

BAB II

DASAR TEORI

2.1 MATRIKS ANALISIS¹

2.1.1 Keruntuhan Struktur

Fungsi utama bangunan adalah memikul beban-beban dan pengaruh lingkungan luar. Menurut ensiklopedia (<http://ensiklopedia.org>). Kegagalan struktur adalah kondisi dimana ada satu atau dua komponen struktur, atau bahkan struktur tersebut secara keseluruhan kehilangan kemampuan menahan beban yang dipikulnya. Umumnya dipicu oleh adanya beban berlebih yang menyebabkan kekuatan (strength) struktur mencapai kondisi batas sehingga menimbulkan fraktur atau lendutan yang besar. Profesional menyebutnya sebagai keruntuhan struktur.

Mekanisme keruntuhan struktur:

- 1) Tekuk/ *buckling* (lokal dan global)
- 2) *Creep* (rangkai)
- 3) *Fatigue* (kelelahan)
- 4) *Fraktur* (retak)
- 5) *Yielding* (leleh, deformasi bertambah tanpa adanya penambahan beban)
- 6) *Melting* (leleh, perubahan dari padat menjadi cair akibat suhu)
- 7) Korosi

Tiap mekanisme mempunyai perilaku yang berbeda, dan untuk terjadi keruntuhan tidak perlu semua mekanisme tersebut terjadi, jadi cukup satu saja dan terjadilah keruntuhan tersebut. Dari semua mekanisme keruntuhan yang sifatnya daktail sehingga diusahakan terjadi terlebih dulu (jika terpaksa akan terjadi keruntuhan).

¹ Jurnal Teknik Sipil Volume 2 Nomor 2, Oktober 2006 : 74-147

2.1.2 Program Komputer untuk Simulasi Struktur

Akibat perkembangan teknologi komputer yang semakin canggih, baik dari segi *hardware* maupun *software* dan harganya pun relatif terjangkau, serta banyak bukti bahwa hasilnya mendekati model fisik (Noor dan McComb 1981) maka simulasi numerik berbasis komputer menjadi pilihan yang banyak dipakai (Willam dan Tanabe 2001, John et.al. 2005, Karim dan Hoo Fatt 2005, Yokihiro et.al. 2005, Wiryanto Dewobroto 2005a/b).

Analisa struktur dengan metode matriks kekakuan merupakan versi awal metode elemen hingga yang menjadi andalan untuk digunakan bersama dengan komputer. Dasar teori penyelesaian statik yang digunakan metode matriks kekakuan adalah persamaan keseimbangan struktur yang dapat ditulis dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$[k]\{\delta\} = \{F\}$$

dimana:

$[k]$ = matriks kekakuan sebagai suatu yang menghubungkan perpindahan (deformasi) dengan beban

$\{\delta\}$ = deformasi

$\{F\}$ = Gaya yang diberikan

Formulasi persamaan keseimbangan memperlihatkan bahwa besarnya deformasi $\{\delta\}$ berbanding lurus dengan gaya $\{F\}$ yang diberikan, kondisi di atas menunjukkan bahwa jenis analisa struktur yang digunakan adalah elastik linier hingga perlu diingat batasan-batasannya sebagai berikut :

- 1) Lendutan struktur relatif kecil sehingga dapat dianggap kondisi geometri struktur sebelum dan sesudah pembebanan tidak ada perubahan.
- 2) Material yang digunakan pada struktur masih berperilaku elastis-linier.

2.2 MACAM-MACAM SISTEM STRUKTUR BANGUNAN TINGGI²

2.2.1 Sistem Gravitasi pada Struktur Bangunan Gedung

Sistem yang menyokong kekuatan sebuah struktur bangunan gedung dilihat dari segi gravitasi. Terdapat dua sistem yaitu sistem lantai dan sistem Beton pratekan (*prestressed concrete*).

a) Sistem Lantai

Sistem ini terdiri atas empat jenis yaitu:

- *Flat plate*

Struktur plat yang rata tanpa balaok/ girder. Dimana beban vertikal diteruskan langsung ke kolom.

- *Flat slab*

Suatu struktur tanpa balok, dimana pada bagian kolomnya terdapat penebalan (*drop panel*) yang berfungsi untuk menahan/ meredam gaya geser dan momen bending negatif.

- *Waffle system*

Merupakan sistem *two way joist*, dimana pada bagian sekitar kolom bentuk kubahnya di abaikan. Hal ini bertujuan untuk memperoleh kapasitas geser yang lebih besar.

- *One way concrete ribbed slabs*

Berbeda dengan *waffle system* yang *two way joist*, sistem *one way concrete* merupakan sistem *one way joist*

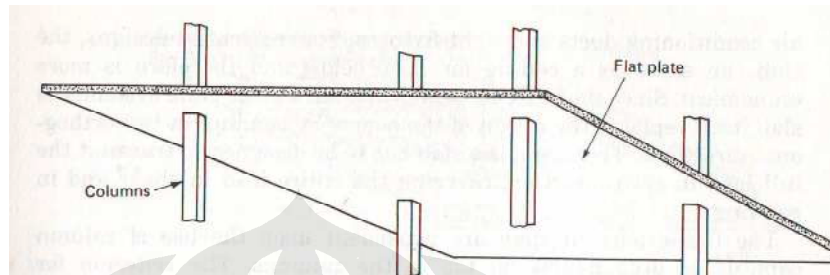
b) Sistem Beton Prategang

Konsep dasar dari beton prategang adalah memberikan tegangan pendahuluan atau awal artinya tegangan yang diberikan terlebih dahulu (*permanent internal stress*) untuk meningkatkan kekuatan (*performance*) struktur. Yang besarnya sedemikian rupa sehingga tegangan yang terjadi akibat beban luar dapat dilawan. Metode prategang (pratarik) adalah sebagai berikut:

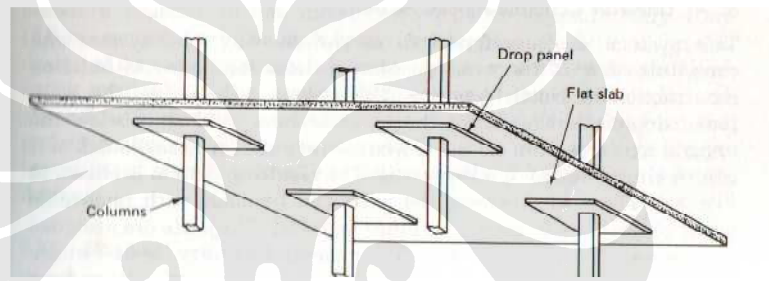
- tendon ditarik terlebih dahulu dan diangkur pada balok beton yang kuat.

² Taranat S Bungale, *Structural Analysis and Design of Tall Building* (Singapore: McGraw-Hill Int., 1988), hall 311

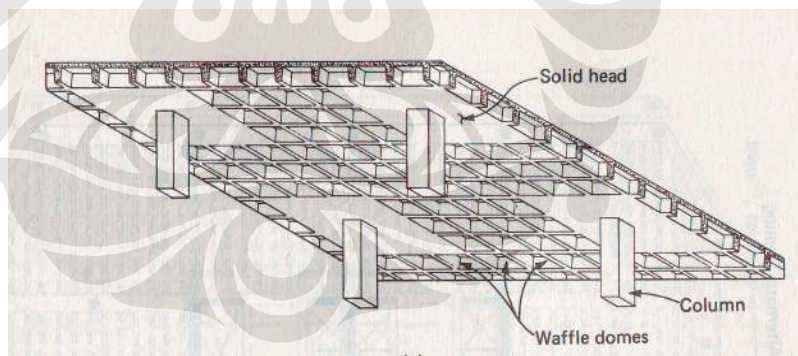
- Beton dicor menutupi/ menyelimuti tendon dalam suatu cetakan. Setelah beton mengeras pratarik dilepas (tendon di putuskan) maka akan terjadi tegangan tekan dalam beton
- Metode ini banyak dipakai untuk produksi beton pracetak.



(a)



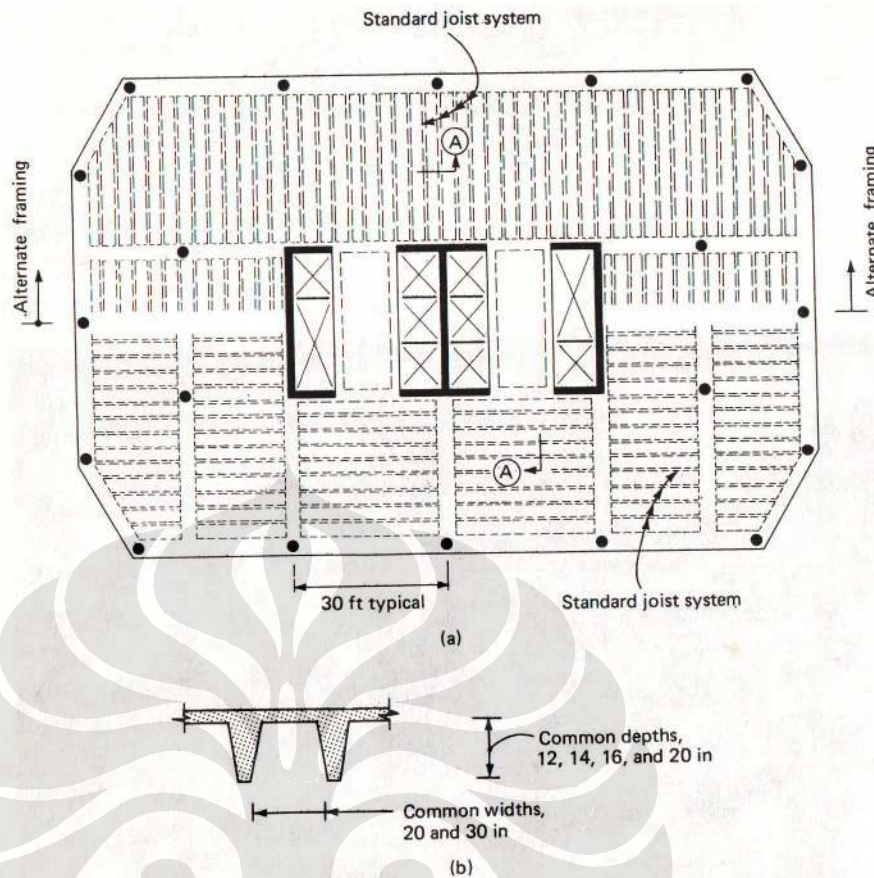
(b)



(c)

Gambar 2.1. Sistem lantai (a) sistem *flat plate*; (b) sistem *flat slab*; (c) sistem *waffle*³

³ Taranat S Bungale, *Structural Analysis and Design of Tall Building* (Singapore: McGraw-Hill Int., 1988), chapter 8, *Gravity System in Concrete Buildings*.



Gambar 2.2. Sistem lantai *One- Way Joist* (a) *Building Plan*; (b) *Section A*⁴

2.2.2 Sistem Penahan Gaya Lateral Struktur Bangunan Gedung⁵

Berikut ini adalah berbagai sistem yang menyokong kekakuan struktur, dalam kaitannya dengan ketahanan struktur terhadap arah lateral.

a) *Flat slab and column*

Yaitu sistem *slab* dan kolom. Dimana plat itu tersendiri terdiri atas tiga jenis yang sudah disebutkan sebelumnya, yaitu: *flat slab*, *flat plate* dan *waffle system*. Sistem *slab* dan kolom ini mampu memberikan kekakuan untuk struktur bangunan 10 lantai.

b) *Flat slab and shear walls*.

Sistem *slab* dan kolom tidak mampu memberikan kekakuan yang memadai untuk bangunan gedung lebih dari 15 sampai dengan 20

⁴ Taranat S Bungale, *Structural Analysis and Design of Tall Building* (Singapore: McGraw-Hill Int., 1988), Page 404.

⁵ Taranat S Bungale, *Structural Analysis and Design of Tall Building* (Singapore: McGraw-Hill Int., 1988), Chapter 5, *Lateral Bracing System for Concrete Buildings*.

lantai. dalam hal ini *shear walls* memiliki fungsi sebagai penahan gaya lateral utama.

c) *Flat slab , shear walls and columns*

Untuk struktur yang lebih tinggi lagi (lebih dari 20 lantai), kekakuan dapat dicapai dengan mengikut sertakan sistem *frame*, yaitu hubungan kolom dan *slab* sebagai penahan gaya lateral. Momen tahanan dari *frame* tidak lebih dari 10 s/d 20 % dari momen tahanan *shear walls*.

d) *Couple shear walls*

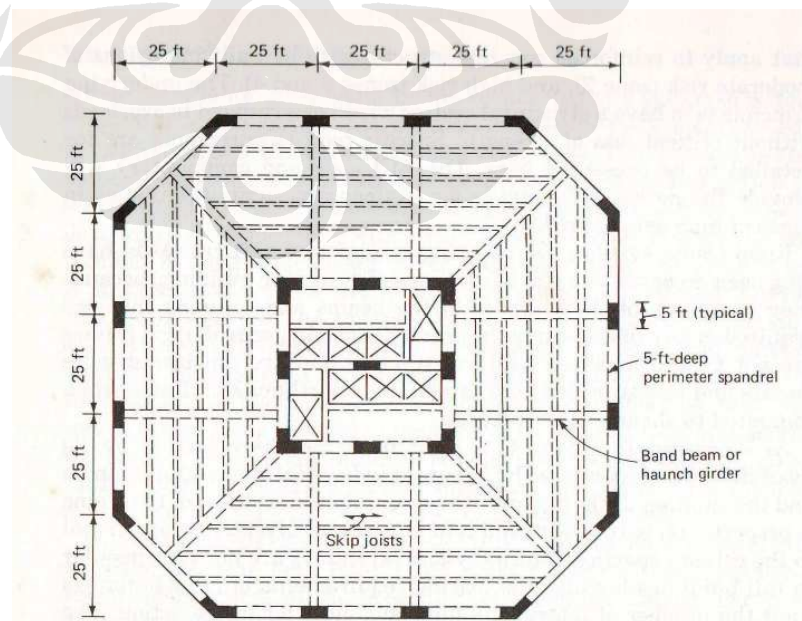
Adalah sistem dua atau lebih *shear wall* yang dihubungkan dengan balok atau *slab* sehingga kekakuan sistem meningkat. Hal ini disebabkan karena balok atau *slab* tersebut mengendalikan kerja dari masing-masing sistem *individual cantilever* sehingga bekerja secara komposit. Sistem ini bisa mencapai kekakuan lateral untuk bangunan gedung 30 hingga 40 lantai.

e) *Rigid frame*

Yaitu sabungan portal/ *frame* antara balok dan kolom yang *rigid*.

f) *Widely spaced perimeter tube.*

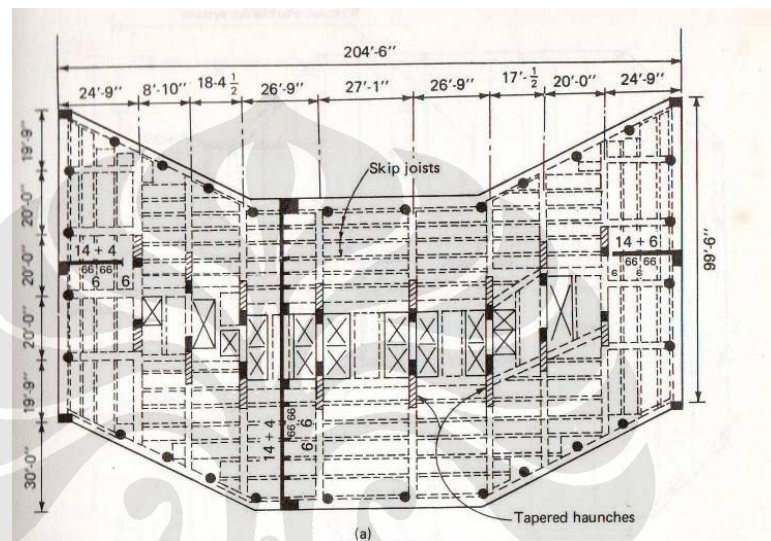
Yaitu sistem dimana kolom-kolom dengan jarak tertentu di ikat dengan *deep spandrel*. Sehingga membentuk sistem menyerupai tabung.



Gambar 2.3. *Tube Building with Widely Spaced Perimeter Columns*

g) *Rigid frame with haunch girder*

Kekurangan sistem *rigid frame* adalah dimensi yang digunakan dapat besar sekali, oleh karena itu digunakan *deep spandrel* tanpa mengurangi jarak lantai ke lantai. Untuk menghemat material, girder dibuat meruncing pada ujung-ujungnya, dengan cara ini kekakuan lateral dapat terpenuhi tanpa harus menambah tinggi (jarak) dari lantai ke lantainya.



Gambar 2.4. *Haunch Girder Floor Plan of Five Post Oak Building*

h) *Core supported sistem*

Merupakan sistem *shear wall* yang dibentuk *rectangular box* (membentuk inti). Sistem ini mampu menahan berbagai beban, baik beban vertikal, geser dan momen lentur dari berbagai arah dan juga torsi ketika kekuatan dan kekakuan terpenuhi diantara sisi-sisinya.

i) *Shear wall- frame interaction*

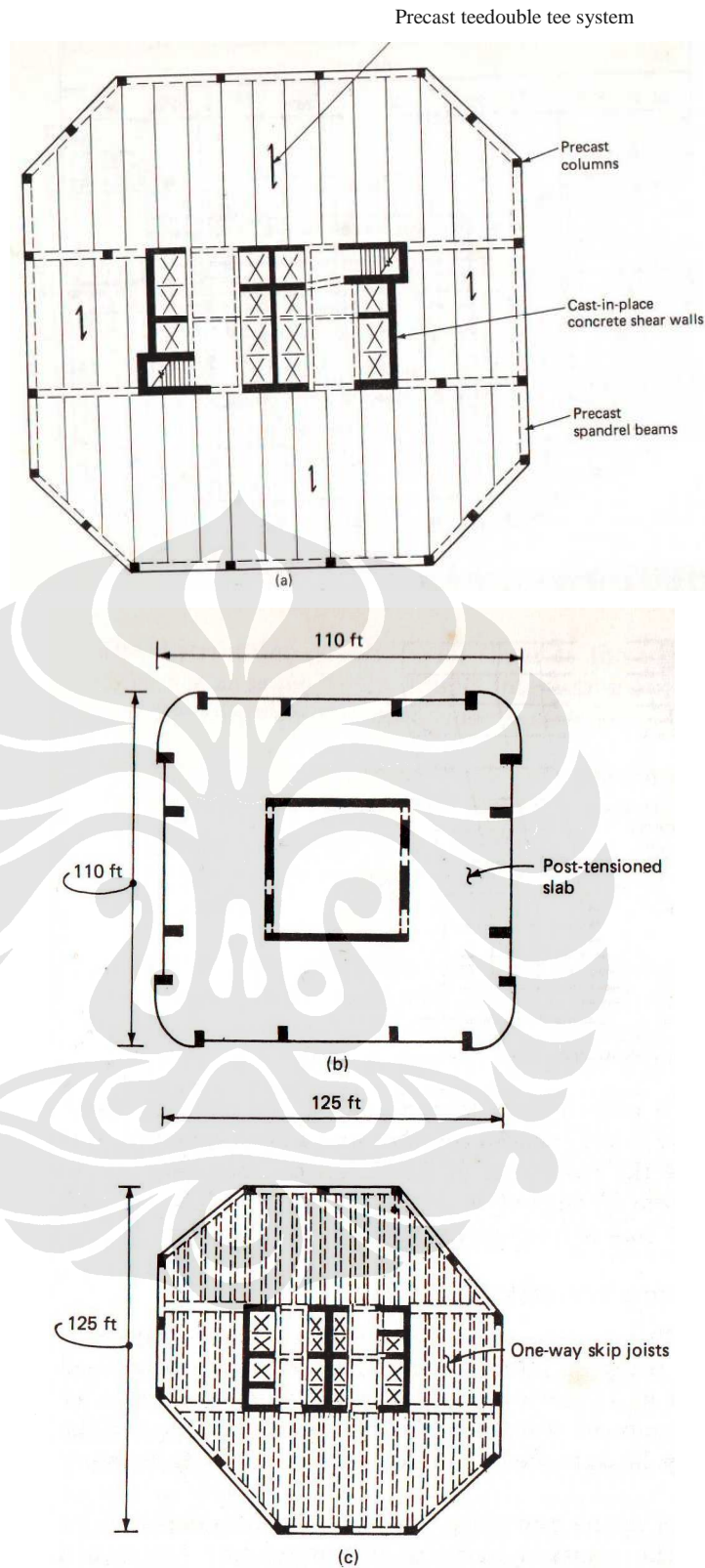
Sistem ini merupakan gabungan dari *shear wall* dan sistem *frame*.

j) *Frame tube structure*

Sistem ini terdiri atas kolom-kolom dengan jarak yang berdekatan yang dihubungkan dengan *relatively deep spandrel*. Hasil dari sistem ini seperti sebuah sistem yang besar sekali.

k) *Exterior diagonal tube*

Yaitu *bresing* di sisi luar untuk menambah ketahanan diagonal geser .



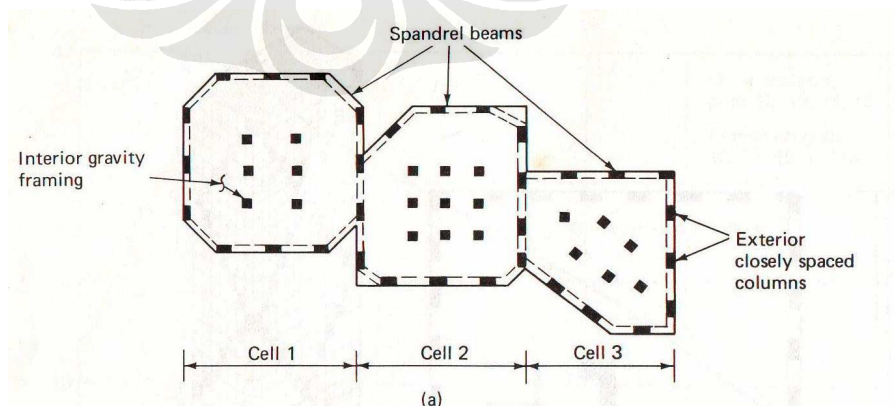
Gambar 2.5. Shear Core Buildings (a) Cast in Place Shear Walls with Precast Surround; (b) Shear Wall with Posttentioned Flat Plate; (c) Shear Wall with One-way Joist System.



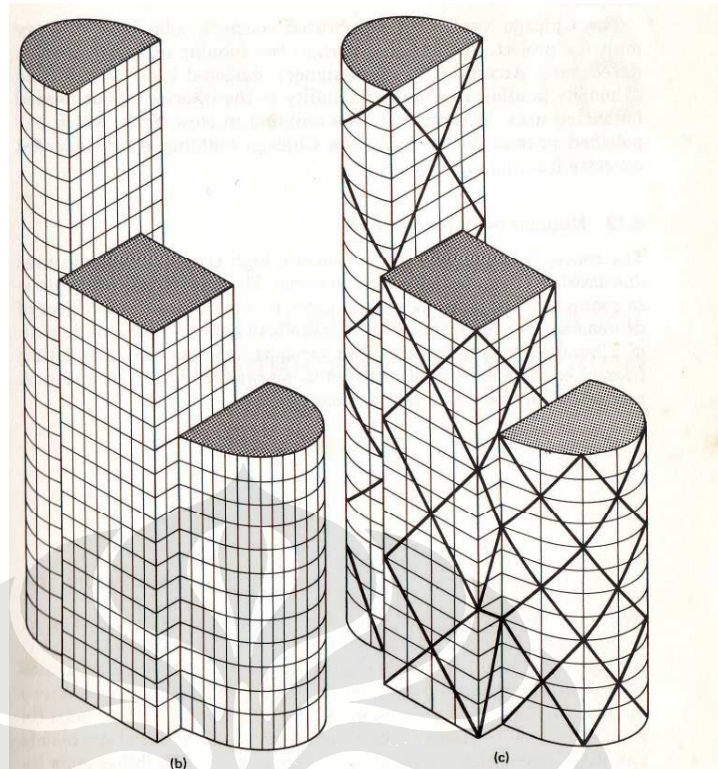
Gambar 2.6. *Exterior Diagonal Tube/Brace Tube (a) Plan; (b) Schematic Elevation*

1) *Modular/ Bundle tube*

Hal mendasar dari sistem ini yaitu prinsip menghubungkan dua atau lebih *individual tube* dalam suatu kesatuan untuk mengatasi efek geser.



Gambar 2.7. *Bundle Tube (a) Schematic Plan*



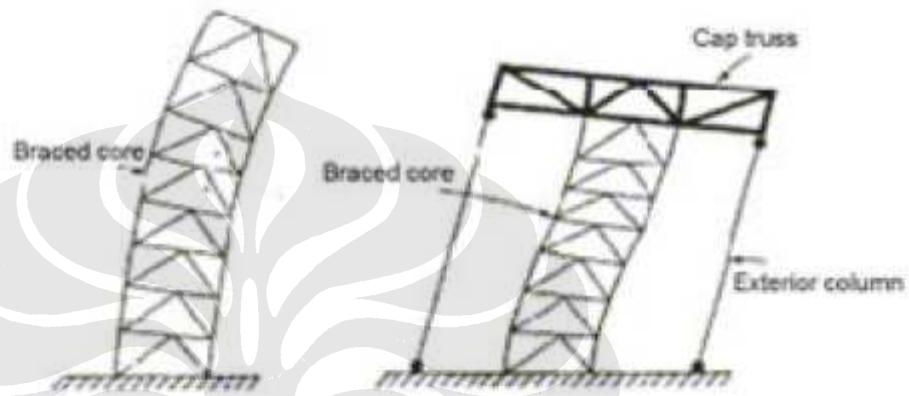
Gambar 2.7. (Sambungan) *Bundle Tube* (b) *Frame Bundle Tube*; (c) *Diagonal Brace Bundle Tube*.

2.3 SISTEM *OUTRIGGER*

Davy sukamta, ketua himpunan ahli konstruksi Indonesia <http://www.engineering-center.net>. *Outrigger* adalah struktur pengaku, berupa lengan yang terikat pada *core wall* hingga kolom terluar bangunan. Prinsipnya seperti perahu layar. Tiang layar adalah intinya, kemudian balok-balok silang layarnya adalah *outriggernya*. Sedangkan tali-tali tiang pada pasak adalah kolom *outriggernya*. Dengan kata lain sistem ini memanfaatkan lebar bangunan untuk memaksimalkan kekakuan karena *outrigger* mampu memberikan ketahanan terhadap momen guling dari gempa atau angin dan membuat gedung lebih stabil. Untuk bangunan dengan kelangsingan mencapai 1:8 bahkan lebih dengan skala yang didapat dari perbandingan lebar gedung dengan tinggi gedung, gedung akan rentan goyang.

Sistem struktur *outrigger* sebenarnya diterapkan sejak 1970. Pertama kali dengan baja. Baru pada 1990-an ditemukan sistem struktur *outrigger* dengan menggunakan lengan beton.

Pada saat gaya horisontal terjadi pada struktur bangunan, lentur pada *core* menyebabkan terjadinya rotasi pada lengan *outrigger*. Yang kemudian menyebabkan kolom-kolom mengalami tarik dan tekan sehingga terjadi kopel. Walaupun sistem *outrigger* menambah kekakuan lentur struktur namun tidak dapat meningkatkan ketahanan geser yang disebabkan oleh dinding geser.



Gambar 2.8. *The brace and the brace core, Exterior Column, and Cap Truss*⁶

2.4 PEMBEBANAN PADA STRUKTUR BANGUNAN TINGGI

Sebuah struktur diharapkan mampu menahan beban-beban, beban-bebean tersebut diantaranya adalah seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.1

Tabel 2.1 *Pembebanan pada struktur gedung*

Pembebanan pada struktur gedung				
Beban				
Mati	Hidup	Angin	Gempa	Khusus
Akibat unsur bagian struktur: Kolom Balok plat mesin-mesin, peralatan tetap	Beban akibat penghunian Barang-barang mesin yang dapat dipindahkan Untuk atap: beban air hujan (genangan dan energi kinetik)	Beban akibat adanya perbedaan tekanan udara	Beban akibat gempa yang dipengaruhi oleh gerakan tanah	Beban akibat: Selisih suhu pengangkatan & pemasangan penurunan pondasi susut rangkai

Kombinasi pembebanan untuk struktur bangunan beton bertulang dimana pada umumnya beban yang dipikul adalah beban mati (D), beban hidup (L) dan beban gempa (E) adalah sebagai berikut:

$$1). U = 1,4D$$

⁶ Taranat S Bungale, *Structural Analysis and Design of Tall Building* (Singapore: McGraw-Hill Int., 1988)

- 2). $U = 1,2D + 1,6L \pm 0,5$ (A atau R)
- 3). $U = 1,2D + 1,0L \pm 1,0$ ($E_x \pm 0,3 E_y$)
- 4). $U = 1,2 D + 1,0L \pm 1,0$ ($0,3E_x \pm E_y$)
- 5). $U = 0,9D \pm 1,0$ ($E_x \pm 0,3 E_y$)
- 6). $U = 0,9D \pm 1,0$ ($0,3E_x \pm E_y$)

Terdapat total 18 kombinasi beban untuk mendapatkan gaya dalam untuk pemancangan penampang balok dan kolom.

2.4.1 Beban Mati

Menurut Pedoman Perencanaan dan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung (PPPuRdG). Pengertian beban mati ialah berat dari semua bagian dari suatu gedung yang bersifat tetap, termasuk segala unsur tambahan, penyelesaian-penyelesaian, mesin-mesin serta peralatan tetap yang merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari gedung itu.

2.4.1.1 Reduksi Beban Mati

Apabila beban mati memberikan pengaruh yang menguntungkan terhadap kekuatan struktur maka beban mati harus dikalikan dengan faktor reduksi 0,9.

2.4.2 Beban hidup

Menurut Pedoman Perencanaan dan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung (PPPuRdG). Pengertian beban hidup ialah semua beban yang terjadi akibat penghunian atau penggunaan suatu gedung, dan kedalamnya termasuk beban-beban pada lantai yang berasal dari barang-barang yang dapat berpindah, mesin-mesin serta peralatan yang tidak merupakan bagian yang tidak 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 kinetik) butiran air. Ke dalam beban hidup tidak termasuk beban angin, beban gempa dan beban khusus.

2.4.2.1 Beban hidup lantai gedung

Beban hidup lantai gedung dapat dilihat pada Table 2 PPPuRdG . Kedalam beban tersebut sudah termasuk sudah termasuk kelengkapan ruang sesuai dengan kegunaan lantai ruang yang bersangkutan, dan juga dinding-dinding pemisah ringan dengan berat tidak lebih dari 100kg/m^2 . Tidak termasuk lemari-lemari arsip dan perpustakaan , alat-alat dan mesin.

Tabel 2.2 Beban hidup pada lantai gedung

a. Lantai dan tangga rumah tinggal, kecuali yang disebut dalam b	200 kg/m ²
b. Lantai dan tangga rumah tinggal sederhana dan gudang-gudang tidak penting yang bukan untuk toko, pabrik atau bengkel	125 kg/m ²
c. Lantai sekolah, ruang kuliah, kantor, toko, toserba, restoran, hotel, asrama dan rumah sakit	250 kg/m ²
d. Lantai ruang olah raga	400 kg/m ²
e. Lantai ruang dansa	500 kg/m ²
f. Lantai dan balkon dalam dari ruang-ruang untuk pertemuan yang lain daripada yang disebut dalam a s/d e, seperti mesjid, gereja, ruang penerbitan, ruang rapat, bioskop dan panggung penonton dengan tempat duduk tetap	400 kg/m ²
g. Panggung penonton dengan tempat duduk tidak tetap atau untuk penonton yang berdiri	500 kg/m ²
h. Tangga, bordes tangga dan gang dari yang disebut dalam c	300 kg/m ²
i. Tangga, bordes tangga dan gang dari yang disebut dalam a, e, f dan g	500 kg/m ²
j. Lantai ruang pelengkap dari yang disebut dalam c, d, e, f dan g	250 kg/m ²
k. Lantai untuk pabrik, bengkel, gudang, perpustakaan, ruang arsip, toko buku, toko besi, ruang alat-alat dan ruang mesin, harus direncanakan terhadap beban hidup yang ditentukan tersendiri, dengan minimum	400 kg/m ²
l. Lantai gedung parkir bertingkat: — untuk lantai bawah	800 kg/m ²
— untuk lantai tingkat lainnya	400 kg/m ²
m. Balkon-balkon yang minoritas bebas keluar harus direncanakan terhadap beban hidup dari lantai ruang yang berbatasan, dengan minimum	300 kg/m ²

2.4.2.2 Beban hidup atap gedung

Beban hidup atap gedung dapat dicapai orang : 100kg/m^2

2.4.2.3 Reduksi beban hidup

1) Peluang untuk tercapainya suatu persentase tertentu dari beban hidup yang membebani struktur pemikul suatu gedung selama umur gedung tersebut tergantung pada:

- Bagian struktur yang ditinjau
- Penggunaan gedung

- Tujuan beban tersebut ditinjau.
- 2) Koefisien reduksi beban hidup untuk perencanaan balok induk dan portal, dapat dilihat pada Tabel 4 PPPuRdG 1987. Koefisien Reduksi beban hidup untuk perencanaan beban horisontal dari gedung, dapat dilihat pada Tabel 4 PPPuRdG 1987.
 - 3) Koefisien reduksi beban hidup untuk perencanaan unsur-unsur vertikal (kolom, dinding geser) dan pondasi yang memikul beberapa lantai tingkat.

Untuk memperhitungkan peluang terjadinya beban hidup yang berubah-ubah, maka untuk perhitungan gaya normal (gaya aksial) didalam unsur-unsur struktur vertikal (kolom, dinding) serta beban pada pondasinya, jumlah kumulatif beban hidup terbagi rata yang ditentukan dalam pasal 2.1.2 yang bekerja pada lantai-lantai tingkat yang dipikulnya, dapat dikalikan dengan suatu koefisien reduksi yang nilainya bergantung pada jumlah lantai yang dipikul dan besarnya factor reduksi tersebut dicantumkan pada Tabel 5 PPPuRdG 1987.

Tabel 2.3 Koefisien Reduksi Beban Hidup

Penggunaan gedung	Koefisien reduksi beban hidup	
	Untuk perencanaan balok induk dan portal	Untuk peninjauan gempa
PERUMAHAN/PENGHUNIAN: Rumah tinggal, asrama, hotel, rumah sakit	0,75	0,30
PENDIDIKAN: Sekolah, ruang kuliah	0,90	0,50
PERTEMUAN UMUM: Mesjid, gereja, bioskop, restoran, ruang dansa, ruang pagelaran	0,90	0,50
KANTOR: Kantor, bank	0,60	0,30
PERDAGANGAN: Toko, toserba, pasar	0,80	0,80
PENYIMPANAN: Gudang, perpustakaan, ruang arsip	0,80	0,80
INDUSTRI: Pabrik, bengkel	1,00	0,90
TEMPAT KENDARAAN: Garasi, gedung parkir	0,90	0,50
GANG DAN TANGGA:		
– perumahan/penghunian	0,75	0,30
– pendidikan, kantor	0,75	0,50
– pertemuan umum, perdagangan penyimpanan, industri, tempat kendaraan	0,90	0,50

Tabel 2.4 Koefisien Reduksi Beban Hidup Kumulatif

Jumlah lantai yang dipikul	Koefisien reduksi yang dikalikan kepada beban hidup kumulatif
1	1,0
2	1,0
3	0,9
4	0,8
5	0,7
6.	0,6
7.	0,5
8 dan lebih	0,4

2.4.3 Beban Angin

Menurut Pedoman Perencanaan dan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung (PPPuRdG). Pengertian beban angin ialah semua beban yang bekerja pada gedung atau bagian gedung yang disebabkan oleh selisih dalam tekanan udara.

2.4.3.1 Penentuan Beban Angin

Beban angin ditentukan dengan menganggap adanya tekanan positif dan tekanan negatif (isapan), yang bekerja tegak lurus pada bidang yang ditinjau dan besarnya beban angin sama dengan tekanan tiup dikali dengan koefisien angin.

2.4.3.2 Pembebasan Peninjauan Beban Angin

Pembebasan Peninjauan Beban Angin untuk kondisi:

- Pada gedung tertutup dan rumah tinggal dengan tinggi tidak lebih dari 16 m, dengan struktur yang cukup kaku.
- Apabila perbandingan antara tinggi dan lebar gedung dan struktur gedung cukup kecil.

2.4.4 Beban Gempa

Menurut Pedoman Perencanaan dan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung (PPPuRdG). Pengertian beban gempa adalah semua beban statik ekuivalen yang bekerja pada gedung atau bagian gedung yang menirukan pengaruh dari gerakan tanah akibat gempa itu. Dalam hal pengaruh gempa pada

struktur gedung ditentukan berdasarkan suatu analisa dinamik, maka yang diartikan dengan beban gempa disini adalah gaya-gaya di dalam struktur tersebut yang terjadi oleh gerakan tanah akibat gempa itu.

Menurut Rancangan Standar Nasional (SNI) 03-1726-2002, Tata Cara Perencanaan Gempa untuk Bangunan Gedung. Gempa rencana ditetapkan mempunyai periode ulang 500 tahun, agar probabilitasnya terbatas pada 10% selama 50 tahun.

2.4.4.1 Kategori Gedung

SNI 03-1726-2002. Pengaruh gempa rencana harus di kalikan dengan suatu faktor keutamaan I menurut persamaan:

$$I = I_1 I_2$$

Dimana:

I_1 = faktor keutamaan berkaitan dengan penyesuaian probabilitas terjadinya gempa selama umur gedung.

I_2 = faktor keutamaan berkaitan dengan penyesuaian umur gedung tersebut.

I_1 dan I_2 ditetapkan menurut tabel 2.4.

Tabel 2.5. Faktor Keutamaan untuk Berbagai Kategori Gedung dan Bangunan

Katagori Gedung	Faktor Keutamaan		
	I_1	I_2	I
Gedung umum seperti untuk penghunian, perniagaan dan perkantoran	1,0	1,0	1,0
Monumen dan bangunan monumental	1,0	1,6	1,6
Gedung penting pasca gempa seperti RS, 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 diatas menara	1,5	1,0	1,5

2.4.4.2 Daktilitas Struktur

Faktor daktilitas struktur gedung μ adalah rasio antara simpangan maksimum struktur gedung akibat pengaruh gempa rencana pada saat mencapai kondisi di ambang keruntuhan dan simpangan struktur gedung pada saat terjadinya pelelehan pertama.

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

δ_m = simpangan maksimum pada kondisi di ambang keruntuhan

δ_y = simpangan maksimum pada saat terjadi pelelehan pertama

$\mu = 1,0$ adalah nilai faktor daktilitas struktur elastik penuh

2.4.4.3 Pembebanan Gempa Nominal (V_n) dan Faktor Reduksi Gempa (R)

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

V_e = pembebanan maksimum akibat pengaruh beban rencana yang diserap struktur gedung elastik penuh dalam kondisi diambang keruntuhan

V_y = pembebanan yang menyebabkan pelelehan pertama

μ = faktor daktilitas struktur gedung

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

$f_1 = 1,6$; faktor kuat lebih yang terkandung dalam struktur gedung

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

$R = 1,6$; Faktor reduksi gempa struktur elastik penuh

R_m = faktor reduksi gempa maksimum.

Nilai R dan μ , dengan ketentuan bahwa nilai R dan μ tidak dapat melampaui nilai maksimumnya, tercantum dalam tabel 2.6.

Untuk struktur gedung terdiri dari beberapa jenis subsistem struktur gedung yang berbeda:

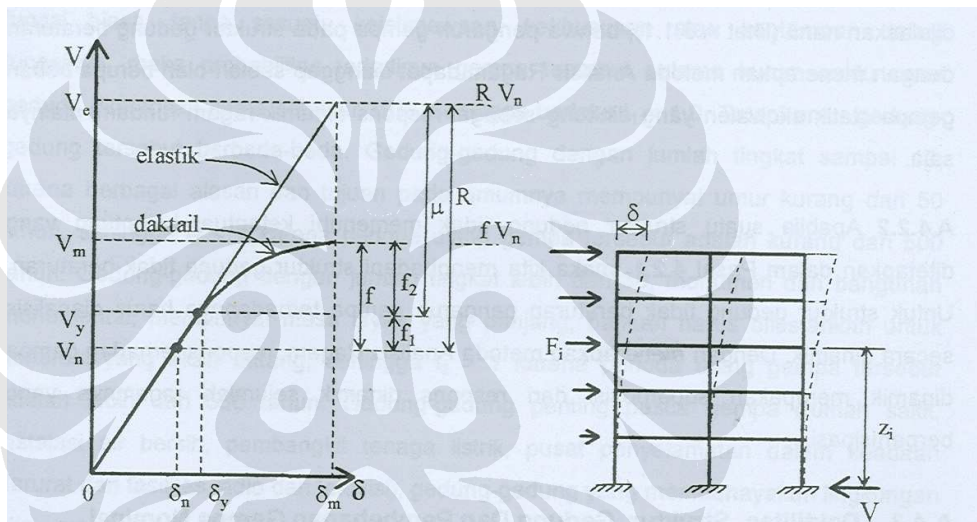
$R = \frac{\sum V_s}{\sum V_s / R_s}$ hanya dipakai apabila rasio antara nilai-nilai faktor reduksi

gempa dari jenis-jenis subsistem struktur gedung yang ada tidak lebih dari 1,5

Dimana: R = faktor reduksi gempa representatif struktur gedung

R_s = nilai faktor reduksi gempa masing-masing jenis subsistem struktur gedung.

V_s = gaya geser dasar yang dipikul masing-masing jenis subsistem struktur gedung



Gambar 2.9. Diagram Beban- Simpangan ($V-\delta$) Struktur Gedung

Tabel 2.6. Parameter daktilitas struktur gedung

Taraf kinerja struktur gedung	μ	R pers.(6)
Elastik penuh	1,0	1,6
Daktail 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
Daktail penuh	5,3	8,5

Dalam tabel 2.7. ditetapkan nilai μ_m yang dapat dikerahkan oleh beberapa jenis sistem dan sub sistem struktur gedung , berikut faktor reduksi maksimum R_m yang ber sangkutan. Untuk subsistem struktur gedung yang tidak tercantum dalam tabel 2.7. faktor daktilitas dan faktor reduksi gempanya harus ditentukan dengan cara-cara rasional, misalnya dari hasil analisis beban dorong statik (*static push-over analysis*).

Tabel 2.7. faktor daktilitas maksimum, faktor reduksi gempa maksimum, faktor tahanan lebih struktur dan faktor tahanan lebih total beberapa jenis sistem dan subsistem strukur gedung.

Sistem dan subsistem struktur gedung	Uraian sistem pemikul beban gempa	μ_m	R_m Pers. (6)	f Pers. (39)
1. Sistem dinding penumpu (Sistem struktur yang tidak memiliki rangka ruang pemikul beban gravitasi secara lengkap. Dinding penumpu atau sistem bresing memikul hampir semua beban gravitasi. Beban lateral dipikul diikuti dinding geser atau rangka bresing)...	1. Dinding geser beton bertulang	2,7	4,5	2,8
	2. Dinding penumpu dengan rangka baja ringan dan bresing tarik	1,8	2,8	2,2
	3. Rangka bresing di mana bresingnya memikul beban gravitasi			
	a. Baja	2,8	4,4	2,2
	b. Beton bertulang (tidak untuk Wilayah 5 & 6)	1,8	2,8	2,2
2. Sistem rangka gedung (Sistem struktur yang pada dasarnya memiliki rangka ruang pemikul beban gravitasi secara lengkap. Beban lateral dipikul dinding geser atau rangka bresing).	1. Rangka bresing eksentris baja (RBE)	4,3	7,0	2,8
	2. Dinding geser beton bertulang	3,3	5,5	2,8
	3. Rangka bresing biasa			
	a. Baja	3,6	5,6	2,2
	b. Beton bertulang (tidak untuk Wilayah 5 & 6)	3,6	5,6	2,2
	4. Rangka bresing konsentrik khusus			
	a. Baja	4,1	6,4	2,2
5. Dinding geser beton bertulang berangkai daktail	4,0	6,5	2,8	
6. Dinding geser beton bertulang kantilever daktail penuh	3,6	6,0	2,8	
7. Dinding geser beton bertulang kantilever daktail parsial	3,3	5,5	2,8	
3. Sistem rangka pemikul momen (Sistem struktur yang pada dasarnya memiliki rangka ruang pemikul beban gravitasi secara lengkap. Beban lateral dipikul rangka pemikul momen terutama melalui mekanisme lentur)	1. Rangka pemikul momen khusus (SRPMK)			
	a. Baja	5,2	8,5	2,8
	b. Beton bertulang	5,2	8,5	2,8
	2. Rangka pemikul momen menengah beton (SRPMM)	3,3	5,5	2,8
3. Rangka pemikul momen biasa (SRPMB)				
	a. Baja	2,7	4,5	2,8
	b. Beton bertulang	2,1	3,5	2,8
	4. Rangka batang baja pemikul momen khusus (SRBPMK)	4,0	6,5	2,8
5. Sistem ganda (Terdiri dari: 1) rangka ruang yang memikul seluruh beban gravitasi; 2) pemikul beban lateral berupa dinding geser atau rangka bresing dengan rangka pemikul momen. Rangka pemikul momen harus direncanakan secara terpisah mampu memikul sekurang-kurangnya 25% dari seluruh beban lateral; 3) kedua sistem harus direncanakan untuk memikul secara bersama-sama seluruh beban lateral dengan memperhatikan interaksi /sistem ganda)	1. Dinding geser			
	a. Beton bertulang dengan SRPMK beton bertulang	5,2	8,5	2,8
	b. Beton bertulang dengan SRPMB baja	2,6	4,2	2,8
	c. Beton bertulang dengan SRPMM beton bertulang	4,0	6,5	2,8
	2. RBE baja			
	a. Dengan SRPMK baja	5,2	8,5	2,8
	b. Dengan SRPMB baja	2,6	4,2	2,8
	3. Rangka bresing biasa			
	a. Baja dengan SRPMK baja	4,0	6,5	2,8
	b. Baja dengan SRPMB baja	2,6	4,2	2,8
	c. Beton bertulang dengan SRPMK beton bertulang (tidak untuk Wilayah 5 & 6)	4,0	6,5	2,8
	d. Beton bertulang dengan SRPMM beton bertulang (tidak untuk Wilayah 5 & 6)	2,6	4,2	2,8
	4. Rangka bresing konsentrik khusus			
	a. Baja dengan SRPMK baja	4,6	7,5	2,8
b. Baja dengan SRPMB baja	2,6	4,2	2,8	
5. Sistem struktur gedung kolom-kantilever: (Sistem struktur yang memanfaatkan kolom kantilever untuk memikul beban lateral)	Sistem struktur kolom kantilever	1,4	2,2	2

Tabel 2.7. (lanjutan)

Sistem dan subsistem struktur gedung	Uraian sistem pemikul beban gempa	μ_m	R_m Pers. (6)	f Pers. (39)
Sistem interaksi dinding geser dengan rangka	Beton bertulang biasa (tidak untuk Wilayah 3, 4, 5 & 6)	3,4	5,5	2,8
Subsistem tunggal Subsistem struktur bidang yang membentuk struktur gedung secara keseluruhan)	1. Rangka terbuka baja	5,2	8,5	2,8
	2. Rangka terbuka beton bertulang	5,2	8,5	2,8
	3. Rangka terbuka beton bertulang dengan balok beton pratekan (bergantung pada indeks baja total)	3,3	5,5	2,8
	4. Dinding geser beton bertulang berangkai daktail penuh	4,0	6,5	2,8
	5. Dinding geser beton bertulang kantilever daktail parsial	3,3	5,5	2,8

2.4.4.4 Jenis Tanah Dan Perambatan Gelombang

Jenis tanah ditetapkan sebagai tanah keras, tanah sedang, dan tanah lunak. Apabila untuk lapisan tebal maksimumnya 30m paling atas dipenuhi syarat-syarat yang tercantum dalam tabel 2.7

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 niralir 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		

PI = indeks plastisitas tanah

W_n = kadar air alami tanah yang ditinjau

S_u = kuat geser niralir lapisan tanah yang ditinjau

Dalam tabel 4 \bar{v}_s, \bar{N} dan \bar{S}_u adalah nilai rata-rata berbobot besaran itu dengan tebal lapisan tanah sebagai besaran pembobotnya yang harus dihitung menurut persamaan:

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

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

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

Dimana:

t_i = tebal lapisan tanah ke-i

v_s = kecepatan rambat gelombang geser melalui lapisan tanah ke-i, nilai

N_i = nilai hasil tes penetrasi standar lapisan tanah ke-i

S_{ui} = kuat geser biralir lapisan tanah ke-i dn m adalah jumlah tanah yang ada di atas batuan dasar

Yang tidak tercantum dalam tabel 4.8 masuk dalam kategori tanah khusus. Tanah khusus adalah juga 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 3m, lempung sangat lunak dengan PI lebih dari 75 dan ketebalan lebih dari 30m. Untuk jenis tanah khusus percepatan muka tanah harus ditentukan dari hasil analisis perambatan gelombang.

2.4.4.5 Wilayah Gempa Dan Spektrum Respon

SNI 03-1726-2002. Indonesia ditetapkan terbagi dalam 6 wilayah gempa. Wilayah gempa 1 adalah wilayah kegempaan paling rendah dan wilayah gempa 6 kegempanya paling tinggi. Pembagian wilayah ini di dasarkan atas percepatan puncak batuan dasar akibat pengaruh gempa rencana dengan periode ulang 500 tahun, dengan nilai rata-rata untuk setiap wilayah gempa ditetapkan dalam Gambar” wilayah gempa

Indonesia dengan percepatan puncak batuan dasar dengan periode ulang 500 tahun” lampiran 1, dan tabel 2.7.

Tabel 2.7 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	

Wilayah gempa 1 ditetapkan sebagai percepatan minimum yang harus diperhitungkan dalam perencanaan struktur untuk menjamin kekekaran (*robustness*) minimum dari struktur gedung.

Untuk masing-masing wilayah gempa ditetapkan *Spectrum Respons Gempa Rencana C-T* seperti ditunjukkan dalam gambar “ Respons spektrum gempa rencana”, terampir 2.

C = faktor respons gempa, dinyatakan dalam percepatan gravitasi

T = waktu getar alami (detik)

Untuk $T = 0$, maka $C = A_0$. Dimana A_0 merupakan percepatan puncak muka tanah menurut tabel 2.7.

2.4.4.6 Eksntritisas Pusat Massa Terhadap Pusat Rotasi Lantai Tingkat

Pusat masa lantai tingkat suatu struktur gedung adalah titik tangkap resultan beban mati, berikut beban hidup yang sesuai, yang bekerja pada lantai tingkat itu. Pada perencanaan struktur gedung, pusat masa adalah titik tangkap beban gempa statik ekuivalen atau gaya gempa dinamik.

Pusat rotasi lantai tingkat suatu struktur gedung adalah suatu titik pada lantai tingkat itu yang bila suatu beban horisontal bekerja padanya,

lantai tingkat tersebut tidak berotasi, sedangkan tantai-lantai tingkat lainnya berotasi.

2.4.4.7 Kekakuan Struktur

Baik analisis statik maupun analisis dinamik, Beton pratekan dan baja komposit harus diperhitungkan terhadap kekakuannya. Untuk itu, momen inersia penampang unsur struktur dapat ditentukan berdasarkan momen inersia penampang utuh dikali dengan suatu persentase efektifitas penampang sebagai berikut:

- Untuk kolom dan balok rangka beton bertulang terbuka :75%
- Untuk dinding geser beton bertulang kantilever :60%
- Untuk dinding geser beton bertulang berangkai
 - komponen dinding yang mengalami tarikan aksial : 50%
 - Komponen dinding yang mengalami tekanan aksial : 80%
 - Komponen balok perangkai dengan tulangan memanjang : 20%

Modulus elastisitas beton E_c di tetapkan sesuai dengan mutu (kuat tekan yang dipakai). Sedangkan modulus elastisitas baja ditetapkan sebesar $E_s = 200$ Gpa .

2.4.4.8 Drift Atau Simpangan Antar Tingkat

Drift atau simpangan antara tingkat adalah selisih *displacement* lateral antara dua lantai yang berturutan. Dengan demikian untuk tingkat ke- i ,
 $drift = \delta_i - \delta_{i-1}$.

2.4.4.9 Kinerja Struktur Gedung

Kinerja batas layan: *drift* atau simpangan antara tingkat adalah selisih displacemen lateral antara dua lantai yang berturutan, dengan demikian untuk tingkat ke- i , $drift = \delta_i - \delta_{i-1}$. Simpangan antar-tingkat ini harus dihitung dari simpangan struktur gedung tersebut akibat pengaruh gempa nominal yang telah dibagi Faktor Skala.

Untuk memenuhi persyaratan kinerja batas layan struktur gedung, dalam segala hal simpangan antar-tingkat yang dihitung dari simpangan

struktur gedung tidak boleh melampaui $0.03/R$ kali tinggi tingkat yang bersangkutan atau 30 mm , bergantung yang mana yang nilainya terkecil

Kinerja batas ultimate: Akibat pengaruh beban gempa rencana, dalam kondisi diambang keruntuhan dan untuk membatasi kemungkinan terjadinya keruntuhan struktur gedung yang dapat menimbulkan korban jiwa manusia dan untuk mencegah benturan antar-gedung yang dipisahkan oleh sela pemisah, simpangan atau simpangan antar-tingkat ini harus dihitung dari simpangan struktur gedung akibat pembebanan gempa nominal, dikalikan dengan factor pengali ζ sebagai berikut:

- untuk struktur gedung beraturan:

$$\zeta = 0.70 R$$

- untuk struktur gedung tidak beraturan:

$$\zeta = 0.70 R/\text{Faktor Skala}$$

Simpangan antar-tingkat dalam kondisi batas ultimate ini tidak boleh melampaui 0.02 kali tinggi tingkat yang bersangkutan.

2.4.4.10 P-Delta Efek

Untuk struktur yang taraf penjepitan lateralnya lebih dari 10 tingkat atau 40 m, haarus diperhitungkan terhadap pengaruh P-Delta, yaitu suatu gejala yang terjadi pada struktur gedung yang fleksibel, dimana simpangan kesamping yang besar akibat beban gempa lateral menimbulkan beban lateral tambahan akibat momen guling yang terjadi oleh beban gravitasi yang titik tangkapnya menyimpang ke samping.

2.4.4.11 Arah Pembebanan Gempa

Arah pembebanan gempa harus ditentukan sedemikian rupa, hingga memberikan pengaruh terbesar terhadap unsur-unsur subsistem dan sistem secara keseluruhan.

Untuk mensimulasikan arah pengaruh gempa rencana yang sembarang terhadap strktur gedung , pengaruh gempa dalm arah utama, yang ditentukan harus dianggap efektif 100% dan harus dianggap terjadi bersamaan dengan pengaruh pembebanan gempa dalam arah tegak lurus

pada arah tegak lurus pada arah pembebanan utama tadi, dengan efektifitas 30%.

2.4.4.12 Beban Khusus

Menurut Pedoman Perencanaan dan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung (PPPuRdG). Pengertian beban khusus adalah semua beban yang bekerja pada gedung atau bagian gedung yang terjadi akibat selisih suhu, pengangkatan dan pemasangan, penurunan pondasi, susut, gaya-gaya tambahan. Yang berasal dari beban hidup seperti gaya rem yang berasal dari keran, gaya sentrifugal, dan gaya dinamis yang berasal dari mesin-mesin, serta pengaruh-pengaruh khusus lainnya.

2.5 ANALISA RESPON DINAMIK

Dinamik secara sederhana dapat didefinisikan sebagai perubahan waktu, jadi beban yang dinamik adalah setiap beban yang arah atau posisinya berubah menurut waktu. Pada dasarnya ada dua pendekatan yang berbeda, yang dapat dipakai untuk mengevaluasi struktur terhadap beban dinamik, yakni pendekatan deterministik dan nondeterministik⁷.

- Yang dimaksud dengan pendekatan deterministik adalah jika variasi waktu pembebanan diketahui secara lengkap, walaupun sifatnya tidak beraturan, dan besarnya selalu sama atau tetap.
- Yang dimaksud dengan analisa nondeterministik adalah jika variasi waktu tidak diketahui secara lengkap.

Jika struktur bangunan dikenakan gaya luar yang berupa gaya dinamik, maka ada tiga komponen gaya melawan beban dinamik tersebut, yaitu:

- Gaya inersia (kelembaman) yang merupakan perkalian massa dan percepatan pergerakan tanah.

$$f_i = m\ddot{u}$$

- Gaya redaman yang merupakan perkalian koefisien redaman dan percepatan pergerakan tanah.

⁷ Primasari Dini, Karakteristik Dinamik pada Penggunaan *Outrigger* Sebagai Solusi Penambahan Lantai pada Struktur Banguna Tinggi (*High Rise Building*), Skripsi Depok, 2006,14

$$f_D = c\dot{u}$$

- Gaya inelastis yang merupakan perkalian kekakuan dan perpindahan gerakan tanah.

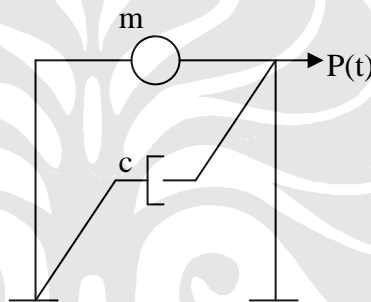
$$f_S = ku$$

Dengan menggunakan hukum kesetimbangan Newton II dan komponen-komponen utama tersebut didapat gaya-gaya yang bekerja meliputi beban yang dikenakan $p(t)$ dan ketiga gaya diatas mengakibatkan gerak.

$$f_i + f_D + f_S = p(t)$$

Sehingga mendapatkan rumus kesetimbangan dinamik:

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



Gambar 2.10 Komponen utama sistem dinamik

Pendekatan analisa dinamik untuk mendapatkan respon struktur terhadap gempa dengan pemodelan massa tegumpal, dapat dibedakan menjadi dua metode perhitungan, yaitu:

- 1). *Respon History Analysis (RHA)*, yang menghasilkan fungsi struktur terhadap waktu. Yaitu analisa dengan memberlakukan riwayat waktu beban dinamik pada model struktur. Untuk analisa struktur terhadap beban gempa, suatu model struktur dikenakan riwayat percepatan gempa yang didapat dari hasil pencatatan rekaman gempa atau rekaman gempa tiruan.
- 2). *Respon Spectrum Analysis (RSA)*, yang merupakan estimasi respon puncak struktur yang cukup baik, tanpa adanya analisa riwayat waktu dari struktur. Pada RHA menghasilkan respon struktur sebagai fungsi waktu, nilai yang dibutuhkan dalam desain adalah aksimum. Untuk menentukan langsung nilai maksimum respon dapat digunakan RSA.

2.5.1 Spectral Modal Analysis

Untuk gedung tidak beraturan, pengaruh gempa rencana terhadap struktur gedung harus ditentukan melalui analisis response dinamik 3 dimensi;

- *Ragam dominan:* Ragam pertama (fundamental) harus dominan dalam translasi;
- *Spektrum gempa rencana:* Analisis menggunakan Spektrum Response Gempa Rencana sesuai Gambar 2 TCPKGuG 2002, yang nilai ordinatnya dikalikan faktor koreksi I/R, dimana I adalah faktor keutamaan menurut Tabel 1 (TCPKGuG2002), sedangkan R adalah factor reduksi gempa representatif dari struktur gedung yang bersangkutan.
- *Jumlah ragam:* Jumlah ragam *vibrasi* yang ditinjau dalam perjumlahan respons ragam menurut metoda ini harus sedemikian rupa, sehingga partisipasi massa dalam menghasilkan respons total harus mencapai sekurang-kurangnya 90%.
- *Kombinasi Ragam:* Perjumlahan response *ragam* yang memiliki waktu-waktu getar alami yang berdekatan, apabila selisihnya kurang dari 15 %, harus dilakukan dengan Kombinasi kuadratik Lengkap *Complete Quadratic Combination* (CQC) [6]. Untuk yang berjauhan dapat dilakukan dengan SRSS.
- (7) *Faktor Skala:* Nilai akhir respons dinamik struktur terhadap pembebanan gempa nominal akibat pengaruh gempa rencana dalam suatu arah tertentu, tidak boleh diambil kurang dari 80 % nilai response ragam yang pertama. Bila response dinamik dinyatakan dalam V , maka persyaratan tersebut:

$$V \geq 0.80 V_1$$

dimana V_1 adalah gaya geser dasar nominal sebagai response ragam yang pertama terhadap pengaruh gempa rencana menurut persamaan:

$$V_1 = C_1 I/R W_t$$

dimana C_1 adalah nilai faktor response gempa.

Dengan demikian gaya geser tingkat nominal akibat pengaruh gempa rencana sepanjang tinggi gedung hasil analisis ragam spectrum dalam arah tertentu, harus dikalikan nilainya dengan suatu faktor skala:

$$\text{Faktor Skala} = 0.80 V_f/V_t \geq 1$$

Dimana V_t adalah gaya geser dasar nominal yang didapat dari analisis ragam spektrum.

