

BAB II

STUDI LITERATUR

2.1 Fenomena gempa

Gempa bumi adalah suatu gejala fisik yang ditandai dengan bergetarnya bumi dengan berbagai intensitas. Getaran gempa dapat disebabkan oleh banyak hal antara lain akibat peristiwa vulkanik, yaitu gerakan tanah yang disebabkan oleh aktivitas desakan magma ke permukaan bumi, atau akibat meletusnya gunung berapi. Gempa yang terjadi akibat aktivitas vulkanik ini disebut dengan gempa vulkanik. Gempa vulkanik terjadi di daerah sekitar aktivitas gunung berapi dan akan menyebabkan mekanisme patahan yang sama dengan gempa tektonik.

Getaran gempa juga dapat diakibatkan oleh peristiwa tektonik yaitu getaran tanah yang disebabkan oleh gerakan atau benturan antara lempeng-lempeng tektonik yang terdapat di dalam lapisan permukaan bumi. Gempa yang terjadi akibat aktivitas tektonik disebut juga gempa tektonik.

Selain gempa vulkanik dan gempa tektonik terdapat juga gempa runtuh, gempa imbasan dan gempa buatan. Gempa runtuh diakibatkan oleh runtuhnya tanah di daerah pegunungan sehingga akan terjadi getaran di sekitar runtuh tersebut. Gempa imbasan biasanya terjadi di sekitar dam karena fluktuasi air dam sedangkan gempa buatan adalah gempa yang sengaja dibuat oleh manusia seperti ledakan nuklir atau ledakan untuk mencari bahan mineral. Skala gempa tektonik jauh lebih besar dibandingkan dengan jenis gempa lainnya sehingga efeknya lebih banyak terhadap struktur bangunan.

Di bumi ini terdapat 3 jalur gempa, dimana 2 diantaranya bertemu di Indonesia. Ketiga jalur gempa itu adalah:

1. *Circum Pacific Earthquake Belt* atau *Great Earthquake Belt*: Cordilleras de los Andes (Chili, Equador, Loop ke Caribia) – Amerika Tengah – Meksiko – California - British Colombia – Alaska – Aleutian Islands –

Kamchatka – Jepang – Taiwan – Philipina – Indonesia (Sulawesi Utara, Irian) – Melanesia – New Zaeland.

Menurut para ahli, jalur melanesia – Polynesia – New Zaeland termasuk dalam suatu jalur tersendiri yang disebut jalur Indo-Australia.

2. *Alpide Earthquake Belt* atau *Trans-Asiatic Earthquake Belt*: Azores – Mediterania & Alpine structures (Morocco, Portugal, Italy, Balkan, Rumania) – Asia kecil (Turki) – Caucasus – Iraq – Iran – Afghanistan – Himalaya (Hindu Kush) – Burma – Indonesia (bukit barisan, lepas pantai selatan pulau Jawa, Sunda kecil, Maluku)
3. *Mid-Atlantic Oceanic Earthquake Belt*: mengikuti mid-Atlantic Ridge (Spitzbergen, Iceland, Atlantic Selatan)

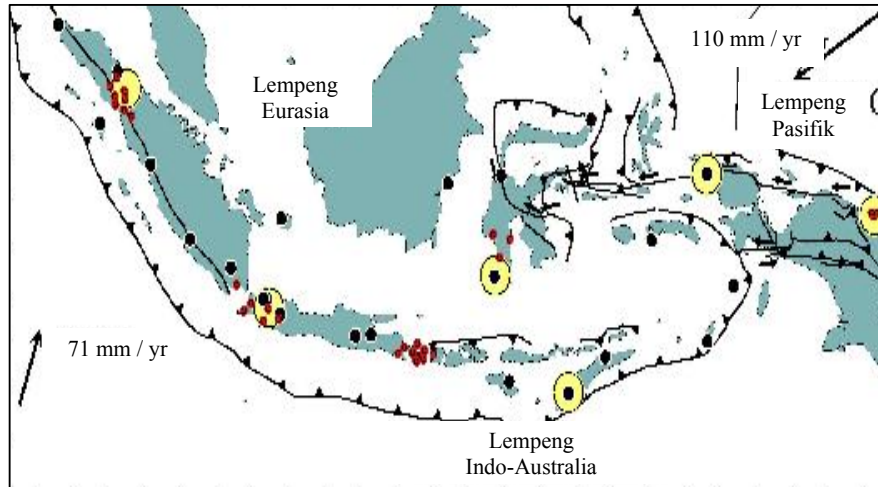
Dengan demikian lokasi gempa cenderung terkonsentrasi pada tempat-tempat tertentu saja, seperti pada batas pelat tektonik Pasifik. Tempat ini dikenal dengan nama lingkaran api (*Ring of Fire*) karena banyaknya gunung berapi dan aktivitas geologi di daerah ini.



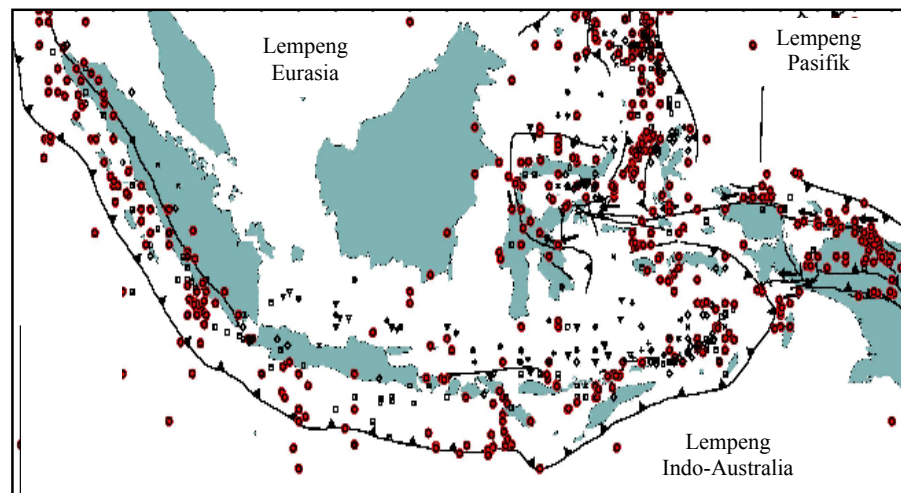
Gambar 2.1 *Ring of Fire*

Dari jalur gempa diatas terlihat bahwa kepulauan Indonesia menjadi tempat pertemuan 2 jalur gempa, yaitu : *Circum Pacific Earthquake Belt* atau *Great Earthquake Belt* dan *Alpide Earthquake Belt* atau *Trans-Asiatic*

Earthquake Belt. Dengan demikian kepulauan Indonesia merupakan daerah yang memiliki faktor kegempaan yang penting.



Gambar 2.2 Lingkungan tektonik Indonesia terdiri dari tiga lempeng tektonik; Indo-Australia, Pasifik dan Eurasia yang bergerak relatif terhadap lainnya (lihat arah panah). Batas lempeng tektonik merupakan daerah konsentrasi aktifitas gempa bumi yang diplot sebagai garis hitam dan segi tiga. Garis tebal merupakan sesar aktif, sedangkan lingkaran adalah stasiun seismograf (Sumber : Badan Metereologi dan Geofisika).



Gambar 2.3 Distribusi lokasi gempa bumi besar yang pernah terjadi tahun 1900 s/d 1996 dengan magnitude $M > 6$ pada Skala Richter (Sumber : Badan Metereologi dan Geofisika).

2.2 Pengukuran Gempa

Ada dua cara yang biasa dipakai sebagai ukuran kekuatan gempa, yaitu *magnitude* dan *local intensity*. *Magnitude* adalah suatu ukuran dari besarnya energi yang dilepaskan oleh *hypocenter* atau pusat gempa.

Sebelum ditemukannya alat-alat pencatat getaran gempa, satu-satunya cara untuk mengukur besarnya gempa adalah dengan jalan pengamatan langsung oleh manusia. Untuk memudahkan pengamatan tersebut, dibuatlah daftar-daftar yang mengklasifikasikan besarnya gempa, berdasarkan derajat kerusakan yang ditimbulkan oleh gempa terhadap bangunan-bangunan. Skala daftar derajat kerusakan ini dinyatakan dalam angka Romawi (I, II, III,). Skala ini pada umumnya digunakan untuk pengamatan oleh orang-orang yang sudah berpengalaman untuk memperkirakan tingkat intensitas suatu gempa.

Derajat kerusakan akibat gempa yang sama dengan ukuran yang terdapat dalam daftar yang dipakai untuk menyatakan intensitas suatu gempa. Intensitas yang dilaporkan untuk suatu gempa adalah intensitas maksimum yang disebabkan oleh aktivitas gempa pada suatu lokasi. Intensitas ini sering juga disebut sebagai intensitas lokal. Intensitas lokal berhubungan langsung dengan percepatan tanah maksimum yang terjadi akibat gempa. Dengan demikian intensitas lokal gempa akan berhubungan pula dengan besar kecilnya kerusakan yang terjadi pada bangunan-bangunan disuatu lokasi.

Daftar skala intensitas, pertama kali dikembangkan oleh Rossi dari Italia dan Forrel dari Swiss. Skala ini, merujuk pada nilai I sampai X, yang untuk pertama kalinya digunakan untuk melaporkan gempa San Fransisco yang terjadi pada tahun 1906. Pada tahun 1902 seorang seismolog dan vulkanolog dari Italia bernama Giuseppe Mercalli mengusulkan skala intensitas dari I sampai dengan XII. Pada tahun 1931, Harry O. Wood dan Frank Neumann memodifikasi skala Mercalli ini, dan disebut skala *Modified Mercalli Intensity (MMI Scale)* untuk mengukur intensitas gempa yang terjadi di California, Amerika.

Skala MMI mempunyai 12 tingkatan intensitas gempa (I s/d XII). Setiap tingkatan intensitas didefinisikan berdasarkan pengaruh gempa yang didapat

dari pengamatan, seperti guncangan tanah, dan kerusakan dari struktur bangunan seperti gedung, jalan, dan jembatan. Tingkat intensitas I sampai VI, digunakan untuk mendeskripsikan apa yang dilihat dan dirasakan orang selama terjadinya gempa ringan dan gempa sedang. Sedangkan tingkat intensitas VII sampai dengan XII digunakan untuk mendeskripsikan kerusakan pada struktur bangunan selama terjadinya gempa kuat.

Tabel 2.1 Skala intensitas Modified Mercalli (MMI)

Skala Intensitas	Keterangan
I	Tidak terasa orang, hanya tercatat oleh alat pencatat yang peka
II	Getaran terasa oleh orang yang sedang istirahat, terutama orang yang berada di lantai dan di atasnya
III	Benda-benda yang tergantung bergoyang, bergetar ringan
IV	Getaran seperti truk lewat. Jendela, pintu dan barang pecah belah bergemerincing
V	Getaran terasa oleh orang di luar gedung. Orang tidur terbangun. Benda-benda tidak stabil di atas meja terguling atau jatuh. Pintu bergerak menutup dan membuka.
VI	Getaran terasa oleh semua orang. Banyak orang takut dan keluar rumah. Berjalan kaki sulit. Kaca jendela pecah. Meja dan kursi bergerak.
VII	Sulit berdiri. Getaran terasa oleh pengendara motor dan mobil. Genteng di atap terlepas.
VIII	Pengemudi mobil terganggu. Tembok bangunan retak.
IX	Semua orang panik. Tembok bangunan mengalami kerusakan berat. Pipa-pipa dalam tanah putus.
X	Sebagian konstruksi portal dan temboknya rusak beserta pondasinya. Tanggul dan bendungan rusak berat. Rel kereta api bengkok sedikit. Banyak terjadi tanah longsor.
XI	Rel kereta api rusak berat. Pipa-pipa di dalam tanah rusak
XII	Terjadi kerusakan total. Bangunan-bangunan mengalami kerusakan. Barang-barang terlempar ke udara.

Dari penjelasan mengenai tingkat kerusakan bangunan yang dapat terjadi akibat gempa, terlihat bahwa penentuan dari nilai Skala Mercalli sangat bersifat *subjektif* karena beberapa hal sebagai berikut :

1. Tergantung pada jarak *epicenter* sampai tempat yang dimaksud.
2. Keadaan geologi setempat
3. Kualitas dari bangunan-bangunan setempat di lokasi terjadinya gempa.
4. Pengamatan manusia sangat dipengaruhi oleh keadaan panik akibat kekacauan yang biasanya terjadi pada saat gempa.

Salah satu skala yang paling sering digunakan untuk mengukur kekuatan atau besarnya gempa adalah Skala Richter (*Richter Magnitude Scale*), atau disebut *Local Magnitude* (M_L). Skala ini dibuat oleh DR. Charles F. Richter dari California Institute of Technology pada 1934. Skala Richter didasarkan pada skala logaritma dan ditulis dalam angka Arab (1, 2, 3,).

Magnitude gempa dinyatakan dengan huruf M dan didefinisikan sebagai logaritma dari amplitude maksimum dalam mikron, tercatat pada jarak 100 km dari epicenter dengan seismometer standar Wood-Anderson dengan periode bebas 0,8 detik, pembesaran 2800 kali dan dengan faktor peredaman 0,8.

Hubungan antara *magnitude* M dengan jumlah energi (*strain energy*) yang dilepaskan dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\log E = 11,4 + 1,5M \quad (\text{erg atau dyne} - \text{cm})$$

Dari rumus diatas terlihat, bahwa peningkatan dalam satuan M berarti peningkatan dalam energi sebanyak $10^{1,5}$. Jadi, suatu gempa dengan *magnitude* $M = 7$ melepaskan 32 kali lebih banyak energi daripada gempa dengan *magnitude* $M = 6$ dan 1000 kali lebih banyak energi daripada gempa dengan *magnitude* $M = 5$.

Magnitude gempa dapat mencerminkan kondisi sesungguhnya dari besarnya gempa. *Magnitude* tidak memberikan gambaran mengenai derajat kerusakan yang disebabkan oleh gempa. Perlu dicatat, bahwa suatu gempa dengan

magnitude besar yang terjadi di tengah samudera, mungkin tidak akan mengakibatkan kerusakan pada bangunan, bahkan getarannya pun mungkin tidak akan dirasakan oleh manusia yang berada di darat. Sebaliknya suatu gempa dengan *magnitude* rendah tetapi mempunyai pusat gempa yang dekat pada suatu kota yang padat penduduk serta penuh dengan bangunan-bangunan, mungkin akan menyebabkan banyak kerusakan.

Tabel 2.2 Magnitude dan kelas kekuatan gempa

<i>Magnitude</i> Gempa	Kelas Kekuatan Gempa	Pengaruh gempa	Perkiraan kejadian pertahun
< 2,5	Minor earthquake	Pada umumnya tidak dirasakan, tetapi dapat direkam oleh seismograf.	900,000
2,5 s.d 4,9	Light earthquake	Selalu dapat dirasakan, tetapi hanya menyebabkan kerusakan kecil.	30,000
5,0 s.d 5,9	Moderate earthquake.	Menyebabkan kerusakan pada bangunan dan struktur-struktur yang lain.	500
6,0 s.d 6,9	Strong earthquake	Kemungkinan dapat menyebabkan kerusakan besar, pada daerah dengan populasi tinggi.	100
7,0 s.d 7,9	Major earthquake	Menimbulkan kerusakan yang serius.	20
≥ 8.0	Great earthquake	Dapat menghancurleburkan daerah yang dekat dengan pusat gempa.	satu setiap 5-10 tahun

Ukuran kebesaran gempa seperti dinyatakan oleh skala Richter hanya berguna bagi para ahli seismologi, tetapi tidak langsung menyangkut kepentingan para Insinyur yang ingin mengetahui sifat-sifat gempa yang langsung mempengaruhi konstruksi. Yang langsung mempengaruhi konstruksi adalah intensitas lokal dari gempa, yaitu besar kecilnya getaran permukaan di tempat konstruksi. Tempat konstruksi ini dapat berada ratusan kilometer dari *epicenter* gempa yang besar, tetapi dapat juga sangat berdekatan dengan *epicenter* gempa yang ringan, yang kedua-duanya dapat memberikan pengaruh yang sama terhadap konstruksi tersebut. Secara kuantitatif intensitas gempa setempat dinyatakan dengan percepatan permukaan (*ground surface*

acceleration) dengan satuan gal (cm/det²). Untuk memudahkan penyebutan telah diadakan skala-skala intensitas berdasarkan pengamatan manusia terhadap kerusakan-kerusakan pada bangunan. Skala-skala demikian sebenarnya telah ada sejak sebelum adanya alat-alat pencatat gempa.

Untuk menunjukkan lebih pentingnya intensitas gempa dari pada *magnitude*-nya bagi para rekayasa, sebagai contoh adalah fenomena gempa yang terjadi di kota Agadir (Morocco) yang hancur oleh gempa pada tahun 1960 dengan membawa korban jiwa 12.000 jiwa, padahal *magnitude* gempa hanya $M = 5,75$, tetapi *hypocenter* tepat dibawah kota itu dengan kedalaman hanya 2 – 3 km. Intensitas gempa pada waktu itu adalah sekitar X MMI.

Sebagai perbandingan dapat dikemukakan, bahwa gempa terbesar yang pernah dirasakan di Jakarta adalah yang terjadi pada tanggal 1 April 1943 jam 14.18.08 GMT oleh gempa dengan *magnitude* $M = 7$, tetapi dengan jarak *epicenter* 150 km dan kedalaman *hypocenter* 30 km. Seperti kita ketahui Jakarta pada waktu itu tidak hancur, karena menurut skala intensitas hanya terdapat kira-kira V MMI (Kompas, 18 Maret 1997).

Tabel 2.3 Hubungan antara *magnitude* dan intensitas gempa

Magnitude (Richter)	Intensitas (MMI)	Pengaruh-pengaruh Tipikal
≤ 2	I – II	Pada umumnya tidak terasa
3	III	Terasa di dalam rumah, tidak ada kerusakan
4	IV – V	Terasa oleh banyak orang, barang-barang bergerak, Tidak adak kerusakan struktural
5	VI – VII	Terjadi beberapa kerusakan struktural, seperti Retak-retak pada dinding
6	VII – VIII	Kerusakan menengah, seperti hancurnya dinding
7	IX – X	Kerusakan besar, seperti runtuhnya bangunan
≥ 8	XI – XII	Rusak total atau hampir hancur total

2.3 Percepatan Permukaan

Percepatan permukaan setempat adalah yang langsung mempengaruhi konstruksi. Karena itu, hal ini merupakan titik tolak dari perhitungan bangunan tahan gempa.

Percepatan adalah parameter yang menyatakan perubahan kecepatan mulai dari keadaan diam sampai pada kecepatan tertentu. Percepatan gelombang gempa yang sampai di permukaan bumi disebut percepatan tanah, dan merupakan gangguan yang perlu dikaji untuk setiap gempa, kemudian dipilih percepatan tanah yang maksimum untuk dipetakan agar bisa memberikan pengertian tentang efek paling parah yang pernah dialami suatu lokasi.

Rumus-rumus yang eksak untuk menghitung percepatan permukaan setempat praktis tidak dapat diturunkan, karena banyak faktor-faktor yang mempengaruhinya, terutama sifat-sifat dari lapisan deposit setempat. Karena itu, rumus-rumus yang ditemukan dalam literatur pada umumnya adalah rumus-rumus empiris atau semi-empiris. Jelaslah, bahwa rumus-rumus demikian yang dikembangkan di suatu daerah atau negara tertentu, belum tentu dapat dipakai begitu saja di daerah dengan sifat-sifat lapisan deposit yang berlainan

Salah satu rumus semi empiris adalah dari Kawashumi :

$$\log \alpha = M \cdot 5,45 \cdot 0,00084 (\Delta - 100) + \left(\log \frac{100}{\Delta}\right) \times \frac{1}{0,43429}$$

M = Magnitude

Δ = Jarak hypocenter

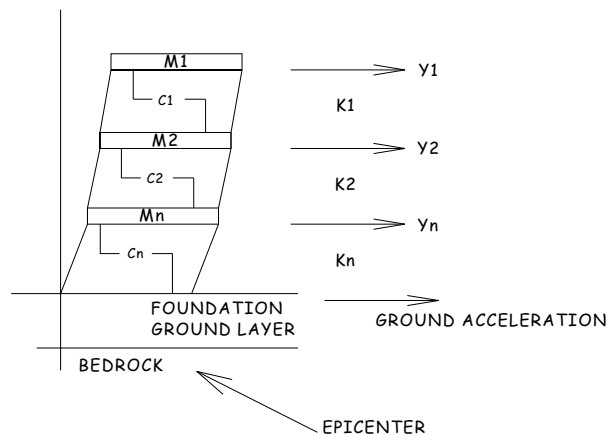
α = Percepatan dalam gal (cm/dt²)

g = Percepatan gravitasi setempat

Rumus ini sangat praktis, karena hubungan antara percepatan permukaan setempat α dan *magnitude* M hanya merupakan fungsi dari jarak *hypocenter* Δ . di dalam tabel dengan mudah dapat dihitung M dan Δ yang diketahui.

rumus di bawahnya adalah rumus empiris yang memberi hubungan antara intensitas MMI dan percepatan permukaan setempat a . kedua rumus ini dipakai oleh Lembaga Metereologi dan Geofisika sebagai rumus-rumus standar. jadi, apabila di Indonesia ini diketahui letak *epicenter* dan diketahui pula *magnitude* gempanya, maka dapatlah dihitung percepatan permukaannya.

Berhubung rumus Kawashumi adalah rumus semi empiris, maka timbulah pertanyaan apakah dapat dipakai begitu saja di Indonesia, untuk menjawab pertanyaan itu dapat di tinjau rumus lain dari Kanai.



Gambar 2.4 Permodelan Bangunan Akibat Beban Gempa

Menurut Kanai lebih baik kita meninjau dahulu perambatan gelombang gempa pada *bedrock* atau *baseroack* dari *focus* ke tempat yang ditinjau, karena hal ini dapat dianalisa dengan cukup tepat, mengingat sifat-sifat *bedrock* lebih banyak diketahui. Dengan menganggap getaran pada *bedrock* sebagai *vibratory force*, maka getaran pada permukaan merupakan masalah *forced vibration* dengan *damping effects* bergantung pada sifat-sifat lapisan deposit. Sifat-sifat lapisan deposit ditentukan oleh *predominant period* lapisan itu bila ada getaran gempa.

Prof. K. Kanai (Earthquake Research Institute University of Tokyo) telah menurunkan rumus semi empiris sebagai berikut:

$$a_g = \gamma a_r$$

$$\gamma = 1 + \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{1+\alpha r}{1-\alpha r} \left\{1 - \left(\frac{T}{T_o}\right)^2\right\}\right]^2 + \left[\frac{0,3}{\sqrt{T_o}} \frac{T}{T_o}\right]^2}}$$

$$a_r = \frac{10^{0,61 M - 1,73 \log \Delta_e + 0,13}}{T}$$

a_g = *ground surface acceleration* (gal)

a_r = *vibratory force acceleration* pada base rock (gal)

γ = *magnification* atau *amplifying factor*

T = *period of earthquake motion* (sec.)

T_o = *predominant period of alluvial deposit above base rock*

M = *magnitude of earthquake*

Δ_e = *epicentre distance* (km)

Untuk keadaan yang paling berbahaya, yaitu apabila *earthquake vibration period* T mencapai nilai yang sama dengan *predominant period* T_o dari *alluvial deposit* (resonansi), maka $T = T_o$ dan persamaannya menjadi:

$$\gamma = 1 + \frac{\sqrt{T_o}}{0,3}$$

$$a_r = \frac{10^{0,61 M - 1,73 \log \Delta_e + 0,13}}{T_o}$$

$$\log a_r T_o = 0,61 M - 1,73 \log \Delta_e + 0,13$$

Seperti dapat dilihat diatas, untuk dapat menggunakan rumus Kanai perlu diketahui *predominat period* lapisan deposit dan ini harus diukur di lokasi setempat.

Vibration characteristic suatu bahan tidak tergantung pada besarnya *amplitude*. Sifat ini dipakai oleh Kanai untuk menentukan *predominant period* lapisan deposit. Disekeliling kita senantiasa ada hal-hal yang menyebabkan getaran tanah, mulai dari lalu lintas jalan raya, kereta api, mesin-mesin pabrik sampai orang yang menyalakan fan listrik. Dengan demikian, tanah terus menerus berada dalam getaran, tetapi dengan *amplitude* yang kecil sekali yang tidak dapat dirasakan oleh manusia, getaran-getaran ini disebut *microtremor*. Jadi dengan mencatat *microtremor* ini dengan alat pencatat yang sangat peka, dari *accelerogram* yang dicatat selama kurun waktu pencatatan dengan interpretasi statistik dapat ditentukan *predominant period* lapisan deposit tersebut.

Dengan memasang alat tadi pada berbagai kedalaman, didapatkan *predominant period* lapisan-lapisan itu, yang semakin dalam menunjukkan nilai yang semakin mengecil. Demikianlah dari *microtremor measurement* di beberapa tempat di Jakarta (Hotel Indonesia, Sarinah Dept Store, Wisma Nusantara) dalam tahun 1964 di dapatkan *period* lapisan atas di Jalan Thamrin sebesar $T_0 = 0,12$ detik.

Sekarang dapatlah dibandingkan rumus Kawashumi dan rumus Kanai, hasilnya adalah sebagai berikut:

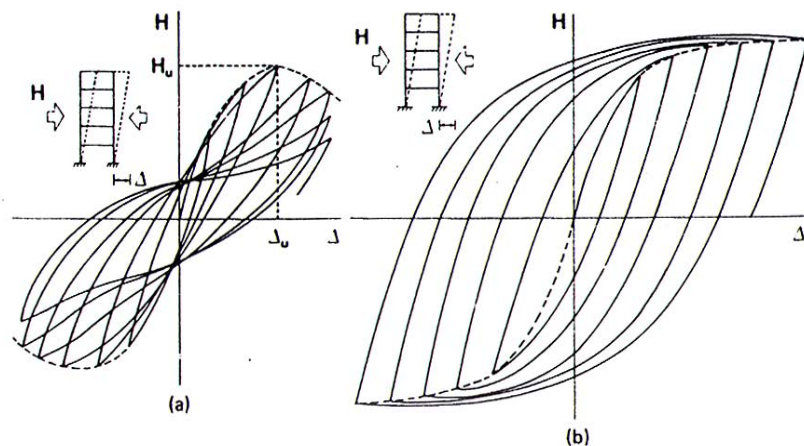
- Menurut Kawashumi : 20 gal (0,02 g)
- Menurut Kanai : 78 gal (0,078 g)

Adapun rumusan lain yang menyatakan hubungan antara Skala Richter dan percepatan tanah maksimum atau *Peak Ground Acceleration* (PGA) akibat pengaruh gempa pada suatu wilayah, adalah dengan menggunakan rumus Donovan dan Matuschka. Jika M adalah besarnya gempa menurut Skala Richter, H adalah jarak *hypocenter* (dalam km), maka besarnya percepatan tanah maksimum a (dalam cm/detik^2) adalah :

- Rumus Donovan (1973) : $a = 1080.(2,718)^{0,5.R} (H+25)^{-1,32}$
- Rumus Matuschka (1980) : $a = 119.(2,718)^{0,81.R} . (H+25)^{-1,15}$

2.4 Pengaruh Getaran Gempa terhadap Konstruksi

Perencanaan struktur bangunan tahan gempa yang baik memerlukan pengetahuan tentang bagaimana perilaku dari struktur tersebut saat terjadi gempa. Banyak faktor yang mempengaruhi respon dari struktur pada saat terjadi gempa. Gambar 2.5 menunjukkan hubungan antara beban horisontal akibat gempa yang arahnya bolak-balik dengan perpindahan yang terjadi dari dua struktur portal (*frame structure*) yang dengan perilaku yang berbeda. Struktur pada Gambar 2.5.a menunjukkan perilaku ketahanan gempa yang buruk. Pada struktur ini, setelah tercapainya kekuatan batas (*ultimate*) dari struktur (H_u), akan terjadi penurunan kekuatan yang sangat signifikan akibat beban gempa yang berulang. Dari kurva siklus histeresis yang terbentuk terlihat bahwa struktur pada Gambar 2.5.a mempunyai kapasitas disipasi energi yang kecil atau terbatas, dengan demikian struktur ini tidak mempunyai kemampuan daya dukung yang baik di dalam menahan beban gempa. Struktur-struktur seperti ini pada umumnya bersifat getas (*brittle*).

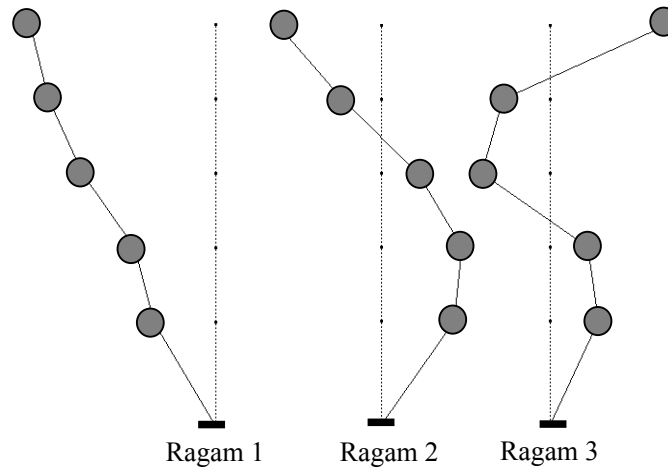


Gambar 2.5 Perilaku struktur akibat pembebanan horisontal berulang, (a). Perilaku struktur yang buruk , (b). Perilaku struktur yang baik

Struktur pada Gambar 2.5.b mempunyai perilaku yang baik didalam memikul beban gempa. Kurva siklus histeresis yang terbentuk pada struktur ini lebih besar dibandingkan dengan struktur yang pertama. Hal ini menunjukkan bahwa struktur mempunyai kapasitas disipasi energi yang besar, sehingga struktur mempunyai kemampuan daya dukung yang baik di dalam menahan beban gempa. Struktur-struktur seperti ini pada umumnya bersifat daktil (*ductile*). Perilaku daktil dari struktur merupakan hal yang sangat penting di dalam merencanakan struktur bangunan tahan gempa.

Untuk memahami lebih lanjut tentang perilaku bangunan beban gempa marilah kita tinjau hal berikut. Pondasi suatu konstruksi akan dipaksa bergerak dengan tanah yang bergetar. Hal ini menimbulkan gaya-gaya di dalam konstruksi akibat kelebamannya. Apabila konstruksi ini kaku sekali, maka konstruksi tersebut akan ikut bergetar dengan tanah sebagai benda yang kaku. Pada konstruksi demikian menurut dalil-dalil mekanika (Newton) gaya inersia adalah massa dari konstruksi itu dikalikan dengan percepatan yang dalam hal ini adalah sama dengan percepatan permukaan. Tetapi dalam kenyataannya, konstruksi-konstruksi tidak kaku, tetapi *flexible* sehingga respon gerakan tanah jauh lebih kompleks dari pada suatu benda yang kaku.

Apabila tanah bergerak dalam suatu arah, pondasi dari konstruksi ikut bergerak. Kelebaman dari bagian atas konstruksi berhasrat melawan pergerakan ini, dengan akibat terjadinya distorsi pada konstruksi dan sambil bergetar terus dibangkitkan ke dalam suatu pola getaran tertentu. Sifat getaran ini tergantung pada pembagian massa, kekakuan konstruksi dan sifat-sifat peredaman (*damping*). Getaran tersebut berupa *fundamental (first) mode* dengan periode terpanjang (frekuensi terpendek), *second mode*, *third mode* dan seterusnya, dengan periode yang semakin pendek. Untuk perhitungan kekuatan konstruksi *first mode vibration* pada umumnya adalah menentukan, dimana semua massa bergerak kearah yang sama. Waktu getar (*period*) untuk *first mode vibration* ini disebut *fundamental period* atau *natural period* dari konstruksi.



Gambar 2.6 Mode Getar Struktur

Jadi jelaslah, bahwa percepatan dari berbagai bagian dari konstruksi pada suatu *vibration mode* tidak lagi sama dengan percepatan tanah. Gaya inersia yang bekerja pada pondasi disebut *base shear* dan yang bekerja pada lantai-lantai tingkat disebut *story shear*. Berhubung pada bangunan *flexible* terdapat efek cambuk (*whiplash effect*), maka *top story shear* akan lebih besar daripada *base shear*. Dengan demikian, *story shear* akan semakin besar nilainya semakin tinggi letak tingkat itu. Pada konstruksi yang dianggap kaku sekali, *story shear* ini merata dari bawah sampai keatas.

2.5 Pengaruh Kegempaan pada Struktur Bangunan *The Peak Apartment*

Mengingat kondisi kegempaan Jakarta, seperti hal yang dipaparkan diatas, maka perlu diperhatikan kondisi teknologi struktur bangunan yang akan dibangun di wilayah Jakarta khususnya untuk *tall building*.

The Peak Apartment @ Sudirman berlokasi di Jalan Setiabudi Raya no 9, Sudirman-Jakarta. Massa bangunan terdiri dari empat tower, dimana dua tower masing-masing memiliki 35 lantai (Tower A dan B) dan dua tower berikutnya masing-masing 55 lantai (Tower C dan D).

Seluruh struktur terbuat dari beton bertulang. Pada tower C dan D yang memiliki ketinggian 55 lantai, memiliki kelangsingan bangunan yang tinggi,

yaitu 1 : 8. Dengan skala kelangsingan seperti itu, rancangan struktur akan lebih ditentukan oleh faktor kekakuan (*stiffness*) daripada faktor kekuatan. Dengan kata lain struktur bisa saja sudah memenuhi syarat kekuatan tetapi tidak cukup kaku untuk membatasi pergerakan gedung akibat gaya lateral seperti gempa.

The Peak Apartment @ Sudirman menggunakan system lateral modern generasi ketiga untuk *tall building*, yaitu penggunaan *corewall* dan *outrigger* sebagai kombinasi penahan gaya lateral. Apartemen ini menggunakan tiga susun *outrigger* yang diletakkan pada lantai 10-12, lantai 21-23 dan lantai 32-34. Balok-balok *outrigger* ini mentransfer momen lentur pada *corewall* menjadi gaya aksial pada kolom *outrigger* dan dengan demikian membuat struktur gedung menjadi kaku. Dengan sistem ini diharapkan seluruh lebar gedung dapat dimanfaatkan untuk menstabilkan struktur apartemen ini dalam menahan gaya lateral akibat gempa.

2.6 Historikal *Outrigger*

2.6.1 Dari Pasangan Bata ke Rangka Baja

Gedung tinggi atau monumen tinggi, sejak jaman dahulu selalu membuat impresi mendalam bagi orang-orang yang melihatnya. Manusia terinspirasi untuk membuat bangunan pencakar langit. Kalau pada jaman dahulu , suatu monumen atau menara tinggi memiliki fungsi yang terbatas, misalnya sebagai menara pengintai, menara lonceng, sebagai simbol status dan lain sebagainya. Kini umumnya orang membuat gedung tinggi untuk dihuni.

Pada abad pertengahan, Eropa sudah banyak memiliki bangunan dan monumen tinggi. Bangunan-bangunan ini dibangun dengan material batu atau pasangan bata yang direkat oleh campuran pasir, kapur dan *pozzolan* tanpa besi tulangan. Pada umumnya bangunan-bangunan tinggi di Eropa ini berfungsi sebagai pengering kain selain sebagai simbol status.

Mendekati awal abad 19, bangunan tinggi yang berfungsi sebagai hunian mulai berkembang. Bangunan tinggi dibangun dengan pasangan bata sebagai

material utamanya dan bangunan-bangunan ini sangat masif karena bobotnya. Akibat bobotnya yang besar, umumnya ketinggian yang dicapai menjadi terbatas. Luas bidang penahan lantai dasar, tidak mungkin dibuat terlalu besar berlebihan. Dengan tebalnya dinding, bobotnya dan kurang fleksibilitas denah yang dapat dicapai, menyebabkan *masonry construction* mempunyai aplikasi terbatas untuk gedung tinggi. Contoh nyata adalah gedung Monadnock di Chicago yang terdiri dari 16 lantai, dengan tebal dinding mencapai 1.8 meter di lantai dasar. Pada masa itu, gedung ini menjadi gedung pasangan bata tertinggi di dunia.

Pada masa revolusi industri, pemakaian rangka besi berkembang pesat sesuai dengan perkembangan teknologi material. Sejalan dengan ketersediaan material baru ini, berbagai sistem struktur baru dan berbagai bentuk gedung ikut berkembang, dari besi cor yang getas dan memiliki kapasitas tarik rendah sampai ditemukan besi tempa.

Pada tahun 1885, lahir gedung pencakar langit pertama, yaitu gedung *Home Life Insurance Company* di Chicago. Adapun perancangnya William Le Baron Jenney, menggunakan portal kerangka baja dan besi tempa, dimana portal ini mampu menahan seluruh beban gravitasi dan beban lateral akibat angin. Seluruh bobot gedung di tahan oleh kerangka metal, yang berupa kolom pipa besi tempa yang diisi semen dengan balok besi tempa untuk enam lantai pertama dan balok baja untuk lantai lainnya.

2.6.2 Sistem Struktur Generasi Ketiga

Memasuki tahun 1950, konstruksi beton bertulang mulai digunakan sebagai elemen utama dalam pembangunan gedung tinggi. Karena pengetahuan manusia yang masih terbatas akan perilaku beton bertulang terutama mengenai *non linearitas material* beton sendiri, maka pada awal abad 20 kebanyakan gedung tinggi di Amerika menggunakan baja profil sebagai elemen struktur utamanya. Pada tahun ini peran asosiasi semen (PCA) dalam memajukan pengetahuan tentang konstruksi beton sangat menonjol lewat riset dan publikasinya sehingga para perancang mulai terbiasa dengan konstruksi beton.

Setelah penemuan cara produksi baja oleh Bessemer dan pemakaian kerangka baja murni sebagai elemen struktur di gedung *Home Life Insurance* digabung dengan perkembangan sistem *elevator* modern, maka kemungkinan membangun kearah vertikal terbuka lebar. Gedung *Woolworth* (1913) mencapai ketinggian 242 meter dengan jumlah lantai 60 tingkat, merupakan gedung tinggi di dunia saat selesai di bangun. Tetapi rekornya cepat dipatahkan oleh gedung *Chrysler*, 77 lantai di New York dengan ketinggian mencapai 319 meter. Kemudian muncul *Empire State Building* tahun 1930 dengan ketinggian 385 meter. Seluruh pencakar langit ini mempunyai sistem struktur portal *open frame* dengan kombinasi ikatan pengaku (*bracing*).

Belakangan para insinyur menyadari, apabila sistem lateral struktur diletakkan pada keliling gedung, maka bisa dicapai efisiensi pemakaian material. Lahirlah konsep struktur tabung yang sangat populer dengan pemakaian pertamanya di tahun 1963 oleh Fazlur Khan untuk gedung De Witt Chesnut, 43 lantai di Chicago. Ia menunjukkan bahwa sistem *open frame* kurang mendukung apabila gedung bertambah tinggi. Dengan bertambahnya pengetahuan tentang mekanika bahan dan perilaku gedung, Fazlur Khan menganjurkan meninjau gedung secara bentuk tiga dimensinya.

Perkembangan selanjutnya menjurus kearah konsep yang lebih modern, yaitu "gedung sebagai balok kantilever" yang menjulang dari muka tanah. Sistem ini mengambil struktur cerobong (*chimney*) sebagai model ideal, dimana seluruh material berada pada tepi serat paling luar sehingga memiliki kekakuan yang tinggi. Struktur demikian akan sangat efisien dalam menahan deformasi lentur dan geser.

Generasi ketiga sistem struktur pencakar langit ini berangkat dari bentuk ideal cerobong asap (*chimney*). Cerobong diurai menjadi kolom, diletakkan pada tepi seluar mungkin untuk memanfaatkan seluruh lebar gedung sebagai alas penahan momen guling.

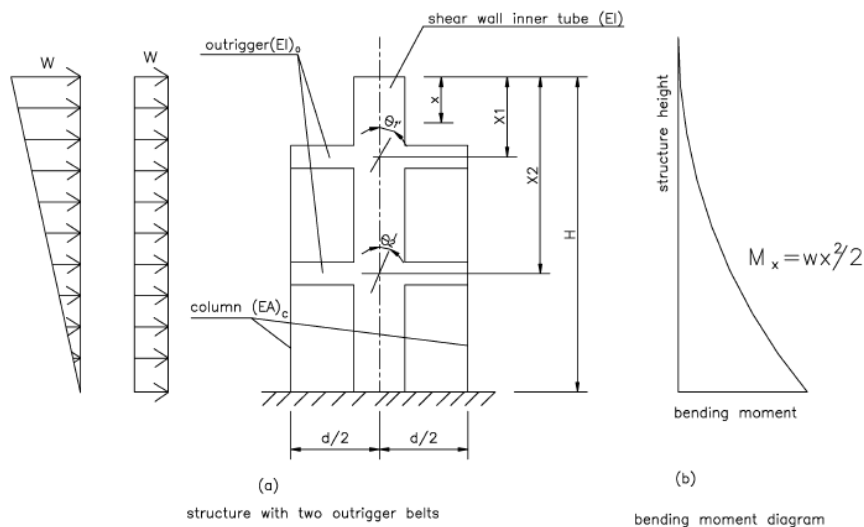
2.6.3 Sistem Pengaku Bangunan (*Outrigger*)

Bangunan yang memiliki angka kelangsingan yang tinggi, rancangan strukturnya akan lebih ditentukan oleh faktor kekakuan (*stiffness*) daripada

faktor kekuatan (*strength*). Dengan kata lain, struktur bisa saja sudah memenuhi syarat kekuatan tetapi tidak cukup kaku untuk membatasi pergerakan gedung akibat gaya lateral.

Angka kelangsingan adalah perbandingan antara ketinggian bangunan dengan lebar bangunan. Semakin tinggi angka kelangsingan maka semakin besar pula pergerakan horisontal bangunan (*lateral displacement*). Maka suatu sistem pengaku bangunan diperlukan untuk mengatasi *displacement* ini, agar *displacement* yang terjadi masih dalam batas toleransi. Pada sistem struktur generasi ketiga *corewall* yang identik dengan cerobong (*chimney*) dikombinasikan dengan *outrigger* dengan tujuan dapat membatasi *lateral displacement* yang terjadi pada bangunan.

Corewall dapat diidentikkan dengan tiang layar kapal. Balok *outrigger* adalah balok silangnya dan kolom-kolom *outrigger* adalah tali-talinya. Balok-balok *outrigger* ini mentransfer momen lentur pada *corewall* menjadi gaya aksial pada kolom *outrigger* dan dengan demikian membuat struktur bangunan menjadi kaku. Dengan sistem ini seluruh lebar bangunan dapat dimanfaatkan untuk menstabilkan struktur langsing gedung dalam menahan gaya lateral.



Gambar 2.7 Prinsip Dasar Kombinasi Struktur *Corewall* dan *Outrigger*

2.7 Aspek Kegempaan Pada Bangunan *The Peak Apartment*

Berdasarkan akibat-akibat yang dapat ditimbulkan oleh bencana gempa di Indonesia, maka perlu adanya upaya-upaya untuk menekan bahaya bencana yang diakibatkan oleh gempa. Aspek rekayasa gempa sangat perlu diterapkan pada rekayasa struktur, agar bangunan mempunyai ketahanan yang baik terhadap pengaruh gempa. Penggunaan standar bangunan sangat penting untuk menjamin bahwa bangunan tersebut aman untuk dihuni.

Penentuan tingkat risiko terjadinya gempa untuk suatu wilayah, secara analitis dimungkinkan, berkat sifat-sifat dari peristiwa gempa yang pernah terjadi sebelumnya, sebagaimana halnya pada beberapa bencana alam lainnya, seperti halnya banjir. Peristiwa terjadinya gempa dapat direpresentasikan dengan suatu model matematik dan teori probabilitas. Tingkat risiko gempa pada suatu wilayah diartikan sebagai probabilitas atau kemungkinan terlampauinya respon pergerakan tanah yang maksimum pada wilayah tersebut, dalam suatu kurun waktu tertentu. Dengan mengetahui sejarah kegempaan suatu daerah yang diperoleh dari pengamatan atau rekaman gempa yang pernah terjadi di masa lalu, tingkat risiko atau peluang terjadinya gempa pada suatu wilayah dapat diperkirakan dengan menggunakan rumus-rumus matematika dan statistik.

Tingkat risiko gempa pada suatu wilayah atau zona, tidak dapat ditentukan hanya berdasarkan frekuensi terjadinya gempa saja. Hal ini disebabkan karena tingkat risiko gempa diukur berdasarkan kerusakan struktur yang ada pada suatu lokasi, yang tidak hanya tergantung dari besarnya gempa, tetapi juga tergantung pada jarak pusat gempa (*epicenter*) dari lokasi yang ditinjau, serta kondisi tanah pada lokasi tersebut. Sebagai contoh, gempa kuat dengan *magnitude* $M=7$ pada Skala Richter dengan pusat gempa berjarak 300 km dari lokasi yang ditinjau, belum tentu menimbulkan kerusakan yang lebih besar dibandingkan gempa dengan *magnitude* $M=5$ atau $M=6$ pada Skala Richter, tetapi dengan pusat gempa yang berjarak 50 km. dari lokasi yang ditinjau.

Demikian pula halnya pengaruh beban gempa pada struktur bangunan yang terletak di atas tanah lunak dan di atas tanah keras, dapat juga berlainan.

Pada perencanaan struktur bangunan tahan gempa, perlu ditinjau 3 taraf beban gempa, yaitu Gempa Ringan, Gempa Sedang dan Gempa Kuat, untuk merencanakan elemen-elemen dari sistem struktur, agar tetap mempunyai kinerja yang baik pada saat terjadi gempa. Gempa Ringan, Gempa Sedang, Gempa Kuat, dan Gempa Rencana untuk keperluan prosedur perencanaan struktur didefinisikan sebagai berikut :

2.7.1 Gempa Ringan

Gempa ringan adalah gempa yang peluang atau risiko terjadinya dalam periode umur rencana bangunan 50 tahun adalah 92% ($R_N = 92\%$), atau gempa yang periode ulangnya adalah 20 tahun ($T_R = 20$ tahun). Akibat gempa ringan ini struktur bangunan harus tetap berperilaku elastis, ini berarti bahwa pada saat terjadi gempa elemen-elemen struktur bangunan tidak diperbolehkan mengalami kerusakan struktural maupun kerusakan non-struktural. Pada saat terjadi gempa ringan, penampang dari elemen-elemen pada sistem struktur dianggap tepat mencapai kapasitas nominalnya, dan akan berdeformasi lebih lanjut secara tidak elastis (inelastis) jika terjadi gempa yang lebih kuat.

Karena risiko terjadinya gempa ringan adalah 92%, maka dapat dianggap bahwa selama umur rencananya, struktur bangunan pasti akan akan mengalami gempa ringan, atau risiko terjadinya gempa ringan adalah 100% ($R_N = 100\%$).

2.7.2 Gempa Sedang

Gempa Sedang adalah gempa yang peluang atau risiko terjadinya dalam periode umur rencana bangunan 50 tahun adalah 50% ($R_N = 50\%$), atau gempa yang periode ulangnya adalah 75 tahun ($T_R = 75$ tahun). Akibat gempa sedang ini struktur bangunan tidak boleh mengalami kerusakan struktural, namun diperkenankan mengalami kerusakan yang bersifat non-struktural. Gempa sedang akan menyebabkan struktur bangunan sudah berperilaku tidak elastis,

tetapi tingkat kerusakan struktur masih ringan dan dapat diperbaiki dengan biaya yang terbatas.

2.7.3 Gempa Kuat

Gempa Kuat adalah gempa yang peluang atau risiko terjadinya dalam periode umur rencana bangunan 50 tahun adalah 2% ($R_N = 2\%$), atau gempa yang periode ulangnya adalah 2500 tahun ($T_R = 2500$ tahun). Akibat gempa kuat ini struktur bangunan dapat mengalami kerusakan struktural yang berat, namun struktur harus tetap berdiri dan tidak boleh runtuh sehingga korban jiwa dapat dihindarkan. Gempa kuat akan menyebabkan struktur bangunan berperilaku tidak elastis, dengan kerusakan struktur yang berat tetapi masih berdiri dan dapat diperbaiki.

2.7.4 Gempa Rencana

Karena beban pada struktur yang diakibatkan oleh gempa merupakan beban yang tidak pasti, maka untuk menentukan besarnya beban gempa yang akan digunakan di dalam perencanaan, tidak dipergunakan beban yang diakibatkan oleh gempa kuat sebagai dasar perhitungannya. Desain struktur terhadap pengaruh gempa kuat akan menghasilkan bangunan yang tidak ekonomis. Di dalam standar gempa yang baru dicantumkan bahwa, untuk perencanaan struktur bangunan terhadap pengaruh gempa digunakan gempa rencana. Gempa Rencana adalah gempa yang peluang atau risiko terjadinya dalam periode umur rencana bangunan 50 tahun adalah 10% ($R_N = 10\%$), atau gempa yang periode ulangnya adalah 500 tahun ($T_R = 500$ tahun).

Dengan menggunakan gempa rencana ini, struktur dapat dianalisis secara elastis untuk mendapatkan gaya-gaya dalam yang berupa momen lentur, gaya geser, gaya normal, dan puntir atau torsi yang bekerja pada tiap-tiap elemen struktur. Gaya-gaya dalam ini setelah dikombinasikan dengan gaya-gaya dalam yang diakibatkan oleh beban mati dan beban hidup, kemudian digunakan untuk mendimensi penampang dari elemen struktur

berdasarkan metode LRFD (*Load Resistance Factor Design*) sesuai dengan standar desain yang berlaku.

Peluang atau risiko terjadinya gempa pada struktur bangunan selama umur rencananya dapat dihitung dengan menggunakan rumus probabilitas di atas. Jika periode ulang terjadinya gempa ringan : $T_R = 20$ tahun, gempa sedang : $T_R = 75$ tahun, dan gempa kuat : $T_R = 2500$ tahun, serta umur rencana rata-rata bangunan di Indonesia adalah $N=50$ tahun, maka akan didapatkan besarnya risiko terjadinya gempa pada struktur bangunan adalah : R_N Gempa Ringan = 92% \cong 100%, R_N Gempa sedang = 50%, dan R_N Gempa Kuat = 2%.

2.7.5 Gempa Nominal

Besarnya beban gempa nominal yang digunakan untuk perencanaan struktur ditentukan oleh tiga hal, yaitu oleh besarnya gempa rencana, oleh tingkat daktilitas yang dimiliki struktur, dan oleh nilai faktor tahanan lebih yang terkandung di dalam struktur. Berdasarkan pedoman gempa yang berlaku di Indonesia yaitu Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Rumah dan Gedung (SNI 03-1726-2002)., besarnya beban gempa horisontal (V) yang bekerja pada struktur bangunan, ditentukan menurut persamaan :

$$V = \frac{C \cdot I}{R} W_t$$

Dimana, I adalah Faktor Keutamaan Struktur, C adalah nilai Faktor Respon Gempa yang didapat dari Respon Spektrum Gempa Rencana untuk waktu getar alami fundamental T, dan W_t ditetapkan sebagai jumlah dari beban-beban berikut :

- Beban mati total dari struktur bangunan gedung
- Jika digunakan dinding partisi pada perencanaan lantai, maka harus diperhitungkan tambahan beban sebesar 0,5 kPa
- Pada gudang-gudang dan tempat penyimpanan barang, maka sekurang-kurangnya 25% dari beban hidup rencana harus diperhitungkan

- Beban tetap total dari seluruh peralatan dalam struktur bangunan gedung harus diperhitungkan

2.7.5.1 Faktor Keutamaan Struktur

Dengan probabilitas terjadinya gempa rencana adalah 10% dalam kurun waktu umur rencana bangunan gedung 50 tahun, maka menurut teori probabilitas Gempa rencana ini mempunyai periode ulang 500 tahun. Gempa rencana ini akan menyebabkan struktur bangunan gedung mencapai kondisi di ambang keruntuhan, tetapi masih dapat berdiri sehingga dapat mencegah jatuhnya korban jiwa. Untuk berbagai kategori bangunan gedung, tergantung pada probabilitas terjadinya keruntuhan struktur bangunan gedung selama umur rencananya, pengaruh gempa rencana terhadapnya harus dikalikan dengan suatu Faktor Keutamaan Struktur (I) menurut persamaan :

$$I = I_1 \cdot I_2$$

Dimana I_1 adalah Faktor Keutamaan untuk menyesuaikan periode ulang gempa berkaitan dengan penyesuaian probabilitas terjadinya gempa itu selama umur rencana gedung, sedangkan I_2 adalah Faktor Keutamaan untuk menyesuaikan umur rencana gedung tersebut.

Karena gedung-gedung bertingkat, monumen dan bangunan monumental sama-sama memiliki fungsi biasa, tanpa sesuatu keistimewaan, kekhususan atau keutamaan dalam fungsinya, maka probabilitas terjadinya gempa tersebut selama kurun waktu umur rencana gedung ditetapkan sama sebesar 10%, sehingga berlaku $I_1 = 1,0$. Tetapi umur rencana dari gedung-gedung tersebut berbeda-beda. Gedung-gedung dengan jumlah tingkat sampai 10, karena berbagai alasan dan tujuan pada umumnya mempunyai umur kurang dari 50 tahun, sehingga $I_2 < 1$ karena periode ulang gempa tersebut adalah kurang dari 500 tahun. Gedung-gedung dengan jumlah tingkat lebih dari 30, monumen dan bangunan monumental, mempunyai masa layan yang

panjang, bahkan harus dilestarikan untuk generasi yang akan datang, sehingga $I_2 > 1$ karena periode ulang gempa tersebut adalah lebih dari 500 tahun.

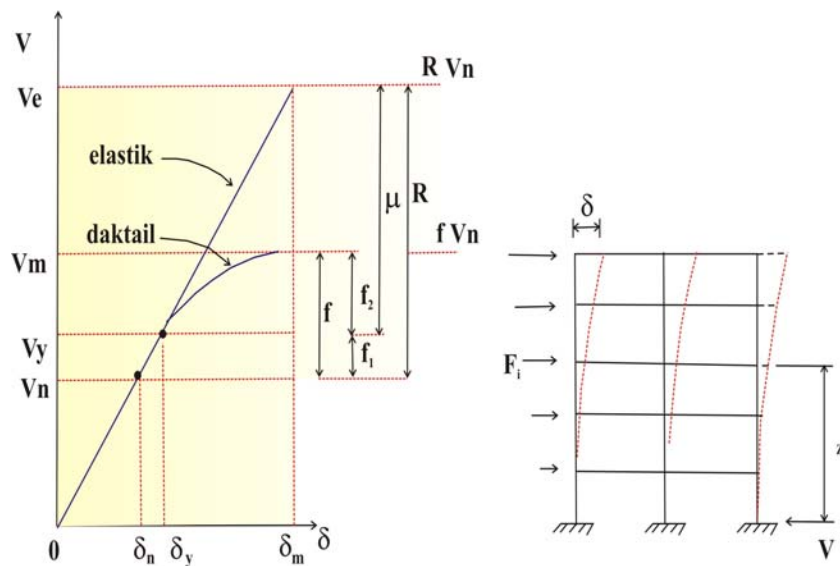
Gedung-gedung penting pasca gempa (rumah sakit, instalasi air bersih, pembangkit tenaga listrik, pusat penyelamatan dalam keadaan darurat, fasilitas radio dan televisi), gedung-gedung yang membahayakan lingkungan bila rusak berat akibat gempa (tempat penyimpanan bahan berbahaya) atau membahayakan bangunan di dekatnya bila runtuh akibat gempa (cerobong, tangki di atas menara), mempunyai umur manfaat tidak berbeda dengan gedung-gedung dengan fungsi biasa, yaitu sekitar 50 tahun, sehingga berlaku $I_2 = 1,0$. Tetapi probabilitas terjadinya gempa tersebut selama kurun waktu umur gedung harus dibedakan dan semuanya harus kurang dari 10%, sehingga $I_1 > 1$ karena periode ulang gempa tersebut adalah lebih dari 500 tahun. Kombinasi I_1 dan I_2 untuk beberapa kategori gedung ditetapkan dalam Tabel 4.1, berikut perkaliannya I.

Tabel 2.4 Faktor Keutamaan Struktur untuk Berbagai Kategori Bangunan

Kategori gedung/bangunan	Faktor Keutamaan		
	I_1	I_2	I
Gedung umum seperti untuk perumahan, perniagaan dan perkantoran.	1,0	1,0	1,0
Monumen dan bangunan monumental	1,0	1,6	1,6
Gedung penting pasca gempa seperti rumah sakit, instalasi air bersih, pembangkit tenaga listrik, pusat penyelamatan dalam keadaan darurat, fasilitas radio dan televisi	1,4	1,0	1,4
Gedung untuk menyimpan bahan berbahaya seperti gas, produk minyak bumi, asam, bahan beracun.	1,6	1,0	1,6
Cerobong, tangki di atas menara	1,5	1,0	1,5

2.7.5.2 Daktilitas Struktur

Salah satu faktor penting yang dapat mempengaruhi besar kecilnya beban gempa yang bekerja pada struktur bangunan adalah daktilitas struktur. Beberapa standar perencanaan ketahanan gempa untuk struktur gedung, menggunakan asumsi *constant maximum displacement rule*, untuk mendefinisikan tingkat daktilitas struktur. Asumsi yang dianut divisualisasikan dengan diagram beban-simpangan (diagram V- δ) yang ditunjukkan dalam gambar 2.8. Asumsi ini menyatakan bahwa struktur bangunan gedung yang bersifat daktail dan struktur bangunan gedung yang bersifat elastik penuh, akibat pengaruh Gempa Rencana akan menunjukkan simpangan maksimal δ_m yang sama dalam kondisi diambang keruntuhan. Asumsi ini adalah konservatif, karena dalam keadaan sesungguhnya struktur bangunan gedung yang daktail memiliki δ_m yang relatif lebih besar dibandingkan struktur bangunan gedung yang elastis, sehingga memiliki faktor daktilitas struktur (μ) yang relatif lebih besar dari pada yang diasumsikan



Gambar 2.8 Diagram beban (V)-Simpangan (δ) Struktur Bangunan Gedung

Faktor daktilitas struktur (μ) adalah rasio antara simpangan maksimum (δ_m) struktur gedung akibat pengaruh Gempa Rencana pada saat mencapai kondisi di ambang keruntuhan, dengan simpangan struktur gedung pada saat terjadinya pelelehan pertama (δ_y), yaitu :

$$1,0 \leq \mu = \frac{\delta_m}{\delta_y} \leq \mu_m$$

Pada persamaan ini, $\mu = 1,0$ adalah nilai faktor daktilitas untuk struktur bangunan gedung yang berperilaku elastik penuh, sedangkan μ_m adalah nilai faktor daktilitas maksimum yang dapat dikerahkan oleh sistem struktur bangunan gedung yang bersangkutan.

Jika V_e adalah pembebanan maksimum akibat pengaruh Gempa Rencana yang dapat diserap oleh struktur gedung yang bersifat elastik penuh dalam kondisi di ambang keruntuhan, dan V_y adalah pembebanan yang menyebabkan pelelehan pertama di dalam struktur gedung, maka dengan asumsi bahwa struktur gedung daktil dan struktur gedung elastik penuh akibat pengaruh Gempa Rencana menunjukkan simpangan maksimum δ_m yang sama dalam kondisi di ambang keruntuhan, maka berlaku hubungan sebagai berikut :

$$V_y = \frac{V_e}{\mu}$$

Jika V_n adalah pembebanan gempa nominal akibat pengaruh gempa rencana yang harus ditinjau dalam perencanaan struktur gedung, maka berlaku hubungan sebagai berikut :

$$V_n = \frac{V_y}{f_1} = \frac{V_e}{R}$$

dimana f_1 adalah faktor kuat lebih beban dan bahan yang terkandung di dalam struktur bangunan gedung dan nilainya ditetapkan sebesar $f_1 = 1,6$ dan R disebut faktor reduksi gempa yang nilainya dapat ditentukan menurut persamaan :

$$1,6 \leq R = \mu \cdot f_1 \leq R_m$$

$R = 1,6$ adalah faktor reduksi gempa untuk struktur gedung yang berperilaku elastik penuh, sedangkan R_m adalah faktor reduksi gempa maksimum yang dapat dikerahkan oleh sistem struktur yang bersangkutan. Dalam Tabel 2.5 dicantumkan nilai R untuk berbagai nilai μ yang bersangkutan, dengan ketentuan bahwa nilai μ dan R tidak dapat melampaui nilai maksimumnya.

Tabel 2.5 Parameter Daktilitas Struktur Gedung

Taraf kinerja struktur gedung	μ	R
Elastis penuh	1,0	1,6
Daktil parsial	1,5	2,4
	2,0	3,2
	2,5	4,0
	3,0	4,8
	3,5	5,6
	4,0	6,4
	4,5	7,2
	5,0	8,0
Daktil penuh	5,3	8,5

Nilai faktor daktilitas struktur gedung μ di dalam perencanaan struktur gedung dapat dipilih menurut kebutuhan, tetapi tidak boleh diambil lebih besar dari nilai faktor daktilitas maksimum μ_m yang dapat dikerahkan oleh masing-masing sistem atau subsistem struktur gedung.

2.7.5.3 Arah Pembebanan Gempa

Jika besarnya beban gempa sudah dapat diperkirakan, maka pertanyaan selanjutnya adalah, bagaimana menentukan arah beban gempa terhadap bangunan. Dalam kenyataannya arah datangnya gempa terhadap bangunan tidak dapat ditentukan dengan pasti, artinya pengaruh gempa dapat datang dari sembarang arah. Jika bentuk denah dari bangunan simetris dan teratur, sehingga bangunan jelas memiliki sistem struktur pada dua arah utama bangunan yang saling tegak lurus, perhitungkan arah gempa dapat dilakukan lebih sederhana.

Pembebanan gempa tidak penuh tetapi biaksial atau sembarang dapat menimbulkan pengaruh yang lebih rumit terhadap struktur gedung ketimbang pembebanan gempa penuh tetapi uniaksial. Untuk mengantisipasi kondisi ini *Applied Technology Council* (ATC, 1984) menetapkan bahwa, arah gempa yang biaksial dapat disimulasikan dengan meninjau beban Gempa Rencana yang disyaratkan oleh peraturan, bekerja pada ke dua arah sumbu utama struktur bangunan yang saling tegak lurus secara simultan. Besarnya beban gempa pada struktur dapat diperhitungkan dengan menjumlahkan 100% beban gempa pada satu arah dengan 30% beban gempa pada arah tegak lurusnya.

Bila bentuk denah dari bangunan tidak simetris atau tidak beraturan, maka sulit untuk menentukan arah beban gempa yang paling menentukan. Untuk ini perlu dilakukan analisis struktur dengan meninjau pengaruh dari beban gempa pada masing-masing arah dari struktur. Untuk berbagai arah gempa yang bekerja, bagian yang kritis dari elemen-elemen struktur akan berbeda pula. Berapa kemungkinan arah gempa yang akan ditinjau pada analisis, sepenuhnya tergantung pada perencana struktur.

2.8 Wilayah Gempa dan Spektrum Respon

Salah satu faktor yang mempengaruhi besar kecilnya beban gempa yang bekerja pada struktur bangunan adalah faktor wilayah gempa. Dengan demikian, besar kecilnya beban gempa, tergantung juga pada lokasi dimana struktur bangunan tersebut akan didirikan. Indonesia ditetapkan terbagi dalam 6 Wilayah Gempa seperti ditunjukkan dalam Gambar 1, dimana Wilayah Gempa 1 adalah wilayah dengan kegempaan paling rendah, dan Wilayah Gempa 6 adalah wilayah dengan kegempaan paling tinggi. Pembagian Wilayah Gempa ini, didasarkan atas percepatan puncak batuan dasar akibat pengaruh Gempa Rencana dengan periode ulang 500 tahun, yang nilai rata-ratanya untuk setiap Wilayah Gempa ditetapkan dalam Gambar 2.9 dan Tabel 2.6.

Peta Wilayah Gempa Indonesia dibuat berdasarkan analisis probabilistik bahaya gempa (*probabilistic seismic hazard analysis*), yang telah dilakukan untuk seluruh wilayah Indonesia berdasarkan data seismotektonik mutakhir yang tersedia saat ini. Data masukan untuk analisis pembuatan peta gempa adalah, lokasi sumber gempa, distribusi *magnitude* gempa di daerah sumber gempa, fungsi perambatan gempa (*atenuasi*) yang memberikan hubungan antara gerakan tanah setempat, *magnitude* gempa di sumber gempa, dan jarak dari tempat yang ditinjau sampai sumber gempa, serta frekuensi kejadian gempa per tahun di daerah sumber gempa. Sebagai daerah sumber gempa, ditinjau semua sumber gempa yang telah tercatat dalam sejarah kegempaan di Indonesia, baik sumber gempa pada zona subduksi, sumber gempa dangkal pada lempeng bumi, maupun sumber gempa pada sesar-sesar aktif yang sudah teridentifikasi.

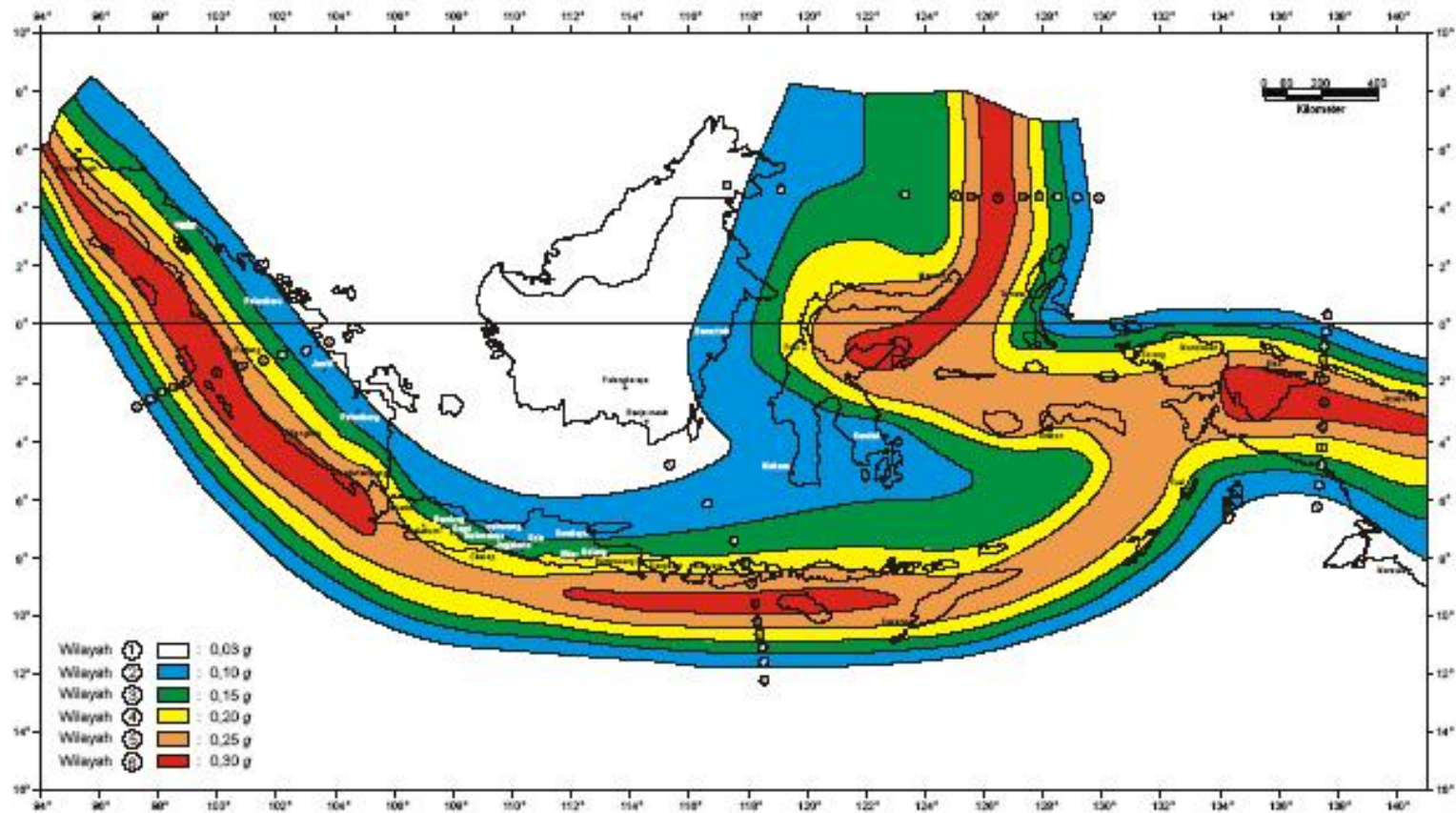
Hasil analisis probabilistik bahaya gempa ini diplot pada peta Indonesia berupa garis-garis kontur percepatan puncak batuan dasar dengan periode ulang 500 tahun (periode ulang Gempa Rencana), yang kemudian menjadi dasar bagi penentuan batas-batas wilayah gempa. Percepatan batuan dasar rata-rata untuk Wilayah Gempa 1 s/d 6, telah ditetapkan berturut-turut adalah sebesar 0,03 g, 0,10 g, 0,15 g, 0,20 g, 0,25 g dan 0,30 g. Dengan percepatan

batuan dasar ini, maka ditetapkan percepatan puncak muka tanah (A_0) untuk Tanah Keras, Tanah Sedang dan Tanah Lunak seperti yang tercantum pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Percepatan puncak batuan dasar dan percepatan puncak muka tanah untuk masing-masing Wilayah Gempa Indonesia

Wilayah Gempa	Percepatan puncak batuan dasar ('g')	Percepatan puncak muka tanah A_0 (g)			
		Tanah Keras	Tanah Sedang	Tanah Lunak	Tanah Khusus
1	0,03	0,04	0,05	0,08	Diperlukan evaluasi khusus di setiap lokasi
2	0,10	0,12	0,15	0,20	
3	0,15	0,18	0,23	0,30	
4	0,20	0,24	0,28	0,34	
5	0,25	0,28	0,32	0,36	
6	0,30	0,33	0,36	0,38	

Percepatan puncak batuan dasar dan percepatan puncak muka tanah A_0 untuk Wilayah Gempa 1 yang ditetapkan dalam gambar 2.9 dan tabel 2.6 ditetapkan juga sebagai percepatan minimum yang harus diperhitungkan dalam perencanaan struktur gedung untuk menjamin kekekaran (*robustness*) minimum dari struktur gedung tersebut. Jadi beban gempa yang disyaratkan tersebut merupakan pengaruh dari gempa yang bukan Gempa Rencana. Di dalam peraturan bangunan negara tetangga kita Singapura yang berbatasan dengan wilayah gempa 1, terdapat suatu ketentuan yang berkaitan dengan kekekaran struktur gedung, yaitu bahwa setiap struktur gedung harus diperhitungkan terhadap beban-beban horisontal nominal pada taraf masing-masing lantai tingkat sebesar 1,5% dari beban mati nominal lantai tingkat tersebut.

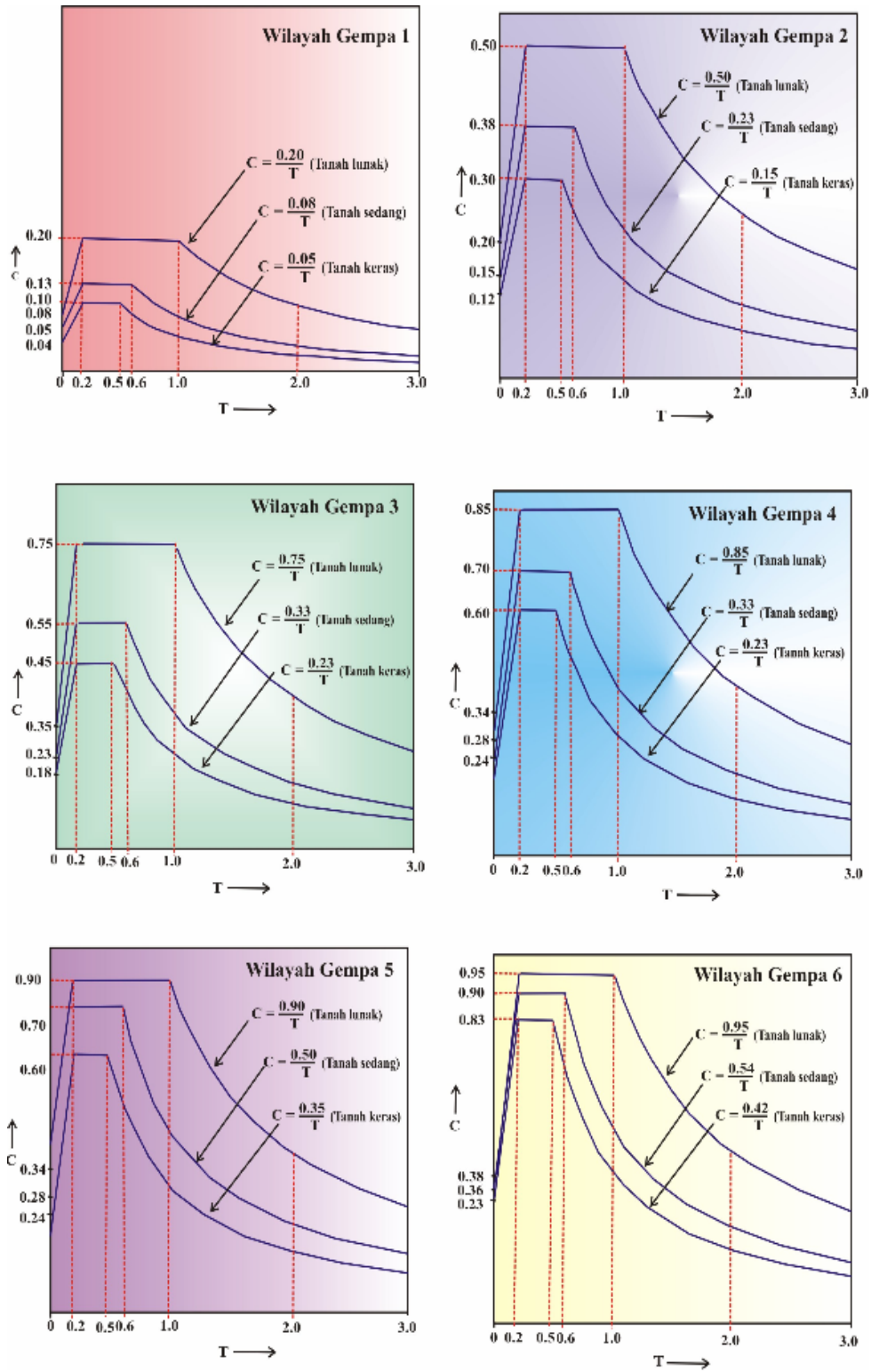


Gambar 2.9 Peta Zona Gempa di Indonesia

Dengan menggunakan kriteria ini, maka suatu struktur bangunan gedung bertingkat rendah (gedung dengan periode getar T yang pendek) yang terletak di wilayah gempa 1 dan di atas tanah sedang dengan faktor reduksi gempa misalnya sekitar $R = 7$ (struktur dengan daktilitas sebagian / parsial), harus diperhitungkan terhadap faktor respons gempa sebesar $0,13 I/R = 0,13 \times 0,8/7 = 0,015$. Hasil ini selaras dengan peraturan yang ditetapkan di Singapura. Dengan demikian, standar gempa SNI 2002 ini boleh dikatakan memelihara kontinuitas kegempaan regional lintas batas negara, jadi tidak lagi seperti menurut standar SNI 1989 yang lama, dimana wilayah gempa 1 merupakan daerah yang bebas gempa sama sekali.

Untuk menentukan pengaruh gempa rencana pada struktur gedung, yaitu berupa beban geser dasar nominal statik ekuivalen pada struktur bangunan gedung beraturan, dan gaya geser dasar nominal sebagai respons dinamik ragam pertama pada struktur bangunan gedung tidak beraturan, untuk masing-masing wilayah gempa ditetapkan Spektrum Respons Gempa Rencana C-T seperti ditunjukkan dalam gambar 2.10. Dalam gambar tersebut C adalah Faktor Respons Gempa yang dinyatakan dalam percepatan gravitasi, dan T adalah waktu getar alami struktur gedung yang dinyatakan dalam detik.

Secara umum spektrum respons adalah suatu diagram yang memberi hubungan antara percepatan respons maksimum suatu sistem satu derajat kebebasan (SDK) akibat suatu gempa masukan tertentu, sebagai fungsi dari faktor redaman dan waktu getar alami sistem SDK tersebut. Spektrum respons C-T yang ditetapkan untuk masing-masing Wilayah Gempa, adalah suatu diagram yang memberikan hubungan antara percepatan respons maksimum (Faktor Respons Gempa) C dan waktu getar alami T sistem SDK akibat gempa rencana, dimana sistem SDK tersebut dianggap memiliki rasio redaman kritis sebesar 5%.



Gambar 2.10 Spektrum Respon Gempa Rencana

Kondisi $T = 0$ mengandung arti, bahwa sistem SDK tersebut adalah sangat kaku, sehingga getaran dari sistem tersebut sepenuhnya akan mengikuti gerakan tanah. Dengan demikian, untuk $T = 0$ percepatan respons maksimum menjadi identik dengan percepatan puncak muka tanah ($C = A_0$). Bentuk dari spektrum respon yang sesungguhnya menunjukkan suatu fungsi yang acak, dimana untuk harga T yang meningkat akan menunjukkan nilai yang mula-mula meningkat dulu sampai mencapai suatu nilai maksimum, kemudian akan turun lagi secara *asimtotik* mendekati sumbu- T . Untuk mempermudah penggunaan, Spektrum Respons C - T yang digunakan di dalam SNI Gempa 2002 telah diidealisasikan sebagai berikut : untuk $0 \leq T \leq 0,2$ detik, C meningkat secara linier dari A_0 sampai A_m ; untuk $0,2 \text{ detik} \leq T \leq T_c$, C bernilai tetap $C = A_m$; untuk $T > T_c$, C mengikuti fungsi hiperbola $C = A_r/T$. Dalam hal ini T_c disebut waktu getar alami sudut. Idealisasi fungsi hiperbola ini mengandung arti, bahwa untuk $T > T_c$ kecepatan respons maksimum yang bersangkutan bernilai tetap. A_m dan A_r masing-masing adalah percepatan respons maksimum atau Faktor Respons Gempa maksimum dan pembilang dalam persamaan hiperbola Faktor Respons Gempa C pada Spektrum Respons Gempa Rencana.

Dari berbagai hasil penelitian ternyata, bahwa untuk $0 \leq T \leq 0,2$ detik terdapat berbagai ketidakpastian, baik dalam karakteristik gerakan tanahnya sendiri maupun dalam sifat-sifat daktilitas sistem SDK yang bersangkutan. Karena itu untuk $0 \leq T \leq 0,2$ detik C ditetapkan harus diambil sama dengan A_m . Dengan demikian untuk $T \leq T_c$, Spektrum Respons berkaitan dengan percepatan respons maksimum yang bernilai tetap. Sedangkan untuk $T > T_c$, berkaitan dengan kecepatan respons maksimum yang bernilai tetap.

Berbagai hasil penelitian menunjukkan, bahwa A_m berkisar antara $2 A_0$ dan $3 A_0$, sehingga $A_m = 2,5 A_0$ merupakan nilai rata-rata yang dianggap layak untuk perencanaan. Selanjutnya, dari berbagai hasil penelitian juga ternyata, bahwa sebagai pendekatan yang baik waktu getar alami sudut T_c

untuk jenis-jenis tanah keras, tanah sedang dan tanah lunak dapat diambil sebesar berturut-turut 0,5 detik, 0,6 detik dan 1,0 detik. Dalam Tabel 2.7, nilai-nilai A_m dan A_r dicantumkan untuk masing-masing Wilayah Gempa dan masing-masing jenis tanah.

Tabel 2.7. Spektrum Respon Gempa Rencana

Wilayah Gempa	Tanah Keras $T_c = 0,5$ det		Tanah Sedang $T_c = 0,6$ det.		Tanah Lunak $T_c = 1,0$ det.	
	A_m	A_r	A_m	A_r	A_m	A_r
1	0,10	0,05	0,13	0,08	0,20	0,20
2	0,30	0,15	0,38	0,23	0,50	0,50
3	0,45	0,23	0,55	0,33	0,75	0,75
4	0,60	0,30	0,70	0,42	0,85	0,85
5	0,70	0,35	0,83	0,50	0,90	0,90
6	0,83	0,42	0,90	0,54	0,95	0,95

Gelombang gempa merambat melalui batuan dasar di bawah permukaan tanah. Dari kedalaman batuan dasar ini gelombang gempa tersebut kemudian merambat ke permukaan tanah sambil mengalami pembesaran (amplifikasi), bergantung pada jenis lapisan tanah yang berada di atas batuan dasar tersebut. Dengan adanya pembesaran gerakan ini, maka pengaruh Gempa Rencana di permukaan tanah harus ditentukan dari hasil analisis perambatan gelombang gempa dari kedalaman batuan dasar ke permukaan tanah.

Ada dua kriteria yang dapat digunakan untuk mendefinisikan batuan dasar, yaitu berdasarkan nilai hasil Test Penetrasi Standar N , atau berdasarkan besarnya kecepatan rambat gelombang geser v_s . Batuan dasar adalah lapisan batuan di bawah permukaan tanah yang memiliki nilai hasil Test Penetrasi Standar (SPT) paling rendah $N = 60$, dan tidak ada lapisan batuan lain di bawahnya yang memiliki nilai $SPT < N = 60$, atau lapisan batuan yang memiliki kecepatan rambat gelombang geser v_s yang mencapai 750 m/detik, dan tidak ada lapisan batuan lain di bawahnya yang memiliki nilai kecepatan rambat gelombang < 750 m/detik. Dalam praktek definisi yang pertama yang umumnya dipakai, mengingat data nilai N merupakan data standar yang selalu

ditemukan dalam laporan hasil penyelidikan geoteknik suatu lokasi, sedangkan untuk mendapatkan nilai v_s diperlukan percobaan-percobaan khusus di lapangan. Apabila tersedia ke-2 kriteria tersebut, maka kriteria yang menentukan adalah yang menghasilkan jenis batuan yang lebih lunak.

Menurut SNI Gempa 2002, ada empat jenis tanah dasar harus dibedakan dalam memilih harga C, yaitu tanah keras, tanah sedang, tanah lunak, dan tanah khusus. Definisi dari jenis tanah keras, tanah sedang dan tanah lunak dapat ditentukan berdasarkan tiga kriteria, yaitu kecepatan rambat gelombang geser v_s , nilai hasil Test Penetrasi Standar N, dan kekuatan geser tanah S_u (*shear strength of soil*). Untuk menetapkan jenis tanah yang dihadapi, paling tidak harus tersedia 2 dari 3 kriteria tersebut, dimana kriteria yang menghasilkan jenis tanah yang lebih lunak adalah yang menentukan. Apabila tersedia ke-3 kriteria tersebut, maka jenis suatu tanah yang dihadapi harus didukung paling tidak ada 2 kriteria tadi.

Tabel 2.8. Jenis-jenis Tanah

Jenis Tanah	Kecepatan rambat gelombang geser rata-rata \bar{v}_s (m/det)	Nilai hasil Test Penetrasi Standar rata-rata \bar{N}	Kuat geser tanah rata-rata \bar{S}_u (kPa)
Tanah Keras	$\bar{v}_s \geq 350$	$\bar{N} \geq 50$	$\bar{S}_u \geq 100$
Tanah Sedang	$175 \leq \bar{v}_s < 350$	$15 \leq \bar{N} < 50$	$50 \leq \bar{S}_u < 100$
Tanah Lunak	$\bar{v}_s < 175$	$\bar{N} < 15$	$\bar{S}_u < 50$
	Atau, setiap profil dengan tanah lunak yang tebal total lebih dari 3 m, dengan $PI > 20$, $w_n \geq 40\%$, dan $S_u < 25$ kPa		
Tanah Khusus	Diperlukan evaluasi khusus di setiap lokasi		

Dari berbagai penelitian ternyata, bahwa hanya lapisan setebal 30 m paling atas yang menentukan pembesaran gerakan tanah di permukaan tanah. Karena itu, nilai rata-rata berbobot dari ke-3 kriteria tersebut harus dihitung sampai kedalaman tidak lebih dari 30 m. Jenis tanah ditetapkan sebagai Tanah Keras, Tanah Sedang, atau Tanah Lunak, apabila untuk lapisan setebal maksimum 30 m paling atas, dipenuhi syarat-syarat seperti yang tercantum dalam Tabel 2.8.

Dalam Tabel 2.8 di atas, \bar{v}_s , \bar{N} dan \bar{S}_u adalah nilai rata-rata berbobot besaran tanah dengan tebal lapisan tanah sebagai besaran pembobotnya, yang harus dihitung menurut persamaan-persamaan sebagai berikut :

$$\bar{v}_s = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{\sum_{i=1}^m t_i / v_{si}}$$

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{\sum_{i=1}^m t_i / N_i}$$

$$\bar{S}_u = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{\sum_{i=1}^m t_i / S_{ui}}$$

dimana t_i adalah tebal lapisan tanah ke-i, v_{si} adalah kecepatan rambat gelombang geser melalui lapisan tanah ke-i, N_i nilai hasil Test Penetrasi Standar lapisan tanah ke-i, S_{ui} adalah kuat geser tanah lapisan ke-i, dan m

adalah jumlah lapisan tanah yang ada di atas batuan dasar. Selanjutnya, PI adalah Indeks Plastisitas tanah lempung, w_n adalah kadar air alami tanah, dan S_u adalah kuat geser lapisan tanah yang ditinjau.

Karena sifat dari jenis Tanah Khusus tidak dapat dirumuskan secara umum, maka sifatnya harus dievaluasi secara khusus di setiap lokasi dimana jenis tanah tersebut ditemukan. Pada jenis Tanah Khusus, gerakan gempa di permukaan tanah harus ditentukan dari hasil analisis perambatan gelombang gempa. Dalam analisis perambatan gelombang gempa ini, accelerogram gempa harus diambil dari rekaman getaran akibat gempa yang ada atau yang didapatkan dari suatu lokasi, yang kondisi geologi, topografi, dan seismotoni, mirip dengan lokasi tempat Tanah Khusus yang ditinjau berada.

Tanah Khusus dalam Tabel 2.8, adalah jenis tanah yang tidak memenuhi persyaratan yang tercantum dalam tabel tersebut. Di samping itu, yang termasuk dalam jenis Tanah Khusus adalah tanah yang memiliki potensi likuifaksi yang tinggi, lempung sangat peka, pasir yang tersementasi rendah yang rapuh, tanah gambut, tanah dengan kandungan bahan organik yang tinggi dengan ketebalan lebih dari 3 m, lempung sangat lunak dengan $PI > 75$ dan ketebalan lebih dari 10 m, lapisan lempung dengan $25 \text{ kPa} < S_u < 50 \text{ kPa}$ dan ketebalan lebih dari 30 m.

2.9 Karakteristik Perilaku Bangunan dibawah Pengaruh Gempa Rencana (Time History Analysis)

Perhitungan respons dinamik struktur bangunan gedung tidak beraturan terhadap pengaruh Gempa Rencana, dapat dilakukan dengan metoda analisis dinamik berupa analisis respons dinamik riwayat waktu yang bersifat linier atau non-linier dengan suatu akselerogram gempa yang dianggakan sebagai gerakan tanah masukan. Untuk analisis respons dinamik linier riwayat waktu terhadap pengaruh gempa rencana pada taraf pembebanan gempa nominal, percepatan muka tanah asli dari gempa masukan harus diskalakan ke taraf

pembebanan gempa nominal tersebut, sehingga nilai percepatan puncaknya A menjadi :

$$A = \frac{A_0 I}{R}$$

dimana A_0 adalah Percepatan Puncak Muka Tanah, R adalah Faktor Reduksi Gempa dari struktur yang bersangkutan, sedangkan I adalah Faktor Keutamaan dari struktur bangunan. Nilai-nilai A_0 , I , dan R tercantum didalam standar gempa. Dalam analisis ini redaman struktur yang harus diperhitungkan dapat dianggap 5% dari redaman kritis.

Akselerogram gempa masukan yang ditinjau harus diambil dari rekaman gerakan tanah akibat gempa yang didapat di suatu lokasi yang mirip kondisi geologi, topografi dan seismotektoniknya dengan lokasi tempat struktur gedung yang ditinjau berada. Untuk mengurangi ketidakpastian mengenai kondisi lokasi ini, paling sedikit harus ditinjau 4 buah akselerogram dari 4 gempa yang berbeda, salah satunya harus diambil akselerogram Gempa El Centro N-S yang telah direkam pada tanggal 15 Mei 1940 di California.

Berhubung gerakan tanah akibat gempa pada suatu lokasi tidak mungkin dapat diperkirakan dengan tepat, maka sebagai gempa masukan dapat juga dipakai gerakan tanah yang disimulasikan. Parameter-parameter yang menentukan gerakan tanah yang disimulasikan ini antara lain terdiri dari waktu getar dominan tanah, konfigurasi spektrum respons, jangka waktu gerakan dan intensitas gempanya.

2.10 Penyelesaian Rekayasa Berbasis Komputer

Program-program komputer rekayasa (STAAD Pro, SAP 2000, ETABS, SAFE, ANSYS, ABAQUS, ADINA, GT-STRUDL) berbeda dengan program komputer umumnya (MS Word, Photoshop, Excel, AutoCAD), karena pengguna program komputer rekayasa dituntut untuk memahami latar belakang metode penyelesaian dan batasan-batasan yang dihasilkan dari program tersebut. Pada umumnya, *developer* program tidak bertanggung jawab untuk setiap kesalahan yang timbul dari pemakaian program, hal itu dapat dilihat dari berbagai kutipan *disclaimer* yang dinyatakan pada setiap manualnya.

CONSIDERABLE TIME, EFFORT AND EXPENSE HAVE GONE INTO THE DEVELOPMENT AND DOCUMENTATION OF SAFE. THE PROGRAM HAS BEEN THOROUGHLY TESTED AND USED. IN USING THE PROGRAM, HOWEVER, THE USER ACCEPTS AND UNDERSTANDS THAT NO WARRANTY IS EXPRESSED OR IMPLIED BY THE DEVELOPERS OR THE DISTRIBUTORS ON THE ACCURACY OR THE RELIABILITY OF THE PROGRAM.

THE USER MUST EXPLICITLY UNDERSTAND THE ASSUMPTIONS OF THE PROGRAM AND MUST INDEPENDENTLY VERIFY THE RESULTS.

SAFE 8.0.6 - Computers and Structures, Inc. , Berkeley, California, USA

Meskipun demikian, dalam manualnya selalu disajikan bukti perbandingan analisis yang menunjukkan bahwa program yang dibuatnya telah teruji dapat menyelesaikan kasus-kasus tertentu yang telah terbukti hasilnya.

Dari kutipan-kutipan tersebut diperoleh pemahaman bahwa dari satu sisi, pembuatnya mencoba menyakinkan kepada calon pemakai bahwa program yang dibuatnya sudah benar dengan membuktikannya pada problem tertentu yang dapat diselesaikan dengan baik. Sisi lain, *developer* tidak mau bertanggung jawab bila terjadi kesalahan dari pemakaian program jika dipakai oleh orang lain. Artinya, pengguna harus bertanggung jawab sendiri dari keputusan memakai hasil program tersebut. Dengan kata lain, dapat disimpulkan bahwa penggunaan program yang tidak benar berpotensi untuk menghasilkan kesalahan yang berisiko tinggi sedemikian sehingga mereka tidak mau dilibatkan untuk menanggung kerugian yang timbul.

Untuk dapat menggunakan program dengan benar diperlukan pemahaman yang cukup mengenai latar belakang teori yang digunakan untuk membuat program komputer tersebut. Memahami setiap opsi-opsi dari program yang akan digunakan, termasuk pemasukan data yang tepat dan mengetahui sejauh mana solusi yang dihasilkan masih dapat diterima. Misal pemakaian program analisa struktur umum yang menghasilkan lendutan struktur yang besar meskipun program tersebut berjalan dengan mulus (tidak mengeluarkan *warning*), dan sebagainya. Latar belakang teori yang dipakai, pada umumnya disampaikan pada setiap manual yang disertakan.

Umumnya manual yang disertakan cukup lengkap, bahkan terlalu lengkap (sangat tebal) dan untuk memahaminya diperlukan latar belakang pendidikan yang mencukupi. Dalam konteks lain, disadari bahwa program-program rekayasa yang tersedia juga mengikuti trend *software* pada umumnya yang dilengkapi efek visual yang menarik sehingga program yang dibuat semakin mudah untuk digunakan tanpa perlu membaca secara khusus petunjuk dari manual yang disediakan. Hal tersebut juga ditunjang dengan tuntutan pasar bahwa pemakaian program komputer adalah sesuatu yang mutlak dalam bisnis yang semakin ketat ini, karena memberikan kesan canggih yang membantu dalam segi marketing untuk jasa konsultasi teknik yang akan ditawarkan.

Tanpa perlu memahami teori lebih dalam, pemakai dapat secara mudah menjalankan program dan merasa sudah memahami betul program yang dipakainya. Apabila hal tersebut terjadi, saat itulah kemungkinan dapat terjadi kesalahan dalam pemakaian program seperti yang dibayangkan *developer* yang dapat menimbulkan kerugian besar, baik dari segi ekonomi maupun keselamatan pengguna hasil rancangan dari program rekayasa.

2.10.1 Software SAFE (*Slab Analysis with Finite Element Method*)

Untuk analisa plat lantai *The Peak Apartment @ Sudirman-Jakarta*, kami menggunakan program SAFE yang merupakan program *add-on* dari *Computers and Structure Inc.* (pengembang *SAP-Structure Analysis Program*), yang merupakan salah satu rangkaian program analisa struktur.

Telah diketahui sebelumnya, *Computer and Structure Inc.* mengeluarkan rangkaian 3 program untuk analisa struktur, SAP yang ditujukan untuk analisa struktur umum, ETABS yang ditujukan untuk analisa bangunan gedung dan SAFE yang ditujukan untuk analisa plat lantai. Khusus untuk program SAFE telah dilengkapi dengan *CSidetailer* yang merupakan program tambahan yang dapat menggambarkan kondisi tulangan, baik arah maupun diameter tulangan yang dibutuhkan secara otomatis.

Program SAFE menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method*), yaitu metode diskritisasi elemen menjadi pias-pias kecil sehingga perhitungan distribusi tegangan dan regangannya menjadi lebih akurat. Untuk perhitungan gaya dalam pada elemen plat keseluruhannya sendiri menggunakan metode portal ekivalen (*Equivalent Frame Method*). Secara umum metode perhitungan elemen plat menurut ACI (*American Concrete Institute*) dapat digolongkan menjadi:

1. Metode disain langsung (*Direct Design Method*)

Metode ini memberikan aturan untuk menentukan total momen desain statis dan distribusinya diantara momen penampang negatif dan positif.

2. Metode portal ekivalen (*Equivalent Frame Method*)

Metode ini menggunakan portal ekivalen dalam analisa struktur untuk menentukan momen negatif dan positif yang bekerja pada slab.

Untuk desain slab, SAFE memberikan opsional metode integrasi nodal dan integrasi Wood-Armer. Adapun kedua metode integrasi itu tetap mendasarkan perhitungannya pada desain strip (jalur) slab. Slab lantai dibagi menjadi 2 jalur utama, yaitu : jalur kolom (*Column Strip -CS*) dan jalur tengah (*Middle Strip -MS*). Dua jalur utama ini membentang saling tegak lurus pada arah x dan y sistem koordinat (*x-strip and y-strip*). Secara garis besar yang membedakan metode integrasi diatas adalah:

1. Metode integrasi nodal

Perhitungan momen yang terjadi akan selalu pada keadaan seimbang terhadap beban yang bekerja dan tidak tergantung oleh banyaknya diskritisasi elemen.

Pendekatan dengan metode integrasi nodal ini sangat cocok pada model yang diskritisasi elemennya kurang berpengaruh (*poorly developed*)

2. Metode integrasi Wood-Armer

Perhitungan momennya tidak akan selalu pada keadaan seimbang terhadap beban yang bekerja, tetapi pada diskritisasi elemen yang membutuhkan akurasi tinggi, metode integrasi ini menjanjikan desain yang lebih baik.

Software Staad Pro 2004 (*Structure Analysis And Design*)

Research Engineering Inc. (developer STAAD Pro 2004) mengembangkan program STAAD yang merupakan salah satu perangkat lunak untuk analisa dan desain struktur yang berorientasi objek (*object oriented program*). Keunggulan yang sangat dominan adalah kemudahan dalam permodelan, definisi beban, generasi beban, penentuan parameter desain dan ditambah *script file* yang mudah dibaca serta dimodifikasi.

Structural Analysis and Design (STAAD Pro 2004) merupakan salah satu program struktural yang mampu melakukan analisa dinamik baik *Spectrum Response Analysis* maupun *Time History Analysis*.

Pada analisa beban lateral ini, kami memanfaatkan *post-processing* dari program STAAD Pro 2004 dalam menganalisa struktur *outrigger* pada *The Peak Apartment*. Tahapan awal (*pre-processing*) dimulai dengan modeling dan definisi beban, kemudian dilanjutkan dengan tahapan analisa. Tahapan ini menawarkan opsi perhitungan dengan *stardyne advance analysis* atau *staad analysis*. *Stardyne advance analysis* merupakan *software* komersial pertama untuk dinamik analisis yang membasiskan perhitungannya pada metode elemen hingga (*finite element*). *Stardyne* sangat cocok untuk permasalahan struktur yang sangat kompleks seperti *buckling analysis* dan *modal extraction*.

Kami menggunakan *STAAD engine* untuk menyelesaikan permasalahan gaya lateral pada struktur *The Peak Apartment @ Sudirman-Jakarta*, karena analisa dengan menggunakan *STAAD engine* masih *powerfull* dalam perhitungan analisa dinamik.

Secara garis besar analisa dinamik pada STAAD Pro 2004 didasarkan pada:

1. *Solution of the Eigenproblem*

Eigenproblem pada struktur didasarkan pada *lumped mass matrix* dengan massa tiap lantai masing-masing memiliki derajat kebebasan.

Ada dua metode yang digunakan untuk analisa *eigenproblem* ini, yaitu:

- *subspace iteration method*
- *determinant search method*

2. *Mass Modeling*

Natural frequencies dan *mode shape* struktur merupakan parameter utama yang mempengaruhi respon struktur dibawah beban dinamik. Perhitungan getaran bebas struktur digunakan untuk memecahkan persoalan tadi dengan asumsi tidak ada fungsi gaya eksternal yang terjadi, frekuensi alami dan *mode shapes* merupakan fungsi langsung dari kekakuan dan massa struktur.

STAAD menggunakan *diagonal mass matrix* dari 6 persamaan *lumped mass per joint*. Berat sendiri atau beban merata pada elemen terbagi merata sebesar 50% pada tiap-tiap ujung joinnya tanpa adanya *rotational mass moments of inertia* nya.

3. *Damping Modelling*

Nilai redaman memiliki karakteristik yang khusus dengan memasukkan nilainya pada setiap mode, dengan menggunakan *formula based on the first two frequencies* atau dengan menggunakan *composite modal damping*. *Composite modal damping* menggunakan perhitungan redaman suatu mode dan membandingkannya dengan *damping ratio* dari material yang berbeda (misal baja, beton dan tanah).

4. *Response Spectrum Analysis*

Perhitungan modal response yang ada dikombinasikan dengan metode square root of the sum of squares (SRSS), the complete quadratic combination (CQC), the ASCE4-98 (ASCE), the Ten Percent (TEN) atau metode the absolute (ABS) untuk mendapatkan respon struktur akibat beban gempa rencana

5. *Response Time History Analysis*

STAAD dilengkapi dengan fasilitas perhitungan *Response Time History Analysis*, yang merupakan respon struktur terhadap beban dinamis yang bekerja pada joinnya ataupun *ground motion* yang bekerja pada dasar struktur.