

BAB 2 DASAR TEORI

2.1 TEORI GEMPA BUMI

Terjadinya gempa bumi merupakan hasil fenomena alam dan perbuatan manusia yang dapat diakibatkan oleh :

- Akibat meteor yang jatuh
- Aktivitas gunung berapi
- Ledakan bawah tanah akibat nuklir

Gempa bumi yang paling membahayakan adalah gempa bumi akibat pelepasan energi karena konsentrasi tegangan yang tinggi pada kerak bumi. Mekanisme dasar dalam bumi yang menimbulkan gempa bumi belum dimengerti sepenuhnya, dan berbagai teori yang mengusulkan berkenaan dengan mekanisme ini cenderung menimbulkan konflik. Untuk maksud sekarang ini cukuplah ditunjukkan bahwa sebab utama gempa bumi erat kaitannya dengan proses tektonik lautan dipermukaan bumi. Lempengan kulit bumi yang berpindah-pindah yang sebagian sekarang, yaitu sepanjang riwayat catatan seismografik yang berarti.

2.1.1 Teori Pelat Tektonik

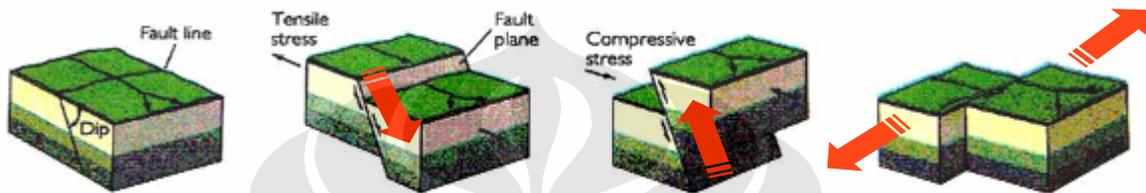
Menurut Teori Pelat Tektonik, kerak bumi terdiri dari pelat-pelat tektonik (lempeng *Lithosphere*) yang dapat merupakan bagian *ocenia* atau *continental* (benua). Pelat tektonik ini terapung di atas lapisan *Asthenosphere* serta membentuk tiga jalur gempa di perbatasannya.

Pelat-pelat tektonik ini bergerak secara perlahan, relatif satu dengan yang lain dan menimbulkan regangan elastis. Jika regangan ini melebihi kapasitas batuan maka batuan mengalami keruntuhan dan energi regangan yang tersimpan dalam batuan dilepaskan secara tiba-tiba sehingga menimbulkan gempa tektonik yang dahsyat. Mekanisme pembentukan gempa tektonik ini dikenal sebagai *Elastic Rebound Theory*.

2.1.2 Tipe Pergerakan Patahan

Deformasi relatif yang dapat mencapai 100 mm/tahun dan terjadi di perbatasan pelat tektonik, menimbulkan patahan di permukaan bumi. Secara umum pergerakan patahan ini dapat dikelompokkan dalam 4 tipe :

- *Strike-Slip Fault Normal*
- *Reverse-Slip Fault Left*
- *Slip Fault*
- *Oblique-Slip Fault*

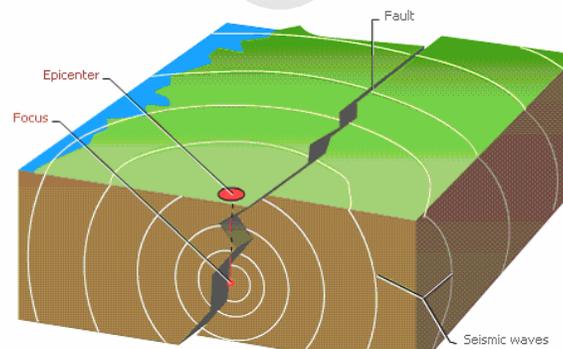


Gambar 2.1 Tipe Pergerakan Patahan

Pergerakan patahan yang sebenarnya merupakan kombinasi tipe-tipe diatas. Namun sebagian besar gempa tektonik disebabkan oleh pergerakan *strike-slip* dan biasanya gempa tipe ini cukup merusak.

2.1.3 Pusat Terjadinya Gempa

Pusat terjadinya gempa tektonik disebut *hypocenter/focus/source*, sedangkan titik dipermukaan tanah di atas *hypocenter* disebut *epicenter*. *Focal depth* dan *focal distance* adalah kedalaman *hypocenter* dari permukaan tanah dan jaraknya terhadap titik acuan.



Gambar 2.2 Ilustrasi Hubungan *Focus* Dengan *Epicenter*

2.1.4 Sifat-sifat Gempa bumi

1. Global

Secara geografis, distribusinya terstruktur terdapat daerah gempa bumi atau dengan gempa bumi yang besar.

2. Melepaskan energi yang sangat besar

Pelepasan energi bisa terjadi di benua (daratan) maupun di lautan, pelepasan energi di lautan menyebabkan tsunami.

3. Datang secara berkelompok baik terhadap waktu maupun ruang.

4. Kedalam *focus* (titik api) gempa bervariasi sampai 700 km.

5. Distribusi frekuensi gempa merupakan fungsi dari kedalaman *focus* namun tidak seragam terhadap kedalaman maupun geologis.

Gempa dangkal adalah gempa yang melepaskan energi sedang dan besar selalu disertai dengan deformasi tanah di permukaan. Deformasi ini dapat berupa patahan (*fault*) maupun pengangkatan permukaan (*surface up-lift / subsidence*)

Gempa bumi dapat digolongkan berdasarkan kedalaman *hypocenter* :

- Gempa dangkal < 70 km
- Gempa menengah 70-300 km
- Gempa dalam > 300 km

2.1.5 Ukuran Kekuatan Gempa

Ukuran gempa dapat dinyatakan dalam skala *Richter* (*M*) atau skala *Modified Mercalli* (*MMI*). Skala *Richter* mengukur *Magnitude* gempa berdasarkan amplitudo yang terjadi sehingga lebih objektif. Sedangkan skala *Modified Mercalli* mengukur *Intensitas* gempa berdasarkan efeknya terhadap manusia atau bangunan sehingga lebih bersifat subjektif.

Magnitude M menunjukkan perbandingan amplitudo *A* pada jarak 100 km dari *epicenter* dengan amplitudo standar $A_0 = 0,001$ mm dalam skala logaritma.

$$M = \text{Log}_{10} \frac{A}{A_0} \dots\dots\dots (2.1)$$

Sedangkan energi E yang dilepaskan oleh gempa berskala M *Richter* adalah :

$$\text{Log}_{10} E = 11,4 + 1,5M \dots\dots\dots (2.2)$$

Berikut ini adalah sebuah tabel yang menggambarkan tingkatan magnitudo dan kekuatan gempa, pengaruh-pengaruhnya, serta perkiraan jumlah gempa yang terjadi setiap tahunnya. Hanya gempa-gempa dengan $M \geq 5$ yang perlu ditinjau dalam perencanaan struktur.

Tabel 2.1 Magnitude dan Kelas Kekuatan Gempa

Magnitude Gempa	Kelas Kekuatan Gempa	Pengaruh Gempa	Perkiraan Kejadian Per tahun
< 2,5	<i>Minor earthquake</i>	Pada umumnya tidak dirasakan, tetapi dapat direkam oleh seismograf	900.000
2,5 s/d 4,9	<i>Light earthquake</i>	Selalu dapat dirasakan, tetapi hanya menyebabkan kerusakan kecil	30.000
5,0 s/d 5,9	<i>Moderate earthquake</i>	Menyebabkan kerusakan pada bangunan dan struktur-struktur yang lain	500
6,0 s.d 6,9	<i>Strong earthquake</i>	Kemungkinan dapat menyebabkan kerusakan besar, pada daerah dengan populasi tinggi	100
7.0 s.d 7.9	<i>Major earthquake</i>	Menimbulkan kerusakan yang serius	20
≥ 8.0	<i>Great earthquake</i>	Dapat menghancurleburkan daerah yang dekat dengan pusat gempa	satu setiap 5-10 tahun

Karena skala *Mercalli* bersifat subjektif, maka untuk suatu kerusakan yang diakibatkan oleh gempa, pengamatan yang dilakukan oleh beberapa orang akan mempunyai pendapat yang berbeda mengenai tingkat

kerusakan yang terjadi. Berikut ini tingkatan kekuatan gempa dengan skala MMI dalam tabel berikut :

Tabel 2.2 Skala Intensitas *Modified Mercalli* (MMI Scale)

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

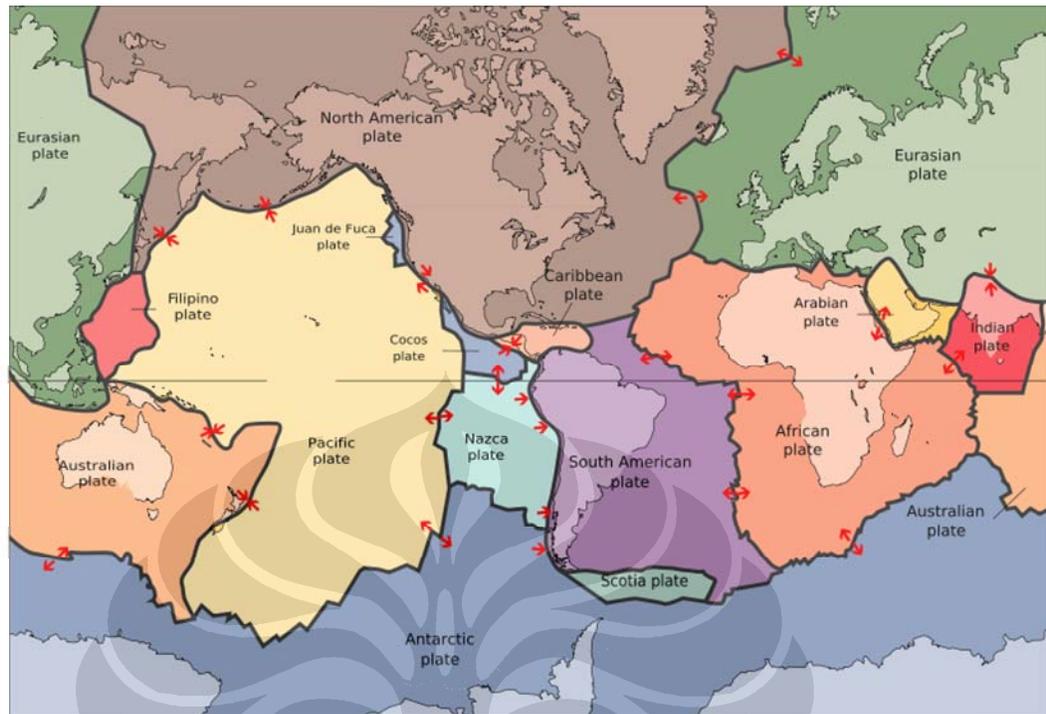
Jika dibandingkan antara skala *Richter* dengan skala *Modified* diperoleh hubungan :

Tabel 2.3 Hubungan Antara *Magnitude* Dan *Intensitas* Gempa

Magnitude (<i>Richter</i>)	Intensitas (<i>MMI</i>)	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

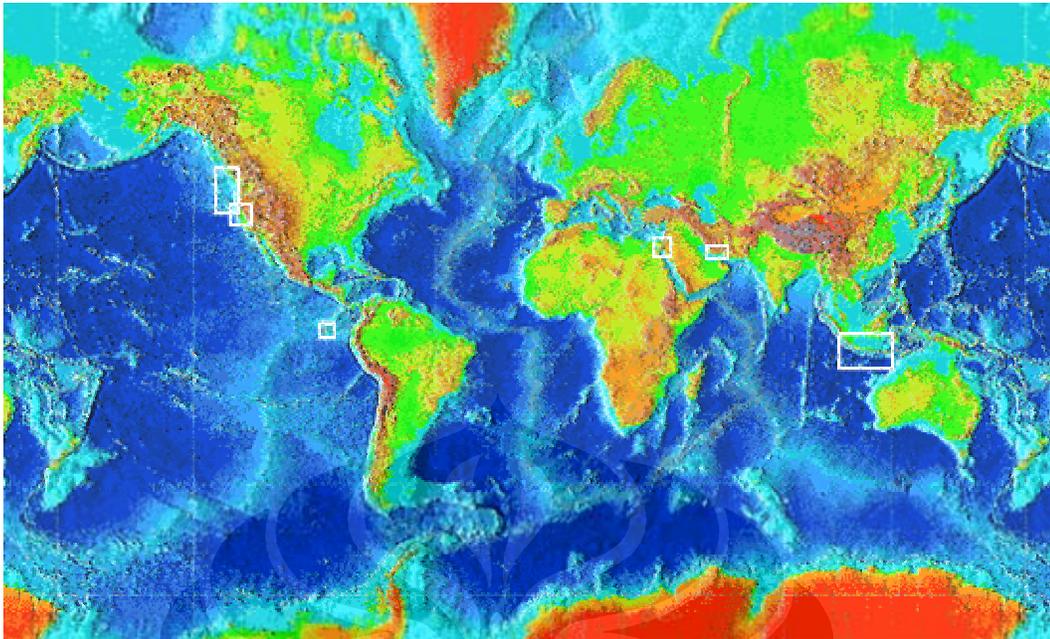
2.1.6 Lempeng Tektonik Bumi

Kerak bumi terdiri dari beberapa lempengan (*lithosphere*) sebesar benua dengan ketebalan ± 80 km. Lempengan tektonik ini merupakan bagian *oceanica* maupun *kontinental*, Lempengan tektonik bergerak relative sama satu dengan yang lain dengan kecepatan 1 -10 cm / tahun. Lempeng-lempeng *lithosphere* terapung diatas lapisan *astheno-sphere* dan dipisahkan satu sama lain oleh batas lempeng (*plate boundary*) dimana pada batas lempeng ini terbentuk tiga jalur gempa yaitu :



Gambar 2.3 Peta Lempengan Tektonik Bumi

1. *Circum Pacific Earthquake Belt (Great Eathquake Belt)*
Sabuk *Circum – Pasific* di sekitar Lautan Pasifik yang mayoritas utama dari semua gempa bumi (baik merusak maupun yang kecil)
2. *Alfide Eathquake Belt (Trans Asiatic Earthquake Belt)*
Sabuk *Alpide* yang terbentang dari pegunungan Himalaya berjajar melalui Papua dan Turki dan selanjutnya sepanjang Laut Mediterania.
3. *Mid Atlantic Oceania Eathquake Belt*
Sabuk disepanjang pusat Lautan Atlantik, secara jelas menepati suatu batas antara lempengan-lempengan kulit bumi.

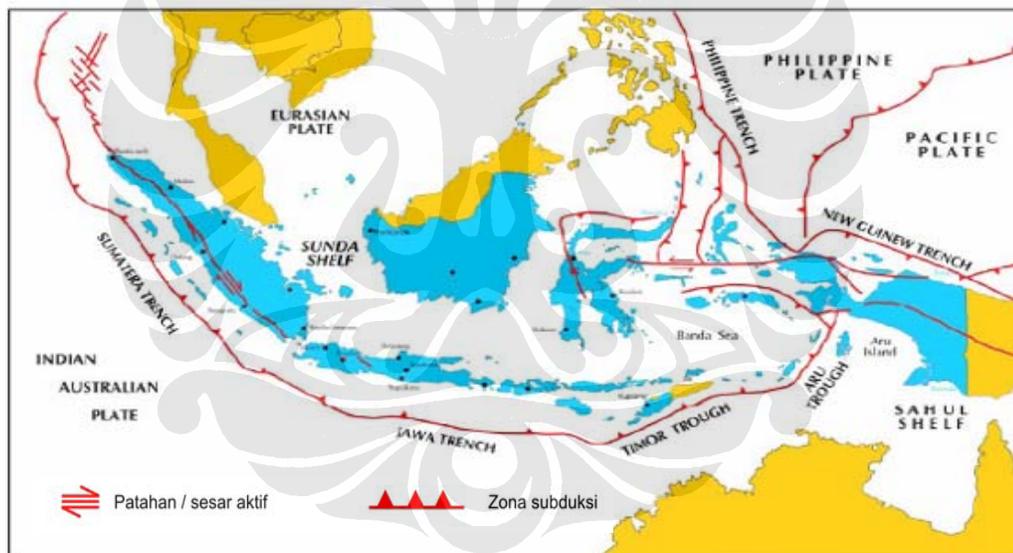
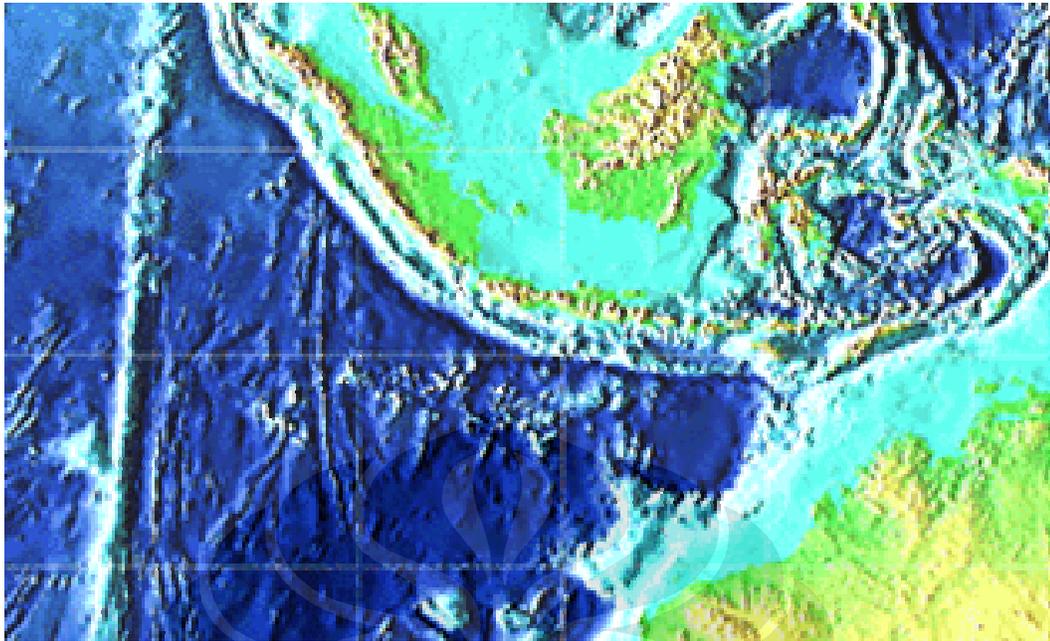


Gambar 2.4 Jalur Busur Gempa yang Berotasi Berlawanan dengan Arah Jarum Jam

Suatu fakta yang menarik diamati di sepanjang sabuk ini umumnya cenderung menunjukkan busur jalur gempa yang berotasi berlawanan dengan arah jarum jam dari lempengan kulit bumi lembah pasifik relatif terhadap massa tanah pada semua sisi.

2.1.7 Lempeng Tektonik Indonesia

Wilayah Indonesia mencakup daerah daerah yang mempunyai suatu tingkat resiko gempa yang tinggi sekali karena dihubungkan oleh 4 sistem tektonis yang aktif, yaitu lempeng *Eurasia*, Lempeng *Indo-Australia*, Lempeng *Filipina* dan Lempeng *Pasifik*. Panjang busur ini kurang lebih 4000 km, arahnya sejajar dengan pantai barat Sumatra, Selatan Jawa dan terus sepanjang Timor.



Gambar 2.5 Peta Lempengan Indonesia

(Masyhur Irsyam dkk, “Pembuatan peta gempa Indonesia dan ground motion untuk wilayah Jakarta”, *Seminar Nasional UNTAR 2005*)

Indonesia terletak di pertemuan 4 lempeng, yaitu :

1. Lempeng *Indo-Australia*
2. Lempeng *Pasifik*
3. Lempeng *Eurasia*
4. Lempeng *Filipina*

Busur Indonesia dapat dibagi sampai 3 bagian yang perbedaannya sangat berarti satu dengan yang lain, yaitu :

1. Sepertiga ujung timur busur ini mempunyai keadaan geologis yang rumit dan mencakup daerah Sulawesi., Maluku dan Laut Banda
2. Dalam bagian Sumatra, busur pulau ini (ujung barat) dapat dianggap dalam sumber gempa bumi tidak pernah melampaui 100 km.
3. Di bagian Jawa, busur pulau ini dicatat banyak lokasi gempa yang dalamnya lebih 600 km dibawah Laut Jawa dan Pulau Kalimantan. Data-data sejarah menjelaskan, kejadian-lejadian gempa jarang sekali di selatan busur ini.

Terbentuknya jalur gempa bumi di Indonesia :

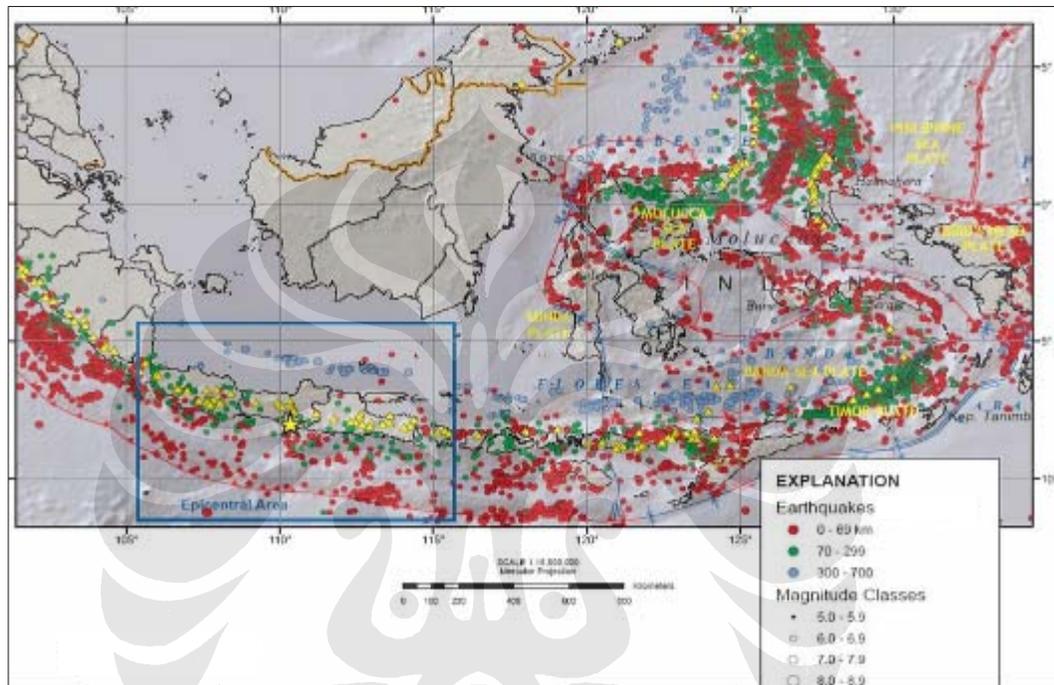
2. Lempeng *Hindia – Australia* menekik ke bawah lempeng *Eurasia* sepanjang palung sumatera dan jawa yang membentang di sebelah barat sumatra, selatan jawa terus ke selatan Timor kemudian melengkung mengikuti jalur Busur Banda.
3. Lempeng Pasifik bergeser ke arah barat sepanjang perbatasan dengan lempeng benua Australia, yaitu mulai dari Papua sampai Sulawesi.
4. Pertemuan ketiga lempeng terjadi di wilayah maluku.

Dampak dari pergerakan antar lempeng tersebut menyebabkan :

1. Sesar *Lintas Sumatra*.
2. Sesar *Palu-Koro* di Sulawesi.
3. Sesar *Digul* yang ke barat menjadi sesar *Tarera Aiduan* di Papua.

2.2 KEGEMPAAN PULAU SUMATRA

Aktivitas gempa di Indonesia relatif cukup tinggi, dalam rentang waktu tahun 1897-2000 terdapat sekitar 8237 kejadian gempa dengan magnitude $M > 5$. Lokasi episenter dari gempa-gempa tersebut dapat dilihat pada Gambar.



Gambar 2.6 Aktivitas gempa di Indonesia

(Masyhur Irsyam dkk, "Pembuatan peta gempa Indonesia dan *ground motion* untuk wilayah Jakarta", *Seminar Nasional UNTAR 2005*)

Kejadian gempa yang terjadi didekat batas pertemuan antara lempeng samudra yang menujam masuk ke bawah lempeng benua dikalsifikasikan sebagai *zona subduksi*. *Zona subduksi* Sumatra terbentang dari Selat Sunda ke arah utara hingga Laut Andaman. Lempeng samudera yang menujam masuk ke bawah lempeng benua .



Gambar 2.7 Zona Subduksi Sumatra

Pada zona ini memiliki usia relatif muda, yaitu sekitar 46 juta tahun dibandingkan dengan *zona subduksi* Jawa yang berusia sekitar 150 juta tahun. Lempeng samudera ini juga relatif tipis dan ringan karena faktor usia yang relatif muda, sehingga cenderung berada kedalaman yang relatif dangkal dibandingkan lempeng yang memiliki usia lebih tua pada zona subduksi Jawa¹. Kegempaan pada zona subduksi Sumatra terdiri dari kejadian gempa yang terjadi dekat palung pertemuan lempeng hingga kedalaman sekitar 250 km dengan sudut penunjaman sekitar 30° hingga 40°. Menurut LIPI, dorongan Lempeng *Indo-Australia* terhadap bagian utara Sumatra adalah 52 mm/tahun dan 60 mm/tahun pada bagian selatan Sumatra.

¹ Berggren et. al.,1984

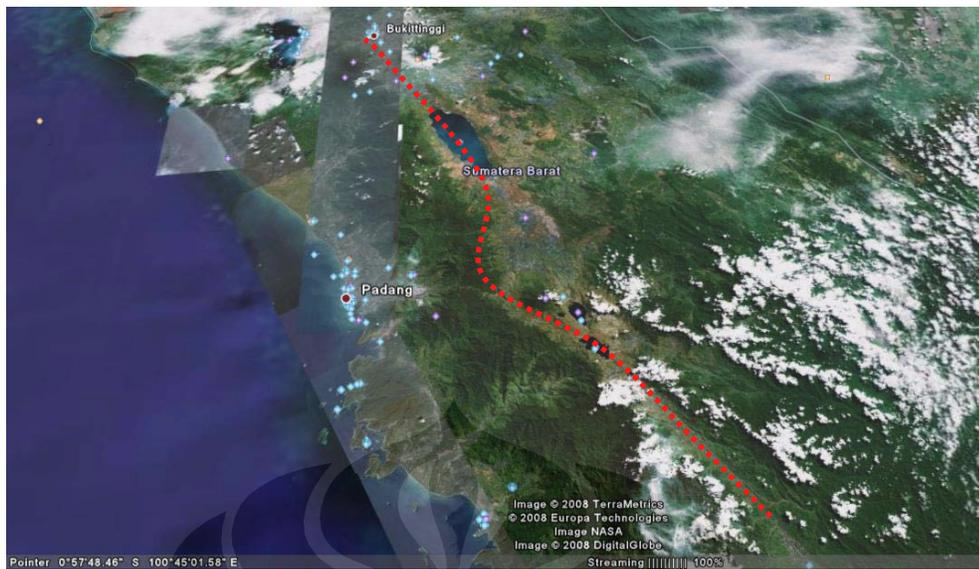


Gambar 2.8 Dorongan Lempeng *Indo-Australia* terhadap bagian utara Sumatra (Kompas, 31 Desember 2004)

Patahan Geser Sumatra, merupakan indikasi saling berpapasan (*simple-shear*) atau saling bergeser antara dua lempengan kerak bumi dengan tanpa adanya pembentukan atau penghancuran kerak bumi. Oleh karena itu, patahan ini dengan dibatasi oleh suatu patahan mendatar yaitu di daerah "*transform fault boundary*".

Patahan ini merentang mulai dari Banda Aceh sampai ke Teluk Semangko di Selat Sunda, dengan panjang sekitar 1650-1700 km. Data geologi, geomorfologi, dan geofisika memperlihatkan indikasi bahwa sesar ini bergerak sampai sekarang dengan memperlihatkan gerakan geser. *Lineaments* Sesar Geser Sumatra yang melintas kota Bukittinggi di Ngarai Sianok. Patahan ini diantaranya telah menggeserkan jalan sepanjang 2 sampai 4 meter dalam peristiwa Gempa bumi Danau Singkarak tahun 1943².

² Untung et al, 1986



Gambar 2.9 Patahan *Balah Semangko*

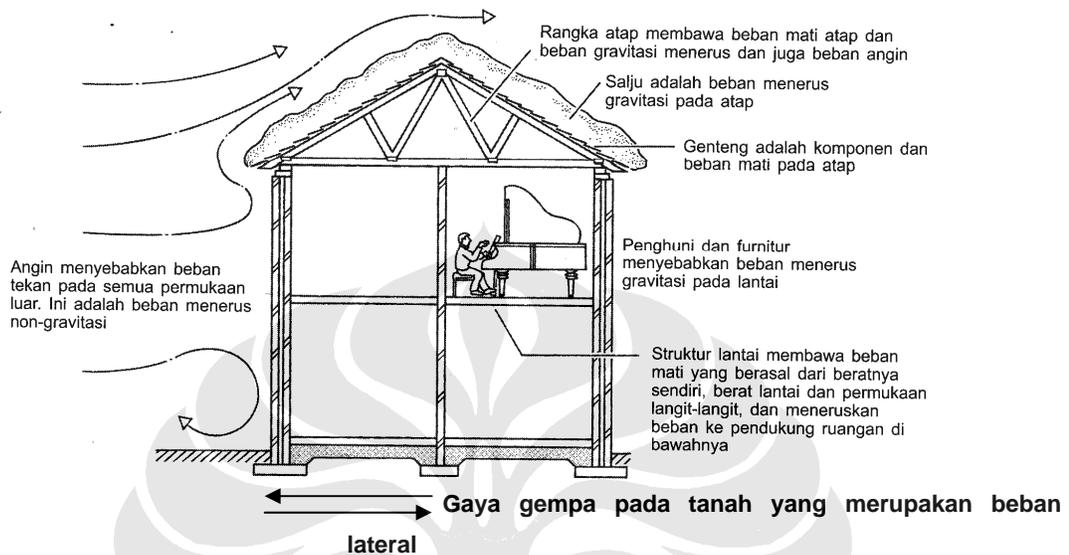
Zona subduksi Sumatra diindikasikan sebagai zona dengan aktivitas gempa yang tinggi. Hal ini dapat dilihat dari catatan kejadian gempa historis dimana pada zona ini tercatat sejumlah kejadian gempa besar ($M > 8.0$) adalah gempa tahun 1833 ($M = 8.8$), Gempa tahun 1861 ($M = 8.5$), Gempa Bengkulu pada tanggal 4 Juni 2000, Gempa gempa Tapanuli tahun 1892 dan Gempa Aceh 2004 ($M = 9$). Beberapa kejadian gempa historis dengan $7.5 < M < 7$ juga dilaporkan oleh *Newcomb & McCann* (1987), gempa Liwa tahun 1933 ($M = 7.2$), gempa Liwa tahun 1993 ($M = 7.5$). Sejumlah kejadian gempa sedang ($6 < M < 7$) juga dilaporkan gempa 1833 adalah Pulau Enggano, Padang Panjang tahun 1926 ($M = 6.75$), gempa Tes tahun 1952 dan gempa Aceh tahun 1964 ($M = 6.7$)

2.3 PEMBEBANAN

Beban-beban pada suatu konstruksi dibagi dalam dua tipe: beban mati dan beban hidup (atau berguna). Beban mati adalah beban-beban yang secara umum permanen dan konstan selama masa pakai konstruksi. Beban hidup, sebaliknya, adalah tidak kekal dan berubah-ubah besarnya, sebagai contoh yaitu

Universitas Indonesia

beban akibat angin atau akibat orang-orang yang menempati seperti ilustrasi gambar dibawah ini.



Gambar 2.10 Prediksi beban maksimum yang akan terjadi.

Evaluasi beban merupakan proses yang kompleks tetapi biasanya tersedia pedoman perencanaan yang berupa standar, dimana prosedur dan asumsi dalam perencanaan serta besarnya beban rencana harus mengikuti ketentuan sebagai berikut :

1. Ketentuan mengenai perencanaan dalam tata cara ini didasarkan pada asumsi bahwa struktur direncanakan untuk memikul semua beban kerjanya (beban hidup dan beban mati).
2. Beban kerja diambil berdasarkan SNI-03-1727-1989F, Tata cara perencanaan pembeban untuk rumah dan gedung, atau penggantinya.
3. Dalam perencanaan terhadap beban angin dan gempa (beban lateral), seluruh bagian struktur yang membentuk kesatuan harus direncanakan berdasarkan tata cara ini dan juga harus memenuhi SNI-1726-1989 (terbaru, SNI 03-1726-2002), Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk rumah dan gedung atau penggantinya.

Untuk analisa pembebanan struktur yang akan dihitung pada penelitian ini yaitu beban kerja (beban hidup dan beban mati) dan beban lateral (beban gempa). Adapun pengertian dari masing-masing beban yaitu :

Beban Kerja

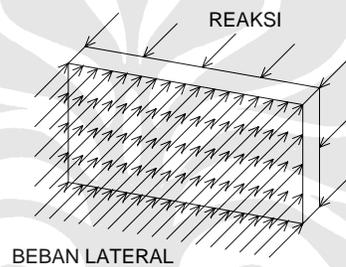
Dari macam perhitungan struktur yang ada faktor beban kerja perlu dimasukan karena hal tersebut merupakan faktor umum suatu konstruksi dalam memikul gaya gravitasi. Pembeban ini dapat diambil dari peraturan yang berlaku di Indonesia, SNI 03-1727-1989F, Tata Cara Perencanaan Pembebanan Untuk Rumah dan Gedung. Beban kerja dapat dibagi secara umum atas dua beban antara lain :

1. Beban Mati, adalah berat dari semua bagian dari suatu gedung yang bersifat tetap, termasuk segala unsur tambahan, penyesuaian-penyesuaian, mesin-mesin serta peralatan tetap yang merupakan bagian yang tak terpisahkan dari gedung itu. Berat sendiri dari bahan-bahan bangunan penting dan dari beberapa komponen gedung yang harus ditinjau didalam menentukan beban mati dari suatu gedung.
2. Beban hidup, ialah semua beban yang terjadi akibat penghuni atau penggunaan suatu gedung dan kedalamnya termasuk beban-beban yang dapat berpindah, mesin-mesin serta peralatan yang tidak merupakan bagian yang tak terpisahkan dari gedung dan dapat diganti selama masa hidup dari gedung itu, sehingga mengakibatkan perubahan dalam pembebanan lantai dan atap tersebut. Khusus pada atap kedalam beban hidup dapat termasuk beban yang berasal dari air hujan, baik akibat genangan maupun akibat tekanan jatuh (energi *kinetic*) butiran air. Kedalam beban hidup tidak termasuk beban angin, gempa dan beban khusus.

Beban lateral

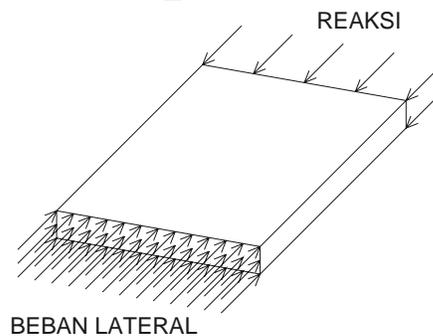
Untuk mengetahui sebuah bangunan dapat mempertahankan diri dari efek beban lateral dari angin dan gaya gempa diperlukan pengetahuan terhadap perilaku dari aplikasi dari kondisi gaya terhadap gaya yang ditransfer terhadap sistem struktur dalam menahan gaya lateral.

Perilaku beban lateral dapat digambarkan dengan simplikasi elemen bangunan sederhana dibawah efek lateral. Ketahanan elemen umum suatu struktur terhadap gaya lateral yang dapat direspon kesetimbangannya, yaitu sebagai berikut :



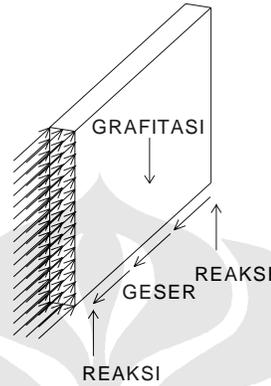
Gambar 2.11 Respon Kesetimbangan Dinding *Eksisting*

Dinding *exterior*, berfungsi sebagai elemen jangkau sederhana, dibebankan dengan tekanan normal merata terhadap permukaan *vertikal* dan mengirim reaksinya ke setiap perletakkannya. Namun dalam beberapa kasus, gaya pada struktur gedung diteruskan ke elemen struktur beberapa lantai dibawah dan diatasnya.



Gambar 2.12 Respon Kesetimbangan *Diafragma Horizontal*

Diafragma horizontal, berfungsi sebagai elemen jangkauan sederhana, dibebankan dengan tekanan normal terhadap permukaan tebal *horizontal* dan mengirim reaksinya ke setiap perletakkannya.

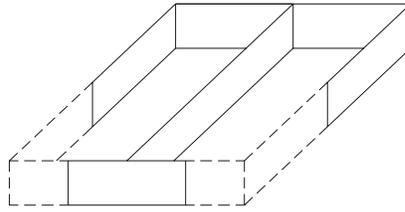


Gambar 2.13 Respon Kesetimbangan *Difragma Vertikal*

Diafragma vertikal, berfungsi sebagai elemen geser, dibebankan dengan tekanan normal merata terhadap permukaan tebal vertikal dan mengirim beban gravitasi, gaya geser dan reaksinya kesetiap perletakkannya.

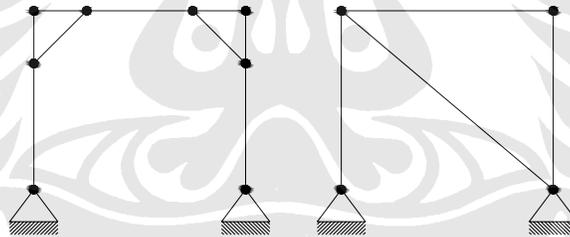
Dalam visualisasi gaya diatas, untuk bangunan gedung pada umumnya diasumsikan mengalami pembebanan dominan terhadap gaya lateral oleh beban angin dan atau beban gempa. Bangunan gedung lebih tahan terhadap beban vertikal seperti gaya gravitasi dikarenakan perhitungan dasar bangunan dianalisa untuk menahan gaya vertikal, namun kondisi demikian memiliki perlemahan dalam mendukung gaya lateral yang terbebani oleh struktur.

Dari pengalaman *engginering* terdahulu struktur dapat dikelompokkan menjadi 5 macam sistem struktur yang tahan terhadap gaya lateral :



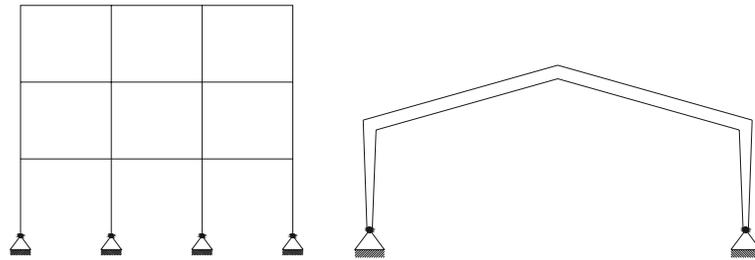
Gambar 2.14 Sistem *Box* atau *Panelized*

Sistem *box* atau *Panelized*, memiliki kombinasi terhadap elemen panel horizontal dan vertikal. Sebagian besar struktur menggunakan diafragma horizontal, seperti dengan adanya konstruksi atap dan lantai. Tipe sistem lain biasanya memiliki variasi dari *elemen bracing vertikal*. Dalam keadaan tertentu struktur atap harus ditahan dengan rangka batang atau yang dimaksudkan ketika memiliki banyak bukaan atap atau atap dak dengan sedikit atau tidak kekuatan diafragmanya.



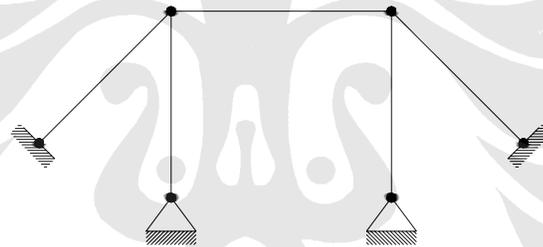
Gambar 2.15 Sistem *Internally Braced Frames*

Sistem *Internally Braced Frame*, dibutuhkan ketika struktur yang dirakit tipikal dan elemen balok yang sekitarnya tidak stabil dibawah pengaruh beban lateral, yang mana struktur rangka tanpa menggunakan bracing. *Shear wall* (dinding geser) harus menggunakan bracing ini, dalam beberapa kasus fungsi sistem *box* , meskipun ini struktur rangka, hal tersebut diperlukan menggunakan diagonal member. *X-bracing*, *knee Bracing*, *struts* dan yang lainnya untuk menghasilkan stabilitas struktur rangka persegi.



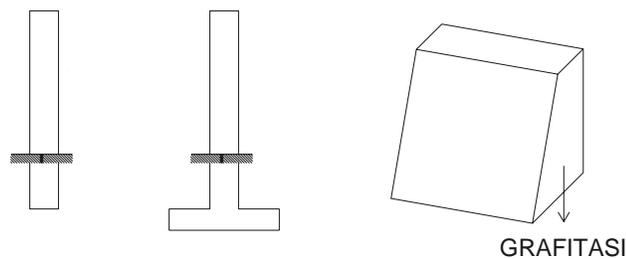
Gambar 2.16 Sistem *Rigid Frames*

Sistem *rigid frames*, meskipun sistem ini jarang digunakan karena faktor ekonomis yang cukup mahal, namun teknik tersebut biasanya menghasilkan tingkat fleksibilitas yang baik dalam menahan sistem beban lateral, hal tersebut guna menahan momen sambungan antara setiap elemen rangkai struktur.



Gambar 2.17 Sistem *Eksternally Braced Frames*

Sistem *Externally Braced Frame*, menggunakan *guys*, *struts*, *buttresses* dan lainya yang dipasang diluar dari struktur atau struktur akhirnya.



Gambar 2.18 Sistem *self-stabilizing elements*

Sistem *self-stabilizing elements* dinding penahan, *flagpoles*, *pyramid*, *tripods* dan lainnya, pada stabilitas dihasilkan dari formasi dasar dari struktur. Biasanya dapat dilihat dari bentuk struktur yang simetris, stabil, beban sendiri yang besar dan lainnya.

Dari setiap sistem diatas memiliki variasi tergantung dari jenis material, formasi struktur, detail konstruksi dan lainnya. Dari variasi diatas menghasilkan karakteristik yang berbeda-beda, meskipun setiap dari tipe dasar memiliki beberapa properties yang berbeda. Properties yang penting berhubungan dengan kekakuan atau katahanan dari deformasinya.

Kondisi bangunan yang menahan beban lateral secara major, didominasi oleh dua beban lateral yaitu : beban angin dan gempa. Penjelasan dari setiap beban akan dijelaskan dibawah ini :

1. Beban angin, ialah semua beban yang bekerja pada gedung atau bagian gedung yang disebabkan oleh selisih dalam tekanan udara. Angin memiliki macam kondisi, antara lain : *Tornadoes*, *Hurricanes*, *Local Peculiar Wind*, *Sustained Local Wind*. Dari macam kondisi tersebut secara umum memberikan efek antar lain : *Direct positive Pressure*, *Aerodynamic Drag*, *Negative Pressure* dan kemudian tiga efek tersebut dikombinasikan untuk menghasilkan beban angin pada struktur dengan arah dan besaran tertentu. Sesuai dengan pengkajian dari lokasi setiap daerah di Indonesia dan mengadopsi berbagai referensi maupun peraturan negara lain, Indonesia telah merangkum kondisi umum kecepatan angin sesuai dengan syarat geologi daerah tertentu, sesuai dengan peraturan yang berlaku SNI-03-1727-1989f, Tata cara perencanaan pembebanan untuk rumah dan gedung.
2. Beban Gempa, ialah beban yang bekerja pada gedung atau bagian gedung yang menirukan pengaruh dari gerakan tanah akibat gempa itu. Dalam hal pengaruh gempa pada struktur tersebut yang terjadi oleh gerakan tanah akibat gempa itu.

2.4 KOMBINASI BEBAN

Berbagai kombinasi harga karakteristik dari beban mati W_{DL} , beban hidup W_{LL} , beban angin W_{WD} dan faktor-faktor keamanan beban harus dipertimbangkan untuk pembebanan konstruksi. Faktor-faktor keamanan beban yang ditetapkan oleh SNI-Tata Cara Perencanaan Konstruksi Kayu dibahas dalam Pasal 6.2.2, dan untuk keadaan batas ultimit, kombinasi pembebanan yang harus dipertimbangkan adalah sebagai berikut:

$$1. U = 1,4 W_{DL} \dots\dots\dots(2.3)$$

$$2. U = 1,2 W_{DL} + 1,6 W_{LL} + 0,5 (A \text{ atau } R) \dots\dots\dots(2.4)$$

$$3. U = 1,2 W_{DL} + 1,6 (A \text{ atau } R) + (0,5L \text{ atau } 0,8W_{WD}) \dots\dots\dots(2.5)$$

$$4. U = 1,2 W_{DL} + 1,3W_{Dw} + 0,5L + 0,5 (A \text{ atau } R) \dots\dots\dots(2.6)$$

$$5. U = 1,2 W_{DL} + 0,5 W_{LL} \pm 1,0 E \dots\dots\dots(2.7)$$

$$6. U = 0,9 W_{DL} \pm (1,3W_{DL} \text{ atau } 1,0 E) \dots\dots\dots(2.8)$$

Keterangan :

- Faktor beban untuk W_{WIND} boleh dikurangi menjadi 1,3 bilamana beban angin W_{WIND} belum direduksi oleh faktor arah.
- Faktor beban untuk W_{LL} boleh direduksi menjadi 0,5 kecuali untuk ruangan pertemuan, dan semua ruangan yang beban hidupnya W_{LL} -nya lebih besar dari pada 500 kg/m^2 .

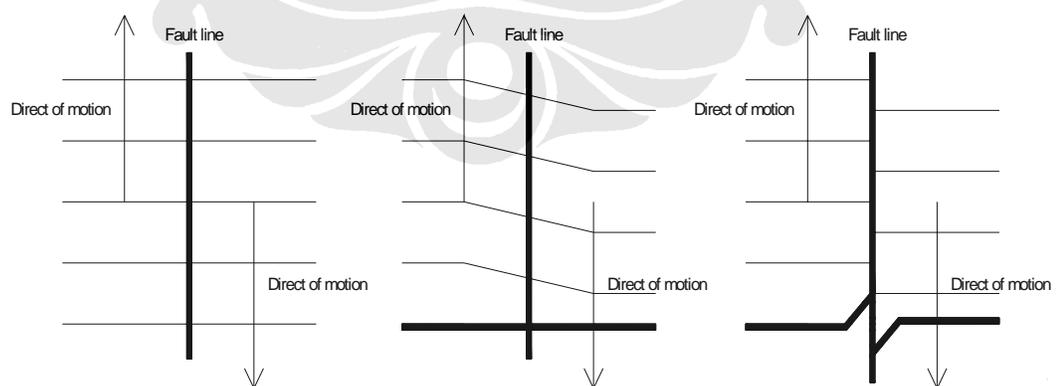
Dimana :

- U = Kuat Perlu.
- W_{DL} = Beban/Muatan Mati.
- W_{LL} = Beban/Muatan Hidup.
- W_{WD} = Beban/Muatan Angin.
- A = Beban Atap.
- R = Beban Hujan.
- E = Beban/Muatan Gempa.

2.5 PEMBEBAN GEMPA

Dalam memperhitungkan beban gempa yang diasumsikan akan dipikul oleh struktur bangunan, dasar-dasar dari perencanaan struktur terhadap beban dinamis yang direspon oleh bangunan terhadap kondisi gempa perlulah diperhatikan. Perhitungan respon dinamis dari suatu struktur bangunan terhadap beban gempa dapat dibagi menjadi dua bagian besar, yaitu perhitungan respons riwayat waktu (*Time history analysis*) yang biasanya dilakukan dengan memakai analisa numerik, serta perhitungan dengan cara analisa ragam spektrum respon (*Respon Spectra Analysis*). Untuk mempelajari proses perencanaan struktur terhadap gempa tentu diperlukan pengetahuan tentang gempa itu sendiri. Gempa-gempa besar ini biasanya merupakan *shallow focus earthquake* yang terjadi karena suatu proses tektonik. Salah satu teori yang banyak dianut untuk menjelaskan *shallow earthquake* ialah *Elastic Rebound Theory*.

Teori Elastic Rebound ini diusulkan oleh *HF. Reid* berdasarkan studi terhadap ratakan yang terjadi di *San Andreas Fault* pada waktu terjadi gempa *San Fransisco* pada tahun 1906. Menurut teori tektonik lempeng, kerak bumi terdiri atas beberapa lempeng yang bergerak satu terhadap lainnya. Batas antara dua buah lempeng dinamakan retakan kerak bumi atau *fault*.



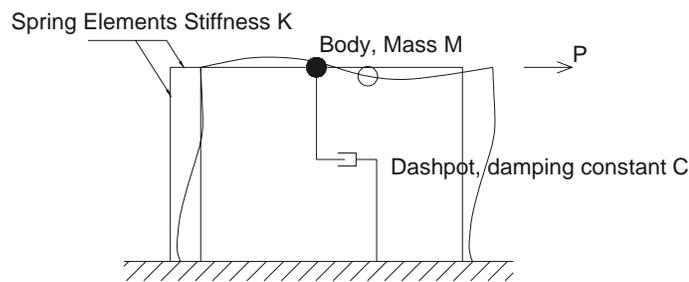
Gambar 2.19 Proses Terjadinya Patahan Teori *Elastic Rebound*

Menurut teori *Elastic Rebound*, sebab dari gempa adalah adanya pelepasan *Elastic-Strain* energi yang terjadi dengan tiba-tiba. *Elastic Strain Energy* ini tertumbuk karena adanya gerakan antara lempengan kerak bumi. Bila pada suatu tempat tertentu *Fracture Strength* dari kerak bumi terlampaui, titik ini akan melepaskan *elastic strain energy* yang merupakan penyebab terlampauinya *Fracture Strength* dititik-titik lainnya yang dapat dilihat pada gambar diatas. Dengan demikian maka akan terjadi pelepasan energi yang besar sekali yang mengakibatkan terjadi gempa.

Akan tetapi, pentingnya masalah gempa bumi kini telah diperluas melebihi kebutuhan mendesak untuk konstruksi tahan gempa pada daerah seismik. Gempa bumi secara sistematis berakibat atas kesalahan yang dibuat dalam perencanaan dan konstruksi. Meskipun kesalahan kecil dari aspek teknik gempa bumi inilah yang membuatnya sebagai tantangan dan sangat menarik dan memberikan nilai pendidikan jauh melebihi sarananya yang langsung.

2.6 KESETIMBANGAN DINAMIK

Struktur yang mengalami pembebanan dinamik diperlukan membangun persamaan perhitungan dengan menggunakan metode elemen hingga, dimana elemen yang diamati diperlakukan menjadi diferensial nodal dimana nodal tersebut dimasukkan dalam titik koordinat dari struktur sehingga dapat mengetahui perpindahan nodal diferensial secara keseluruhan struktur. Dalam penjelasannya dapat diperhatikan pada model sistem sederhana pada struktur yang memiliki derajat kebebasan tunggal sebagai berikut :

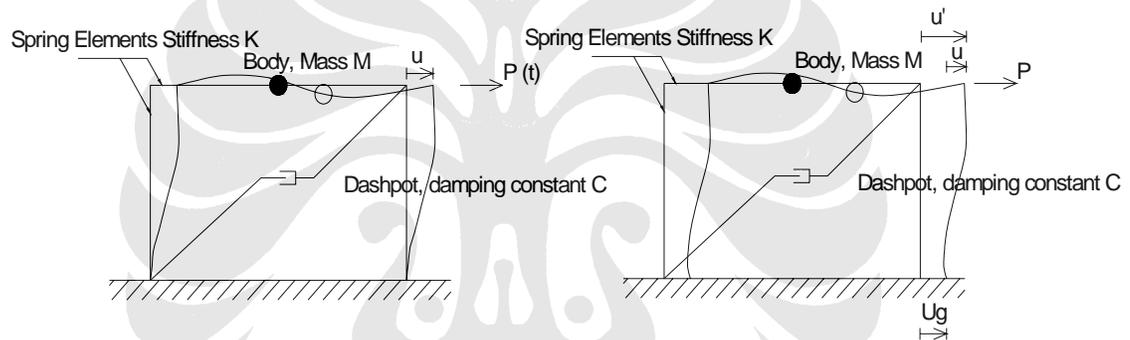


Gambar 2.20 Modelisasi Derajat Kebebasan Tunggal

2.6.1 Sistem Derjat Kebebasan Tunggal (SDOF)

Sifat-sifat fisik yang penting dari setiap sistem struktur yang elastik secara linier yang dikenakan pada beban dinamik meliputi massa, sifat elastik (kelenturan atau kekakuan), mekanisme kehilangan energi atau peredaman dan sumber-luar eksitasi atau pembebanannya. Dalam model yang paling sederhana dari suatu sistem SDOF, masing-masing sifat tersebut dianggap terpusat pada elemen fisik tunggal.

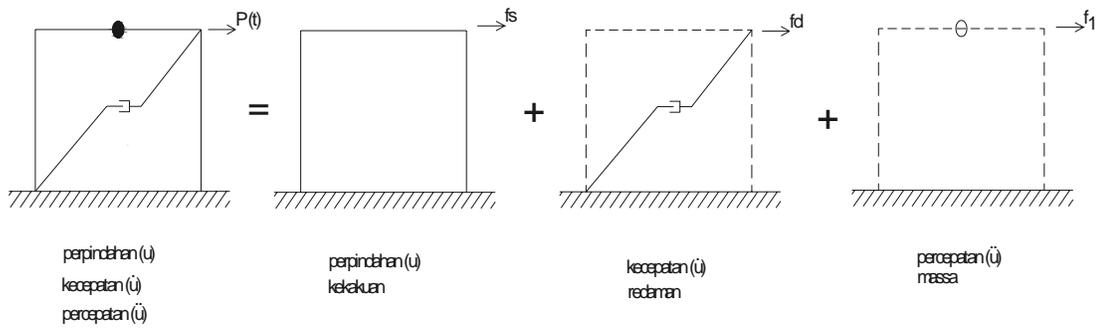
Sistem tersebut dipertimbangkan pada gambar dibawah ini. Itu terdiri dari massa (M) yang terkoordinasi pada tingkat atap, dengan rangka massa kecil memiliki kekakuan pada sistem dan redaman pelekat (*dashpot*).



Gambar 2.21 Macam Modelisasi SDOF

Dari pemodelan diatas dapat disuperposisikan dengan menggunakan hukum kesetimbangan Newton kedua, dimana gaya-gaya yang dialami struktur :

- $P(t)$: Gaya luar yang akan didistribusikan keseluruhan struktur.
- $f_1 = m \cdot \ddot{u}$: Gaya luar komponen massa terhadap percepatan gerakan tanah.
- $f_D = c \cdot \dot{u}$: Gaya luar komponen redaman terhadap kecepatan gerakan tanah.
- $f_s = k \cdot u$: Gaya luar komponen kekakuan terhadap perpindahan gerakan tanah.



Gambar 2.22 Modelisasi Keseimbangan SDOF dinamik

$$P(t) = fs = k.u + fd = c.u + f_1 = m.u \dots\dots\dots(2.9)$$

Dari persamaan konstanta differensial keseimbangan rumusan dinamik untuk sistem derajat kebebasan tunggal terhadap gaya luar didapatkan rumus :

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \dots\dots\dots(2.10)$$

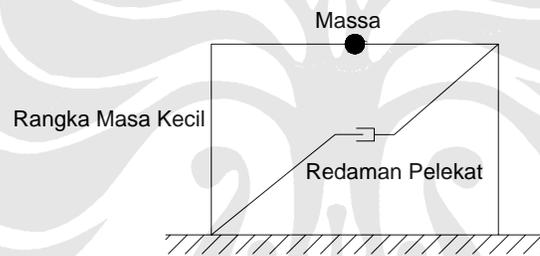
Massa keseluruhan (M) dari sistem ini dicakup dalam balok tegar terhadap percepatan pergerakan (\ddot{u}) . Rol-rol membatasi balok ini terkendala sehingga ia hanya dapat bergerak dalam translasi sederhana. Tahanan elastik terhadap perpindahan diberikan oleh pegas tanpa bobot dengan kekakuan (k) terhadap perpindahan oleh redaman (c) terhadap kecepatan pergerakan (\dot{u}). Mekanisme pembebanan luar yang menimbulkan respon dinamik pada sistem dengan berbentuk beban $p(t)$ yang berubah menurut waktu.

Ada faktor lain yang perlu dipertimbangkan antara lain terhadap deformasi struktur gerakan tanah, dimana deformasi massa bangunan dapat mengakibatkan ketidak-nyamanan penghuni bangunan maupun kondisi didalamnya. Hal tersebut disyaratkan pada bangunan-bangunan khusus yang diberikan deformasi ijin yang diperbolehkan pada struktur, seperti bangunan rumah sakit, turbin nuklir, tempat radioaktif, peralatan sensitif dan bangunan khusus lainnya. Getaran umumnya terjadi ada 2 macam yaitu :

2.6.1.1 Getar Bebas

Struktur dapat dibayangkan mengalami getaran bebas dimana struktur tersebut distribusikan dari posisi persamaan statik dan diperbolehkan bergetar tanpa memberikan pengaruh dinamik dalamnya.

Ketentuan struktur mengenai getaran bebas memiliki karakteristik gaya luar $P(t)$ bernilai nol. Penyelesaian umum berdasarkan penyelesaian partikular dan komplementer (penyelesaian homogen, bagian kanan tanda sama dengan adalah nol). Secara rumusan keadaan ini dapat diartikan sebagai gerakan yang terjadinya tanpa adanya gaya luar. Dapat digambarkan sebagai berikut.



Gambar 2.23 Modelisasi SDOF Getaran Bebas

Persamaan umum dinamika getaran bebas menjadi :

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \dots\dots\dots(2.11)$$

Persamaan diatas dapat diselesaikan dengan mengasumsikan getaran bebasnya adalah getaran harmonik sederhana :

$$U = U_0 \sin(\omega t - \phi) \dots\dots\dots(2.12)$$

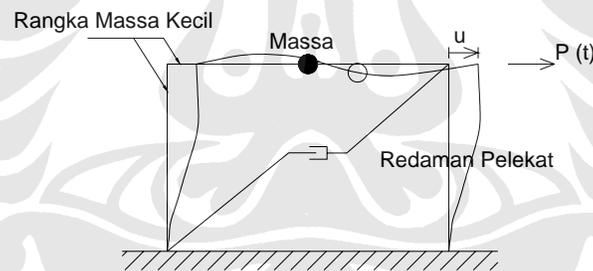
Jika persamaan ini dimasukkan kedalam persamaan (rumus 2.11) dinamikanya maka akan dihasilkan persoalan *eigen* :

$$(k - \omega_n^2 m)\phi_n = 0 \dots\dots\dots(2.13)$$

Dari penyelesaian rumus diatas menghasilkan variabel dinamik yang diperlukan dalam perhitungan, antara lain : frekuensi alami dan pola getar.

2.6.1.2 Getar Paksa

Struktur dapat dibidang mengaloi getaran paksa dimana terdapat gaya paksaan yang mangganggu struktur berbentuk beban luar $P(t)$ struktur tersebut distribusikan secara dinamik dalamnya yang digambarkan dibawah ini.



Gambar 2.24 Modelisasi SDOF Getaran Paksa

Persamaan umum dimanik getaran paksa menjadi :

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \dots\dots\dots(2.14)$$

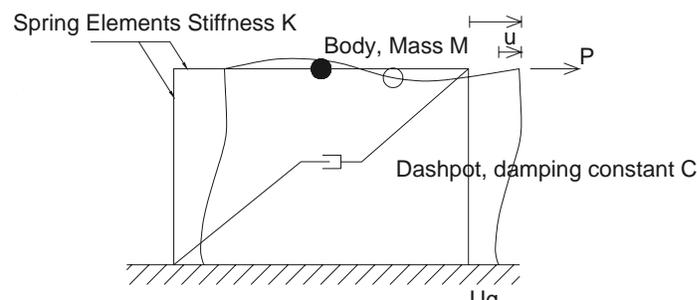
Apabila keadaan awal dari getaran paksa ini tidak sama dengan nol, maka penyelesaian persamaan diatas adalah penyelesaian umum yang terdiri dari penyelesaian partikulir dan komplementer. Bila

keadaan awal dari getaran paksa ini nol maka penyelesaian persamaan hanya terdiri dari penyelesaian partikular, dimana penyelesaian ini untuk bentuk-bentuk dari $P(t)$, misalnya *polynomial* atau fungsi harmonis. Beban yang membebani struktur berupa beban impuls yang merupakan gaya yang cukup besar yang akan terjadi secara tiba-tiba dan berlangsung dalam waktu yang relatif singkat. Dan beban lainnya ialah beban sembarang yang merupakan rangkaian beban *impuls* yang berbeda besaran. Dalam menyelesaikan persamaan diatas dapat menggunakan dengan persamaan *differensial*, dimana biasanya menggunakan *Integrasi Duhamel* yang merupakan fungsi sederhana yang merupakan integrasi terhadap waktu.

$$u(t) = \frac{1}{m \omega_d} \int P(\tau) e^{-\xi(t-\tau)} \sin[\omega_D(t-\tau)] d\tau \dots\dots\dots(2.15)$$

Persamaan kesetimbangan dinamik dapat diselesaikan dengan dua metode pendekatan, yaitu pendekatan statik dan dinamik dengan hubungan variabel karakteristik dinamik dan reaksi respon dinamik.

Dalam penulisan ini gaya dinamik yang dibahas berasal dari percepatan tanah (\ddot{U}_g) akibat gempa bumi. Dimana getaran tanah tersebut menyebabkan pergerakan tumpuan (*support expansion*) yang digambarkan dibawah ini.



Gambar 2.25 Modelisasi SDOF perpindahan perletakan

Persamaan umum dinamikanya berubah menjadi :

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) \dots\dots\dots(2.16)$$

Dalam menyelesaikan persamaan diatas juga dapat menggunakan dengan persamaan differensial atau yang sejenis lainnya.

2.6.2 Sistem Drajat Kebebasan Majemuk (MDOF)

Pada umumnya, respon dinamik dari struktur tidak dapat diuraikan secara memadai dengan suatu model SDOF, respon biasanya mencangkup variasi waktu dari bentuk perpindahan demikian pula amplitudonya. Sifat-sifat seperti ini hanya dapat diuraikan dalam bentuk lebih dari satu derajat kebebasan. Jumlah derajat kebebasan (komponen-komponen perpindahan) yang akan ditinjau terserah kepada kebijaksanaan analisis, makin besar jumlah yang diberikan makin baik pendekatan sifat dinamik yang sebenarnya, tetapi dalam banyak hal hasil-hasil yang sangat baik dapat diperoleh dengan hanya dua atau tiga derajat kebebasan saja. Dengan banyaknya derajat kebebasan dari satu kesatuan struktur maka dalam persamaan dinamik dibuat dalam bentuk matriks, sebagai berikut :

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{P(t)\} \dots\dots\dots(2.17)$$

2.6.3 Metode Analisa Bangunan Tahan Gempa

Beban gempa bumi merupakan beban yang unik diantara tipe beban yang harus ditinjau karena gempa bumi yang besar umumnya akan menyebabkan tegangan dan lendutan yang lebih besar pada berbagai komponen kritis struktur dari pada semua beban gabungan

lainya, meskipun kemungkinan terjadi suatu gempa bumi selama masa pakai struktur yang diharapkan sangat kecil.

Pembebanan yang diperhitungkan pada peraturan mengacu terhadap hubungan antara gabungan beban ekstrim yang dipikul bangunan dan kemungkinan terhadap daya tahan gempa yang aktif, biasanya diambil strategi yang didasarkan pada dua kriteria perancangan :

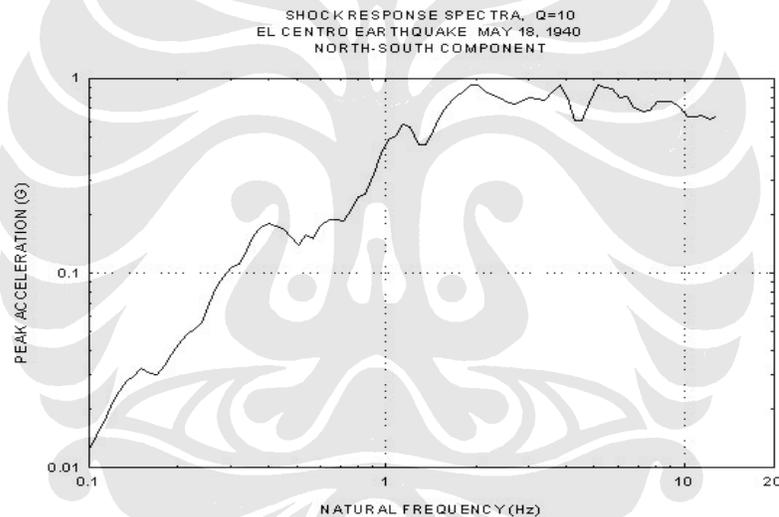
1. Gempa bumi ukuran sedang yang mungkin cocok diaplikasikan dibangunan yang diambil sebagai dasar perencanaan. Bangunan harus diseimbangkan agar mampu menahan intensitas gerakan tanah ini tanpa kerusakan yang berarti terhadap struktur dasar.
2. Gempa bumi yang paling dasyat yang dimungkinkan dapat terjadi dilapangan dipakai sebagai pengujian keamanan struktur. Oleh karena gempa bumi ini sangat tidak diinginkan terjadi., perancangan secara ekonomis dibenarkan memberikan izin rancangan yang dapat menyebabkan kerusakan struktur yang berarti, akan tetapi keruntuhan dan kematian dapat harus dihindari.

2.6.3.1 Analisa Dinamik

Dalam rangka menerapkan karakteristik gerakan tanah dari gempa bumi rancangan dan gempa bumi maksimum yang mungkin terjadi pada suatu lapangan bangunan tertentu , perlu pertama-tama untuk mempelajari riwayat gempa bumi regional selama periode dimana setiap tipe informasi seismik diperoleh. Hanya dari data yang ditetapkan dari rekaman gempa menjadikan suatu taksiran terhadap kekuatan gempa bumi yang bisa diperkirakan mempengaruhi lapangan dan frekuensinya yang mungkin terjadi antara suatu kejadian lainnya. Oleh karena gempa bumi relatif jarang terjadi, maka data statistik yang ada merupakan taksiran pendekatan dari seismisitas lapangan. Disamping itu data pendukung lainnya

dapat diperoleh dari studi geologi lapangan, yang membantu untuk menempatkan patahan-patahan aktif yang kuat dan menetapkan karakteristik tektonik struktur geologi lokal.

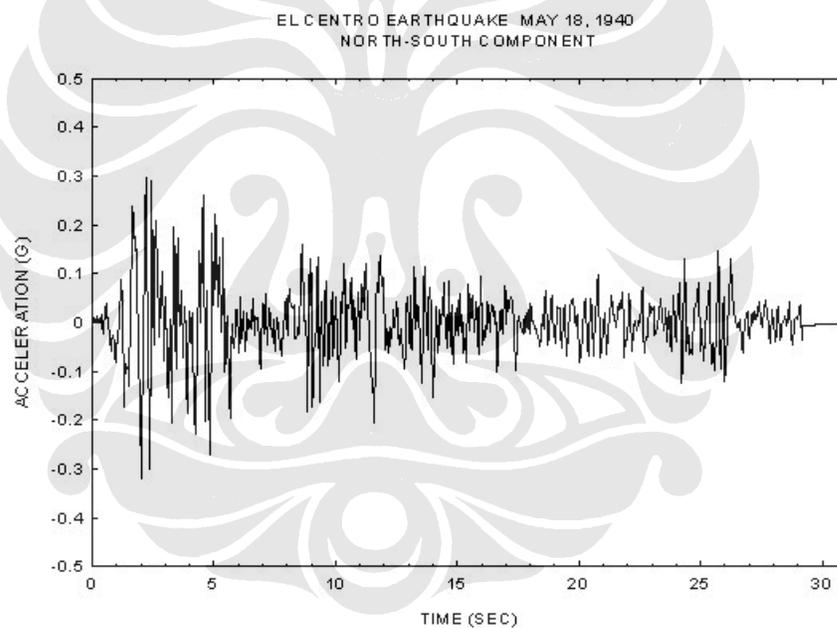
Salah satu cara yang paling sederhana untuk menetapkan gerakan tanah yang diharapkan adalah dengan menggunakan akselerogram dari suatu gempa bumi yang harus berlalu yang mempunyai besar yang pantas dan telah dicatat pada suatu jarak yang bersangkutan. Misalnya, catatan gerakan yang kuat dari gempa bumi El Centro, 18 Mei 1940 NS, merupakan catatan yang bisa dibilang universal digunakan didunia.



Gambar 2.26 *Shock Response Spectra El- Centro*



Gambar 2.27 Gambar Keadaan Setelah Gempa *El-Centro*



Gambar 2.28 *Time History El-Centro North-South Component*

Digunakan pada berbagai keadaan untuk menggambarkan gerakan gempa bumi rancangan berkekuatan 7,0 pada jarak sekitar 7 km. Akan tetapi pengalaman telah menunjukkan bahwa mungkin ada perbedaan drastis antara catatan-catatan gempa bumi yang mempunyai kekuatan dan jarak yang sama, dan respon struktur yang

Universitas Indonesia

dihasilkan oleh catatan tunggal menetapkan gempa bumi rancangan memberikan hasil yang sangat tidak tentu mengenai pengertian respon yang dihasilkannya.

Terdapat dua macam metode yang digunakan dalam analisa dinamik, yaitu metode analisa modal yang diselesaikan dengan metode integrasi langsung yang diselesaikan dengan Analisa Riwayat Waktu (*Respon History Analysis*) dan Analisa Spektrum Respon (*Respon Spectrum Analysis*).

2.6.3.1.a Analisa Riwayat Waktu (*Respon History Analysis*)

Pada analisa riwayat waktu sebenarnya metode yang lebih mendekati dalam perancangan struktur dimana metode ini mengambil nilai percepatan tanah maksimum dari macam-macam catatan respon gempa setiap interval waktu. Metode ini sangat cocok pada perhitungan struktur *non-linier* maupun *linier elastis*. Persamaan dinamik yang digunakan adalah :

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) \dots\dots\dots(2.18)$$

Persamaan diatas dapat diselesaikan dengan

$$u(t) = \sum_{n=1}^N \phi_n u_n(t) \dots\dots\dots(2.19)$$

$$m_i = \sum_{n=1}^N \Gamma_n m u_n \dots\dots\dots(2.20)$$

Menghasilkan persamaan modal

$$\ddot{D}_n + 2\zeta_n \omega_n \dot{D}_n + \omega_n^2 D_n = -\ddot{u} g(t) \dots\dots\dots(2.21)$$

$$A_n(t) = \omega_n^2 D_n(t) \dots\dots\dots(2.22)$$

Dengan total respons umum ternormalisasi

$$r(t) = \sum_{n=1}^N r_n(t) = \sum_{n=1}^N r_n^{st} A_n(t) \dots\dots\dots(2.23)$$

Adapun lokal respons gempa yang diambil harus mewakili lokasi bangunan yang akan didisain terhadap jenis tanah, intensitas lokasi gempa, sehingga dapat mendekati nilai percepatan gempa maksimum sebenarnya .

2.6.3.1.b Analisa Spektrum Respon (*Respon Spectrum Analysis*)

Walaupun spektrum respon memberikan suatu dasar yang memuaskan bagi keseimbangan struktur selama tahap rancangan awal, umumnya perlu untuk mendapatkan suatu uraian eksplisit dari gerakan tanah sebelum penyelesaian rancangan struktur yang besar. Adapun lokasi respon gempa maksimum sebenarnya.

Catatan riwayat waktu yang sebenarnya sangat penting untuk struktur yang *respon non-liniernya* harus ditinjau apabila *spektrum respons* hanya dapat menyelesaikan respons struktur yang *linier elastis*. Dari persamaan umum dinamik ditransformasikan dari koordinat nodal melalui hubungan Persamaan dinamik yang digunakan adalah :

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m_i\ddot{u}_g \dots\dots\dots(2.24)$$

Persamaan diatas dapat diselesaikan dengan

$$k = \phi_n q_n \dots\dots\dots(2.25)$$

$$m_i = \Gamma_n m \phi_n \dots\dots\dots(2.26)$$

Menghasilkan persamaan modal

$$\ddot{D}_n + 2\zeta_n \dot{D}_n + \omega_n^2 D_n = -\ddot{u}_g \dots\dots\dots(2.27)$$

$$A_n = \omega_n^2 D_n \dots\dots\dots(2.28)$$

Dengan *modal respons spektrum* puncak kontribusi moda ke-n

$$r_{n0} = r_n^{st} A_n \dots\dots\dots(2.29)$$

Menentukan total respons spektrum puncak, terdapat 3 macam ketentuan kombinasi penentuan jumlah respons yaitu :

a. *Absolute Sum* (ABSSUM)

$$r_0 \leq \sum_{n=1}^N |r_{n0}| \dots\dots\dots (2.30)$$

Pendekatan total respons puncak diatas terlalu konserfatif, dimana respons puncak yang diberikan relatif cukup besar, sehingga cara ini kurang populer

Universitas Indonesia

digunakan. Namun pada peraturan SNI 03-1726-1989 memperbolehkan menggunakan ABSSUM untuk selisih waktu getar hampir sama besar.

b. *Square Root of Sum of Square (SRSS)*

$$r_0 = \sqrt{\sum_{n=1}^N r_{n0}^2} \dots\dots\dots(2.31)$$

Ketentuan kombinasi ini dikembangkan oleh *E.Rosenblueth's Ph.D* (1951) dimana memiliki perhitungan yang baik dalam menentukan respon apabila struktur memiliki selisih frekuensi alami yang berjauhan. Namun batasan tersebut tidak memberikan kepastian dalam menentukan ketentuan permasalahan. Metode ini dipakai pada peraturan gempa Indonesia.

c. *Complete Quadratic Combination (CQC)*

$$r_0 \approx \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{n=1}^N \rho_{in} r_{i0} r_{n0}} \dots\dots\dots(2.32)$$

Persamaan diatas dapat diselesaikan dengan

$$\rho_{in} = \frac{8\zeta^2(1+\beta_{in})\beta_{in}^{3/2}}{(1-\beta_{in}^2)^2 + u\zeta^2(1+\beta_{in})^2} \dots\dots\dots(2.33)$$

$$\beta_{in} = \frac{\omega_i}{\omega_n}$$

Kombinasi ini memiliki kemampuan yang lebih luas terhadap struktur jika dibandingkan dengan batasan ketentuan SRSS. Metode ini dipakai pada peraturan SNI 03-1726-2002 yang memperbolehkan menggunakan CQC untuk selisih waktu getar hampir sama besar dengan batasan selisih 15%.

2.6.4 Perbandingan *Respon History Analysis* dan *Respon Spectrum Analysis*)

Perbandingan dari hasil Analisa Riwayat Waktu (*Respon History Analysis*) dan Analisa Spektrum Respons (*Respon Spectrum Analysis*), dimana :

1. ABSSUM memiliki nilai yang cukup konservatif dan tidak digunakan, karena hasil perhitungan dimensi struktur akan tidak ekonomis.
2. SRSS dan CQC memiliki nilai yang mendekati kesamaan dalam menghitung respon puncak dikarenakan nilai koefisien kolerasi yang relatif kecil untuk struktur dengan perbedaan frekuensi amalnya.
3. Respons puncak yang dihitung dengan SRSS atau CQC bernilai lebih kecil dibandingkan nilai RHA, hal ini bukan umum terjadi, bisa terjadi nilai yang besar jika menggunakan *respons spektrum* yang bergerigi untuk eksitasi tunggal
4. Kesalahan pada SRSS (atau CQC) menghitung respon puncak, diperlihatkan pada persentase dari nilai RHA, perbedaan terdapat pada kualitas respons. Sekitar 15 % untuk gaya geser lantai teratas 10 % untuk momen guling M_b dan perpindahan lantai teratas.

2.7 KAYU SEBAGAI BAHAN STRUKTUR RUMAH TRADISIONAL

Kayu telah digunakan sebagai bahan struktur rumah tradisional sejak dahulu. Kayu mempunyai kekuatan tarik dan tekan, dan secara struktural cocok untuk berperan sebagai elemen yang memikul beban jenis tekan aksial, tarik aksial, dan beban lentur. Pada Rumah Tradisional kayu digunakan untuk membuat struktur yang lentur, lantai dan atap pada struktur. Kaso, balok lantai, rangka, balok menerus, balok dengan berbagai jenis, lengkungan, *shell*, dan bentuk-bentuk lipatan semuanya telah dibuat dengan menggunakan kayu.

Kenyataan bahwa kayu merupakan makhluk hidup menjelaskan sifat fisik dasar yang dimilikinya. Bagian dari pohon yang digunakan untuk struktur kayu jantung kayu (*heartwood*) dan getah kayu (*sapwood*) dari batang pohon mempunyai fungsi struktur pada pohon hidup dan oleh karena itu, seperti halnya kebanyakan organisme, biasanya memiliki sifat struktur yang sangat baik. Kayu tersusun atas serat sel panjang yang lurus paralel terhadap batang pohon asal dan dengan demikian terhadap serat kayu yang dihasilkan dari lingkaran tahunan. Bahan dari dinding-dinding sel memberikan kayu kekuatan dan fakta bahwa elemen-elemennya memiliki berat atom yang rendah berkontribusi terhadap berat jenisnya yang rendah. Berat kayu yang ringan juga disebabkan oleh struktur sel bagian dalam yang menghasilkan penampang melintang elemen yang secara permanen.

Jika paralel terhadap serat kayu, kekuatannya kira-kira sama dalam tarik dan tekan sehingga papan dengan serat kayu yang lurus dapat digunakan untuk elemen yang memikul beban jenis tekan aksial, tarik aksial, atau lentur. Jika tegak lurus terhadap serat kayu, kekuatannya kecil karena serat dengan sangat mudah dapat dihancurkan atau ditarik lepas ketika dibebani tekan dan tarik dalam arah ini.

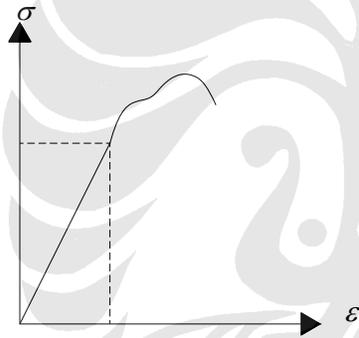
Kelemahan pada tegak lurusnya serat kayu ini menyebabkan kayu mempunyai kekuatan geser yang rendah ketika dibebani beban-beban jenis lentur dan juga membuatnya tidak tahan terhadap pemusatan tegangan seperti yang terjadi pada sambungan.

Dalam memahami kayu sebagai elemen konstruksi, beberapa hal berikut perlu dipahami lebih mendalam :

a. Sifat Elastis.

Sifat elastis kayu terutama akibat tarik sangat tergantung pada kadar kekeringannya. Kayu kering kadar lengas rendah akan mempunyai batas elastisitas yang lebih rendah.

Batas proporsional kayu relatif cukup tinggi, yaitu hingga 75 % dari tegangan patahnya. Kondisi ini memperkuat bahwa pada kayu sangat cocok untuk dianalisa secara elastis, sehingga berlaku Hukum *Hooke* dimana relasi tegangan dan regangan masih *linier*.



Gambar 2.29 Diagram Tegangan Regangan Kayu

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad \dots\dots\dots(2.34)$$

Dimana : σ = Tegangan
 E = Modulus Elastisitas
 ε = Regangan

b. Homogen

Homogen adalah keadaan dimana di dalam bagiannya mempunyai sifat fisik yang sama. Sebagai material bentukan alam dan terdiri dari

serat-serat, tidaklah tepat bila material kayu dikatakan homogen. Namun demikian dalam praktek, dapatlah dianggap bahwa kayu sebagai elemen konstruksi bersifat homogen.

c. Berlaku *Hipotesa Bernouli*

Pada balok yang terlentur, penampang tetap rata dan tegak lurus sumbu netralnya. Anggapan ini tidak tepat benar, sebab dalam penyelidikan yang lebih mendalam dijumpai adanya penyimpangan akan anggapan *linieritas* ini. Namun demikian, dalam praktek anggapan ini masih dapat dipakai, sehingga analisa menjadi lebih sederhana.

d. *Isotrop*

Isotrop menunjukkan kesamaan sifat dalam segala arah. Kayu yang terdiri dari kumpulan serat, mempunyai sifat yang sangat ditentukan oleh seratnya. Dengan demikian jelas kayu bukanlah material yang *isotrop*. Sifat *anisotropy* kayu nampak khususnya pada :

- Kekuatan.
- Pengerutan.
- Mudah atau sulitnya dibelah.

Dalam praktek, material kayu dapat dianggap *orthotropick*, dimana tiga bidang simetrinya saling tegak lurus.

Ketegaklurusan ini meliputi :

- Dalam arah serat (longitudinal).
- Dalam arah tangensial (menyigung cincin pertumbuhan).
- Dalam arah radial (tegak lurus cincin pertumbuhan).

2.7.1 Sifat Mekanis dan Klasifikasi

Pembagian atau klasifikasi kayu konstruksi berkaitan dengan sifat-sifat mekanis yang dimiliki kayu. Sifat mekanis ini antara lain :

- Retak
- Kadar Kekeringan
- Mata Kayu
- Miring Arah Serat
- Pengeringan
- Cincin Tahun
- Keadaan Pohon
- Berat Jenis
- Pengawetan
- Keawetan

1. Berdasarkan Mutu Kayu

Kayu dibagi menjadi Mutu A dan Mutu B

Mutu A

Kadar Kekeringan: Kering udara (12 %-18%, rata-rata 15 %)

Mata : $d_1 \leq (h/6)$, $d_2 \leq (b/6)$, $d_1 \leq 3,5$ cm dan $d_2 \leq 3,5$ cm

Wanvlak : $e_2 \leq (h/10)$, $e_2 \leq (b/10)$

Miring arah serat : $\text{tg}(\alpha) = 1/10$

Retal-retak : $h_r \leq (b/4)$, $h_f \leq (b/5)$

Mutu B

Kadar Kekeringan: ≤ 30 %

Mata : $d_1 \leq (h/4)$, $d_2 \leq (b/4)$, $d_1 \leq 5$ cm dan $d_2 \leq 5$ cm

Wanvlak : $e_2 \leq (h/10)$, $e_2 \leq (b/10)$

Miring arah serat : $\text{tg}(\alpha) = 1/7$

Retal-retak : $h_r \leq (b/3)$, $h_f \leq (b/4)$

2. Berdasarkan Kelas Awet

Ukuran lama waktu ketahanan dalam suatu kondisi, berhubungan dengan kelas awet kayu. Kelas awet dibagi menjadi : Kelas I, Kelas II, Kelas III, Kelas IV dan Kelas V.

Tabel 2.4 Kelas Awet Kayu

Kondisi	I	II	III	IV	V
Di tanah lembab	8 th	5 th	3 th	Pendek	Amat pendek
Terlindungi dari air / lengas	20 th	15 ht	10 th	Beberapa tahun	Tak Lama
Dibawah atap / udara kering	~	~	Lama Sekali	Bertahun-tahun	Beberapa Tahun
Dirawat / dicat	~	~	~	> 20 th	< 20 Th
Serangan Rayap	Tidak	Jarang	Agak Lama	Cepat	Sangat Cepat
Serangan Bubuk	Tidak	Tidak	Hampir Tidak	Tak Seberapa	Cepat

3. Berdasarkan Kelas Kuat

Kelas kuat dikelompokkan berdasarkan 4 parameter berikut : berat jenis, kuat lentur mutlak, kuat tekan mutlak, serta *modulus elastisitasnya*. Kelas kuat dibagi mejadi : Kelas I, Kelas II, Kelas III, Kelas IV dan Kelas V

Tabel 2.5 Kelas Kuat

	I	II	III	IV	V
Berat Jenis	> 0,9	0,9 – 0,6	0,6 – 0,4	0,4 – 0,3	< 0,3
Kuat Lentur Mutlak (kg/cm ²)	> 1100	1100 - 725	725 - 500	500 - 360	< 360
Kuat Tekan Mutlak (kg/cm ²)	> 650	650 - 425	425 - 300	300 - 215	< 215
Modulus Elastisitas E (kg/cm ²)	$1,25 \times 10^5$	10^5	$0,8 \times 10^5$	$0,6 \times 10^5$	

4. Berdasarkan Tegangan Ijin

Tegangan ijin dikelompokkan berdasarkan kelasnya : Kelas I, Kelas II, Kelas III, Kelas IV, Kelas V dan Mutu A dan Mutu B

Tabel 2.6 Tagengan Ijin Kayu

Tegangan (kg/cm)	I	II	III	IV	V
$\sigma_{lt //}$, (lentur sejajar serat)	130	100	75	50	130
$\sigma_{tk //}$, σ_{tr} (tekan dan tarik)	130	85	60	45	110
$\Sigma_{tk \perp}$, (tegak lurus serat)	40	25	15	10	30
$\tau //$, (geser sejajar serat)	20	12	8	5	15

Catatan :

a. Daftar tegangan ijin tersebut hanya berlaku untuk kayu mutu A. Untuk kayu mutu B, angka-angka diatas harus dikalikan dengan 0,75.

b. Kondisi diatas berlaku untuk konstruksi yang terlindungi dan yang memikul muatan tetap.

Konstruksi terlindungi merupakan kosnruksi yang terlindungi dari perubahan cuaca atau udara yang besar sehingga tidak basah dan kadar kekeringannya tidak banyak berubah.

Muatan tetap adalah muatan yang berlangsung lebih dari 3 bulan atau beban bergerak yang bersifat tetap.

Misalnya : mobil diatas jembatan, berat sendiri, gaya lateral tanah.

c. Reduksi Tegangan Ijin

Bila kondisi berbeda dengan yang disebut diatas, tegangan ijin yang digunakan harus menggunakan ketentuan berikut :

<i>Tak Terlindungi / Terendam Air / Kadar Kekeringan Tinggi</i>	<i>(2/3) × tegangan ijin</i>
<i>Cepat Mengering</i>	<i>(5/6) × tagangan ijin</i>
<i>Muatan Lengkap : Beban Utama ditambah beban sekunder / tambahan</i>	<i>(5/4) × tegangan ijin</i>

d. *Bila gaya tekan yang bekerja tidak sejajar serat, namun membentuk sudut (α), maka tegangan tekan ijinnya merupakan fungsi α .*

$$\sigma_{tk\alpha} = \sigma_{tk //} - (\sigma_{tk //} - \sigma_{tk \wedge}) \sin \alpha \dots\dots\dots(2.35)$$

Universitas Indonesia

2.7.2 Analisa Dinamik Struktur Kayu Terhadap Gempa

Perencanaan struktur bangunan tahan gempa yang baik memerlukan pengetahuan tentang bagaimana perilaku dari struktur tersebut saat terjadi gempa. Struktur kayu merupakan struktur yang ringan serta mempunyai kekuatan dan daktilitas yang tinggi, sehingga sangat baik digunakan untuk konstruksi bangunan di daerah rawan gempa. Karena termasuk konstruksi ringan, maka struktur kayu dapat digunakan sebagai konstruksi rumah tinggal tanpa perlu perhitungan struktural.

Jika akan digunakan sebagai konstruksi yang harus tahan terhadap gempa, maka struktur kayu perlu diperiksa kekuatannya dan diberi perkuatan-perkuatan struktural, serta perlu detail konstruksi yang baik. Struktur kayu tahan gempa biasanya terdiri elemen-elemen balok, kolom, diafragma dan dinding. Meskipun material kayu mempunyai kemampuan yang baik dalam hal menahan pengaruh gempa, tapi berdasarkan pengamatan di lapangan banyak struktur kayu yang mengalami kerusakan berat pada saat terjadi gempa. Hal ini disebabkan karena struktur kayu tidak dirancang dengan baik, serta tidak adanya perkuatan dan detail konstruksi yang baik. Beberapa faktor yang menyebabkan kerusakan dari bangunan kayu pada saat terjadi gempa adalah :

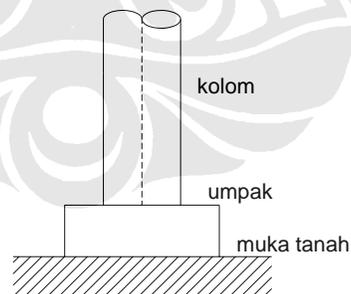
1. Kurangnya dinding kayu yang dipasang pada bangunan.
2. Pengaruh torsi akibat penempatan dinding yang tidak teratur (*eksentris*).
3. Atap yang terlalu berat.
4. Penjepitan yang kurang baik antara kolom dan pondasi.
5. Detail sambungan yang tidak baik antara elemen-elemen struktur.
6. Tanah longsor atau problem tanah lainnya.



Gambar 2.30 Struktur Rumah Tradisional Sumatra yang Rusak Akibat Gempa

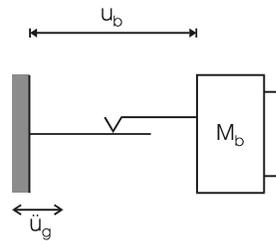
2.8 SISTEM PONDASI

System pondasi umpak terdapat pada Rumah Omo Sebua, Rumah Gadang Bodi Caniago, dan Rumah Bolon Simalungun. Pondasi umpak adalah pondasi yang kayu diletakkan begitu saja diatas batu lempeng dan batu juga diletakkan begitu saja diatas tanah. Sehingga gaya yang bekerja pada pondasi umpak adalah gaya gesek batu dengan kayu ($\mu = 0,4$), gaya gesek batu dengan tanah ($\mu = 0,7$). Gaya gesek ini dipengaruhi oleh koefisien gesek antar dua material berbeda dan gaya vertikal tegak lurus terhadap arah gaya gesek bekerja.



Gambar 2.31 Sistem Pondasi Umpak

Gaya gesek yang bekerja diasumsikan sebagai *Pure-Friction* (P-F) dapat dimodelkan sebagai berikut :



Gambar 2.32 Pemodelan *Pure-Friction*

Pada saat struktur rigid yang diberi *isolasi seismik* dengan redaman *Coulomb* murni mengalami percepatan gempa horisontal \ddot{u}_g , maka persamaan gerak menjadi:

$$\ddot{u}_b + \mu g \operatorname{sgn}(\dot{u}_b) = -\ddot{U}_g - \sum_{n=1}^N B_n \ddot{q}_n \quad \dots\dots\dots(2.36)$$

dimana :

g = percepatan gravitasi dan μ koefisien gesek.

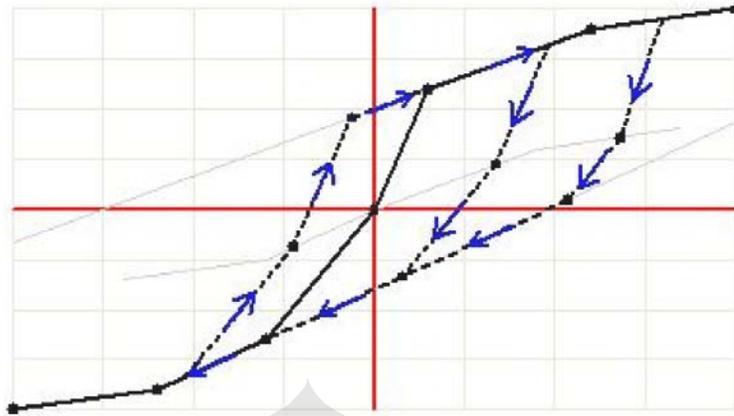
Persamaan diatas menggambarkan kelakuan sistem pada saat bergeser, sedangkan pada kondisi struktur tidak bergeser, kondisi *non-sliding* :

$$\dot{U}_b = 0 \quad \dots\dots\dots(2.37)$$

kondisi tak bergeser ini akan terjadi selama :

$$\mu g - \left| \ddot{U}_g + \sum_{n=1}^N B_n \ddot{q}_n \right| > 0 \quad \dots\dots\dots(2.38)$$

Jika kondisi seperti pada persamaan diatas gagal, maka terjadi pergeseran dan persamaan (2.36) yang berlaku.



Gambar 2.33 *Multi-linear Kinematic Plasticity Property Type for Uniaxial Deformation*

2.9. BATAS DAERAH KERN, KASUS LENTUR BIAKSIAL

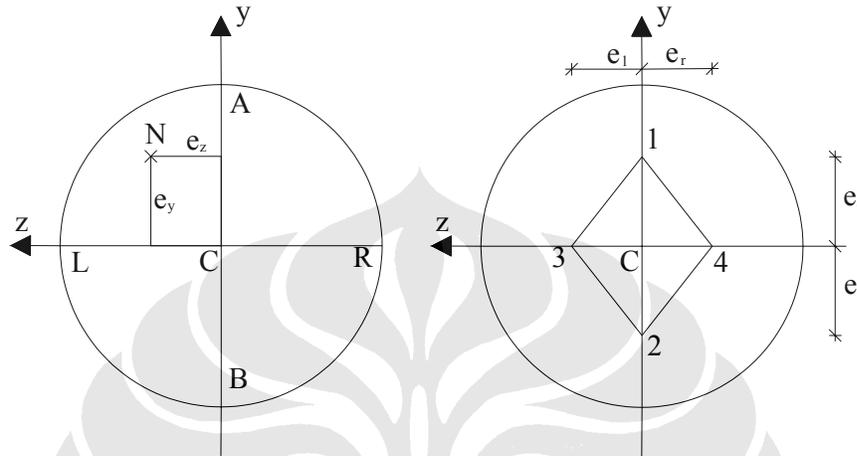
Untuk kasus gaya normal tekan N dalam lentur *biaksial*, *eksentrisitas* (e_y, e_x) mewakili lentur dengan arah vertikal pada sumbu Y dan Z . Tegangan normal diberikan oleh :

$$\begin{aligned} \sigma(y, z) &= -\frac{N}{A} - \frac{N \cdot e_y}{I_{zz}} \cdot y - \frac{N \cdot e_x}{I_{yy}} \cdot z \\ &= \sigma_0 \left[-1 - \frac{e_y}{r_z^2} \cdot y - \frac{e_x}{r_y^2} \cdot z \right] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(2.39)$$

$$\begin{aligned} r_y^2 &= \frac{I_{yy}}{A} \\ r_z^2 &= \frac{I_{zz}}{A} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(2.40)$$

Batas daerah Kern dalam kasus biaksial adalah garis lurus pada keempat kuadran, dengan batas pada arah Y , dan arah Z , sebagai

$$\begin{aligned}
 [e_b, e_a] &= \left[-\frac{r_z^2}{y_r}, -\frac{r_z^2}{y_l} \right] \\
 [e_r, e_l] &= \left[-\frac{r_y^2}{y_a}, -\frac{r_y^2}{y_b} \right]
 \end{aligned}
 \tag{2.41}$$



Gambar 2.34 Batas Daerah *Kern*, Kasus Lentur *Biaksial*

Seperti dalam gambar diatas persamaan garis batas daerah inti kern adalah :

$$\begin{aligned}
 13: e_l \cdot y + e_a \cdot z - e_a \cdot e_l &= 0 \\
 32: e_l \cdot y + e_b \cdot z - e_b \cdot e_l &= 0 \\
 24: e_r \cdot y + e_b \cdot z - e_b \cdot e_r &= 0 \\
 41: e_r \cdot y + e_a \cdot z - e_a \cdot e_r &= 0
 \end{aligned}
 \tag{2.42}$$

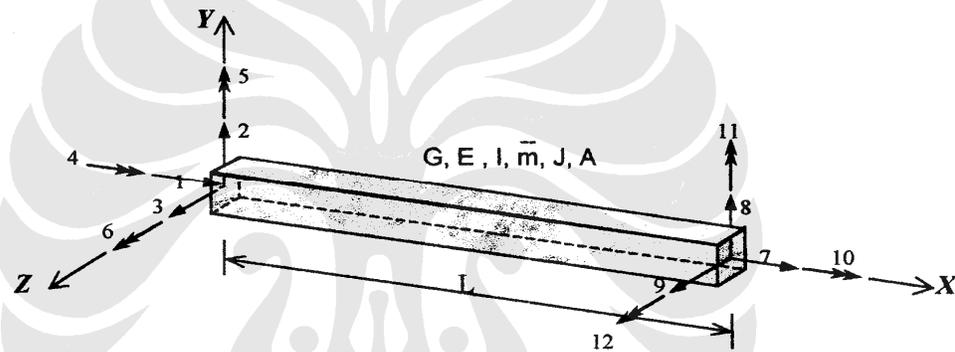
2.10 ANALISA DINAMIK PORTAL

Kerangka tiga dimensi (Portal Ekuivalen 3D) merupakan struktur yang terdiri dari elemen-elemen balok dan kolom. Setiap rangka batang ruang dapat memikul gaya aksial, momen puntir, momen lentur dalam kedua arah sumbu utama penampang lintang, dan gaya geser dalam arah sumbu utama.

Pada Portal Ekuivalen Tiga Dimensi mempunyai 12 koordinat nodal untuk menghubungkan dua buah titik, jadi menghasilkan matriks elemen dengan dimensi 12×12 .

2.10.1 Matriks Kekakuan

Matriks Kekakuan untuk segmen balok seragam tiga dimensi telah disusun dengan cara *superposisi* matriks kekakuan aksial, matriks kekakuan torsi (puntir) dan matriks kekakuan lentur. Arah dari deformasi tersebut diperlihatkan pada gambar berikut.



Gambar 2.35 Batang atau Elemen Balok dari Kerangka Ruang

Matriks kekakuan lentur digunakan dua kali dalam membentuk matriks kekakuan dari segmen balok tiga dimensi karena pengaruh aksial dihitung terhadap dua bidang utama dari penampang melintang. Dengan kombinasi penyusunan dari matriks-matriks ini didapat matriks kekakuan lengkap untuk rangka tiga dimensi sebagai berikut :

$$[K] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{-6EI_z}{L^2} & 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{L} & 0 & \frac{-6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L} \end{bmatrix} \quad \dots(2.43)$$

Dimana dalam persamaan kekakuannya sebagai berikut :

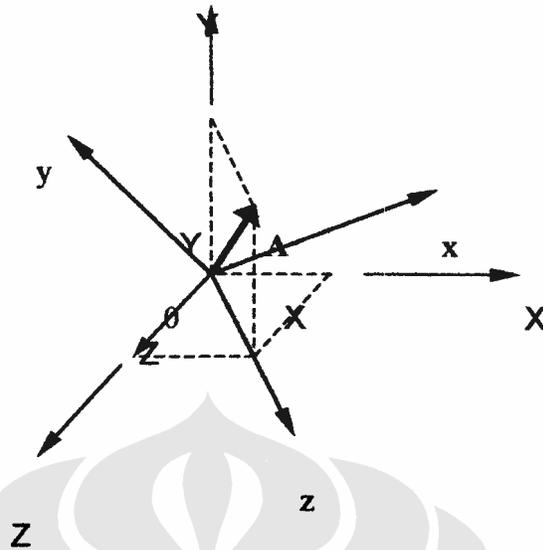
$$\{P\} = [k]\{d\} \dots\dots\dots(2.44)$$

2.10.2 Matriks Massa

Matriks massa terkelompok untuk segmen balok seragam dari kerangka tiga dimensi adalah sebuah matriks diagonal, dimana koefisien-koefisien yang berhubungan dengan perpindahan translasi serta rotasi adalah sama dengan setengah dari inersia total segmen balok, sedangkan koefisien yang berhubungan dengan lentur dianggap sama dengan nol.

Matriks massa sepadan untuk sebuah segmen balok seragam dan suatu kerangka tiga dimensi, telah didapatkan dengan mengkombinasikan matriks massa sepadan untuk pengaruh aksial,

Universitas Indonesia



Gambar 2.36 Komponen-Komponen dari Sebuah Vektor Sembarang A pada Koordinat Lokal dan Koordinat Umum Global

Pada gambar ini juga terlihat vektor A dengan komponen-komponennya pada sumbu X, Y, Z. Vektor A ini, serta komponen-komponennya dapat menyatakan gaya atau perpindahan pada koordinat nodal dan titik hubung suatu struktur. Vektor A harus diproyeksikan dari komponen-komponen X, Y, Z ke sumbu x, y, dan z. Dalam persamaan matriksnya proyeksi vektor A adalah sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos xX & \cos xY & \cos xZ \\ \cos yX & \cos yY & \cos yZ \\ \cos zX & \cos zY & \cos zZ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.46)$$

atau dalam notasi ringkas,

$$\{A\} = [T_1]\{A'\} \dots\dots\dots(2.47)$$

Dimana :

$\{A'\}$ =komponen sistem lokal

$\{A\}$ =komponen sistem global (umum)

$[T_1]$ =matriks transformasi

Sebuah segmen balok dari sebuah rangka tiga dimensi memerlukan transformasi empat vektor perpindahan untuk dua titik penghubung, matriks transformasi dapat ditulis sebagai :

$$[T] = \begin{bmatrix} [T_1] & & & \\ & [T_1] & & \\ & & [T_1] & \\ & & & [T_1] \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.48)$$

maka perpindahan nodal dapat ditransformasikan seperti,

$$\{\delta\} = [T]\{\bar{\delta}\} \dots\dots\dots(2.49)$$

dan gaya nodal pun dapat ditransformasikan sebagai berikut,

$$\{P\} = [T]\{\bar{P}\} \dots\dots\dots(2.50)$$