

Bidang Penelitian: Ilmu Lingkungan

**LAPORAN AKHIR
PENELITIAN SAINS TEKNOLOGI DAN SENI
FAKULTAS TEKNIK**

**IDENTIFIKASI PERILAKU TRANSFORMASI GEOMETRIS
BANGUNAN DALAM PROSES DISAIN BANGUNAN
TERHADAP GEMPA**



TIM PENGUSUL

1. **Dr. Livian Teddy, ST., MT** (NIDN. 0010057507)
2. **Dr. Johannes Adiyanto, ST., MT** (NIDN. 0026097407)
3. **Husnul Hidayat, ST., MT** (NIDN. 0024108304)

Dibiayai dari :
Anggaran PNPB Fakultas Teknik
Universitas Sriwijaya tahun anggaran 2020
0474/UN9.FT/TU.SK/2020 tanggal 2 September 2020
Sesuai dengan Kontrak Penelitian Sains Teknologi dan Seni FT. UNSRI
Nomor : 1647/UN9.FT/TU.SK/2020
Tanggal 2 September 2020

**PROGRAM STUDI TEKNIK ARSITEKTUR
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
DESEMBER 2020**

HALAMAN PENGESAHAN

- Judul Penelitian : Identifikasi Perilaku Transformasi Geometris Bangunan Dalam Proses Disain Bangunan Terhadap Gempa
1. Bidang Penelitian : Ilmu Lingkungan
 2. Ketua Peneliti
 - a. Nama Lengkap : Dr. Livian Teddy, ST., MT
 - b. Jenis Kelamin : Laki-laki
 - c. NIP/NIDN : 197402102005011003 / 0010057507
 - d. Pangkat dan Golongan : Penata / IIIc
 - e. Jabatan Struktural : -
 - f. Jabatan Fungsional : Lektor
 - g. Perguruan Tinggi : Universitas Sriwijaya
 - h. Fakultas / Jurusan : Teknik / Teknik Arsitektur
 - i. Alamat Kantor : Jl. Raya Palembang Prabumulih Km.32 Ogan Ilir – Sumatera Selatan
 - j. Telepon/Fax : -
 - k. Alamat Rumah : Jl. Peternakan Raya No. A4 Palembang
 - l. Telepon/Hp/Fax/email : 0711-410285 / 0895383927303
[/livianteddy@gmail.com](mailto:livianteddy@gmail.com)
 3. Jumlah Anggota Peneliti : 3 orang
 - a. Nama Anggota I : Dr. Johannes Adiyanto, ST., MT
 - b. Nama Anggota II : Husnul Hidayat, ST., MT
 4. Tahun usulan : 2020
 5. Biaya yang diusulkan . : Rp. 23.500.000,-

Ketua UPPM FT Unsri,

Indralaya, Desember 2020
Mengetahui,
Ketua Peneliti,

Dr. Rosidawani, S.T.,M.T.
NIP. 19760509 2000 12 2 001

Dr. Livian Teddy, ST., MT
NIP. 197402012005011003

Menyetujui,
Dekan Fakultas Teknik

Prof. Ir. Subriyer Nasir, M.T., Ph.D
NIP. 19600909 198703 1 004

HALAMAN PENGESAHAN

- Judul Penelitian : Identifikasi Perilaku Transformasi Geometris Bangunan Dalam Proses Disain Bangunan Terhadap Gempa
1. Bidang Penelitian : Ilmu Lingkungan
2. Ketua Peneliti
- a. Nama Lengkap : Dr. Livian Teddy, ST., MT
 - b. Jenis Kelamin : Laki-laki
 - c. NIP/NIDN : 197402102005011003 / 0010057507
 - d. Pangkat dan Golongan : Penata / IIIc
 - e. Jabatan Struktural : -
 - f. Jabatan Fungsional : Lektor
 - g. Perguruan Tinggi : Universitas Sriwijaya
 - h. Fakultas / Jurusan : Teknik / Teknik Arsitektur
 - i. Alamat Kantor : Jl. Raya Palembang Prabumulih Km.32 Ogan Ilir – Sumatera Selatan
 - j. Telepon/Fax : -
 - k. Alamat Rumah : Jl. Peternakan Raya No. A4 Palembang
 - l. Telepon/Hp/Fax/email : 0711-410285 / 0895383927303
[/livianteddy@gmail.com](mailto:livianteddy@gmail.com)
3. Jumlah Anggota Peneliti : 3 orang
- a. Nama Anggota I : Dr. Johannes Adiyanto, ST., MT
 - b. Nama Anggota II : Husnul Hidayat, ST., MT
4. Tahun usulan : 2020
5. Biaya yang diusulkan . : Rp. 23.500.000,-

Ketua UPPM FT Unsri,

Dr. Rosidawani, S.T., M.T.
NIP. 19760509 2000 12 2 001

Indralaya, Desember 2020
Mengetahui,
Ketua Peneliti,

Dr. Livian Teddy, ST., MT
NIP. 197402012005011003



Menyetujui,
Dekan Fakultas Teknik

Prof. Ir. Subriyer Nasir, M.T., Ph.D
NIP. 19600909 198703 1 004

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT sebagai sumber ilmu, rahmat, barakah, anugrah dan pemberi petunjuk jalan dan kemudahan yang telah melimpahkan nikmat, karunia dan hidayah-Nya. Laporan penelitian dengan judul : Identifikasi Perilaku Transformasi Geometris Bangunan Dalam Proses Disain Bangunan Terhadap Gempa. Diharapkan dapat menambah pengalaman penelitian penulis dalam bidang arsitektur. Semoga penelitian ini nantinya dapat memberikan pedoman bagi arsitek dalam mendisain bangunan tahan gempa.

Indralaya, Desember 2020

Dr. Livian Teddy, ST., MT

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	iv
BAB I. PENDAHULUAN.....	1
1.1. LATAR BELAKANG	1
1.2. RUMUSAN MASALAH.....	2
1.2. TUJUAN PENELITIAN.....	2
BAB II. TINJAUAN LITERATUR.....	3
2.1. STRUKTUR RANGKA RIGID	3
2.2. MATERIAL BETON BERTULANG	3
2.3. <i>MODAL ANALYSIS</i> (ANALISIS MODAL) DAN <i>ECCENTRICITY</i> (EKSENTRISITAS)	4
2.3.1. <i>DIRECTIONS FACTOR</i> (FAKTOR ARAH).....	5
2.3.2. <i>PERIOD</i> (PERIODE GETAR STRUKTUR)	5
2.3.3. <i>MODE</i> (RAGAM)	5
2.3.4. <i>PARTICIPATING MASS RATIO</i> (RASIO PARTISIPASI MASSA)	6
2.3.5. <i>ECCENTRICITY</i> (EKSENTRISITAS)	6
2.4. EVALUASI IREGULERITAS GEOMETRI BANGUNAN TERHADAP GEMPA...7	
2.4.1. KONFIGURASI KETIDAKBERATURAN TORSI.....	7
2.4.2. KONFIGURASI KETIDAKBERATURAN SUDUT DALAM	8
2.4.3. KONFIGURASI DISKONTINUITAS DIAFRAGMA.....	9
2.4.4. KONFIGURASI KETIDAKBERATURAN SISTEM NONPARALEL	10
2.4.5. KONFIGURASI <i>SOFT STORY</i> / TINGKAT LUNAK	10
2.4.6. KONFIGURASI KETIDAKBERATURAN BERAT/MASSA	11
2.4.7. KONFIGURASI KETIDAKBERATURAN GEOMETRI VERTIKAL.....	12
2.4.8. KONFIGURASI DISKONTINUITAS KETIDAKBERATURAN KUAT LATERAL TINGKAT / WEAK STORY.....	13
2.4.9. KONFIGURASI KETIDAKBERATURAN PERGESERAN MELINTANG TERHADAP BIDANG & DISKONTINUITAS ARAH BIDANG	14

BAB III. METODE PENELITIAN	16
3.1. JENIS RANCANGAN PENELITIAN	16
3.2. SAMPEL DAN MODEL PENELITIAN.....	17
3.3. METODE PENGUMPULAN DATA.....	17
3.4. METODE ANALISIS DATA.....	18
BAB IV. TINJAUAN LOKASI PENELITIAN.....	19
4.1. KONDISI KEGEMPAAN DI INDONESIA	19
4.2. KONDISI KEGEMPAAN DI SUMATERA SELATAN	21
4.3. MODEL PENELITIAN	22
BAB V. HASIL IDENTIFIKASI DAN <i>GUIDANCE</i>	27
5.1. HASIL IDENTIFIKASI.....	27
5.2. USULAN <i>GUIDANCE</i>	48
BAB VI. KESIMPULAN	53
DAFTAR PUSTAKA.....	54
LAMPIRAN LUARAN TAMBAHAN : ARTIKEL DI SEMINAR NASIONAL AVOER (TERBIT)	
LAMPIRAN LUARAN WAJIB : ARTIKEL DI JURNAL ARTEKS SINTA 2 (PROSES TRANSLATE KE BAHASA INGGRIS)	

BAB I. PENDAHULUAN

I.1. LATAR BELAKANG

Indonesia merupakan wilayah rawan gempa yang dilalui banyak jalur gempa subduksi seperti Eurasia, Indo-Australia, Pasifik dan sesar seperti sesar Sumatra, Jawa, Sulawesi dan Papua Barat. Dengan demikian sudah banyak kejadian gempa yang menimbulkan korban jiwa dan harta. Salah satu penyumbang terbanyak korban jiwa akibat gempa yaitu kerusakan dan keruntuhan bangunan.

Melakukan disain bangunan untuk dapat menerima gempa kuat dalam kondisi elastis adalah tidak ekonomis. Yang mungkin dilakukan yaitu bangunan bisa saja rusak berat tetapi tidak mengalami keruntuhan. Dan untuk membuat bangunan dengan kondisi demikian tidak cukup diserahkan pada ahli struktur saja tetapi harus ada kerjasama baik antara arsitek dan ahli struktur (Arnold and Stewart, 2000; Hoedajanto and Riyansyah, 2015). Proses perancangan bangunan tahan gempa seharusnya dimulai dari proses disain arsitektur dengan mempertimbangkan aspek geometri bangunan yang akan berpengaruh pada perilaku struktur dalam menerima gempa terutama beban lateral.

Dalam proses disain arsitektur dikenal proses *form finding* yaitu proses pencarian bentuk sampai akhirnya ditemukan bentuk yang sesuai. Biasanya dimulai dengan bentuk sederhana kemudian dilakukan transformasi sehingga didapatkan bentuk yang lebih kompleks. Tetapi pada proses transformasi ini biasanya arsitek lebih fokus pada aspek estetika saja. Pada prinsipnya tidak ada larangan untuk membuat bentuk-bentuk yang kompleks. Tetapi yang menjadi perhatian adalah konsekuensi dari penggunaan bentuk-bentuk kompleks tersebut dalam masalah perilaku gempa terhadap bangunan (Harmankaya and Soyluk, 2012). Selain konfigurasi geometri bangunan, jenis material bangunan juga mempengaruhi ketahanan bangunan terhadap gempa. Material baja memiliki sifat daktilitas yang baik dibandingkan beton yang bersifat getas. Tetapi beton merupakan material struktur bangunan yang paling sering digunakan di Indonesia. Penelitian ini mencoba mempelajari perubahan konfigurasi bangunan yang berbahan beton bertulang dari bentuk dasar menjadi bentuk yang lebih kompleks sehingga mempengaruhi respon bangunan terhadap gempa. Tujuannya mempelajari perubahan geometri bangunan terhadap perilaku struktur dalam menerima beban gempa.

I.2. RUMUSAN MASALAH

Bagaimana perubahan konfigurasi bangunan dengan material beton dari bentuk dasar menjadi bentuk yang lebih kompleks sehingga mempengaruhi respon bangunan terhadap gempa ?

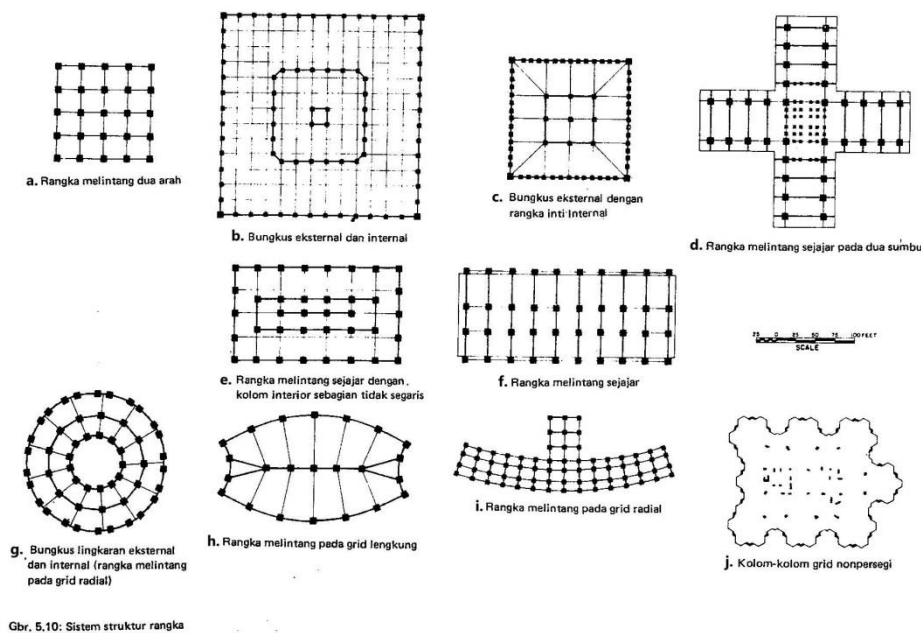
I.3. TUJUAN PENELITIAN

1. Mempelajari perubahan konfigurasi bangunan dari bentuk dasar menjadi bentuk yang lebih kompleks sehingga mempengaruhi respon bangunan terhadap gempa.
2. Untuk mendapatkan pedoman bagi arsitek dalam mendisain bangunan sehingga lebih tahan terhadap gempa.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. STRUKTUR RANGKA RIGID

Rangka rigid (kaku) biasanya terdiri dari susunan paralel atau ortogonal kolom dan balok (gambar 2.1). Tahanan terhadap beban horisontal diberikan oleh tahanan lentur kolom, balok dan join. Kontinuitas dari rangka juga memberikan kontribusi menahan beban gravitasi dengan mengurangi momen di balok. Keuntungan dari rangka rigid yaitu sederhana, susunannya tidak mengganggu, bebas dari pengaku dan struktur dinding, lebih leluasa mengatur ruang dalam serta dapat menyusun jendela atau dinding fasade tanpa halangan. Rangka rigid dianggap ekonomis untuk bangunan sampai dengan 25 lantai. Akan tetapi, jika dikombinasi dengan *shear wall* atau *core* dapat menghasilkan struktur yang lebih kaku sehingga tinggi potensialnya bisa sampai dengan 50 lantai atau lebih.



Gambar 2. 1. Sistem struktur rangka (sumber : Schueller 1989).

2.2. MATERIAL BETON BERTULANG

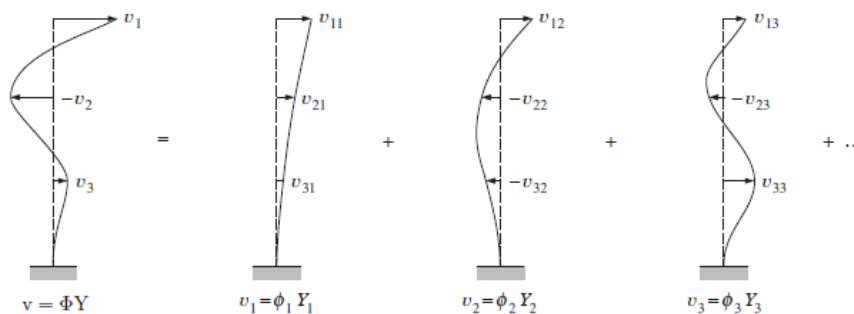
Beton bertulang merupakan material favorit dalam industri bangunan di dunia termasuk di Indonesia. Beton merupakan material percampuran dari semen, kerikil, pasir dan air. Material yang terbentuk dari hasil percampuran tersebut dapat memiliki sifat memiliki kekuatan tekan yang tinggi tapi kekuatan tarik yang lemah. Untuk mengatasi hal tersebut beton dikombinasikan dengan baja tulangan.

Jika proses pembentukan beton bertulang dilakukan dengan baik akan mendapatkan material yang kuat, tahan lama dan daktil (Nawy, Surjaman and Suryoatmono, 1990). Dalam perencanaan bangunan tahan gempa tingkat daktilitas beton bertulang bermacam-macam sesuai dengan Kategori Desain Seismik-nya.

2.3. MODAL ANALYSIS (ANALISIS MODAL) DAN ECCENTRICITY (EKSENTRISITAS)

Analisis modal, atau metode *mode*-superposisi, adalah prosedur respons dinamis linier yang mengevaluasi dan melapiskan bentuk *mode* getaran bebas untuk mengkarakterisasi pola perpindahan. Bentuk *mode* menggambarkan konfigurasi yang secara alami akan dipindahkan oleh suatu struktur. Biasanya, pola perpindahan lateral menjadi perhatian utama. Bentuk mode ekspresi matematika orde rendah cenderung memberikan kontribusi terbesar untuk respon struktural. Saat pesanan meningkat, bentuk *mode* berkontribusi lebih sedikit, dan diperkirakan kurang andal. Masuk akal untuk memotong analisis jika jumlah bentuk *mode* cukup.

Sebuah struktur dengan derajat kebebasan N akan memiliki bentuk mode N yang sesuai. Setiap bentuk *mode* adalah pola perpindahan independen dan normal yang dapat diperkuat dan dilapiskan untuk membuat pola perpindahan resultan, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2. 2. Perpindahan resultan dan komponen modal (sumber : Ondrej, 2019).

Evaluasi numerik dilanjutkan dengan mengurangi persamaan gerak (N persamaan diferensial simultan digabungkan dengan massa penuh dan matriks kekakuan) menjadi himpunan yang jauh lebih kecil dari persamaan diferensial orde dua tak berpasangan (N persamaan koordinat normal independen). Ortogonalitas hubungan bentuk mode memungkinkan reduksi ini.

Dalam program etabs analisis modal menghasilkan beberapa *output* dalam menilai ireguleritas suatu bangunan yaitu *directions factor, period, mode* dan *participating ratio*.

Analisis lainnya dalam Etabs dalam menilai ireguleritas suatu bangunan yaitu *centers mass and rigidity*.

2.3.1. DIRECTIONS FACTOR (FAKTOR ARAH)

Untuk setiap mode, faktor arah modal mengidentifikasi dominasi arah eksitasi. Setiap faktor adalah persentase yang menghubungkan komponennya (terjemahan sepanjang X atau Y, atau rotasi sekitar Z) dengan perpindahan total pada semua diafragma dan lantai. Oleh karena itu, faktor arah berjumlah 100 (Habib, 2012).

2.3.2. PERIOD (PERIODE GETAR STRUKTUR)

Periode getar biasanya digambarkan sebagai pendulum yang diberi gaya sehingga mengayun secara bolak balik. Periode getar disimbolisasi T dengan satuan detik. Waktu mengayun pendulum dari mulainya berayun sampai dengan kembali ketempatnya semula disebut 1 periode getar.

Bangunan juga memiliki periode getar alami atau *natural fundamental period*. Dimana bangunan akan berayun dengan sendirinya tanpa adanya gaya dari luar yang tergantung pada kekakuan dan massa bangunan itu sendiri. Periode getar struktur ini merupakan hal yang sangat penting dalam perencanaan bangunan tahan gempa karena merupakan salah satu parameter yang menentukan intensitas gempa pada bangunan (Mulia, 2016).

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = \frac{1}{f} \text{-----(2.1)}$$

Dimana,

T = periode getar

ω = frekuensi sirkular

m = massa

k = kekakuan

f = frekuensi

2.3.3. MODE (RAGAM)

Menurut Mulia (Mulia, 2016), *mode* berkaitan erat dengan periode getar. Dalam analisa dinamik, periode getar divisualisasikan sebagai pola ayunan (*mode shape*). *Mode shape* merupakan pola-pola ayunan dalam periode terpanjang sampai dengan periode terpendek.

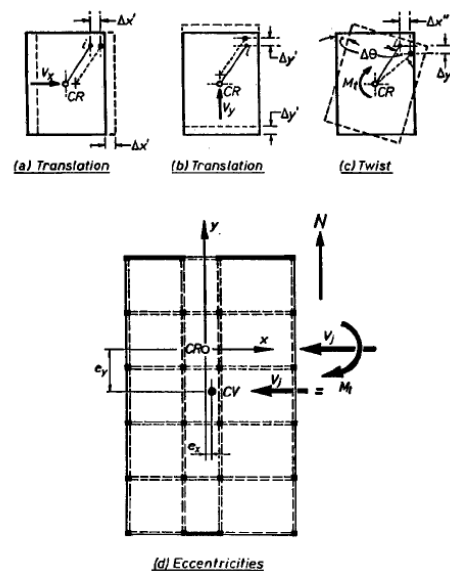
Periode *mode shape* terpanjang disebut *mode shape* pertama atau *fundamental mode*. Pada umumnya *fundamental mode* ini digunakan dalam mengevaluasi fleksibilitas bangunan. Perhitungan *mode shape* sangat sulit dilakukan secara manual tetapi pada saat ini sudah banyak *software* struktur seperti Sap2000, Etabs, Staadpro dan lainnya yang dapat melakukan perhitungan dinamis *mode shape*.

2.3.4. PARTICIPATING MASS RATIO (RASIO PARTISIPASI MASSA)

Participating Mass Ratio berhubungan dengan *mode shape*. Pola-pola *mode shape* dijumlahkan sehingga partisipasi massa dalam menghasilkan respon total (*mass participating ratio*) paling tidak 100%. *Mass participating ratio* 100% dapat digunakan untuk menilai kelayakan model bangunan seperti bentuk bangunan yang terlalu ireguler sehingga *mass participating ratio* 100% sulit tercapai.

2.3.5. ECCENTRICITY (EKSENTRISITAS)

Eccentricity atau eksentrisitas terjadi pada bangunan dimana pusat massa dan pusat kekakuan tidak berimpit atau eksentris sehingga ketika terjadi gaya lateral gempa dapat menyebabkan torsi pada bangunan tersebut. Secara sederhana, pusat massa dapat dikatakan pusat geometri bangunan sehingga mudah dihitung secara simple. Sebaliknya, pusat kekakuan adalah dengan menghitung kekakuan dari kolom serta unsur vertikal lainnya seperti dinding geser, tangga dan sebagainya, sehingga hitungannya cukup rumit (Tjokrodimuljo, 1997). Eksentrisitas dapat digunakan mengevaluasi tingkat ireguleritas dari model bangunan.



Gambar. 2.3. Eksentrisitas menyebabkan deformasi translasi dan torsi pada bangunan (sumber : Paulay & Priestley 1992)

2.4. EVALUASI IREGULERITAS GEOMETRI BANGUNAN TERHADAP GEMPA

Standar tahapan proses desain di Indonesia menurut ketentuan Ikatan Arsitek Indonesia (IAI) (IAI, 2007) yaitu dari tahap konsep desain, tahap pra-desain, desain, tahap pengembangan desain, dan tahap pembuatan gambar kerja (*Detail Engineering Design*). Dalam tahap-tahap proses desain tersebut biasanya arsitek terfokus pada tata ruang dan tata bentuk sehingga kerentanan bangunan terhadap gempa sering terabaikan. Jika diketahui adanya kerentanan desain bangunan terhadap gempa pada tahap proses desain, maka dapat dilakukan perubahan desain untuk mengurangi resiko yang kemungkinan terjadi pada saat gempa kuat. Selain itu, dalam mendesain bangunan tahan gempa, arsitek seharusnya mempunyai ahli struktur yang handal. Akan tetapi, hal yang salah mengasumsikan mereka dapat mengatasi segalanya (Arnold and Stewart, 2000). Oleh karena itu dalam proses desain arsitek mampu mengevaluasi ireguleritas/ketidakteraturan bangunan desainnya terhadap gempa. Semakin ireguler suatu bangunan berarti semakin rentan bangunan tersebut mengalami kerusakan fatal akibat goyangan gempa.

Sebenarnya FEMA 451B (FEMA, 2007) sudah memberikan koridor dalam mengevaluasi ireguleritas suatu bangunan tetapi sifatnya terlalu teknis sehingga tidak mudah dipahami oleh arsitek. Sehingga kemudian dikembangkan menjadi SVA (*Simplified Vulnerability Assessment*) Desain Arsitektur (Teddy, Hardiman and Tudjono, 2018) yang salah satunya dapat mengevaluasi ireguleritas bangunan dalam proses desain.

2.4.1. KONFIGURASI KETIDAKBERATURAN TORSI

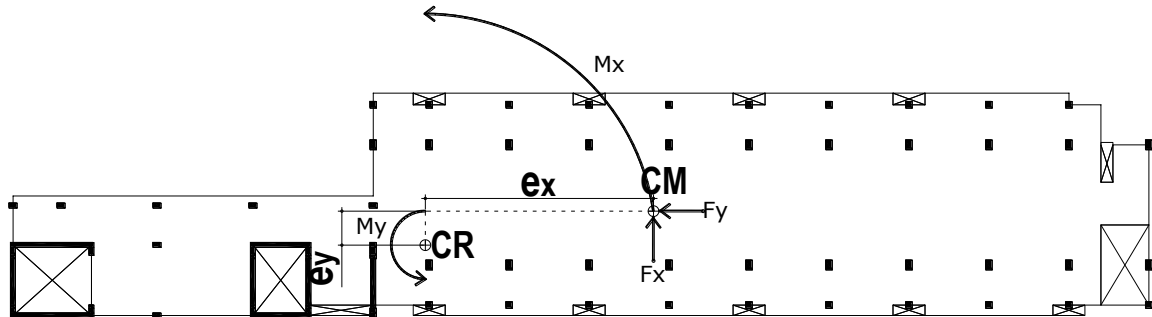
Torsi terjadi akibat pusat massa (CM) dan pusat kekakuan (CR) tidak berimpit sehingga menimbulkan eksentrisitas (e) yang dapat menyebabkan puntiran/torsi pada bangunan (gambar 2.4). Walaupun demikian, denah bangunan berbentuk regular tetapi perbedaan susunan, dimensi dan material balok, kolom, dinding geser, dinding bata, void pada lantai serta distribusi beban terhadap bangunan dapat menyebabkan torsi pada bangunan. Untuk penentuan persyaratan tingkatan penilaian eksentrisitas suatu bangunan yaitu :

$$e_{r-i} = e_i / w_i \text{ ----- (2.2)}$$

Di mana : e_{r-i} = rasio antara panjang eksentrisitas (e_i) tingkat ke $-i$ dan lebar bangunan (w_i) tingkat ke $-i$.

Tabel 2.1. Tingkatan kualitas rasio eksentrisitas (e_{r-i}) konfigurasi ketidakberaturan torsi

Sumber	Tingkatan kualitas (q_a)		
	1.0	0.75	0.5
JBDPA (Okada <i>et al.</i> , 2005)	$e_{r-i} \leq 0.1$	$0.1 < e_{r-i} < 0.3$	$e_{r-i} \geq 0.3$



Gambar 2.4 : Eksentrisitas (e_x, e_y) antara *center of massa* (CM) dan *center of rigidity* (CR)

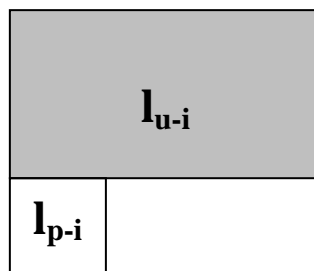
2.4.2. KONFIGURASI KETIDAKBERATURAN SUDUT DALAM

Efek konfigurasi bangunan akibat gempa dapat menimbulkan deformasi bangunan yang tidak seragam sehingga menimbulkan konsentrasi tegangan terhadap sudut-sudut dalam bangunan dan menimbulkan torsi pada bangunan (gambar 2.5).

Untuk penentuan persyaratan tingkatan penilaian ketidakberaturan sudut dalam suatu bangunan yaitu :

$$b_{r-i} = l_{p-i}/l_{u-i} \text{-----} (2.3)$$

Di mana : b_{r-i} = rasio luas proyeksi proyeksi/sayap bangunan (l_{p-i}) tingkat ke $-i$ dan luas lantai bangunan utama tingkat ke $-i$ (l_{u-i}).



Gambar 2.5. Luas proyeksi proyeksi/sayap bangunan (l_{p-i}) tingkat ke $-i$ dan luas lantai bangunan utama tingkat ke $-i$ (l_{u-i}).

Tabel 2.2: Tingkatan kualitas rasio dimensi bangunan (b_{r-i}) konfigurasi ketidakberaturan sudut dalam

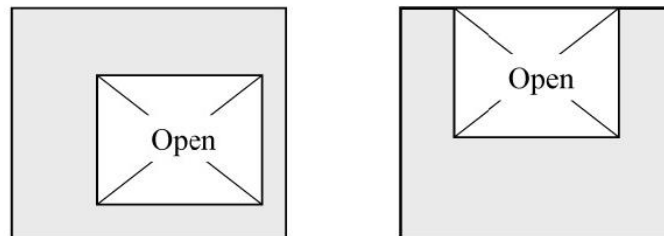
Sumber	Tingkatan kualitas (q_b)		
	1.0	0.75	0.5
JBDPA (Okada <i>et al.</i> , 2005); NZSEE (2006)	Seluruh sayap $b_{r-i} \leq 10\%$	Salah satu sayap $10\% < b_{r-i} \leq 30\%$	Dua atau lebih sayap $b_{r-i} > 30\%$

2.4.3. KONFIGURASI DISKONTINUITAS DIAFRAGMA

Lubang pada lantai akibat *void*, *shaft*, tangga, *lift*, eskalator dan lainnya harus dibatasi karena konfigurasi seperti ini akan mengurangi integritas lantai dalam menahan beban gempa dan menyalurkan beban gempa ke elemen-elemen struktur lainnya (balok, kolom dan dinding geser) (gambar 2.6). Untuk penentuan persyaratan tingkatan penilaian diskontinuitas diafragma suatu bangunan yaitu :

$$e_{v-i} = \frac{\sum l_{b-i}}{\sum l_{l-i}} \text{-----} (2.4)$$

Di mana : e_{v-i} = rasio luas lubang bukaan void, shaft, tangga, lift dll tingkat ke $-i$ (l_{b-i}) dan luas lantai tingkat ke $-i$ (l_{l-i}).



Gambar 2.6. Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma

Tabel 2.3. Tingkatan kualitas rasio lubang bukaan (e_{v-i}) konfigurasi diskontinuitas diafragma

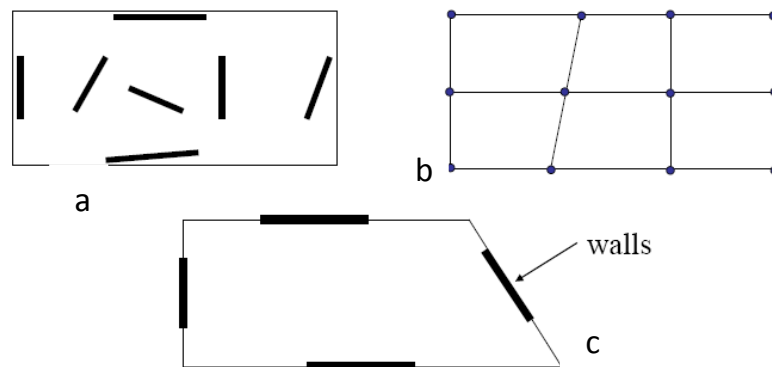
Sumber	Tingkatan kualitas (q_c)		
	1.0	0.75	0.5
JBDPA (Okada <i>et al.</i> , 2005)	$e_{v-i} \leq 0.1$	$0.1 < e_{v-i} < 0.3$	$e_{v-i} \geq 0.3$

2.4.4. KONFIGURASI KETIDAKBERATURAN SISTEM NONPARALEL

Balok, kolom, dan dinding geser yang tidak disusun mengikuti aksis ortogonal akan membentuk konfigurasi ketidakberaturan sistem nonparalel. Konfigurasi seperti ini dapat mengarahkan torsi, translasi diagonal, dan kerusakan lokal pada bangunan (gambar 2.7). Untuk penentuan persyaratan tingkatan penilaian ketidakberaturan sistem non paralel suatu bangunan yaitu :

$$j_{r-i} = \frac{\sum j_i}{\sum j_{t-i}} \text{-----} (2.5)$$

Di mana, j_{r-i} = rasio jumlah elemen balok, kolom dan/atau dinding geser yang tidak mengikuti aksis ortogonal ($\sum j_i$) tingkat ke $-i$ dan jumlah total elemen balok, kolom dan/atau dinding geser tingkat ke $-i$ ($\sum j_{t-i}$).



Gambar 2.7. Ketidakberaturan pergeseran melintang terhadap bidang

Tabel 2.4. Tingkatan kualitas rasio jumlah elemen balok & kolom (j_{r-i}) konfigurasi ketidakberaturan sistem nonparalel

Sumber	Tingkatan kualitas (q_d)		
	1.0	0.75	0.5
Rekomendasi	$j_{r-i} < 30\%$	$30\% \leq j_{r-i} \leq 50\%$	$j_{r-i} > 50\%$

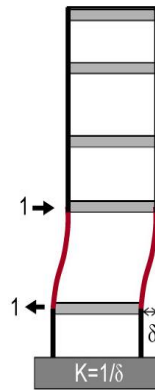
2.4.5. KONFIGURASI SOFT STORY / TINGKAT LUNAK

Konfigurasi ketidakberaturan kekakuan adalah berkurangnya kekakuan lateral secara tiba-tiba pada suatu tingkat / *soft story*. Kondisi seperti ini bisa terjadi ditingkat manapun, tetapi yang paling kritis ketika terjadi di lantai pertama, sebab gaya geser gempa yang paling besar terjadi di level tersebut. Karakteristik esensial dari tingkat lunak ini adalah adanya suatu tingkat yang mengalami diskontinuitas kekakuan (gambar 2.8).

Untuk mengevaluasi suatu bangunan termasuk konfigurasi ini dengan rumus pendekatan yaitu :

$$l_{r-i} = l_{i+1} / l_i \text{-----} (2.6)$$

Di mana : l_{r-i} = rasio tinggi kolom/dinding geser satu tingkat dari tingkat $-i$ (l_{i+1}) dan tinggi kolom ditingkat $-i$ (l_i).



Gambar 2.8. Ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak/*soft story*

Tabel 2.5. Tingkatan kualitas rasio tinggi kolom (l_{r-i}) konfigurasi tingkat lunak

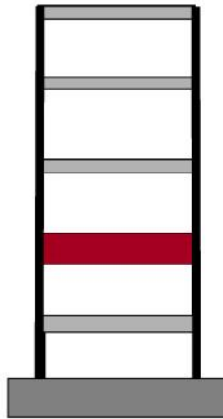
Sumber	Tingkatan kualitas (q_e)		
	1.0	0.75	0.5
JBDPA (Okada <i>et al.</i> , 2005)	$l_{r-i} \geq 0.8$	$0.7 \leq l_{r-i} < 0.8$	$l_{r-i} < 0.7$

2.4.6. KONFIGURASI KETIDAKBERATURAN BERAT/MASSA

Distribusi beban yang tidak merata pada suatu lantai atau lantai di bawah maupun di atasnya akan membentuk konfigurasi ketidakberaturan berat/massa. Konfigurasi seperti ini dapat menyebabkan torsi dan deformasi berlebihan pada bangunan (gambar 2.9). Untuk penentuan persyaratan tingkatan penilaian ketidakberaturan berat/massa suatu bangunan yaitu :

$$m_{r-i} = \sum m_i / \sum m_{i+1} \text{-----} (2.7)$$

Di mana : m_{r-i} = rasio massa lantai ditingkat $-i$ (m_i) dan massa lantai satu tingkat diatas dari tingkat $-i$ (m_{i+1}).



Gambar 2.9. Ketidakberaturan berat/massa

Tabel 2.6: Tingkatan kualitas rasio massa lantai (m_{r-i}) konfigurasi ketidakberaturan berat/massa

Sumber	Tingkatan kualitas (q_f)		
	1.0	0.75	0.5
NZSEE (2006)	$m_{r-i} \leq 100\%$	$100\% < m_{r-i} \leq 150\%$	$m_{r-i} > 150\%$

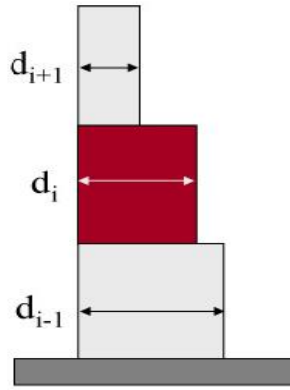
2.4.7. KONFIGURASI KETIDAKBERATURAN GEOMETRI VERTIKAL

Kategori *setback* bisa pemunduran bangunan atau pemajuan bangunan (kantilever). Bangunan *setback* termasuk bangunan ireguler karena pusat massa dan pusat kekakuan tidak berimpit secara vertikal. Massa dan kekakuan baik arah horisontal maupun arah vertikal tidak terdistribusi secara merata. Problem akan terjadi pada daerah peralihan kekakuan dari kekakuan yang besar terhadap bagian bawah kekakuan yang relatif kecil pada bagian atas. Diskontinuitas seperti ini mengarahkan pada konsentrasi tegangan diperbatasan tingkat antara tower dan podium (gambar 2.10) atau untuk kantilever antara kolom dan balok kantilever.

Untuk penentuan persyaratan tingkatan penilaian ketidakberaturan geometri vertikal suatu bangunan yaitu :

$$s_{r-i} = A_i/L_i \text{ ----- (2.8)}$$

Di mana, s_{r-i} = rasio panjang bangunan (L_i) tingkat ke $-i$ dan panjang *setback* bangunan (A_i) tingkat ke $-i$.



Gambar 2.10 : Ketidakberaturan geometri vertikal

Tabel 2.7: Tingkatan kualitas rasio panjang bangunan dan setback (S_{r-i}) konfigurasi ketidakberaturan geometri vertikal

Sumber	Tingkatan kualitas (q_g)		
	1.0	0.75	0.5
Bureau Of Indian Standards (BIS, 2002); FEMA 451B (FEMA, 2007)	$s_{r-i} \leq 0.1$	$0.1 < s_{r-i} < 0.3$	$s_{r-i} \geq 0.3$

2.4.8. KONFIGURASI DISKONTINUITAS KETIDAKBERATURAN KUAT LATERAL TINGKAT / *WEAK STORY*

Konfigurasi ini merupakan diskontinuitas kapasitas lateral struktur kolom dan dinding geser. Kasus yang sering terjadi pada konfigurasi tingkat lemah / *weak story* yaitu tidak memadainya dimensi ukuran kolom, sehingga ketika terjadi gempa dengan cepat tidak bisa bertahan lama langsung mengalami kegagalan tekuk (gambar 2.11).

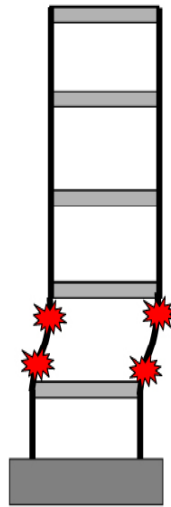
Untuk penentuan persyaratan tingkatan penilaian ketidakberaturan kuat lateral tingkat yaitu :

$$a_{r-i} = (\sum a_e)_i / (\sum a_e)_{i+1} \text{ ----- (2.9)}$$

Di mana, a_{r-i} = rasio luas kolom dan/atau dinding geser ditingkat $-i$ ($\sum a_e$) $_i$ dan luas kolom dan/atau dinding geser satu tingkat dari tingkat $-i$ ($\sum a_e$) $_{i+1}$.

Tabel 2.8. Tingkatan kualitas rasio luas kolom (a_{r-i}) konfigurasi tingkat lemah

Sumber	Tingkatan kualitas (q_h)		
	1.0	0.75	0.5
Turkish	$a_{r-i} > 0.8$	$0.65 \leq a_{r-i} \leq 0.8$	$a_{r-i} < 0.65$



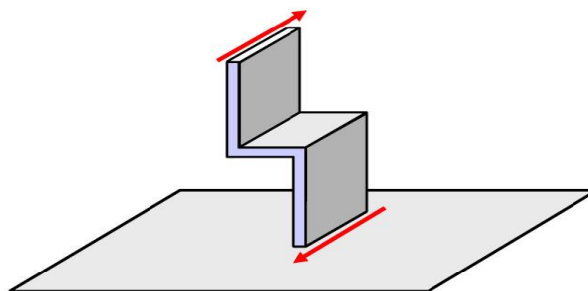
Gambar 2.11. Diskontinuitas dalam ketidakberaturan kuat lateral tingkat

2.4.9. KONFIGURASI KETIDAKBERATURAN PERGESERAN MELINTANG TERHADAP BIDANG & DISKONTINUITAS ARAH BIDANG

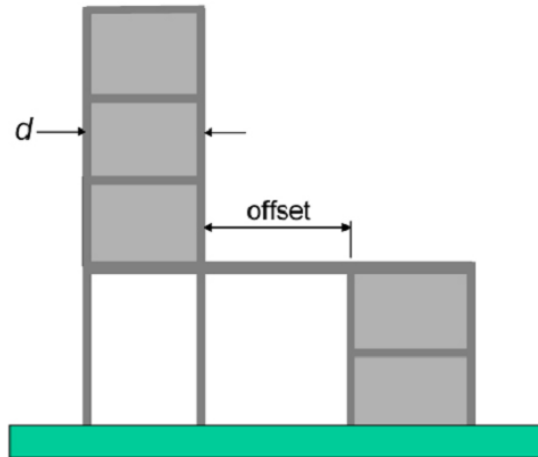
Konfigurasi ketidakberaturan pergeseran melintang terhadap bidang (gambar 2.12) dan diskontinuitas arah bidang (gambar 2.13) yang paling sering terjadi di Indonesia yaitu akibat penggunaan dinding bata sebagai batas pemisah ruangan yang disusun kurang teratur dan kadang tidak menerus ke tingkat atas/bawah sehingga terputusnya jalur beban, terjadi perbedaan kekakuan, dan eksentrisitas antar tingkat. Untuk mengevaluasi apakah keberadaan dinding bata bisa meningkatkan kekakuan atau malah menimbulkan potensi *softstory* dengan rumus yaitu :

$$d_{r-i} = \frac{\sum d_i}{\sum l_i} \text{-----} (2.10)$$

Di mana, d_{r-i} = rasio kepadatan dinding (%), $\sum d_i$ = luas dinding bata lantai tingkat ke $-i$ dan $\sum l_{tot-i}$ = Luas lantai di lantai tingkat ke $-i$.



Gambar 2.12 : Ketidakberaturan pergeseran melintang terhadap bidang



Gambar 2.13 : Diskontinuitas arah bidang dalam ketidakberaturan elemen penahan gaya lateral vertikal

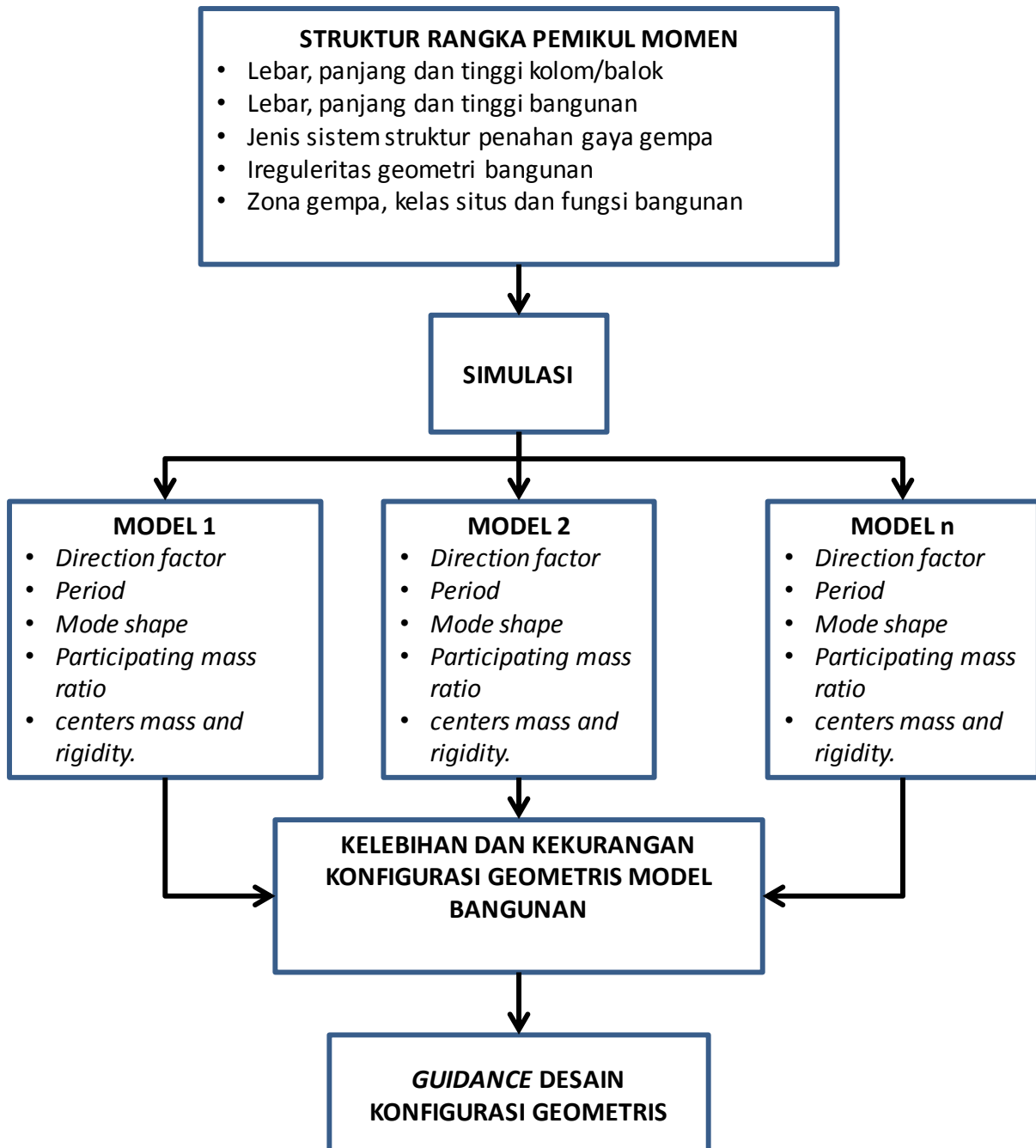
Tabel 2.9: Tingkatan kualitas rasio kepadatan dinding (d_{r-i}) konfigurasi ketidakberaturan bidang

Sumber	Tingkatan kualitas (q_i)		
	1.0	0.75	0.5
Alwashali & Maeda (2012); Boen et al. (2014)	$d_{r-i} > 1.5\%$	$1\% \leq d_{r-i} \leq 1.5\%$	$d_{r-i} < 1\%$

Tabel 2.10. Rekapitulasi indeks ireguleritas di tingkat -i (S_{D-i})

			Gi (Tingkatan kualitas)		
			1.0	0.75	0.5
Ireguleritas Horizontal	a	Konfigurasi ketidakberaturan torsi	$e_{r-i} \leq 0.1$	$0.1 < e_{r-i} < 0.3$	$e_{r-i} \geq 0.3$
	b	Konfigurasi ketidakberaturan sudut dalam	Seluruh sayap $b_{r-i} \leq 10\%$	Salah satu sayap $10\% < b_{r-i} \leq 30\%$	Dua atau lebih sayap $b_{r-i} > 30\%$
	c	Konfigurasi ketidakberaturan diskontinuitas diafragma	$e_{v-i} \leq 0.1$	$0.1 < e_{v-i} < 0.3$	$e_{v-i} \geq 0.3$
	d	Konfigurasi ketidakberaturan sistem paralel	$j_{r-i} < 30\%$	$30\% \leq j_{r-i} \leq 50\%$	$j_{r-i} > 50\%$
Ireguleritas Vertikal	e	Konfigurasi ketidakberaturan kekakuan	$l_{r-i} \geq 0.8$	$0.7 \leq l_{r-i} < 0.8$	$l_{r-i} < 0.7$
	f	Konfigurasi ketidakberaturan berat/massa	$m_{r-i} < 100\%$	$100\% \leq m_{r-i} \leq 150\%$	$m_{r-i} > 150\%$
	g	Konfigurasi ketidakberaturan geometri vertikal / setback	$s_{r-i} \leq 0.1$	$0.1 < s_{r-i} < 0.3$	$s_{r-i} \geq 0.3$
	h	Konfigurasi ketidakberaturan diskontinuitas dalam ketidakberaturan kuat lateral tingkat	$a_{r-i} \geq 0.8$	$0.65 \leq a_{r-i} < 0.8$	$a_{r-i} < 0.65$
Ireguleritas Horizontal & Vertikal	i	Konfigurasi ketidakberaturan pergeseran melintang terhadap bidang & diskontinuitas arah bidang	$d_{r-i} > 1.5\%$	$1\% \leq d_{r-i} \leq 1.5\%$	$d_{r-i} < 1\%$

BAB III. METODE PENELITIAN



Gambar 3.1. Alur Penelitian

3.1. JENIS RANCANGAN PENELITIAN

Rancangan penelitian yang digunakan yaitu penelitian simulasi. Penelitian simulasi merupakan penelitian yang berusaha mempelajari perilaku suatu sistem dengan menggunakan model (Borowski and Borwein, 1989). Kegunaan dari simulasi yaitu menganalisa respon suatu sistem atas variasi-variasi *input* yang dimasukkan dalam sistem tersebut.

Sifat penelitian ini menggunakan pendekatan eksploratif yang tidak berusaha menguji suatu hipotesis atau teori tetapi berupaya menemukan informasi umum mengenai sesuatu topik/masalah yang belum banyak diketahui dan dibahas sebelumnya (Pirmanto, Jundillah and Widagdo, no date).

3.2. SAMPEL DAN MODEL PENELITIAN

Dalam penelitian simulasi ini digunakan model konseptual. Model konseptual adalah sebuah perkiraan dari dunia nyata yang berfungsi sebagai deskripsi visual model matematika (Ledder, 2013). Model analog/konseptual pada penelitian ini digunakan sebagai model simulasi dalam program ETABS dengan analisis modal, dapat diketahui ireguleritas bangunan yang dimodelkan terhadap gempa.

Teknik sampling yang digunakan yaitu *purposive sampling*. Menurut Nasution (Nasution, 1995) *purposive sampling* adalah sampel yang dipilih dengan cermat hingga relevan dengan desain penelitian. Penelitian ini menggunakan 32 model bangunan. Adapun variasi dari 32 model tersebut yaitu :

- Untuk lebar dan panjang balok/kolom relatif sama tetapi ada beberapa variasi tinggi kolom.
- Variasi lebar, panjang dan tinggi bangunan.
- Jenis sistem struktur yang digunakan struktur rangka pemikul momen.
- Zona gempa yang digunakan zona *high* , kelas situs tanah lunak, dan fungsi bangunan sebagai perkantoran.
- Variasi bentuk dan komposisi geometris. Dimulai dari bentuk dasar geometris, bentuk subtraktif dan aditif, kombinasi dari bentuk dasar dan bentuk organis/lengkung.

3.3. METODE PENGUMPULAN DATA

Dalam penelitian ini digunakan data kuantitatif dan kualitatif. Data kuantitatif merupakan data angka yang didapatkan dari hasil pengukuran. Lalu, data kualitatif adalah data dalam bentuk kata-kata dan gambar dari dokumen, observasi, dan transkrip (Neuman, 2014).

Data-data kuantitatif yang dikumpulkan dari penelitian-penelitian sebagai *input* pembuatan model simulasi tersebut yaitu :

- Lebar, panjang dan tinggi kolom/balok
- Lebar, panjang dan tinggi bangunan
- Jenis sistem struktur penahan gaya gempa

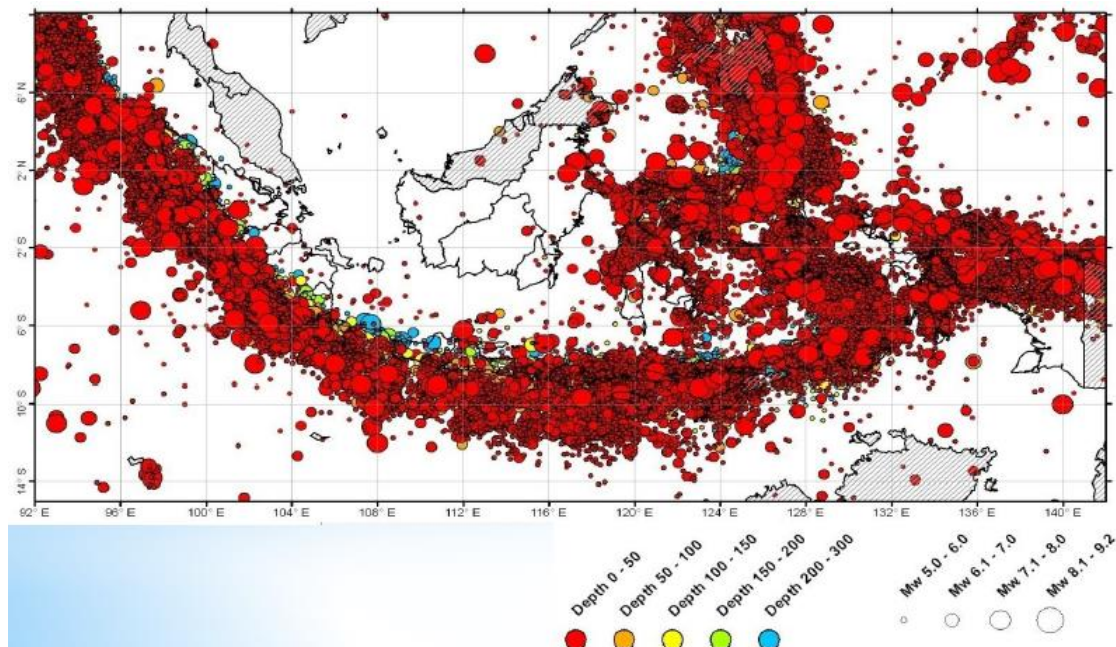
- Ireguleritas geometri bangunan
- Zona gempa, kelas situs dan fungsi bangunan

3.4. METODE ANALISIS DATA

Model-model simulasi yang di-*input* dalam software ETABS kemudian di analisa dengan *modal analysis* atau analisa modal. Dari hasil analisa tersebut didapatkan *output* yaitu *directions factor, period, mode, participating ratio* dan *centers mass and rigidity*. Dari hasil analisa tersebut kemudian digunakan dalam mengevaluasi ireguleritas dari masing-masing model tersebut.

BAB IV. LOKASI PENELITIAN

Indonesia merupakan negara rawan bencana gempa bumi (gambar 4.1) karena dilewati beberapa jalur gempa teraktif di dunia, seperti jalur gempa Mediteranian dan Circum Pasifik dan juga berbagai patahan-patahan lokal/sesar. Dengan demikian, sudah ribuan kali gempa besar maupun kecil yang tercatat dan tidak tercatat menimpa Indonesia. Gempa Aceh tahun 2004 menimbulkan 200.000-an jiwa tewas atau hilang karena diikuti oleh gelombang Tsunami dan mengakibatkan kerusakan hampir seluruh infrastruktur serta bangunan yang ada. Hal tersebut, diikuti pada beberapa gempa lainnya seperti gempa Yogyakarta tahun 2006, gempa Bengkulu dan Sumatra Barat tahun 2007 yang juga menimbulkan korban jiwa dan kerusakan tidak sedikit pada bangunan. Dengan kondisi rawan gempa seperti ini sudah seharusnya bangunan-bangunan yang ada di Indonesia didesain tahan gempa.



Gambar 4.1. Kejadian gempa utama tahun 1900 s/d 2016 (dari total kejadian dengan $M_w > 5$ sebanyak > 50.000 (sumber : Katalog gempa PUSGEN, 2017)

4.1. KONDISI KEGEMPAAN DI INDONESIA

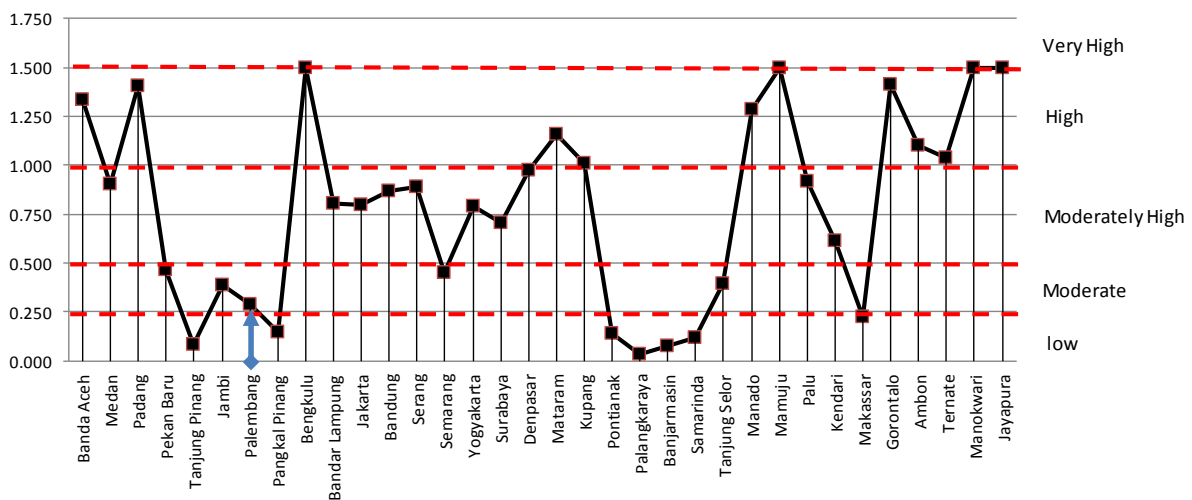
Setiap lokasi di Indonesia memiliki parameter S_S (percepatan batuan dasar pada perioda pendek) dan S_1 (percepatan batuan dasar pada perioda 1 detik) yang berbeda. Dengan peta gempa yang terbaru 2019 (BSN, 2019), di semua lokasi ada yang mengalami kenaikan dan ada pula yang mengalami penurunan parameter S_S dan S_1 dibandingkan peta gempa 2012 (BSN, 2012). Artinya, berpengaruh juga potensi besar kecilnya gempa yang akan terjadi di

suatu tempat. Untuk memudahkan mengidentifikasi potensi besar kecilnya gempa di suatu lokasi, FEMA 155 (FEMA, 2015) membagi dalam 5 zona gempa (tabel 4.1) yaitu :

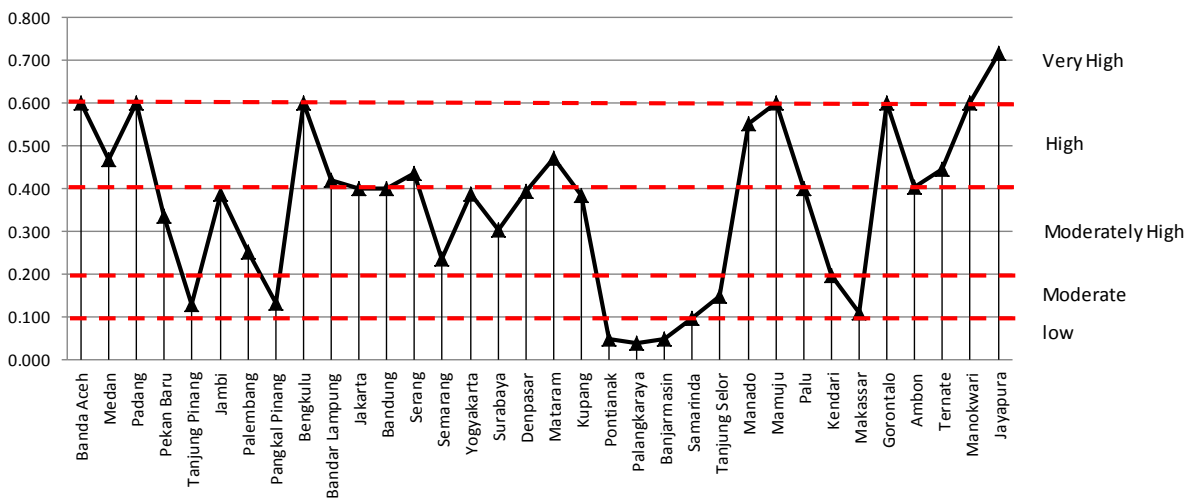
Tabel 4.1. Rentang nilai percepatan respon spektral (MCE_R) di masing-masing zona gempa (Sumber : FEMA 2015).

Zona Gempa	Rentang nilai respon masing-masing zona	
	Ss (g)	S1 (g)
Rendah (<i>Low</i>)	$Ss < 0.250g$	$S1 < 0.100g$
Sedang (<i>Moderate</i>)	$0.250g \leq Ss < 0.500g$	$0.100g \leq S1 < 0.200g$
Sedang Tinggi (<i>Moderately High</i>)	$0.500g \leq Ss < 1.000g$	$0.200g \leq S1 < 0.400g$
Tinggi (<i>High</i>)	$1.000g \leq Ss < 1.500g$	$0.400g \leq S1 < 0.600g$
Sangat Tinggi (<i>Very High</i>)	$Ss \geq 1.500g$	$S1 \geq 0.600g$

Wilayah di Indonesia di peta gempa 2019 memiliki kategori zona gempa rendah (*Low*) s/d zona gempa tinggi (*High*) (gambar 4.1 dan 4.2).



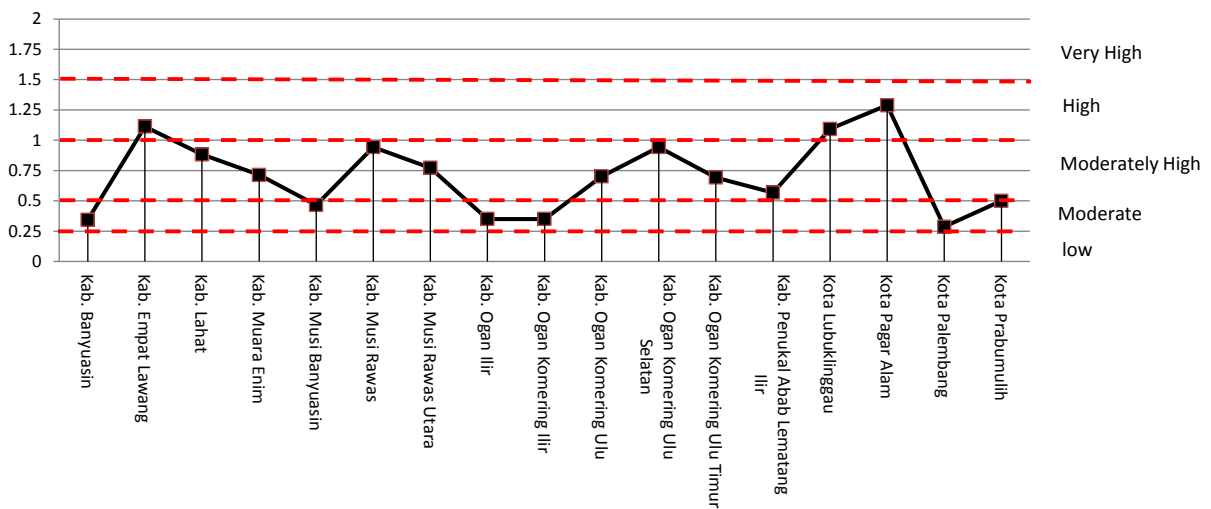
Gambar 4.1. Nilai parameter S_s kota-kota di Indonesia (sumber : diolah dari <http://rsapuskim2019.litbang.pu.go.id/>)



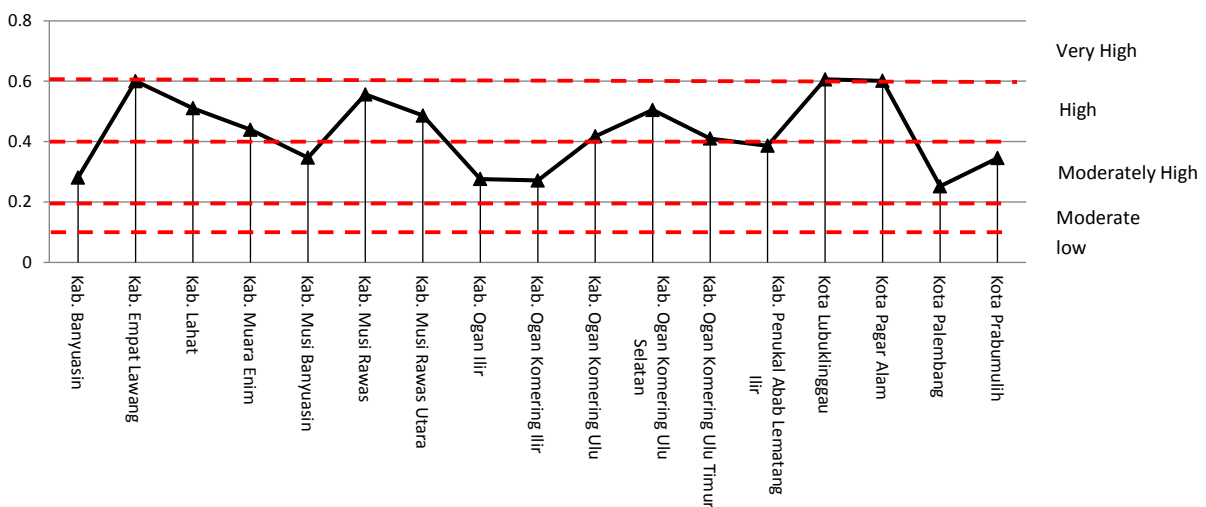
Gambar 4.2. Nilai parameter S₁ kota-kota di Indonesia (sumber : diolah dari <http://rsapuskim2019.litbang.pu.go.id/>)

4.2. KONDISI KEGEMPAAN DI SUMATERA SELATAN

Berdasarkan peta gempa yang terbaru tahun 2019 (BSN, 2019) daerah-daerah di Provinsi Sumatera Selatan termasuk dalam zona *Moderately High* (tinggi menengah) sampai dengan *High* (tinggi) (lihat gambar 4.3 dan 4.4). Yang berarti sebagian besar daerah-daerah di Provinsi Sumatera Selatan rawan potensi terjadinya gempa. Hal ini berarti arsitek-arsitek di daerah pun perlu bersiap-siap dalam menghadapi potensi terjadinya gempa pada bangunan yang didesainnya. Hal ini berarti arsitek perlu pedoman praktis dalam proses *form finding*. Tetapi pedoman bangunan tahan gempa yang dikembangkan baru-baru ini terlalu teknis dan sulit dipahami oleh arsitek (Özmen and Ünay, 2007). Sehingga diharapkan penelitian ini dapat menjadi kontribusi kecil bagi arsitek sebagai pedoman mendesain bangunan.



Gambar 4.3. Nilai parameter S_5 Kabupaten-kabupaten di Prov. Sumsel (sumber : diolah dari <http://rsapuskim2019.litbang.pu.go.id/>)

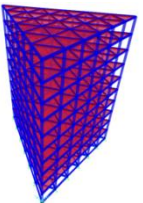
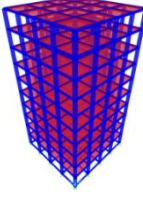

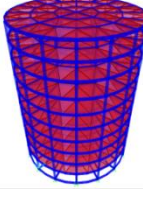
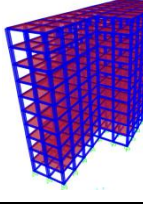


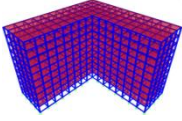
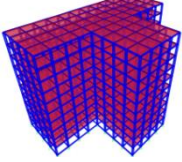
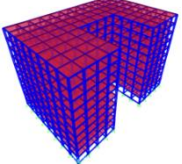
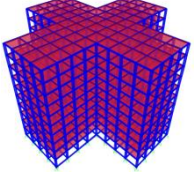
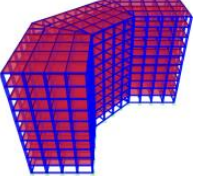
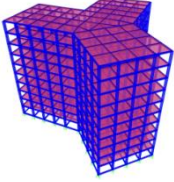
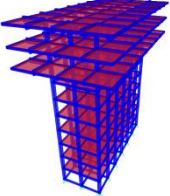
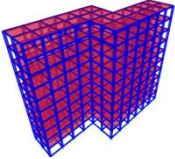
Gambar 4.4. Nilai parameter S_1 Kabupaten-kabupaten di Prov. Sumsel (sumber : diolah dari <http://rsapuskim2019.litbang.pu.go.id/>)


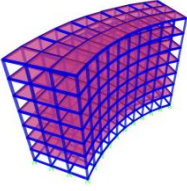
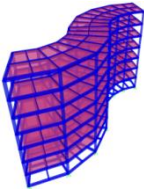
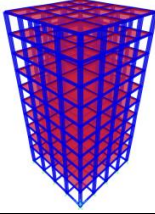
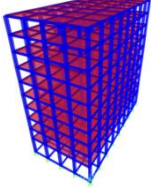
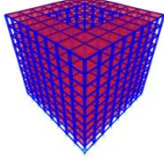
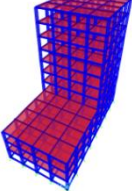
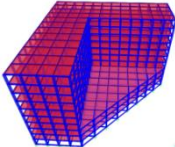
4.3. MODEL PENELITIAN

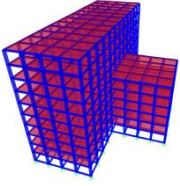
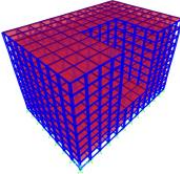
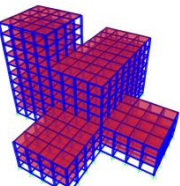
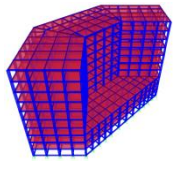
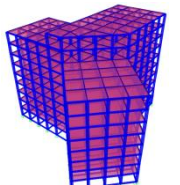
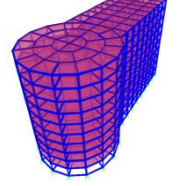
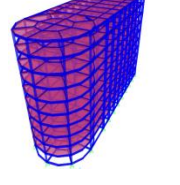
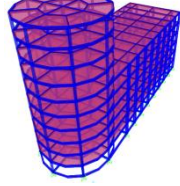
Dalam penelitian digunakan 32 model yang diasumsikan mewakili bentuk dasar geometris (model 00 s.d 03), bentuk subtraktif dan aditif (model 04, 11, 13,18, 21, 23B, 25), kombinasi dari bentuk dasar (model 05, 06, 07, 08, 09, 10, 12, 19, 20, 22, 24, 26, 26B, 26C, 27, 27C, 27E) dan bentuk organis/lengkung (model 14, 15). Untuk zona gempa Sumatera Selatan yang digunakan yaitu zona *High* ($S_s = 1.2887$ dan $S_1 = 0.6011$), kelas situs tanah lunak, dan fungsi bangunan sebagai perkantoran. Sedangkan data-data dimensi struktur dan material dari masing-masing model dapat dilihat pada tabel dibawah ini (tabel 4.2) :

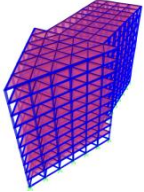
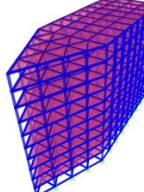
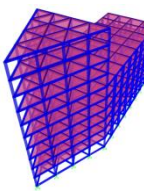
Tabel 4.2. Data struktur dan material model bangunan

No.	Model	Jml. Lt. (n)	mutu beton (Kg/cm ²)	Mutu baja (Kg/cm ²)		Dimensi		Tebal plat lt. (n)	Tinggi kolom (m)
				Tulangan	Sengkang	balok (cm)	kolom (cm)		
00		10	300	4000	2400	B25X40	K60X60	12	4
01		10	300	4000	2400	B25X40	K60X60	12	4
02		10	300	4000	2400	B25X40	K60X60	12	4
03		10	300	4000	2400	B25X40	D60	12	4
04		10	300	4000	2400	B25X40	K60X60	12	4

05		10	300	4000	2400	B25X40	K60X60	12	4
06		10	300	4000	2400	B25X40	K60X60	12	4
07		10	300	4000	2400	B25X40	K60X60	12	4
08		10	300	4000	2400	B25X40	K60X60	12	4
09		10	300	4000	2400	B25X40	K60X60	12	4
10		10	300	4000	2400	B25X40	K60X60	12	4
11		10	300	4000	2400	B25X40 B25X100	K60X60	12	4
12		10	300	4000	2400	B25X40	K60X60	12	4

13		7	300	4000	2400	B25X40	K60X60	12	4
14		7	300	4000	2400	B25X40	D60	12	4
15		7	300	4000	2400	B25X50 B30X60	D65	12	4
16		10	300	4000	2400	B25X40	K60X60	12	4 6
17		10	300	4000	2400	B25X40	K60X60	12	4 6
18		10	300	4000	2400	B25X40	K60X60	12	4
19		10	300	4000	2400	B25X40	K60X60	12	4
20		10	300	4000	2400	B25X40	K60X60	12	4

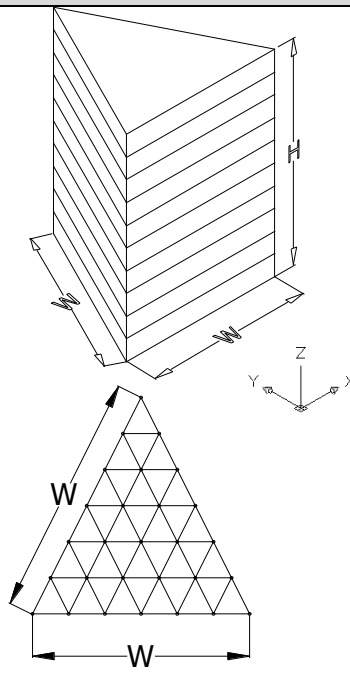
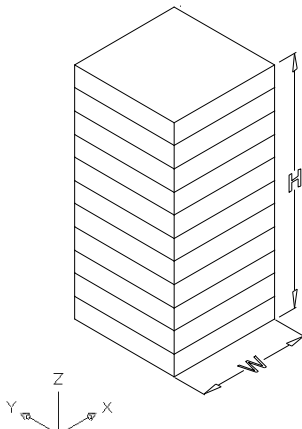
21		10	300	4000	2400	B25X40	K60X60	12	4
22		10	300	4000	2400	B25X40	K60X60	12	4
23B		10	300	4000	2400	B25X40	K60X60	12	4
24		10	300	4000	2400	B25X40	K60X60	12	4
25		10	300	4000	2400	B25X40	K60X60	12	4
26		10	300	4000	2400	B25X40 B25X50	K60X60 D60	12	4
26B		10	300	4000	2400	B25X50	K60X60 D60	12	4
26C		10	300	4000	2400	B25X50	K60X60 D60	12	4

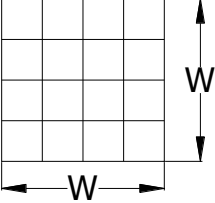
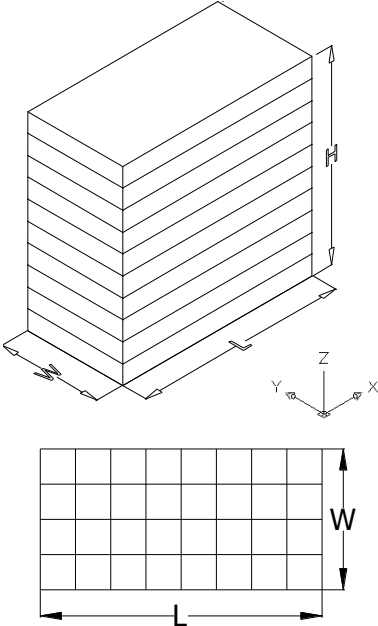
27		10	300	4000	2400	B25X40	K60X60 D60	12	4
27C		10	300	4000	2400	B25X40	K60X60 D60	12	4
27E		10	300	4000	2400	B25X40	K60X60 D60	12	4

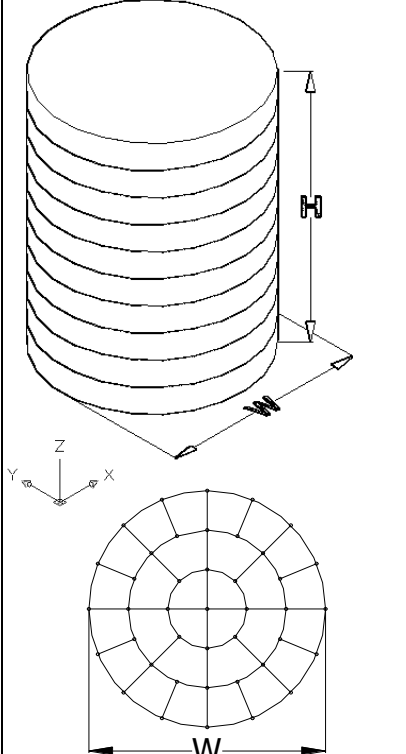
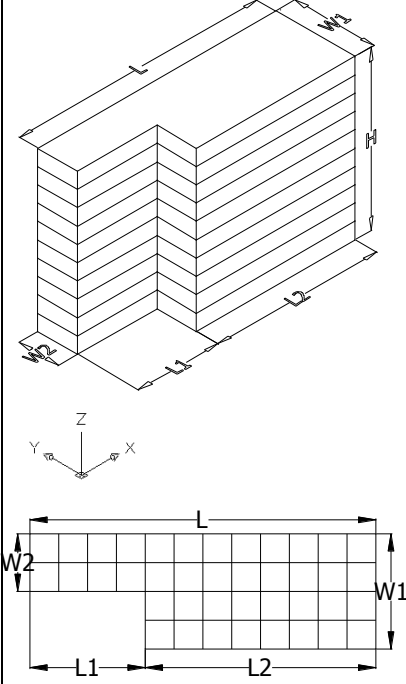
BAB V. HASIL IDENTIFIKASI DAN *GUIDANCE*

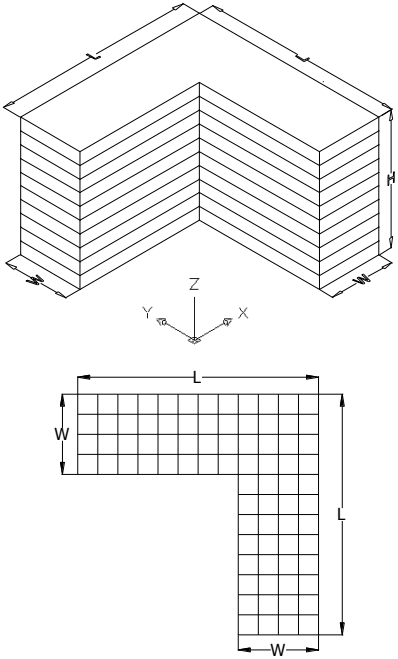
5.1.HASIL IDENTIFIKASI

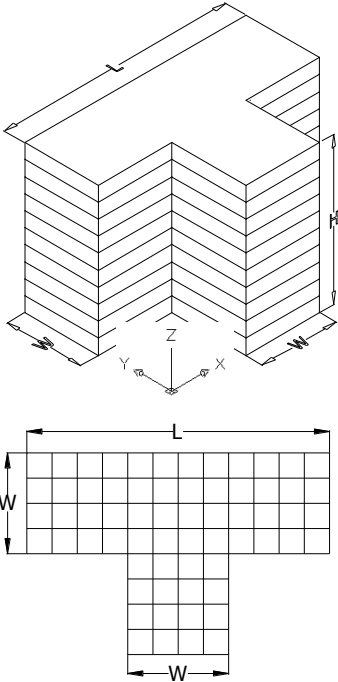
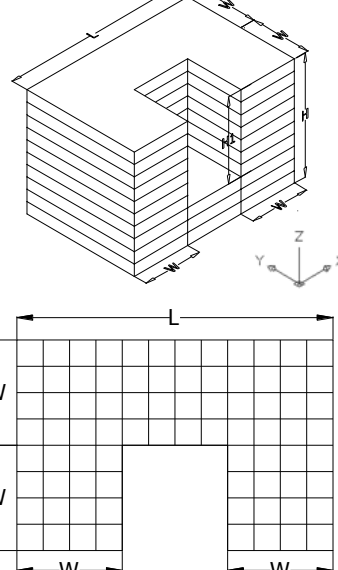
Gambar 5.1. Konfigurasi geometris bentuk-bentuk dasar, transformasi & komposisi massa serta respon perilakunya terhadap gempa

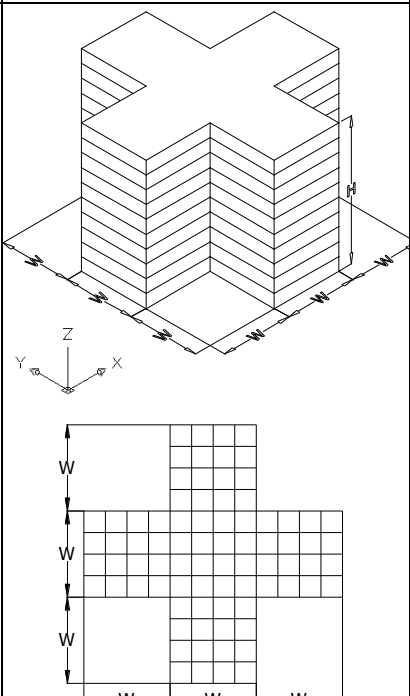
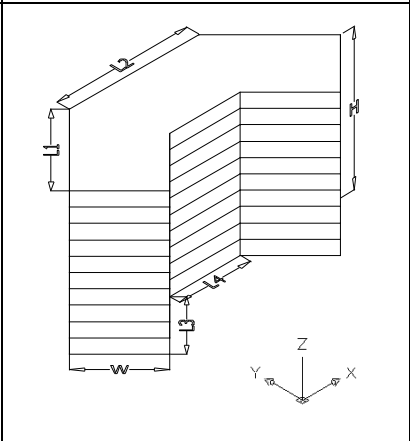
No	Geometri	Keuntungan	Kelemahan
1.	 <ul style="list-style-type: none"> • $W = 30 \text{ m}$, $H = 40 \text{ m}$, $H/W=1.3$ • mode 1=translasi-Y, mode 2=translasi-X, & mode 3=rotasi • Participating Mass Ratio $\geq 85\% \rightarrow$ mode 5 • $Tc-X=1.96 \text{ dt}$ & $Tc-Y=1.93 \text{ dt}$. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk lebih atraktif. - Dengan bentuk segitiga sama sisi deformasi dominan translasi (mode 1 & 2). 	<ul style="list-style-type: none"> - Modul struktur yang tidak grid persegi atau grid segitiga untuk membentuk ruang yang efektif menjadi lebih sulit. - Jika terlalu langsing $H/W > 4$, bangunan terlalu fleksibel sehingga bisa mengganggu kenyamanan penghuni dan pemeliharaan gedung (lift macet, pintu & jendela sukar dibuka, dinding retak). Selain itu, juga meningkatkan gaya-gaya internal kolom dan balok terutama di bagian bawah bangunan.
2.		<ul style="list-style-type: none"> - Pengaturan modul struktur lebih teratur dengan modul grid sehingga tata ruang lebih efektif. - Bentuk simetris 2 aksis sehingga menimalisir terjadinya : <ul style="list-style-type: none"> o Torsi / puntir o Penyebaran gaya lebih merata - Deformasi dominan translasi (mode 1 & 2). 	<ul style="list-style-type: none"> - Jika terlalu langsing $H/W > 4$, bangunan terlalu fleksibel sehingga bisa mengganggu kenyamanan penghuni dan pemeliharaan gedung. Selain itu, juga meningkatkan gaya-gaya internal kolom dan balok terutama di bagian bawah bangunan.

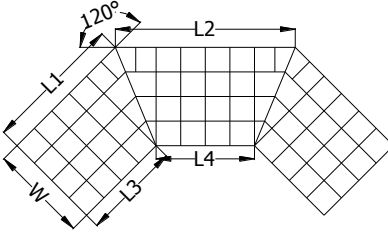
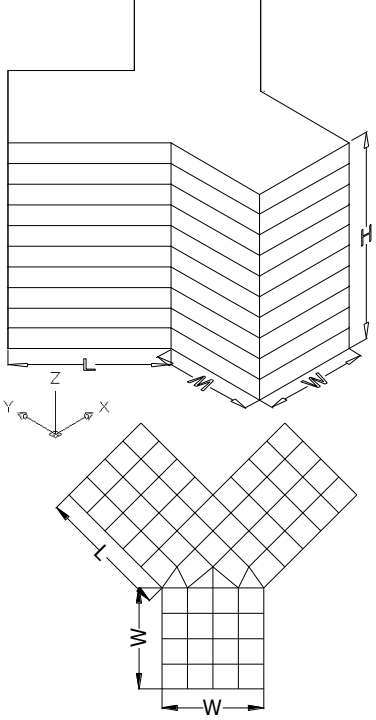
	 <ul style="list-style-type: none"> • $W = 20 \text{ m}$, $H = 40 \text{ m}$, $H/W=2$ • mode 1=translasi-Y, mode 2=translasi-X, & mode 3=lecutan-Y • Participating Mass Ratio $\geq 85\%$ \rightarrow mode 4 • $T_{c-X}=1.99 \text{ dt}$ & $T_{c-Y}=1.99 \text{ dt}$. 	2).	
3.	 <ul style="list-style-type: none"> • $W = 20 \text{ m}$, $H = 40 \text{ m}$, $L = 40 \text{ m}$, $H/W=2$ • mode 1=translasi-Y, mode 2=translasi-X, & mode 3=lecutan-Y • Participating Mass Ratio $\geq 85\%$ \rightarrow mode 4 • $T_{c-X}=1.97 \text{ dt}$ & $T_{c-Y}=2.04 \text{ dt}$ 	<ul style="list-style-type: none"> - Pengaturan modul struktur lebih teratur dengan modul grid sehingga tata ruang lebih efektif. - Bentuk simetris 2 aksis sehingga menimalisir terjadinya : <ul style="list-style-type: none"> o Torsi / puntir o Penyebaran gaya lebih merata - Deformasi dominan translasi (mode 1 & 2). 	<ul style="list-style-type: none"> - Jika $L \geq 50 \text{ m}$ mengakibatkan mode dinamis lecutan horisontal. - Jika terlalu langsing $H/W > 4$, bangunan terlalu fleksibel sehingga bisa mengganggu kenyamanan penghuni dan pemeliharaan gedung. Selain itu, juga meningkatkan gaya-gaya internal kolom dan balok terutama di bagian bawah bangunan.

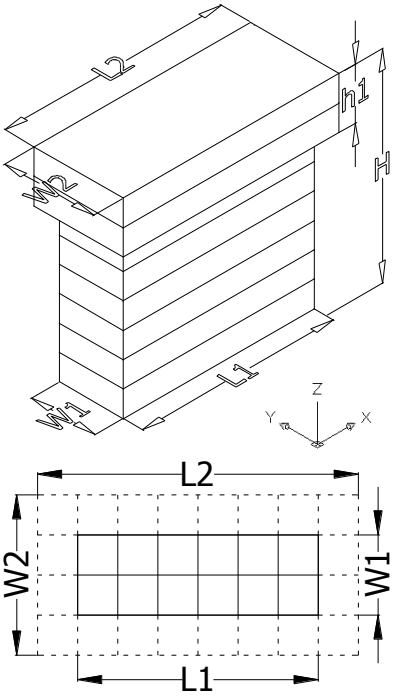
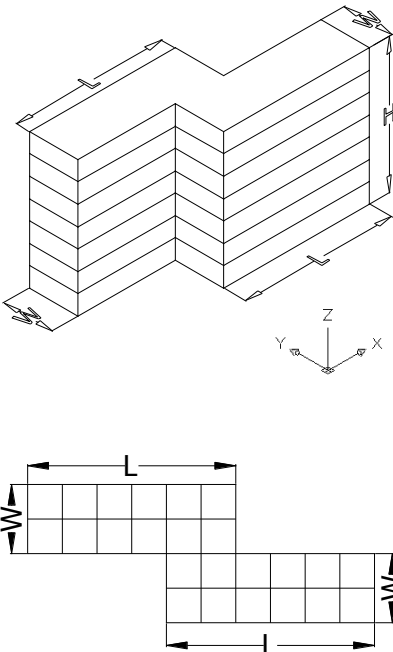
<p>4.</p>	 <ul style="list-style-type: none"> • $W = 20 \text{ m}$, $H = 40 \text{ m}$, $H/W=2$ • mode 1=translasi-Y, mode 2=translasi-X, & mode 3=lecutan-Y • Participating Mass Ratio $\geq 85\% \rightarrow$ mode 4 • $Tc-X=1.71 \text{ dt}$ & $Tc-Y=1.71 \text{ dt}$ 	<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk lebih dinamis. - Bentuk simetris 2 aksis sehingga menimalisir terjadinya : <ul style="list-style-type: none"> o Torsi / puntir o Penyebaran gaya lebih merata - Deformasi dominan translasi (mode 1 & 2). 	<ul style="list-style-type: none"> - Modul struktur yang tidak grid persegi untuk membentuk ruang yang efektif menjadi lebih sulit. - Jika terlalu langsing $H/W > 4$, bangunan terlalu fleksibel sehingga bisa mengganggu kenyamanan penghuni dan pemeliharaan gedung. Selain itu, juga meningkatkan gaya-gaya internal kolom dan balok terutama di bagian bawah bangunan.
<p>5.</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Pengaturan modul struktur lebih teratur dengan modul grid sehingga tata ruang lebih efektif. - Jika massa besar $H/W1 < 4$ dan massa kecil $H/W2 > 4$ maka massa kecil akan berkurang fleksibilitasnya. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk ireguler dengan deformasi kombinasi translasi (mode 1) dan torsi-translasi (mode 2). - Elemen struktur umumnya tidak didesain untuk menahan deformasi translasi-diagonal dan torsi. - Dengan terbentuknya konfigurasi ketidakberaturan sudut dalam dapat menimbulkan terkonsentrasinya

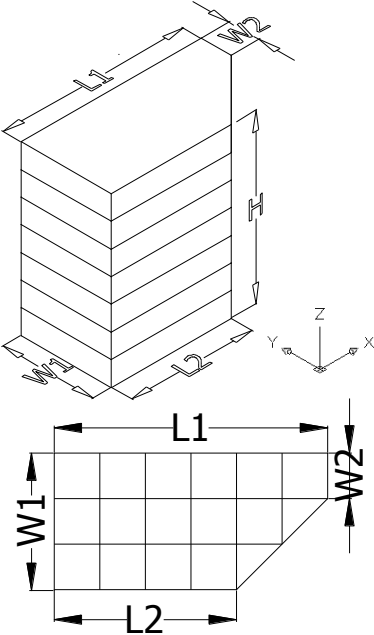
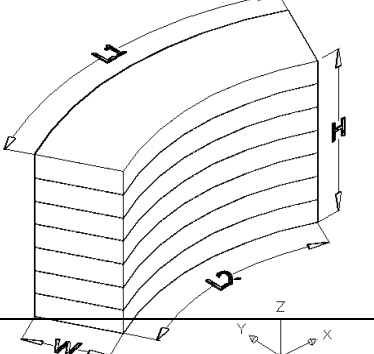
	<ul style="list-style-type: none"> • $W1 = 20 \text{ m}$, $W2=10 \text{ m}$, $L1=20 \text{ m}$, $L2=40 \text{ m}$, $H = 40 \text{ m}$, $H/W1=2$, $H/W2=4$ • mode 1=translasi-Y, mode 2=torsi-translasi-X, & mode 3=torsi • Participating Mass Ratio $\geq 85\%$ \rightarrow mode 5 • $Tc-X=1.94 \text{ dt}$ & $Tc-Y=2.06 \text{ dt}$ 		<p>gaya geser pada pertemuan massa.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dengan $H/W1 < H/W2$ menimbulkan perbedaan kekakuan dan deformasi pada masing-masing massa sehingga kegagalan struktur massa kecil dapat ikut menyeret massa besar.
<p>6.</p>	 <ul style="list-style-type: none"> • $W=20 \text{ m}$, $L=60 \text{ m}$, $H=40 \text{ m}$, $H/W=2$ • mode 1= translasi-diagonal, mode 2= translasi-diagonal, & mode 3=torsi • Participating Mass Ratio $\geq 85\%$ \rightarrow mode 5 • $Tc-X=2.03 \text{ dt}$ & $Tc-Y=2.01 \text{ dt}$ 	<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk lebih atraktif. - Pengaturan modul struktur lebih teratur dengan modul grid sehingga tata ruang lebih efektif. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk ireguler dengan deformasi dominan translasi-diagonal (mode 1 & 2). - Elemen struktur umumnya tidak didesain untuk menahan deformasi translasi-diagonal dan torsi. - Dengan terbentuknya konfigurasi ketidakberaturan sudut dalam dapat menimbulkan terkonsentrasinya gaya geser pada pertemuan massa. - Pada arah aksis yang sama bisa terjadi perbedaan deformasi yang besar pada ujung-ujung massa bangunan.

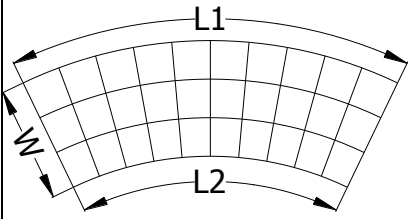
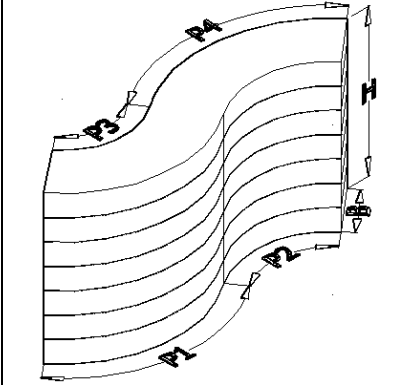
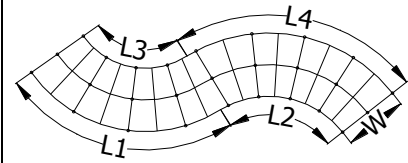
<p>7.</p>	 <ul style="list-style-type: none"> • $W=20$ m, $L=60$ m, $H=40$ m, $H/W=2$ • mode 1=translasi-Y, mode 2=torsi-translasi-X, & mode 3=torsi • Participating Mass Ratio $\geq 85\%$ \rightarrow mode 5 • $Tc-X=1.99$ dt & $Tc-Y=2.03$ dt 	<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk lebih atraktif. - Pengaturan modul struktur lebih teratur dengan modul grid sehingga tata ruang lebih efektif. - Massa bangunan lebih kaku daripada massa linier. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk ireguler yang menimbulkan kombinasi deformasi translasi (mode 1) dan torsi-translasi (mode 2). - Elemen struktur umumnya tidak didesain untuk menahan deformasi translasi-diagonal dan torsi. - Kombinasi deformasi translasi dan torsi bisa mengakibatkan terjadinya perbedaan deformasi yang besar pada ujung-ujung massa bangunan. - Dengan terbentuknya konfigurasi ketidakberaturan sudut dalam dapat menimbulkan terkonsentrasinya gaya geser pada pertemuan massa.
<p>8.</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk lebih atraktif. - Pengaturan modul struktur lebih teratur dengan modul grid sehingga tata ruang lebih efektif. - Massa bangunan lebih kaku daripada massa linier. - Deformasi dominan translasi (mode 1 & 2). 	<ul style="list-style-type: none"> - Terbentuknya konfigurasi ketidakberaturan sudut dalam dapat menimbulkan terkonsentrasinya gaya geser pada pertemuan massa. - Pada arah aksis -X bisa terjadi perbedaan deformasi yang besar pada ujung-ujung massa bangunan.

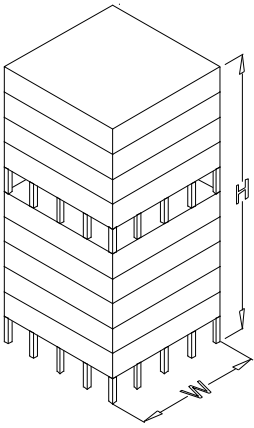
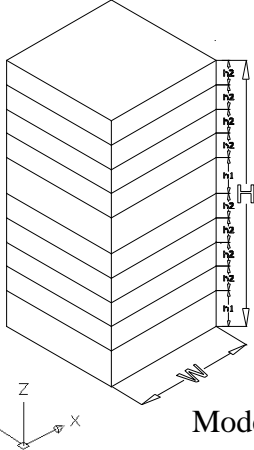
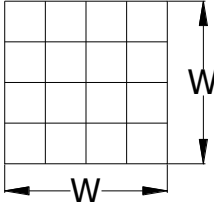
	<ul style="list-style-type: none"> • $W=20$ m, $L=60$ m, $H=40$ m, $H/W=2$ • mode 1=translasi-X, mode 2=translasi-Y, & mode 3=torsi • Participating Mass Ratio $\geq 85\%$ \rightarrow mode 5 • $Tc-X=2.02$ dt & $Tc-Y=2.01$ dt 		
9.	 <ul style="list-style-type: none"> • $W=20$ m, $H=40$ m, $H/W=2$ • mode 1=translasi-X, mode 2=translasi-Y, & mode 3=lecutan-diagonal • Participating Mass Ratio $\geq 85\%$ \rightarrow mode 4 • $Tc-X=1.76$ dt & $Tc-Y=1.76$ dt 	<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk lebih atraktif. - Jika pertemuan massa saling tegak lurus pengaturan modul pertemuan massa masih bisa grid. - Deformasi dominan translasi (mode 1 & 2). 	<ul style="list-style-type: none"> - Jika pertemuan massa tidak saling tegak lurus maka pengaturan modul pertemuan massa tidak bisa grid. - Kombinasi deformasi translasi dan torsi bisa mengakibatkan terjadinya perbedaan deformasi yang besar pada ujung-ujung massa bangunan. - Terbentuknya konfigurasi ketidakberaturan sudut dalam dapat menimbulkan terkonsentrasinya gaya geser pada pertemuan massa.
10.		<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk lebih atraktif. - Pengaturan modul struktur dominan modul grid. - Pertemuan massa tidak saling tegak lurus $\leq 120^\circ$ dianggap non-konfigurasi ketidakberaturan sudut dalam. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pertemuan massa tidak saling tegak lurus maka pengaturan modul pertemuan massa tidak bisa grid. - Bentuk ireguler yang menimbulkan kombinasi deformasi translasi (mode 1) dan torsi

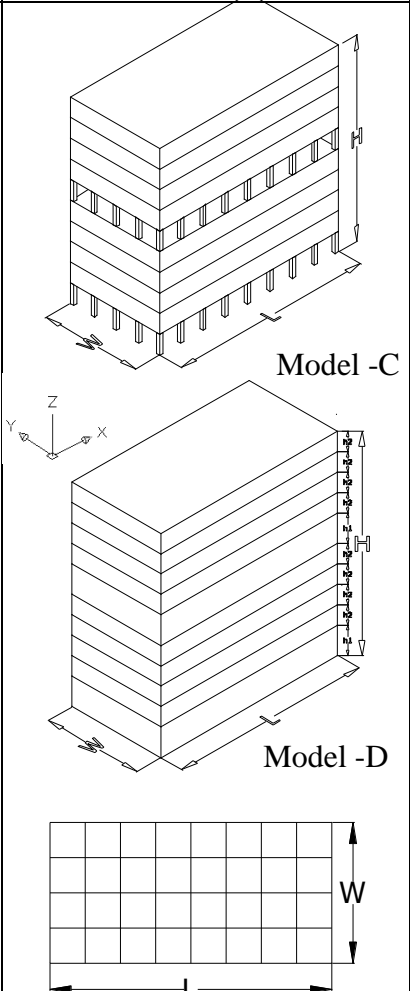
	 <ul style="list-style-type: none"> • $L1=28.28$ m, $L2=36.57$ m, $L3=20$ m, $L4=20$ m, $W=20$ m, $H=40$ m, $H/W=2$ • mode 1=translasi-Y, mode 2=torsi, & mode 3=torsi • Participating Mass Ratio $\geq 85\%$ \rightarrow mode 5 • $Tc-X=1.72$ dt & $Tc-Y=1.75$ dt 		<p>(mode 2).</p> <ul style="list-style-type: none"> - Elemen struktur umumnya tidak didesain untuk menahan deformasi translasi-diagonal dan torsi. - Tata massa yang tidak saling tegak lurus menyebabkan terbentuknya konfigurasi ketidakberaturan sistem non paralel yang dapat memperbesar deformasi translasi dan torsi.
11.	 <ul style="list-style-type: none"> • $W=20$ m, $L=25.86$ m, $H=40$ m, $H/W=2$ • mode 1=translasi-X, mode 2= translasi-Y, & mode 3=torsi • Participating Mass Ratio $\geq 85\%$ \rightarrow mode 5 • $Tc-X=2.02$ dt & $Tc-Y=1.99$ dt 	<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk lebih atraktif. - Pengaturan modul struktur dominan modul grid. - Deformasi dominan translasi (mode 1 & 2). 	<ul style="list-style-type: none"> - Pertemuan massa tidak saling tegak lurus maka pengaturan modul pertemuan massa tidak bisa grid. - Tata massa yang tidak saling tegak lurus menyebabkan terbentuknya konfigurasi ketidakberaturan sistem non paralel yang dapat memperbesar deformasi translasi dan torsi. - Pada arah aksis -X bisa terjadi perbedaan deformasi yang besar pada ujung-ujung massa bangunan.

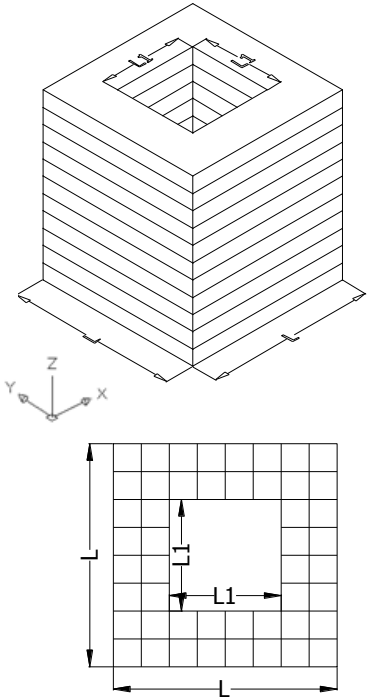
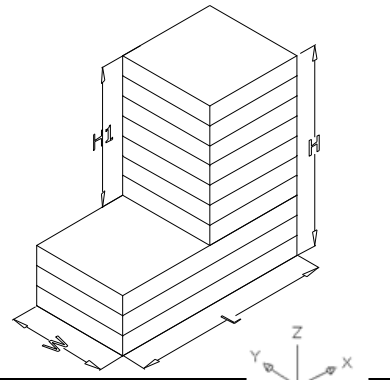
<p>12.</p>	 <ul style="list-style-type: none"> • $L1=30$ m, $L2=40$ m, $W1=10$ m, $W2=20$ m, $h1=8$ m, $H=40$ m, $H/W=2$ • mode 1=translasi-Y, mode 2= translasi-X, & mode 3= torsi-lecutan overhang • Participating Mass Ratio $\geq 85\%$ \rightarrow mode 5 • $Tc-X=2.5$ dt & $Tc-Y=2.75$ dt 	<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk lebih atraktif. - Pengaturan modul struktur lebih teratur dengan modul grid sehingga tata ruang lebih efektif. - Deformasi dominan translasi (mode 1 & 2). 	<ul style="list-style-type: none"> - Meski bentuk simetris, tetapi jika panjang overhang 25% dari bentang portal sebelahnya dapat terjadi kombinasi translasi (mode 1 & 2) dan torsi-lecutan overhang (mode 3) yang dapat menimbulkan konsentrasi gaya-gaya pada pertemuan massa overhang dan massa bangunan utama. - Selain itu, dengan massa yang paling atas lebih berat daripada dibawahnya dan $H/W > 4$ dapat menimbulkan efek pendulum yang bisa menimbulkan kegagalan tekuk pada kolom.
<p>13.</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk lebih atraktif. - Pengaturan modul struktur lebih teratur dengan modul grid sehingga tata ruang lebih efektif. - Deformasi dominan translasi (mode 1 & 2). 	<ul style="list-style-type: none"> - Dengan terbentuknya konfigurasi ketidakberaturan sudut dalam dapat menimbulkan terkonsentrasinya gaya geser pada pertemuan massa.

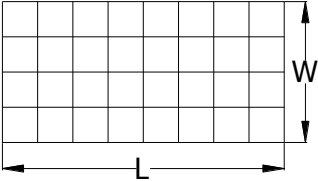
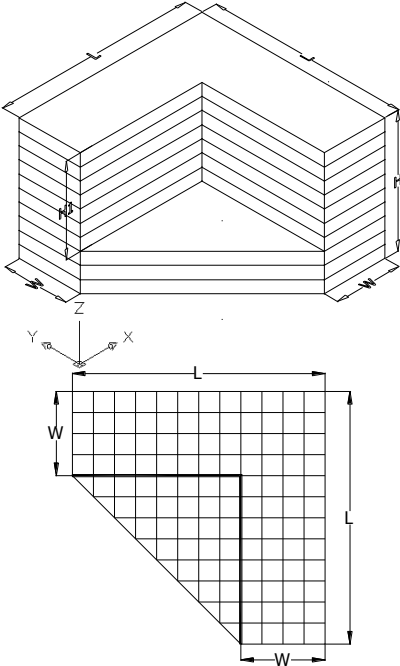
	<ul style="list-style-type: none"> • $L=30$ m, $W=10$ m, $H=40$ m, $H/W=4$ • mode 1=translasi-Y, mode 2= translasi-X, & mode 3=lecutan-Y • Participating Mass Ratio $\geq 85\%$ \rightarrow mode 4 • $Tc-X=1.91$ dt & $Tc-Y=2.05$ dt 		
14.	 <ul style="list-style-type: none"> • $L1=30$ m, $L2=20$ m, $W1=15$ m, $W2=5$ m, $H=28$ m, $H/W1=1.87$ • mode 1= torsi-translasi-Y, mode 2= torsi-translasi-X, & mode 3=torsi • Participating Mass Ratio $\geq 85\%$ \rightarrow mode 5 • $Tc-X=1.31$ dt & $Tc-Y=1.37$dt 	<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk lebih atraktif. - Pengaturan modul struktur masih dominan modul grid. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bagian massa yang terpotong membentuk modul struktur yang tidak grid sehingga dapat membentuk ruang yang tidak efektif. - Bentuk ireguler yang menimbulkan kombinasi deformasi torsi-translasi (mode 1 & 2) dan torsi (mode 3). - Elemen struktur umumnya tidak didesain untuk menahan deformasi translasi-diagonal dan torsi. - Massa terpotong membentuk konfigurasi ketidakberaturan non paralel yang dapat memperbesar deformasi translasi dan torsi.
15.		<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk atraktif dinamis. 	<ul style="list-style-type: none"> - Modul struktur yang tidak grid persegi untuk membentuk ruang yang efektif menjadi lebih sulit. - Bentuk ireguler

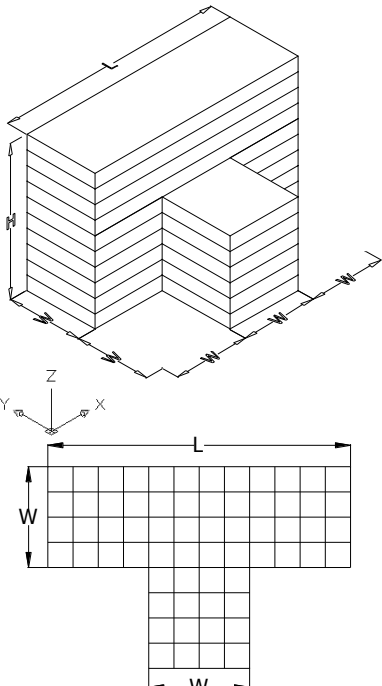
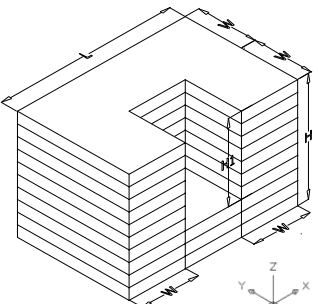
	 <ul style="list-style-type: none"> • L1=50 m, L2=36.58 m, W=15 m, H=28 m, H/W=1.87 • mode 1=translasi-Y, mode 2= torsi, & mode 3= torsi • Participating Mass Ratio \geq 85% \rightarrow mode 5 • Tc-X=1.28 dt & Tc-Y=1.38 dt 		<p>yang menimbulkan kombinasi deformasi translasi (mode 1) dan torsi (mode 2).</p> <ul style="list-style-type: none"> - Elemen struktur umumnya tidak didesain untuk menahan deformasi translasi-diagonal dan torsi. - Dengan bentuk bagian dari lingkaran maka modul strukturnya tidak grid, sehingga menghasilkan konfigurasi ketidakberaturan non paralel yang dapat memperbesar deformasi translasi dan torsi.
16.	  <ul style="list-style-type: none"> • L1=33.61 m, L2=21.39 m, L3=18.43 m, L4=36.05 m, W=10 m, H=28 m, H/W=2.8 • mode 1= torsi, mode 2= torsi, & mode 3= torsi • Participating Mass Ratio \geq 85% \rightarrow mode 6 	<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk dinamis. atraktif 	<ul style="list-style-type: none"> - Modul struktur yang tidak grid persegi untuk membentuk ruang yang efektif menjadi lebih sulit. - Bentuk sangat ireguler sehingga menimbulkan deformasi dominan torsi (mode 1, 2 & 3). - Elemen struktur umumnya tidak didesain untuk menahan deformasi translasi-diagonal dan torsi. - Dengan bentuk bagian dari lingkaran, maka

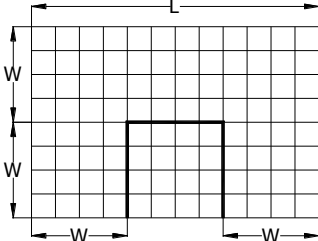
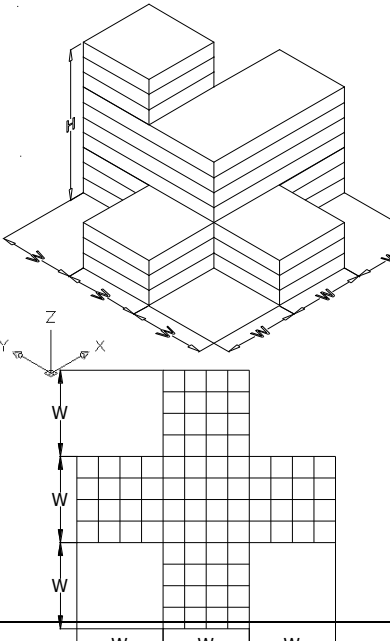
	<ul style="list-style-type: none"> • $T_c-X=1.15 dt$ & $T_c-Y=1.2 dt$ 		<p>modul strukturnya tidak grid sehingga menghasilkan konfigurasi ketidakberaturan non paralel yang dapat memperbesar deformasi translasi dan torsi.</p>
17.	 <p style="text-align: center;">Model -A</p>  <p style="text-align: center;">Model -B</p>  <p>Model B :</p> <ul style="list-style-type: none"> • $W=20$ m, $H=40$ m, $h_1=6$ m, $h_2=4$ m, $H/W=2$ • mode 1=translasi-Y, mode 2=translasi-X, & mode 3=lecutan-Y 	<ul style="list-style-type: none"> - Pengaturan modul struktur lebih teratur dengan modul grid sehingga tata ruang lebih efektif. - Bentuk simetris 2 aksis sehingga menimalisir terjadinya torsi dan penyebaran gaya lebih merata. - Deformasi dominan translasi (mode 1 & 2). 	<ul style="list-style-type: none"> - Jika terdapat <i>open space</i> pada lantai dasar dan/atau lantai tengah bangunan, sedangkan lantai lainnya diisi dengan tata ruang dinding masif dengan distribusi cukup merata dengan kepadatan $>1\%$. Dengan demikian, potensi terjadinya <i>soft story</i> pada bagian <i>open space</i> karena kekakuannya lebih lemah dibandingkan lainnya (model – A), atau - Jika ketinggian lantai dasar dan/atau lantai tengah bangunan lebih tinggi dari lantai lainnya ($h_1>h_2$), maka potensi terjadinya <i>soft story</i> pada bagian kolom lantai yang lebih tinggi karena kekakuannya lebih lemah dibandingkan lainnya (model – B).

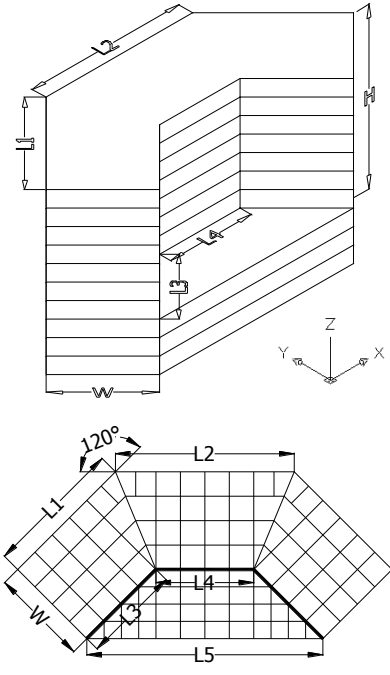
	<ul style="list-style-type: none"> • Participating Mass Ratio $\geq 85\%$ \rightarrow mode 3 • $T_{c-X}=2.13$ dt & $T_{c-Y}=2.13$ dt 		<ul style="list-style-type: none"> - Jika terlalu langsing $H/W > 4$, dapat memperparah terjadinya <i>soft story</i>.
18.	 <p>Model -C</p> <p>Model -D</p> <p>Model D :</p> <ul style="list-style-type: none"> • $W = 20$ m, $L=40$ m, $h_1=6$ m, $h_2=4$ m, $H = 44$ m, $H/W=2.2$ • mode 1=translasi-Y, mode 2=translasi-X, & mode 3=lecutan-Y • Participating Mass Ratio $\geq 85\%$ \rightarrow mode 4 • $T_{c-X}=2.12$ dt & $T_{c-Y}=2.2$ dt 	<ul style="list-style-type: none"> - Pengaturan modul struktur lebih teratur dengan modul grid sehingga tata ruang lebih efektif. - Bentuk simetris 2 aksis sehingga meminimalisir terjadinya torsi dan penyebaran gaya lebih merata. - Deformasi dominan translasi (mode 1 & 2). 	<ul style="list-style-type: none"> - Jika terdapat <i>open space</i> pada lantai dasar dan/atau lantai tengah bangunan, sedangkan lantai lainnya diisi dengan tata ruang dinding masif dengan distribusi cukup merata dengan kepadatan $>1\%$. Dengan demikian, potensi terjadinya <i>soft story</i> pada bagian <i>open space</i> karena kekakuannya lebih lemah dibandingkan lainnya (model - C), atau - Jika ketinggian lantai dasar dan/atau lantai tengah bangunan lebih tinggi dari lantai lainnya ($h_1 > h_2$), maka potensi terjadinya <i>soft story</i> pada bagian kolom lantai yang lebih tinggi karena kekakuannya lebih lemah dibandingkan lainnya (model - D). - Jika terlalu langsing $H/W > 4$ dan/atau $L \geq 50$ m dapat memperparah terjadinya <i>soft</i>

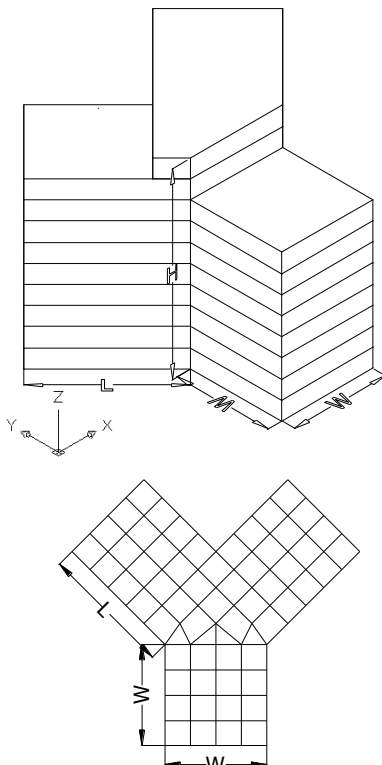
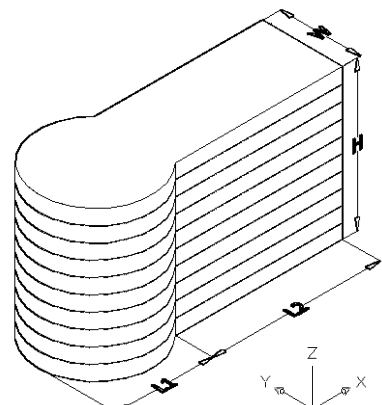
<p>19.</p>	 <ul style="list-style-type: none"> • $L=40$ m, $L1=20$ m, $H = 40$ m, $H/L=1$ • mode 1=translasi-Y, mode 2=translasi-X, & mode 3=lecutan-Y • Participating Mass Ratio $\geq 85\%$ \rightarrow mode 4 • $Tc-X=1.98$ dt & $Tc-Y=1.98$ dt 	<ul style="list-style-type: none"> - Pencahayaan dan penghawaan alami dapat masuk melalui void. - Pengaturan modul struktur lebih teratur dengan modul grid sehingga tata ruang lebih efektif. - Bentuk simetris 2 aksis sehingga menimalisir terjadinya torsi. - Deformasi dominan translasi (mode 1 & 2). 	<p><i>story.</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Jika void $>50\%$ dari luas lantai, maka kemampuan lantai sebagai diafragma menyalurkan beban lateral dan pengikat kolom dan/atau dinding geser berkurang drastis. - Adanya void pada bangunan meningkatkan fleksibilitas bangunan. Jika void $> 25\%-30\%$ dari luas lantai, maka fleksibilitas yang terjadi akan meningkatkan deformasi translasi secara drastis. - Peningkatan fleksibilitas bangunan juga meningkatkan gaya momen kolom dan balok terutama di bagian bawah bangunan. - Dengan adanya void pada arah aksis yang sama bisa terjadi perbedaan deformasi yang besar pada ujung dan tengah massa bangunan.
<p>20.</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk lebih atraktif. - Pengaturan modul struktur lebih teratur dengan modul grid sehingga tata ruang lebih efektif. - Adanya massa podium dapat mengurangi deformasi. 	<ul style="list-style-type: none"> - Komposisi massa tower dan podium diletakkan tidak simetris 1 aksis mengakibatkan kombinasi deformasi torsi (mode 1) dan translasi (mode 2). - Jika tower terlalu

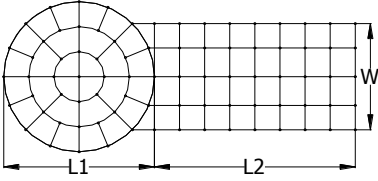
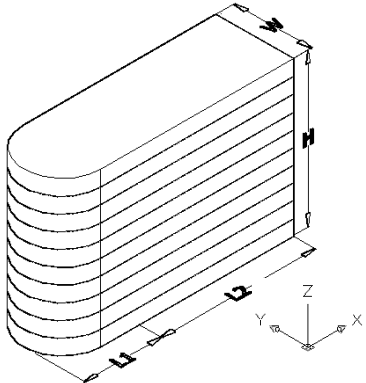
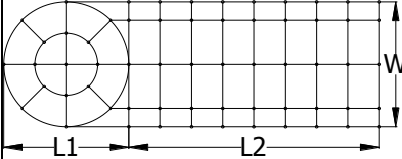
	 <ul style="list-style-type: none"> • $W = 20 \text{ m}$, $H = 40 \text{ m}$, $L=40 \text{ m}$, $H/W=2$ • mode 1= torsi, mode 2=translasi-X, & mode 3= torsi. • Participating Mass Ratio $\geq 85\% \rightarrow$ mode 7 • $Tc-X=1.73 \text{ dt}$ & $Tc-Y=1.91 \text{ dt}$ 		<p>langsing $H1/W > 4$, bangunan terlalu fleksibel sehingga bisa mengganggu kenyamanan penghuni dan pemeliharaan gedung.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Selain itu, bentuk ireguler geometri vertikal ini juga meningkatkan gaya-gaya internal plat, kolom, dan balok antara pertemuan podium dan tower.
21.	 <ul style="list-style-type: none"> • $W=20 \text{ m}$, $L=60 \text{ m}$, $H=40 \text{ m}$, $H/W=2$ • mode 1= translasi-diagonal, mode 2= translasi-diagonal, & mode 3= torsi • Participating Mass Ratio $\geq 85\% \rightarrow$ mode 5 • $Tc-X=1.93 \text{ dt}$ & $Tc-Y=1.90 \text{ dt}$ 	<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk lebih atraktif. - Pengaturan modul struktur dominan modul grid. - Massa aditif (podium) yang menghubungkan sayap-sayap tower dapat mengurangi deformasi. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk ireguler kombinasi massa podium dan tower berbentuk 'L' menghasilkan deformasi dominan translasi-diagonal (mode 1 & 2). - Elemen struktur umumnya tidak didesain untuk menahan deformasi translasi-diagonal dan torsi. - Pada arah aksis yang sama bisa terjadi perbedaan deformasi yang besar pada ujung-ujung massa bangunan. - Jika tower terlalu langsing $H1/W > 4$ dan tower terlalu fleksibel sehingga bisa mengganggu kenyamanan penghuni serta pemeliharaan gedung.

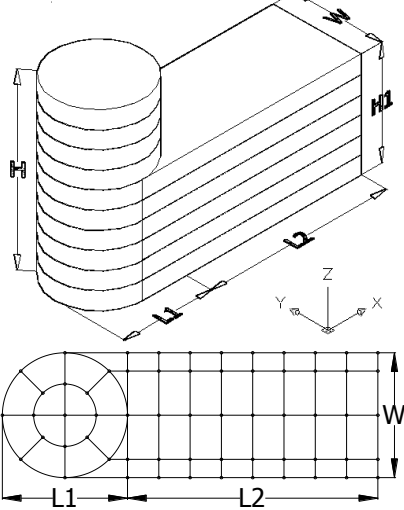
			<ul style="list-style-type: none"> - Selain itu, bentuk tidakberaturan geometri vertikal dan ketidakberaturan sudut dalam ini juga meningkatkan gaya-gaya internal plat, kolom, dan balok antara pertemuan podium dan tower.
22.	 <ul style="list-style-type: none"> • $W=20$ m, $L=60$ m, $H=40$ m, $H/W=2$ • mode 1=torsi, mode 2=translasi-Y, & mode 3=torsi • Participating Mass Ratio $\geq 85\%$ \rightarrow mode 5 • $Tc-X=1.93$ dt & $Tc-Y=1.87$ dt 	<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk lebih atraktif. - Pengaturan modul struktur lebih teratur dengan modul grid sehingga tata ruang lebih efektif. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk ireguler yang dibentuk kombinasi massa yang berbeda ketinggian secara signifikan mengakibatkan kombinasi deformasi dominan torsi (mode 1) dan translasi (mode 2). - Dengan terbentuknya konfigurasi ketidakberaturan geometri vertikal dan ketidakberaturan sudut dalam dapat menimbulkan terkonsentrasinya gaya-gaya internal plat, kolom dan balok pada pertemuan massa yang beda ketinggian.
23.		<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk lebih atraktif. - Pengaturan modul struktur lebih teratur dengan modul grid sehingga tata ruang lebih efektif. - Massa aditif (podium) yang menghubungkan 	<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk ireguler komposisi massa podium dan tower berbentuk 'U' menghasilkan deformasi dominan rotasi (mode 1) dan translasi (mode 2).

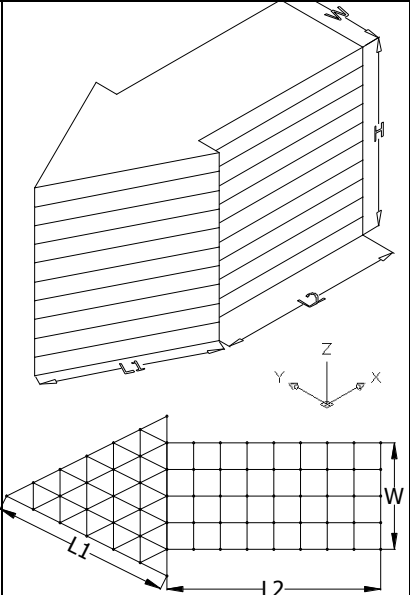
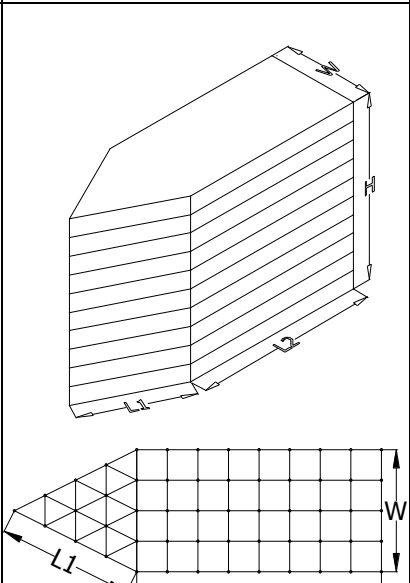
	 <ul style="list-style-type: none"> • $W=20$ m, $L=60$ m, $H=40$ m, $H/W=2$ • mode 1= torsi, mode 2=translasi-Y, & mode 3= torsi • Participating Mass Ratio $\geq 85\%$ \rightarrow mode 5 • $Tc-X=1.96$ dt & $Tc-Y=1.96$ dt 	<p>sayap-sayap tower dapat mengurangi deformasi.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Terbentuknya konfigurasi ketidakberaturan sudut dalam dapat menimbulkan terkonsentrasinya gaya geser pada pertemuan massa. - Pada arah aksis $-X$ bisa terjadi perbedaan deformasi yang besar pada ujung-ujung massa bangunan. - Jika tower terlalu langsing $H1/W > 4$ dan tower terlalu fleksibel sehingga bisa mengganggu kenyamanan penghuni serta pemeliharaan gedung. - Selain itu, bentuk ireguler geometri vertikal ini juga meningkatkan gaya-gaya internal plat, kolom, dan balok antara pertemuan podium dan tower.
24.		<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk lebih atraktif. - Jika pertemuan massa saling tegak lurus pengaturan modul pertemuan massa masih bisa grid. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk ireguler yang dibentuk komposisi massa yang berbeda ketinggian dan diatur relatif acak menghasilkan kombinasi deformasi dominan torsi (mode 1) dan translasi (mode 2). - Dengan terbentuknya konfigurasi ketidakberaturan geometri vertikal

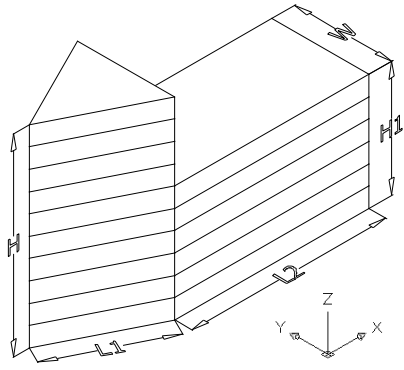
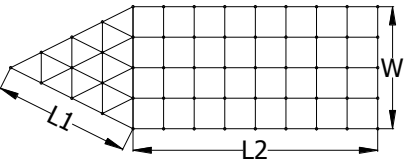
	<ul style="list-style-type: none"> • $W=20$ m, $H=40$ m, $H/W=2$ • mode 1= torsi, mode 2=translasi-Y, & mode 3= torsi • Participating Mass Ratio $\geq 85\%$ \rightarrow mode 8 • $Tc-X=1.44$ dt & $Tc-Y=1.28$ dt 		<p>dan ketidakberaturan sudut dalam dapat menimbulkan terkonsentrasinya gaya-gaya internal plat, kolom dan balok pada pertemuan massa yang beda ketinggian.</p>
25.	 <ul style="list-style-type: none"> • $L1=28.28$ m, $L2=36.57$ m, $L3=20$ m, $L4=20$ m, $L5=48.28$ m, $W=20$ m, $H=40$ m, $H/W=2$ • mode 1= torsi, mode 2= translasi-Y, & mode 3= torsi • Participating Mass Ratio $\geq 85\%$ \rightarrow mode 5 • $Tc-X=1.61$ dt & $Tc-Y=1.59$ dt 	<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk lebih atraktif. - Pengaturan modul struktur dominan modul grid. - Massa aditif (podium) yang menghubungkan sayap-sayap tower dapat mengurangi deformasi. - Pertemuan massa tidak saling tegak lurus $\leq 120^\circ$ dianggap non-konfigurasi ketidakberaturan sudut dalam. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pertemuan massa tidak saling tegak lurus maka pengaturan modul pertemuan massa tidak bisa grid. - Bentuk ireguler komposisi massa podium dan tower berbentuk 'V' menghasilkan deformasi dominan rotasi (mode 1) dan translasi (mode 2). - Tata massa yang tidak saling tegak lurus menyebabkan terbentuknya konfigurasi ketidakberaturan sistem non paralel yang dapat memperbesar deformasi translasi dan torsi. - Jika tower terlalu langsing $H1/W > 4$ dan tower terlalu fleksibel sehingga bisa mengganggu kenyamanan penghuni serta pemeliharaan gedung. - Selain itu, bentuk ireguler geometri vertikal ini juga

			meningkatkan gaya-gaya internal plat, kolom, dan balok antara pertemuan podium dan tower.
26.	 <ul style="list-style-type: none"> • $W=20$ m, $L=25.86$ m, $H=40$ m, $H/W=2$ • mode 1= torsi, mode 2= translasi-Y, & mode 3= torsi • Participating Mass Ratio $\geq 85\%$ \rightarrow mode 5 • $T_c-X=1.90$ dt & $T_c-Y=1.84$ dt 	<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk lebih atraktif. - Pengaturan modul struktur dominan modul grid. - Pertemuan massa tidak saling tegak lurus $\leq 120^\circ$ dianggap non-konfigurasi ketidakberaturan sudut dalam. - Bentuk ireguler yang dibentuk kombinasi massa yang berbeda ketinggian, tetapi tidak berbeda secara signifikan dan diatur relatif acak mengakibatkan kombinasi deformasi dominan torsi (mode 1) dan translasi (mode 2). Akan tetapi, tidak sebesar jika ketinggian antar massa berbeda secara signifikan. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pertemuan massa tidak saling tegak lurus, maka pengaturan modul pertemuan massa tidak bisa grid. - Tata massa yang tidak saling tegak lurus menyebabkan terbentuknya konfigurasi ketidakberaturan sistem non paralel yang dapat memperbesar deformasi translasi dan torsi. - Pada arah aksis -X bisa terjadi perbedaan deformasi yang besar pada ujung-ujung massa bangunan.
27.		<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk lebih atraktif dan dinamis. - Pengaturan modul struktur masih dominan modul grid. 	<ul style="list-style-type: none"> - Modul struktur tabung silinder yang tidak grid persegi untuk membentuk ruang yang efektif menjadi lebih sulit. - Bentuk ireguler komposisi massa berbentuk tabung dan kotak yang sama tinggi menghasilkan

	 <ul style="list-style-type: none"> • $W=21.21$ m, $L1=30$ m, $L2=40$ m, $H=40$ m, $H/W=1.9$ • mode 1= torsi, mode 2= translasi-X, & mode 3= torsi • Participating Mass Ratio $\geq 85\%$ \rightarrow mode 5 • $Tc-X=1.81$ dt & $Tc-Y=2.04$ dt 		<p>kombinasi deformasi dominan torsi (mode 1) dan translasi (mode 2).</p> <ul style="list-style-type: none"> - Massa tabung dengan modul yang tidak saling tegak lurus dengan modul grid massa kotak menyebabkan terbentuknya konfigurasi ketidakberaturan sistem non paralel yang dapat memperbesar deformasi translasi dan torsi.
28.	  <ul style="list-style-type: none"> • $W=20$ m, $L1=20$ m, $L2=40$ m, $H=40$ m, $H/W=2$ • mode 1= torsi & mode 3= translasi-X • Participating Mass Ratio $\geq 85\%$ \rightarrow mode 5 • $Tc-X=1.65$ dt & $Tc-Y=1.76$ dt 	<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk lebih atraktif dan dinamis. - Pengaturan modul struktur masih dominan modul grid. 	<ul style="list-style-type: none"> - Modul struktur tabung silinder yang tidak grid persegi untuk membentuk ruang yang efektif menjadi lebih sulit. - Bentuk ireguler komposisi massa berbentuk tabung dan kotak yang sama lebarnya (W) menghasilkan kombinasi deformasi dominan torsi (mode 1) dan translasi (mode 3) - Massa tabung dengan modul yang tidak saling tegak lurus dengan modul grid massa kotak menyebabkan terbentuknya konfigurasi ketidakberaturan sistem non paralel

			yang dapat memperbesar deformasi translasi dan torsi.
29.	 <ul style="list-style-type: none"> • $W=20$ m, $L1=20$ m, $L2=40$ m, $H=40$ m, $H1=24$ m, $H/W=2$ • mode 1= torsi, mode 2= translasi-X, & mode 3= torsi. • Participating Mass Ratio $\geq 85\%$ \rightarrow mode 5 • $Tc-X=1.20$ dt & $Tc-Y=1.53$ dt 	<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk lebih atraktif dan dinamis. - Pengaturan modul struktur masih dominan modul grid. 	<ul style="list-style-type: none"> - Modul struktur tabung silinder yang tidak grid persegi untuk membentuk ruang yang efektif menjadi lebih sulit. - Bentuk ireguler komposisi massa berbentuk tabung silinder dan kotak yang sama lebarnya (W), tetapi beda ketinggian (H & $H1$) menghasilkan kombinasi deformasi dominan torsi (mode 1) dan translasi-X (mode 2). - Massa tabung dengan modul yang tidak saling tegak lurus dengan modul grid massa kotak menyebabkan terbentuknya konfigurasi ketidakberaturan sistem non paralel yang dapat memperbesar deformasi translasi dan torsi.
30.		<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk lebih atraktif dan dinamis. - Pengaturan modul struktur masih dominan modul grid. - Komposisi modul grid segitiga dan 	<ul style="list-style-type: none"> - Modul struktur tabung segitiga yang tidak grid persegi (grid segitiga) untuk membentuk ruang yang efektif

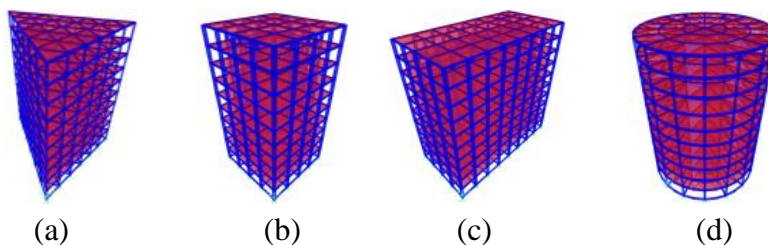
	 <ul style="list-style-type: none"> • B=20 m, P1=30 m, P2=40 m, H=40 m, H/B=2 • mode 1=translasi-Y & mode 3= translasi-X. • Participating Mass Ratio \geq 85% \rightarrow mode 5 • Tc-X=1.87 dt & Tc-Y=1.97 dt 	<p>persegi menghasilkan deformasi dominan translasi (mode 1 & 3).</p>	<p>menjadi lebih sulit.</p>
31.	 <ul style="list-style-type: none"> • W=20 m, L1=20 m, L2=40 m, H=40 m, H/W=2 • mode 1=translasi-Y & mode 2=translasi-X, mode 3=rotasi • Participating Mass Ratio \geq 85% \rightarrow mode 5 	<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk lebih atraktif dan dinamis. - Pengaturan modul struktur masih dominan modul grid. - Komposisi modul grid segitiga dan persegi menghasilkan deformasi dominan translasi (mode 1 & 2). 	<ul style="list-style-type: none"> - Modul struktur tabung segitiga yang tidak grid persegi (grid segitiga) untuk membentuk ruang yang efektif menjadi lebih sulit.

	<ul style="list-style-type: none"> • $Tc-X=1.94$ dt & $Tc-Y=2.07$ dt 		
32.	  <ul style="list-style-type: none"> • $W=20$ m, $L1=20$ m, $L2=40$ m, $H=40$ m, $H1=24$ m, $H/W=2$ • mode 1=rotasi & mode 2=translasi-X, mode 3=rotasi • Participating Mass Ratio $\geq 85\%$ \rightarrow mode 8 • $Tc-X=1.37$ dt & $Tc-Y=1.73$ dt 	<ul style="list-style-type: none"> - Bentuk lebih atraktif dan dinamis. - Pengaturan modul struktur masih dominan modul grid. 	<ul style="list-style-type: none"> - Modul struktur tabung segitiga yang tidak grid persegi (grid segitiga) untuk membentuk ruang yang efektif menjadi lebih sulit. - Bentuk ireguler komposisi massa berbentuk tabung segitiga dan kotak yang sama lebarnya (W), tetapi beda ketinggian (H & H1) menghasilkan kombinasi deformasi dominan torsi (mode 1) dan translasi-X (mode 2).

5.2. GUIDANCE

Berikut ini *guidance* dalam proses *form finding* berdasarkan tabel 5.1 sehingga didapatkan disain konfigurasi bangunan yang lebih tahan terhadap gempa yaitu :

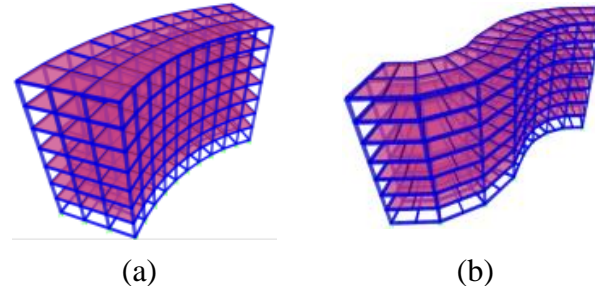
1. Penggunaan bentuk-bentuk dasar



Gambar 5.1. Konfigurasi geometri dengan bentuk-bentuk dasar : a). Tabung segitiga, b). Kotak bujur sangkar, c). Kotak persegi panjang dan d). Tabung silinder.

Penggunaan bentuk-bentuk dasar atau primer tabung segitiga, kotak bujur sangkar, kotak persegi panjang, dan tabung silinder merupakan bentuk-bentuk reguler yang ketahanannya terhadap gempa sangat baik; tetapi secara estetika relatif monoton.

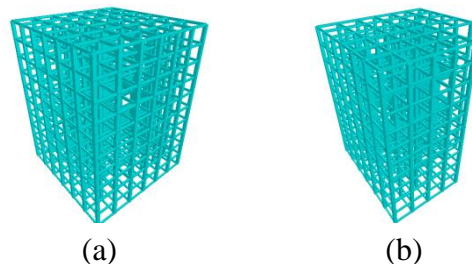
2. Penggunaan bentuk-bentuk organis



Gambar 5.2. Konfigurasi geometri dengan bentuk-bentuk organis.

Bentuk-bentuk seperti ini mengandung ireguleritas torsi dan ireguleritas sistem non paralel serta kondisi di lapangan responnya terhadap gempa sulit diprediksi. Hindari penggunaan bentuk-bentuk organis di zona gempa kuat karena ketahanannya kurang baik terhadap gempa, walaupun secara estetika relatif menantang.

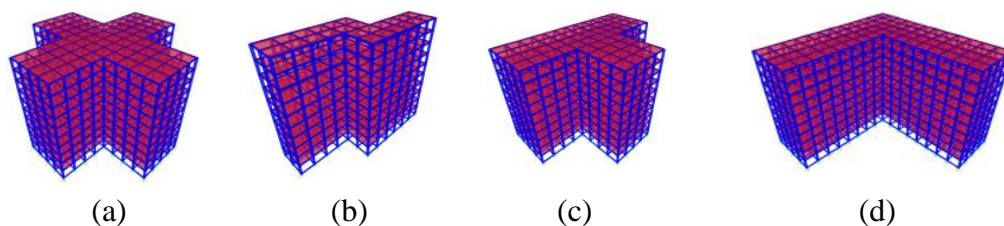
3. Penggunaan bentuk massa aditif dan subtraktif

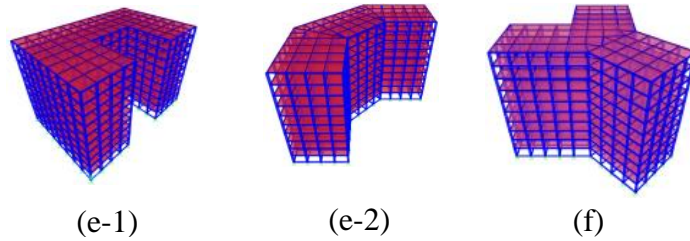


Gambar 5.3. Konfigurasi geometri dengan bentuk massa subtraktif : a). Model dasar, dan b). Model subtraktif (sumber : Teddy, Hardiman and Nuroji, 2016).

Untuk mengurangi persepsi monoton pada bentuk-bentuk dasar di atas dapat dilakukan proses aditif (penonjolan) dan/atau subtraktif (coakan) dari bentuk-bentuk dasar $\leq \pm 10\%$ sehingga ketahanannya terhadap gempa masih relatif baik sebagaimana bentuk dasarnya.

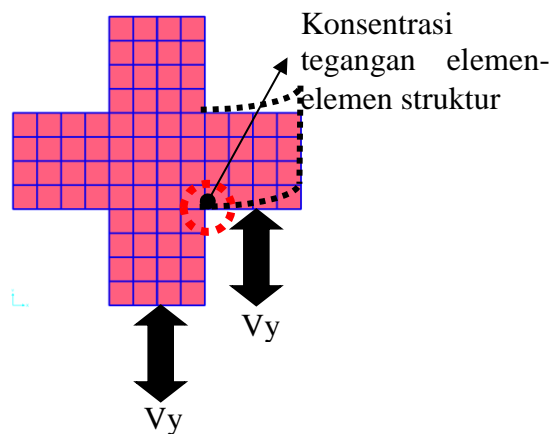
4. Penggunaan massa bentuk +, Z, T, L, U, Y





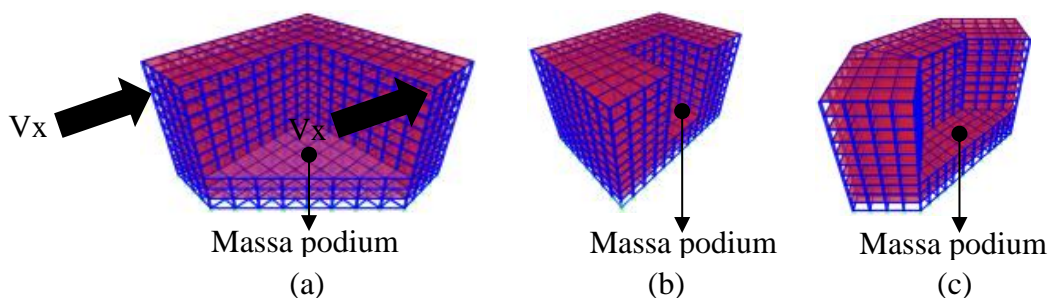
Gambar 5.4. Konfigurasi geometri dengan massa : a). Bentuk -X, b). Bentuk -Z, c). Bentuk -T, d). Bentuk -L, e). Bentuk -U dan f). Bentuk -Y

Yang perlu diperhatikan dalam penggunaan massa bentuk X, Z, T, L, U, Y dalam desain yaitu potensi terjadi perbedaan deformasi diujung-ujung sayap massa dan konsentrasi tegangan dipertemuan massa pada saat terjadi gempa kuat.



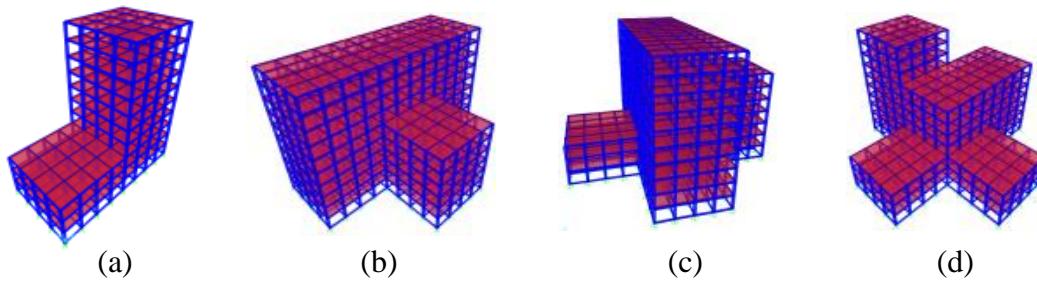
Gambar 5.5. Perbedaan deformasi dan konsentrasi tegangan pada massa bentuk X akibat gempa.

Untuk mengurangi perbedaan deformasi dan konsentrasi tegangan dengan penggunaan massa podium, *shear wall*, dan perkuatan lainnya.



Gambar 5.6. Deformasi diujung sayap massa dan konsentrasi tegangan di pertemuan massa dapat dikurangi dengan penggunaan massa podium

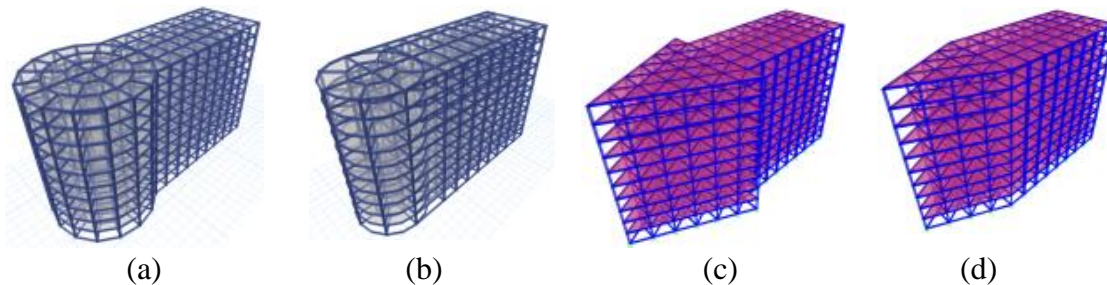
5. Penggunaan komposisi massa sama bentuk



Gambar 5.7. Komposisi massa sama bentuk dan beda ketinggian dapat menimbulkan perbedaan deformasi, konsentrasi tegangan di pertemuan massa dan torsi.

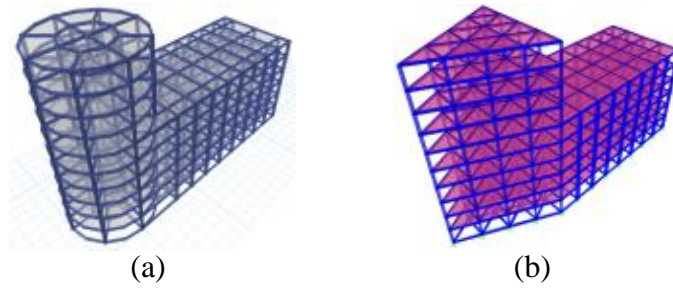
Komposisi massa sama bentuk dan beda ketinggian seperti (gambar 5.7a s/d 5.7d) pada saat terjadi gempa kuat dapat menimbulkan potensi terjadinya perbedaan deformasi diujung-ujung sayap massa, konsentrasi tegangan dipertemuan massa, dan terjadinya torsi akibat perbedaan ketinggian. Untuk mengurangi perbedaan deformasi dan konsentrasi tegangan dengan penggunaan massa podium, *shear wall/core wall*, dan perkuatan lainnya serta tata massa paling tidak simetris 1 aksis (gambar 5.7a s/d 5.7c); sehingga perilaku bangunan ketika terjadi gempa tidak acak dan masih bisa diprediksi serta diantisipasi.

6. Penggunaan komposisi massa berbeda bentuk



Gambar 5.8. Komposisi massa beda bentuk dan sama ketinggian dapat menimbulkan perbedaan deformasi dan torsi.

Modul struktur lingkaran mengandung ireguleritas sistem non paralel, sedangkan modul struktur segitiga memiliki kestabilan yang baik dibandingkan modul struktur lingkaran dan persegi. Secara umum komposisi massa beda bentuk dan sama ketinggian seperti (gambar 5.8a s/d 5.8d) pada saat terjadi gempa kuat dapat menimbulkan potensi terjadinya perbedaan deformasi diujung-ujung sayap massa dan terjadinya torsi akibat perbedaan kekakuan modul struktur.



Gambar 5.9. Komposisi massa beda bentuk dan ketinggian dapat menimbulkan perbedaan deformasi dan torsi.

Komposisi massa beda bentuk dan ketinggian seperti (gambar 5.9a dan 5.9b) pada saat terjadi gempa kuat dapat menimbulkan potensi terjadinya perbedaan deformasi diujung-ujung sayap massa dan terjadinya torsi akibat perbedaan ketinggian. Untuk mengurangi perbedaan deformasi dan torsi pada komposisi massa berbeda bentuk atau ketinggian dengan *shear wall/core wall*. Lalu, untuk perkuatan lainnya yaitu tata massa paling tidak simetris 1 aksis, sehingga perilaku bangunan ketika terjadi gempa tidak acak dan masih bisa diprediksi serta diantisipasi.

BAB VI. KESIMPULAN

Dari hasil pembahasan dan usulan *guidance* dalam proses perancangan arsitektur tahan gempa dapat disimpulkan yaitu :

- Untuk menghasilkan desain *earthquake architecture* perlu kerjasama baik antara arsitek dan ahli struktur.
- Perilaku deformasi bangunan terhadap gempa sangat dipengaruhi oleh komposisi dan bentuk geometris bangunan.
- Untuk zona gempa kuat, hindari bentuk geometris bangunan dengan komposisi dan transformasi yang acak dan organis/lengkung.
- Perilaku deformasi bangunan dapat dikurangi dan dikontrol dengan penggunaan *core wall/shear wall*, podium dan dilatasi.

DAFTAR PUSTAKA

1. Alwashali, H. and Maeda, M. (2012) ‘Study of Seismic Evaluation Methods Of RC Buildings With Masonry Infill Walls ; A Case Study of Building in Jordan’, in Japan Association for Earthquake Engineering (JAEE) (ed.) *International Symposium on Earthquake Engineering, JAEE, Vol.1*. Tokyo: JAEE, pp. 497–506.
2. Arnold, C. and Stewart, W. W. (2000) ‘Seismic Analysis and Design’, in AIA (ed.) *The Architects Handbook of Professional Practice*. 13th editi. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., pp. 1–7.
3. BIS (2002) *Criteria for Earthquake Resistant Design of Structures Part 1 General Provisions and Buildings - IS 1893(Part 1):2002*. New Delhi: Bureau of Indian Standards (BIS).
4. Boen, T., Arya, A. S. and Ishiyama, Y. (2014) *Guidelines for Earthquake Resistant Non-Engineered Construction*. UNESCO.
5. Borowski, E. J. and Borwein, J. M. (1989) ‘Dictionary of Mathematics Glasgow’. Harper Collins Publishers.
6. BSN (2012) *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung - SNI 1726 : 2012*. Jakarta: Badan Standar Nasional.
7. BSN (2019) *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung SNI 1726: 2019, Jakarta: Standar Nasional Indonesia*.
8. Earthquake Research Departement (2007) *Turkish Earthquake Code (TEC)*. General Directorate of Minister Affairs.
9. FEMA (2007) *NEHRP Recommended Provisions for New Buildings and Other Structures: Training and Instructional Materials-FEMA 451B*. Washington DC: Federal Emergency Management Agency (FEMA).
10. FEMA (2015) *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: Supporting Documentation-FEMA 155*. Washington DC: Federal Emergency Management Agency (FEMA).
11. Habib, F. (2012) *Direction factor, CSI Knowledge base*. Available at: <https://wiki.csiamerica.com/display/etabs/Direction+factor> (Accessed: 7 November 2020).
12. Harmankaya, Z. Y. and Soyluk, A. (2012) ‘Architectural Design of Iregular Buildings in Turkey’, *International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS*,

Vol:12(No.01), p. 42 to 48.

13. Hoedajanto, D. and Riyansyah, M. (2015) 'Bangunan Tahan Gempa dan Tanggung Jawab Legal Praktisi Konstruksi Indonesia', in Sukamta, D. and Et.al. (eds) *Challenges in the Future*. Jakarta: HAKI, pp. 1–10.
14. IAI (2007) *Pedoman Hubungan Kerja Antara Arsitek Dengan Pengguna Jasa*. Jakarta: Badan Sistem Informasi Arsitektur Ikatan Arsitek Indonesia.
15. Ledder, G. (2013) *Mathematics for the Life Sciences*. New York, NY: Springer New York (Springer Undergraduate Texts in Mathematics and Technology). doi: 10.1007/978-1-4614-7276-6.
16. Mulia, R. (2016) *PERIODE GETAR STRUKTUR, MENGAPA BEGITU PENTING, BAGIAN I – GEMPA*, *Weblog*. Available at: <https://rezkymulia.wordpress.com/2013/03/27/periode-getar-struktur-mengapa-begitu-penting-bagian-i-gempa/> (Accessed: 22 July 2020).
17. Nasution, S. (1995) *Metode research (penelitian ilmiah): usul tesis, desain penelitian, hipotesis, validitas, sampling, populasi, observasi, wawancara, angket*. Jakarta: Bumi Aksara.
18. Nawy, E. G., Surjaman, T. and Suryoatmono, B. (1990) *Beton Bertulang: Suatu Pendekatan Dasar*. PT. Eresco, Bandung.
19. Neuman, L. W. (2014) *Social research methods: Qualitative and quantitative approaches*. 7th edn. London: Pearson Education Limited. doi: 10.1234/12345678.
20. NZSEE (2006) *Assessment and Improvement of the Structural Performance of Buildings in Earthquakes*. Wellington: New Zealand Society for Earthquake Engineering (NZSEE).
21. Okada, T. et al. (eds) (2005) *Guidelines for Seismic Retrofit of Existing Reinforced Concrete Buildings*. Tokyo: The Japan Building Disaster Prevention Association (JBDPA).
22. Ondrej (2019) *Modal Analysis, CSI Knowledge base*. Available at: <https://wiki.csiamerica.com/display/kb/Modal+analysis> (Accessed: 7 November 2020).
23. Özmen, C. and Ünay, A. I. (2007) 'Commonly encountered seismic design faults due to the architectural design of residential buildings in Turkey', *Building and Environment*, 42(3), pp. 1406–1416. doi: 10.1016/j.buildenv.2005.09.029.
24. Paulay, T. and Priestley, M. (1992) *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. Canada: John Wiley & Sons.
25. Pirmanto, D., Jundillah, M. L. and Widagdo, K. A. (no date) 'JENIS PENELITIAN MENURUT KEDALAMAN ANALISIS DATA'.

26. Schueller, W. (1989) *Struktur Bangunan Bertingkat Tinggi*. Bandung: PT Eresco.
27. Teddy, L., Hardiman, G. and Tadjono, S. (2018) 'Simplified Vulnerability Analysis (SVA) Preliminary Design of the Frame Structure in the Architectural Design Process', *Indian Journal of Science and Technology*, 11(May), pp. 1–13. doi: 10.17485/ijst/2018/v11i20/121768.
28. Tjokrodinuljo, K. (1997) *Teknik Gempa*. Yogyakarta: Penerbit Nafiri.

IDENTIFIKASI PERILAKU TRANSFORMASI GEOMETRIS BANGUNAN DALAM PROSES DISAIN BANGUNAN TERHADAP GEMPA

Livian Teddy^{1*}, Johannes Adiyanto² dan Husnul Hidayat¹

^{1,2,3} Teknik Arsitektur, Universitas Sriwijaya, Palembang
Corresponding author: livianteddy@gmail.com

ABSTRAK: Indonesia merupakan wilayah rawan gempa termasuk wilayah Sumatera Selatan dengan kategori *moderate* s/d *high*, sehingga bangunan harus dirancang untuk tahan gempa. Dalam proses disain arsitektur dikenal proses *form finding* yaitu proses pencarian bentuk rancangan dari bentuk sederhana sampai dengan bentuk final yang kompleks. Pada prinsipnya tidak ada larangan untuk membuat bentuk-bentuk yang kompleks tetapi harus mengetahui konsekuensi dari penggunaan bentuk-bentuk kompleks tersebut dalam masalah perilaku gempa terhadap bangunan. Penelitian ini penelitian eksperimen simulasi dengan menggunakan 7 model bangunan (I, L, T, U, +, Z, \cap) yang sering digunakan dalam desain arsitektur tetapi 6 model diantaranya memiliki ireguleritas geometris. Hasil analisa *modal analysis* program Etabs terhadap 7 model bangunan tersebut yaitu : perbandingan $H/D \leq 2$, periode getarnya relatif sama dengan periode maksimumnya, ragam fundamentalnya kategori reguler hanya model bentuk I, T, U, + dan rasio partisipasi massa model bangunan semakin kompleks/ireguler bentuknya semakin besar mode yang dibutuhkan. *Guidance* yang diusulkan dalam proses *form finding* yaitu SRPM $H/D \leq 2$ atau $H/D > 2$ SRPM + *shear wall/core wall*, bentuk geometris dasar memiliki ketahanan yang baik terhadap gempa, hindari bentuk organis/lengkung di zona rawan gempa kuat, bentuk ireguleritas torsi dan sudut dalam dapat diminimalisir dengan penambahan *shear wall/core wall*, perkuatan atau dilatasi.

Kata Kunci: gempa, arsitektur, form finding, simulasi, guidance

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan wilayah rawan gempa yang dilalui banyak jalur gempa subduksi seperti Eurasia, Indo-Australia, Pasifik dan sesar seperti sesar Sumatra, Jawa, Sulawesi dan Papua Barat. Dengan demikian sudah banyak kejadian gempa yang menimbulkan korban jiwa dan harta. Salah satu penyumbang terbanyak korban jiwa akibat gempa yaitu kerusakan dan keruntuhan bangunan.

Melakukan disain bangunan untuk dapat menerima gempa kuat dalam kondisi elastis adalah tidak ekonomis. Yang mungkin dilakukan yaitu bangunan bisa saja rusak berat tetapi tidak mengalami keruntuhan. Dan untuk membuat bangunan dengan kondisi demikian tidak cukup diserahkan pada ahli struktur saja tetapi harus ada kerjasama baik antara arsitek dan ahli struktur (Arnold and Stewart, 2000; Hoedajanto and Riyansyah, 2015). Proses perancangan bangunan tahan gempa seharusnya dimulai dari proses disain arsitektur dengan mempertimbangkan aspek geometri bangunan yang akan

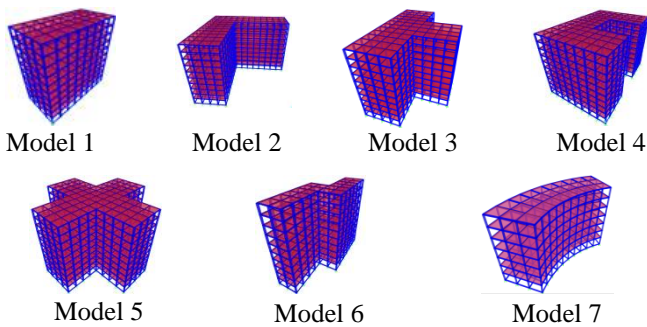
berpengaruh pada perilaku struktur dalam menerima gempa terutama beban lateral.

Dalam proses disain arsitektur dikenal proses *form finding* yaitu proses pencarian bentuk sampai akhirnya ditemukan bentuk yang sesuai. Biasanya dimulai dengan bentuk sederhana kemudian dilakukan transformasi sehingga didapatkan bentuk yang lebih kompleks. Tetapi pada proses transformasi ini biasanya arsitek lebih fokus pada aspek estetika saja. Pada prinsipnya tidak ada larangan untuk membuat bentuk-bentuk yang kompleks. Tetapi yang menjadi perhatian adalah konsekuensi dari penggunaan bentuk-bentuk kompleks tersebut dalam masalah perilaku gempa terhadap bangunan (Harmankaya and Soyuluk, 2012). Selain konfigurasi geometri bangunan, jenis material bangunan juga mempengaruhi ketahanan bangunan terhadap gempa. Material baja memiliki sifat daktilitas yang baik dibandingkan beton yang bersifat getas. Tetapi beton merupakan material struktur bangunan yang paling sering digunakan di Indonesia. Penelitian ini mencoba mempelajari konfigurasi bangunan yang berbahan beton bertulang dari bentuk I menjadi bentuk yang lebih

kompleks +, Z, T, L, U, ∩ sehingga mempengaruhi respon bangunan terhadap gempa. Tujuannya mempelajari perubahan geometri bangunan terhadap perilaku struktur dalam menerima gaya gempa.

MODEL DAN METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan jenis penelitian eksperimen simulasi. Dengan menggunakan 7 model bangunan (gambar 1) berbentuk I, L, T, U, +, Z, ∩ ketinggian bangunan 10 lantai dan tinggi antar lantai 4 m. Enam bentuk-bentuk terakhir sering kali digunakan dalam perancangan arsitektur tetapi terkandung ireguleritas didalamnya (JIA and JASO, 2012). Sistem struktur yang digunakan yaitu Struktur Rangka Pemikul Momen (SRPM). Modul kolom yang digunakan 5x5 m, dimensi kolom 0.6x0.6 m dan d-0.6 m (model -7), dimensi balok 0.25x0.4 m dan tebal lantai t=12cm. Mutu beton K-300, mutu baja tulangan fy=4000 Kg/cm2 dan mutu baja sengkang fy=2400 Kg/cm2.



Gambar 1 3D model bangunan.

Tabel 1 Periode fundamental dan periode maksimum(dtk), perbandingan tinggi dan lebar bangunan (H/D), mode translasi (Ux dan Uy) dan rotasi (Rz), dan partisipasi massa (Sum Ux dan Sum Uy) (sumber : analisa).

Model	Period -T (dtk)		Tmax(dtk)	H/D	Uy mode -1	Ux mode -2	Rz mode -3	Sum Uy (100%) mode -n	Sum Ux (100%) mode -n
	mode -1 (y)	mode -2 (x)							
1	1.935	1.865	1.80	2	0.7876	0.7908	0.7895	23	24
2	1.921	1.908	1.80	2	0.3299	0.3953	0.6606	28	28
3	1.924	1.890	1.80	2	0.7896	0.7675	0.7657	27	26
6	1.942	1.818	1.80	2	0.7833	0	0	27	28
7	1.916	1.785	1.80	2	0.7964	0.0500	0.0494	26	27

Model	Period -T (dtk)		Tmax(dtk)	H/D	Ux mode -1	Uy mode -2	Rz mode -3	Sum Ux(100%) mode -n	Sum Uy (100%) mode -n
	mode -1 (x)	mode -2 (y)							
4	1.909	1.908	1.80	2	0.7803	0.7907	0.7809	29	28
5	1.907	1.907	1.80	2	0.7852	0.7852	0.7888	25	26

Ke-7 geometri model bangunan diatas di-input kedalam program struktur Etabs. Asumsi beban mati 400kg/m2 dan beban hidup yang digunakan yaitu fungsi perkantoran (250 kg/m2) dan dianalisa dengan modal analysis sehingga didapatkan output modal information

yaitu fundamental period (T), shape mode translation (Ux, Uy), torsion (Rz) dan Participating Mass Ratio (Sum Ux, Sum Uy).

Periode Fundamental model bangunan (T) dibandingkan Periode Fundamental maksimum (Tmax) dapat diketahui kekakuan suatu struktur (Budiono and Supriatna, 2011). Jika T < Tmax maka struktur kaku dan jika T > Tmax maka struktur fleksibel. Untuk Tmax didasarkan pada zona gempa kategori high yang ada di Sumatera Selatan.

Ux, Uy dan Rz digunakan untuk menilai tingkat ketidakberaturan/ireguler suatu struktur bangunan. Bangunan dengan dominan translasi pada mode -1 dan mode -2 (Ux dan Uy) dan rotasi pada mode -3 (Rz) dapat dikategorikan bangunan yang beraturan/reguler (Murty et al., 2012).

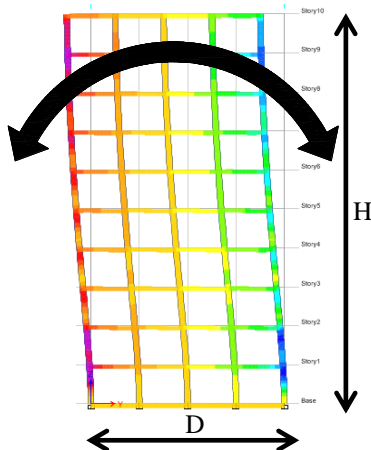
Sum Ux dan Sum Uy merupakan penjumlahan masing-masing kontribusi mode/ragam arah aksis -x dan -y didalam modal analysis. Untuk menjamin akurasi metode ini tergantung pada bagian yang berpartisipasi dari total massa bangunan yang disebut Participating Mass Ratio (Rasio Partisipasi Massa) (Hanna et al., 2017). Menurut peraturan gempa Indonesia terbaru partisipasi rasio massa harus mencapai 100% (BSN, 2019). Salah satu penyebab yang dapat mengakibatkan suatu model bangunan penjumlahan ragamnya tidak mencapai 100% yaitu kompleksitas dan/atau ireguleritas dari suatu bangunan. Semakin kompleks dan/atau ireguler suatu bangunan semakin banyak mode yang dibutuhkan dan juga semakin sulit penjumlahan ragamnya mencapai 100%.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Periode Fundamental (T)

Jika dibandingkan antara periode fundamental dengan periode maksimum model bangunan (tabel 1) memperlihatkan baik arah -x maupun arah -y semua

periode fundamentalnya (T) diatas periode maksimumnya (T_{max}) kecuali arah $-x$ model 7. Tetapi tidak terlalu signifikan perbedaannya.

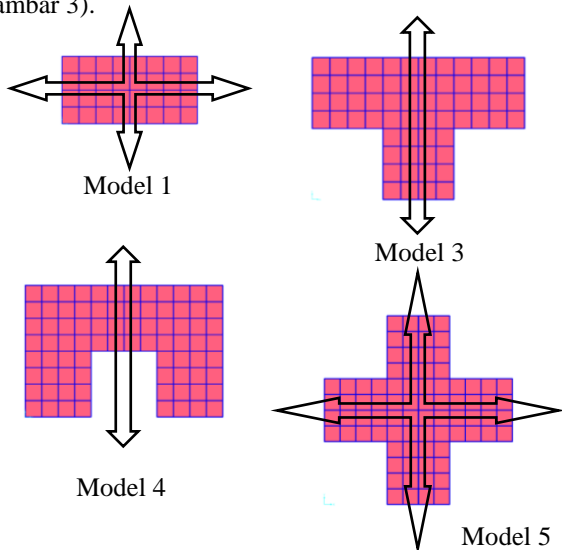


Gambar 2 Perbandingan ideal tinggi (H) dan lebar (D) bangunan tinggi $\frac{H}{D} \leq 4$ untuk mengurangi potensi *overturning* akibat gempa (sumber : diadaptasi dari JIA and JASO, 2012)).

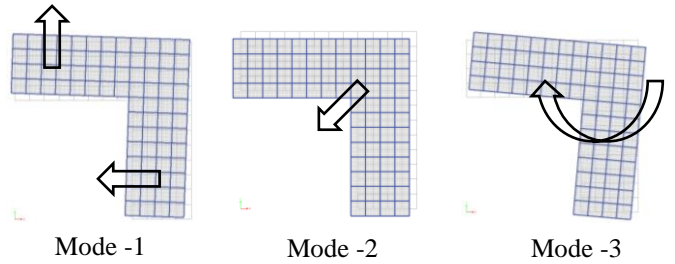
Begitu juga perbandingan antara tinggi dan lebar bangunannya (H/D) masih dibawah 4. Hal ini berarti semua model bangunan masih cukup kaku dalam menghadapi berbagai *mode* potensi gempa yang terjadi sehingga dapat mengurangi masalah efek *overturning* (gambar 2) yang biasa terjadi pada bangunan tinggi (E.Garcia and A.Sozen, 2004; JIA and JASO, 2012).

Ragam Getar Fundamental (*Mode*)

Dari 7 model, yang memenuhi kriteria reguler dimana mode -1 dan -2 translasi, dan mode -3 rotasi yaitu hanya model 1, model 3, model 4 dan model 5 (tabel 1). Dari bentuk denah masing-masing model memiliki denah simetris 2 aksis (model 1 dan 5) dan denah simetris 1 aksis (model 3 dan 4). Model 3 dan 4 walaupun hanya simetris 1 aksis ternyata masih memiliki reguleritas (gambar 3).

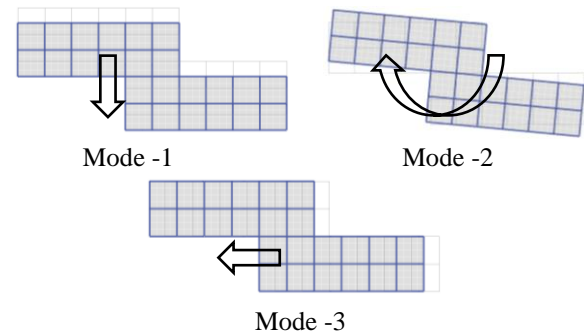


Gambar 3 Reguleritas model bangunan I, T, U dan + yang memiliki denah simetris 2 aksis dan 1 aksis (sumber : analisa).

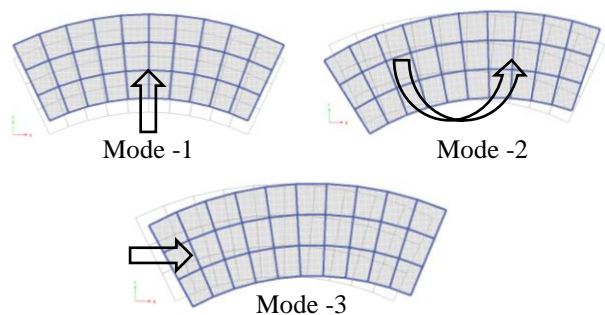


Gambar 4 Ireguleritas model 2 bentuk L : mode -1 translasi, mode -2 translasi diagonal dan mode -3 rotasi (sumber : analisa).

Model 2, jika dilihat pada tabel 1 sebenarnya mode -1 dan -2 translasi tetapi pada mode -1 translasinya tidak dominan (<0.5) terjadi pada 2 aksis sekaligus dan bercampur dengan rotasi sedangkan mode -2 translasinya diagonal dan juga tidak dominan (<0.5). Untuk mode -3 rotasi dan masih cukup dominan (>0.5) (gambar 4). Fenomena lainnya pada model 6 dan 7. Model 7 memiliki simetris 1 aksis dan model 6 tidak simetris. Keduanya pada mode -1 translasi sedangkan pada mode -2 rotasi dan mode -3 translasi (gambar 5 dan 6).

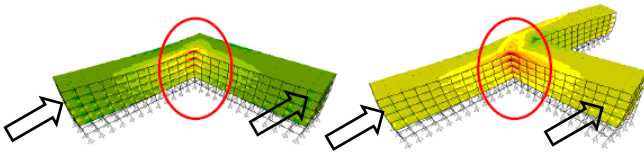


Gambar 5 Ireguleritas model 6 bentuk Z : mode -1 translasi, mode -2 rotasi dan mode -3 translasi (sumber : analisa).



Gambar 6 Ireguleritas model 7 bentuk \cap : mode -1 translasi, mode -2 rotasi dan mode -3 translasi (sumber : analisa).

Model bangunan 3, 4 dan 5 jika menurut ragam getar fundamentalnya termasuk kategori reguler tetapi masih mengandung ireguleritas horisontal lainnya yaitu ketidakberaturan sudut dalam (FEMA, 2007). Di mana terjadi konsentrasi tegangan gaya pada sudut pertemuan massa akibat perbedaan kekakuan pada saat terjadi gempa (gambar 7). Potensi ireguleritas ini juga terjadi pada model 2 dan 6. Hal ini dapat dicegah dengan perkuatan pada area pertemuan sudut massa, menghindari sayap-sayap massa yang terlalu panjang (< 15% dari massa utama), penggunaan dinding geser pada ujung-ujung sayap massa dan pertemuan antar massa bangunan, atau pemisahan antar massa bangunan dengan dilatasi (adaptasi Duggal, 2007). Model bangunan 7 relatif berbeda dengan model lainnya karena model 1 s/d 6 layout kolom dan baloknya masih mengikuti arah aksis x dan y. Sedangkan model 7 susunan kolom dan baloknya tidak mengikuti arah aksis ortogonal atau kategori ketidakberaturan sistem non paralel (FEMA, 2007). Mengatasi ireguleritasnya yaitu penggunaan *shear wall* diujung-ujung bangunan atau sebaiknya hindari saja penggunaan bentuk lengkung terutama di area rawan gempa kuat. Berdasarkan realita lapangan bangunan berbentuk lengkung ternyata kerusakannya relatif parah akibat goyangan gempa kuat (Liang LI, 2019).



Gambar 7 Potensi terjadi ireguleritas ketidakberaturan sudut dalam model 2, 3, 4 dan 5 (sumber : Murty et al., 2012).

Rasio Partisipasi Massa

Jumlah mode maksimum yang dibutuhkan untuk melakukan *modal analysis* pada model bangunan yaitu 10*jumlah lantai (N) (Madutujuh, 2020). Kemudian setelah analisis baru diketahui dengan pasti jumlah mode yang dibutuhkan untuk mencapai partisipasi massa 100%. Partisipasi massa 100% pada seluruh model diatas mode -20 (tabel 1). Yang paling terkecil mode -23 dan -24 yaitu pada model 1 yang memiliki bentuk I. Sedangkan yang terbesar mode -28 dan -29 pada model 7 yang berbentuk U. Secara umum semakin bertambah kompleksitas dan ireguleritas semakin banyak mode yang dibutuhkan untuk mencapai partisipasi massa 100%.

Jika partisipasi massa 100% sulit dicapai walaupun sudah menambah mode, dapat dilakukan dengan (Madutujuh, 2020) :

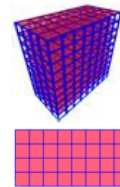
- Mengatur ulang susunan kolom atau *shear wall*.

- Memperbesar dimensi kolom atau *shear wall*.
- Memeriksa distribusi beban.
- Menyederhanakan bentuk massa yang kompleks dengan memisahkannya menggunakan dilatasi.

KESIMPULAN

Dari hasil analisa diatas bentuk-bentuk I, L, T, U, +, Z, ∩ diusulkan *guidance* dalam proses *form finding* desain arsitektur sehingga didapatkan konfigurasi geometri bangunan yang relatif tahan terhadap gempa yaitu :

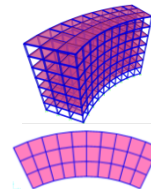
1. Perbandingan tinggi dan lebar bangunan Untuk SRPM batasi ketinggian dan lebar bangunan dengan rasio $H/D \leq 2$. Jika $H/D > 2$ kombinasikan dengan *shear wall* dan/atau *core wall*.
2. Pemakaian bentuk dasar



Gambar 8 Bentuk dasar persegi panjang (sumber : analisa).

Bentuk dasar seperti persegi panjang memiliki ketahanan lebih baik terhadap gempa dibandingkan bentuk lainnya tetapi penampilannya relatif sederhana dan monoton.

3. Pemakaian bentuk organik dan lengkung



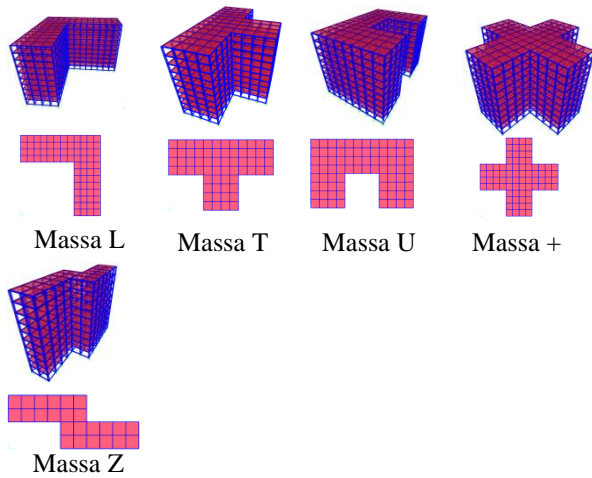
Gambar 9 Bentuk lengkung (sumber : analisa).

Bentuk organik dan lengkung memiliki ireguleritas torsi dan ireguleritas sistem non paralel. Jika kompleksitasnya bertambah respon bangunan ini terhadap gempa semakin sulit diperkirakan. Hindari penggunaan bentuk lengkung dan organik di zona gempa kuat karena ketahanannya terhadap gempa kurang baik walaupun secara arsitektural bentuknya menarik.

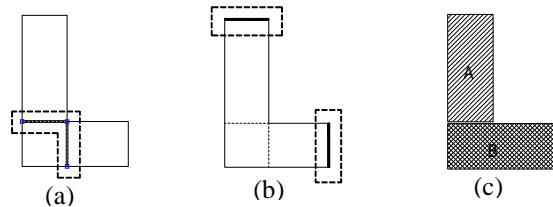
4. Pemakaian bentuk L, T, U, +, Z

Bentuk L, T, U, +, Z (gambar 10) memiliki ireguleritas torsi dan ketidakberaturan sudut dalam. Untuk meminimalisir ireguleritas tersebut dengan cara memperkuat area dimana memiliki potensi terjadinya konsentrasi tegangan gaya akibat gempa (gambar 11a), memperkecil potensi torsi dengan meletakkan *shear wall* diujung-ujung sayap bangunan (gambar 11b) atau

menggunakan dilatasi untuk memisahkan massa bangunan yang tidak beraturan (gambar 11c).



Gambar 10 Bentuk L, T, U, +, Z.



Gambar 11 Perkuat dimana potensi terjadinya konsentrasi tegangan gaya (a), gunakan *shear wall* dimana dapat memperkecil potensi torsi (b) atau pisahkan massa bangunan dengan dilatasi (c) (sumber : analisa).

UCAPAN TERIMA KASIH

Riset ini didukung penuh oleh pendanaan PNPB Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya melalui skema SAINSTEK. Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Universitas Sriwijaya atas dana yang telah disetujui yang membuat penelitian penting ini dapat fisibel dan efektif.

DAFTAR PUSTAKA

Arnold, C. and Stewart, W. W. (2000) 'Seismic Analysis and Design', in AIA (ed.) *The Architects Handbook of Professional Practice*. 13th editi. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., pp. 1–7.

BSN (2019) *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung SNI 1726: 2019*, Jakarta: Standar Nasional Indonesia.

Budiono, B. and Supriatna, L. (2011) *Studi Komparasi Desain Bangunan Tahan Gempa Dengan*

Menggunakan SNI 03-1726-2002 dan RSNI 03-1726-2012. Bandung: Penerbit ITB.

Duggal, S. K. (2007) *Earthquake resistant design of structures*. Oxford university press New Delhi.

E.Garcia, L. and A.Sozen, M. (2004) 'Earthquake-Resistant Design of Reinforced Concrete Buildings', in Bozorgnia, Y. and V.Bertero, V. (eds) *Earthquake engineering: from engineering seismology to performance-based engineering*. CRC press, pp. 798–907.

FEMA (2007) *NEHRP Recommended Provisions for New Buildings and Other Structures: Training and Instructional Materials-FEMA 451B*. Washington DC: Federal Emergency Management Agency (FEMA).

Hanna, N. F. *et al.* (2017) 'Efficient Mass Participation Ratio of Building with Basement', *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 14(1), pp. 59–74. doi: 10.9790/1684-1401045974.

Harmankaya, Z. Y. and Soyluk, A. (2012) 'Architectural Design of Iregular Buildings in Turkey', *International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS*, Vol:12(No.01), p. 42 to 48.

Hoedajanto, D. and Riyansyah, M. (2015) 'Bangunan Tahan Gempa dan Tanggung Jawab Legal Praktisi Konstruksi Indonesia', in Sukamta, D. and Et.al. (eds) *Challenges in the Future*. Jakarta: HAKI, pp. 1–10.

JIA and JASO (eds) (2012) *Earthquake-Resistant Building Design for Architects*. Japan: Takhesi Goto.

Liang LI (2019) 'Research on the Function of Architectural Design Based on Seismic Observation Records in Seismic Design of Buildings', *Academic Journal of Environment & Earth Science*. Francis Academic Press, 1(1).

Madutujuh, N. (2020) *Perencanaan Gedung Bertingkat dengan Program SANSPRO*. Jakarta.

Murty, C. V. R. *et al.* (2012) *Some Concepts in Earthquake Behaviour of Buildings*. Gujarat: Gujarat State Disaster Management Authority Government of Gujarat.

Identifying Geometric Configuration of Earthquake-Resistant Buildings

Livian Teddy¹, Johannes Adiyanto², Husnul hidayat³

^{1,2,3}Department Architecture, Engineering Faculty, Universitas Sriwijaya
Jl. Palembang-Prabumulih KM 32, Indralaya, Indonesia
Email: livianteddy@gmail.com

Abstract

Indonesia merupakan wilayah rawan gempa karena di lewati lempeng-lempeng tektonik dunia dan ratusan patahan lokal. Sudah banyak korban akibat tertimpa bangunan. Oleh karena itu bangunan di Indonesia harus di desain tahan gempa. Akan tetapi tidak banyak *guidance* bagi arsitek dalam mendesain bangunan tahan gempa. Penelitian ini memberikan usulan *guidance* bagi arsitek dalam mendesain konfigurasi geometri bangunan yang relatif tahan gempa. Metode penelitian yang digunakan metode eksperimen simulasi dengan menggunakan 32 model bangunan dengan berbagai macam konfigurasi geometri. Kemudian dianalisa dengan *modal analysis software* Etabs dan SVA Desain Arsitektur. Dari hasil analisa diusulkan *guidance* : 1). Hindari bangunan terlalu langsing gunakan rasio tinggi bangunan (H)/lebar bangunan (D) ≤ 2 , 2). Hindari *soft story* dimana tinggi kolom atas (h)/tinggi kolom bawah (h1) ≤ 0.8 , 3). Gunakan bentuk simetris 2 atau 1 aksis dan hindari bentuk dengan komposisi acak, 4). Gunakan massa transformasi aditif dan subtraktif $\leq 15\%$, 5). Potensi iregularitas torsi dan sistem non paralel bentuk L, T, U, +, Z dapat diminimalisir dengan perkuatan elemen struktur, *shear wall* atau dilatasi, 6). Hindari penggunaan bentuk asimetris non aksis.

Keywords: gempa, arsitektur, *guidance*, konfigurasi geometri, simulasi

Abstract

Title: *Identifying Geometric Configuration of Earthquake-Resistant Buildings*

Indonesia is an earthquake-prone area because it is located at the world's most active tectonic plates and hundreds of local faults. Obviously, there have been many earthquake victims caused by collapsed buildings, hence the need for earthquake-resistant construction. However, there is not much guidance for architects to design earthquake-resistant buildings. This research proposes guidance for architects on how to design building forms relatively able to resist earthquakes. The simulation experiment method involving 32 building models in various forms was employed. The experimental results were then analyzed with modal analysis in ETABS and SVA for architectural design. Based on the analysis report, some guidelines were proposed: 1). Avoid buildings that are too slender, use the slenderness ratio ≤ 2 , 2). Avoid soft stories where the ratio of the top column height (h) to the bottom column height (h1) ≤ 0.8 , 3). Use symmetrical shapes with 1 or 2 axes and avoid shapes with random compositions, 4). Use the additive and subtractive mass transformation $\leq 15\%$, 5). Strengthen the structural elements, install shear walls, or use dilatation to minimize potential torsional irregularities and non-parallel system irregularities of L, T, U, +, and Z forms 6). Avoid using non-axial asymmetrical forms.

Keywords: *earthquake, architecture, guidance, geometry configuration, simulation.*

Introduction

According to the 2016 earthquake catalog published by PUSGEN (PuSGen 2017), from 1900 – 2016, there were 50.000 earthquakes

with a magnitude of $M_w > 5$ in Indonesia. These earthquakes were caused by subduction earthquakes as a result of the movement of some tectonic plates like the Indo-Australian plate, the Eurasian plate, the Pacific plate, the Philippine Sea plate, and the movement of local faults such as the Great Sumatra fault (the Semangko fault) and the Lembang fault. From earthquakes occurring in 2004 - 2010 only, more than 250.000 people had perished. Most of the victims died because the buildings fell on them, hence the need for earthquake-resistant buildings (Kementrian PU 2010).

Designing earthquake-resistant buildings certainly needs effective collaboration between architects and structural engineers (Arnold and Stewart 2000; Hoedajanto and Riyansyah 2015). Many codes and guides are related to this type of buildings, but only a few are made for architects (Özmen and Ünay 2007). This study strives to give a small contribution to architects in the form of guidance in designing geometric configurations of earthquake-resistant buildings. This research involved 32 building models with basic and complex geometric forms as the configurations. Simulations were then conducted using ETABS to comprehend the deformation behavior of each model as a result of earthquake loads. After conducting simulations, the strengths and weaknesses of each model were compiled as the guidance for architects to design earthquake-resistant buildings.

Research Methods and Models

The quantitative method with the experimental simulation was used in this research. There were 32 models for simulation, and they were assumed as the representation of the basic geometric forms (models 0 to 3), the subtractive and additive transformation forms (models 04, 11, 13, 18, 21, 23 B, 25), the composition of the basic forms (models 05, 06, 07, 08, 09, 10, 12, 19, 20, 22, 24, 26, 26B, 26C, 27, 27C, 27E), and organic/curved forms (models 14, 15). In addition, the strong earthquake zone ($S_S = 1.5$ and $S_1 = 0.6$), the soft ground site class, and the office buildings were also simulated in this research.

The structural system which was used is the moment resisting frame. The height of the building model was 10 floors except for models 13 to 15, which were only 7 floors. The height between floors was 4 m, except for the column of the first floor in model 16 and

model 17 (6 m). The beam dimension was 0.25×0.4 m, except for model 11 (using beam combination 0.25×0.4 m and 0.25×1.0 m), model 15 (using beam combination 0.3×0.6 m and 0.25×0.5 m), model 26 (using beam combination 0.25×0.4 m and 0.25×0.5 m), and both model 26B and 26C (0.25×0.5 m). The column dimension, moreover, was 0.6×0.6 m, except for model 3 and model 14 (0.6 m in diameter), model 16 (0.65 m in diameter), and several models; namely 26, 26B, 26C, 27, 27C and 27E; that combined column dimension of 0.6×0.6 m and diameter of 0.6 m. The thickness of the floor plate for the simulation was 0.12 m where the concrete quality of the beam/column/floor plate was K-300, the quality of the main reinforcing steel was $F_y = 4000$ Kg / cm², and the quality of stirrup steel was $F_y = 2400$ Kg / cm². The assumption of the dead load, in addition, was 400 Kg / cm² while the assumption of the live load was 250 Kg / cm² (office buildings function).

The aforementioned data were input to ETABS (in which the modal analysis and eccentricity analysis were conducted) and to Simplified Vulnerability Analysis (SVA) for Architectural Design. The results obtained from the modal analyses were Period (T), Shape Mode Translation (U_x , U_y) and Rotation (R_z), Participating Mass Ratio (Sum U_x , Sum U_y) while outputs from the eccentricity analysis were centers of mass and rigidity. The results from SVA analyses, on the other hand, were vertical/horizontal irregularities.

By comparing the fundamental period of the building model (t) and the maximum fundamental period (t_{max}), the structure's stiffness can be seen (Budiono and Supriatna 2011). If $t < t_{max}$ then the structure is stiff and if $t > t_{max}$ then the structure is flexible. The t_{max} is based on the earthquake zones in Indonesia which are categorized as "high".

U_x , U_y , and R_z are used to assess the level of irregularity. Buildings with dominant translation in mode -1 and mode -2 (U_x and U_y) and rotation in mode -3 (R_z) can be categorized as regular (Murty et al. 2012).

Sum U_x and Sum U_y are the sums of the contributions each mode towards -x and -y axes in the modal analysis. To ensure its accuracy, this method relied on the part participating in the total building mass called Participating Mass Ratio (Hanna et al. 2017). According to the latest earthquake regulations, SNI 1726: 2019, the mass participation ratio

must reach 100% (BSN 2019). One of the reasons why the mode calculation of one building model cannot reach 100% is its complexity and/or irregularity. The more complex and/or the more irregular a building is, the more modes needed and the more difficult the calculation mode to reach 100 %

Eccentricity occurs in buildings where the centers of mass and rigidity do not coincide or are not eccentric so that it can cause torsion in the building when an earthquake lateral force occurs (Tjokrodinuljo 1997).

Based on FEMA 451B (FEMA 2007) and Simplified Vulnerability Analysis (SVA) for Architectural Design (Teddy, Hardiman, and Tudjono 2018), there are two criteria of buildings' geometric configurations, regular and irregular. Irregular configurations, particularly, have two categories namely, horizontal structural irregularities and vertical structural irregularities. Horizontal structural irregularities comprises of torsional irregularities, interior angle irregularities, diaphragm discontinuity irregularities, out-of-plane offset irregularities, and non-parallel system irregularities. Vertical structural irregularities, on the other hand, consists of stiffness-related soft story irregularities, weight (mass) irregularities, vertical geometric irregularities, in-plane discontinuity in vertical lateral force-resisting elements, and discontinuity in lateral strength-weak story irregularities.

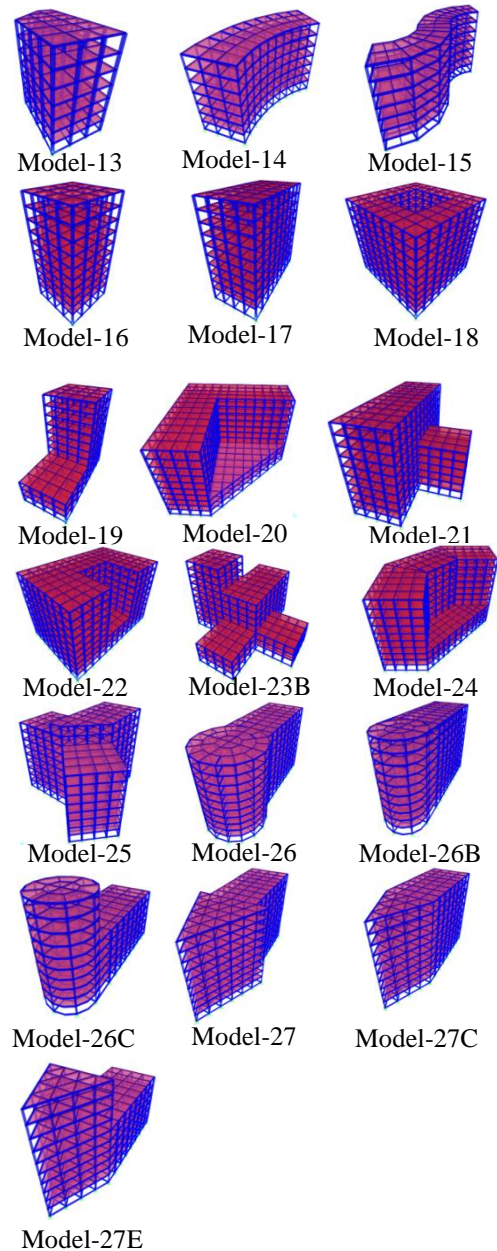
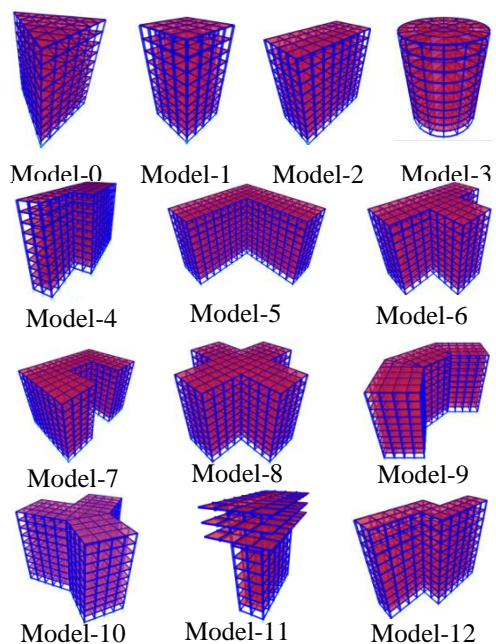


Figure 1. The 32 building models
Source: Analysis

Results and Discussion

Period (T)

From table 1, it can be seen that there are no significant differences between the building's fundamental period (T) and the building's maximum period (T_{max}) except for model -11. This condition means that the other building models are still stiff enough while the model-11 is relatively slender ($H/D=4$) so that it will not be so stiff. Nathan Madutujuh (Madutujuh 2020) proposes the ideal comparison $H/D \leq 2$

that can reduce *over-turning* effects, especially in tall buildings.

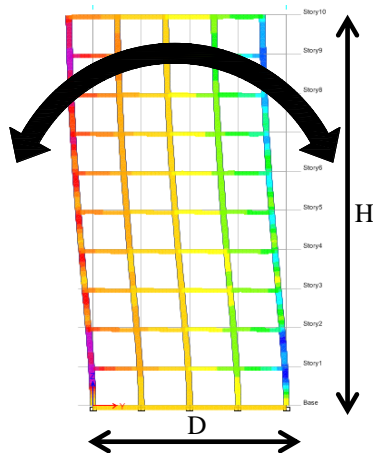


Figure 2. The ideal comparison between height (H) and width (D) of a tall building $H/D \leq 2$ to reduce the possibility of *over-turning* due to an earthquake
Source : (Madutujuh 2020).

Shape Mode Translation (U_x , U_y), Rotation (R_z) and Eccentricity

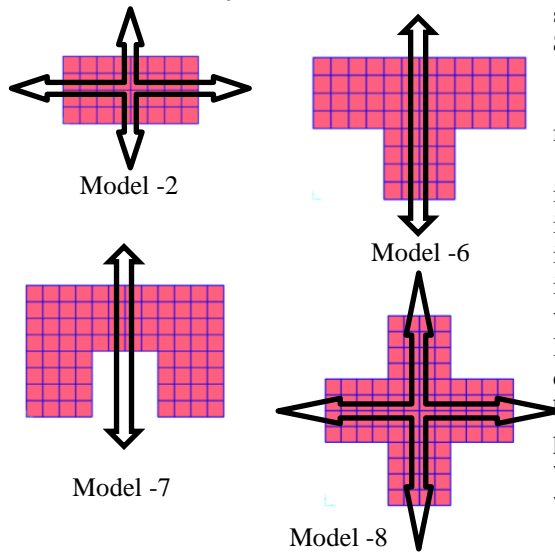


Figure 3. Buildings, with one or two axes of symmetry and have equally high mass composition, still have regular characteristics.
Source: analysis

According to FEMA 451B and SVA for Architectural Design, it is only models -1 and -2 that have regular geometric configuration categories. However, from 10 irregular categories based on FEMA 451B, SNI 1726:2019 only disallows buildings with torsional irregularities, soft story, and weak story. Thus, a building model is categorized as relatively regular if the models -1 and the

model -2 are dominant translation (U_x and U_y), the model-3 is dominant rotation (R_z), the eccentricity is not excessive, and there is no soft story/weak story. Of 32 models, only 16 of them that can be included in the category, namely models -0, 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 18, 22, 26, 27, and 27C. From these 16 models, furthermore, 14 of them are categorized as symmetrical building models with one or two axes (model -0, 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 18, 22, 26, 27 and 27C) and have equally high mass composition. In addition, the other two models categorized as relatively regular are models -4 and -13. These two models are not symmetrically formed by the subtractive transformation, which is not dominant ($\leq 15\%$). Therefore, their deformation behavior is still dominated by their two-axial symmetrical intact mass.

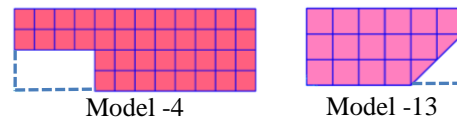


Figure 4. Buildings with subtractive results 10% - 15% in which their intact mass deformation behavior is symmetrical rectangles with two axes.
Source: analysis

From all previously mentioned 32 models, most of them still have irregularities (see table 1) like torsional irregularities, interior angle irregularities, diaphragm discontinuity irregularities, non-parallel system irregularities, stiff-related soft story irregularities, weight (mass) irregularities, and vertical geometric irregularities/setback. Irregularities definitely will cause torsion and concentrations of tension on some parts of buildings (Arnold 2006), but these potential problems can be reduced by using shear walls/core walls and strengthening structures where the concentrations of tension occur.

The Mass Participation Ratio

The number of maximum modes needed to conduct modal analyses of building models is $10 \times$ the floor number (N) (Madutujuh 2020). It is after the analyses have been done that the exact number of modes needed to reach 100% mass participation is known. In addition, the geometric configuration, both vertical and horizontal, can also influence the number of modes. Table 1 and figure 5 shows two 7-floor-building models with relatively simple geometric configurations, model -13 (from the subtractive result) and model -14 (having one-axial symmetrical form), only needs mode 19 and mode 20 to reach 100% mass

participation. Furthermore, to reach a more complex model like model -15 which has non-parallel system irregularities, it needs mode 44.

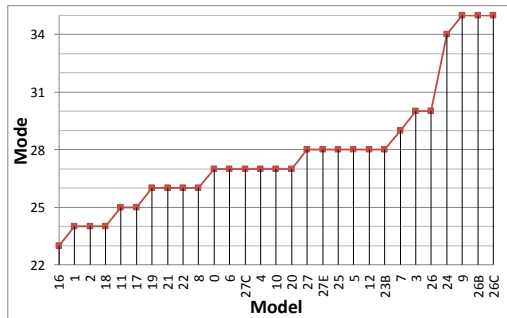


Figure 5. The increasing number of mass participation modes reaching 100 % based on the buildings' irregularity level.
Source: Analysis

For the 10-floor-building model, increasing the number of modes is started by simple models with 23 - 25 modes (models -16, 1, 2, 18, 11, 17). The next levels are firstly dominated by models having two and one axes of symmetry with 26 and 27 modes (models 19, 21, 22, 8, 0, 6, 27C, 10); and then by non-symmetrical models with mode 28 (models 25, 5, 12, 23B). For the last level, models are dominated by non-parallel system irregularities with 29 – 35 modes (model -3, 26, 24, 9, 26B, 26C). The 7-floor-model, model -15, also has non-parallel system irregularities with 44 modes. The number of these modes is even beyond the maximum number of modes for the 10-floor-building. This condition proves that the more irregular a building is, the more difficult the building reaches 100% mass participation, hence not recommended structure.

Guidance

From the geometric configuration analyses described above, the guidance in the form-finding process of architectural design is proposed (Goldsmith 2014), and from this guidance, the buildings' geometric configurations relatively resistant to earthquakes are obtained, namely:

- 1). The comparison between the buildings' height and width

For the moment resisting frame, limit the buildings' height (H) and width (D) by applying the ratio $H/D \leq 2$. If $H/D > 2$, combine it with shear walls and/or core walls.

- 2). The use of buildings having different heights between floors.

The configuration of stiffness irregularities is sudden diminishing of lateral stiffness in one building/soft story. Such condition usually happens in any building's level if the ratio of the column height of the upper level (h) to the column height of the level below (h1) is ≤ 0.8 (FEMA 2007) (Figure 6).

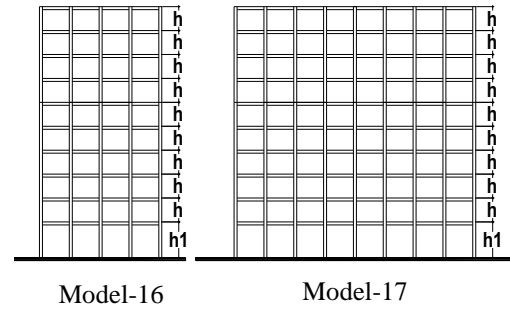


Figure 6. Geometric configuration with the ratio of the upper floors column height to the first floor column height ≤ 0.8 can cause a *soft story*.
Source: Analysis

Avoid the geometric configurations that contain soft story especially in strong earthquake zones because soft story is the major cause of the damaged and collapsed buildings every time a strong earthquake happens in Indonesia (Boen 2006, 2007b, 2007a).

- 3). The use of one or two axes of symmetry and the same height.

Though aesthetically monotonous, the basic or primary forms like triangular tubes, square boxes, rectangular boxes, and cylindrical tubes are the regular forms that offer very effective resistance to earthquakes (Figure 7).

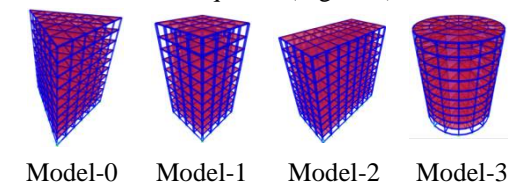


Figure 7. Geometric configuration with basic forms like triangular tube, square box, rectangular box, and cylindrical tube that have good resistance to earthquakes.
Source: Analysis

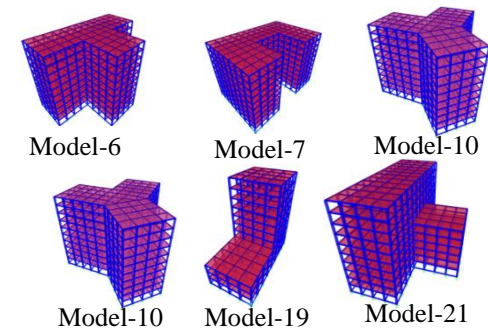


Figure 8. Geometric configurations in one axis of symmetry and in the same height still have relatively regular deformation behavior towards earthquakes.
Source: Analysis

Geometric configurations that have one axis of symmetry and the same heights still have relatively regular deformation behavior towards earthquakes and interesting composition in connection with the aesthetic (Figure 8).

4). The use of additive and subtractive transformation mass

The geometric configuration; created through additive or subtractive processes, $\leq 15\%$ from basic forms; evidently offers relatively effective resistance to earthquakes, and its basic or primary form, as well as its variation, is quite aesthetically interesting (Figure 9).

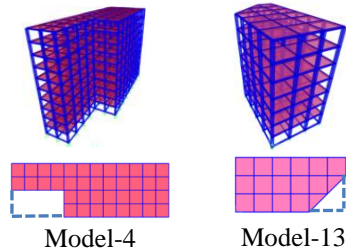


Figure 9. Geometric configurations with subtractive mass forms $\leq 15\%$ are still influenced by the deformation behavior of their intact masses.
Source: Analysis

5). The use of transformation forms and compositions that have different heights.

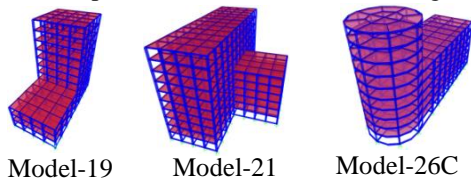


Figure 10. Torsion occurring in geometric configurations with one axis of symmetry mass composition and having different heights can be reduced with shear walls or core walls.
Source: Analysis

Apparently, the occurrence of torsion is more sensitive in the vertical mass composition changes than in the horizontal ones (figure 10). However, if the mass is still symmetrical (1 axis minimum), the behavior deformation can still be anticipated in several ways such as using shear walls or core walls for the higher mass to reduce potential torsion.

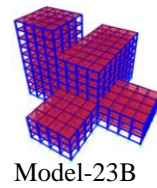


Figure 11. A geometric configuration with random mass composition will also create random deformation behavior.
Source: Analysis

Though it is aesthetically beautiful, building construction having random mass composition or transformation should be avoided since such construction may also cause random deformation behavior which obviously cannot be predicted or anticipated (figure 11).

6). The use of L, T, U, +, and Z forms

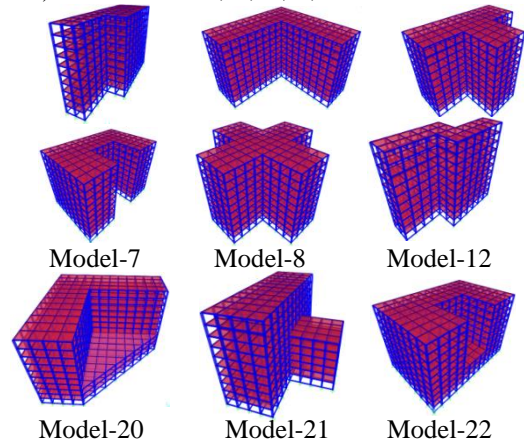


Figure 12. Geometric configurations of L, T, U, +, Z have potential torsional and interior angle irregularities.
Source: Analysis

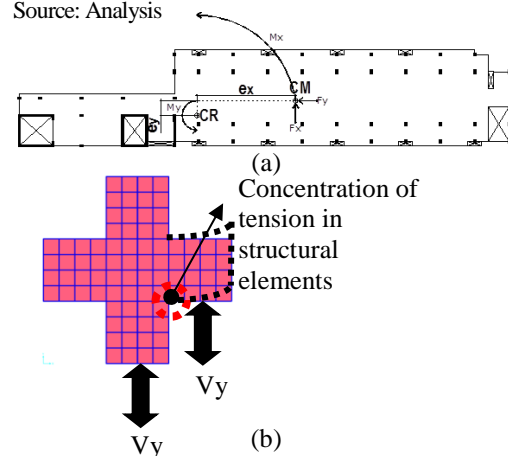


Figure 13. (a). Eccentricity (e_x , e_y) between Center of Mass (CM) and Center of rigidity (CR) that can cause torsion to buildings, (b). The difference between deformation and tension concentration in the + mass form as a result of an earthquake (V_y).
Source: Analysis

The L, T, U, +, and Z forms (figure 12) have potential torsional irregularities (figure 13a) and interior angle irregularities (figure 13b). To minimize the irregularities, some methods can be applied like strengthening areas where the concentration of tension force as a result of earthquakes is likely to occur (figure 14a), reducing potential torsion by installing shear walls at the tips of the wings (figure 14b), or using dilatation to separate the irregular building masses (figure 14c) (adaptation from Duggal, 2007).

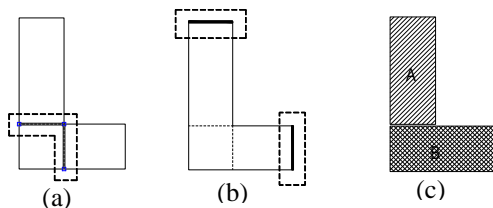
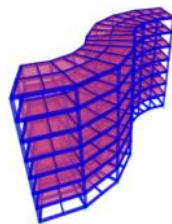


Figure 14. (a). Strengthen the places where the concentration of tension force potentially occurs, (b). Use shear walls to reduce the potential torsion or, (c). Conduct dilatation to separate the building mass.
Source: Analysis

- 7). The use of non-axial asymmetrical mass form



Model-15

Figure 15. The organic forms that have potential torsional and non-parallel system irregularities tend to have random deformation behavior.
Source: Analysis

The organic geometric configurations are non-axial asymmetrical forms that potentially have both torsional irregularities and non-parallel system irregularities. If the configurations are complex, it will be difficult to predict buildings' ability to respond to earthquakes. Therefore, although they are architecturally attractive, the organic forms are not recommended forms in strong earthquake zones because they are less resistant to earthquakes. (Liang LI 2019).

Conclusion

Actually, there is no prohibition on designing any kind of building forms in architecture. However, an architect must

understand the risks of building damage due to earthquakes and the additional costs for anticipating such disasters. Therefore, "simple is secure" is better than "simple is boring" when it is related to designing buildings in earthquake-prone areas.

Acknowledgment

This research is fully funded by the PNPB of Engineering Faculty of Universitas Sriwijaya through the SAINSTEK scheme. The authors would like to express their gratitude to Universitas Sriwijaya for the funding program that has made this important research feasible and effective.

References

- Arnold, Christopher. 2006. "Seismic Issues In Architectural Design." In *Designing For Earthquakes A Manual For Architects - FEMA 454*. California: Engineering Research Institute (EERI).
- Arnold, Christopher, and William W. Stewart. 2000. "Seismic Analysis and Design." In *The Architects Handbook of Professional Practice*, edited by AIA, 13th editi, 1–7. New Jersey: John Wiley & Sons Inc.
- Boen, Teddy. 2006. "The Yogya Earthquake 27 May 2006, Structural Damage Report."
- . 2007a. "Bengkulu & West Sumatra Earthquakes, September 12, 2007, Structural Damage Report."
- . 2007b. "West Sumatra Earthquake, 6 March 2007, Structural Damage Report." In *Konstruksi Tahan Gempa Indonesia*, edited by HAKI, 1–30. Jakarta: HAKI.
- BSN. 2019. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Dan Non Gedung SNI 1726: 2019*. Jakarta: Standar Nasional Indonesia.
- Budiono, Bambang, and Lucky Supriatna. 2011. *Studi Komparasi Desain Bangunan Tahan Gempa Dengan Menggunakan SNI 03-1726-2002 Dan RSNI 03-1726-2012*. Bandung: Penerbit ITB.
- Duggal, Shashikant K. 2007. *Earthquake Resistant Design of Structures*. Oxford university press New Delhi.
- FEMA. 2007. *NEHRP Recommended Provisions for New Buildings and Other Structures: Training and Instructional Materials-FEMA 451B*. Washington DC: Federal Emergency Management Agency (FEMA).

- Goldsmith, Nicholas S. 2014. "Shape Finding or Form Finding?" In *Proceedings of IASS Annual Symposia*, 2014:1–10.
- Hanna, Nagy.F., Ali.M. Elrafei, Magdy.M.M Genidi, and Tamer M S Elsaied. 2017. "Efficient Mass Participation Ratio of Building with Basement." *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering* 14 (1): 59–74. <https://doi.org/10.9790/1684-1401045974>.
- Hoedajanto, Dradjat, and Muhammad Riyansyah. 2015. "Bangunan Tahan Gempa Dan Tanggung Jawab Legal Praktisi Konstruksi Indonesia." In *Challenges in the Future*, edited by Davy Sukamta and Et.al., 1–10. Jakarta: HAKI.
- Kementrian PU. 2010. "Peta Hazard Gempa Indonesia 2010 Sebagai Acuan Dasar Perencanaan Dan Perancangan Infrastruktur Tahan Gempa." *Jakarta: Kementerian PUPR*.
- Liang LI. 2019. "Research on the Function of Architectural Design Based on Seismic Observation Records in Seismic Design of Buildings." *Academic Journal of Environment & Earth Science* 1 (1).
- Madutujuh, Nathan. 2020. "Perencanaan Gedung Bertingkat Dengan Program SANSIRO." Webinar HAKI. Jakarta.
- Murty, C. V. R., Rupen Goswami, A. R. Vijayanarayanan, and Vipul V. Mehta. 2012. *Some Concepts in Earthquake Behaviour of Buildings*. Gujarat: Gujarat State Disaster Management Authority Government of Gujarat.
- Özmen, Cengiz, and Ali Ihsan Ünay. 2007. "Commonly Encountered Seismic Design Faults due to the Architectural Design of Residential Buildings in Turkey." *Building and Environment* 42 (3): 1406–16. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.09.029>.
- PuSGen, P G N. 2017. *Peta Sumber Dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Bandung: Puskim.
- Teddy, Livian, G Hardiman, and S Tudjono. 2018. "Simplified Vulnerability Analysis (SVA) Preliminary Design of the Frame Structure in the Architectural Design Process." *Indian Journal of Science and Technology* 11 (May): 1–13. <https://doi.org/10.17485/ijst/2018/v11i20/121768>.
- Tjokrodinuljo, Kardiyono. 1997. *Teknik Gempa*. Yogyakarta: Penerbit Nafiri.