempatan kepada saya menyampaikan orasi ilmiah dengan judul **KEAMANAN DAN KEANDALAN GEDUNG SUPER TINGGI TERHADAP BAHAYA GEMPA DI INDONESIA**. Topik ini merupakan bagian dari road map penelitian Kelompok Keahlian Rekyasa Struktur dengan tema *Performance Based Design* dan sekaligus merupakan pertanggungjawaban akademik penulis dari apa yang telah dilakukan di Indonesia yaitu melakukan penyempurnaan berkelanjutan dan pengembangan perencanaan struktur yang berbasiskan risiko, khususnya dalam gedung super tinggi.

Semoga tulisan ini dapat menjelaskan berbagai faktor yang sifatnya acak yang mempengaruhi cara kita merancang gedung-gedung super tinggi, dan memacu penelitian penelitian berikutnya bagi kepentingan bangsa dan negara yang kita cintai, Indonesia. Aamiin..

Wassalam,

Indra Djati Sidi

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
1. LATAR BELAKANG.....	1
1.1. Peran Ilmu Rekayasa Risiko dan Keandalan	1
1.2. Gempa dan Gedung Super Tinggi di Indonesia	3
2. PERKEMBANGAN GEDUNG SUPER TINGGI DI INDONESIA .	6
3. KETIDAKPASTIAN DALAM PERENCANAAN BANGUNAN SUPER TINGGI	8
3.1. Tahanan Dalam Bangunan Super Tinggi	9
3.2. Ketidakpastian Dalam Menentukan Gaya Gempa	12
3.2.1. Peta Hazard Gempa dan Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)	12
3.2.2. Perbedaan antara Proses Desain dan Kinerja Gedung akibat Gempa	15
4. MODEL PROBABIBILITAS GEDUNG SUPER TINGGI AKIBAT GEMPA KUAT	18
5. TOWER 1, PROYEK THAMRIN NINE DAN PENELITIAN DI KAMPUS ITB	20
6. KELOMPOK KEAHLIAN REKAYASA STRUKTUR	24
7. PENUTUP	26
8. PENGHARGAAN DAN TERIMA KASIH	27
9. REFERENSI	32
10. CURRICULUM VITAE	37

KEAMANAN DAN KEANDALAN GEDUNG SUPER TINGGI TERHADAP BAHAYA GEMPA DI INDONESIA

1. LATAR BELAKANG

1.1. Peran Ilmu Rekayasa Risiko dan Keandalan

Suatu sistem rekayasa, dalam hal ini rekayasa teknik struktur, tidak pernah terlepas dari ketidakpastian (*uncertainty*) yang disebabkan oleh *inherent variability* dari material yang dikenal sebagai *aleatory uncertainties* (misalnya kuat tarik baja dan kuat tekan beton) dan *random systematic error* dari formula yang digunakan dalam perencanaan yang disebabkan oleh simplifikasi dari model matematik yang dikenal sebagai *epistemic uncertainties*. Akibatnya akan selalu terjadi perbedaan antara *predicted capacity* dan *actual capacity*. Ketidakpastian ini kemudian diperbesar dengan sifat random atau stokastik dari beban yang bekerja, seperti beban gempa, beban angin, lalu lintas dan beban hidup, yang juga mengandung komponen *aleatory uncertainties* dan *epistemic uncertainties*. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa tahanan dan beban yang bekerja pada suatu sistem struktur merupakan variabel acak (*random variable*). Akibatnya kemungkinan terjadi gagal atau *risk* tidak dapat dihindarkan. Risiko untuk gagal akan selalu ada dalam suatu sistem rekayasa. Dengan menyadari hal ini maka didunia telah dikembangkan pendekatan *probability based factor of safety* atau pendekatan angka keamanan yang diturunkan berdasarkan pendekatan probabilitas untuk mencapai tingkat risiko tertentu yang dapat diterima atau *acceptable risk*. Pada perencanaan

beton bertulang atau struktur baja dikenal metoda perencanaan *load resistance factor design (LRFD)* dimana faktor reduksi dan beban diturunkan atas dasar suatu nilai *acceptable risk*. Lebih jauh lagi peta gempa yang digunakan dalam perencanaan struktur didasarkan atas tingkat risiko kegagalan 10^{-2} , artinya bangunan yang dirancang dengan menggunakan peta tersebut mempunyai tingkat kegagalan atau risiko sama dengan 10^{-2} , terhadap gaya gempa.

Dalam beberapa tahun ke depan Indonesia akan membangun berbagai infrastruktur seperti jalan, jembatan, pelabuhan besar, bangunan tingkat tinggi, pembangkit tenaga nuklir, dan lain sebagainya, yang kesemuanya tidak terlepas dari adanya ketidakpastian atau *uncertainty* dalam tahanan dan beban. Struktur yang dibangun akan lebih besar, lebih panjang, dan lebih tinggi, dan mungkin baru pertama kali dibangun di Indonesia. Semuanya akan mengandung ketidakpastian baik *aleatory* maupun *epistemic* sekaligus dan dengan demikian risiko gagal tidak dapat dihindari. Lebih jauh lagi analisis struktur tidak cukup dengan quasi static linear analysis, melainkan masuk kepada wilayah *nonlinear dynamic analysis*. Dengan *risk and reliability engineering* yang mengkombinasikan antara pendekatan deterministik, matematik probabilitas, ilmu statistik, dan stokastik perencanaan optimum dapat dilakukan dengan melakukan *assessment* terhadap semua ketidakpastian yang terlibat dalam suatu sistem engineering dan kemudian memodelkannya dalam kerangka probabilitas. Alat untuk melakukan analisis tersebut dapat menggunakan solusi langsung (*direct solution*), atau *advance first order second moment method*, dan saat ini banyak dikembangkan teknik-teknik simulasi untuk

persaman kinerja yang complex seperti Monte Carlo Method atau Probability Density Evolution Method (PDEM). Keputusan akan diambil atas dasar suatu nilai *acceptable risk* yang diperoleh dari pengalaman masa lalu. Lebih jauh lagi, *reliability engineering* mampu mengkombinasikan *judgment* yang sifatnya subyektif atau hasil percobaan seperti load test dengan hasil kuantitatif melalui kerangka *Bayesian* yang dapat meng-update tingkat *safety and reliability* dari suatu sistem rekayasa.

Dengan singkat dapat dikatakan bahwa ilmu rekayasa risiko dan keandalan akan memainkan peran yang sentral dalam upaya mendapatkan rancangan infrastruktur yang optimal, dan akan menjadi salah satu parameter dalam pengambilan keputusan produk-produk rekayasa, dalam hal ini teknik struktur.

1.2. Gempa dan Gedung Super Tinggi di Indonesia

Indonesia adalah satu kawasan dengan kejadian gempa yang tinggi karena terletak pada benturan berbagai lempengan tektonik besar yang dikenal juga dengan kawasan *ring of fire*. Kalau dicermati peta gempa yang telah di mutakhirkan pada tahun 2017 oleh Tim Pemutakhiran Peta Sumber dan Bahaya Indonesia Tahun 2017 [1] terlihat dengan jelas bahwa gempa terjadi dari ujung Sumatera hingga Papua dengan berbagai besaran magnitude. Dalam 20 tahun terakhir ini telah terjadi gempa yang bervariasi dari magnitudo 6.3 (Yogyakarta 2006) hingga magnitudo 9.2 (Aceh 2004). Dan gempa-gempa ini telah mengakibatkan kehilangan jiwa, kerusakan infrastruktur, dan menghancurkan bangunan-bangunan yang tidak memenuhi syarat syarat perencanaan.

Dengan demikian perencanaan infrastruktur dan bangunan harus menyertakan pengaruh gempa yang akan menimbulkan percepatan pergerakan tanah (*ground motion*) di lokasi infrastruktur atau bangunan. Bangunan-bangunan yang ada termasuk gedung super tinggi akan diguncang pada muka tanah akibat terjadinya gempa tersebut. Indonesia telah mempunyai peraturan untuk merancang bangunan tahan gempa yang selalu diperbarui secara berkala. Standard terbaru saat ini adalah Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung yang telah disahkan pada tahun 2012 [2], dan saat ini sedang bekerja tim yang akan memperbarui peraturan gempa tersebut karena peta gempa sudah dimutakhirkan pada tahun 2017 yang harus diikuti dengan peta gempa bagi perencanaan infrastruktur dan gedung. Dan ada kecenderungan peraturan gempa semakin berat karena perubahan peta gempa akibat ditemukannya gempa baru, sesar patahan baru dan karena pengembangan terbaru akan gempa dan bangunan tahan gempa yang muncul dari riset dan pengalaman dari gempa yang baru saja terjadi [1]. Berbagai teknik perencanaan telah digunakan di Indonesia, seperti analisis respons spektra dan pushover yang sudah merupakan *common practice*. Sedangkan analisis yang berbasis kinerja (*performance based design* - PBD) [3] yang memanfaatkan analisis non linear riwayat waktu mulai mendapatkan perhatian karena menawarkan model yg lebih realistis dengan potensi penghematan yang akan diperoleh.

Namun demikian gempa tetap merupakan misteri; tetap saja tidak dapat diketahui dengan pasti kapan gempa terjadi, dimana gempa terjadi, berapa besar magnitudo gempa, dan berapa tepatnya (*exactly*) percepatan

tanah yang terjadi dilokasi bangunan, dan seperti apa respons bangunan akibat gempa masih diselimuti dengan ketidakpastian (*uncertainty*). Karena banyaknya ketidakpastian yang ada dalam perencanaan bangunan tahan gempa maka pendekatan probabilitas dan reliabilitas menjadi pilihan yang rasional. Rekayasa gempa akan selalu dihadapkan pada kemungkinan bahwa tahanan gempa yang disiapkan lebih kecil dari gaya gempa yang akan datang. Kemungkinan ini ada dan tidak dapat dihilangkan. Namun perencana dapat menekan kemungkinan gagal tersebut atau risiko gagal sekecil mungkin hingga batas yang dapat diterima atau disebut sebagai *acceptable risk*. Dengan basis risiko yang dapat diterima inilah dibuat peta percepatan gempa dengan basis risiko yang dapat diterima dan base shear akibat *ground acceleration* yang akan bekerja pada dasar bangunan, serta *load resistance factor design* (LRFD) yang digunakan dalam perencanaan elemen-elemen struktur, yang secara keseluruhan disebut sebagai *probability based factor of safety* atau *reliability based design*.

Dalam orasi ilmiah ini penulis akan menggambarkan berbagai ketidakpastian yang ada dalam perencanaan bangunan tahan gempa, khususnya pada bangunan super tinggi yang mulai banyak dibangun di Jakarta. Faktor-faktor tadi digunakan untuk menghitung risk atau reliability dari gedung super tinggi dengan memanfaatkan fungsi *hazard* dan kapasitas gempa gedung tinggi melalui proses teorema probabilitas total. Pada orasi ini akan dijelaskan penerapan *performance based design* dan *reliability based design* pada salah satu gedung super tinggi: Tower 1, Proyek Thamrin Nine di Jakarta. Tower 1 ini akan akan menjadi salah satu dari 100

gedung tertinggi didunia, yang saat ini dalam masa konstruksi (**Gambar 1**).

2. PERKEMBANGAN GEDUNG SUPER TINGGI DI INDONESIA

Dalam beberapa tahun belakangan ini mulai banyak di bangun gedung super tinggi atau pencakar langit yang sebagian besar berlokasi di Jakarta. Gedung super tinggi tersebut antara lain Tower 1, Proyek Thamrin Nine (**Gambar 2**), Menara Jakarta (**Gambar 3**), North dan South Tower Indonesia 1 (**Gambar 4**) dan beberapa gedung lainnya seperti tertera pada **Tabel 1**. Pada umumnya Gedung super tinggi ini mempunyai jumlah lantai lebih besar dari 50 lantai, relatif langsing yang ditandai dengan perioda bangunan yang cukup tinggi (>6 detik), artinya deformasi gedung akibat gempa tidak lagi didominasi oleh moda 1 (lateral). Dalam perencanaan tahan gempa pada umumnya gedung-gedung ini terletak pada wilayah respon spektra *constant displacement*. Untuk menjamin keamanan dan keandalan gedung-gedung super tinggi tersebut SNI 1726; 2012 mensyaratkan adanya perioda gedung maksimum atau T_{max} gedung tinggi yang pada umumnya jauh lebih rendah dari perioda bangunan T yang diperoleh dari analisis modal. Dari T_{max} ini akan diperoleh nilai koefisien geser C_s yang lebih besar dari C_s yang didasarkan nilai T gedung. Selain itu SNI 1726:2012 dan ASCE 10 2016 [4] mensyaratkan juga penggunaan $C_{s_{minimum}}$ yang pada umumnya lebih besar dari C_s yang didasarkan T_{max} . Tentu saja persyaratan ini akan memberikan desain yang konservatif. Hal ini akan dibahas lebih dalam dalam orasi ini.



Gambar 1. Tower 1, Thamrin Nine Dalam Masa Konstruksi Saat Ini



Gambar 2.
Tower 1,
Thamrin Nine



Gambar 3. Menara Jakarta



Gambar 4.
North and South Tower, Indonesia 1

Tabel 1. Gedung Super Tinggi di Jakarta

No.	Gedung Super Tinggi	Jumlah Lantai	Tinggi Gedung (m)	Perioda Gedung (detik)	Perencana Gedung
1.	Tower 1, Proyek Thamrin Nine	72	335	7	Wiratman
2.	Tower 2, Proyek Thamrin Nine	62	300	10	Meinhardt/ LAPI ITB
3	Tower Fortune, Menara Jakarta	61	287.4	9.59	Penta ReKayasa
4	Tower Breeze, Menara Jakarta	57	231	9.59	Penta ReKayasa
5	Tower Equinox, Menara Jakarta	56	216.5	9.2	Penta ReKayasa
6	Tower Destiny, Menara Jakarta	56	216.55	9.11	Penta ReKayasa
6	Signature Tower	111	638	13-14	Thornton Tomasetti/ Gistama
7	The Pakubuwono Signature	50	252	6.38	Davy Sukamta & Partners
8	North Tower, Indonesia 1	63	303	7.4	Davy Sukamta & Partners
9	South Tower, Indonesia 1	54	303	5.94	Davy Sukamta & Partners
10	The Tower	50	202	6.23	Davy Sukamta & Partners

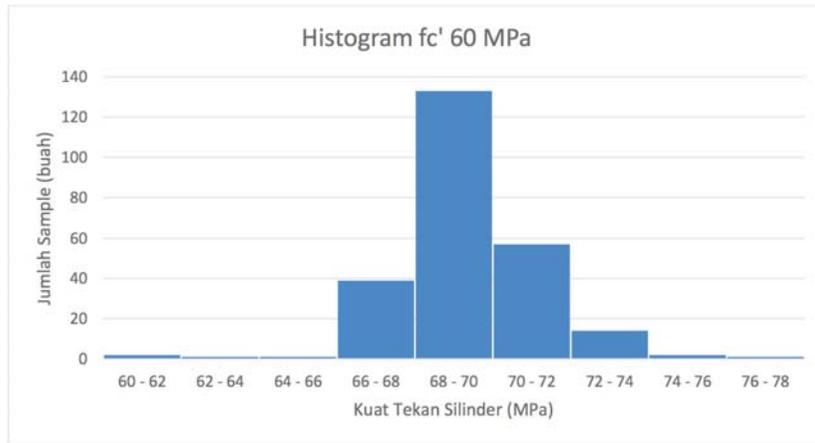
3. KETIDAKPASTIAN DALAM PERENCANAAN BANGUNAN SUPER TINGGI

Ketidakpastian dalam bangunan super tinggi dapat dibagi 2 bagian besar yaitu ketidakpastian yang ada pada tahanan atau resistance dan ketidakpastian yang berkaitan dengan beban atau load, dalam hal ini beban mati, beban hidup, dan beban gempa. Dan ketika berbicara tentang seberapa aman atau seberapa reliablekah gedung super tinggi terhadap gempa maka pertanyaan yang harus dijawab adalah seberapa akurasi atau ketepatan perencana dapat menetapkan kekuatan bangunan dan beban

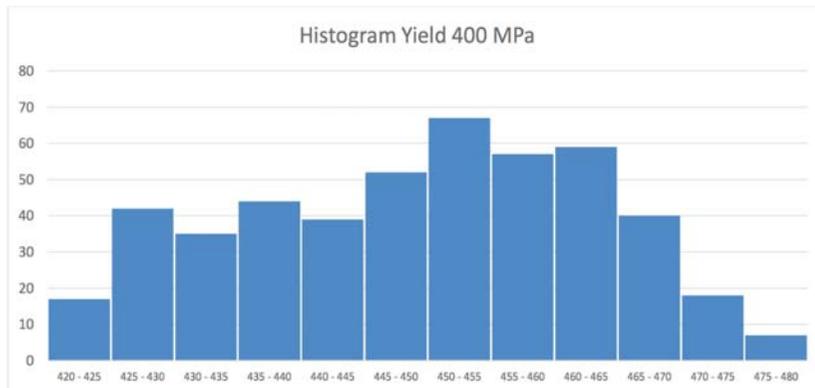
gempa yang bekerja. Beban gempa tidak bekerja sendirian, melainkan diikuti beban mati, dan sebagian dari beban hidup yang tentunya ikut diperhitungkan, dan pada akhirnya menghasilkan beban total pada gedung.

3.1. Tahanan Dalam Bangunan Super Tinggi

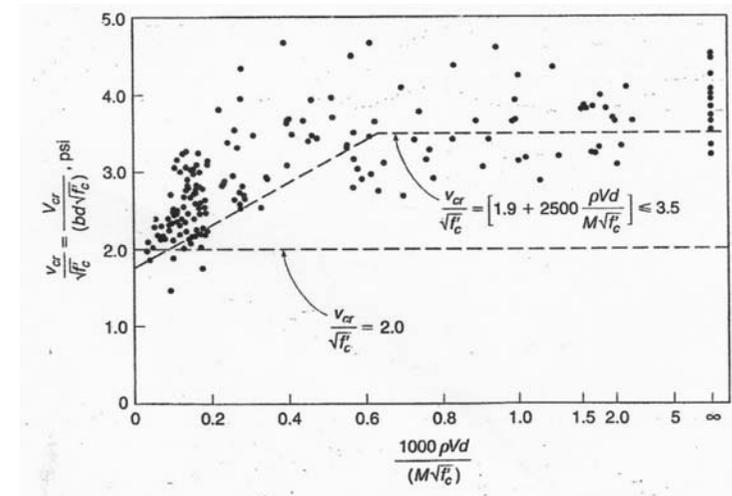
Dapat dikatakan bahwa hampir semua parameter atau variabel yang terlibat dalam perencanaan bangunan tahan gempa adalah variabel yang sifatnya acak atau *random*. Tidak pernah ada dari uji coba kuat tekan beton atau uji tarik baja diperoleh hasil yang seragam, selalu menunjukkan variasi yg mengikuti pola tertentu (**Gambar 5** dan **Gambar 6**). Selain itu rumus-rumus yang dipakai untuk menghitung kuat lentur atau kuat geser penampang, atau kekuatan tekan kolom merupakan simplifikasi dari dari fenomena yang kompleks. Perbandingan antara nilai prediksi (**predicted value**) dan nilai yang diukur (*observed value*) tidak selalu satu (model sempurna) melainkan menunjukkan variasi yang harus diperhitungkan dalam perencanaan (**Gambar 7**). Ketidakpastian juga muncul dalam respons bangunan yang bervariasi akibat beban gempa yang bervariasi walaupun mempunyai yang *peak ground acceleration* (PGA) yang sama. **Tabel 2** menunjukkan bahwa suatu gedung dapat runtuh pada PGA yang berbeda, karena pengaruh gempa yang berbeda energi, frekwensi, serta durasinya.



Gambar 5. Uji Kuat tekan Beton Tower 1, Thamrin Nine



Gambar 6. Histogram Uji Tarik Baja, Tower 1, Thamrin Nine



Gambar 7. Perbandingan Antara Prediksi dan Kuat Geser Terukur (Sesudah Nilson et. al., 2004, [5])

Tabel 2. Variasi Kapasitas Tower 1, Thamrin nine Akibat Beban Gempa Riwayat Waktu Yang Berbeda (Sesudah Patrisia, dkk, 2017, [6])

No.	Earthquak Record	PGA (g)	Scale	Scaled PGA (g)
1	Loma Prieta	0.4	1.2	0.48
2	Imperial Valley	0.39	1.2	0.468
3	Northridge	0.4	1.05	0.42
4	Chi Chi	0.39	1.31	0.511
5	Kobe	0.43	1.7	0.731
6	Mammoth Lakes	0.42	1.375	0.578
7	Morgan Hill	0.42	2	0.84
8	MYG 013	0.216	5.1	1.104
9	TCU 015	0.187	2.76	0.517
10	TCU 089	0.181	2.75	0.498
11	TCU 120	0.157	1.75	0.275
12	ABY	0.205	3	0.615
13	TAP 035	0.241	2.55	0.614
14	Padang	0.272	3	0.816

3.2 Ketidakpastian Dalam Menentukan Gaya Gempa

Ketidakpastian yang paling besar datang dari prediksi percepatan guncangan tanah yang akan bekerja pada suatu gedung dalam masa guna bangunan tersebut. Ketidakpastian ini bersumber dari ketidak tahuan kita untuk menentukan kapan dan dimana gempa akan terjadi, berapa magnitudo gempa yang akan terjadi, dan berapa percepatan gempa yang akan terjadi dilokasi gedung. Tegasnya kita tidak tahu dengan pasti (deterministik). Para perencana dihadapkan pada ketidakpastian dan risiko, namun keputusan harus diambil. Pembangunan harus tetap berlanjut. Dan ini bukan masalah baru, *enjining* selalu berhadapan dengan ketidakpastian dan tidak pernah hal ini mencegah perencana untuk memutuskan. Perencana adalah seorang *risk taker*. Untuk mengatasi hal ini perencana menggunakan konsep angka keamanan yg harus dipenuhi, yaitu rasio antara kekuatan nominal / beban nominal. Atau konsep *Load Resistance Factor Design* dalam merancang elemen-elemen struktur seperti: pelat, balok, kolom, dinding geser, dan/ atau core wall yang kesemuanya didasarkan atas tingkat risiko yg telah diterima. Sebagai contoh SNI 1726: 2012 menetapkan probabilitas gagal sebesar 1% dapat diterima untuk umur gedung 50 tahun.

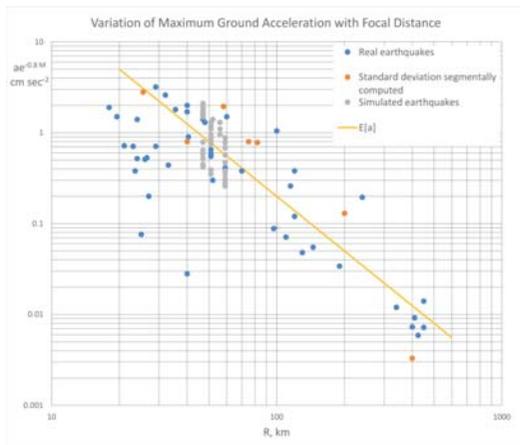
3.2.1. Peta Hazard Gempa dan Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA).

Untuk menentukan gaya gempa yang akan dipakai dalam merancang sebuah gedung super tinggi dilokasi tertentu, perencana memerlukan informasi percepatan tanah maksimum yang akan dipergunakan untuk

menentukan gaya geser dasar (*base shear*) gempa yang bekerja (diperkirakan akan bekerja) pada dasar gedung. Maka diperlukan peta *hazard* (bahaya) gempa yang dipakai untuk menentukan koefisien geser C_s . Peta yang telah dibuat dalam SNI 1726 2012 dan segera akan dimutakhirkan pada akhir 2018 didasarkan atas konsep 1% *acceptable risk*. Tentu saja sudah diperkirakan bahwa banyak ketidakpastian dalam menentukan percepatan batuan ndasar pasa perioda pendek atau S_s dan percepatan batuan dasar pada perioda 1 detik atau yg biasa disebut dengan S_1 . Tentu saja penetapan S_s dan S_1 tidak terlepas dari ketidakpastian yang *inherent* ada dalam konsep yang dikembangkan. PSHA yang digunakan selalu mengandung unsur-unsur sebagai berikut [7]:

1. Kejadian gempa yang dimodel sebagai proses Poisson
2. Magnitudo yang akan terjadi pada suatu patahan dimodel sebagai random variable berdistribusi truncated exponential
3. Lokasi hypocentrum pada patahan dimodel sebagai berdistribusi uniform artinya gempa dapat terjadi dengan probabilitas yang sama pada sesar tertentu.
4. Panjang sesar dapat dimodel untuk mengikuti distribusi beta yang mempunyai banyak kemungkinan bantuk namun mempunyai batas atas dan bawah
5. Jika Gempa terjadi pada suatu kawasan maka kawasan tersebut dapat juga dimodel untuk mengikuti distribusi beta, dan gempa dapat terjadi secara uniform pada kawasan tersebut.
6. PSHA dikembangkan untuk fungsi atenuasi tertentu, atau yang biasa

disebut sebagai GMPE, *Ground Motion Prediction Equation*. GMPE ini pada umumnya diturunkan untuk kawasan tertentu dengan menggunakan regresi linear maupun nonlinear. Sejak Esteva dan Rosenbleuth (1964) [8] memperkenalkan fungsi GMPE pertama (**Gambar 8**), hingga kini telah tercatat ada 240 GMPE yang dipublikasikan, dan yang terakhir diusulkan oleh Mahani dan Kao (2018 [9]). Sebagai catatan belum pernah ada GMPE yang 100% fit dengan data, selalu ada deviasi jika dibandingkan dengan pengukuran lapangan. GMPE adalah salah satu persamaan yang digunakan dalam menentukan hazard suatu daerah dan ikut menyumbang pada variabilitas peta gempa dan fungsi hazard suatu kawasan. **Gambar 9, 10, dan 11** menunjukkan penyebaran data pengukuran terhadap fungsi atenuasi tertentu/GMPE.



Gambar 8. Variasi nilai PGA dengan Focal Distance (Sesudah Esteva dan Rosenbleuth, 1964 [8])

Ditinjau dari pendekatan probabilitas dapat dikatakan bahwa peta yang eksak atau fungsi hazard suatu kawasan tertentu yg eksak tidak mungkin diperoleh, karena ia merupakan “penjumlahan” dari banyak random variable. Penjumlahan dari banyak random variable akan mendekati distribusi normal dengan mengacu pada teorema limit sentral atau central limit theorem. Dapat dikatakan bahwa fungsi hazard bagi suatu daerah merupakan random variable yg bervariasi yang tentunya akan mempengaruhi nilai annual hazard atau risiko yang akan dihitung. Variabilitas ini dapat diperhitungkan untuk mendapatkan hasil risiko final.

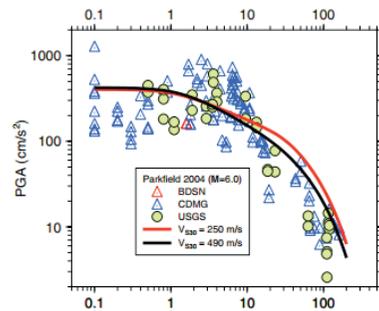
3.2.2. Perbedaan antara Proses Desain dan Kinerja Gedung akibat Gempa.

Dalam proses desain gedung tinggi pada umumnya perencana menggunakan gaya lateral yang bekerja pada tiap lantai gedung. Gaya tingkat tersebut di hitung dari gaya geser dasar yang bekerja pada permukaan tanah. Perbedaan yang mendasar antara proses desain dan realita gaya gempa yang bekerja adalah dalam persamaan gaya yang diselesaikan.

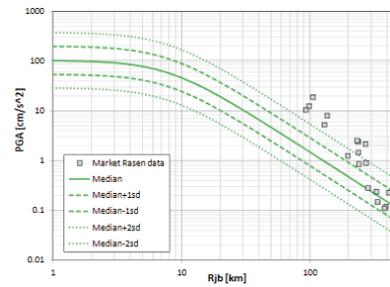
Dalam proses desain persamaan yang diselesaikan adalah:

$$\{P\} = [K] \{x\} \tag{1}$$

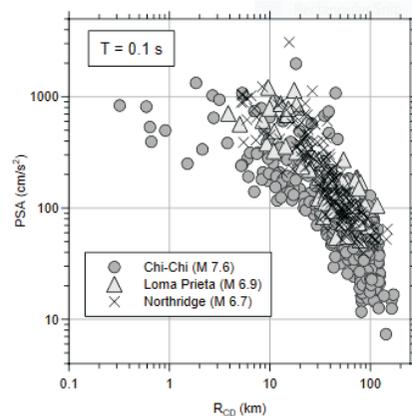
Matrix P adalah gaya lateral ekuivalen yang bekerja yang diharapkan dampaknya mendekati gaya yang terjadi akibat gempa, K adalah kekakuan struktur, dan x adalah deformasi.



Gambar 9. Perbandingan Data Gempa Parkfield 2004 dengan Prediksi Dari GMPE BA07, [10] (Sesudah Boore dan Atkinson, 2007)



Gambar 10. Perbandingan Model NGA Akbar dan Bommer (2010), strike-slip M= 4.5 dgn data Gempa Market [11] Rasen (sesudah Arango dkk, 2012)



Gambar 11. Percepatan Tanah untuk 3 Macam Sumber Gempa, Dengan T = 0.1 detik (Sesudah Boore, 2008, [12])

Sedangkan persamaan gerak gedung akibat gempa mengandung matris masa M dan redaman C yang tidak ada dalam persamaan yang digunakan dalam tahap perencanaan, sebagai berikut:

$$[M] \{\ddot{x}\} + [C] \{\dot{x}\} + [K] \{x\} = -[M] \{\ddot{x}_g\} \quad (2)$$

Dimana \ddot{x}_g adalah percepatan tanah akibat gempa. Jelas sekali akan ada perbedaan antara hasil persamaan 1 dan 2, karena simplifikasi yang diambil. Secara umum persamaan 1 akan memberikan hasil yang konservatif karena berbagai persyaratan yang harus dipenuhi dalam menentukan gaya geser dasar rencana yang diatur oleh standar SNI 1726:2012. Analisis pushover pun tidak merefleksikan perilaku gedung dalam menahan gaya gempa, namun besaran-besaran yang diperoleh dari analisis pushover seperti C_d , R , dan Ω_o dapat dipakai dalam perencanaan awal untuk mendapatkan dimensi dan tulangan. Setelah itu sebaiknya perencana *back to basic* menggunakan *performance based design* (PBD) dengan memanfaatkan persamaan gerak gedung akibat gaya gempa. Analisis nonlinear riwayat waktu dapat diterapkan pada gedung melalui *step by step direct integration e.g., Newmark β Method* (Newmark and Rosenbleuth, 1971 [13]). Dalam PBD yang diperlukan adalah *input ground motion* dilokasi bangunan dan karakteristik penampang yang ditandai oleh dimensi penampang, tulangan, mutu beton, dan mutu baja. Jika *input ground motion* ini dimiliki melalui research dan pengukuran lapangan maka berbagai ketidakpastian yang muncul dalam PSHA dapat di *bypass*. Khususnya dalam perencanaan gedung super tinggi lebih realistis jika gedung tersebut diuji dengan beberapa *ground motion* yang diperkirakan

bekerja dilokasi gedung. Semakin banyak *ground motion* yang digunakan akan semakin baik perencanaan mendapat gambaran akan perilaku gedung, kekuatan dan kekakuan gedung. Lebih jauh lagi dari data kekuatan diatas dibentuk *probability density function* dari kapasiats atau yang lebih dikenal dengan nama fungsi fragilitas gedung tersebut.

4. MODEL PROBABIBILITAS GEDUNG SUPER TINGGI AKIBAT GEMPA KUAT

Annual Hazard adalah probabilitas suatu besaran PGA diliwati dalam satu tahun untuk suatu lokasi tertentu. Annual hazard ini diperoleh melalui PSHA. Sebagai contoh, jika suatu gedung dirancang untuk dapat menahan $PGA = 0.2 \text{ g}$, maka gedung tersebut akan gagal bila PGA yang terjadi lebih besar dari 0.2g , atau gagal bila $PGA > 0.2\text{g}$ atau Probabilitas gagal = $P(X > 0.2\text{g})$, dimana X adalah PGA yang akan terjadi. Inilah yang mendasari konsep *uniform hazard* dimana nilai hazard dianggap sama dengan risiko gagal struktur gedung. Hasil ini akan benar jika kekuatan gedung merupakan deterministik variabel, bukan acak. Konsep ini digunakan dalam SNI 1726:2002. Perkembangan lebih lanjut menunjukkan bahwa kapasitas struktur merupakan *random variable*, jauh dari deterministik. Karakteristik acak ini sebagai akibat variabilitas dalam bahan baja dan beton dan pengaruh rekor gempa yang berbeda. Setiap gempa mempunyai energi, frekwensi, PGA, dan durasi yang berbeda satu sama lainnya yang memberikan dampak berbeda juga dalam respons bangunan. Dengan demikian jika kapasitas penampang sama dengan Y,

maka gagal dapat didefinisikan sebagai percepatan tanah yang terjadi lebih besar kapasitas gedung atau $X > Y$ atau dalam bentuk *conditional probability* dapat dituliskan sebagai:

$$P(\text{Gagal}) = P(X > Y \mid \text{kapasitas} = y) \quad (3)$$

Karena Y merupakan variabel acak maka melalui teorema probabilitas total, probabilitas gagal dapat dinyatakan sebagai:

$$P(\text{Gagal}) = \int_0^{\infty} P(X > Y \mid y) f_Y(y) \quad (4)$$

$P(X > Y \mid y)$ adalah fungsi hazard yang diperoleh melalui PSHA sedangkan (y) adalah kapasitas struktur atau yang disebut juga fragilitas struktur. Pada umumnya (y) mengikuti distribusi lognormal dengan demikian risiko dapat dinyatakan sebagai [14], [15], dan [16]:

$$P_f = T \times \int P(X > y \mid y) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta y} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{\ln y - \ln \mu + 0.5 \ln(1 + \Omega_y^2)}{\beta} \right]^2 \right\} \quad (5)$$

Dimana μ nilai rata-rata dari kapasitas Y, Ω_y adalah koefisien variasi dari Y dan β adalah deviasi standar dari $\ln Y$, dan T adalah umur bangunan. Statistik dari Y ini diperoleh dengan cara menguji ketahanan gedung terhadap gempa riwayat waktu yang diperbesar hingga terjadi collapse atau keruntuhan pada kolom atau shearwall. Teknik ini dikenal sebagai incremental dynamic analysis (IDA). Jika dilakukan terhadap n riwayat waktu, maka akan diperoleh n data kekuatan gedung dalam bentuk Y atau PGA maksimum yang dapat ditahan gedung. Dengan demikian dari n data tersebut dapat diperoleh nilai rata-rata maupun koefisien variasi yang menjadi input dalam Persamaan 5.

Untuk mengantisipasi pengaruh kekuatan bahan yang random, terbatasnya data riwayat waktu yang digunakan, atau model struktur yang tidak sempurna, maka koefisien variasi dari kapasitas diperbesar dengan pendekatan *first order second moment* (e.g., Ang dan Tang, 1970 [17]) sebagai berikut:

$$\Omega_Y^2 = \Omega_R^2 + \Omega_D^2 + \Omega_S^2 + \Omega_M^2 \quad (6)$$

Dimana Ω_R = koefisien variasi yang diperoleh dari IDA, Ω_D = koreksi koefisien variasi karena terbatasnya data riwayat waktu gempa, Ω_S = koreksi karena model struktur yang tidak sempurna, dan Ω_M = koreksi karena variabilitas dari bahan baja dan beton.

Dan β menjadi:

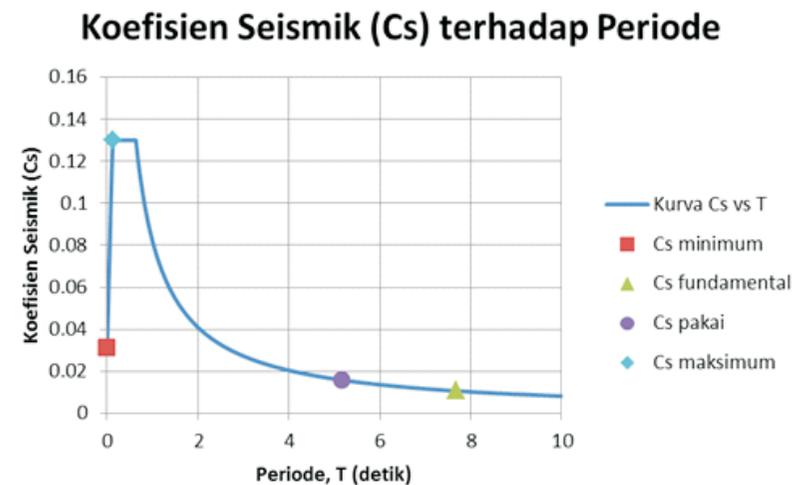
$$\beta = \sqrt{\ln(1 + \Omega_Y^2)} \quad (7)$$

Dengan menggunakan persamaan 1 hingga 7 probabilitas gagal suatu gedung dapat dievaluasi dengan cepat dan sederhana. Metoda ini bukan satu satunya cara untuk menghitung risiko terhadap gempa. Risiko kegagalan dapat juga ditentukan melalui proses random vibration dimana beban gempa dimodel sebagai sebuah proses stokastik atau melalui proses simulasi Monte Carlo (e.g., Ang dan Tang 1970)

5. TOWER 1, PROYEK THAMRIN NINE DAN PENELITIAN DI KAMPUS ITB

Tower 1, Proyek Thamrin Nine ini berlokasi di jalan Thamrin, Jakarta, merupakan gedung super tinggi dengan 72 lantai, 6 basemen, dan

ketinggian dari muka tanah 366 meter (Gambar 2). Gedung ini dirancang dengan memanfaatkan PBD dan dilakukan evaluasi risiko gedung terhadap gaya gempa yang mungkin terjadi. Proses PBD dilakukan oleh Prof. Bambang Budiono dan tim, Gempa riwayat waktu untuk lokasi Thamrin Nine disiapkan oleh Prof. Wayan Sengara, dan perhitungan risiko dilakukan oleh Junisa Arini Patrisia dari PT Wiratman [18]. PBD ditempuh karena tulangan yang diperoleh sangat padat sebagai konsekuensi penerapan C_s minimum yang diatur SNI 1726:2012, sangat menyulitkan dalam pelaksanaannya (Gambar 12). Perhatikan dari Gambar 13, jika dipaksakan penggunaan C_s minimum dalam desain, maka nilainya setara dengan bangunan dengan $T = 3$ detik atau kira-kira dengan ketinggian 30 lapis, yang perilakunya sangat berbeda dengan gedung 72 lantai. Konservatif ya.



Gambar 12. Grafik Koefisien Seismik dengan T Gedung

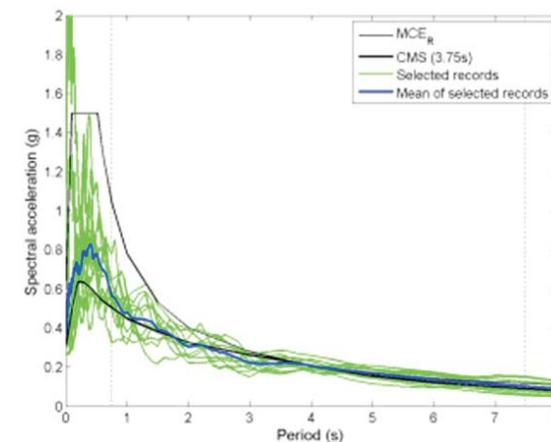
Ada tulangan kolom yang luasnya 6%, ini padat sekali apalagi diwilayah sambungan atau joint. Sangat sulit untuk dilaksanakan. Dengan PBD luas tulangan dapat dikurangi hingga 2 sd 2.5% namun harus dibuktikan bahwa performance yang ditetapkan dapat dicapai yaitu Life Safe, dengan tingkat risiko 1%. Gedung Thamrin Nine ini menggunakan $C_{s \text{ rata-rata}}$ dalam menentukan gaya geser dasar yang merupakan nilai rata $C_{s \text{ minimum}}$ dan C_s yang diperoleh dari perioda bangunan yang pada umumnya sudah masuk wilayah constant displacement (**Gambar 12**). Kalau kita lihat perbandingan antara spectra response desain dan spectra response akibat beberapa beban riwayat waktu, maka pada perioda tinggi, > 6 detik, perbedaaan desain spectra dan spectra akibat berbagai gempa riwayat waktu mengecil. Uncertainty nya lebih sedikit jika dibangun pada bangunan2 yang jumlah lantai < 40 atau $T < 4$ detik. Masih terjadi perbedaan yang cukup besar. Artinya untuk bangunan super tinggi PGA yang akan bekerja diketahui dengan lebih pasti/ certain (**Gambar 13**) [19].

Hasil IDA menunjukkan bahwa kapasitas gedung memang tergantung pada percepatan tanah atau riwayat waktunya bekerja. Dari **Tabel 2** terlihat bahwa kapasitas gedung T1 bervariasi dari 0.275 g hingga 1.104 g dengan nilai rata rata 0.606 g dengan koefisien variasi 0.35.

Lebih jauh dapat ditunjukkan bahwa distribusi tahanan atau fungsi fragilitas mengikuti distribusi lognormal. Dengan menggunakan Persamaan 5 dan 6 dapat ditunjukkan bahwa nilai annual risk dari struktur Tower 1 Thamrin Nine adalah 1.78×10^{-4} atau tingkat risiko untuk umur

gedung 50 tahun adalah $50 \times 1.78 \times 10^{-4} = 0.89 \times 10^{-2}$. Dan nilai ini lebih kecil dari 1% yaitu nilai risiko yang dapat diterima yang disyaratkan SNI 1726:2012. Pada gedung T1 akan dipasang SHMS (*Structural Health and Monitoring System*) yang dapat mengukur deformasi gedung akibat angin dan gempa, percepatan bangunan akibat gempa, dan percepatan gempa di tanah (*free field*). Ini semua akan berguna untuk mengetahui the real stiffness dari gedung, selain memperkaya pengetahuan kita akan perilaku percepatan tanah akibat gempa.

Analisis beberapa bangunan super tinggi sudah juga menjadi riset dalam tugas akhir mahasiswa S1 atau thesis mahasiswa S2. Secara singkat dapat disampaikan bahwa gedung-gedung super tinggi yang dirancang dengan kosep $C_{s \text{ rata-rata}}$ mempunyai tingkat keandalan yang memadai terhadap bahaya gempa dalam kurun umur bangunan 50 tahun.



Gambar 13. Spektra dari Ground Motion yang di Skalikan Terhadap Spektra Target (Sesudah FEMA 1051, 2015)

Table 3. Risiko Bebebrapa Gedung Super Tinggi Dengan Outtrigger dan Belt Truss Dirancang Dengan C_s Smaller than $C_{s\text{ minimum}}$ SNI 1726:2012

No.	A	B	T (sec)	$C_{s\text{ min}}$ Indonesian Code	C_s design	C_s design / $C_{s\text{ minimum}}$	Life Time Risk	Reference
1	60	2	5.6	0.0252	0.0172	0.68	5.5×10^{-4}	[20]
2	80	2	7.8	0.0332	0.0183	0.55	1.1×10^{-2}	[21]
3	60	2	6.4	0.0252	0.0169	0.67	4.2×10^{-4}	[22]

A = jumlah lantai

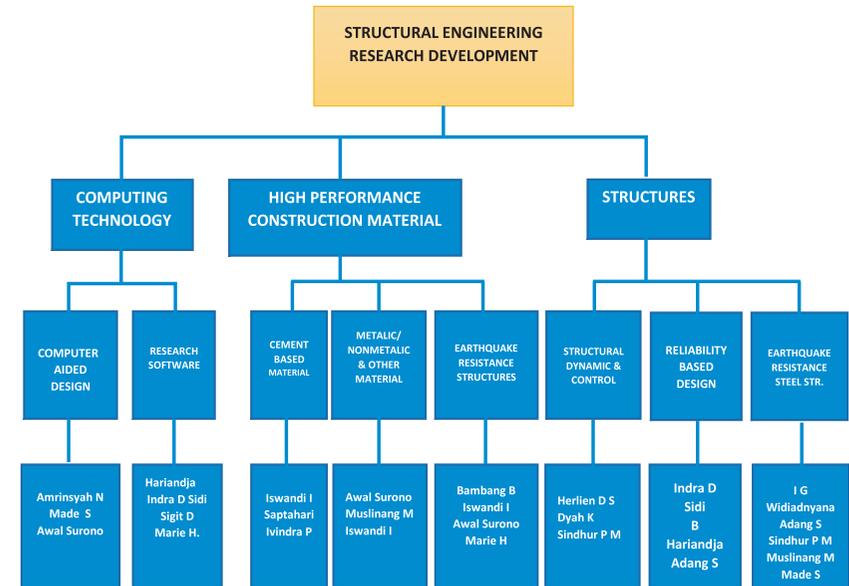
B = lokasi outrigger dan belt truss

T = perioda fundamental gedung

Mempelajari lebih dalam dari spektra respons terhadap gempa, pada umumnya gedung-gedung super tinggi terletak pada wilayah *constant displacement* dengan PGA yang kecil. Peraturan-peraturan gempa yang ada di dunia cenderung mensyaratkan beban gempa yang lebih berat lagi, yang sebenarnya sangat kecil kemungkinannya terjadi, hal tentunya akan memberikan tingkat keandalan yang tinggi namun diikuti dengan biaya tinggi. Secara tidak langsung perancangan bangunan super tinggi didasarkan atas perilaku bangunan yang jauh lebih rendah. Peningkatan harga C_s yang didasarkan C_s dari batasan T_{max} dan/ atau C_s dari batas $C_{s\text{ min}}$ akan berdampak pada peningkatan gaya geser dasar rencana (**Gambar 14**), dan pada akhirnya akan memberikan tulangan yang padat atau dimensi kolom/ shearwall yang besar pula.

6. KELOMPOK KEAHLIAN REKAYASA STRUKTUR

Bidang rekayasa risiko dan keandalan (*risk and reliability engineering*)



Gambar 15. Road Map Penelitian KK Struktur, Prodi Teknik Sipil, FTSL ITB Dalam Performance Based design, Visi 2020

merupakan bagian terpadu dari road map Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur (KKRS) Visi 2020, dalam mengembangkan *performance based design* terutama dalam menghadapi gaya gempa (**Gambar 15**). Dalam **Gambar 15** terlihat bahwa *risk dan reliability design* merupakan bagian terpadu untuk mendapatkan desain struktur yang berbasis kinerja. Dan perkembangan ini sangat sesuai dengan perkembangan perancangan infrastruktur diluar negeri yang semuanya sudah mengadopsi *probability based design* sebagai dasar perencanaan untuk mendapat struktur yang optimal seperti yang digunakan oleh AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), FEMA (Federal Earthquake

Management Agency), dan ASCE (American Society of Civil Engineer). Sebagai informasi, FEMA 1050 -2015 (Federal Earthquake Management Agency) dan peraturan ASCE 7 –2016 (American Society of Civil Engineer 7 – 2016) yang baru saja keluar merekomendasikan penggunaan analisa risiko dalam melakukan *performance based design* bagi bangunan tinggi akibat gaya gempa. Dan bangunan tersebut harus mencapai *level of reliability* yang ditetapkan.

7. PENUTUP

Ada kecenderungan besar gedung super tinggi akan terus dibangun. Akan menyusul Signature Tower yang mempunyai jumlah lantai 111, dan gedung-gedung super tinggi lain nya akan menyusul sejalan dengan pertumbuhan ekonomi Indonesia. Riset dalam perencanaan gedung super tinggi akan terus berlanjut, terutama yang akan dilakukan KK Struktur dengan road mapnya yang menyangkut berbagai aspek, antara lain pengembangan model struktur, perencanaan elemen-elemen struktur seperti corewall, belt truss dan outrigger, mengembangkan LRFD lanjut, dan lain-lainnya.

Teman-teman di KK Geoteknik bersama kawan-kawan dari geofisika, geologi, dan geodesi akan selalu menyempurnakan peta gempa Indonesia dengan inovasi maupun temuan-temuan baru yang berkaitan. Dengan gempa dan patahan, termasuk dapat menghasilkan berbagai ground motion yang siap dipakai dalam PBD.

Lebih jauh lagi Fakultas Teknik Sipil Dan Lingkungan telah

membentuk Center for Infrastructure and Built Environment untuk memberikan pelayanan riset dan penelitian dalam seluruh infrastruktur termasuk gedunggedung super tinggi. Semoga semua ini dapat bermanfaat bagi almamater, bang, dan negara. Aamiin.

8. PENGHARGAAN DAN TERIMA KASIH

Semua kejadian, semua keberhasilan terjadi semata mata karena izin Allah Azza wa Jalla, tidak ada yang kebetulan, dan semua terjadi pada saatnya. Bagi Allah SWT tidak ada kejadian yang acak, semua ada hukum-hukumnya yang eksak, kita saja yang belum mengetahui. Saya bersyukur kepada Allah SWT atas amanah guru besar yang dipercayakan kepada saya, semoga saya menjadi insan yang pandai syukur dan dapat menjalankan amanah ini dengan sebaik baiknya bagi kepentingan almamater, bangsa dan negara. Jelas sekali, guru besar bukan keberhasilan saya sendiri, banyak pihak yang ikut andil mendorong, memotivasi, mengingatkan, bekerja sama, dan mengingatkan agar jangan lupa dan lalai menyiapkan segala sesuatu yang menyangkut guru besar ini.

Pada kesempatan ini saya ingin menyampaikan terima kasih dan penghargaan yang setinggi tingginya kepada Rektor ITB, Prof. Kadarsah Suryadi dan jajaran pimpinan ITB, Ketua Senat ITB, Prof. Indratmo Sukarno dan segenab jajarannya, dan Ketua Forum Guru besar ITB, Prof. Tutuka Adji dan jajaran Guru Besar ITB yang telah memberikan dukungan serta rekomendasinya. Terima kasih atas kepercayaan yang telah diberikan untuk menjadi salah satu guru besar ITB.

Pada kesempatan ini saya ingin menyampaikan terima kasih dan hormat saya kepada Prof. Wiranto Arismunandar yang tidak henti-hentinya mengingatkan saya agar saya mengurus guru besar ini, kadang-kadang saya berdoa jika bertemu beliau untuk tidak ditanya tentang guru besar ... sepertinya beliau juga mengetahui saya tidak mau ditanya. Terima kasih bapak atas bimbingan, pelajaran, kepercayaan yang selalu diberikan kepada saya.

Saya juga menyampaikan terima kasih kepada Jenderal TNI (Purn) Wismoyo Arismunandar atas motivasi, pelajaran kepemimpinan dan nasionalisme yang diberikan yg mendorong saya untuk terus keep going. Banyak pelajaran yang saya timba dalam berinteraksi dengan bapak.

Terima kasih pula ingin saya haturkan bagi Prof. Malik Fadjar yang juga selalu menanyakan: mas Indra guru besarnya kapan? ... terima kasih atas kepercayaan, dorongan, dan semangat yang bapak berikan kepada saya. Semoga saya dapat menjalankan amanah ini dengan sebaik-baiknya.

Pada hari ini saya juga ingin menyampaikan terima kasih juga kepada bapak Dr. H. Feisal Tamin, yang selalu mengingatkan profesionalisme dan netralitas PNS. Beliau juga termasuk pribadi yang selalu menanyakan: koq lama benar jadi professor nya... it's a very tough question. Terima kasih bapak untuk semua dukungan dan perhatian yg telah diberikan.

Terima kasih saya sampaikan kepada dekan FTSL ITB, Prof. Ade Syafruddin, dan jajaran pimpinan FTSL ITB yang telah mengurus dengan

telaten semua proses guru besar ini. Bahkan dilapangan badminton pun beliau kerap bertanya: bagaimana pak Indra persiapan guru besarnya? Pertanyaan yang berat, jawabnya: sedang pak! Berkali-kali jawabnya sedang!

Saya ingin juga menyampaikan terima kasih kepada teman-teman, sahabat-sahabat, dan kolega di Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur yang juga selalu menanyakan, mengingatkan bahkan menasihati tentang pengurusan guru besar ini, apa lagi sudah mendekati umur 65 tahun: Prof. Binsar Hariandja, Prof. Amrinsyah Nasution, Prof. Widiadnyana Merati, Prof. Adang Surahman, Prof. Bambang Budiono, Prof. Iswandi Imran, dan Prof. Herlien sebagai ketua KK yang dengan sabar mengurus urusan penilaian. Khususnya bagi Prof. Binsar, Prof. Amrinsyah, Prof. Widi, dan Prof. Adang saya sampaikan terima kasih atas rekomendasi yang telah diberikan. Terima kasih juga kepada seluruh anggota lainnya yang selalu memberikan dukungannya dan semangatnya. Saya sampaikan terima kasih ibu Sofi yang telah mengurus berbagai keperluan administrasi, dan pak Asep yang telah memasukan bahan-bahan dalam borang yang disiapkan.

Terima kasih saya sampaikan kepada Prof. Masyhur Irsyam yang selalu memberikan dukungannya, memberikan berbagai info tentang keguru besaran, Prof. Lambok Hutasoit yang memberikan rekomendasinya, dan Prof. Wayan Sengara sebagai mitra meneliti bangunan tahan gempa.

Implementasi *Performance Based Design dan Risk Based Design*, tidak terlepas dari kepercayaan yang diberikan PT Putragaya Wahana sebagai

pemilik proyek Thamrin Nine untuk mau mendanai analisis di atas. Teori apapun yang bagus tanpa ada pihak yang percaya dan mau mendanai hanya bagus di atas kertas saja. Saya ingin menyampaikan terima kasih kepada mas Alvin, mas Onel, pak Nico atas kepercayaan dan kerja sama yang begitu baik selama ini. Thanks a lot guys.

Terima kasih yang sebesar besarnya saya sampaikan kepada semua sahabat, teman, kolega, dari berbagai instansi dan kelompok yang telah datang meluangkan waktu di hari Sabtu yang biasanya adalah hari keluarga, antara lain segenab gang PR 3 ITB periode 1989 – 1997, jajaran Lembaga Penelitian ITB tahun 1988, Jajaran Komisaris dan Direksi PT BBE, sahabat-sahabat dari Yayasan KORPRI, teman-teman dari Yayasan STIPAN, kawan-kawan saya dari Politeknik Gajah Tunggal, teman-teman kolega semasa Pembantu Rektor Bidang Kemahasiswaan dari berbagai perguruan tinggi periode 1989-1997, kawan-kawan alumni Sipil ITB 1972, teman-teman saya alumni SMA N I Budi Utomo kelas PP5, para mantan atlet-atletik Gabungan Atletik Bandung, teman-teman pengurus KORPRI ketika pak Feisal Tamin menjadi ketua umumnya, dan teman-teman saya “the good guys” dari Ditjen Dikdasmen 1998 – 2005, Depdiknas, terima kasih atas persahabatan yang selalu terjalin dari dulu hingga sekarang, semoga silaturahmi kita selalu terjaga. Aamiin.

Saya ingin juga ingin menyampaikan terima kasih dan apresiasi kepada Prof. Alfredo H-S Ang dari University of California, Irvine, beliau adalah “*my tough professor*” sewaktu saya belajar keandalan di University of Illinois, Champaign Urbana, USA, atas dukungan yang telah diberikan.

Terimakasih juga saya sampaikan kepada Prof. Ser Tong Quek dari National University of Singapore dan Prof. Sang Hyo Kim dari Yonsei University, Seoul, Korea, dua teman ketika menempuh studi di University of Illinois, atas dukungan dan rekomendasi yang telah diberikan. *Thanks guys.*

Terima kasih saya sampaikan kepada seluruh mahasiswa, dan para alumni S1, S2, dan S3 yang telah saya bimbing yang telah menjadi inspirasi bagi penelitian dan pengembangan KK Struktur, Prodi Teknik Sipil, FTSL ITB.

Pada kesempatan ini saya ingin menyampaikan doa, syukur, dan terima kasih kepada almarhum ayahanda Sidi Bakaroedin, dan ibunda Darwani yang hadir di Aula Barat ITB yang telah membesarkan kami dengan kasih sayang walaupun dalam suasana yang berat ketika saya mulai kuliah di ITB pada tahun 1972. Pelajaran disiplin, kerja keras, dan pantang menyerah banyak kami belajar dari ipapa dan mama, semoga amal ibadah, kasih sayang papa dan mama akan mendapat balasan yang setimpal dari Allah Azza wa Jalla. Aamiin. Saya juga menyampaikan doa, syukur, terima kasih kepada almarhum mertua saya Komodor A. Andoko bin Dargo dan almarhumah Aminetti binti Rubini yang selalu memberikan dukungan dan teman diskusi dalam berbagai masalah bangsa. Saya selalu teringat almarhumah yang dikala hari raya selalu memasak masakan kesukaan: sup buntut (untuk saya sendiri) ...semoga mereka mendapat tempat yang mulia di alam baka. Aamiin

Dan yang terakhir saya ingin menyampaikan doa, syukur, terima

kasih kepada istri tercinta Pretty dan anak-anakku yang saya sayangi Diko, Linda, Gatra, dan Listya yang selalu menjadi inspirasi dan motivasi untuk selalu berbuat yang terbaik. Istri yang selalu mendampingi dalam suasana apapun dan menjadi teman diskusi yang setia dengan masukannya yang kadang-kadang out of box. Kehadiran cucunda Zia membuat badan yang lelah ketika bekerja menjadi segar kembali. Terima kasih ya Allah.

9. REFERENSI

1. **"Peta Sumber Gempa dan Bahaya Gempa Indonesia 2017"**, Tim Pusat Studi Gempa Nasional, Pusat Litbang Perumahan dan Pemukiman, Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan rakyat, September 2017.
2. **"Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung"**, SNI 1726:2012, Badan Standardisasi Nasional 2012.
3. Budiono, B., **"Struktur Bangunan Tahan Gempa"**, Orasi Ilmiah dalam Rangka Dies ITB, 2017.
4. ASCE/SEI 7-16, **"Minimum design Loads and Associated Criteria for Buildings and other Structures"**, ASCE 2017.
5. Nilson, A. H., Darwin, D., and Dolan, C. W., **"Design of Concrete Structures"**, McGraw Hill, 13th Edition, 2004.
6. Junisa Arini Patrisia, Bambang Budiono, Indra Djati Sidi, "

Reliabilitas Struktur Gedung T9-Tower 1 Terhadap Beban Gempa MCER Dengan *Incremental Dynamic Analysis*", Sdeminar HAKI 2017.

7. Robin K. Mc Guire, **"Seismic Hazard and Risk Analysis"**, Earthquake Engineering Research Institute, 2004.
8. Esteva and Rosenbleuth, **"Espectros de Temblores a Distancias Moderadas y Grandes"**, Boletin Sociedad Mexicana de Ingenieria Sismica, 2:1 18, 1964. (in Spanish).
9. Mahani, A.B. and Kao, H., **"Ground Motion from m 1.5 to 3.8 Induced Earthquakes at Hypocentral distance < 45 km in the Montrey Play of North East British Columbia"**, Canada, Seismological Research Letters, 89 (18): 22-34, January 2018.
10. Boore, D. M. and Atkinson, G.M., **"Boore-Atkinson NGA Ground Motion Relations for the Geometric Mean Horizontal Component of Peak and Spectral Ground Motion Parameters"**, PEERC Report 2007/1, University of Berkeley, May 2007.
11. Arango et. al., **"Comparing Predicted and Observed Ground Motions from UK Earthquakes"**, 15 WCEE, Lisboa, 2012.
12. Boore, D.M., **"Ground Motion Prediction Equations (GMPEs) from a Global Dataset: The PEER NGA Equation"**, USGS
13. Newmark, N.M. and Rosenblueth, E., **"Fundamentals of Earthquake Engineering"**, Prentice Hall 1971.
14. Sidi, I.D., Putri, I.R.P., Rivani, D.A.F., Patrisia, J.A., and Hapsari, W.

- (2016), "**Probabilistic Modeling of Seismic Risk Based Design for Super Tall Building with Outrigger and Belt Truss in Jakarta**", 5th International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management", August 17–20, 2016, Seoul, Korea.
15. Indra Djati Sidi, Widiadnyana Merati, I Wayan Sengara, M. Rilly A. Yogi (212), "**Development of Seismic Risk Based Design for Buildings in Indonesia**", 1st International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials (SCESCM) Enhancing the Role of Civil Engineering in Indonesia 11-13 Sept 2012.
 16. Indra Djati Sidi, "**Development of Seismic Risk Based Design for Super Tall Buildings in Indonesia**", The Latest Development in Civil Engineering, A book/monograph to honor the 80th Birthday of Prof.Dr. Ir. Wiratman Wangsadinata, Februari 2015, ISBN: 978-602-72044-0-9.
 17. Alfredo H-S. Ang and Wilson Tang, "**Probability Concepts in Engineering Planning and Design**", Volume II Decision, Risk, and Reliability, John Wiley, 1990.
 18. Bambang Budiono, Wiratman Wangsadinata, Indra Djati Sidi, "**Desain Berbasis Kinerja (Performance Based Design) Untuk Struktur Gedung Super Tinggi Thamrin 9 Tower 1 Dengan Sistem Outrigger & Belt-truss**", Seminar HAKI 2017.
 19. "**2015 NEHRP recommended Seismic Provision: Design Examples**", FEMAP-1051 / July 2016.
 20. Putri, I.R.P., "**Reliability of 60 Storey Building with Single Outrigger and Belt Truss Subjected to Earthquake Load**", (in Indonesian). *Final Project at Department of Civil Engineering, Institut Teknologi Bandung, 2015.*
 21. Hapsari, W., "**Design of 80 Storey Building with Reinforced Concrete Outrigger and Steel Belt Truss Subjected to Earthquake in Jakarta**", (in Indonesian). *Final Project at Department of Civil Engineering, Institut Teknologi Bandung, 2016.*
 22. Patrisia, J.A., "**Reliability of 60 Storey Building with Multi Outrigger and Belt Truss Subjected to Earthquake Load**" (in Indonesian). *Final Project at Department of Civil Engineering, Institut Teknologi Bandung, 2015.*

CURRICULUM VITAE



1. UMUM

Nama : **INDRA DJATI SIDI**

Tmpt. & tgl. lhr. : Amsterdam, 5 Juni 1953

Agama : Islam

Jabatan saat ini : Dosen pada Prodi Teknik Sipil,
FTSL, Institut Teknologi
Bandung

NIP : 195306051977101001

Pangkat : Guru besar dalam ilmu Rekayasa Struktur,
Keandalan dan Keamanan

Golongan : IV/d

Isteri : Dwi Ratna Pertiwi (Pretty)

Agama : Islam

Pendidikan : Bachelor of Fine Art, Maryland College of Art,
Baltimore, Maryland, U.S.A.

Pekerjaan : Ibu Rumah Tangga

Anak : 1. Sidi Sidik Permana (Diko), 32 tahun
: 2. Linda Wulandari (Menantu)
: 3. Sidi Janardhana Gatra Parahita (Gatra), 25 tahun
: 4. Listya Gharini Saraswati, 21 tahun

Cucu : 1. Ziareva Aqila Ganes, 1 tahun 3 bulan

Alamat : **Kantor**
Gedung f CIBE, Lantai 4,
Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan
Lingkungan, Institut Teknologi Bandung,
Jalan Ganesha 10, Bandung, Indonesia
Phone: (022) 250 - 4556; Fax: (022) 251 - 0713

Rumah

- Jalan Taman Sidoluhur No. 15, Bandung 40123
Phone: (022) 251 – 7115
- Taman Flamboyan II/ C3-1, Jakarta Barat 11650
Phone (021) – 586 – 7864

2. PENDIDIKAN, PELATIHAN, DAN KEGIATAN EKSTRAKURIKULER

2.1. Pendidikan dan Pelatihan/ Kursus.

- Doctor of Philosophy, Ph.D., 1986, Department of Civil Engineering, University of Illinois di Urbana - Champaign, Illinois, U.S.A.
- Master of Science, M.Sc., 1981, Department of Civil Engineering, University of Illinois di Urbana - Champaign, Illinois, U.S.A.
- Sarjana Teknik, Ir., 1976, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Bandung, Indonesia.
- Penataran Penghayatan dan Pengamalan Pancasila (P4) Type A, tahun 1986.
- Orientasi Pengembangan Pembina Kemahasiswaan, tahun 1988.
- Penataran Kesadaran Bela Negara dan Peningkatan Kemampuan Pertahanan Sipil, tahun 1990.
- Penataran Calon Penatar P4 Tingkat Nasional / Manggala, tahun 1995.
- Kursus Singkat Angkatan VII, Lemhannas tahun 1998, 18 minggu, di Jakarta.

3. PENGALAMAN KERJA

3.1. Pendidikan/Pengajaran

- Ketua Yayasan Pendidikan Bina Dharma Nurharapan Indonesia, yang mengoperasikan Politeknik Gajah Tunggal di Tangerang, sejak 13 Mei 2014.
- Ketua Yayasan Pendidikan Abdi Negara Nusantara, yang mengoperasikan Sekolah Tinggi Ilmu Pemerintahan Abdinegara Nusantara di Jakarta, 2009 sd sekarang.
- Ketua Dewan Pembina Ikatan Guru Indonesia, 2008 – Direktur Jenderal Pendidikan Dasar dan Menengah, Depdiknas, 1998 – 2005.
- Pembantu Rektor Bidang Kemahasiswaan Institut Teknologi Bandung, 1989 – 1997.
- Ketua Lembaga Penelitian Institut Teknologi Bandung, 1988 – 1989.
- Asisten peneliti pada Departemen Teknik Sipil University of Illinois, Illinois, U.S.A dalam bidang Analisis Risiko dan Keandalan, 1985 – 1986.
- Dosen di Jurusan Teknik Sipil Institut Teknologi Bandung dalam bidang ilmu-ilmu struktur, 1976 – sekarang.

3.2. Persiapan dan Pembangunan Infrastruktur di ITB

- Koordinator Teknis Pembangunan dan Pengembangan Kampus ITB yang berkaitan dengan proyek OECF dan DIP, melakukan koordinasi dengan Depdikbud, Ditjen Anggaran, dan Bappenas, 1991 – 1997.
- Koordinator Pembebasan tanah di Lebak Siliwangi, 1991 – 1992.

- Relokasi Kebun Binatang Bandung dan Pembangunan Kebun Binatang Jatinangor, sebagai Wakil Ketua III Tim Gabungan, SK Gubernur (draft), 1991 – 1997.
- Koordinator Pelaksana Tim Khusus “Pinjaman OECF”, 1992.
- Ketua Tim Persiapan Pembangunan ITB melalui Dana Pinjaman OECF Stage I (negosiasi untuk memperoleh bantuan pinjaman OECF I). SK Rektor tahun 1992, 1992 – 1994.
- Ketua Tim Khusus Pinjaman OECF Stage II, SK Rektor tahun 1994, 1994 – 1995.
- Penasehat Komisi Pertimbangan OECF II, SK Rektor tahun 1993, 1993 – 1997.
- Ketua Tim Persiapan Pembangunan ITB dengan Dana Pinjaman Pemerintah Indonesia melalui JICA, 2008 – 2009.
- Ketua Tim Penyusun Masterplan Fisik Pengembangan ITB, 2008 – 2012.

3.3. Pengembangan Unit Usaha ITB

- Direktur Utama PT. LAPI Ganeshatama Consulting, bergerak dalam konsultansi infrastruktur, 1992 – 1997.
- Direktur Utama PT. LAPI Elpatsindo, perlindungan terhadap bahaya petir, 1993 – 1994.
- Komisaris PT. LAPI Elpatsindo, 1995 – 1997.
- Kepala Tim Penelitian dan Perancangan Intellegent Building System (IBS) PT. TELKOM, 1992 – 1993.
- Ketua Gugus Tugas Kerjasama antara ITB dan PT. Danayasa Arthatama, 1992 – 1997.
- Penanggung Jawab Satuan Tugas Perencanaan dan Perancangan Kantor Pusat PT. Satelindo, Daan Mogot, Kerjasama ITB dan PT.

Satelindo, 1995 – 1997.

- Penasehat Yayasan Widya Ganesa Mandiri, yayasan yg dimiliki ITB, 1995 – 1997.

3.4. Kemahasiswaan

- Dosen Pembina Unit Aktifitas Atletik dan Judo ITB, 1988 - 1997.
- Dosen Pembina Unit Aktifitas Judo ITB, 1989 - 1997.
- Ketua Harian Majelis Pembina Pramuka Gudup 06005 - 06006 ITB, 1994 - 1997.
- Anggota Asia Pacific Student Services Associates (APSSA), 1992 – 1998.

3.5. Keolahragaan

- Ketua Umum Persatuan Atletik Indonesia, Kotamadya Bandung, 1987 – 1995.
- Ketua Komisi Atletik Badan Pengembangan Olah Raga Mahasiswa Indonesia (BAPOMI) Propinsi Jawa Barat, 1987 - 1995. Ketua Bidang Dana dan Sarana KONI Kotamadya Bandung, 1989 - 1994.
- Ketua Bidang Organisasi PASI Propinsi Jawa Barat, 1990 - 1995.
- Ketua III Badan Pengembangan Olahraga Mahasiswa (BAPOMI) Propinsi Jawa Barat, 1990 – 1995.
- Ketua Bidang Penelitian dan Pengembangan Pengurus Besar Persatuan Judo Seluruh Indonesia (PB PJSI), 1991 - 1995.
- Ketua I Persatuan Bola Basket Seluruh Indonesia (PERBASI) Propinsi Jawa Barat, SK PB Perbasi No. 027/PB/1992, tanggal 20 November 1992, 1992 - 1996.

- Anggota Dewan Penasehat KONI DT. I Propinsi Jabar, SK KONI Pusat No. 042 tahun 1993, 1993 - 1997.
- Anggota Bidang Pengembangan PB GABSI, keputusan Ketua PB GABSI, tanggal 1 Agustus 1994, 1994 – 1998.
- Ketua Bidang Penelitian dan Pengembangan KONI Pusat, SK formatur KONI Pusat No. 001/Formatur/KONI/1995, tanggal 22 Februari 1995, 1995 – 1998.
- Wakil Ketua Umum II KONI Pusat, 1998 – 2003.

3.6. Kemasyarakatan

- Ketua Ikatan Alumni ITB Pusat, 1992 - 1996
- Anggota Tim Penasehat Konstruksi Bangunan DKI Jakarta, berdasarkan SK Gubernur DKI Jaya No. 493 tahun 1994, 13 April 1994, Periode 1994 – 1998.
- Anggota Tim Penasehat Konstruksi Bangunan DKI Jakarta, berdasarkan SK Gubernur DKI Jaya, Periode 2010 – 2013.
- Anggota Tim Penasehat Konstruksi Bangunan DKI Jakarta, berdasarkan SK Gubernur DKI Jaya Nomor 728 tahun 2014, Periode 2014 – 2017.
- Ketua Dewan Penyantun Yayasan Pendawa Padma, bergerak dalam bidang seni olah nafas, 1994 – sekarang.
- Ketua II KORPRI Pusat, 1999 - 2004.
- Ketua Koalisi Masyarakat untuk Pengawasan Pemerintahan yang Baik dan Bersih (Komwas PBB), sebuah LSM yg bergerak dalam advokasi pemerintahan yang baik dsan bersih, 2007 – 2012.
- Anggota Pembina Yayasan KORPRI, 2000 – sekarang.
- Ketua Majelis Pendidikan Nasional KOSGORO,

3.7. Kegiatan Organisasi selama di USA

- Anggota Moslem Student Association of North America (MSA).
- Wakil Ketua Perkumpulan Judo University of Illinois di Urbana - Champaign, Illinois.
- Sekretaris Umum Keluarga Masyarakat Indonesia, Urbana - Champaign, Illinois.

3.8. Kegiatan Penyusunan Peraturan Perencanaan dalam Teknik Struktur

- Anggota tim penyusun Peraturan Beton Indonesia 1989, 1987 – 1989. Menyusun load and resistance factor design atas target risiko yang ditetapkan.
- Anggota tim penyusun “Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung” - SNI 1726 2012, menentukan standar deviasi dari fungsi fragilitas bangunan gedung yang akan menentukan gaya gempa rencana, tahun 2011.
- Anggota tim penyusun penyempurnaan “Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung” - SNI 1726 – 2012, menentukan fungsi fragilitas bangunan gedung, tahun 2017.

4. KEANGGOTAAN ORGANISASI PROFESI

- International Association for Structural Safety and Reliability (IASSR).
- International Association for Civil Engineering Reliability and Risk Analysis (IACRR).
- Persatuan Insinyur Indonesia (PII).

- Himpunan Ahli Konstruksi Indonesia (HAKI).
- Ikatan Ahli Teknik Otomotif (IATO), dan
- Phi Kappa Phi, perkumpulan outstanding student di Illinois, USA 1981-1986.

5. PENGHARGAAN

- Dosen Beprestasi Tingkat Fakultas 2012, FTSL, Bidang Pengabdian pada Masyarakat, Institut Teknologi Bandung, SK Rektor Nomor: 175/SK/I1.A/KP/2012, tertanggal 26 Juli 2012.
- Award for Excellence, the World Bank, outstanding achievements in support of The National Scholarships and Grants Program, August 2000.
- Bintang Jasa Utama dari Presiden Republik Indonesia, 1998.
- Penghargaan Berprestasi Tinggi, Kursus Singkat Angkatan ke VII Lemhannas, 6 Nopember 1998.
- Satya Lencana Karya Satya X tahun dari Presiden Republik Indonesia, 24 Juli 1996.
- Dosen Teladan 1987, Sumono Prize, dipilih oleh Himpunan Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil (HMS) Institut Teknologi Bandung.

6. PUBLIKASI 10 TAHUN TERAKHIR

- **Sidi, I.D.**, *Probabilistic Modelling of Updating Pile Capacity Prediction for Offshore Structure using Proof Loads and Survived Piles*, Fifth Asian Pacific Symposium on Structural Reliability and its Application, Proceedings, 23-25 May 2012, Singapore.
- Yudhi Lastiasih, **Sidi, I.D.**, Masyhur Irsyam, and F.X. Toha,

Reliability Evaluation of Axial Bored Pile Bearing Capacity in City of Jakarta, Fifth Asian Pacific Symposium on Structural Reliability and its Application, Proceedings, 23-25 May 2012, Singapore.

- **Indra Djati Sidi**, Widiadnyana Merati, I Wayan Sengara, and M. Rilly A. Yogi, *Development of Seismic Risk Based Design for Buildings in Indonesia*, 1st International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials, Proceedings, 11-13 September, Yogyakarta.
- I Wayan Sengara, Masyhur Irsyam, Widiadnyana Merati, **Indra Djati Sidi**, Made Suardjana, *Development MCER (Risk Targeted Maximum Considered Earthquake) Through Investigation of Hazard and Fragility Curve*, Final Report, Program Hibah Penelitian RGR2-2.3.1 Conducting Core research, August 2012.
- I Wayan Sengara, Masyhur Irsyam, **Indra Djati Sidi**, Widiadnyana Merati, Khrisna S. Pribadi, Made Suardjana, Mark Edwards, *Some Recent Efforts in Earthquake Hazard and Risk Analyses for Disaster Risk Reduction in Indonesia*, The Second International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation (ICEEDM-2): "Seismic Disaster Risk Reduction and Damage Mitigation for Advancing Earthquake Safety of Structures," Surabaya, Indonesia, 19-20 July 2011.
- R.K. Wattimena, S. Kramadibrata, **I.D. Sidi**, M.A. Azizi, *Developing coal pillar stability chart using logistic regression*, International Journal of Rock Mechanics, Elsevier, 58 (2013) 55-60.
- M.A. Azizi, S. Kramadibrata, R.K. Wattimena, and **I.D. Sidi**, *Characterization of Physical & Mechanical Properties Distribution of Indonesian Coal (for Poster)*, The ISRM International Symposium EUROCK 2013, 21-26 September 2013, Wroclaw, Poland.

- Yudhi Lastiasi and **Indra Djati Sidi**, *Reliability of Estimation Pile Load Capacity Methods*, Journal of Engineering Technological Sciences, Vol. 46, No. 1, 2014, page 1-16.
- **Sidi, Indra Djati**, *Development of Seismic Risk Based Design for Super Tall Buildings in Indonesia*, monograf The Latest Development in Civil Engineering, dalam rangka Ulang Tahun ke 80 Prof. Wiratman Wangsadinata, 2015.
- **Sidi, I.D**¹, Putri, I.R.P.², Rivani, D.A.F.³, Patrisia, J.A.⁴, and Hapsari, W.⁵, *Probabilistic Modeling of Seismic Risk Based Design for Super Tall Building with Outrigger and Belt Truss in Jakarta*, 5th International Symposium on Rekiability Engineering and Risk Management, August 17-20, 2016, Seoul.
- **Sidi, I. D.**, *Spatial Probabilistic Model of Block Failure Capacity of Piles in Clay*, Journal of Civil Engineering and Architecture, December, 2016.
- **Sidi, I. D.**, *Probability Modeling of Seismic Risk Based Design for a Dual System Structure*, Journal of Engineering and Technological Sciences, ITB, 2017.

