

1

PENDAHULUAN

Gempa bumi merupakan fenomena alam yang sangat berbahaya bagi lingkungan alam dan lingkungan buatan manusia. Gempa bumi dapat mengakibatkan terjadinya fenomena alam lain seperti *liquefaction*, tsunami dan tanah longsor. Sedangkan terhadap lingkungan buatan, gempa bumi mengakibatkan banyak sekali bangunan yang runtuh termasuk bangunan gedung, sarana dan prasarana, seperti jalan, jembatan, pembangkit listrik, dan sebagainya. Getaran gempa bumi tidak mengakibatkan kematian pada manusia, tapi keruntuhan bangunan atau fenomena alam sampingannya yang banyak menewaskan manusia.

Gempa bumi Lombok yang terjadi secara beruntun pada 29 Juli, 5 Agustus, 19 Agustus 2018 mengakibatkan terjadi *liquefaction* yang dampaknya sangat luar biasa, banyak rumah yang tenggelam ke dalam tanah. Sebanyak 564 orang meninggal dunia, 1.584 korban luka-luka, dan berbagai bangunan seperti rumah tinggal, infrastruktur, sekolah, fasilitas kesehatan, rumah ibadat dan fasilitas perekonomian mengalami kerusakan/keruntuhan (<https://bisnis.tempo.co/read/1125319/ini-data-lengkap-kerusakan-gempa-lombok-versi-bnpb/full&view=ok>). Tsunami yang terjadi di Aceh 26 Desember 2004 menyebabkan 167.000 jiwa meninggal maupun hilang, sekitar 500.000 orang kehilangan tempat tinggal (<https://nasional.kompas.com/read/2019/12/26/10570861/5-fakta-gempa-dan-tsunami-aceh->

tragedi-yang-terjadi-15-tahun-lalu?page=all). Tsunami yang terjadi pada 11 Maret 2011 di Jepang menghantam pembangkit listrik tenaga nuklir Fukushima Daiichi mengakibatkan banyak kerusakan, salah satu kerusakan yang sangat berbahaya adalah kebocoran bangunan penyimpan reaktor nuklir yang mengakibatkan pencemaran lingkungan dengan radio aktif, sehingga pembangkit tersebut harus dinonaktifkan. Kejadian-kejadian tersebut dan sangat banyak kejadian lain menunjukkan betapa berbahayanya gempa bumi bagi keselamatan jiwa manusia, serta sangat merugikan dari faktor sosial dan ekonomi. Untuk itulah manusia berusaha menemukan teknologi yang dapat mengamankan diri maupun properti terhadap gempa bumi, bahkan hal tersebut telah dilakukan di masa lalu oleh nenek moyang kita. Teknologi tersebut sekarang dikenal sebagai teknologi gempa.

Pada awalnya teknologi gempa dipandang hanya menangani bidang keteknikan saja. Teknologi gempa telah dikenalkan di Eropa sejak akhir abad ke-19. Pada saat itu peraturan dalam desain struktur hanya menetapkan sekian persen dari beban mati diperhitungkan sebagai beban lateral (Hu *et al.*, 1996). Tahun 1914 di Jepang dikembangkan metode koefisien gempa untuk merancang struktur kayu, batu, beton dan baja terhadap gempa. Kemudian rentang pengetahuan teknologi gempa menjadi luas mencakup geofisik, geologi, seismologi, teori getaran, struktur material dinamik, rekayasa struktur dan teknologi konstruksi. Goal desain struktur adalah mendesain dan membangun struktur yang tahan gempa dan menghindari kehilangan nyawa (Okamoto, 1973).

Menurut Housner (1983), aspek nonteknis dalam teknologi gempa sama penting dengan aspek teknis untuk mempertimbangkan efek berbahaya dari gempa bumi, termasuk isu keselamatan jiwa, konsekuensi terhadap aspek sosial, ekonomi dan konsekuensi lain. Menurut Clough (1992) teknologi gempa mencakup aktivitas yang sangat luas seperti sosial, ekonomi, politik, sains dan teknik dan semua aspek berkontribusi pada tujuan untuk pencegahan (*prevent*) kerusakan yang disebabkan oleh gempa bumi. Menurut Bertero (1992) teknologi

gempa adalah cabang dari ilmu rekayasa yang mempunyai semangat untuk mengurangi, dan idealnya meniadakan bahaya gempa bumi.

Bertero (2004) meringkas cakupan teknologi gempa, yaitu meliputi usaha multidisiplin dari banyak cabang sains dan rekayasa dengan tujuan untuk mengontrol risiko gempa bumi terhadap aspek sosial dan ekonomi sampai taraf yang dapat diterima. Untuk mencapai hal tersebut dilakukan berbagai riset yang dikaitkan dengan pengembangan teknologi yang memungkinkan, dan penerapan pengetahuan ke dalam praktik.

Lingkup desain arsitek/mahasiswa arsitektur mencakup tahap tanggap darurat dan preventif. Dalam tahap tanggap darurat, para arsitek/mahasiswa arsitektur dapat berperan untuk membuat desain hunian/bangunan sementara untuk korban gempa bumi, seperti yang telah dikerjakan oleh Shigeru Ban yang terkenal dengan hunian sementara dari tabung kertas untuk para korban gempa di Kobe, Turki dan negara lain.

Arsitek mentransformasikan konsep abstrak menjadi desain nyata, dan mengintegrasikan berbagai aspek yang bersifat multidisiplin. Dalam kaitan dengan bencana gempa bumi, arsitek perlu menyadari bahwa desain bangunan yang dibuatnya berada dalam lingkup “preventif” untuk meminimalkan korban jiwa dan kerusakan bangunan. Oleh karena itu, arsitek perlu berkolaborasi dengan beberapa *expert* di bidang-bidang yang terkait. Salah satu bidang yang menjadi fokus buku ini adalah bidang teknik sipil. Suatu kolaborasi dapat berhasil dengan baik apabila setiap pihak memahami dengan baik masalah yang akan diselesaikan. Buku ini ditulis untuk memberikan pemahaman kepada para arsitek/mahasiswa arsitektur tentang beberapa pemahaman teknis yang berhubungan dengan teknologi gempa dengan harapan agar arsitek/mahasiswa arsitektur dapat bekerja sama dengan perancang struktur secara optimal, selain itu agar mereka sadar bahwa teknologi gempa dapat memperkaya tampilan/ekspresi arsitektur bangunan.

Buku ini terdiri dari 7 bab, yaitu:

- Bab 1. Pendahuluan.
- Bab 2. Membahas tentang gempa bumi dan dampaknya, di dalamnya diuraikan luasnya dampak gempa bumi terhadap lingkungan alam dan lingkungan buatan/infrastruktur yang dapat berdampak pada segi sosial, ekonomi dan keselamatan jiwa, tentang dasar-dasar kegempaan dan respons bangunan terhadap gempa bumi. Dasar-dasar kegempaan diuraikan dalam bab ini untuk memberi pemahaman mengapa getaran gempa memberi dampak destruktif pada bangunan dan bagaimana respons bangunan terhadap getaran gempa bumi.
- Bab 3. Membahas tentang konfigurasi bangunan terhadap gempa bumi dan penyelesaiannya. Dalam bab ini diuraikan bahwa konfigurasi bangunan tidak hanya ditinjau dari bentuk bangunan saja, tapi juga mencakup penataan elemen-elemen struktural dan elemen-elemen nonstruktural. Ada dua tipe konfigurasi, yaitu beraturan dan tidak beraturan. Masing-masing tipe konfigurasi memberi respons yang berbeda terhadap getaran gempa bumi, konfigurasi tidak beraturan memberikan respons yang kompleks yang dampaknya menambah gaya-gaya dalam struktur bangunan.
- Bab 4. Membahas tentang dasar-dasar perancangan struktur bangunan terhadap gempa bumi dan teknologinya, yaitu tentang desain struktur bangunan terhadap gempa bumi, yang sebenarnya murni bidangnya teknik sipil, namun pemahaman dasarnya diperlukan oleh arsitek/mahasiswa arsitektur untuk dapat memahami ide-ide sains dan teknologinya. Teknologi tersebut mencakup teknologi konvensional dan teknologi inovatif. Apabila dipahami secara baik, persyaratan-persyaratan konstruksi sambungan dalam teknologi konvensional dapat menjadi pemicu ide detail konstruksi yang struktural dan sekaligus arsitektural, sedangkan teknologi inovatif menampilkan komponen-komponen peredam yang juga dapat berdampak pada penggalan ide.

- Bab 5. Membahas tentang teknologi gempa tradisional, dengan tujuan untuk belajar dari nenek moyang, tentang bagaimana teknologi konstruksi bangunan yang mereka hasilkan ternyata dapat berdiri dengan kokoh sampai dengan saat ini setelah berkali-kali dilanda gempa bumi. Dapat dipelajari konstruksi yang mereka ciptakan ternyata konsepnya serupa dengan teknologi masa kini namun dipecahkan dengan sederhana dan kenyataannya efektif meredam getaran gempa.
- Bab 6. Membahas tentang retrofit seismik, bab ini berisi tentang perkuatan bangunan sebagai tindakan preventif terhadap gempa bumi.
- Bab 7. Membahas tentang teknologi gempa dalam arsitektur. Dalam bab ini dibahas bagaimana arsitek dapat berkreasi dengan beberapa batasan atau tuntutan penyelesaian berkaitan dengan teknologi gempa. Pembahasannya lebih banyak menyertakan contoh-contoh daripada teori.

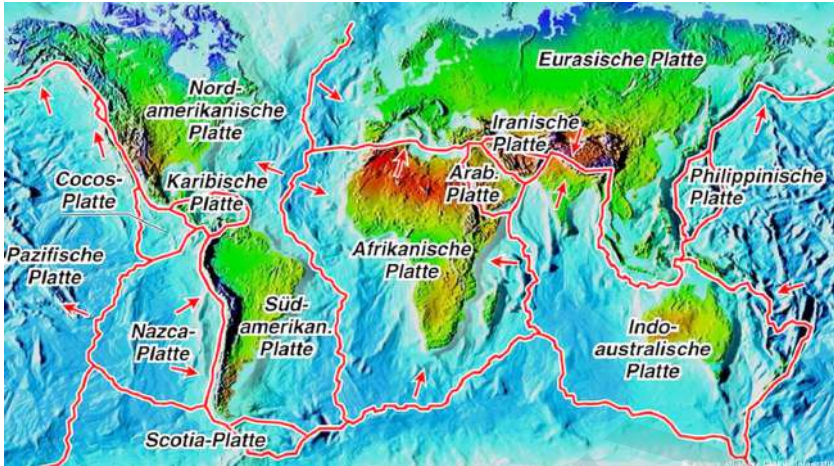
DUMMY

2

GEMPA BUMI DAN DAMPAKNYA

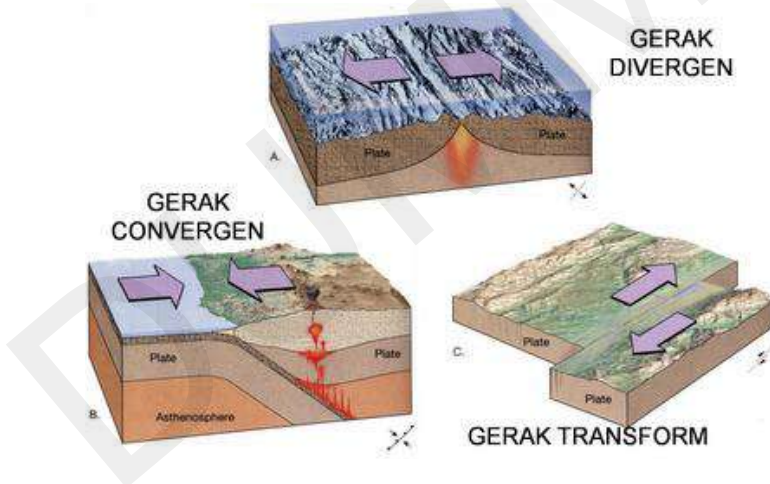
A. Terjadinya Gempa Bumi

Gempa bumi adalah getaran yang terjadi di permukaan bumi akibat pelepasan energi dari dalam bumi secara tiba-tiba yang menciptakan gelombang seismik. Lapisan terluar bumi adalah litosfer (kulit bumi) yang terdiri dari sekitar tujuh lempeng, lempeng-lempeng tektonik (*tectonic plates*) dan banyak lempeng-lempeng yang lebih kecil (Gambar 1). Lempeng-lempeng litosfer ini mengapung di atas astenosfer yang terdiri dari material bersifat liat. Mereka bergerak relatif satu dengan yang lainnya dan di batas-batas lempeng terjadi perbedaan pergerakan, baik divergen (menjauh), konvergen (bertumbukan), ataupun transform (menyamping) (Gambar 2). Gempa bumi tektonik, aktivitas vulkanik, pembentukan gunung, dan pembentukan palung samudera umumnya terjadi di daerah sepanjang pertemuan antar lempeng. Pergerakan lateral lempeng umumnya berkecepatan sekitar 2-10 cm per tahun.



Gambar 1. Peta Lempeng Tektonik

<http://www.dw.com/id/mengenal-gerakan-lempeng-tekonik/a-37394092>, diunduh 11/07/2019



Gambar 2. Gerak Relatif di Garis Patahan

<http://thekingslau.blogspot.com/2015/12/macam-macam-pergerakan-lempeng-bumi.html>, diunduh 11/07/2019

Pertemuan antara lempeng-lempeng tektonik membentuk “garis” patahan pada kulit bumi, dan material (batuan) pada garis patahan tersebut lebih lunak dibandingkan batuan lempeng. Perbedaan

pergerakan mengakibatkan terjadinya energi potensial pada daerah patahan, yang semakin lama semakin besar. Apabila akumulasi energi potensial tersebut sedemikian besarnya sehingga tidak mampu ditahan oleh material pada daerah patahan tersebut, material patahan akan runtuh dan energi potensial lepas menjadi getaran yang menyebar ke semua arah dan merambat ke permukaan bumi menghasilkan gempa bumi. Semakin kuat material patahan, semakin besar pula energi potensial yang terkekang dan mengakibatkan energi gempa juga semakin besar.

Pusat pelepasan energi gempa adalah pusat gempa atau hiposenter (*hypocentre*). Bila dari hiposenter ditarik garis tegak lurus dengan permukaan tanah, titik pertemuan garis tersebut dengan permukaan tanah disebut episenter (*epicentre*). Apabila pusat sebuah gempa besar berada di laut dan dekat dengan pantai, gempa tersebut berpotensi mengakibatkan gelombang tsunami.

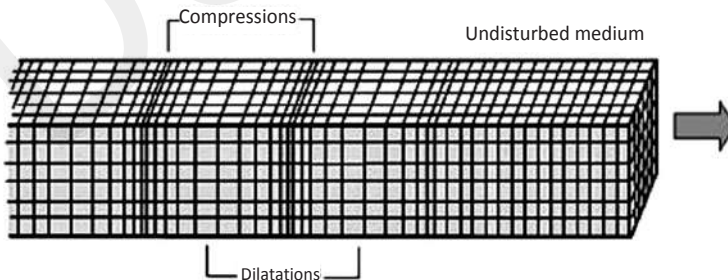
Besarnya energi gempa diukur dengan skala Richter yang merupakan skala magnitudo (M). Skala yang mengukur intensitas lokal atau kekuatan getaran di tempat yang ditinjau adalah skala Modified Mercalli Intensity (MMI). Skala MMI disusun dalam 12 tingkatan, yaitu: I hampir tidak terasa sampai dengan XII kerusakan total (lampiran 2). Untuk keperluan perancangan, dilakukan rekaman riwayat waktu (*time history*) dari goncangan tanah dengan menggunakan *accelerogram* untuk mengukur intensitas lokal. Yang dihasilkan oleh rekaman adalah: perpindahan (*displacement*) dalam waktu, kecepatan dalam waktu dan percepatan dalam waktu yang merupakan parameter perancangan yang terukur.

Besarnya energi gempa bumi (M) diklasifikasikan berdasarkan waktu ulang kejadian gempa (*return period*), yaitu: gempa besar dengan waktu ulang sangat panjang, gempa sedang dengan waktu ulang menengah, dan gempa kecil dengan waktu ulang pendek. Semakin panjang waktu ulang gempa, semakin besar magnitudo gempa (M) yang terjadi.

B. Tipe-tipe Getaran Gempa

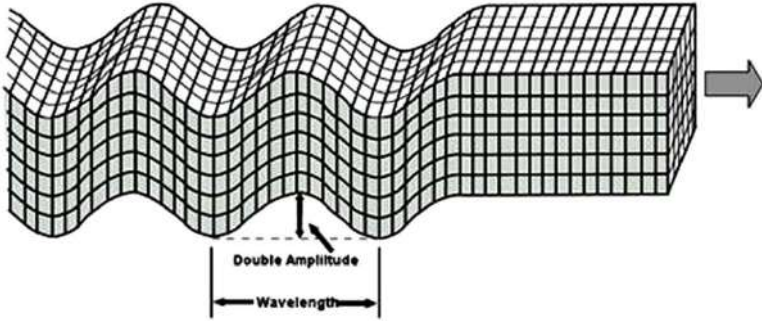
Getaran gempa merambat pada material tanah dengan bentuk gelombang yang berbeda-beda. Ada empat tipe gelombang gempa, yaitu sebagai berikut.

1. Gelombang primer (P wave), bergerak paling cepat dan paling awal dengan kecepatan sekitar 8 km/detik. Gelombang ini bergerak secara longitudinal dengan menekan dan menarik material batuan searah dengan arah pergerakannya (Gambar 3a).
2. Gelombang sekunder (S wave), bergerak menggeser material batuan ke samping kiri dan kanan secara transversal dalam bentuk gelombang ke samping (Gambar 3b).
3. *Love wave*, merupakan gelombang permukaan yang bergerak pada permukaan batuan menggeser material batuan ke samping kiri dan kanan secara transversal dalam bentuk patahan-patahan (Gambar 3c).
4. *Rayleigh wave*, juga merupakan gelombang permukaan yang bergerak dengan kecepatan paling rendah pada permukaan batuan, bagian atas gelombang menggulung material batuan sehingga terjadi gerakan naik-turun pada batuan yang dilewati (Gambar 3d). Gelombang Rayleigh ini merupakan gelombang yang paling merusak.



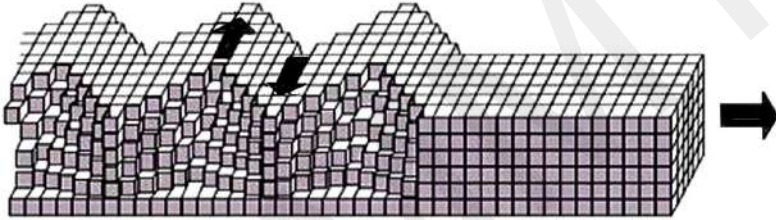
Gambar 3a. Gelombang Primer (P Wave)

<http://koboijonggol.blogspot.co.id/2011/11/gelombang-gempa-seismic-wave.html>,
diunduh 11/07/2019



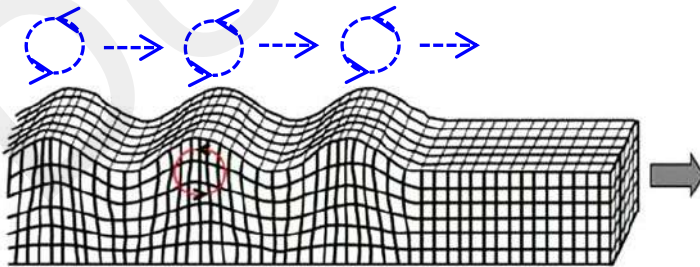
Gambar 3b. Gelombang Sekunder (S Wave)

(<http://koboijonggol.blogspot.co.id/2011/11/gelombang-gempa-seismic-wave.html>,
diunduh 11/07/2019)



Gambar 3c. Love Wave

<http://koboijonggol.blogspot.co.id/2011/11/gelombang-gempa-seismic-wave.html>,
diunduh 11/07/2019



Gambar 3d. Rayleigh Wave

<http://koboijonggol.blogspot.co.id/2011/11/gelombang-gempa-seismic-wave.html>,
diunduh 11/07/2019

C. Pengukuran Pergerakan Tanah

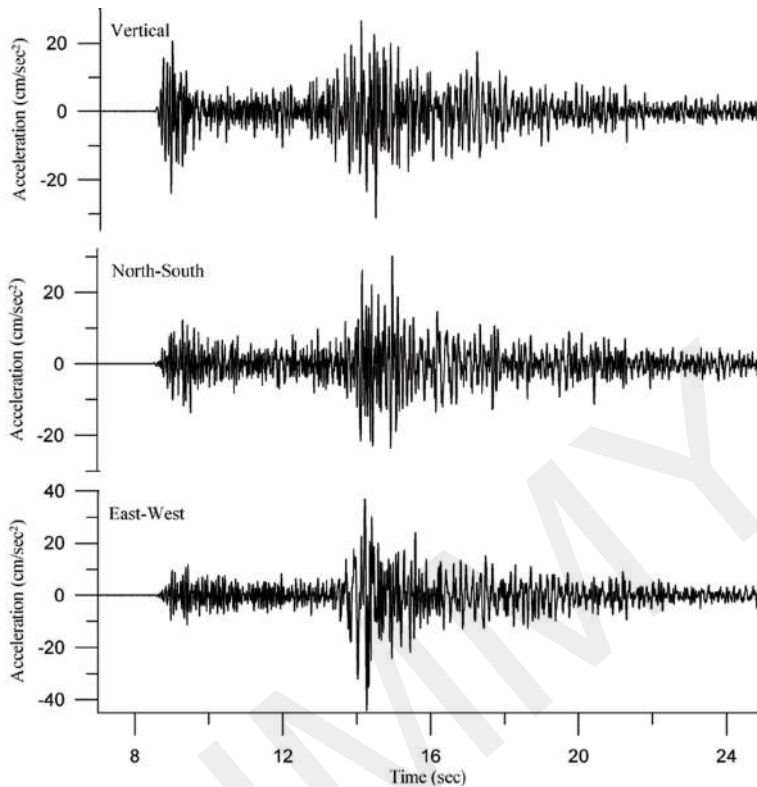
Besar kecilnya amplitudo, kecepatan, dan frekuensi getaran gempa dipengaruhi oleh jenis batuan atau tanah yang dilewati. Sebagai contoh, amplifikasi getaran yang melewati tanah endapan (*alluvial*) atau lumpur (*mud*) di San Francisco Bay, masing-masing sekitar 4 sampai 9 kali lebih besar dibanding ketika melewati batuan granit (Arnold, 1982). Gerakan tanah akibat gempa yang dominan adalah pergerakan horizontal, namun pergerakan vertikal tidak selalu diabaikan, ada fenomena gempa tertentu yang getaran vertikalnya juga signifikan, dan ada juga jenis sistem struktur tertentu yang rentan terhadap getaran vertikal.

Alat untuk mengukur kekuatan gempa adalah seismograf (*seismograph*). Seismograf yang dipakai untuk mengukur pergerakan yang kuat adalah akselerometer (*accelerometers*) atau akselerograf (*accelerograph*) yang didesain untuk merekam getaran gempa di dekat sumber gempa, sedangkan hasil rekamannya disebut akselerogram (*accelerogram*). Hasil rekaman tersebut berbentuk garis coret-coret (Gambar 4), amplitudo (mm) setiap puncak garis coretan tersebut dibaca sebagai besarnya percepatan di titik yang ditinjau, cara membaca untuk grafik kecepatan atau perpindahan adalah sama.



Gambar 4a. Contoh Alat Seismograf

http://asset.indosport.com/article/image/213103/137247_620-34.jpg?w=750&h=428,
diunduh Juli 2019



Gambar 4b. Contoh Rekaman Percepatan Tanah (Akselerogram)
Gempa Kachchh, Wilayah Gujarat 9 March 2008

https://www.researchgate.net/figure/250075360_fig5_Figure-7-A-sample-strong-motion-accelerograph-record-of-an-mb-50-earthquake-from, diunduh Juli 2019

Satuan percepatan adalah gals (g) atau cm/det^2 . Besarnya percepatan tanah yang mulai dapat dirasakan oleh manusia adalah 0,001 g, percepatan di antara 0,1 sampai 0,2 menyebabkan beberapa orang sukar menapakkan kaki dan merasa mual. Percepatan tanah 0,1 g cukup dapat merusakkan konstruksi yang lemah, sedangkan percepatan sebesar 0,5 g termasuk yang sangat besar, dan percepatan 1 g dapat digambarkan sebagai bangunan yang menerima gaya gempa (lateral) sebesar berat seluruh bangunan tersebut, kurang lebih dapat diilustrasikan seperti bangunan yang diletakkan secara horizontal seperti kantilever (Arnold, 1982).

Besarnya kekuatan gempa salah satunya dinyatakan dengan skala Richter (SR). Skala Richter ditemukan oleh Profesor Charles Richter dari California Institute of Technology pada tahun 1935.

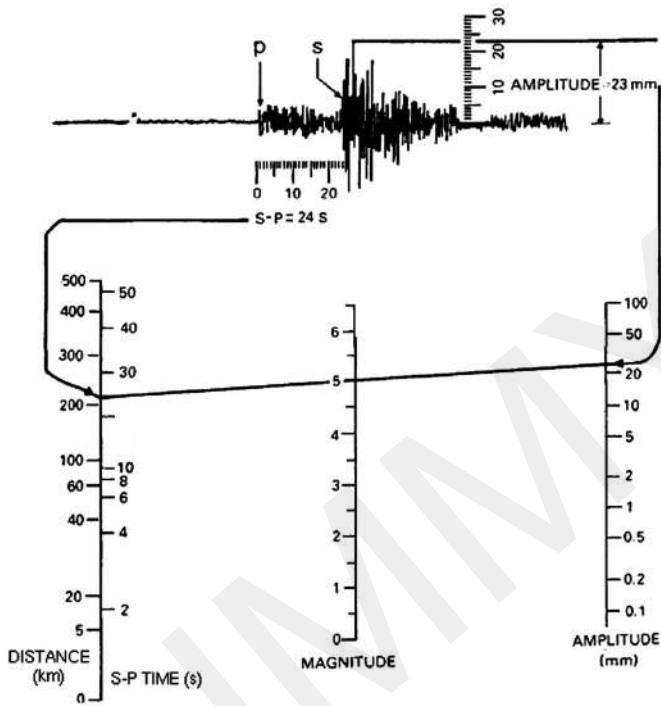
Cara menginterpretasikan grafik skala Richter (Gambar 5):

- Baca perbedaan waktu antara datangnya gelombang P dengan datangnya gelombang S. Pada contoh Gambar 4 tercatat perbedaan waktunya adalah 24 detik. Beri tanda 24 *second* pada skala selisih waktu S-P (titik E). Jarak seismometer terhadap episenter ada di titik yang sama dengan selisih waktu S-P, yaitu 210 km.
- Amplitudo maksimal adalah jarak terbesar yang tercatat dari garis dasar seismogram dari gempa. Pada contoh seismogram di bawah, tercatat amplitudo maksimalnya adalah 23 mm. Beri tanda 23 mm di skala amplitudo (titik F).
- Perpotongan garis lurus EF dengan skala magnitudo di titik D adalah angka magnitudo maksimal, yaitu M 5.

Skala Richter atau SR adalah skala logaritmik dengan basis 10 dari amplitudo maksimum. Kekuatan gempa dengan skala gempa 6 besarnya 10 kali kekuatan gempa skala gempa 5 dan seterusnya.

Menurut para ahli gempa, skala Richter mempunyai keterbatasan karena hanya mengukur Magnitudo Lokal (ML) yang terbatas untuk mengukur kekuatan gempa yang berjarak kurang dari 600 km dan gempa-gempa kecil. Saat ini ada beberapa skala lain selain untuk mengukur kekuatan gempa atau magnitudo gempa, yaitu: Magnitudo Badan (Mb) yang pengukurannya memanfaatkan gelombang primer; Magnitudo Permukaan (Ms) menggunakan simpangan/amplitudo gelombang permukaan (gelombang Rayleigh); dan Magnitudo Momen (Mw) yang pertama kali diperkenalkan pada tahun 1979 oleh Hiroo Kanamori dan Tom Hanks dan paling banyak digunakan saat ini. Magnitudo Momen mengukur “seismic moment” atau momen seismik yang menunjukkan seberapa besar energi yang dilepaskan untuk menghasilkan gempa bumi berdasarkan luas rekahan, panjang slip dan sifat rigiditas (kekakuan) batuan lempeng tektonik. Saat ini, hampir semua stasiun pengamat gempa bumi yang ada di seluruh dunia

menggunakan skala ini (<http://www.ibnurussydy.com/mengenal-skala-magnitudo-gempa-bumi/>, diunduh Juli 2020).



Keterangan:

- a = amplitudo maksimal hasil rekaman seismometer
- b = jarak seismometer terhadap episenter (atau selisih antara waktu datangnya gelombang P dan gelombang S)
- c = garis lurus
- D = baca hasil magnitudo di gambar skala yang di tengah

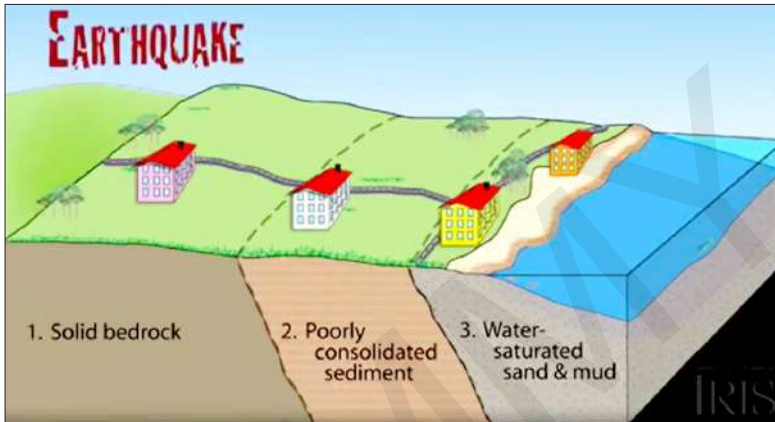
Gambar 5. Grafik Hasil Pengukuran Skala Richter

<https://sumberbelajar.belajar.kemdikbud.go.id/sumberbelajar/tampil/Gempa-Tektonik-2006/konten3.html>, diunduh Februari 2020

D. Kerusakan Struktur Tanah Akibat Getaran Gempa

Getaran gempa bisa merusak kestabilan tanah, salah satu yang berbahaya adalah *liquefaction*. *Liquefaction* adalah kondisi tanah yang ketika digetarkan berubah dari padat menjadi cair (*liquid*). Kondisi

tersebut terjadi pada tanah granular seperti pasir yang letaknya berbatasan dengan sungai, danau, dan sebagainya. Ketika terjadi getaran gempa, tanah/pasir yang bercampur dengan air terurai, kemudian air tanah naik dan keluar ke permukaan tanah sehingga tanah kehilangan daya dukungnya dan bangunan di atasnya melesak ke dalam tanah dan terguling/roboh.



Gambar 6a. Tiga Kondisi Tanah yang Berbeda

https://www.youtube.com/watch?v=536xSZ_XkSs, diunduh 11/07/2019



Gambar 6b. Keruntuhan Karena *Liquefaction* Bangunan di Tanah Paling Tepi (*)

https://www.youtube.com/watch?v=536xSZ_XkSs, diunduh 11/07/2019

Gambar 6a menunjukkan kondisi tanah yang berada di daerah perbatasan tanah dengan air (sungai/danau/dll.). Gambar 6b menunjukkan keruntuhan yang berbeda-beda antara keruntuhan disebabkan oleh kegagalan struktur bangunan dan keruntuhan yang disebabkan oleh *liquefaction*. Keruntuhan bangunan karena kegagalan struktur merusak komponen-komponen struktur maupun nonstruktural bisa sampai runtuh, sedangkan keruntuhan karena *liquefaction* (tanda * dalam Gambar 6b) mengakibatkan fondasi dan seluruh bangunan melesak ke dalam tanah dan “terguling” seluruhnya, dan kalau strukturnya cukup kuat dan kaku, bangunan bisa “terguling” tapi kondisinya relatif masih utuh dengan kerusakan terbatas seperti bangunan-bangunan di Prefektur Niigata dalam Gambar 7a yang “terguling” karena *liquefaction* pada saat gempa tahun 1964. *Liquefaction* yang terjadi di Palu dan Petobo tahun 2018 mengakibatkan bangunan-bangunan terbenam ke dalam tanah, ada yang terbenam sebagian ada yang terbenam sampai seluruh bangunan (Gambar 7b).



Gambar 7a. Bangunan-bangunan Runtuh Karena Fenomena *Liquefaction* di Niigata Prefecture Jepang

http://img.hani.co.kr/imgdb/resize/2016/0920/147427439746_20160920.JPG,
diunduh 11/07/2019



Gambar 7b. Bangunan-bangunan Tenggelam Karena Fenomena *Liquefaction* Tahun 2018 di Palu, Indonesia

<https://www.tribunnews.com/travel/2018/10/04/mengenal-likuifaksi-fenomena-tanah-bergerak-di-kota-palu-dan-cara-mengantisipasinya>, diunduh Juli 2022

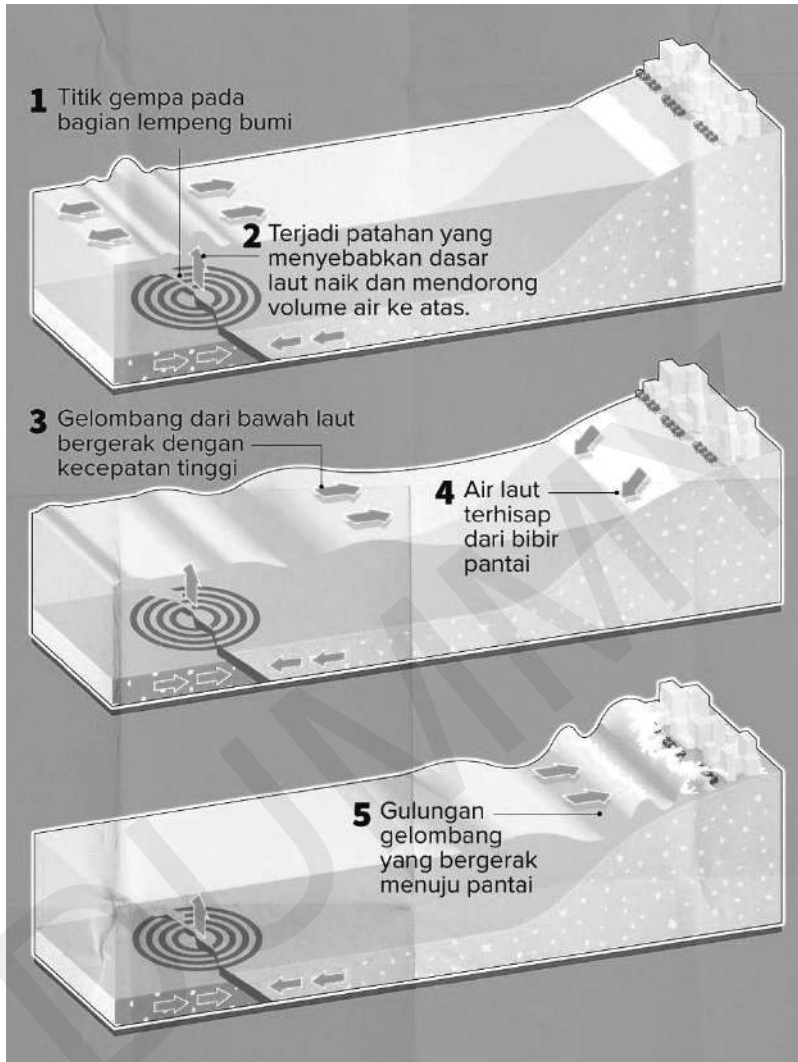
E. Tsunami

Tsunami adalah gelombang pada laut atau danau yang luas, yang terjadi karena perpindahan sejumlah besar air yang bergerak dari dasar sampai permukaan air (seluruh kolom air) dengan kecepatan yang tinggi menuju ke segala arah. Ketinggian gelombang di tengah laut tidak terlalu tinggi hanya sekitar 1 meter, namun panjang gelombangnya sangat panjang bisa dalam bilangan km. Kecepatan gelombang tsunami sangat tinggi sekitar 600 sampai 1.000 km/jam, amat besar dibandingkan ombak biasa (sekitar 50 km/jam). Ketika mendekati pantai, kecepatan gelombang menurun hanya sekitar 35 hingga 50 km/jam, namun tingginya gelombang akan semakin naik, bisa mencapai

20 meter. Dengan ketinggian sedemikian besar, gelombang tsunami dapat masuk dengan kecepatan tinggi ke daratan sampai jarak puluhan kilometer (<https://ilmugeografi.com/bencana-alam/bencana-tsunami>). Naiknya ketinggian gelombang tsunami di pantai terjadi karena seluruh kolom air dari dasar sampai permukaan air bergerak maju, maka ketika kedalaman pantai semakin dangkal gelombang terhambat dan naik sangat tinggi ketika sampai di pantai (Gambar 8a, 8b).

Ada beberapa pemicu terjadinya perpindahan air tersebut, yaitu gempa bumi bawah laut, tanah pantai longsor, ledakan gunung berapi dasar laut, ledakan nuklir bawah laut, meteorit jatuh ke laut, dan sebagainya. Sekitar 90% gempa bumi bawah laut merupakan penyebab terjadinya tsunami. Gempa bumi yang berpotensi mengakibatkan terjadinya tsunami yang adalah gempa bumi bawah laut yang pusatnya terletak di kedalaman 0 hingga 30 km di bawah permukaan laut. Semakin dangkal pusat gempa maka akan semakin besar peluang munculnya tsunami hal ini disebabkan oleh getaran yang dihasilkan akan semakin kuat. Selain itu gempa besar dengan kekuatan di atas 6.5 SR juga menjadi pemicu, karena dengan kekuatan sebesar itu sudah mampu memengaruhi gelombang laut (<https://ilmugeografi.com/bencana-alam/penyebab-tsunami>).

Pusat gempa yang menyebabkan tsunami Samudra Hindia 26 Desember 2004 terletak 160 km di sebelah utara Pulau Simeulue, lepas pantai barat Sumatra Utara, pada kedalaman 30 km (19 mil) di bawah permukaan laut, dengan kekuatan Magnitudo Momen M_w 9,1–9,3. Gempa tersebut diikuti tsunami secara bersamaan mengguncang Bangladesh, India, Malaysia, Myanmar, Thailand, Singapura, dan Maladewa. (https://id.wikipedia.org/wiki/Gempa_bumi_dan_tsunami_Samudra_Hindia_2004).



Gambar 8a. Skema Terjadinya Tsunami

https://www.cnnindonesia.com/teknologi/20181001123917-202-334598/infografis-proses-terjadinya-tsunami?zoom_infografis, diunduh Juli 2022



Gambar 8b. Tsunami di Perairan Atlantik Menghantam Portugal, Spanyol, dan Maroko

http://2.bp.blogspot.com/-1dKOv0MooQg/UPFqrl_Y6HI/AAAAAAAAAJQ/EFHvYDjtQcg/s1600/portugal.jpg, diunduh 11/07/2019

F. Dasar-dasar Kegempaan dan Respons Bangunan terhadap Gempa Bumi

Gempa bumi membebani bangunan secara sangat berbeda dengan beban mati atau beban hidup. Beban mati berupa benda fisik yang membebani struktur bangunan, misalnya pelat lantai, balok lantai, generator set, dan lain-lain. Demikian juga beban hidup misalnya orang-orang/pengguna, dinding partisi, perabot, dan sebagainya. Beban-beban tersebut terjadi karena tarikan gravitasi menuju ke bumi. Beban gempa terhadap bangunan terjadi karena bangunan digetarkan fondasinya oleh getaran tanah. Getaran gempa bumi dimulai dari episenter merambat di permukaan tanah, dan ketika sampai pada sebuah bangunan, getaran tersebut menggetarkan fondasi bangunan, kemudian ditransmisikan ke atas ke seluruh elemen-elemen struktural, elemen-elemen nonstruktural bangunan dan segala isi bangunan, sehingga mengakibatkan seluruh elemen bangunan dan isinya bergetar.

Getaran tersebut bekerja sebagai beban dinamik pada bangunan, yang besarnya tergantung pada: (1) besarnya intensitas gempa di tempat kejadian; dan (2) tergantung dari respons bangunan terhadap getaran gempa tersebut (Gambar 9).

Intensitas getaran setempat/karakteristik getaran tanah sangat berpengaruh terhadap respons bangunan, namun intensitas tersebut bukan satu-satunya kondisi yang berpengaruh terhadap respons bangunan, kondisi struktur bangunan sangat menentukan bagaimana bangunan merespons getaran gempa. Respons bangunan terhadap getaran gempa tergantung pada:

1. Intensitas getaran setempat/karakteristik getaran tanah.
2. Berat massa.
3. Kekakuan struktur bangunan dan karakter peredaman struktur bangunan.
4. “Konfigurasi” bangunan.



Gambar 9. Skema Perjalanan Gempa Bumi Sampai ke Lokasi Kejadian

G. Intensitas Gempa

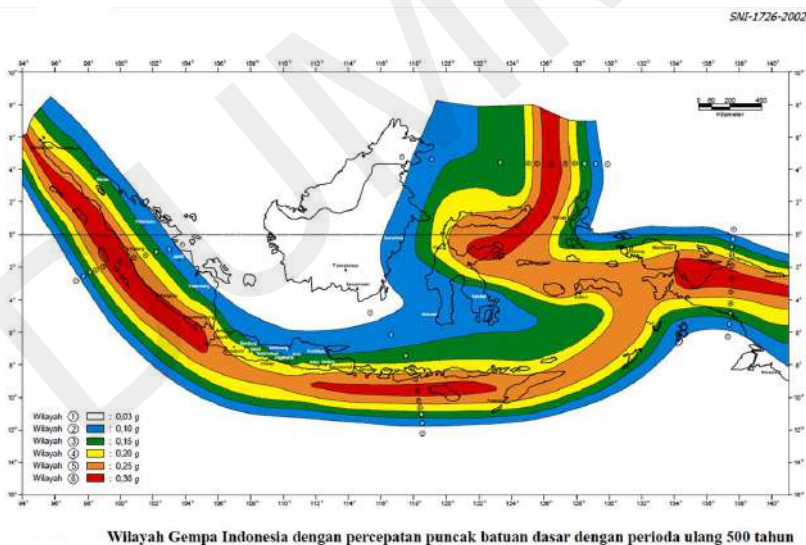
Besarnya intensitas gempa yang bekerja di suatu lokasi tergantung dari besarnya energi gempa yang dilepaskan dari pusat gempa (hiposenter), jarak antara pusat gempa dengan permukaan tanah,

dan jarak dari episenter ke lokasi kejadian. Pelepasan energi gempa dari pusat gempa bumi terjadi ketika akumulasi energi potensial yang terkumpul di dalam batuan pada pertemuan dua lempeng tektonik yang masing-masing bergerak dengan arah yang berbeda melampaui kapasitas kekuatan batuan tersebut sehingga batuan tersebut runtuh dan melepaskan energi gempa. Besarnya energi gempa yang dilepaskan tergantung dari kapasitas dukung batuan yang ada pada pertemuan dua lempeng tektonik tersebut dan luas bidang temu yang berpotensi runtuh, bila kapasitas dukung batuan tersebut semakin besar dan luas bidang temunya semakin luas, maka energi potensial yang terkumpul di dalamnya semakin besar, dan ketika batuan tersebut runtuh, energi gempa yang dilepaskan juga besar. Besarnya energi gempa (magnitudo, atau disingkat dengan M) di hiposenter diukur dengan menggunakan skala Richter (lampiran 1). Beberapa skala yang belakangan ini banyak digunakan untuk mengukur kekuatan atau magnitudo gempa adalah Magnitudo Badan (Mb), Magnitudo Permukaan (Ms), dan Magnitudo Momen (Mw), lihat Bab 2. Skala Magnitudo lebih banyak berkaitan dengan bidang seismologi.

Intensitas lokal atau kekuatan gempa yang bekerja di suatu lokasi kejadian, diukur dengan skala Modified Mercalli (*Modified Mercalli Intensity* atau disingkat MMI). Skala **MMI** mengukur besarnya gempa berdasarkan dampak getaran gempa yang terlihat atau terasa di tempat kejadian dan disusun dalam 12 tingkatan, yaitu: skala I menyatakan gempa hampir tidak terasa oleh manusia, sampai dengan skala XII menyatakan gempa mengakibatkan kerusakan total (lampiran 2). Untuk keperluan perancangan, dilakukan rekaman riwayat waktu (*time history*) dari getaran tanah dengan menggunakan akselerogram untuk mengukur intensitas lokal. Yang dihasilkan oleh rekaman tersebut adalah parameter perancangan yang terukur: perpindahan (*displacement*) dalam waktu, kecepatan dalam waktu dan percepatan dalam waktu. Di antara tiga parameter tersebut percepatan tanah adalah parameter yang umum digunakan dalam perancangan struktur, satuannya adalah gals (cm/det^2). Skala ini berguna untuk para perancang struktur.

... Magnitude dapat dianalogikan dengan *output power* dari stasiun *broadcasting*, sedangkan intensitas lokal bisa dianalogikan dengan kualitas sinyal di tempat. Intensitas seperti kekuatan sinyal yang tergantung dari kekuatan sumber, jarak tempat dari sumber, kondisi setempat dan kondisi perjalanan dari sumber sampai ke lokasi ... (Richter).

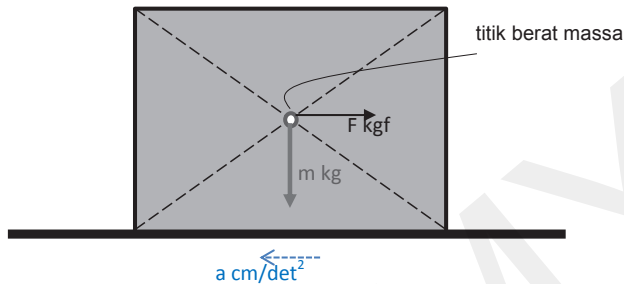
Setiap negara yang berada di wilayah rawan gempa memiliki peta gempa yang berisi pengelompokan wilayah gempa berdasarkan skala intensitasnya. SNI 03-1726-2003 mengelompokkan Indonesia dalam 6 wilayah gempa, di mana wilayah 1 merupakan wilayah dengan kegempaan paling ringan, sedangkan wilayah 6 merupakan wilayah dengan kegempaan paling berat. Pengelompokan tersebut didasarkan pada percepatan puncak batuan di permukaan kulit bumi dengan waktu ulang gempa 500 tahun. Wilayah 1 berdasarkan percepatan puncak 0,03 g; sedangkan wilayah 6 berdasarkan percepatan puncak batuan 0,30 g (Gambar 10). Ketika sampai di permukaan tanah, percepatan tersebut akan berbeda-beda.



Gambar 10. Peta Gempa Indonesia
SNI -1726-2002

H. Gaya Inersia

Apabila sebuah massa pejal yang sangat kaku yang mempunyai berat massa tertentu digetarkan dengan suatu percepatan, maka pada massa tersebut bekerja gaya inersia yang berlawanan arah dengan arah getaran.



Newton memberikan rumusan:

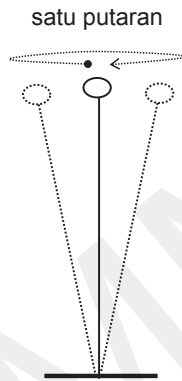
$$F = m \times a,$$

di mana: F adalah gaya inersia (N, kgf), m = massa (kg), dan a = percepatan (cm/det²). Satuan internasional (SI) gaya inersia adalah Newton (N), 1 N = 0.102 kgf (*kilogram force*). Satuan massa internasional (SI) adalah kg (kilogram). Satuan percepatan adalah g (gals) atau cm/det².

Bangunan tidak merupakan massa pejal namun memiliki kekakuan yang terbatas, dan bangunan terdiri dari elemen-elemen struktur serta elemen-elemen nonstruktur yang masing-masing mempunyai kekakuan tertentu. Oleh karena itu, rumus Newton tersebut tidak sesuai untuk menentukan besarnya gaya inersia pada bangunan. Ada beberapa kondisi bangunan yang memengaruhi besarnya gaya inersia tersebut, seperti kekakuan struktur bangunan, sifat peredaman struktur bangunan, dan “konfigurasi” bangunan. Hal yang pasti adalah bahwa apabila bangunan semakin berat, maka gaya inersianya semakin besar.

I. Periode Getar (T)

Periode getar adalah waktu yang diperlukan sebuah benda untuk menempuh satu putaran lengkap dari suatu getaran ketika terganggu dari posisi keseimbangan statis dan kembali ke posisi aslinya (Gambar 11). Periode getar merupakan salah satu properti alami dari setiap benda, termasuk tanah dan struktur bangunan. Sebutan lengkapnya adalah periode getar alami atau *natural fundamental period* (Mulia, 2013).



Gambar 11. Waktu Getar

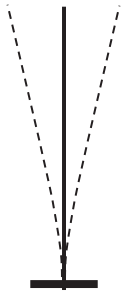
Periode getar alami tanah berbeda-beda untuk lokasi yang berbeda, tergantung dari jenis tanahnya. Tanah keras mempunyai periode getar alami yang pendek, sedangkan tanah lunak mempunyai periode getar alami yang panjang. Oleh karena itu, ketika getaran gempa bumi sampai ke lokasi yang berbeda dengan kondisi tanah yang berbeda, getaran tersebut akan menghasilkan intensitas (perpindahan, kecepatan, dan percepatan) yang berbeda juga.

Jarak lokasi tapak terhadap pusat gempa juga berpengaruh terhadap periode getar alaminya. Periode getar alami lokasi yang dekat dengan pusat gempa cenderung pendek, sebaliknya periode getar alami lokasi yang berjauhan dengan pusat gempa cenderung panjang walaupun jenis tanahnya sama. Periode getar alami tanah berkisar antara 0,5 detik untuk tanah keras sampai 1 detik untuk tanah lunak (Arnold, 1982; SNI 03-1726-2003).

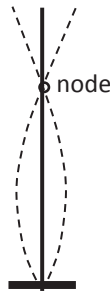
Struktur bangunan mempunyai periode getar alaminya masing-masing, periode getar tersebut merupakan fungsi dari massa dan kekakuan. Menurut Arnold (1982), besarnya periode getar alami struktur berkisar antara 0,5 detik untuk peralatan yang terjangkar dengan baik di dasarnya; 0,1 detik untuk bangunan 1 lantai dengan struktur rangka sederhana; 0,5 detik untuk struktur bangunan rendah sampai dengan sekitar 4 lantai, dan sekitar 1 detik sampai 2 detik untuk bangunan tinggi dari 10 lantai sampai 20 lantai, 4 detik untuk menara tandon air, sekitar 2,5 sampai 6 detik untuk *rig* lepas pantai, dan sekitar 6 detik untuk jembatan gantung bentang lebar. Selain itu nilai periode getar alami struktur bangunan juga tergantung dari material konstruksinya.

Kondisi yang dihindari oleh perancang struktur adalah terjadinya kesamaan antara periode getar alami tanah dengan periode getar alami struktur bangunan, karena hal tersebut dapat mengakibatkan terjadinya resonansi, sehingga kekuatan getaran dalam struktur bangunan atau bagian dari struktur bangunan mengalami amplifikasi. Misalnya bangunan tinggi 10 sampai 20 lantai dengan periode getar alami antara 1 sampai 2 detik berada di tanah lunak yang mempunyai periode getar 1 detik berpeluang mengalami resonansi. Perancang struktur dapat melakukan “*tunning*” misalnya mengubah kekakuan struktur, dengan menambahkan *shear wall* atau *shear core* pada sistem rangka pemikul momen untuk memperpendek periode getar alami struktur.

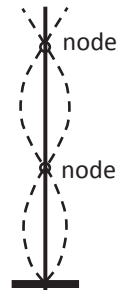
Dalam analisis dinamik, periode getar diasosiasikan dengan ragam getar (*mode shape*). Ragam getar dengan frekuensi terendah (periode getar paling panjang) disebut ragam getar pertama (Mulia, 2013), yaitu pola goyangan bolak-balik ketika struktur bangunan paling awal menerima getaran gempa. Ketika periode getar struktur makin pendek, ragam getar berubah pola goyangannya menjadi ragam getar kedua, dan seterusnya (Gambar 12a, 12b, 12c), sampai getaran berhenti. Dalam analisis dinamik struktur, umumnya diambil ragam getar pertama, kedua dan ketiga untuk mengontrol ragam getar yang dominan terjadi pada struktur atau bagian dari struktur sehingga dapat dilakukan desain struktur yang tepat.



Gambar 12a
Ragam Getar 1



Gambar 12b
Ragam Getar 2
(1 node)

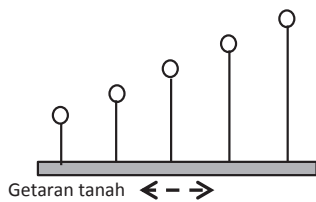


Gambar 12c
Ragam Getar 3
(2 node)

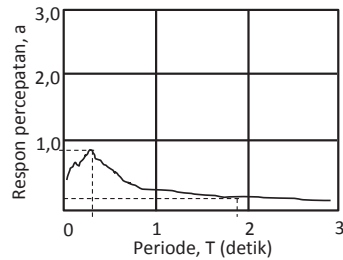
J. Spektrum Respons

Spektrum respons adalah suatu spektrum yang disajikan dalam bentuk grafik antara periode getar struktur T , dan respons-respons maksimum (percepatan, kecepatan, perpindahan) pada bangunan berdasarkan rasio redaman dan gempa tertentu. Secara sederhana pengukuran besarnya respons dari beberapa struktur yang berbeda-beda dengan kondisi tanah tertentu dapat dijelaskan dengan analogi pendulum sebagai berikut.

Andaikan 5 buah pendulum mempunyai dimensi dan material yang sama, namun panjangnya berbeda-beda, maka kekakuan masing-masing pendulum tersebut juga berbeda-beda menurut panjang batangnya. Batang pendek merupakan batang yang paling kaku mempunyai periode getar paling pendek sedangkan batang paling panjang paling fleksibel mempunyai periode getar paling panjang (Gambar 13a). Apabila landasan pendulum-pendulum tersebut digetarkan dengan gempa tertentu yang pernah direkam, masing-masing pendulum cenderung beresonansi dengan amplitudo maksimal masing-masing. Apabila respons percepatan maksimal masing-masing pendulum tersebut diplot terhadap periode getar pendulum di dalam sebuah grafik, maka akan menghasilkan sebuah kurva atau spektrum respons (Gambar 13b).



Gambar 13a. Prinsip Spektrum Respons
(Sumber: Arnold, 1982)



Gambar 13b. Grafik Spektrum Respons
(Sumber: Arnold, 1982)

Dilihat pada Gambar 13a dan 13b, pendulum paling pendek yang mempunyai periode getar paling pendek mengalami respons percepatan paling besar, sedangkan pendulum paling panjang yang mempunyai periode getar paling panjang mengalami respons percepatan paling kecil.

Dengan mengetahui respons percepatan maksimal struktur di lokasi yang ditinjau, maka perancang struktur dapat merencanakan besarnya gempa rencana. SNI 03-1726-2003 menampilkan spektrum respons menurut wilayah gempanya masing-masing, untuk tanah keras, tanah sedang, dan tanah lunak. SNI 1726-2012 sangat rinci mengklasifikasikan situs berdasarkan sifat tanah, mulai dari batuan sangat keras, batuan keras, tanah keras/sangat padat, tanah sedang, tanah lunak, dan tanah khusus yang memerlukan inspeksi geoteknik. Setelah klasifikasi situs ditentukan, SNI 1726-2012 memberi formula untuk menghitung parameter spektrum desain dan menggambarkan spektrum responsnya, sehingga spektrum respons tersebut spesifik untuk setiap lokasi. Grafik spektrum respons dari setiap standar perencanaan seperti SNI tersebut sudah menampilkan kurva spektrum respons dengan koefisien redam, karena setiap struktur selalu mempunyai sifat meredam.

K. Peredaman (*Damping*)

Goyangan bangunan yang menerima beban gempa tidak bersifat konstan, goyangan tersebut beberapa saat setelah gempa berakhir akan berhenti dan kembali ke posisi asalnya. Hal tersebut terjadi karena bangunan punya sifat meredam getaran. Sifat peredaman bangunan tergantung dari material konstruksi, join-join, dan elemen-elemen nonstruktural. Nilai redaman dinyatakan dalam %, artinya sekian persen dari redaman kritis.

Redaman kritis adalah redaman yang mencegah terjadinya goyangan. Apabila sebuah pendulum yang diletakkan vertikal di dalam cairan kental dan ujung atasnya diberi gaya horizontal sampai mengalami simpangan horizontal tertentu, kemudian gaya tersebut dihilangkan, pendulum tersebut langsung kembali ke posisi awal dan berhenti tanpa mengalami goyangan lagi, berarti pendulum tersebut mengalami redaman 100% atau mengalami redaman kritis. Kalau pendulum tersebut berdiri di udara, maka getarannya baru berhenti beberapa saat kemudian, redamannya adalah sekian persen terhadap getaran kritis.

Menentukan dengan pasti nilai redaman struktur bangunan menurut para pakar adalah sangat sulit, maka untuk keperluan desain struktur, nilai redaman ditetapkan dalam standar yang berlaku berdasarkan suatu asumsi yang konservatif. Menurut Arnold (1982) redaman kritis struktur bangunan berkisar antara 2 – 15% terhadap redaman kritis.

L. Daktilitas Material

Daktilitas adalah kemampuan struktur gedung untuk mengalami simpangan inelastik yang besar secara berulang kali dan bolak-balik akibat beban gempa yang menyebabkan terjadinya pelelehan (*yielding*) pertama, sambil mempertahankan kekuatan dan kekakuan yang cukup, sehingga struktur gedung tersebut tetap berdiri, walaupun sudah berada dalam kondisi diambang keruntuhan. Faktor daktilitas adalah rasio antara simpangan maksimum struktur gedung pada saat mencapai

kondisi di ambang keruntuhan dan simpangan struktur gedung pada saat terjadinya pelelehan pertama (SNI 03-1726-2002).

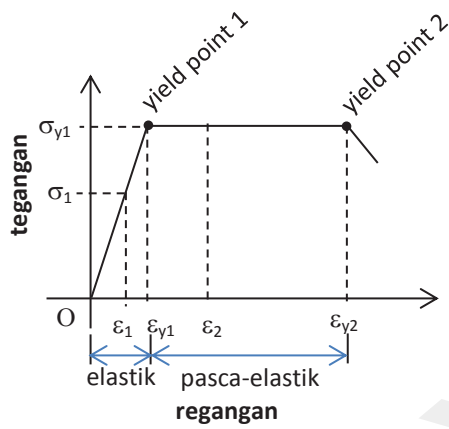
Struktur yang daktil ditentukan oleh material strukturalnya, pendetailan konstruksi, dan jenis sistem strukturnya. Untuk memahami material yang daktil, kita bandingkan perilaku kapur tulis dan kawat ketika dilengkungkan. Ketika kapur tulis kita lengkungkan dengan gaya tertentu, maka segera akan putus, sedangkan ketika kawat kita lengkungkan baru putus setelah kita lengkungkan bolak-balik secara berulang-ulang. Kapur tulis mewakili material yang bersifat getas, sedangkan kawat mewakili material yang bersifat daktil.

Ketika kawat dilengkungkan dengan gaya tertentu sampai sudut kelengkungan tertentu kemudian gayanya dihilangkan dan kawat tersebut kembali lurus seperti keadaan semula maka kawat tersebut dalam keadaan elastik atau masih dalam kekuatan penuh. Ketika kawat dilengkungkan lagi dengan gaya lebih besar sehingga membentuk sudut kelengkungan yang besar dan gayanya dihilangkan dan kawat tersebut tidak dapat kembali ke kondisi semula (menyisakan kelengkungan/deformasi), hal ini menunjukkan kekuatan elastik kawat telah dilampaui atau telah mengalami pelelehan, berarti kawat tersebut telah mengalami fase inelastik, simpangannya juga disebut simpangan inelastik. Kawat tersebut sebenarnya telah mengalami “kerusakan” terbatas dan masih dapat mempertahankan kekuatannya (terbentuk sendi pastis). Material yang mampu mengalami fase inelastik dengan rentang yang sangat panjang (seperti kawat dan baja) adalah material yang daktil. Material daktil untuk struktur bangunan yang umum digunakan adalah baja dan beton bertulang daktil (catatan: tidak semua beton bertulang adalah daktil).

Struktur bangunan dapat berperilaku daktil kalau material yang digunakan bersifat daktil dan pendetailan konstruksinya didesain dan dilaksanakan memenuhi persyaratan daktilitas, serta sistem struktur memiliki tingkat statis tak tentu yang tinggi (dibahas pada Bab 4). Dengan mengizinkan struktur mengalami fase inelastik, maka struktur yang daktil mampu menerima gaya yang lebih besar daripada kekuatan elastiknya tanpa mengalami keruntuhan walaupun mengalami

kerusakan. Struktur dengan daktilitas penuh dapat menerima gaya sampai 8 kali kekuatan elastiknya sambil mengalami deformasi inelastik, dan pada komponen struktur terbentuk sendi plastis (ada bagian yang “rusak”). Berarti apabila struktur menerima gaya gempa yang besar, pembentukan sendi plastis mengakibatkan sebagian energi gempa terlepas (struktur tersebut mengalami disipasi energi).

Untuk memahami hal tersebut dapat dipelajari dari diagram tegangan regangan yang disederhanakan pada Gambar 14. Bila sebuah batang diberi gaya tarik sebesar P_1 , pada penampang melintang batang tersebut bekerja tegangan σ_1 dan regangannya sebesar ϵ_1 , batang tersebut dalam kondisi elastis penuh dan apabila gaya dihilangkan batang kembali ke panjang asal. Ketika batang diberi gaya P_{y1} , pada penampang melintang batang tersebut bekerja tegangan σ_{y1} dan regangannya sebesar ϵ_{y1} , batang tersebut dalam kondisi batas maksimal kekuatan elastiknya, dan masih dapat kembali ke panjang asal apabila gaya dihilangkan. Kondisi batas di mana fase elastis akan beralih ke fase inelastis disebut titik leleh pertama (*yield point 1*). Ketika batang diberi gaya tarik lebih besar misalnya sebesar P_2 , tegangan yang terjadi pada penampang melintang batang tersebut tetap sebesar σ_{y1} , namun regangannya bertambah besar menjadi ϵ_2 , hal ini terjadi karena kekuatan elastik telah dilampaui sehingga batang tersebut tidak bisa meningkatkan lagi perlawanannya dengan tegangan elastik. Dalam kondisi inelastik ini batang sudah tidak bisa kembali ke panjang asalnya lagi, selain itu penampang melintang batang mengecil. Apabila gaya diperbesar terus maka tegangan yang terjadi pada penampang melintang batang tersebut tetap sebesar σ_{y1} dan regangannya bertambah besar terus, sampai ketika mencapai titik leleh ke-2 (kekuatan batas) batang sudah dalam keadaan akan runtuh, dan kalau gaya diperbesar lagi batang tersebut akan runtuh. Uraian ini berlaku juga untuk batang yang diberi momen lentur. Uraian ini sangat disederhanakan, diagram yang terjadi pada beton bertulang dan baja tidak sesederhana Gambar 14.



Gambar 14. Diagram Tegangan-Regangan yang Disederhanakan

DUMMY

3

KONFIGURASI BANGUNAN TERHADAP GEMPA DAN PENYELESAIANNYA

Selain kondisi yang telah diuraikan di Bab 2, kondisi yang memengaruhi respons struktur bangunan terhadap gempa adalah “konfigurasi” bangunan. Konfigurasi bangunan terhadap gempa mencakup tiga hal, yaitu: (1) dimensi dan bentuk massa bangunan; (2) sifat, dimensi, dan tata letak elemen-elemen struktural; dan (3) sifat dan tata letak elemen-elemen nonstruktural bangunan (Arnold, 1982).

Konfigurasi terhadap gempa dikelompokkan dalam dua kelompok, yaitu: (1) konfigurasi beraturan; dan (2) konfigurasi tidak beraturan. Bangunan yang memiliki konfigurasi beraturan akan merespons getaran gempa dengan perilaku yang relatif sederhana, sebaliknya bangunan yang memiliki konfigurasi tidak beraturan akan merespons getaran gempa dengan perilaku yang dinamis dan kompleks sesuai dengan tingkat ketidakaturannya. Bangunan dengan perilaku kompleks menambah risiko terjadinya perbedaan antara perilaku “nyata” pada saat terjadi gempa dan perilaku yang “diprediksi” dalam perancangan struktur.

Struktur bangunan beraturan cenderung bergerak translasi dan sederhana ketika terjadi gempa, yaitu gerak ragam pertamanya dominan translasi mengikuti salah satu sumbu sedangkan gerak ragam keduanya akan dominan dalam gerak translasi sumbu yang lain, sehingga praktis berperilaku sebagai struktur 2D. Sementara itu, struktur bangunan tidak beraturan benar-benar bekerja secara 3D, goyongannya selain

translasi juga ada gerakan rotasi horizontal (torsi). Apabila gerak rotasi tersebut dominan pada ragam pertama, hal tersebut menunjukkan perilaku yang buruk dan sangat tidak nyaman bagi penghuni ketika terjadi gempa (SNI 03-1727-2003). Oleh karena itu, dalam peraturan gempa yang berlaku, bangunan dengan konfigurasi yang tidak beraturan harus dianalisis dengan analisis dinamik, sedangkan bangunan beraturan bisa dianalisis dengan analisis beban gempa statik ekuivalen.

Struktur bangunan tidak beraturan mengakibatkan terjadinya beberapa mekanisme kegagalan struktur, yaitu: *torsi*, *soft-storey*, *setback*, *short column*, P-delta. Ketidakteraturan konfigurasi bangunan menyebabkan struktur bangunan tidak efisien. Ada beberapa pembatasan keteraturan bangunan, buku ini mengacu pada Pedoman Perencanaan untuk Struktur Rangka Beton Bertulang Biasa dan Struktur Tembok Bertulang untuk Gedung 1981.

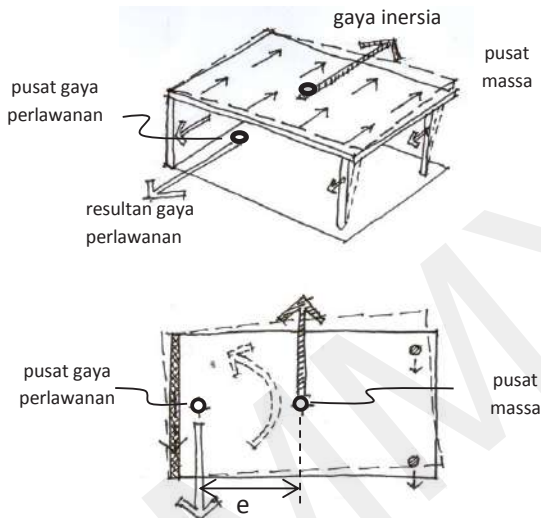
A. Mekanisme Torsi

Mekanisme torsi (rotasi) terjadi karena ada eksentrisitas pada denah bangunan, di mana titik pusat massa bangunan tidak berimpit dengan titik pusat gaya perlawanan lateral. Resultan gaya inersia gempa bekerja di pusat massa, sedangkan resultan gaya perlawanan lateral bekerja di pusat gaya perlawanan struktur penahan gaya lateral. Apabila titik pusat massa dan titik pusat perlawanan lateral tidak berimpit (ada eksentrisitas) akibatnya terjadi momen torsi pada denah bangunan (Gambar 15a dan 15b). Semakin besar eksentrisitasnya, momen torsi semakin besar.

Eksentrisitas dapat terjadi karena hal-hal berikut.

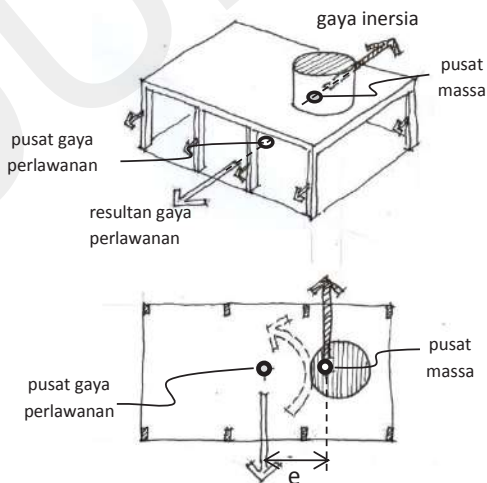
- Kekakuan lateral elemen-elemen struktur penahan gaya lateral ditempatkan secara tidak simetri dalam denah.
- Distribusi beban pada denah tidak simetri. Hal ini terjadi pada bangunan yang di satu sisi denahnya berisi banyak elemen-elemen nonstruktural yang berat seperti dinding-dinding pasangan bata, sedangkan di sisi yang lain tidak ada atau sedikit.
- Bentuk denah dan potongannya tidak beraturan.

Dengan adanya jarak antara pusat massa dan pusat kekakuan (e), besarnya momen torsi pada denah bangunan ini adalah $M_t = V \times e$. Dalam contoh Gambar 15c: A,B,C, momen torsi tersebut memberikan tambahan gaya geser lateral pada kolom-kolom dan pengurangan gaya geser pada dinding geser.



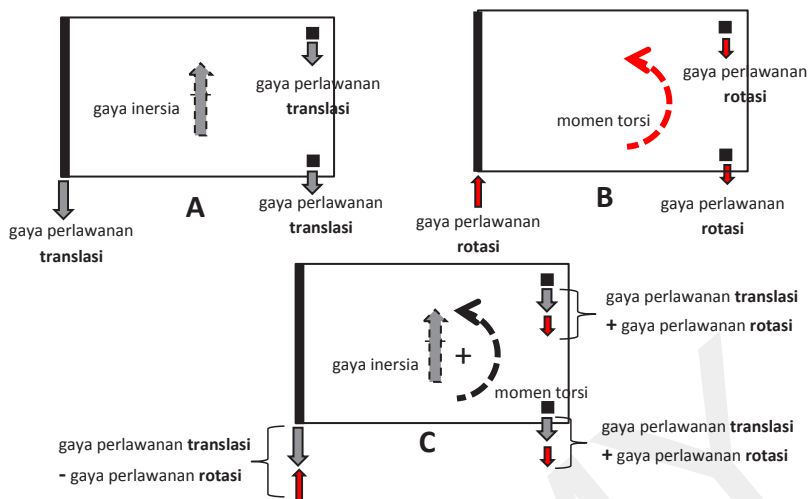
Gambar 15a. Torsi Karena Pusat Kekakuan Eksentris terhadap Pusat Massa

Sumber: (Arnold, 1982)



Gambar 15b. Torsi Karena Distribusi Beban Tidak Simetri

Sumber: (Arnold, 1982)

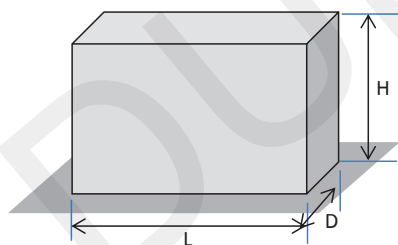


Gambar 15c. Prinsip Perlawanan terhadap Gaya Translasi dan Rotasi

Sumber: (Arnold, 1982)

B. Konfigurasi Bangunan yang Berhubungan dengan Torsi

1. Dimensi Bangunan Ekstrem



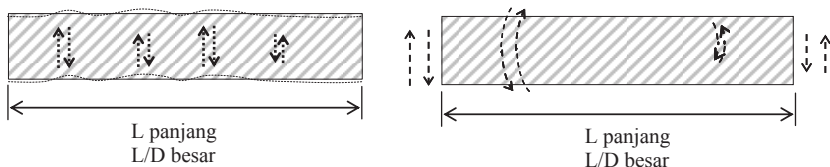
- Ukuran H dan/atau L , dan/atau D sangat besar
 - Aspek ratio H/D besar
 - Aspek ratio L/D besar
- Catatan: $L > D$

Bangunan ini boleh dianggap beraturan apabila:

- $L < 50.00$ m atau < 10 bentang
- $H \leq 40$ m
- $H/D \leq 3$
- $L/D \leq 5$

Gambar 16a. Batasan Dimensi Massa Bangunan Ekstrem

Problem struktural denah panjang dan pipih



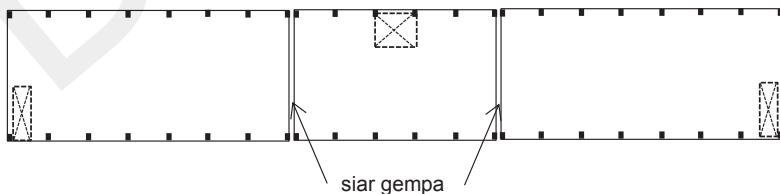
Gambar 16b. Problem Konfigurasi: Bentuk Denah Panjang dan Pipih

Denah yang terlalu panjang dan langsing berpotensi mengalami torsi karena hal-hal berikut.

- Ada kemungkinan terjadi perbedaan periode getar alami tanah di sisi yang satu terhadap sisi yang lain.
- Pada umumnya beban gravitasi dari elemen-elemen nonstruktural pada bangunan tidak tersebar secara merata/seragam dan sangat mungkin tidak simetri. Kondisi ini mengakibatkan torsi serupa dengan Gambar 15b, dan apabila bangunan sangat panjang hal tersebut dapat mengakibatkan torsi yang besar. Selain itu pembagian beban gravitasi tidak merata tersebut juga berpotensi mengakibatkan terjadinya perbedaan respons getaran di titik-titik pada denah lantai tiap tingkat, sehingga pada saat lantai bekerja sebagai diafragma horizontal yang panjang dan langsing, lantai tersebut mengalami perilaku dinamis yang kompleks.
- Elemen-elemen nonstruktural seperti dinding pasangan bata dalam kenyataannya menambah kekakuan pada struktur rangka pemikul momen. Pada umumnya penempatan elemen-elemen tersebut tidak merata dan sering kali tidak simetri. Kondisi ini mengakibatkan torsi serupa dengan Gambar 15b, dan apabila bangunan sangat panjang hal tersebut dapat mengakibatkan torsi yang besar.

Penyelesaian konfigurasi denah langsing dan panjang

- a. Memisahkan bangunan menjadi beberapa massa dengan siar gempa sehingga konfigurasi bangunan menjadi beraturan.

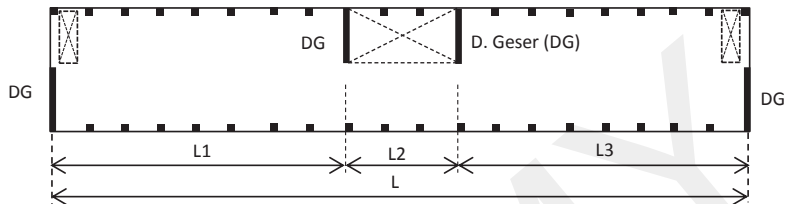


Gambar 17a. Penyelesaian Konfigurasi Denah Langsing dengan Siar Gempa

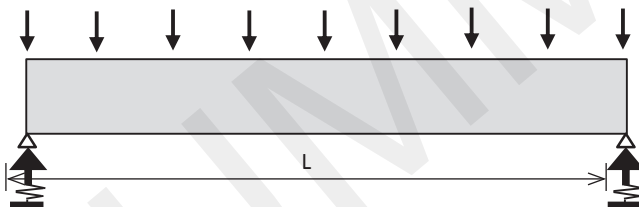
Dalam contoh di atas siar gempa memisahkan struktur bangunan menjadi 3 massa sehingga tiap massa panjangnya tidak melampaui

50 m dan/atau 10 bentang. Jumlah siar gempa tergantung dari panjang massa keseluruhan. Dengan pemisahan struktur ini tiap massa bangunan bergetar sendiri-sendiri apabila diguncang gempa bumi, diafragma menjadi pendek dan tidak langsing sehingga perilaku struktur menjadi sederhana.

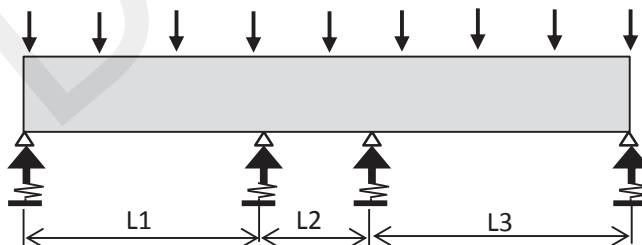
- b. Memperpendek bentang horizontal diafragma dengan memasang dinding geser.



Gambar 17b. Penyelesaian Konfigurasi Denah Langsing Diperkaku dengan Menambahkan Dinding Geser



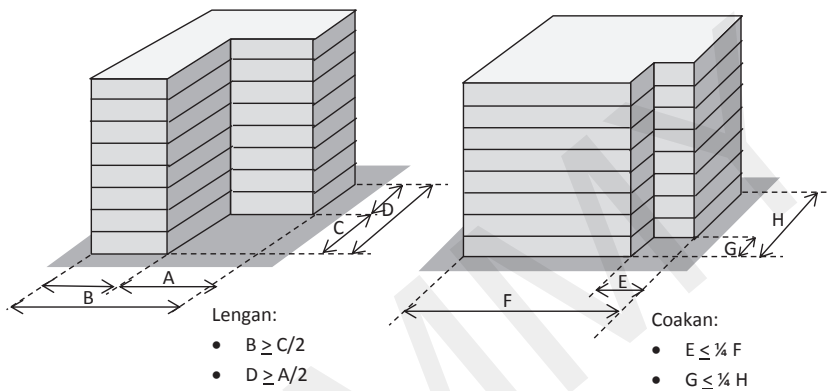
Gambar 17c. Analogi Diafragma sebagai Balok Bidang dengan 2 Buah Tumpuan



Gambar 17d. Analogi Diafragma sebagai Balok Bidang dengan 4 Buah Tumpuan

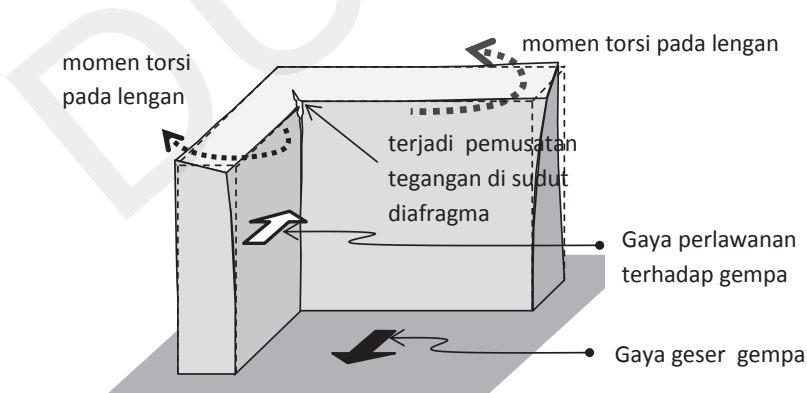
Bidang diafragma pada Gambar 17a dapat dianalogikan sebagai balok bidang yang ditumpu secara lateral oleh 4 buah dinding geser (DG). Pada Gambar 17b dan 17c, dinding geser dianalogikan sebagai tumpuan per. Bila dinding geser ditambahkan di antara 2 buah dinding geser yang ada, bidang diafragma menjadi lebih kaku.

2. Bentuk Denah Berlengan dan Coakan

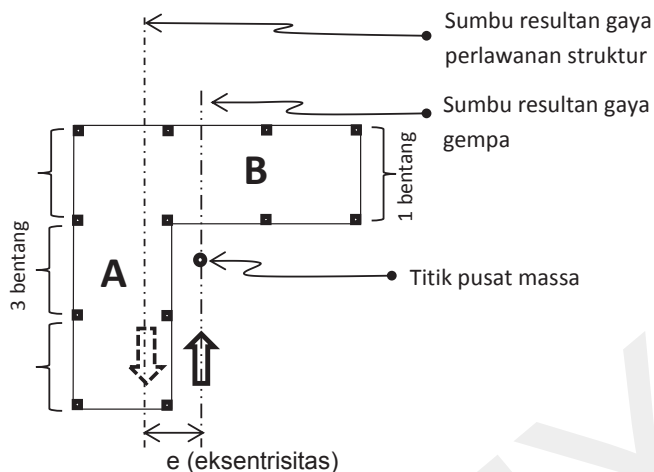


Gambar 18a. Batasan Bentuk Denah Berlengan dan Coakan

Problem struktural denah berlengan



Gambar 18b. Perilaku Bangunan dengan Denah Berlengan



Gambar 18c. Eksentrisitas pada Bangunan dengan Denah Berlengan

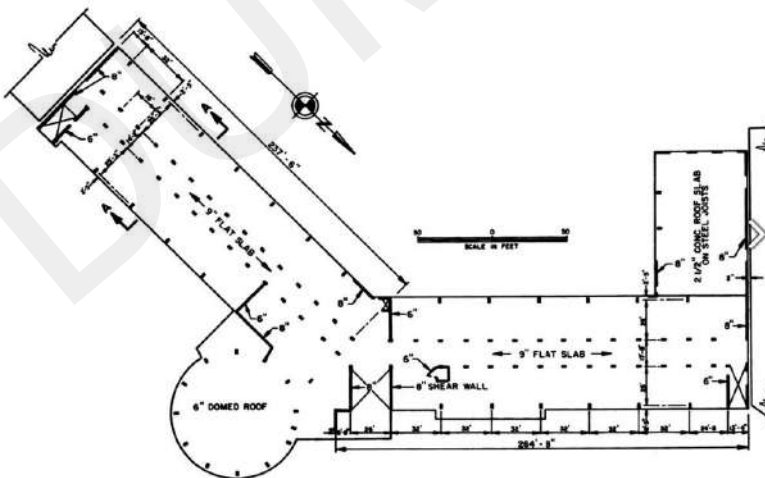
Lengan bangunan akan mengalami momen torsi apabila digoncang gempa seperti dalam Gambar 18b. Momen torsi tersebut terjadi karena ada perbedaan antara kekakuan lengan A yang sejajar dengan arah gaya gempa dan lengan B yang tegak lurus arah gaya gempa (Gambar 18c), di mana pada arah gaya tersebut lengan A lebih kaku daripada lengan B karena 2 buah rangka penahan gaya lateral pada lengan A terdiri dari 3 buah bentang dengan 8 kolom, sedangkan 2 buah rangka penahan gaya lateral pada lengan B terdiri dari 1 buah bentang dengan 4 buah kolom. Perbedaan kekakuan tersebut mengakibatkan posisi sumbu gaya perlawanan struktur terhadap gaya lateral lebih dekat/berada di lengan A, padahal gaya gempa bekerja di titik pusat massa yang posisinya relatif berada lebih di tengah denah massa keseluruhan. Kondisi tersebut, mengakibatkan terjadinya eksentrisitas antara gaya gempa dengan gaya perlawanan, dan eksentrisitas tersebut mengakibatkan terjadinya momen torsi pada lengan B. Putaran lengan B terhadap torsi, diteruskan oleh lantai yang berfungsi sebagai diafragma horizontal ke lengan A, maka portal yang ada di lengan A cenderung mempertahankan posisinya sehingga perilaku tersebut mengakibatkan terjadi pemusatan tegangan geser pada diafragma bagian pojok pertemuan lengan A dan lengan B.

Kasus 1. Keruntuhan karena konfigurasi berlengan, West Anchorage High Shool



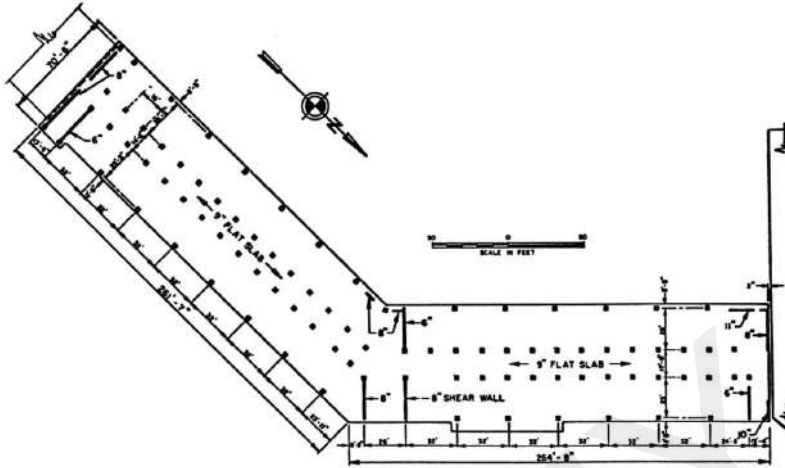
Gambar 19a. Birds Eye View Anchorage High Shool

http://westanchoragehighclassof1963.com/Version2010/images/westhigh_BW%20copy.jpg
information/USA011_Cover_Image.jpg, diunduh November 2017



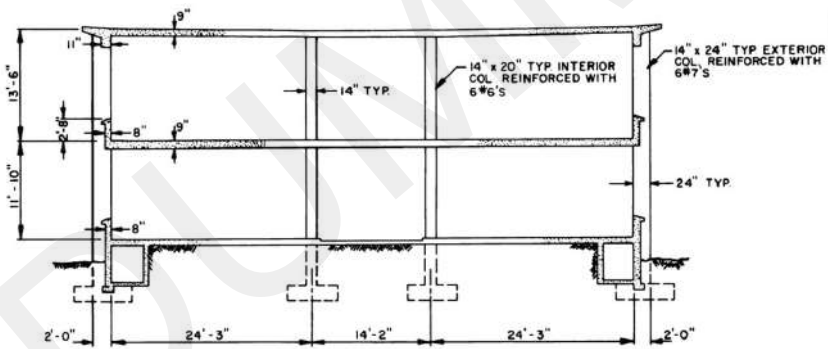
Gambar 19b. Denah Lantai 1 West Anchorage High Shool

<http://db.concretecoalition.org/building/155>, diunduh November 2017



Gambar 19c. Denah Lantai 2 West Anchorage High Shool

[http://db.concretcoalition.org/building/155 information/USA011_Cover_Image.jpg](http://db.concretcoalition.org/building/155%20information/USA011_Cover_Image.jpg),
diunduh November 2017



Gambar 19d. Potongan West Anchorage High Shool

<http://db.concretcoalition.org/building/155>, diunduh November 2017



Gambar 19e. Kegagalan Struktur West Anchorage High Shool

<https://i.pinimg.com/474x/75/be/b4/75beb491b45bb511b7e1d070a2502b69.jpg>,
diunduh November 2017



Gambar 19f. Kegagalan Struktur West Anchorage High Shool

http://db.concretecoalition.org/static/data/4-illustration-of-damage/USA011_Damage_1.jpg,
diunduh November 2017

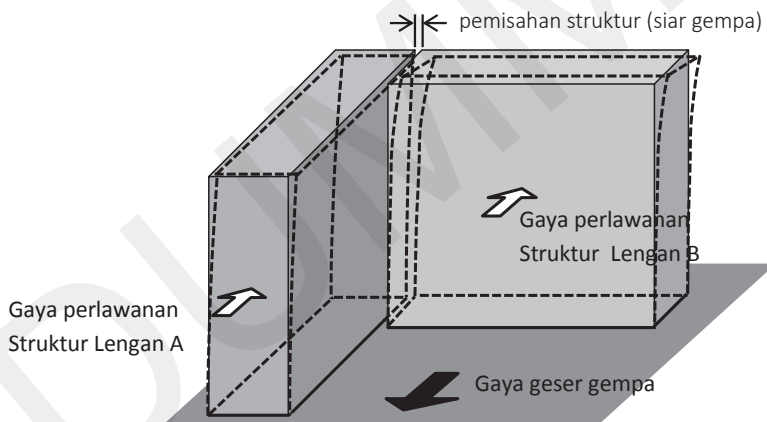
Bangunan West Anchorage High School di Anchorage Alaska, mengalami keruntuhan setelah digoncang gempa bumi kuat pada 27 Maret 1964. Getaran gempa kuat terjadi sekitar 1 sampai 1,5 menit dengan durasi sekitar 4 menit (<http://db.concretcoalition.org/building/155>).

Bangunan berbentuk L terbuka dengan panjang lengan-lengan sekitar 71 meter, struktur bangunannya adalah kolom dengan pelat rata (Gambar 19a s/d 19d). Momen torsi pada lengan bangunan mengakibatkan diafragma (pelat atap dan lantai) mengalami kegagalan struktur (tanda panah pada Gambar 19e), akibatnya masing-masing lengan bangunan bekerja secara terpisah sehingga terjadi redistribusi beban gempa pada *shear wall*. Hal itu mengakibatkan *shear wall* (pada Gambar 18e dilingkari) tidak kuat menahan beban tersebut dan runtuh. Keruntuhan *shear wall* menyebabkan kolom-kolom tidak mampu menahan gaya geser gempa dan mengalami keruntuhan juga (Arnold, 1982). Keruntuhan kolom juga mengindikasikan bahwa balok perimeter lebih kuat daripada kolom. Kerusakan diafragma juga terjadi di sudut lengan dan komponen-komponen struktural lain pada bangunan berlengan tersebut.

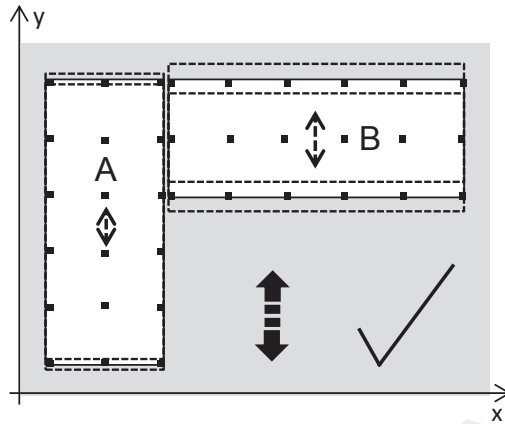
Penyelesaian Konfigurasi Massa Berlengan

Penyelesaian konfigurasi berlengan untuk struktur rangka pemikul momen dengan siar pemisah struktur masing-masing lengan merupakan alternatif yang umum digunakan (Gambar 20a). Ketika massa A terpisah secara struktural dengan massa B, maka respons terhadap getaran gempa masing-masing massa menjadi independen. Masing-masing massa A dan B bergoyang secara translasi dan tidak terjadi goyangan rotasi seperti ketika massa A dan B bergabung. Dengan pemisahan tersebut, problem pemusatan tegangan di sudut lengan bangunan tidak terjadi lagi.

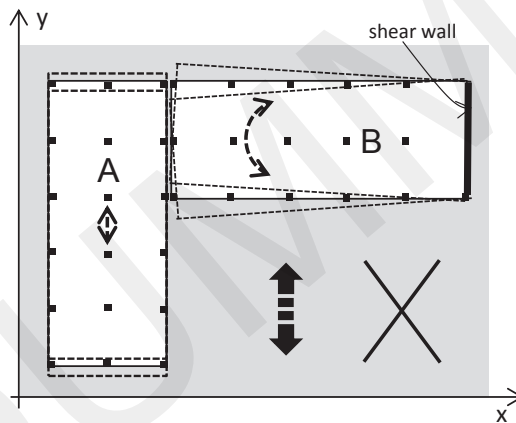
Sebelum memisahkan struktur berlengan, perlu dipilih kondisi yang paling menguntungkan, juga dipastikan bahwa setelah struktur dipisahkan dengan siar gempa malah menjadi tidak beraturan karena misalnya struktur independen malah mengalami torsi karena posisi *shear wall* yang sudah ada menjadi asimetri. Contoh yang sering tidak disadari oleh mahasiswa arsitektur adalah memisahkan struktur berlengan dengan siar gempa, namun di ujung salah satu atau kedua massa yang terpisah terdapat *shear wall* yang membuat massa independen mengalami torsi bila arah gaya gempa sejajar dengan sumbu y seperti pada Gambar 20c. Contoh pada Gambar 20b adalah contoh yang baik karena seluruh sistem menggunakan struktur Rangka Pemikul Momen, sedangkan contoh pada Gambar 20c merupakan contoh yang jelek karena pada massa B terdapat *shear wall* di salah satu sisinya sehingga ketika sudah terpisah kekakuan massa B menjadi asimetri.



Gambar 20a. Penyelesaian Konfigurasi Denah Berlengan untuk Struktur Rangka Pemikul Momen dengan Siar Pemisah Struktur



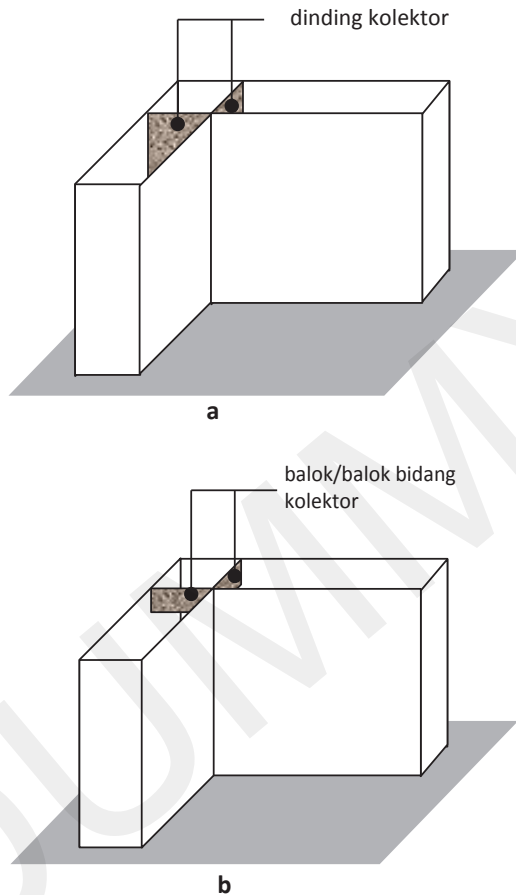
Gambar 20b. Contoh Pemisahan Struktur yang Baik



Gambar 20c. Contoh Pemisahan Struktur yang Tidak Baik

Arnold (1982) mengemukakan pemecahan denah berlengan dengan memasang kolektor kaku di bagian pertemuan lengan-lengan (Gambar 21a dan 21b). Menurutny kolektor dengan bidang/dinding lebih baik daripada balok/balok bidang. Untuk struktur rangka pemikul momen balok-kolom, kolektor tersebut adalah balok yang diperkaku. Diafragma bangunan West Anchorage High School adalah pelat rata tanpa balok, sehingga balok bidang kolektor akan sangat membantu memperkuat dan memperkaku diafragma. Dalam hal ini torsi dibiarkan terjadi, namun adanya kolektor dapat memperkuat dan memperkaku

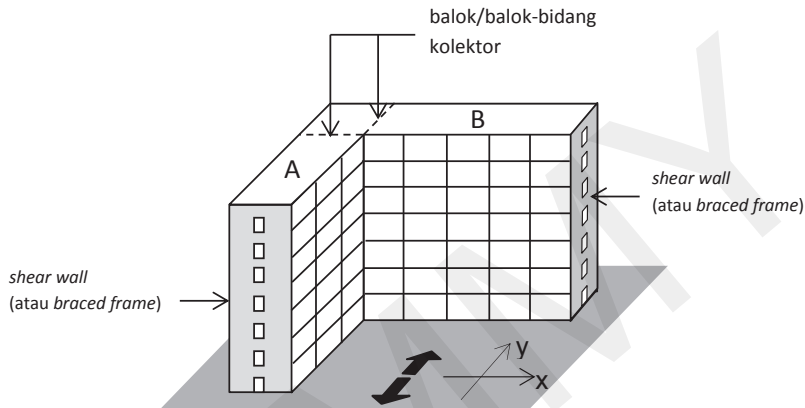
diafragma sehingga mampu menerima gaya geser terpusat di sudut lengan yang disebabkan oleh torsi.



Gambar 21a dan 21b. Pemecahan Konfigurasi Denah Berlengan untuk Struktur Rangka Pemikul Momen dengan Memperkuat/Memperkaku Diafragma di Posisi Sudut Pertemuan Lengan

Alternatif ke-3 (Gambar 21c merupakan pengembangan dari alternatif 2, yaitu mengurangi/mengeliminasi momen torsi yang terjadi di setiap lengan dengan cara menambahkan kekakuan bagian yang lemah. Penambahan kekakuan tersebut dilakukan dengan menambahkan *shear wall* atau *braced frame* sehingga terjadi keseimbangan kekakuan antara Rangka Pemikul Momen (RPM) di lengan A dengan kekakuan *shear*

wall di lengan B untuk arah sumbu y , dan hal yang sama dilakukan juga untuk arah sumbu x . Keseimbangan kekakuan tersebut dipengaruhi oleh dimensi RPM (dimensi balok-balok dan kolom-kolom) dan *shear wall* (tebal dan lebar) atau *bracing* (dimensi batang-batang vertikal, horizontal dan diagonal) tersebut, serta material masing-masing elemen struktur tersebut yang harus diperhitungkan oleh perancang struktur (Gambar 21c).

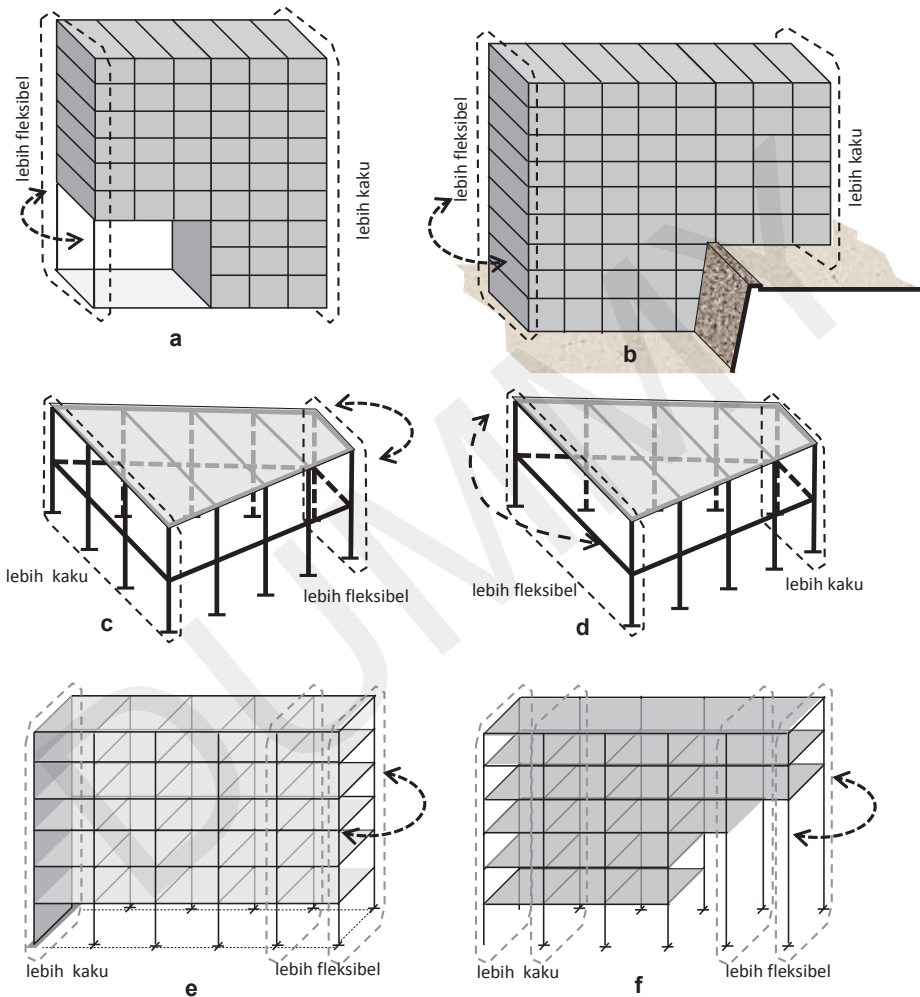


Gambar 21c. Pemecahan Konfigurasi Denah Berlengan untuk Struktur Rangka Pemikul Momen dengan Menambahkan *Shear Wall/Braced Frame* di Bagian Ujung yang Lebih Lemah

3. Tata Letak Elemen Struktural yang Tidak Simetri/Tidak Seimbang

Masalah konfigurasi bangunan terhadap gempa juga dipengaruhi oleh tata letak elemen-elemen struktural seperti Gambar 22 a s.d. f. Walaupun bentuk denah, proporsi denah, proporsi potongan, dimensi bangunan, semuanya beraturan, namun apabila tata letak elemen-elemen strukturalnya tidak beraturan, maka perilaku struktur bangunan tetap kompleks dan dinamis. Struktur bangunan pada Gambar 22 a s.d. f mengalami torsi karena kekakuan elemen-elemen struktur vertikal tidak seimbang atau tidak simetri antara sisi yang satu dengan sisi

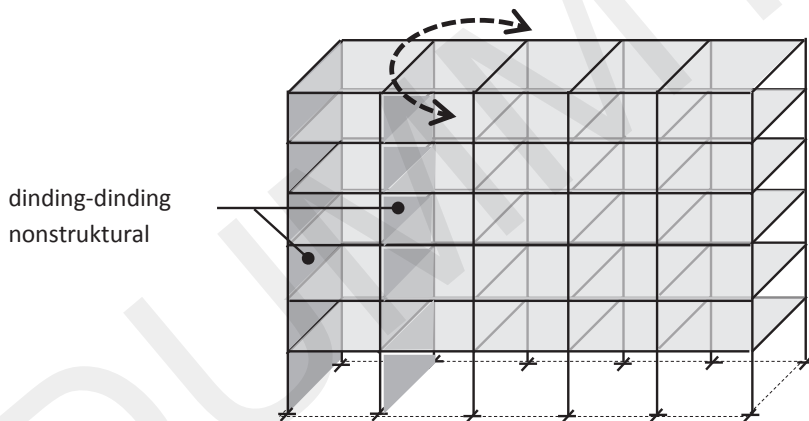
yang lain. Dari gambar-gambar tersebut, struktur bangunan pada Gambar 22a dan f berperilaku lebih kompleks daripada yang lain karena selain torsi terjadi juga mekanisme *soft storey* yang akan dibahas pada pembahasan selanjutnya.



Gambar 22. Beberapa Kemungkinan-kemungkinan Konfigurasi dengan Tata Letak Elemen Struktur yang Tidak Seimbang/Tidak Simetri

Pemecahan strukturnya pada prinsipnya sama dengan bangunan berlengan, yaitu membuat keseimbangan kekakuan antara sisi yang berbeda dengan menempatkan *shear wall* atau *braced frame* di sisi yang fleksibel. Sering dalam desain nyata, tuntutan arsitektural tidak menghendaki adanya *shear wall* atau *braced frame* pada posisi yang dibutuhkan. Dalam hal ini pilihannya adalah menerima torsi sebagai masukan dalam desain struktur dan tetap menggunakan struktur RPM. Apabila torsi cukup ekstrem, dampaknya adalah struktur bangunan tidak ekonomis.

4. Tata Letak Elemen Nonstruktural yang Tidak Simetri/Tidak Seimbang

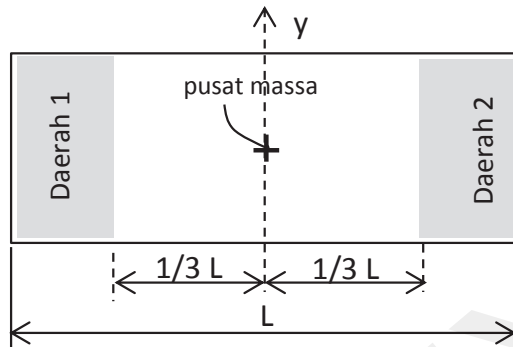


Gambar 23. Perilaku Torsi pada Konfigurasi dengan Tata Letak Elemen Nonstruktural yang Tidak Seimbang/Tidak Simetri

Elemen nonstruktural seperti dinding pasangan bata penyekat ruang mempunyai kekakuan yang cukup berarti. Apabila dinding-dinding ditempatkan pada posisi yang eksentris, bagian yang dindingnya lebih banyak menjadi lebih kaku dan berat daripada yang kosong. Penempatan dinding nonstruktural seperti Gambar 23 menunjukkan ada mekanisme torsi pada struktur bangunannya, karena gaya inersia pada bagian yang banyak dindingnya menjadi lebih besar.

Pembatasan Torsi pada Denah Bangunan yang Tidak Simetri

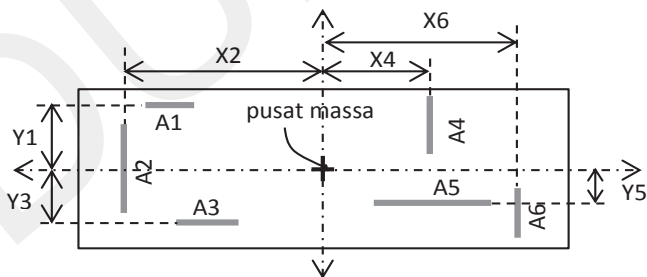
Komponen Penahan Gaya Lateral (Gambar 24):



Gambar 24. Keseimbangan Tata Letak Komponen Penahan Gaya Lateral dalam Denah

Jumlah total momen inersia komponen-komponen struktur penahan gaya lateral (rangka kaku/*shear wall/braced frame*) pada arah y minimal 10% dari berada di daerah 1 dan 2. Pusat massa adalah titik berat semua beban gravitasi yang berada di lantai yang ditinjau.

Persyaratan lain keseimbangan tata letak dinding-dinding nonstruktural (Gambar 25):



Catatan:

A1, A2 dst. = luas penampang horizontal dinding.

Jumlah dinding dalam Gambar 25 hanya contoh.

Gambar 25. Keseimbangan Tata Letak Dinding-dinding Nonstruktural dalam Denah

- 85% dari panjang total dinding-dinding di setiap lantai dalam masing-masing arah utama harus menerus dalam garis sumbu yang sama sepanjang tinggi bangunan sampai pada fondasi.
- Untuk konfigurasi beraturan, dinding-dinding penyekat ruang-ruang diletakkan sesimetris mungkin, apabila tidak simetri maka harus dipenuhi persyaratan:
 - $(A1 \cdot y1) \geq 80\% \{(A3 \cdot y3) + (A5 \cdot y5)\}$ dan sebaliknya.
 - $(A2 \cdot x2) \geq 80\% (A4 \cdot x4) + (A6 \cdot x6)$ dan sebaliknya.

C. *Soft-Storey*

Struktur akan berperilaku sederhana apabila distribusi kekakuan lateral struktur untuk tiap tingkat bangunan (ditinjau dari potongan vertikal) cukup merata, tidak ada perbedaan kekakuan yang signifikan. Mekanisme *soft-storey* terjadi karena ada lantai tertentu yang mempunyai kekakuan lateral sangat kecil dibandingkan dengan lantai-lantai di atasnya. Kekakuan lantai-lantai bagian atas yang besar mengakibatkan simpangan horizontal (*horizontal displacement*) lantai di bawahnya menjadi besar. Simpangan yang besar tersebut mengakibatkan mekanisme P-delta. Bangunan-bangunan yang mempunyai tipologi tersebut antara lain hotel dan apartemen, yaitu bagian atasnya lantai-lantai tipikal, dan bagian bawah berupa podium yang berisi fasilitas publik yang lebih.

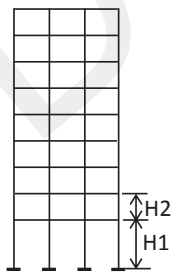
Konfigurasi yang mengakibatkan mekanisme *soft-storey*:

- Kolom-kolom di lantai dasar atau di lantai tertentu mempunyai ketinggian yang jauh lebih besar daripada kolom-kolom lantai-lantai di atasnya. Hal ini mengakibatkan kekakuan struktur di bagian bawah lebih kecil daripada kekakuan struktur di atasnya (Gambar 26a).
- Jarak kolom-kolom di lantai dasar atau lantai tertentu lebih jauh daripada lantai-lantai di atasnya (Gambar 26b). Banyak struktur bangunan bertingkat di mana kolom-kolom lantai atas tidak

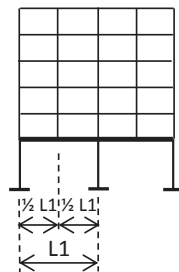
semuannya diteruskan ke fondasi sehingga diperlukan balok transfer untuk memikul kolom-kolom dari atas tersebut. Hal tersebut mengakibatkan kekakuan lateral struktur lantai bawah lebih kecil daripada kekakuan lateral struktur di atasnya.

- *Shear wall* atau *braced frame* di lantai-lantai atas tidak menerus ke fondasi (Gambar 26 c).
- Penempatan elemen-elemen nonstruktural yang mempunyai kekakuan dan berat berarti (seperti pasangan bata dan sejenisnya) lebih banyak di lantai atas daripada lantai di bawahnya. Konfigurasi ini mengakibatkan dua hal:
 - 1) menambah kekakuan lateral struktur bagian atas menjadi lebih besar daripada kekakuan lateral struktur bagian bawah;
 - 2) berat elemen-elemen nonstruktural tersebut mengakibatkan gaya inersia yang besar bekerja di lantai-lantai atas.

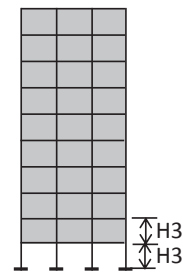
Konfigurasi dalam empat poin di atas mengakibatkan simpangan horizontal kolom lantai di bawah menjadi besar, akibatnya pada kolom tersebut bekerja momen eksentris M_e yang signifikan yang dihasilkan dari gaya gravitasi pada kolom (P) dikalikan eksentrisitasnya (Δ) terhadap tumpuan di bawahnya. M_e tersebut menambah besar momen kolom yang di dalamnya sudah bekerja momen akibat beban gravitasi pada kolom di salah satu sisi bangunan. Perilaku ini disebut dengan mekanisme P-Delta ($P-\Delta$) (Gambar 27).



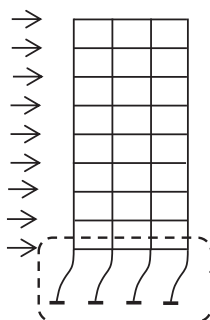
Gambar 26a. Tinggi Kolom Lantai Dasar Jauh Lebih Besar daripada Lantai di Atasnya



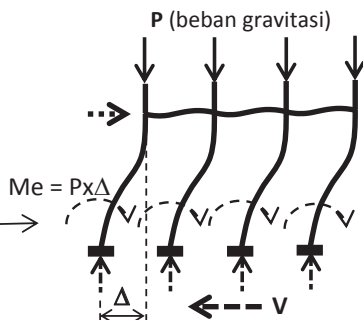
Gambar 26b. Jarak Kolom Lantai Dasar Lebih Besar daripada Lantai di Atasnya



Gambar 26c. Banyak Dinding Nonstruktural di Bagian Atas



Gambar 27a. Mekanisme *Soft-Storey*



Gambar 27b. Mekanisme $P-\Delta$

Kasus 2. Olive View Hospital yang Runtuh Karena *Soft-Storey*

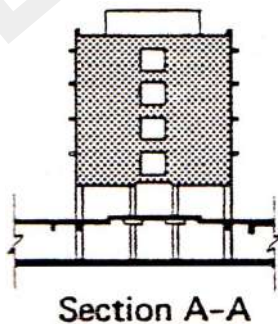


Gambar 28a.

Birds Eye View Olive View Hospital

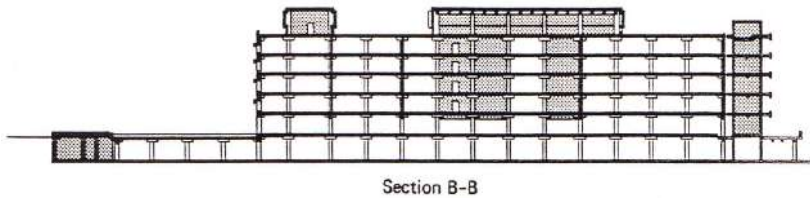
<http://grammalei.com/blast-from-the-past/where-were-you-february-9th-1971/>

#jp-carousel-5313, diunduh Mei 2019



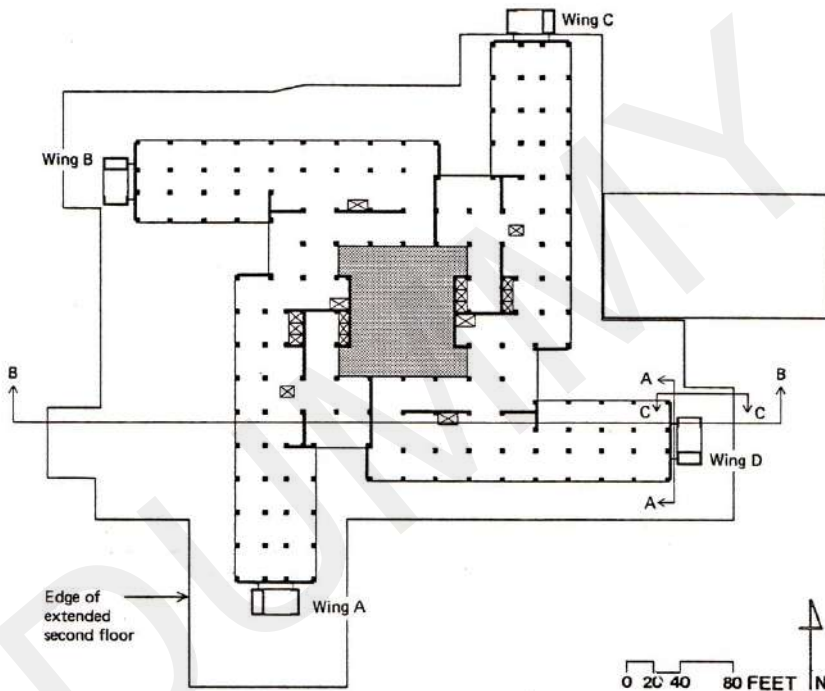
Gambar 28b. Potongan Melintang Olive View Hospital

Sumber: (Arnold, 1982)



Gambar 28c. Potongan Memanjang Olive View Hospital

Sumber: (Arnold, 1982)



Gambar 28d. Denah Tata Letak Struktur Lantai 3 Olive View Hospital

Sumber: (Arnold, 1982)

Olive View Hospital berada di San Francisco, mengalami keruntuhan setelah digoncang gempa San Fernando pada 2 September 1971. Ketinggian bangunan adalah 6 lantai dengan denah bangunannya terdiri dari 4 buah sayap yang mengelilingi *court yard* di tengah. Sayap-sayap bangunan tersebut menghasilkan konfigurasi bangunan berlengan (Gambar 28a dan 28d). Sistem strukturnya adalah kolom dengan pelat rata beton bertulang. Di lantai-lantai 3 ke atas terdapat

beberapa buah *shear wall* yang tidak menerus sampai ke lantai dasar (Gambar 28b s.d. 28d). Di setiap ujung sayap bangunan terdapat tower tangga, namun menurut Jankowski (2009) tower tersebut berdiri bebas (*free standing*) dan tidak memperkaku struktur sayap bangunan.



Gambar 29a. Olive View Hospital, San Fernando, California
Tower Tangga Wing C Miring Karena Pounding

<http://library.open.oregonstate.edu/earthquakes/wp-content/uploads/sites/4/2016/10/12-10-684x1024.jpg>, diunduh Juli 2022



Gambar 29b. Olive View Hospital Pounding dng Core, San Fernando, California, Tower Tangga Wing A, B, D Runtuh Karena Pounding
<https://quake06.stanford.edu/centennial/tour/images/10-06-IMG0036.jpg>, diunduh Mei 2019

Kolom dan pelat lantai di lantai 1 dan 2 membentuk struktur rangka penahan momen yang sangat fleksibel dibandingkan dengan struktur di lantai 3 ke atas yang mempunyai beberapa buah *shear wall*. Diskontinuitas kekakuan vertikal tersebut mengakibatkan terjadinya mekanisme *soft-storey* pada lantai 1 dan lantai 2 dan mengakibatkan kerusakan parah kolom-kolom di lantai 1 dan 2 (Gambar 29a dan 29b).

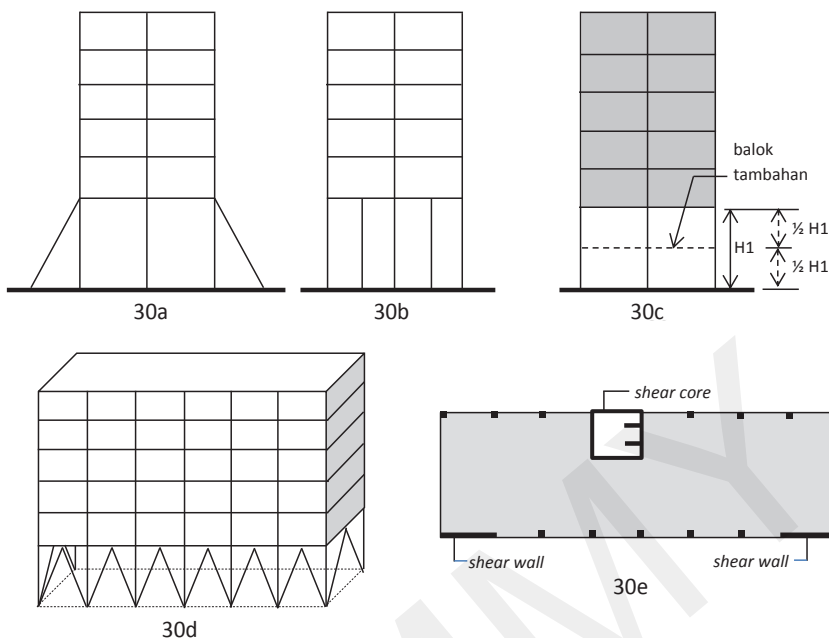
Kerusakan/keruntuhan tower-tower tangga yang berdiri bebas di ujung lengan setiap sayap terjadi karena *pounding* (benturan) antara bangunan sayap dengan tower tangga. Benturan terjadi karena pergerakan dinamik yang berbeda antara bangunan sayap dengan tower tangga, simpangan horizontal bangunan sayap sangat besar karena *soft-storey* dan lebar siar pemisah tidak cukup besar (Jankowski, 2009).

Penyelesaian Masalah *Soft-Storey*

Penyelesaian masalah *soft-storey* adalah dengan memperkaku tingkat yang lunak.

- Menempatkan bracing/*shear wall* pada tingkat yang lunak dengan tata letak yang relatif beraturan.
- Menambah jumlah kolom sehingga jarak kolom lebih rapat dari tingkat yang lebih kaku, selama hal ini memungkinkan dari segi arsitektur.
- Menambahkan balok untuk memperpendek tinggi kolom pada tingkat yang “*soft*” sehingga tinggi kolom pada tingkat tersebut menjadi sama atau hampir sama dengan tingkat yang kaku, selama memungkinkan dari segi arsitektur.
- Memperkaku (mempertebal) *shear wall* atau *shear core* di lantai yang lunak sehingga porsi rangka menahan gaya geser gempa pada lantai *soft* tersebut menjadi lebih kecil.
- Konfigurasinya tetap *soft-storey* tidak diubah, dimensi dan detail-detail struktur dikontrol dalam analisis dan desain struktur dalam batas yang dapat diterima. Pemecahan ini menyebabkan struktur bangunan tidak ekonomis.

Menambah bracing di lantai lunak dapat dilakukan dengan berbagai pola, misalnya seperti Gambar 30a dan 30d. Menambah kolom di lantai lunak seperti Gambar 30b, penambahan kolom kemungkinan tidak populer bagi arsitek. Menambahkan balok seperti Gambar 30c dapat dilakukan tanpa harus menambah lantai, dengan penambahan balok tersebut tinggi kolom di lantai lunak diperpendek sehingga menjadi lebih kaku. Kalau dalam desain arsitektur ada *shear wall* dan *shear core* (seluruh tinggi bangunan), *shear wall* atau *shear core* di lantai lunak dapat diperkaku dengan mempertebal dinding *shear wall* atau *shear core* tersebut.



Gambar 29. Beberapa Alternatif Penyelesaian Konfigurasi *Soft-Storey*

Pembatasan Konfigurasi *Soft-Storey*

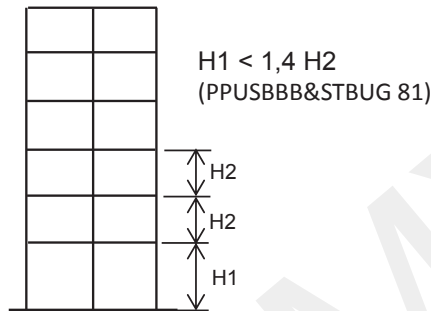
Pembatasan perbedaan kekakuan dinding nonstruktural antar tingkat:

- Panjang total tembok-tembok tinggi penuh di satu tingkat $> 75\%$ panjang total tembok-tembok tinggi penuh tingkat di atasnya (PPUSBBB&STBUG 81)

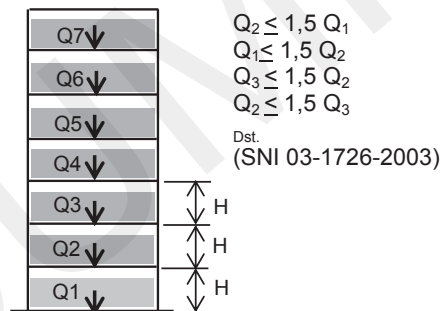
Pembatasan kekakuan antartingkat.

- Tinggi kolom lebih kecil atau sama dengan 1,4 tinggi kolom lantai di atasnya (Gambar 31).
- Kekakuan lateral suatu tingkat $\geq 75\%$ kekakuan lateral tingkat di atasnya.
- Kekakuan lateral suatu tingkat $\geq 80\%$ kekakuan lateral rerata 3 tingkat di atasnya.

- 85% panjang total tembok pada masing-masing arah harus menerus ke fondasi dalam garis sumbu yang sama (SNI 03-1726-2003).
- Setiap lantai tingkat memiliki berat tidak lebih dari 150% berat tingkat di atasnya maupun di bawahnya (Gambar 32). Berat atap maupun rumah atap tidak perlu memenuhi persyaratan ini.



Gambar 31. Pembatasan Perbedaan Tinggi Antartingkat

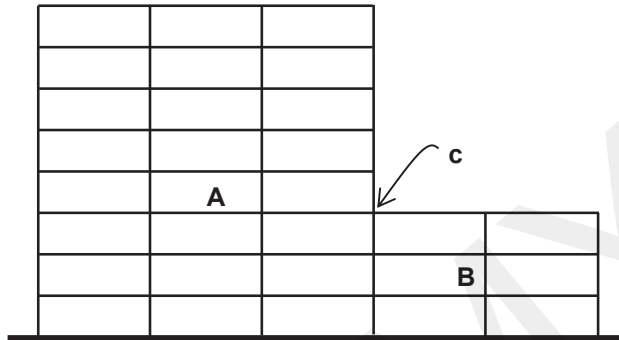


Gambar 32. Pembatasan Perbedaan Berat Antartingkat

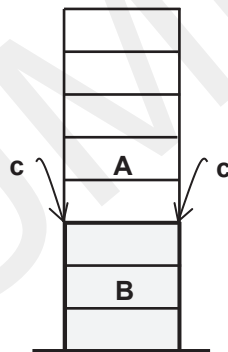
D. Setback

Ada penonjolan yang ekstrem di bagian bawah pada potongan vertikal massa bangunan, antara podium dan tower. Akibat penonjolan podium yang besar, terjadi pemusatan gaya geser yang signifikan pada kolom atau diafragma di tempat pertemuan podium dan tower tersebut. Pemusatan gaya geser terjadi karena struktur podium lebih kaku dari

pada struktur tower, sehingga waktu getar struktur podium lebih pendek dibandingkan waktu getar struktur tower. Kolom dan diafragma di tempat pertemuan tersebut akan berusaha menyesuaikan getaran kolomnya dengan kedua waktu getar, akibatnya terjadi gaya geser horizontal terpusat yang besar.



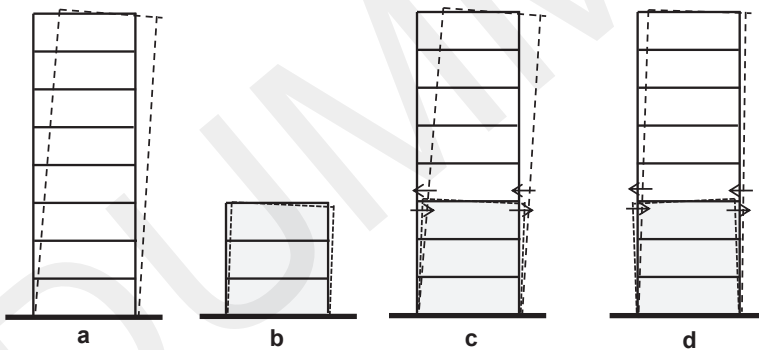
Gambar 33a. *Setback* Tampak Samping Bangunan



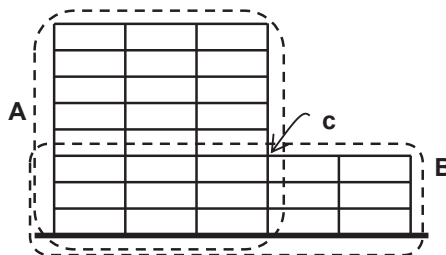
Gambar 33b. *Setback* Tampak Depan Bangunan

Gambar 33a dan 33b menunjukkan tampak samping dan tampak depan bangunan dengan struktur rangka yang mempunyai konfigurasi *setback*. Gambar 34a menunjukkan kecenderungan deformasi struktur rangka bagian A, Gambar 34b menunjukkan kecenderungan deformasi struktur rangka bagian B, masing-masing dilihat dari arah tampak depan. Struktur rangka bagian A lebih tinggi dan fleksibel dari bagian B dan mempunyai waktu getar yang panjang, sedangkan struktur rangka bagian B lebih pendek dan kaku mempunyai waktu getar yang

pendek. Deformasi di puncak bangunan bagian A lebih besar daripada deformasi di puncak bangunan bagian B. Pada pertemuan bagian A dan bagian B di titik c rangka bagian A dan B merupakan satu kesatuan, maka masing-masing bagian berusaha saling memaksakan deformasi sesuai dengan besarnya deformasi dan arah gerakan masing-masing, sehingga terjadi pemusatan gaya geser di titik c tersebut (Gambar 34c dan d). Hal tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut: ketika pada awal pergerakan, masing-masing bagian bergerak ke kanan (Gambar 34c), namun di pertemuan c pergerakan tersebut tidak harmonis karena deformasi masing-masing bagian berbeda. Selanjutnya ketika bagian B yang waktu getarnya lebih pendek sudah bergerak ke kiri, bagian A masih berada di kanan (Gambar 34d). Hal tersebut yang mengakibatkan terjadinya pemusatan gaya geser dan terjadi bertubi-tubi sampai gerakan berhenti. Uraian yang sama juga berlaku untuk *setback* pada tampak samping, bagian A dan B ditinjau seperti Gambar 35.

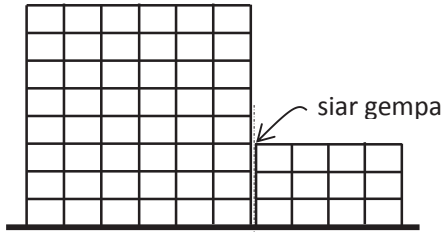


Gambar 34. a. Deformasi Bangunan A; b. Deformasi Bangunan B; c. dan d. Gaya Geser Terpusat Karena Perbedaan Waktu Getar

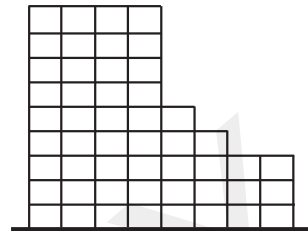


Gambar 35. Bagian A dan B pada Tampak Samping Bangunan *Setback*

Penyelesaian *setback* dapat dilakukan dengan memberi siar pemisah struktur seperti penyelesaian bangunan berlengan (Gambar 36a). Penyelesaian pada Gambar 36b tetap menghasilkan konfigurasi yang tidak beraturan, namun peralihan lebar bentang lantai tidak terlalu mendadak sehingga besarnya gaya geser terpusat berkurang.

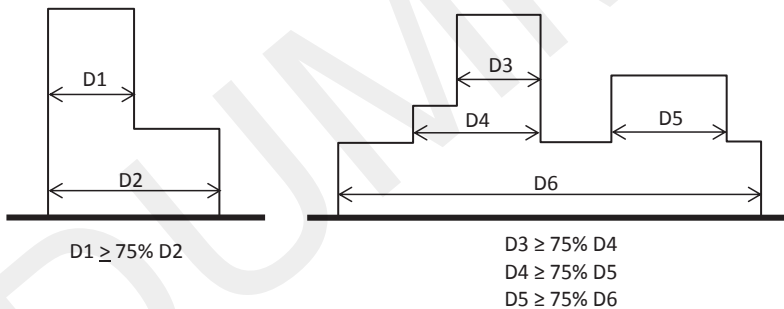


Gambar 36a.
Pemecahan *Setback* dengan Siar



Gambar 36b. Pemecahan
Setback dengan Loncatan
Bidang Muka Bertahap

Pembatasan Konfigurasi *Setback*



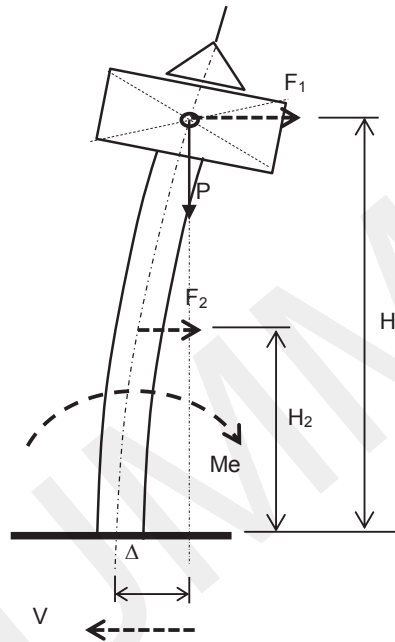
Gambar 37. Pembatasan *Setback*

E. *Invert Setback*

Invert setback adalah konfigurasi potongan bangunan yang merupakan kebalikan dari *setback*, yaitu bagian atas bangunan menonjol lebih lebar daripada bagian bawah.

Problem struktural konfigurasi ini adalah berat massa besar berada di atas sehingga titik berat massa menjadi tinggi. Bila bekerja gaya geser gempa (V), maka resultan gaya inersia (F_1 dan F_2) bekerja di

titik berat massa yang jauh dari tumpuan (fondasi) sehingga menghasilkan momen (M) yang besar. Momen besar cenderung mengakibatkan deformasi (Δ) menjadi besar dan eksentrisitas antara titik berat massa terhadap titik tumpuan juga besar. Beban massa bekerja di titik berat massa, maka karena ada eksentrisitas yang besar akan terjadi mekanisme $P-\Delta$.

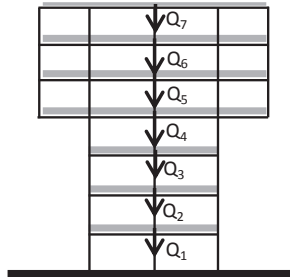


Gambar 38. Mekanisme $P-\Delta$ pada Konfigurasi *Invert Setback*

Pembatasan Konfigurasi *Invert Setback*

Dengan acuan pembatasan berat tiap lantai tidak lebih besar 150% dari lantai di atas maupun di bawahnya (SNI 03-1726-2003), dan dengan asumsi berat per m^2 beban hidup maupun beban mati tiap lantai seragam, maka sebagai acuan awal yang kasar: luas tiap lantai tidak lebih besar 150% dari lantai di atas maupun di bawahnya.

Acuan pembatasan ini hanya untuk perkiraan awal saja dan memang tidak tepat karena berat per m^2 tiap lantai pada umumnya tidak seragam.



Gambar 39. Pembatasan *Invert Setback*

Penyelesaian *Invert Setback*

- Untuk menara diselesaikan dengan mengontrol kekuatan dan kekakuan struktur dalam perancangan struktur.
- Untuk bangunan gedung dilakukan dengan menambahkan *shear wall/shear core* ke masing-masing arah sumbu denah.

F. Struktur Bangunan Langsing

Proporsi Potongan Vertikal yang Pipih dan Bangunan Sangat Tinggi

Struktur yang tinggi dan langsing mempunyai waktu getar yang panjang (dilihat dari diagram spektrum respons), bila menerima beban gempa akan mengalami deformasi lateral yang relatif besar sehingga dapat mengakibatkan efek P-Delta yang cukup berarti (SNI 03-1727-2003). Pada Gambar 40, reaksi tumpuan terhadap beban gravitasi adalah gaya tekan -RC1 (ke atas) pada kedua buah kolom, reaksi tumpuan terhadap beban lateral pada kolom di sisi beban adalah gaya tarik +RT2 (ke bawah) sedangkan reaksi tumpuan terhadap beban lateral pada kolom di seberangnya adalah gaya tekan -RC2 (ke atas). Apabila proporsi bangunan langsing dengan aspek ratio H/D besar, maka gaya tekan (-C2) dan gaya tarik (+T2) pada tumpuan akibat momen menjadi besar. Kemungkinan yang terjadi adalah (Gambar 40):

1. Apabila gaya tekan gravitasi (C1) pada tumpuan lebih besar daripada gaya tarik akibat momen (T2), maka jumlah akhirnya pada satu sisi gaya aksial tekan pada tumpuannya menjadi kecil

dan sisi yang lain gaya aksial tekan pada tumpuannya bertambah besar.

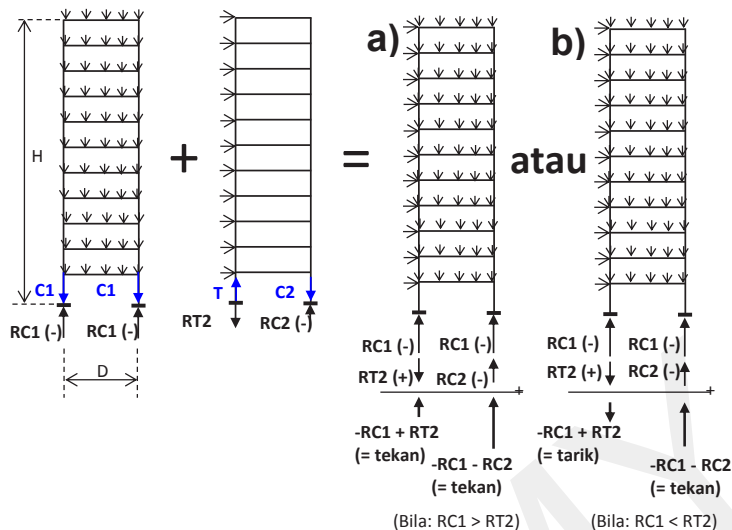
2. Apabila gaya tekan gravitasi C_1 pada tumpuan lebih kecil dari gaya tarik akibat momen, maka jumlah akhirnya pada satu sisi gaya aksial tekan tumpuannya bertambah besar dan sisi lain gaya aksial tumpuannya menjadi tarik.

Semakin besar aspek ratio H/D , gaya aksial tekan dan tarik akibat momen semakin besar. Dari dua kondisi a dan b, jumlah gaya tekan pada kolom di salah satu sisi selalu bertambah besar, hal ini menambah potensi terjadi tekuk pada kolom. Pada kondisi b, salah satu sisi tumpuan mengalami gaya tarik sehingga mengakibatkan tumpuan mendapat gaya angkat ke atas, hal ini tidak menguntungkan karena stabilitas struktur bangunan mengandalkan hanya pada sambungan antara kolom dengan fondasi dan pada kapasitas fondasi untuk melawan gaya angkat.

Selain uraian di atas, bangunan sangat langsing atau sangat tinggi mempunyai waktu getar panjang, maka respons percepatannya kecil (dari diagram spektrum respon) sehingga dalam perencanaan (bila menggunakan analisis beban statik ekuivalen) besarnya gaya-gaya yang bekerja juga kecil. Namun bangunan sangat langsing cenderung berperilaku sangat dinamis, maka pada mode getar tertentu ada potensi bagian struktur bangunan tertentu di tingkat tertentu mengalami resonansi getaran dan terjadi amplifikasi gaya dalam yang sangat besar dan tidak diprediksi dalam perencanaan. Oleh karena itu, untuk struktur tidak beraturan analisis beban gempa statik ekuivalen tidak diperkenankan dan harus dianalisis dengan analisis dinamis.

Pembatasan ketinggian dan proporsi bangunan:

- Tinggi bangunan maksimal 40m atau 10 lantai.
- Proporsi $H/D = 3$



Gambar 40. Gaya Reaksi Tumpuan pada Bangunan Langsing

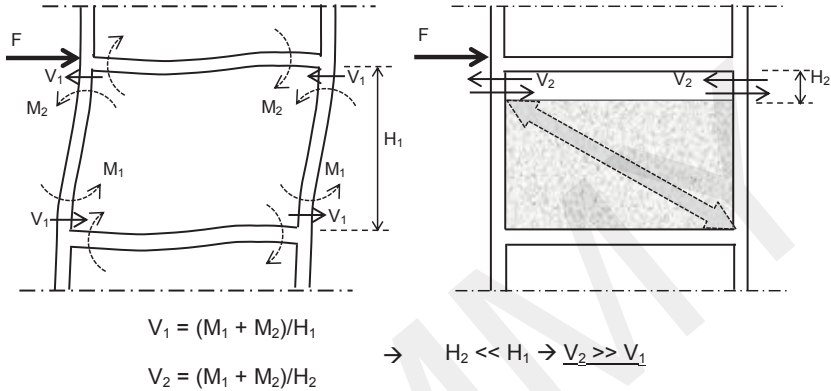
Penyelesaian:

- Untuk menara diselesaikan dengan mengontrol kekuatan dan kekakuan struktur dalam perancangan struktur.
- Untuk bangunan:
 1. Mengontrol kekuatan dan kekakuan struktur dalam perancangan struktur.
 2. Menambahkan elemen pengaku: bracing, core atau shear wall, atau rangka momen yang kaku.

G. *Short Column* (Kolom yang Diperpendek)

Short column adalah mekanisme keruntuhan kolom yang terjadi karena pemusatan gaya geser yang besar pada kolom. Pemusatan gaya geser tersebut disebabkan oleh penempatan elemen nonstruktural atau balok struktural di dalam rangka pemikul momen (RPM) yang penempatannya mengakibatkan perubahan perilaku kolomnya. *Short column* bisa dikatakan sebagai “kolom yang diperpendek” yang sudah dirancang dengan tinggi tertentu, menjadi pendek karena pemasangan elemen nonstruktural atau balok di dalam RPM tersebut.

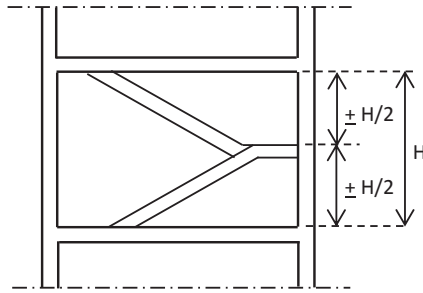
Penempatan dinding yang tidak penuh sampai ke balok di atasnya memperkuat kolom yang asalnya panjang menjadi pendek (Gambar 41). Hal itu mengakibatkan korelasi antara gaya geser dan momen kolom pada kolom RPM akibat gaya gempa berubah. Dengan momen yang sama, gaya geser pada kolom yang diperpendek menjadi lebih besar dibanding gaya geser pada panjang kolom yang asli.



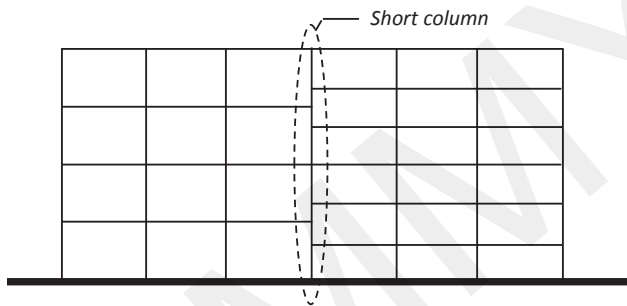
Gambar 41. Mekanisme *Short Column*

Elemen nonstruktural lain yang dapat mengakibatkan *short column* adalah tangga. Balok bordes tangga yang terikat di kolom mengakibatkan panjang kolom terbagi menjadi dua, hal ini dapat mengakibatkan mekanisme *short column* (Gambar 42a).

Bangunan seperti *shopping mall* pada umumnya gedung parkirnya bergabung dengan bangunan *mall*. Tinggi lantai ke lantai bangunan parkir lebih kecil daripada tinggi lantai ke lantai *mall* sehingga balok bangunan parkir tidak sama levelnya dengan balok *mall* dan memperpendek tinggi kolom (Gambar 42b). Bila bangunan tersebut tidak dipisah dengan siar maka pemendekan kolom tersebut berpotensi menyebabkan mekanisme *short column*.



Gambar 42a. Tangga Memperpendek Kolom



Gambar 42b. Balok Tidak Selevel Memperpendek Kolom

Penyelesaian masalah *short column*.

- Struktur RPM yang level baloknya berbeda, dipisahkan dengan siar gempa pada pertemuan rangka yang berbeda level baloknya.
- Dinding yang tidak penuh sampai ke balok dipisahkan dari kolom dengan siar, kemudian siar diisi dengan material lunak (Gambar 45). Agar dinding tersebut dapat menahan beban muka, di tepi kiri kanan dinding dipasang kolom praktis, dan di atas dinding dipasang balok praktis. Kolom praktis tersebut dihubungkan secara kaku (jepit) dengan balok yang memikulnya.
- Bordes tangga dipisahkan secara lateral terhadap kolom dengan menempatkan pelat bordes di atas balok penumpu bordes (Gambar 46a). Apabila pelat tangga dan bordesnya menyatu dengan struktur lantai bawah dan struktur lantai atas, akan membentuk *truss* yang dapat memperkaku struktur RPM di daerah tersebut. Untuk

mengatasi hal tersebut, bordes dipisah menjadi dua agar masing-masing bagian tangga dapat bergerak bebas tidak menghambat pergerakan lantai atas dan bawah (Gambar 46a). Balok penumpu bordes dapat memperkaku RPM, maka salah satu tumpuannya dibuat tumpuan rol (Gambar 46b).

- Menggunakan struktur rangka gravitasi-*shear wall/bracing* dan melimpahkan seluruh beban gempa lateral pada *shear wall/bracing*nya.

Contoh kerusakan bangunan karena mekanisme *short column*.



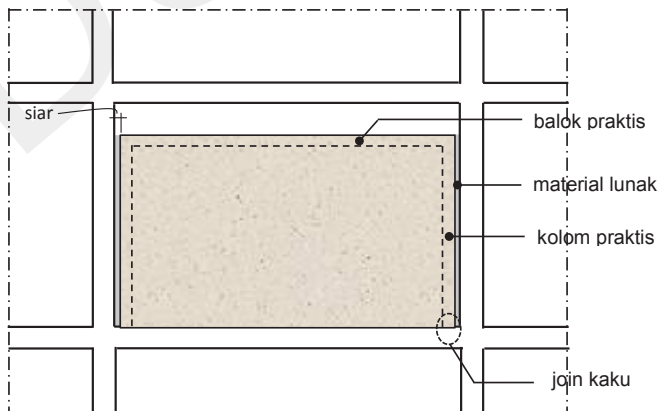
Gambar 43. Kegagalan *Short Column*

<http://inderc.blogspot.com/2012/05/captive-and-short-column-effects.html>, diunduh Juli 2022

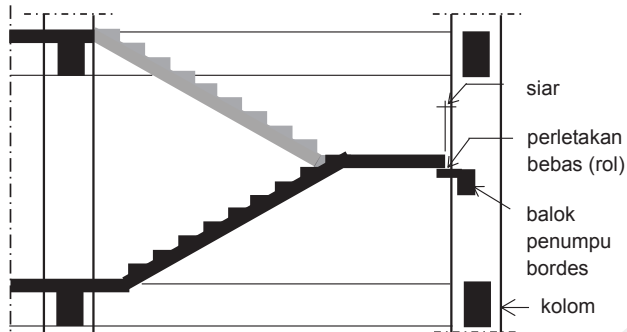


Gambar 44. Kegagalan *Short Column*

http://db.concretetealition.org/static/data/4-illustration-of-damage/NZ005_Damage_1.jpg, diunduh Juli 2022

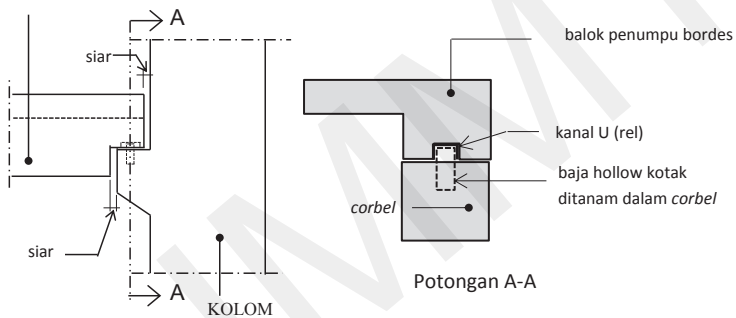


Gambar 45. Detail Siar pada Dinding Tinggi Tidak Penuh

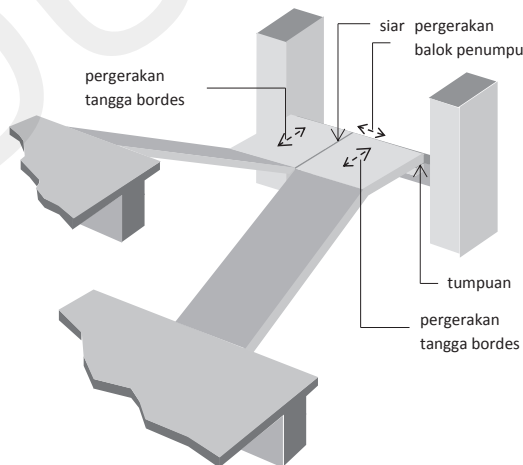


Gambar 46a. Detail Pemisahan Tangga

BALOK PENUMPUP BORDES (tampak memanjang)



Gambar 46b. Detail Tumpuan Balok Penumpu Bordes



Gambar 46c. Perspektif Detail Pemisahan Tangga

H. Kolom Lemah-Balok Kuat (*Strong Beam-Weak Column*)

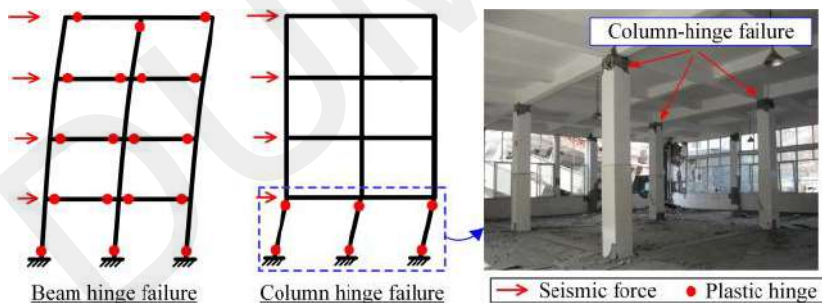
Struktur Rangka Pemikul Momen beton bertulang yang didesain di wilayah gempa memerlukan kekuatan dan daktilitas, dengan tujuan ketika mengalami gempa kecil kolom tetap kuat secara elastik dan tidak mengalami kerusakan sama sekali, sedangkan terhadap gempa kuat mampu mengalami perilaku inelastik sebelum terjadi keruntuhan kolom. Kondisi yang diharapkan tersebut dinyatakan sebagai kolom kuat-balok lemah. Struktur daktil mampu mengalami fase inelastik yang panjang ketika menerima beban berlebih secara berulang, namun mengalami kerusakan/deformasi permanen (komponen tersebut tidak dapat kembali pada bentuk asalnya lagi), kerusakan tersebut dikenal sebagai sendi plastis. Pembentukan sendi plastis tersebut dimaksudkan agar struktur melepaskan energi (disipasi energi) dari beban yang berlebih. Hal yang harus dipastikan adalah bahwa sendi plastis harus terjadi di balok dan bukan di kolom agar kolom tidak runtuh. Keruntuhan kolom, apabila terjadi di lantai-lantai atas akan mengakibatkan lantai-lantai tersebut menimpa lantai-lantai di bawahnya secara berurutan dari atas ke bawah sehingga seluruh bangunan bisa mengalami keruntuhan (disebut efek "*pancake*").

Kerusakan atau keruntuhan bangunan yang terjadi karena mekanisme kolom lemah-balok kuat (*strong beam-weak column*) berkaitan langsung dengan desain struktur (Gambar 47a), yaitu balok yang didesain lebih kuat daripada kolom. Kondisi lain seperti penempatan komponen nonstruktural misalnya dinding yang kaku dan kuat (beton atau pasangan bata yang kuat) di atas balok dapat memperkuat dan memperkuat balok tersebut (Gambar 47b).

Bentuk kerusakan kolom akibat mekanisme kolom lemah-balok kuat yang disebabkan oleh penempatan dinding kaku di atas balok mirip dengan kerusakan *short column*, namun mekanisme yang menyebabkannya berbeda. Kerusakan *short-column* terjadi karena gaya geser pada kolom menjadi besar karena kolom diperpendek dan

menjadi kaku, sedangkan kerusakan kolom lemah-balok kuat terjadi karena balok lebih kuat daripada kolom; atau karena balok diperkaku oleh dinding nonstruktural di atasnya sehingga ketika menerima gaya geser lateral, deformasi balok tersebut terhambat dan menjadi kecil sehingga deformasi di kolom menjadi lebih besar.

Penyelesaian terhadap konfigurasi kolom lemah-balok kuat dapat dilakukan dengan menerapkan desain kapasitas (*capacity design*) yang benar oleh perancang struktur; atau memisahkan dinding tambahan dengan siar yang diisi material lunak terhadap kolom seperti penyelesaian *short column*; atau menggunakan material dinding pengisi yang tidak cukup kaku memperkaku balok sehingga akan rusak dahulu ketika terjadi gempa kuat. Kegagalan struktur karena balok kuat kolom lemah dapat terjadi di lantai mana saja, kalau terjadi di lantai dasar dan terjadi sendi plastis di puncak dan dasar kolom, maka dapat terjadi keruntuhan total bangunan (Gambar 47a). Sementara itu, kalau terjadi di lantai-lantai atas, lantai atas yang runtuh akan menimpa lantai-lantai di bawahnya sehingga ikut runtuh dan terjadi keruntuhan total bangunan (Gambar 47b).



Gambar 47a. Kerusakan Kolom Karena Balok Lebih Kuat dari Kolom

<https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0141029616314882-gr1.jpg>, diunduh Mei 2022



Gambar 47b. Keruntuhan Total Bangunan Karena Mekanisme “Pancake”

<https://image.slidesharecdn.com/behaviorofrcstructureunderearthquakeloading-150221015017-conversion-gate01/95/behavior-of-rc-structure-under-earthquake-loading-8-638.jpg?cb=1424483635>, diunduh November 2021

I. Konstruksi Siar Gempa

Pemisahan struktur bangunan dengan siar gempa bertujuan agar struktur bangunan yang sudah terpisah berperilaku independen terhadap getaran gempa, dengan harapan masing-masing struktur berperilaku lebih sederhana. Setelah adanya pemisahan tersebut, deformasi masing-masing struktur bangunan bisa berbeda. Hal yang dihindari adalah terjadinya benturan (*pounding*) antarbangunan. Banyak kejadian bangunan berdampingan berbenturan satu sama lain ketika terjadi gempa, sehingga salah satu bangunan mengalami keruntuhan dan bangunan yang lainnya mengalami kerusakan. Oleh karena itu, diperlukan lebar yang cukup besar untuk menghindarkan terjadi benturan antarbangunan tersebut.

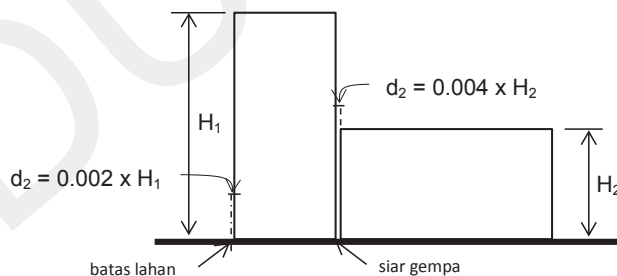
Pedoman perencanaan untuk struktur beton bertulang biasa dan struktur tembok bertulang untuk gedung 1981 menetapkan lebar siar sebagai berikut.

- Jarak pemisah bangunan terhadap batas lahan adalah 0,002 ($1/500$) kali tinggi seluruh bangunan, atau minimal 3,75 cm, dipilih yang terbesar.

- Lebar siar gempa adalah 0,004 (1/250) kali tinggi bangunan pada posisi yang dapat berbenturan, atau minimal 7,5 cm dipilih yang terbesar.

Pembatasan tersebut didasarkan pada pembatasan defleksi maksimal bangunan, yaitu sebesar 0,002 (atau 1/500) kali tinggi bangunan. Bila bangunan yang berada di perbatasan masing-masing mengikuti batasan tersebut, jarak antarbangunan di perbatasan lahan tersebut menjadi $2 \times 0,002 = 0,004$ kali tinggi bangunan. Penjelasan yang sama berlaku juga untuk pembatasan lebar siar gempa pada bangunan.

Struktur yang dipisahkan dengan siar gempa benar-benar harus terpisah secara horizontal satu sama lain. Hal ini berlaku untuk struktur bangunan atas, sedangkan fondasi boleh disatukan secara keseluruhan, asalkan sloof atau pelat fondasi didesain dengan kekakuan yang cukup untuk menghindari terjadinya perbedaan penurunan. *Basement* dapat diperlakukan seperti fondasi dengan disatukan secara keseluruhan tanpa dipisah-pisah dengan siar gempa (Benyamin, 2017). Keuntungan menyatukan seluruh *basement* adalah mengurangi risiko kebocoran air tanah dan apabila didesain dengan sloof atau pelat yang cukup kaku dapat menghindarkan terhadap perbedaan penurunan fondasi.

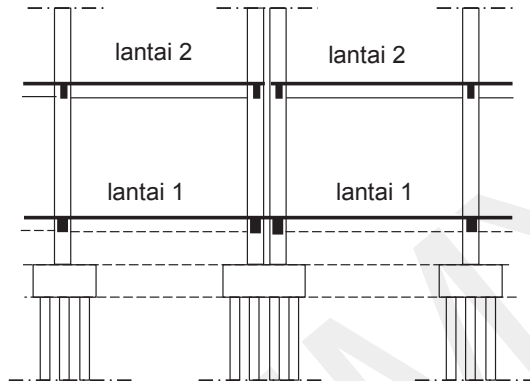


Gambar 48. Pembatasan Lebar Siar Gempa

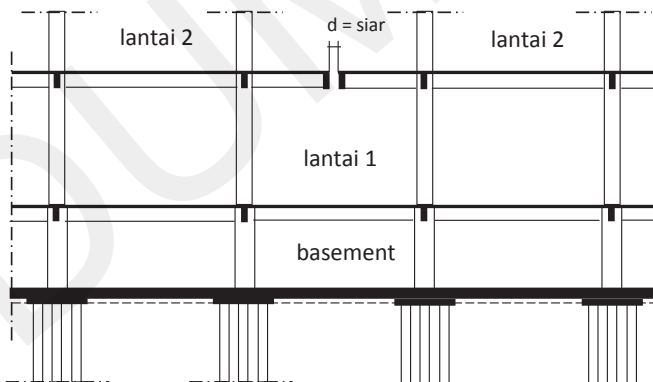
Fondasi atau *basement* yang menyatu berada di dalam tanah dapat dianalogikan sebagai landasan maket, sedangkan struktur atas yang terpisah-pisah dengan siar dianalogikan sebagai maket-maket struktur

bangunan yang terpisah-pisah. Bila landasan tersebut digerakkan bolak-balik, maka maket-maket akan bergetar sendiri-sendiri secara independen.

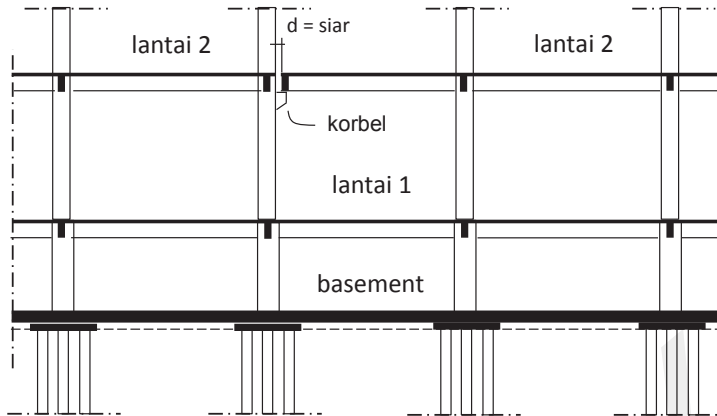
Contoh penyelesaian pertemuan rangka yang dipisahkan dengan siar:



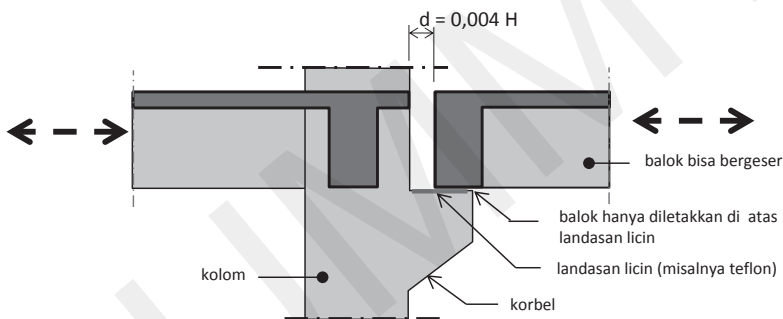
Gambar 49a. Konstruksi Pemisahan Struktur dengan 2 Kolom Berdampingan, Fondasi Tidak Dipisahkan



Gambar 49b. Konstruksi Pemisahan Struktur dengan Kantilever, Basement Tidak Dipisahkan



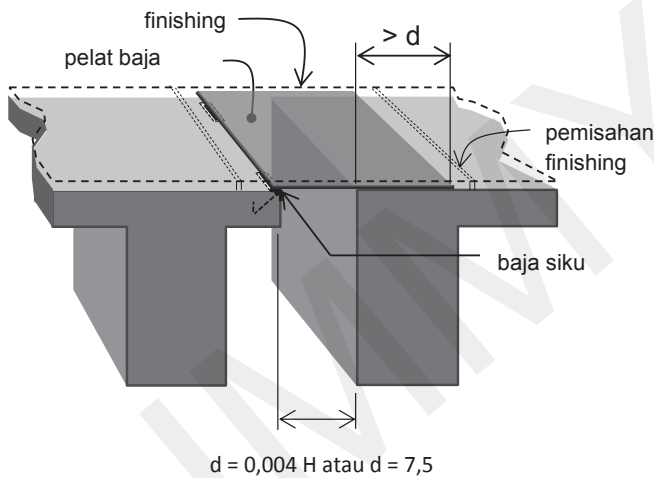
Gambar 49c. Konstruksi Pemisahan Struktur dengan Korbél, Basement Tidak Dipisahkan



Gambar 50a. Detail Siar Gempa, Konstruksi Tumpuan Balok pada Korbél

Batasan lebar siar gempa menghasilkan celah antarmassa bangunan yang lebar, maka perlu diselesaikan dengan detail konstruksi yang khusus di garis siar pada pelat lantai, agar pengguna bangunan tidak terperosok ke dalam siar tersebut. Pada prinsipnya celah siar yang lebar ditutup dengan material yang kuat untuk dibebani oleh penghuni dan perabot, salah satu material yang umum dipakai adalah pelat baja. Pelat baja tersebut dimatikan di salah satu pelat lantai dan diletakkan bebas secara lateral di lantai yang lain agar struktur bangunan yang sudah dipisahkan tersebut masing-masing dapat bergerak lateral secara independen. Konstruksi yang umum diterapkan adalah, menggunakan pelat baja yang diikat dengan jangkar di salah satu pelat lantai pada

setiap jarak sekitar 1 meter, sedangkan pelat baja pada pelat lantai yang lain diletakkan bebas secara lateral. Lebar pelat baja yang tertumpu bebas tersebut harus lebih lebar daripada lebar siar gempa agar apabila terjadi pergerakan berlawanan yang maksimal, pelat baja tersebut masih tertumpu oleh pelat lantai. Finishing lantai akan rusak apabila terjadi pergerakan lantai, kerusakan tersebut dapat diminimalkan dengan memisahkan finishing lantai dan diisi dengan material lunak seperti *sealant* (salah satu contoh pemecahan ada dalam Gambar 50b).



Gambar 50b. Detail Konstruksi Pertemuan Antar Pelat Lantai di Posisi Siar Gempa

4

DASAR-DASAR PERANCANGAN STRUKTUR DAN TEKNOLOGI BANGUNAN TERHADAP GEMPA BUMI

A. Desain Struktur Berdasarkan Kinerja

Telah dibahas dalam Bab I, bahwa gempa bumi merupakan fenomena alam yang sangat tidak terduga waktu kejadiannya maupun besarnya intensitas yang akan terjadi. Oleh karena itu, tidak realistis merancang kekuatan struktur yang tahan terhadap beban gempa besar tanpa mengalami kerusakan sama sekali, karena seberapa pun besarnya beban gempa yang diperhitungkan dalam perancangan struktur, selalu ada kemungkinan terjadi gempa yang lebih besar. Yang menjadi pertanyaan adalah gempa dengan percepatan berapa atau gempa dengan periode ulang berapa, atau berapa besar beban gempa rencana yang harus dimasukkan sebagai dasar perhitungan struktur? Hal tersebut merupakan ranah para pembuat peraturan atau standar perancangan struktur terhadap gempa di setiap negara yang rawan gempa. Indonesia mempunyai Peraturan Perencanaan Tahan Gempa Indonesia untuk Gedung 1981 (PPTGIUG 1981), SNI 03-1726-2002 dan SNI 03-726-2003, serta SNI 03-1726-2012.

PPTGIUG 1981 memperkenalkan (1) konsep daktilitas struktur; (2) konsep keruntuhan yang aman, yaitu mekanisme goyang dengan pembentukan sendi plastis dalam balok (*beam side sway mechanism*), yang mensyaratkan kolom yang lebih kuat dari balok (*strong column weak beam*); dan (3) konsep perencanaan kapasitas (*capacity design*).

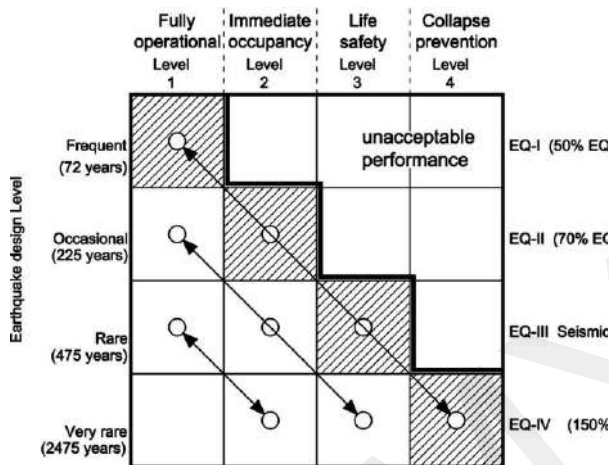
Dalam peraturan ini ditampilkan respons spektra dari gempa dengan periode ulang 200 tahun (kemungkinan terjadi 10% dalam jangka waktu kira-kira 20 tahun), setelah dibagi dengan daktilitas struktur sebesar 4. Pada SNI 03-1726-2002, respons spektra yang digunakan adalah respons spektra gempa yang kemungkinan terjadinya 10% dalam kurun waktu 50 tahun, yaitu gempa dengan periode ulang 500 tahun yang disebut gempa rencana. Desain kapasitas berdasarkan pada perencanaan berbasis kekuatan (*Strength Based Design*) seperti yang diatur dalam SNI 03-1726-2002 sedangkan kinerja (*performance*) struktur tidak menjadi sasaran perencanaan, maka kinerja struktur terhadap beban gempa besar sangat bervariasi. Pengamatan terhadap kejadian gempa besar menunjukkan bahwa perencanaan berdasarkan kekuatan telah berhasil mengurangi korban manusia menjadi sangat kecil, karena struktur tidak runtuh. Tetapi keadaan kerusakan struktur dapat sedemikian rupa sehingga gedung tersebut tidak dapat diperbaiki, dengan demikian bisnis juga berhenti, paling tidak sampai didapatkan bangunan pengganti sementara dan pulihnya infrastruktur. Hal ini memakan biaya langsung maupun tak langsung yang sangat besar.

Pendekatan perancangan struktur terhadap gempa yang dianggap bisa mengatasi kerugian ekonomis adalah pendekatan perancangan berdasarkan kinerja (*performance-based design/ P-BD*). Tingkat kinerja bangunan berdasarkan SEAOC Vision 2000:

1. Level 1 – Beroperasi penuh: tanpa kerusakan.
2. Level 2 – Segera dapat beroperasi: kerusakan minimal, mempertahankan sebagian besar kekakuan dan kekuatannya.
3. Level 3 – Keamanan jiwa: kerusakan signifikan, kehilangan kekakuan substansial, batas deformasi sebelum runtuh (desain struktur terhadap gempa didasarkan pada kondisi ini).
4. Level 4 – Pencegahan keruntuhan: kerusakan parah, korban dalam bangunan yang dalam risiko runtuh (struktur mampu bertahan tidak runtuh sampai 150% besar kekuatan gempa level 3).

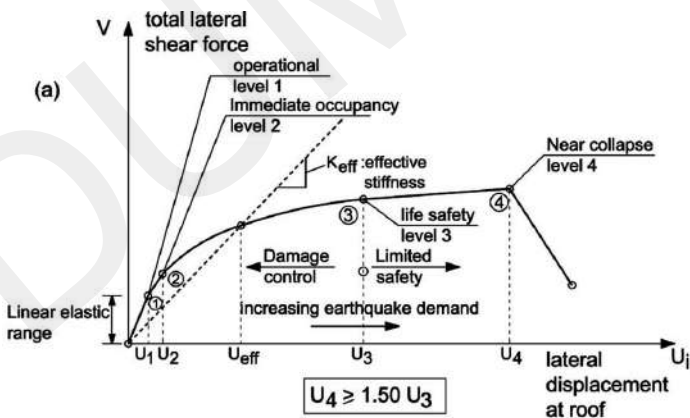
(https://www.fema.gov/media-library-data/1436903055388-0ea-f09be942e02c790440ec0322c7476/fema_p-1050-2.pdf, diunduh September 2018)

Matriks tingkat kinerja bangunan dapat dilihat dalam Gambar 51 (dari SEAOC Vision 2000).



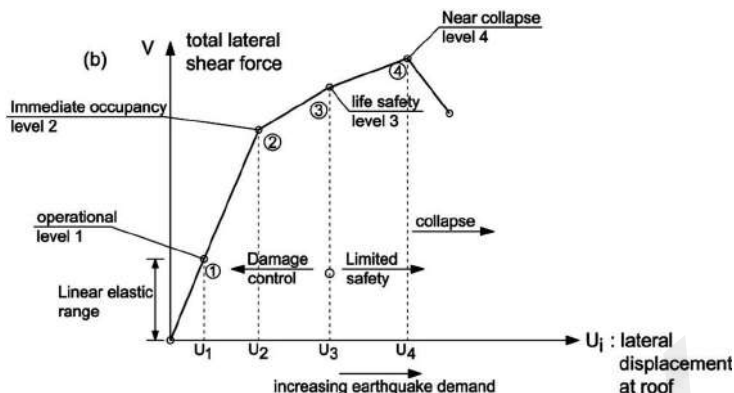
Gambar 51. Tingkat Kinerja Bangunan Berdasarkan SEAOC Vision 2000

<https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/10724/CAE-and-Performance-Based-Design-Ensures-Infrastructure-Stability-after-Seismic-Activity.aspx>, diunduh September 2018



Gambar 52a. Kurva Kapasitas untuk Beton Bertulang dengan Karakteristik Tingkat Kinerja Struktur Daktail

<https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/10724/CAE-and-Performance-Based-Design-Ensures-Infrastructure-Stability-after-Seismic-Activity.aspx>, diunduh September 2018



Gambar 52b. Kurva Kapasitas untuk Beton Bertulang dengan Karakteristik Tingkat Kinerja Struktur Getas

<https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/10724/CAE-and-Performance-Based-Design-Ensures-Infrastructure-Stability-after-Seismic-Activity.aspx>, diunduh September 2018

Pada Gambar 52a dan 52b, garis sumbu U_i menunjukkan besarnya *displacement* atap bangunan, garis sumbu V menunjukkan besarnya gaya geser lateral total pada struktur, artinya ketika bekerja gaya geser total sebesar V , maka terjadi *displacement* atap sebesar U . Garis lengkung/patah-patah menunjukkan kurva kapasitas. Garis kurva dari titik awal sampai dengan titik 1 adalah kapasitas elastik struktur berbentuk garis ini adalah linier, artinya tangen V/U selalu sama mulai dari titik 0 sampai titik 1, rentang ini disebut rentang elastik linier. Titik 1 adalah batas struktur tidak mengalami kerusakan sama sekali, di mana bangunan harus dalam keadaan dapat beroperasi dengan penuh. Perbedaan struktur yang duktail dan getas tampak pada kurva setelah melewati titik 1. Pada struktur yang duktail, kurva mulai menyimpang dari titik 1 berbentuk garis lengkung, sedangkan pada struktur yang getas, kurvanya tetap linier merupakan kelanjutan dari kurva 0-1. Struktur duktail didesain untuk mengalami perilaku inelastik setelah melewati titik 1, sedangkan struktur getas didesain dengan perilaku elastik sampai dengan titik 2. Hal tersebut menunjukkan bahwa struktur duktail boleh didesain untuk mengalami sedikit kerusakan

struktur yang dapat diperbaiki dengan segera (dengan tujuan meredam gaya gempa), sedangkan struktur getas harus didesain dalam kondisi tanpa ada kerusakan dengan gaya geser gempa yang lebih besar daripada struktur yang daktail.

Pada dasarnya ada 3 konsep kontrol kinerja struktur terhadap gempa:

1. Sistem isolasi seismik → memisahkan struktur atas terhadap komponen gaya horizontal tanah, diletakkan di dasar bangunan
2. Disipasi energi pada komponen-komponen struktur bangunan
3. Menyerap getaran dinamik pada struktur.

Implementasi secara teknologi:

- A. Konvensional, khususnya untuk kontrol dengan disipasi energi.
- B. Inovatif (Wada, 2004) yaitu dengan penggunaan alat untuk ketiga konsep kontrol.

A. Pendekatan konvensional:

- Pendekatan elastik dalam desain struktur, di mana struktur didesain kuat terhadap gaya lateral yang bekerja, khususnya untuk daerah yang tidak rawan gempa.
- Pendekatan elastik dan inelastik dalam desain struktur, di mana struktur didesain kuat terhadap gempa kecil, sedangkan terhadap gempa sedang mampu mengalami perilaku inelastik dengan mengandalkan daktilitas material dan daktilitas struktur. Bila terjadi gempa besar, struktur membentuk sendi plastis yang didesain terjadi di bagian komponen struktur tertentu di posisi yang aman terhadap keseluruhan struktur.

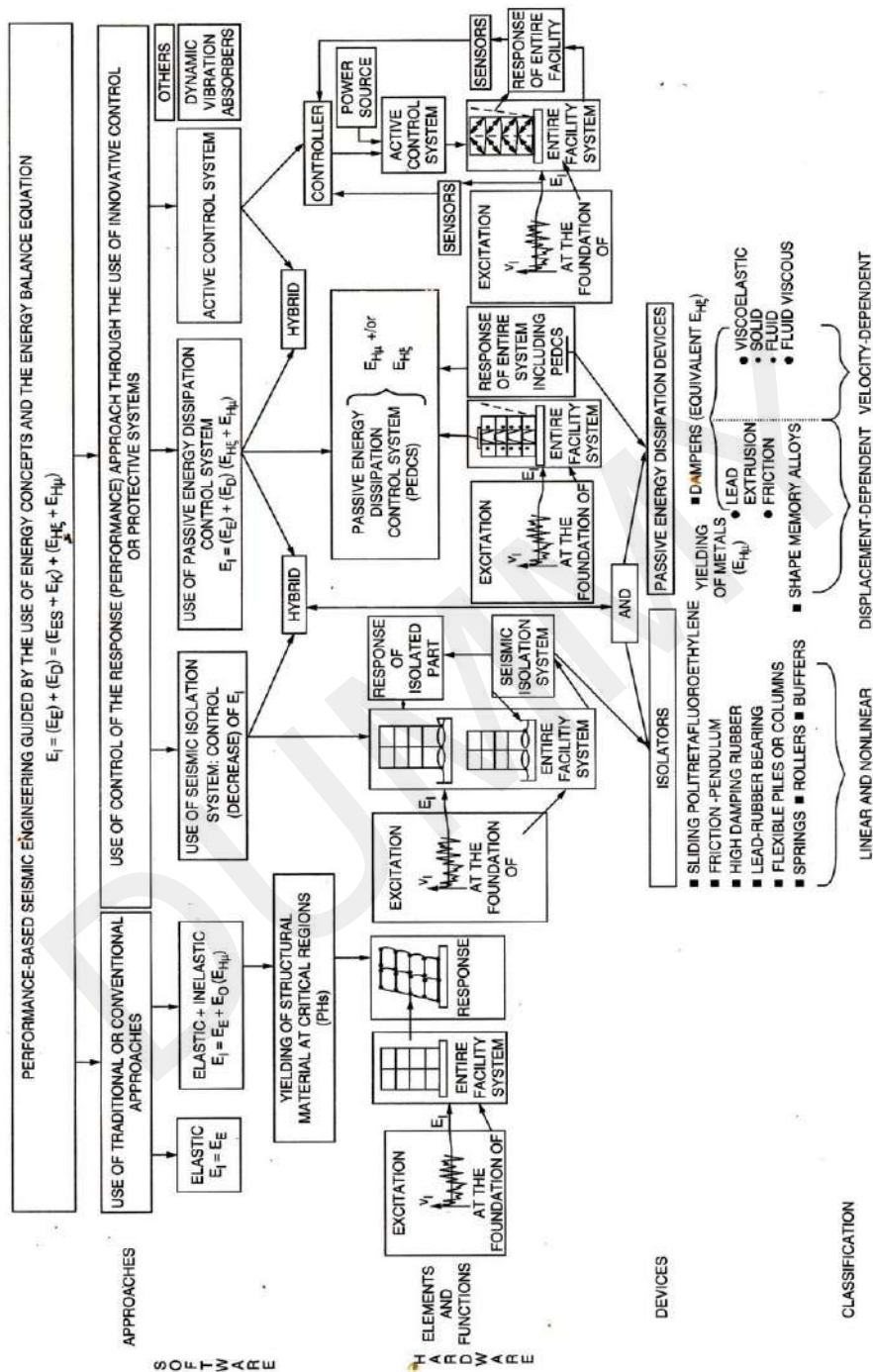
B. Pendekatan dengan menggunakan kontrol inovatif:

1. Sistem isolasi dasar berfungsi mengurangi energi masukan. Sistem ini menggunakan perangkat yang disebut isolasi-dasar atau *base-isolation*.
- 2a. Sistem kontrol disipasi energi pasif yang berfungsi melakukan disipasi energi pada komponen-komponen strukturnya. Sistem

ini menggunakan perangkat peredam pasif yang dipasang pada komponen-komponen struktur tertentu. Perangkat tersebut bekerja ketika menerima energi masukan tertentu yang melampaui kapasitas elastik struktur.

- 2b. Sistem kontrol disipasi energi aktif berfungsi melakukan disipasi energi pada komponen-komponen strukturnya. Sistem kontrol aktif tersebut akan bekerja ketika seluruh bangunan digetarkan gempa, getaran ditangkap oleh sensor diteruskan ke alat kontrol kemudian ke sistem kontrol aktif yang digerakkan oleh tenaga listrik.
3. Sistem *dynamic vibration absorber* (DVA) berfungsi untuk mengurangi amplitudo getaran sistem struktur di frekuensi tertentu, terutama yang dekat dengan frekuensi resonansi antara sistem struktur dengan sistem sekunder.

Secara skematik dapat dilihat peta strategi dan teknik P-BD yang mengacu pada konsep energi dan keseimbangan persamaan energi masukan absolut dengan energi yang disuplai.



Gambar 53. Skema Strategi dan Teknik P-BD Berdasarkan Konsep Energi

Sumber: Bertero, V. V., 1997, diadaptasi oleh Wada, Akira *et al.*, (2004)

B. Pendekatan Konvensional

Pendekatan konvensional mengandalkan daktilitas material dan daktilitas struktur untuk melakukan disipasi energi gempa dan mengakomodasi tingkatan kinerja struktur sebagai berikut.

1. Struktur didesain kuat secara elastik terhadap gempa kecil sehingga tidak terjadi kerusakan sama sekali ketika digetarkan gempa.

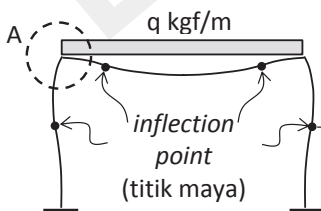
Untuk mengakomodasi keadaan *damage control limit state*, struktur didesain dapat berperilaku inelastik dengan kerusakan berarti yang dikendalikan. Perilaku inelastik mengakibatkan pada beberapa komponen struktur terbentuk sendi-sendi plastis. Sendi-sendi plastis tersebut didesain agar terjadi di balok (*beam side sway mechanism*), dengan konsep kolom lebih kuat dari balok (*strong column weak beam*), dan dilakukan kontrol deformasi struktur untuk membatasi kerusakan struktur.

2. Untuk mengakomodasi *life safety*, deformasi struktur didesain berdasarkan gempa 2500 tahun dan tidak runtuh sampai dengan deformasi maksimalnya mencapai 1,5 kali deformasi terhadap gempa 2500 tahun tersebut. Dalam kondisi tersebut struktur bangunan rusak berat dan tidak dapat diperbaiki namun tidak runtuh dan keselamatan pengguna bangunan selama masa penyelamatan/evakuasi terjamin.
3. Untuk mengakomodasi keadaan *damage control limit state* struktur, ada persyaratan yang harus dipenuhi dalam perencanaan dan pelaksanaan detail konstruksi join kolom-balok agar terjamin bahwa sendi plastis benar-benar terjadi di balok dan bukan di kolom.

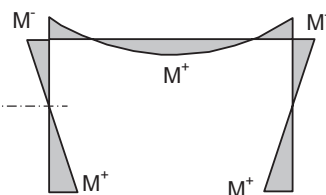
C. Struktur Rangka Pemikul Momen (RPM)

Struktur RPM adalah struktur yang terbentuk dari rangkaian kolom-kolom dan balok-balok dalam bidang vertikal/relatif vertikal 2 dimensi yang membentuk geometri segiempat, di mana join-join kolom-balok

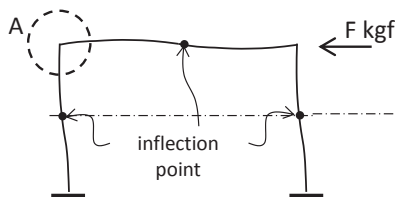
tersebut bersifat kaku (join momen). Join-join kaku tersebut selain menahan gaya geser dan gaya aksial, juga menahan momen, maka bentuk geometri segiempat dapat berdiri dengan stabil dan kaku (Gambar 54a). Kekakuan struktur ditandai dengan deformasinya, yaitu apabila deformasinya kecil maka kekakuannya besar. Gambar 54a dan 54b menunjukkan deformasi elastis dan diagram momen struktur RPM terhadap gaya gravitasi, dan Gambar 54c dan 54d menunjukkan deformasi elastis dan diagram momen struktur RPM terhadap gaya lateral. Momen negatif maksimal terhadap gaya gravitasi pada balok terjadi di bidang temu balok dengan kolom, apabila RPMnya berbentuk portal tunggal maka kolom juga menerima momen yang sama besar dengan balok (Gambar 54b). Momen terbesar (positif/negatif) terhadap gaya lateral pada kolom dan balok terjadi di daerah join kolom-balok tersebut (Gambar 54d), sedangkan momen di titik belok (*inflection point*) adalah nol (Gambar 54b dan 54d). Bila struktur RPM bergoyang ke arah kiri (menerima gaya lateral dari kanan) maka momen negatif maksimal berada di titik A, momen ini menambah besar momen negatif di titik A yang sebelum bergoyang telah menerima momen terhadap gaya gravitasi, sedangkan di sisi yang lain justru saling mengurangi. Apabila terjadi gempa besar, maka kolom, balok dan join kolom-balok yang menerima akumulasi momen maksimal akan mengalami perilaku inelastik sehingga terbentuk sendi plastis. Sendi plastis tersebut bisa terbentuk di balok, di kolom maupun di dalam join kolom-balok. Penempatan sendi plastis harus dikendalikan dalam desain struktur agar tidak membawa dampak berbahaya bagi struktur secara keseluruhan.



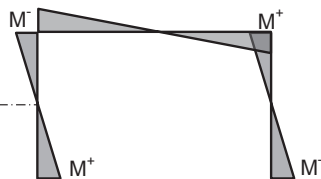
Gambar 54a. Deformasi RPM terhadap Gaya Gravitasi



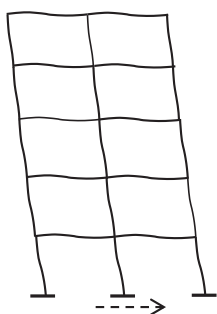
Gambar 54b. Diagram Momen terhadap Gaya Gravitasi



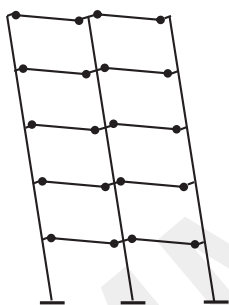
Gambar 54c. Deformasi RPM terhadap Gaya Lateral



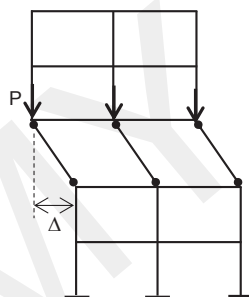
Gambar 54d. Diagram Momen terhadap Gaya Lateral



Gambar 55a. Deformasi Lateral Struktur



Gambar 55b. Beam Side Sway Mechanism

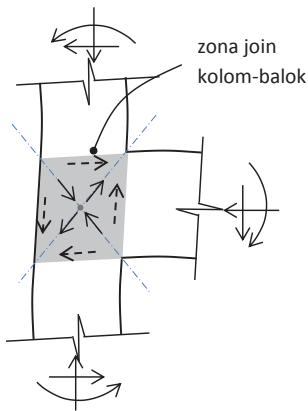


Gambar 55c. Column Side Sway Mechanism, P- Δ Mechanism, Momen eksentris pada kolom $M = P \times \Delta$
Kalau Δ besar, maka M besar

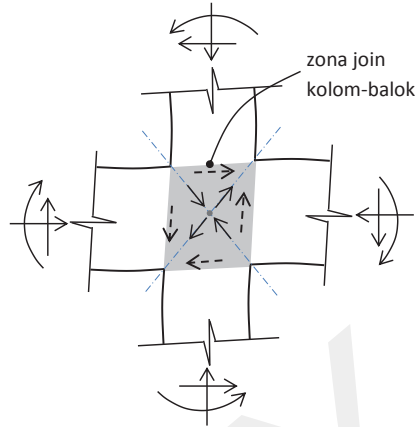
Berhubungan dengan posisi pembentukan sendi plastis, ditetapkan bahwa kolom harus lebih kuat daripada balok dan sendi plastis harus terjadi di balok. Hal itu untuk menjamin agar bekerja mekanisme goyang *beam side sway mechanism* (Gambar 55b). Sedangkan *column side sway mechanism* (Gambar 55c) tidak diharapkan terjadi pada bangunan bertingkat karena sendi plastis yang terjadi di kolom dapat mengakibatkan kolom pada tingkat yang “soft” mengalami *drift* besar (*drift* adalah perbandingan deformasi lateral lantai tingkat tertentu dengan tinggi lantai tingkat bersangkutan, dalam %), sehingga berpotensi mengalami mekanisme P- Δ (Gambar 55c). Di samping itu, karena perilaku inelastik, sendi plastis juga mengakibatkan pengurangan kekuatan kolom dan pada akhirnya dapat mengakibatkan keruntuhan bangunan.

Agar keamanan bangunan terhadap gempa bumi terjamin, maka detail konstruksi di daerah sendi plastis harus didesain dan dilaksanakan dengan baik, teliti dan benar sesuai dengan standar yang berlaku, yang harus dipenuhi dalam perancangan struktur dan pendetailan konstruksi. Zona join kolom-balok berada di dalam balok namun juga sekaligus berada di dalam kolom, oleh karena itu zona tersebut juga harus dijamin tidak mengalami kegagalan struktur ketika terjadi gempa besar. Ketika bekerja momen pada join kolom-balok, di dalam zona tersebut bekerja gaya geser yang memaksa bentuk zona tersebut berubah dari bentuk asal segiempat cenderung menjadi belah ketupat/jajaran genjang, maka di dalam zona tersebut terjadi perlawanan tegangan tekan dan tarik diagonal untuk melawan kecenderungan tersebut (Gambar 56a dan 56b). Penjelasan detail konstruksi dalam tulisan ini terbatas pada penjelasan secara prinsip saja, hal-hal yang lebih detail dapat dipelajari tersendiri dalam referensi yang berhubungan, seperti SNI 03-1726-02/SNI 03-1726-12 untuk konstruksi beton bertulang dan SNI 03-1729-02 untuk konstruksi baja.

Pembentukan sendi plastis pada struktur bangunan tidak terjadi serentak di semua balok pada join kolom-balok, namun terjadi secara bertahap mulai dari join kolom-balok yang menerima momen terbesar. Ketika telah terbentuk sendi plastis pada balok tersebut, maka kapasitas momen balok menjadi kecil. Sendi plastis berikutnya akan terjadi pada balok yang menerima momen terbesar berikutnya, demikian seterusnya. Oleh karena itu, semakin banyak struktur menyediakan peluang pembentukan sendi plastis, struktur semakin daktail. Untuk struktur RPM, semakin banyak join kolom-balok yang bersifat kaku (join momen), peluang terbentuknya sendi plastis makin banyak, artinya semakin daktail. Misalnya struktur RPM yang semua join kolom baloknya adalah join kaku dan tumpuannya bersifat kaku lebih daktail dibandingkan struktur RPM yang sama, tetapi tumpuannya bersifat sendi.



Gambar 56a. Perilaku Zona Join Kolom-Balok Eksterior terhadap Momen



Gambar 56b. Perilaku Zona Join Kolom-Balok Interior terhadap Momen

D. Konstruksi Beton Bertulang

Beton merupakan material yang terdiri dari campuran antara Portland Cement (PC), pasir, kerikil, dan air, dan untuk keperluan tertentu dapat ditambah material tambahan seperti material untuk menambah kelecakan adukan, material untuk memperlambat atau mempercepat proses pengikatan dalam adukan, dan keperluan lain. Beton mempunyai kekuatan tekan jauh lebih tinggi daripada kekuatan tariknya, dan kekuatan tarik beton tidak diperhitungkan dalam desain struktur, oleh karena itu beton bersifat getas. Baja tulangan dibutuhkan untuk menerima tegangan tarik yang terjadi karena momen lentur maupun gaya geser, maka tulangan baja berfungsi menahan tegangan tarik sedangkan beton berfungsi menahan tegangan tekan. Baja tulangan sering dimanfaatkan juga untuk bersama dengan beton ikut menahan gaya tekan untuk mendapatkan efisiensi material.

Untuk bisa menjadi material yang daktail dan membentuk struktur bangunan yang daktail, konstruksi beton bertulang harus didesain dan dilaksanakan dengan benar berdasarkan standar yang berlaku, di Indonesia adalah Standar Nasional Indonesia (SNI) yang dikeluarkan oleh Badan Standardisasi Nasional (BSN).

E. Rangka Pemikul Momen (RPM) Beton Bertulang



Gambar 57. Contoh Konstruksi Bangunan RPM Beton Bertulang

<https://www.crsi.org/projects-responsive/project.cfm?articleID=CEFD41C5-B7D2-94D3-07D5C84C700FBD62>, diunduh September 2018

Gambar-gambar berikut merupakan contoh-contoh keruntuhan konstruksi beton bertulang pascagempa.

Gambar 58a menunjukkan kegagalan geser balok. Posisi terjadinya keruntuhan bukan pada posisi gaya geser maksimal, karena gaya geser maksimal tepat pada pertemuan balok dengan kolom. Terjadinya keruntuhan kemungkinan disebabkan jarak sengkang balok pada posisi keruntuhan terlalu jauh dan jarang.

Gambar 58b menunjukkan kegagalan geser kolom tepat di bawah balok. Pada posisi tersebut bekerja gaya geser lateral kolom maksimal, namun dimensi senggangnya kecil-kecil dan jaraknya jauh-jauh.

Gambar 58c menunjukkan kegagalan geser join kolom-balok yang getas. Dalam gambar tersebut tampak lebar kolom (d) terlalu tipis sehingga panjang jangkar tulangan terlalu pendek, dan tidak terdapat sengkang di dalam kolom pada join tersebut. Beton yang rusak dalam join menyebabkan tulangan balok kehilangan kekuatan lekat.

Gambar 58d menunjukkan kegagalan geser kolom dan join kolom-balok interior (bukan kolom pojok). Tampak di dalam join kolom-balok tidak terdapat sengkang di dalam kolomnya, selain itu sengkang pada kolom di luar join kolom-balok cukup jauh jaraknya. Hal itu yang mengakibatkan terjadi kegagalan geser di dalam join, dan pada kolom.

Belajar dari kerusakan bangunan pascagempa, beberapa hal menjadi catatan (Key, 1988).

1. Semua elemen struktur harus mampu merespons gempa besar dengan perilaku daktail. Untuk elemen struktur yang tidak bisa berperilaku daktail seperti kolom, harus didesain untuk menahan beban elastik pada kondisi *ultimate* (batas).
2. Harus dihindari perilaku nondaktail (getas) seperti kegagalan geser dan lekatan (*bond failures*). Oleh karena itu, overlap tulangan dan penjangkarannya tidak ditempatkan pada area beton yang mengalami tegangan besar, dan harus diakomodasi ketahanan terhadap geser.
3. Mempunyai derajat redundansi struktural yang tinggi agar banyak zona penyerapan energi (pembentukan sendi plastis) sebelum terjadi mekanisme keruntuhan. Untuk struktur RPM, pembentukan sendi plastis harus di balok. Keruntuhan kolom harus dihindari di mana kolom tetap dalam keadaan elastik pada level desain gempa maksimal.



Gambar 58a. Kegagalan Geser Balok

https://www.researchgate.net/figure/Beam-shear-failure-during-an-earthquake-reprinted-with-permission-from-EERI_fig8_275893737, diunduh September 2018



Gambar 58b. Kegagalan Geser Kolom

http://www.world-housing.net/wp-content/uploads/2011/06/RC-Frame_Yakut.pdf,
diunduh September 2018



Gambar 58c. Kegagalan Join Kolom-Balok pada Kolom Pojok
(Eksterior) Beton Bertulang

https://www.researchgate.net/figure/Beam-shear-failure-during-an-earthquake-reprinted-with-permission-from-EERI_fig8_275893737, diunduh September 2018



Gambar 58d. Kegagalan Geser Join Kolom-Balok pada Kolom Interior

https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/75836/3/Pan_Zhangcheng_201611_MAS_thesis.pdf, diunduh September 2018

Perilaku RPM dalam mendukung beban gravitasi berbeda dengan ketika menerima gaya gempa yang bekerja secara lateral dengan arah bolak-balik, hal tersebut memengaruhi kinerja beton bertulang pada RPM tersebut. Kinerja tersebut menentukan bagaimana detail-detail konstruksi sambungan harus dibuat, agar tidak terjadi kegagalan struktur yang fatal.

Kegagalan join kolom-balok bersifat lokal, namun dampaknya dapat mengakibatkan keruntuhan seluruh gedung. Ada dua mekanisme keruntuhan beton bertulang, yaitu sebagai berikut.

1. Keruntuhan lentur
 - a. Keruntuhan getas terjadi kalau luas penampang baja lebih besar dari rasio tulangan maksimal atau 0,75 dari ratio baja tulangan dalam keadaan seimbang,¹ sehingga beton mencapai kondisi inelastik sebelum baja tulangan mengalaminya.

¹Dalam kondisi berimbang serat tekan ekstrem pada beton (ϵ_{cu}) dan serat tarik pada baja tulangan (ϵ_y) secara bersamaan mencapai regangan maksimal. (SNI-03-2847-2002)

Penulangan balok beton bertulang seperti ini diklasifikasikan sebagai *over-reinforced*. Kegagalan yang diakibatkan oleh penulangan *over-reinforced* tersebut mengakibatkan keruntuhan getas, karena beton sebagai material tekan akan runtuh ketika terjadi regangan maksimal (0,003).

- b. Keruntuhan daktail terjadi kalau luas penampang baja lebih kecil dari rasio tulangan maksimal atau 0,75 dari ratio baja tulangan dalam keadaan seimbang, sehingga baja tulangan mencapai kondisi inelastik sebelum beton mengalaminya. Penulangan balok beton bertulang seperti ini diklasifikasikan sebagai *under-reinforced*. Kegagalan yang diakibatkan oleh penulangan *under-reinforced* tersebut mengakibatkan keruntuhan daktail, karena sebelum beton mengalami regangan maksimal, baja tulangan telah mengalami peregangan inelastik terlebih dahulu, dan regangan tersebut akan selalu bertambah apabila gaya tariknya bertambah.

2. Keruntuhan geser

Terjadi kalau sengkang tidak cukup kuat untuk menahan tegangan geser, pada umumnya karena terlalu renggang (jaraknya jauh). Kerusakan geser ditandai dengan retak diagonal dan merupakan keruntuhan getas.

Mekanisme keruntuhan yang diharapkan terutama di wilayah rawan gempa adalah mekanisme keruntuhan lentur yang daktail, hal itu dapat dicapai dengan cara sebagai berikut.

1. Penampang beton bertulang didesain *under-reinforced*, yaitu dengan membatasi ratio luas penampang tulangan dibandingkan dengan luas penampang beton (balok).
2. Memperkuat kapasitas geser pada penampang yang menerima gaya geser maksimal.
3. Kolom lebih kuat dari balok.
4. Kolom didesain secara elastik sampai pada kondisi beban gempa maksimal.

5. Sendi plastis mempunyai jarak yang cukup terhadap join kolom-balok.
6. Merencanakan dan melaksanakan detail-detail konstruksi sambungan mengikuti standar yang berlaku.

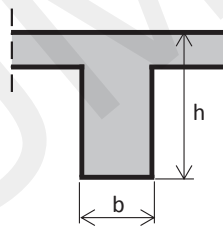
1. Balok Beton Betulang

Ketika menerima gaya gravitasi, momen negatif terjadi pada balok di daerah dekat kolom (tumpuan), sedangkan di daerah bentang (lapangan) terjadi momen positif. Dengan kondisi tersebut, tegangan tarik lentur pada balok di daerah dekat kolom berada di bagian atas dan tegangan tekan lentur berada di bagian bawah, sedangkan di daerah tengah bentang (lapangan) terjadi yang sebaliknya.

Berbeda dengan ketika menerima beban gravitasi, RPM yang menerima gaya gempa lateral mengalami momen negatif dan positif secara bergantian pada sebuah penampang balok karena gaya gempa bekerja secara siklik dengan arah bolak-balik. Ketika gaya bekerja dari arah kiri, maka bagian balok sebelah kanan mengalami momen negatif, sebaliknya ketika gaya gempa lateral bekerja dari arah kanan, maka pada penampang balok sebelah kanan mengalami momen positif. Dengan demikian, baja tulangan tarik balok pada join kolom-balok dibutuhkan untuk masing-masing sisi atas dan sisi bawah balok. Ratio luas penampang tulangan tarik (tulangan utama) tulangan tarik dibutuhkan untuk masing-masing sisi atas (tarik) dan bawah balok (tekan). Ratio luas penampang tulangan tarik (tulangan utama) dibatasi maksimal 0,025 (2,5%) dari luas penampang balok untuk mendapatkan daktilitas balok (*under-reinforced*), dan luas penampang tulangan tekan (terhadap beban gravitasi) dibatasi tidak boleh kurang dari 50% luas penampang tulangan tarik.

Untuk menjamin terjadinya *beam side sway mechanism* (sendi plastis terjadi di balok) pada RPM ketika terjadi gempa besar, maka kekuatan dan kekakuan join kolom-balok harus tetap terjaga. Hal

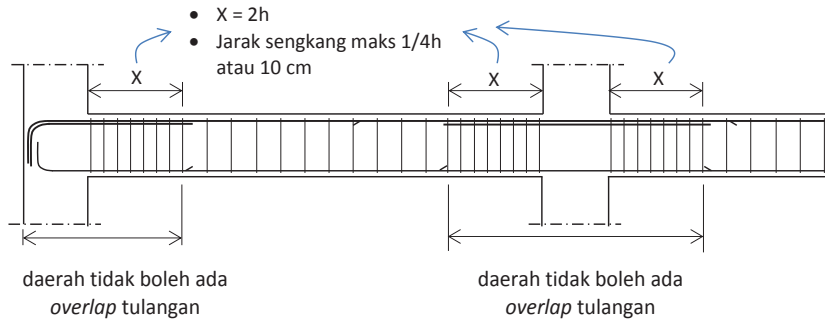
tersebut dapat terjadi dengan memastikan posisi sendi plastis pada balok harus didesain dengan jarak 2 kali kedalaman balok ($= 2h$ cm) terhadap muka kolom agar daerah sepanjang $2h$ cm tersebut tidak mengalami kerusakan ketika terjadi proses pembentukan sendi plastis. Potensi terbentuknya sendi plastis paling awal justru di pertemuan balok dengan muka kolom karena pada posisi tersebut bekerja momen maksimal dan gaya geser maksimal, sedangkan pada posisi yang semakin jauh dari muka kolom besarnya momen dan gaya geser semakin kecil. Untuk menjamin terbentuknya sendi plastis terjadi pada jarak $2h$ cm dari muka kolom, ada dua hal yang harus diperhatikan: 1) daerah sepanjang $2h$ cm tersebut harus diperkuat terhadap gaya geser dengan memasang sengkang lebih rapat dengan jarak maksimal $\frac{1}{4} h$ atau 100 mm, dan 2) luas penampang tulangan terhadap momen yang dipasang dalam pelaksanaan harus sesuai dengan yang didesain, maka daerah sepanjang $2h$ cm tersebut harus bebas dari adanya *overlap* sambungan tulangan untuk menghindari terjadinya penambahan luas penampang tulangan agar balok tidak menjadi *over-reinforced* (Gambar 59).



Pembatasan dimensi balok (Key, 1988):

- a. $b/h \geq 0,3$
- b. $b \geq 250$ mm
- c. $b \text{ balok} \leq (b \text{ kolom} + 0,75h)$ untuk setiap sisi

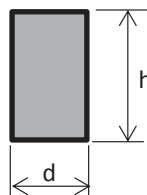
Catatan: (b = lebar balok, h = kedalaman balok)



Gambar 59. Prinsip Penulangan Balok Beton Bertulang

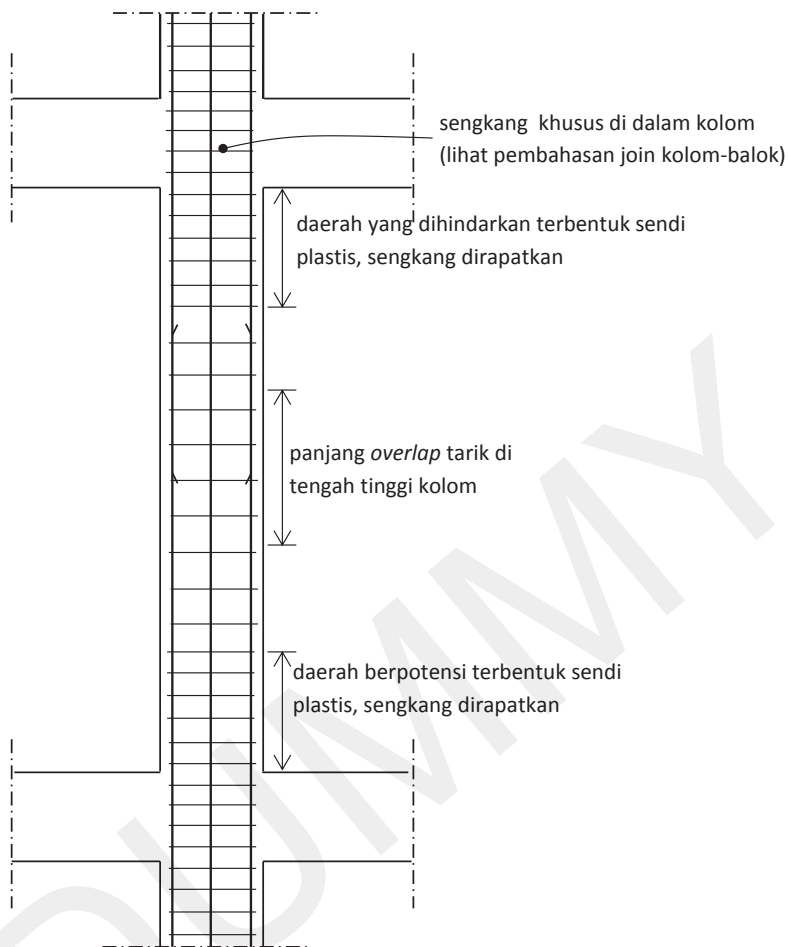
2. Kolom Beton Bertulang

Ratio luas penampang tulangan utama kolom dibatasi antara 0,01 dan 0,06 dari luas penampang kolom, hal ini untuk mendapatkan kekuatan dan daktilitas yang cukup. Penguatan daerah yang berpotensi terjadi sendi plastis ditetapkan sepanjang: a) minimal sepanjang kedalaman kolom, atau b) 6 kali diameter tulangan terbesar, atau c) 45 cm. Sama dengan balok, di daerah tersebut tidak boleh ada *overlap* sambungan tulangan, dan sengkang dipasang lebih rapat dengan jarak $\frac{1}{4}$ lebar kolom terkecil atau 10 cm. *Overlap* sambungan tulangan ditentukan harus di tengah tinggi kolom karena di tengah kolom momen lateralnya adalah nol, kalau kesulitan dalam pelaksanaan sambungan dilakukan di dekat muka balok bawah dengan *mechanical coupler* atau disambung dengan las.



Pembatasan dimensi kolom:

- Dimensi kolom minimal ($d \geq 300 \text{ mm}$)
- Ratio lebar balok: kedalaman kolom ($d/h = 0,4$ (Key, 1988))



Gambar 60. Prinsip Penulangan Kolom Beton Bertulang

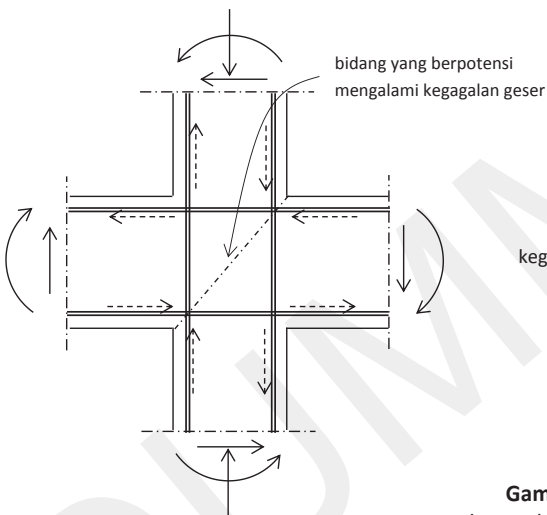
3. Join Kolom-Balok Beton Bertulang

Studi-studi tentang kerusakan join kolom-balok beton bertulang menunjukkan kerusakan terjadi karena:

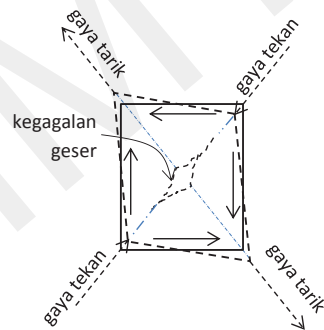
- geser di dalam join;
- kegagalan penjangkaran tulangan balok di dalam join;
- kegagalan lekatan (bond) tulangan balok atau kolom yang melalui join (Key, 1988).

a. Ketahanan Geser dalam Join

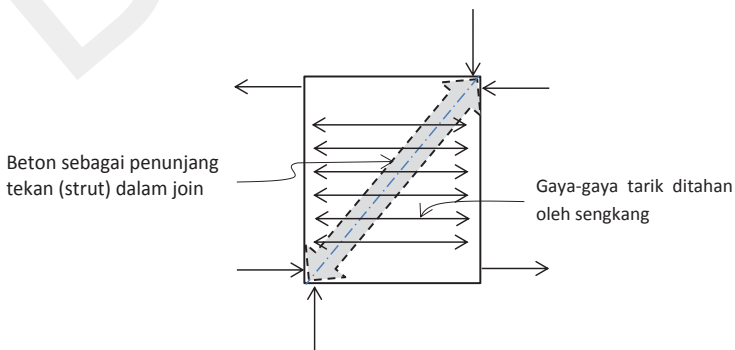
Ketika zona join kolom-balok menerima gaya geser, maka terjadi gaya tekan dan tarik arah diagonal. Kegagalan geser yang terjadi di dalam zona join terjadi pada bidang diagonal join tersebut dapat dilihat dalam Gambar 61a dan 61b. Kegagalan geser tersebut dapat terjadi kalau di dalam zona joint tidak terdapat penahan gaya tarik, oleh karena itu dibutuhkan adanya tulangan tarik di dalam zona join, yaitu sengkang kolom di dalam join (Gambar 61c). Penulangan kolom dengan sengkang di dalam join dapat dilihat pada Gambar 62.



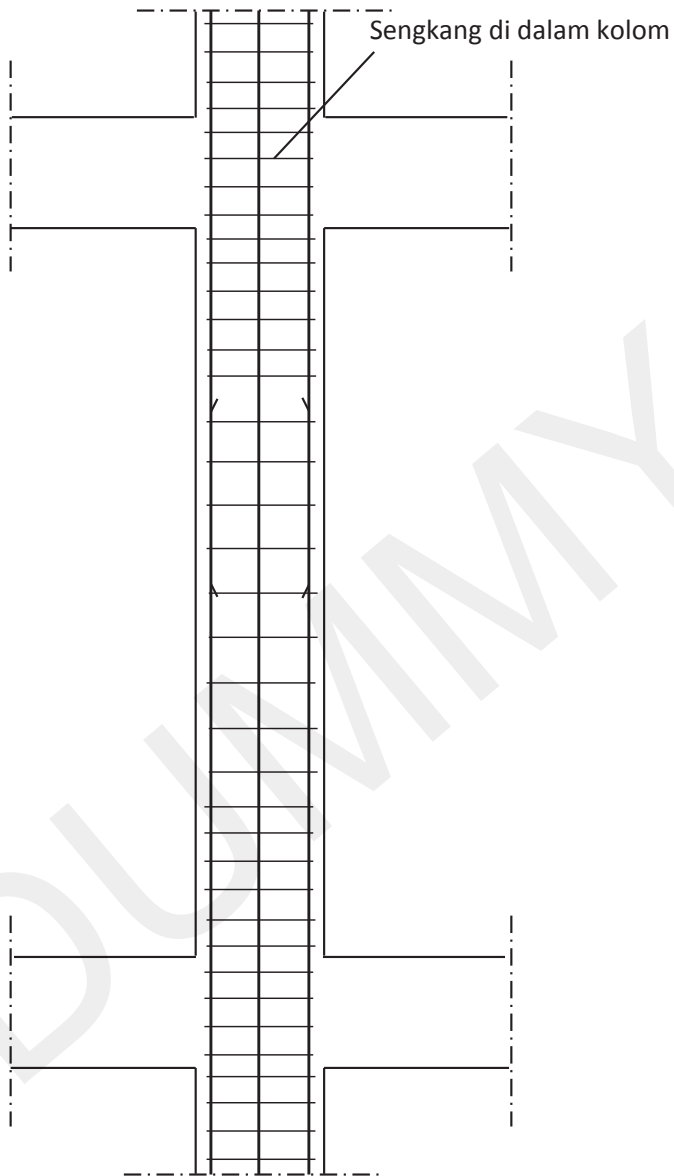
Gambar 61a. Gaya-gaya yang Bekerja pada Join Kolom-Balok Beton Bertulang



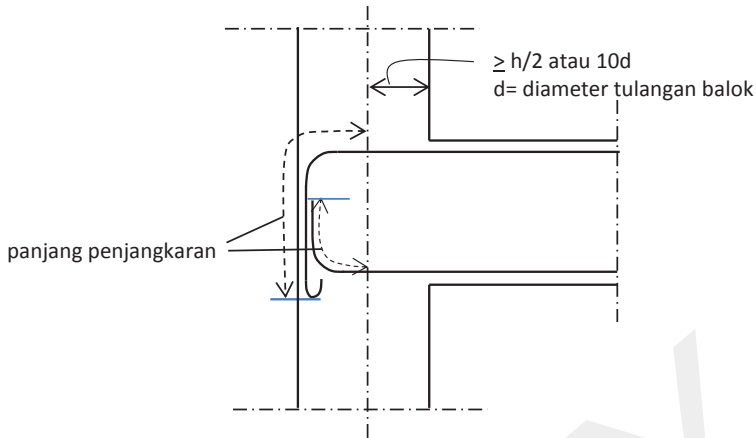
Gambar 61b. Perilaku Join Kolom-Balok Beton Bertulang terhadap Gaya Geser dan Model Kegagalan Tarik dalam Join Kolom-Balok



Gambar 61c. Penahan Gaya Geser dalam Join Kolom-Balok Beton Bertulang

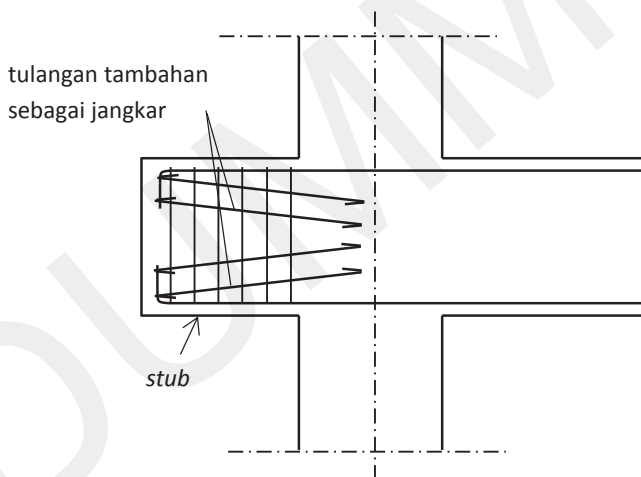


Gambar 62. Penulangan Kolom dengan Sengkang di dalam Join Kolom-Balok



Gambar 63a. Penjangkaran Tulangan Balok pada Kolom Eksterior

Sumber: Key, 1988



Gambar 63b. Penambahan Stub untuk Penjangkaran Tulangan Balok pada Kolom Eksterior

Sumber: Key, 1988

b. Penjangkaran Tulangan Balok

Walaupun posisi sendi plastis telah ditetapkan dengan jarak tertentu dari muka kolom, namun proses *yielding* tulangan berpengaruh terhadap area kolom (dalam zona join). Oleh karena itu, panjang penjangkaran

tulangan balok ke dalam kolom eksterior harus diukur dari posisi $\frac{1}{2}$ kedalaman kolom atau 10 kali diameter tulangan balok (Gambar 63a). Untuk penulangan yang rumit di dalam join, dapat diselesaikan dengan menambahkan stub untuk menempatkan penjangkaran tulangan balok pada kolom eksterior (Gambar 63b).

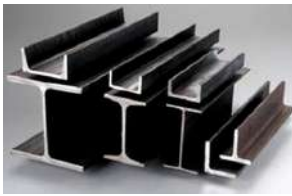
c. Kekuatan Lekat (*Bond Stress*)

Terhadap momen negatif, terjadi tegangan tarik yang besar pada tulangan atas dan tegangan tekan yang besar pada tulangan bawah yang masuk di dalam join kolom-balok. Penetrasi *yielding* tulangan pada saat pembentukan sendi plastis dapat mengurangi efektivitas kekuatan lekat antara tulangan dengan beton. Untuk hal tersebut ditetapkan batas minimal diameter tulangan $\frac{1}{25}$ dari kedalaman kolom untuk baja tulangan dengan tegangan leleh 275 N/mm^2 (2750 kgf/cm^2), atau $\frac{1}{35}$ dari kedalaman kolom untuk baja tulangan dengan tegangan leleh 380 N/mm^2 (3800 kgf/cm^2), (Key, 1988).

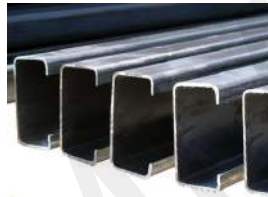
F. Konstruksi Baja

Baja merupakan material produk pabrik yang sudah jadi dalam bentuk pelat tipis dan batang yang mempunyai beragam bentuk penampang melintang. Dari segi proses pembuatannya ada dua macam baja, yaitu baja *hot-rolled* dan *cold-formed*. Baja *hot-rolled* diproses dengan menggelindingkan baja bongkahan yang berpijar melalui sekelompok roda penggiling yang disusun membentuk profil yang direncanakan secara bertahap dan berulang-ulang, dimulai dari kerapatan posisi roda paling longgar yang menghasilkan dimensi yang paling gemuk sampai posisi yang direncanakan dan menghasilkan dimensi-dimensi akhir (Gambar 64a). Sedangkan *cold-formed* adalah pelat baja tipis (hasil proses *hot-rolled*) yang digiling melalui cetakan yang membentuk profil yang direncanakan membentuk profil tertentu (Gambar 64b). Pembentukan profil tersebut dimaksudkan untuk mendapatkan kekakuan batang. Dari ketebalan pelatnya, baja *cold-formed* ada dua macam, yaitu baja dan baja ringan. Baja (struktural) adalah baja *cold-formed* dibuat dari pelat baja yang cukup tebal, dengan ketebalan

1,6 mm sampai dengan 3,2 mm, sedangkan baja ringan adalah baja *cold-formed* yang dibuat dari pelat baja tipis, dengan ketebalan 0,2 mm samapi dengan 1,5 mm. Karena baja ringan sangat tipis, maka untuk melindungi dari karat diberi lapisan timah atau aluminium. Baja (struktural) umum digunakan untuk konstruksi bangunan kecil sampai bangunan berbentuk lebar dan bertingkat banyak, sedangkan baja ringan digunakan untuk konstruksi yang ringan seperti bangunan bentang kecil 1 lantai-2 lantai, konstruksi atap bangunan, rangka untuk konstruksi bangunan kecil, elemen-elemen interior seperti rangka dinding pembatas ruang dan sebagainya. Selanjutnya pembahasan dalam buku ini dibatasi hanya pada material baja struktural.



Gambar 64a. Contoh Beberapa Bentuk Profil Baja *Hot-Rolled*



Gambar 64b. Salah Satu Contoh Bentuk Profil Baja *Cold-Formed*



Gambar 64c. Contoh 2 Buah Bentuk Profil Baja Ringan

Baja merupakan material yang sangat kuat, dan mempunyai kekuatan tarik dan tekan sama besar. Tegangan leleh baja yang digunakan untuk konstruksi bangunan berkisar antara 2.000 kgf/cm² sampai dengan 3.600 kgf/cm². Dengan kekuatan yang tinggi tersebut, dimensi baja hanya memerlukan ketebalan yang tipis-tipis sehingga konstruksi baja relatif ringan. Namun di samping kelebihanannya dari segi kekuatannya tersebut, justru karena dimensi yang tipis mempunyai kekakuan terhadap tekuk yang kecil. Baja sangat bagus digunakan untuk konstruksi bangunan di wilayah rawan gempa karena mempunyai mempunyai sifat yang daktail. Namun untuk dapat membentuk struktur bangunan yang daktail, detail-detail konstruksinya harus direncanakan dan dilaksanakan dengan benar sesuai standar yang berlaku.

Jenis alat penghubung konstruksi baja adalah: baut, paku keling dan las. Di antara ketiga alat penghubung tersebut secara berurutan, las memberikan pengikatan paling kuat, namun paling getas.

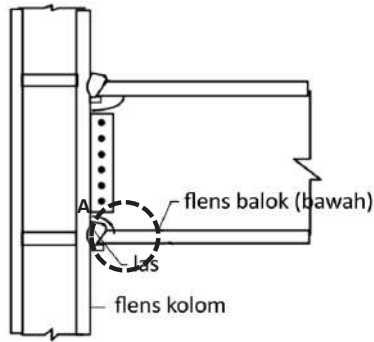
1. Struktur Rangka Pemikul Momen Baja



Gambar 65. Struktur Rangka Pemikul Momen Baja

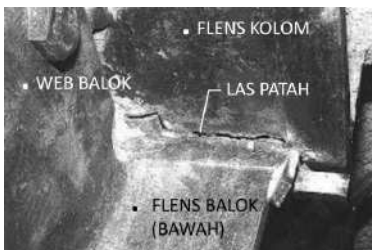
<https://www.nehrp.gov/pdf/nistgcr9-917-3.pdf>, diunduh September 2019

Detail join kolom-balok RPM baja di wilayah rawan gempa merupakan hal yang menjadi salah satu kunci ketahanan struktur bangunan terhadap getaran gempa bumi. Beberapa kerusakan konstruksi baja dapat dipelajari dari pengalaman pascagempa Northridge 1994 di Amerika Serikat, di mana kerusakan terbanyak terjadi di sekitar join kolom-balok. Gambar 66b menunjukkan las yang menghubungkan flens bawah balok dengan flens kolom patah di seluruh panjangnya. Gambar 66c menunjukkan sebagian dari flens kolom patah dan tetap melekat pada flens bawah balok. Gambar 66d menunjukkan flens kolom yang patah, dan Gambar 66e menunjukkan flens dan web kolom yang patah (FEMA-350, Juni 2000). Di samping kerusakan-kerusakan tersebut masih ada kerusakan lainnya misalnya kegagalan geser pada pelat buhul tepat pada baut-bautnya.



Gambar 66a. Tipe Sambungan Kolom-Balok Sebelum 1994 di Amerika

<https://www.nehrp.gov/pdf/fema350.pdf>, diunduh April 2021



Gambar 66b. Patah pada Seluruh Panjang Las yang Menghubungkan Balok dengan Flens Kolom di A

<https://www.nehrp.gov/pdf/fema350.pdf>, diunduh April 2021



Gambar 66c. Retak pada Sebagian Flens Kolom di Belakang Las, Sebagian Flens Kolom Tetap Melekat pada Flens Kolom di A

<https://www.nehrp.gov/pdf/fema350.pdf>, diunduh April 2021



Gambar 66d. Patah pada Flens Kolom di A

<https://www.nehrp.gov/pdf/fema350.pdf>, diunduh April 2021



Gambar 66e. Patah pada Flens dan Web Kolom (Panel Zone) di A

<https://www.nehrp.gov/pdf/fema350.pdf>, diunduh April 2021

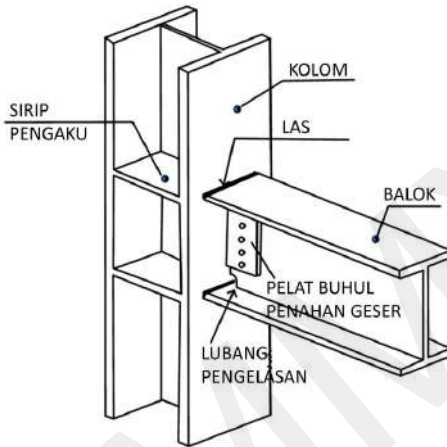
Konsep Desain join kolom-balok RPM dapat dilihat pada Gambar 67a, 67b, 68a dan 68b. Kapasitas beban didasarkan pada momen maksimal di balok, kolom didesain dalam keadaan elastik, deformasi inelastik pada balok. Flens balok didesain sebagai penahan momen untuk mentransfer tegangan lentur tarik-tekan dari balok ke kolom, sedangkan web balok didesain sebagai penahan gaya geser untuk mentransfer tegangan geser balok ke kolom melalui pelat geser dan baut. Pada konsep desain join kolom-balok tersebut, lokasi sendi plastis ditetapkan berjarak terhadap muka kolom sejauh $h/3$ sampai $h/4$ (h = kedalaman balok) dan diharapkan balok mengalami sendi plastis pada lokasi tersebut (di Potongan 2-2 pada Gambar 67b).

Di pojok atas dan bawah web balok pada Potongan 1-1 dalam Gambar 67b diberi lubang untuk lewatan las yang menghubungkan flens balok ke flens kolom. Dengan konfigurasi detail konstruksi tersebut, maka luas penampang web balok pada Potongan 1-1 lebih kecil dibandingkan luas web pada penampang balok yang lainnya termasuk Potongan 2-2, padahal pada Potongan 1-1 terjadi momen lentur dan gaya geser maksimal. Maka justru Potongan 1-1 akan mengalami perilaku inelastik lebih awal dan Potongan 1-1 menjadi lokasi sendi plastis yang nyata terjadi namun tidak direncanakan.

Perilaku inelastik pada sendi plastis tersebut menyebabkan terjadinya *over-strength* dan *strain-hardening* (pengerasan regang)² yang akan memperbesar 1) momen dan gaya geser pada balok dan harus ditahan oleh semua komponen yang saling terhubung pada potongan 1-1, yaitu *groove-weld* yang meghubungkan flens balok dengan kolom, 2) tegangan tekan dan tarik pada flens dan web kolom, 3) tegangan geser pada pelat geser (pelat buhul), dan 4) memperbesar tegangan geser pada *panel zone* join kolom-balok. Retaknya pelat buhul yang mentransfer gaya geser balok ke kolom (Gambar 70) juga bisa disebabkan oleh membesarnya gaya geser tersebut.

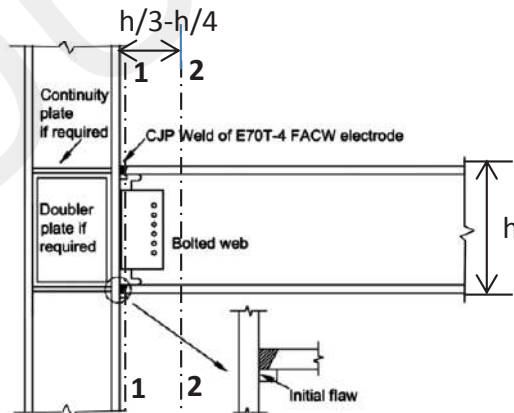
²*Strain hardening* adalah peningkatan kekuatan baja karena terjadi pengerasan regang material setelah baja mengalami fase inelastik, pada saat itu kekuatan baja meningkat lagi dan berperilaku elastik kembali namun dengan grafik tegangan-regangan lebih landai dibandingkan dengan perilaku elastik sebelumnya.

Dari segi pelaksanaan, lubang di pojok atas dan bawah web balok untuk lewatkan pengelasan mengakibatkan pengerjaan pengelasan tidak bisa sempurna karena ketika pengelasan sampai pada lubang web balok, pengelasan harus berhenti dan disambung dari sisi lain web. Lokasi berhentinya pengelasan tersebut menghasilkan cacat dan menjadi titik kritis.



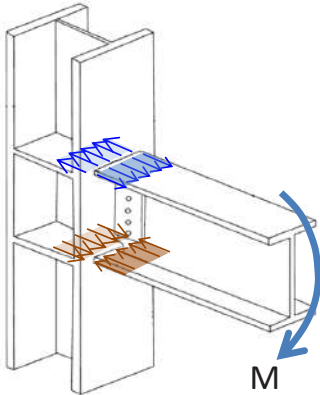
Gambar 67a. Tipologi Konstruksi Join Kolom-Balok di Amerika Serikat Pre-Northrige

<https://www.air-worldwide.com/blog/posts/2018/10/the-earthquake-safety-of-pre-northridge-welded-steel-moment-frame-buildings/>, diunduh April 2021

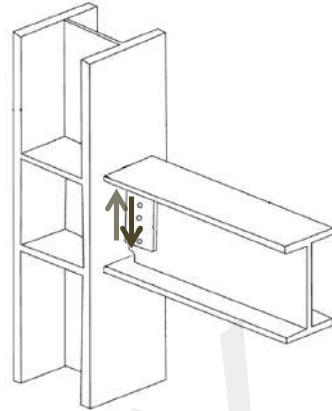


Gambar 67b. Potongan Konstruksi Join Kolom-Balok di Amerika Serikat Pre-Northrige

<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29ST.1943-541X.0000403>, diunduh Juli 2022

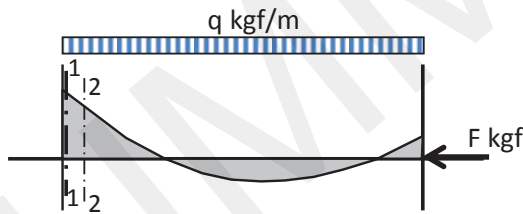


Gambar 68a. Flens Balok Sebagai Pendukung Momen Lentur

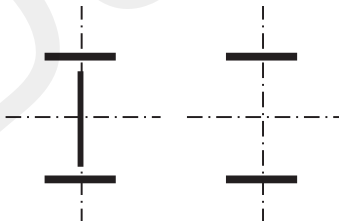


Gambar 68b. Web Balok Sebagai Pendukung Gaya Geser

Terhadap Beban Gravitasi dan Gempa (Lateral)

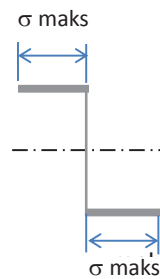


Gambar 69a. Diagram Momen Balok terhadap Gravitasi dan Gempa

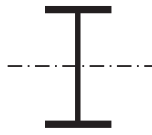


Gambar 69b. Potongan 1-1 Nyata

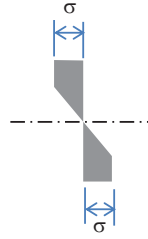
Gambar 69c. Potongan 1-1 Konsep Desain



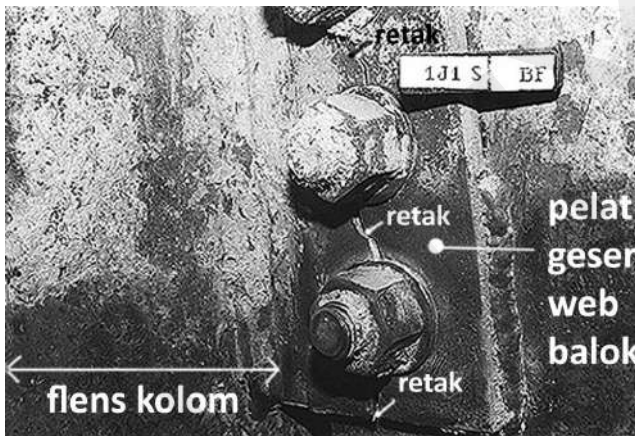
Gambar 69d. Diagram Tegangan Tarik-Tekan Lentur di Pot 1-1



Gambar 69e.
Potongan 2-2



Gambar 69f. Diagram Tegangan
Tarik-Tekan Lentur di Pot 2-2



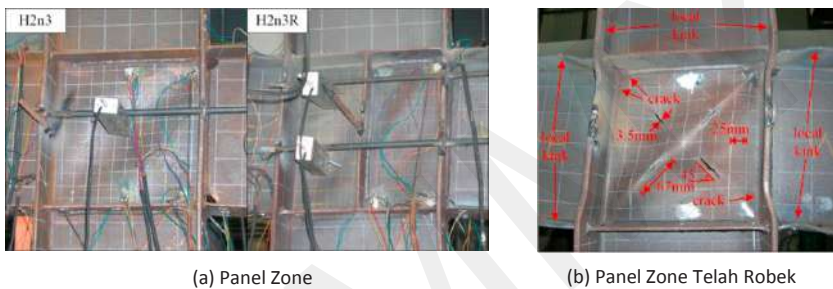
Gambar 70. Retak pada Pelat Buhul Penahan Geser Balok

<https://www.nehrp.gov/pdf/fema350.pdf>, diunduh April 2021

Zona join kolom-balok pada konstruksi baja disebut *panel-zone* yaitu web kolom pada zona join tersebut, perilakunya telah dibahas dalam awal bab ini. Panel-zone menerima gaya aksial tekan dari beban gravitasi. Ketika gempa bumi, struktur menerima beban siklik bolak-balik (lateral) dan di dalam *panel-zone* bekerja gaya geser yang menghasilkan tegangan tekan dan tarik. Ketika gempa besar, total tegangan tekan dan tarik karena gempa dan gravitasi di dalam *panel-zone* tersebut besar. Gaya aksial tekan mengakibatkan bidang web kolom *panel-zone* berpotensi mengalami perilaku tekuk lokal (selanjutnya disebut tekuk-geser). Gambar 71 (a) menunjukkan kondisi keadaan tekuk-geser dari pergerakan ke kiri (H2n3) dan ke kanan (H2n3R), tekuk ditandai dengan mengembungnya pelat *panel zone* (web kolom).

Akibat dari beban siklik yang berlanjut, maka web kolom yang telah tertekuk mengalami kegagalan struktur yang ditandai dengan robeknya pelat web karena tegangan tarik geser seperti dalam Gambar 71 (b).

Setelah kejadian gempa Northridge, di Amerika Serikat muncul “*Recommended Seismic Design Criteria For New Steel Moment-Frame Building*” hasil kerja sama antara FEMA dan SAC *joint venture*. Rekomendasi tersebut mencakup berbagai kriteria desain dan kriteria teknis tentang spesifikasi material dsb. Prinsip dasar beberapa tipe detail join kolom-balok dibahas dalam tulisan ini, namun pemahaman lebih dalam dapat dipelajari dari referensi-referensi lain yang berhubungan.



Gambar 71. Model Kegagalan *Panel Zone* yang Lemah

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263823115301439?via%3Dihub>,
diunduh Juli 2021

Ada tiga tipe RPM berdasarkan tingkat daktilitasnya, dan tuntutan daktilitas tersebut memengaruhi desain dan konstruksi sambungan join kolom-balok, yaitu sebagai berikut.

1. *Ordinary Moment Resistant Frame* (OMRF) atau Rangka Pemikul Momen Biasa (RPMB).

RPMB adalah struktur RPM dengan tuntutan daktilitas yang rendah, dapat digunakan untuk daerah yang tidak rawan terhadap gempa atau yang berpeluang terjadi gempa kecil, penggunaan untuk *seismic-design* paling terbatas.

2. *Intermediate Moment Resistant Frame* (IMRF) atau Rangka Pemikul Momen Menengah (RPMM).

RPMM adalah struktur RPM dengan tuntutan daktilitas menengah, digunakan untuk daerah yang rawan terhadap gempa dengan

tingkat intensitas menengah. Penggunaan untuk *seismic-design* lebih luas dari OMRF.

3. *Special Moment Resistant Frame* (SMRF) atau Rangka Pemikul Momen Khusus (RPMK). Kriteria struktur RPM tipe ini dituntut mempunyai daktilitas yang tinggi, dan digunakan untuk daerah yang rawan terhadap gempa dengan tingkat intensitas tinggi.

Persyaratan join kolom-balok:

- Kolom kuat-balok lemah.
- Keseimbangan kekuatan geser pada *panel zone* dengan kapasitas lentur balok.
- Penambahan kriteria kepadatan (*compactness*) penampang dan pengaku lateral.

Pada dasarnya join kolom-balok RPM, khususnya yang berada di daerah rawan gempa, harus didesain dan dilaksanakan dengan kekuatan sambungan yang lebih besar daripada kekuatan komponen-komponen yang disambung. Join kolom-balok RPM yang tidak memenuhi hal tersebut hanya boleh digunakan untuk wilayah yang tidak rawan gempa.

Konfigurasi detail-detail konstruksi join kolom-balok RPMB yang sama dengan konfigurasi detail konstruksi RPM pre-Northridge, harus didesain dan dilaksanakan berdasarkan kriteria desain yang telah direkomendasikan oleh FEMA. Direkomendasikan juga beberapa tipe detail konstruksi join kolom-balok RPM antara lain: *Welded Unreinforced Flange – Bolted Web Connections* (Gambar 72a), *Bolted Unstiffened Extended End Plate Connection* (Gambar 72b), *Bolted Flange Plate Connection* (Gambar 72c), *Welded Flanges Plate Connection* (Gambar 72d), *Welded Unreinforced Flanges*, *Welded Web Connection* (Gambar 72e).

1. *Welded Unreinforced Flange – Bolted Web Connections* (Gambar 72a).

Detail konstruksi sambungan ini secara garis besar sama dengan detail konstruksi sambungan kolom-balok pre-Northridge, namun didesain dengan kriteria yang telah direkomendasikan oleh FEMA. Konstruksi sambungan kolom-balok ini direkomendasikan hanya untuk RPMB.

2. *Extended Connection* (Gambar 72b)

Pada sambungan kolom-balok tipe ini balok dihubungkan dengan flens kolom melalui *end-plate* yang dibaut pada flens kolom. *End-plate* tersebut diperpanjang sampai melebihi ke dalam balok. Kelebihan tipe sambungan ini dibandingkan dengan tipe *Welded Unreinforced Flange – Bolted Web Connections* adalah: pengelasan seluruh penampang balok pada *end-plate* dapat dilakukan dengan sempurna karena tidak harus melalui lubang pengelasan pada web balok. Dengan pengelasan pada seluruh penampang balok, maka tegangan lentur tarik-tekan pada flens dan tegangan geser web dapat disalurkan oleh las tersebut secara terintegrasi dengan flens dan web balok. Sambungan tipe ini oleh FEMA direkomendasikan untuk RPMB dan RPMK.

3. *Bolted flange plate connection* (Gambar 72c)

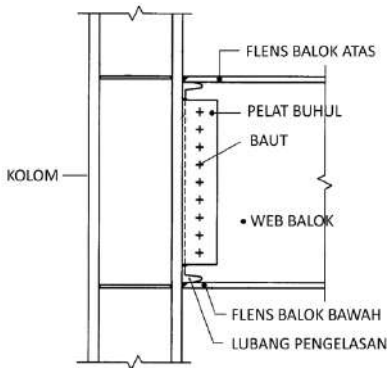
Pada sambungan tipe ini pelat flens dan pelat geser web dilas pada flens kolom, dan masing-masing pelat tersebut dibaut pada flens dan web balok. Sambungan tipe ini oleh FEMA direkomendasikan untuk RPMB dan RPMK.

4. *Welded Flanges Plate Connection* (Gambar 72d).

Konfigurasi detail konstruksi ini menyerupai konfigurasi detail konstruksi *Bolted flange plate connection*, namun pelat flens dan pelat geser masing-masing dilas pada flens kolom maupun pada flens dan web balok. Sambungan tipe ini oleh FEMA direkomendasikan untuk RPMB dan RPMK.

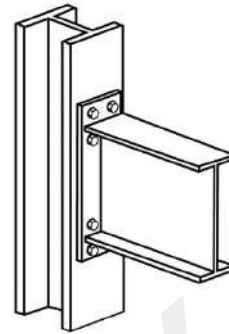
5. *Welded Unreinforced Flanges, Welded Web Connection* (Gambar 72e).

Konfigurasi detail konstruksi ini menyerupai konfigurasi detail konstruksi *Welded Unreinforced Flange – Bolted Web Connections*, namun pelat geser dilas pada flens kolom. Baut yang ada dalam detail tersebut digunakan pada proses pemasangan. Sambungan tipe ini oleh FEMA direkomendasikan untuk RPMB dan RPMK.



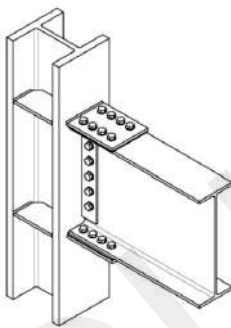
Gambar 72a. Welded Unreinforced Flanges, Bolted Web Connection

<https://www.nehrp.gov/pdf/fema350.pdf>, diunduh April 2021



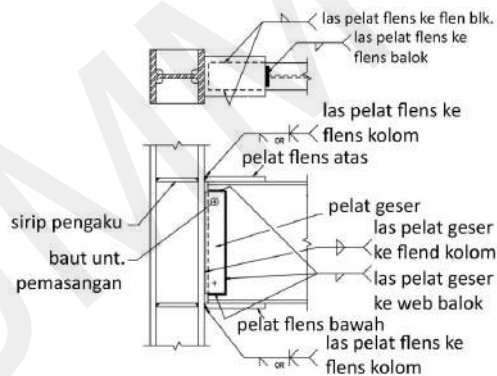
Gambar 72b. Bolted Unstiffened Extended end Plate Connection

<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/gcr/2016/NIST.GCR.16-917-41.pdf>, diunduh April 2021



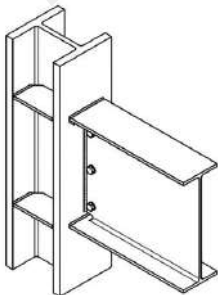
Gambar 72c. Bolted Flange Plate Connection

<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/gcr/2016/NIST.GCR.16-917-41.pdf>, diunduh April 2021



Gambar 72d. Welded Flanges Plate Connection

<https://www.nehrp.gov/pdf/fema350.pdf>, diunduh April 2021



Gambar 72e. Welded Unreinforced Flanges, Welded Web Connection

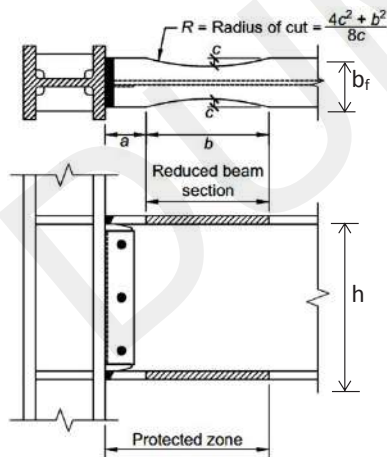
<https://www.nehrp.gov/pdf/fema350.pdf>, diunduh April 2021
<https://www.tokopedia.com/bratajayastorebandung/kasa-nyamuk-parabola-kawat-nyamuk-alumunium-paramesh-termurah-0-7mm-hitam?src=topads> diunduh April 2021

Filosofi desain RPK yang direkomendasikan oleh SAC dan AISC dalam Interim Guidelines (SAC 1995) dan Interim Guidelines Advisory No. 1 (SAC, 1997) dan AISC 1997 adalah:

1. *Weakening scheme.*
2. *Strengthening scheme.*
3. *Toughening scheme.*

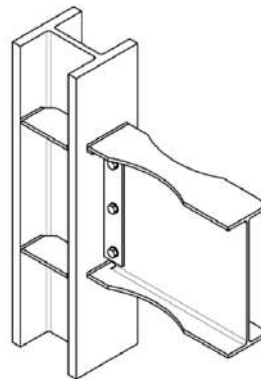
Atau desain didasarkan pada gabungan dari dua atau semua skema tersebut.

1. *Weakening scheme.*
2. Pada lokasi sendi plastis, kekuatan balok diperkecil dengan mengurangi (mencoak) penampang flens balok (*weakening*) pada jarak tertentu dari pertemuannya dengan kolom, atau disebut *Reduced Beam Section* (RBS). Dengan mengurangi flens maka tegangan tarik dan tekan lentur yang dapat diterima oleh flens menjadi lebih kecil, sehingga memaksa sendi plastis terjadi pada posisi tersebut (Gambar 73a dan 73b).



Gambar 73a. Denah dan Potongan
RBS Connection

https://www.researchgate.net/publication/330117156_Pre-qualified_Seismic_Moment_Connections,
diunduh April 2021

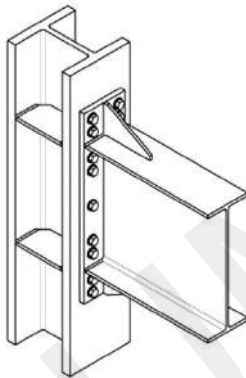


Gambar 73b. Perspektif
RBS Connection

<https://www.nehrp.gov/pdf/fema350.pdf>,
pdf, diunduh April 2021

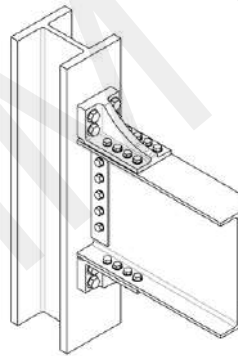
Strengthening Scheme dan Toughening Scheme **(Gambar 73a dan 73b)**

Konsep *strengthening scheme* adalah memperkuat balok pada daerah di antara flens kolom dengan lokasi sendi plastis. Penambahan kekuatan dan ketahanan tersebut dikonstruksikan dengan menambahkan penguat dengan beberapa varian: pelat segitiga di bawah flens balok, pelat segitiga di atas dan di bawah flens balok, pelat yang tambahan di atas dan di bawah flens, dan beberapa varian lain. Tujuan menambahkan penguat tersebut adalah untuk memperkecil tegangan lentur tarik dan tekan maksimal yang bekerja pada flens dan memudahkan mengontrol lokasi sendi plastis di balok seperti yang direncanakan.



**Gambar 74a. Bolted Stiffened
Extended end Plate Connections**

<https://www.nehrp.gov/pdf/fema350.pdf>,
diunduh April 2021



**Gambar 74b. Bolted Stiffened
Extended end Plate Connections**

<https://www.nehrp.gov/pdf/fema350.pdf>,
diunduh April 2021

Toughening Scheme

Konsep *thoughtening scheme* adalah meningkatkan ketangguhan join kolom balok dengan meningkatkan standar material dan prosedur pengelasan.

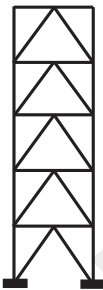
2. Braced-Frame Konsentris (BFK)

Braced-frame konsentris adalah struktur rangka yang diperkaku dengan batang diagonal sehingga membentuk unit-unit segitiga. Pada setiap

titik pertemuan, sumbu-sumbu setiap batang bertemu di satu titik buhul.

Struktur braced-frame konsentris lebih kaku daripada RPM karena terbentuk dari batang-batang yang membentuk unit segitiga (truss).

Ada beberapa bentuk bracing: *chevron inverted V-bracing*, *chevron V-bracing*, *zipper column bracing*, *single bracing*, *X-bracing*, *X configuration bracing*, *single diagonal bracing*, *K-bracing* (Gambar 75a s.d. 75h). Terhadap beban gempa yang arah kerjanya bolak-balik, gaya batang diagonal berubah-ubah tekan dan tarik. Khusus untuk *X-bracing* bisa dirancang dengan batang diagonal hanya menahan tarik saja. Pada dasarnya batang-batang diagonal yang mengalami tekan pada semua bentuk *bracing* berpotensi tertekuk sehingga membutuhkan dimensi yang cukup besar.



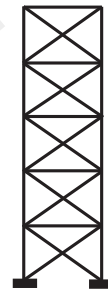
Gambar 75a.
*Chevron Inverted-V
Bracing*



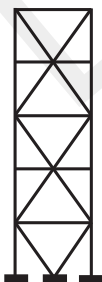
Gambar 75b.
Chevron V Bracing



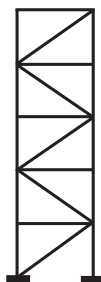
Gambar 75c. *Zipper
Column Bracing*



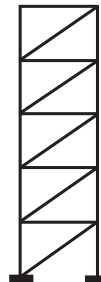
Gambar 75d.
X Bracing



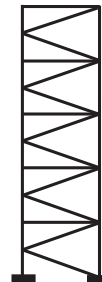
Gambar 75e. *X
Conviguration
Bracing*



Gambar 75f. *Single
Diagonal Bracing
Alternate Direction*



Gambar 75g. *Single
Diagonal Bracing*



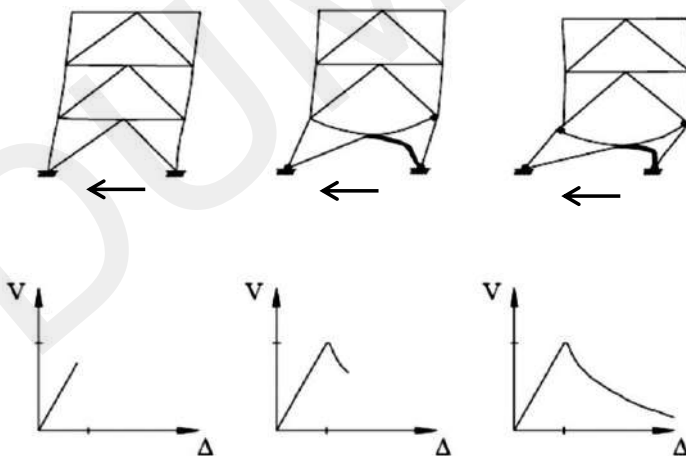
Gambar 75h.
K Bracing

Chevron Brace-Frame (V dan inverted V)

Kinerja *chevron brace* (V atau *inverted V*) terhadap beban gempa kurang optimal, karena:

1. Balok lantai mengalami lendutan yang besar di tengah bentang pada saat *braced frame* berdeformasi dinamis akibat gempa, mengakibatkan batang diagonal tekan berpotensi tertekuk.
2. Setelah batang tekan tertekuk, *chevron brace* menjadi lemah karena terjadi ketidakseimbangan gaya lateral di tengah bentang balok, di mana pada kondisi tersebut batang tarik menerima gaya lebih besar.
3. Ketidakseimbangan gaya tersebut mengakibatkan pada lantai tingkat bersangkutan menjadi sangat lemah dibandingkan lantai-lantai di atasnya dan cenderung mengalami mekanisme *soft storey*. Perilaku tersebut dapat mengakibatkan keruntuhan bangunan.

Kelemahan *chevron brace* bisa diatasi dengan memperbesar dimensi balok atau dengan memasang kolom *zipper* (Gambar 77 (c)).



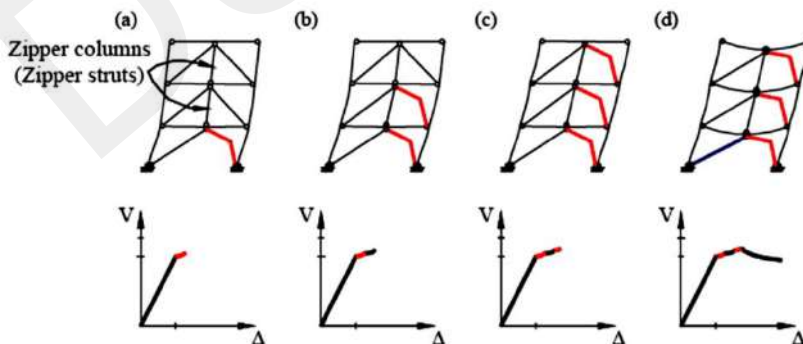
Gambar 76. Mekanisme Kegagalan Struktur Chevron dan Diagram Deformasi Elastis, Deformasi Inelastis Sampai Plastis/Runtuh

Zipper Braced-Frame

Zipper braced-frame merupakan pengembangan dari *chevron braced-frame*. Kolom *zipper* ditambahkan pada titik pertemuan antara *bracing* dengan balok lantai di tengah bentang vertikal ke atas sampai ke puncak struktur bangunan. *Zipper Bracing* diklasifikasikan sebagai *Special Consetric Braced Frame* atau *Braced-frame Konsentris Spesial (KBFS)*, karena penambahan kolom *zipper* dapat meningkatkan daktilitas struktur. Dengan adanya kolom *zipper*, maka deformasi inelastik disebar ke seluruh lantai sehingga batang-batang tekan di setiap lantai berpotensi mengalami tekuk. Oleh karena itu, peredaman dan pelepasan energi gempa semakin besar. Tidak seperti *chevron braced-frame*, *drift* tiap lantai pada *zipper braced-frame* relatif seragam sehingga terhindar dari mekanisme *soft storey*.

Bekerjanya gaya tekan atau gaya tarik pada kolom *zipper* tergantung dari lokasi batang diagonal yang mengalami tekuk paling awal, apabila batang diagonal di lantai dasar tertekuk paling awal maka kolom *zipper* bekerja tarik, apabila batang diagonal tekan di lantai paling atas yang tertekuk paling awal maka kolom *zipper* bekerja tekan.

Kolom *zipper* tidak bekerja ketika struktur mengalami deformasi elastis, dan baru bekerja ketika terjadi deformasi inelastik. Maka ketika deformasi elastik, perilaku *zipper braced-frame* sama dengan *chevron braced-frame*.

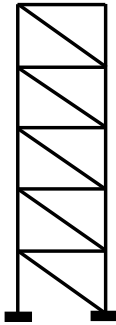


Gambar 77. Mekanisme Kegagalan Struktur *Chevron Braced-Frame* dan Diagram Deformasi Elastis, Deformasi Inelastis Sampai Plastis/Runtuh

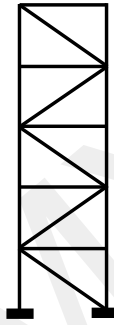
https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_5325.pdf, diunduh Juli 2021

Single Diagonal *Braced-Frame*

Tiap batang diagonal tipe ini mengalami gaya tekan dan gaya tarik secara bergantian ketika menahan gaya gempa, oleh karena itu batang diagonal harus mampu menerima gaya tekan dan tarik. Pada umumnya gaya tekan lebih dominan menentukan dimensi batang diagonal tersebut karena ada mekanisme tekuk.



Gambar 78a.
Single Diagonal Bracing



Gambar 78b. *Single Diagonal Bracing Alternate Direction*

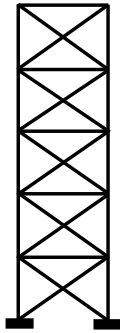
X-Bracing/X-Conviguration Bracing

Batang-batang diagonal *X-bracing* membentuk konfigurasi yang berbentuk X, maka ketika menerima gaya lateral, batang diagonal arah yang satu menerima gaya tarik, sedangkan arah yang lain menerima gaya tekan. Kalau menerima gaya siklik bolak-balik maka batang diagonal bergantian menerima gaya tarik dan tekan.

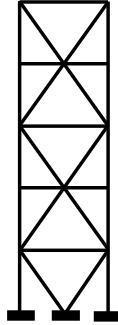
Karena ketika menerima gaya lateral siklik selalu ada batang diagonal yang bekerja tarik, maka bisa hanya dipasang batang diagonal tarik saja. Oleh karena itu, material batang diagonal bisa menggunakan kabel baja.

K-Bracing

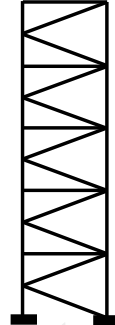
Kinerja *K-bracing* tidak bagus terhadap gempa yang besar, karena memperpendek kolom di salah satu sisi, oleh karena itu tidak dianjurkan dipakai pada wilayah gempa intensitas tinggi.



Gambar 79a.
X Bracing



Gambar 79b.
X Configuration Bracing



Gambar 79c.
K Bracing

3. *Braced-Frame* Eksentris (BFE)

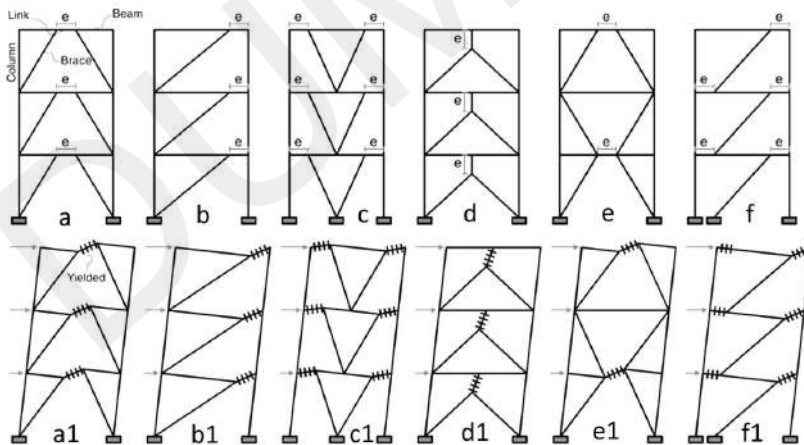
Brace-frame eksentris berbeda dengan *brace-frame* konsentris. Sumbu batang diagonal dengan sengaja digeser sehingga tidak bertemu di satu titik. Jarak dari bidang muka kolom sampai ujung batang diagonal, atau jarak antara ujung 2 buah batang diagonal (untuk *chevron braced frame*) disebut *link*. Tipe-tipe BFE dapat dilihat pada Gambar 80a s.d. f).

Dengan adanya *link* tersebut, maka gaya dari batang diagonal (tarik atau tekan) akan membebani balok dengan gaya aksial dan gaya geser. *Link* meneruskan gaya geser ini ke kolom melalui perlawanan geser. Bila gaya geser pada *link* melampaui kapasitas elastiknya maka *link* mengalami pelelehan geser (*shear yielding*) dan membentuk sendi plastis. Pola deformasi inelastik BFE tersebut dapat dilihat dalam Gambar 80 a1 s.d. f1. Energi gempa terserap melalui proses pelelehan geser ini, dengan demikian struktur *brace frame* menahan hanya sebagian beban gempa elastik. Fungsi dari *link* ini mirip dengan sekering (*fuse*) pada jaringan listrik yang berfungsi memutus aliran listrik kalau terjadi beban listrik melampaui kapasitas, oleh karena itu ada yang menyebut *link* dengan *fuse*. BFE merupakan elemen struktur yang sangat daktail dan sangat baik untuk daerah rawan gempa.

Panjangnya link berpengaruh terhadap kekakuan, kekuatan, daktilitas dan perilaku BFE. *Link* pendek cenderung mengalami pelelehan geser, dan deformasi elastiknya mendekati deformasi BFK. Sedangkan *link* panjang cenderung mengalami pelelehan lentur, dan deformasi elastiknya mendekati deformasi RPM. Dari uji coba laboratorium yang dilakukan oleh Azad dan Topkaya (2017), tampak mekanisme kegagalan struktur *link* pendek menunjukkan web yang retak, mekanisme kegagalan struktur link intermediate menunjukkan tekuk lokal flens paling tepi, dan mekanisme kegagalan struktur link panjang menunjukkan tekuk yang besar pada flens paling tepi (Gambar 81a, Gambar 81b, Gambar 81c). Menurut Azad dan Topkaya, kinerja *link* pendek lebih baik daripada kinerja *link* panjang. Pada umumnya link panjang bertujuan untuk mengakomodasi kebutuhan ruang dari segi arsitektur, seperti *space* untuk lewat.

Rule of thumb panjang *link* (Taranath, 2005):

- $e = \pm 2 \times \text{tinggi balok}$.
- $e = \pm 4 \times \text{lebar flens balok}$.



Gambar 80. Tipe-tipe dan Perilaku/Deformasi Inelastik
Braced Frame Eksentris (BFE)

a = Invert V-BFE, b = Diagonal-BFE, c = V-BFE, d = Y, e = /, f = S-BFE.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X16302292>, diunduh Juli 2021



Gambar 81a. Mekanisme Kegagalan Struktur Link Pendek



Gambar 81b. Mekanisme Kegagalan Struktur Intermediete Link



Gambar 81c. Mekanisme Kegagalan Struktur Link Panjang

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X16302292>, diunduh Juli 2021

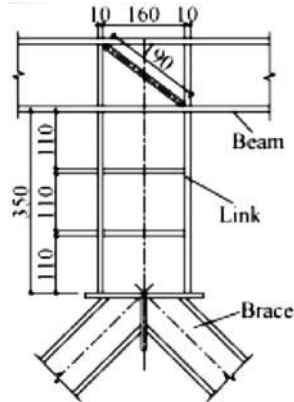
Terjadinya deformasi inelastik pada *link* ketika terjadi gempa besar merusak *link* tersebut sehingga harus ada perbaikan pasca gempa. Perbaikan tersebut adalah dengan melakukan penggantian *link*. Pekerjaan ini menjadi sulit kalau *link* tersebut menyatu dengan balok. Selain itu *link* yang menyatu dengan balok ikut menyatu dengan pelat lantai beton bertulang, maka dimensinya menjadi berlebihan dan membawa dampak pada desain struktur dan fondasi yang berlebihan juga (Mansour *et al.*, 2011). Kelemahan ini dapat diatasi dengan link yang tidak menyatu dengan pelat lantai seperti contoh berikut.

1. *Link* vertikal (Gambar 82)

Link tipe ini posisinya tegak lurus terhadap balok (tipe d dalam Gambar 80) sehingga tidak menyatu dengan pelat lantai, maka proses pengantiannya lebih mudah tidak merusak baloknya. Menurut Xiao *et al.*, kapasitas disipasi energi link dan kemampuan konsumsi energi seluruh rangka BFE-Y lebih besar daripada BFE-K.

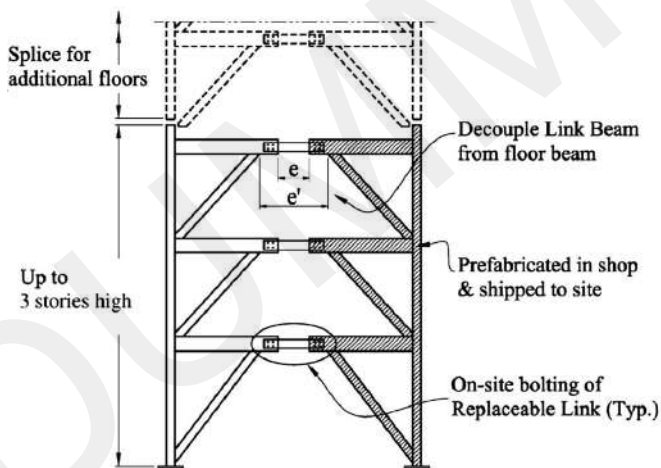
2. *Removable Link* (Gambar 83a, 83b, 83c)

Mansour *et al.*, melakukan eksperimen link yang dapat dilepas ketika perlu diganti. Sambungan link dengan balok menggunakan baut, link dibuat tidak berhubungan dengan pelat lantai. Eksperimen tersebut menunjukkan bahwa link dapat berperilaku sangat daktail.



Gambar 82. Detail Konstruksi Link Vertikal pada BFE-Y

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X16300074>, diunduh Juli 2021



Gambar 83a. Model BFE-K dengan *Removable Link* Tengah

<https://www.semanticscholar.org/paper/An-Alternative-System-for-Eccentrically-Braced-Bishay-Girges/13401fd25e021dbc88a66baa7eeff5f721f6bd85>, diunduh Juli 2022



Gambar 83b. Removable Link Tengah
http://db.nzsee.org.nz/2014/oral/10_Fussell.pdf, diunduh Juli 2021



Gambar 83c. Removable Link Tepi
<https://www.buildmagazine.org.nz/index.php/articles/show/steely-performers>, diunduh Juli 2021

Contoh Bangunan yang Menggunakan Struktur BFE

Braced-frame eksentris dapat diterapkan dalam bangunan, antara lain dapat dilihat pada Gambar 84a dan 84b.



Gambar 84a. Contoh BFE pada Bangunan
https://www.researchgate.net/publication/265063623_Retrofit_techniques_for_seismic_improvement_of_URM_buildings, diunduh Juli 2022



Gambar 84b. Contoh BFE pada Bangunan

<https://www.caee.ca/12CCEEpdf/192-NTsh-129.pdf>, diunduh Juli 2022

G. Pendekatan Inovatif

Pendekatan konvensional mampu mengamankan keselamatan jiwa manusia, tetapi dapat mengakibatkan kerugian ekonomis yang besar akibat kerusakan permanen pada komponen struktur. Pendekatan lain yang dapat mengurangi kerugian ekonomis adalah pendekatan "inovatif", yaitu sistem protektif yang mengontrol kinerja struktur dengan menggunakan peralatan.

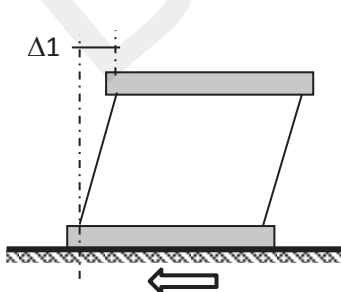
Ada empat macam sistem protektif, yaitu:

1. sistem kontrol isolasi terhadap gempa (*seismic isolation system control*);
2. sistem kontrol pemancar energi pasif pada alat (*passive energy dissipation control system*);
3. sistem kontrol pemancar energi aktif pada alat (*active energy dissipation control system*);
4. sistem penyerap getaran dinamik pada struktur (*Dynamic Vibration Absorber/DVA*).

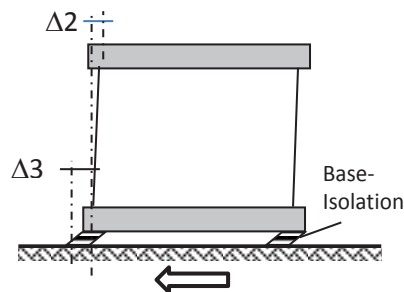
1. Sistem Kontrol Isolasi terhadap Gempa

Sistem isolasi terhadap gempa pada umumnya diletakkan di dasar kolom bangunan di antara kolom/sloof dengan fondasi, disebut *base isolation* (isolasi dasar). Prinsip isolasi dasar adalah “memisahkan bangunan dari komponen horizontal pergerakan tanah dengan cara menambahkan peralatan isolasi dasar di antara fondasi dan struktur atas, tujuannya adalah mereduksi efek dari komponen horizontal percepatan tanah. Pada beberapa bangunan, isolasi dasar diletakkan di puncak kolom *basement*/kolom lantai dasar, dalam hal tersebut struktur atas dipisahkan secara horizontal terhadap kolom di bawahnya.

Isolasi dasar bersifat sangat fleksibel terhadap beban lateral. Bila fondasi bergeser karena gempa, pada ragam getar pertama perpindahan horizontal sangat besar terjadi pada isolasi dasarnya saja, sedangkan bangunan di atasnya deformasinya sangat kecil. Berarti energi gempa tidak seluruhnya ditransmisikan ke struktur atas (Gambar 85a dan 85b). Dengan demikian, gaya-gaya dan momen di dalam komponen-komponen struktur menjadi kecil. Dalam Gambar 85a dan 85b diilustrasikan defleksi horizontal maksimal struktur tanpa isolasi dasar (D1) jauh lebih besar daripada defleksi struktur yang menggunakan isolasi dasar (D2). Perpindahan horizontal total struktur dengan isolasi dasar merupakan jumlah perpindahan lateral maksimal struktur ditambah perpindahan lateral isolasi dasar ($D2 + D3$), di mana D3 (perpindahan isolasi dasar) menyumbangkan deformasi yang sangat besar.



Gambar 85a.
Sistem Struktur Tanpa *Base-Isolation*



Gambar 85b.
Sistem Struktur dengan *Base-Isolation*

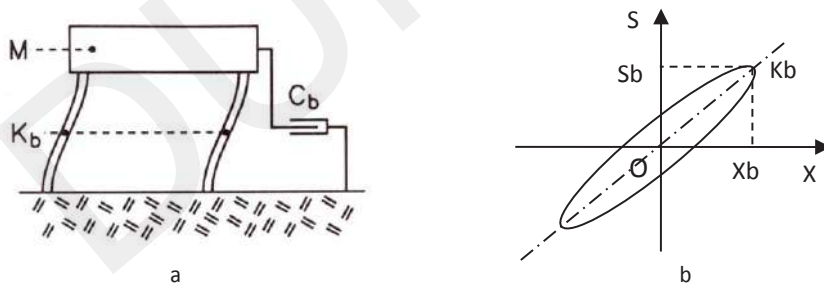
Respons dari ragam getar pertama struktur ditentukan terutama oleh sistem isolasi yang digunakan, waktu ulang struktur dan peredaman struktur. Ragam getar pertama dominan terhadap struktur yang diisolasi, dan pada struktur tidak diisolasi yang mempunyai waktu getar pendek (kaku) kurang lebih sampai dengan 1 detik. Ada banyak tipe isolasi dasar, seperti: *laminated rubber base-isolation*, *lead rubber base-isolation*, dan beberapa paten yang telah banyak diproduksi. Produk-produk paten tersebut ada yang berbentuk bola atau silinder yang menggelinding pada landasan atau bentuk lain, dan dibuat dari baja.

Ada dua sistem peredaman isolasi, yaitu:

1. sistem peredaman linier;
2. sistem peredaman nonlinier.

Sistem peredaman linier mengandalkan sifat material yang sangat fleksibel dan elastis, sedangkan sistem isolasi nonlinier mengandalkan sifat fleksibel dan sifat elasto-plastis material, atau melalui slip antar komponen.

Isolasi Dasar dengan Sistem Peredaman Linier



Gambar 86a. Model *Base-Isolator* dengan Sistem Peredaman Linier

b. Lintasan Histeresis Gaya Geser S vs Displacement X

Sumber: Skinner, R. Ivan *et al.*, 1993

Massa M pada Gambar 86a didukung oleh isolasi linier yang mempunyai kekakuan K_b , dengan koefisien *viscous (velocity) damper* C_b . Sumbu X menunjukkan besarnya perpindahan, sedangkan sumbu S menunjukkan besarnya gaya geser yang bekerja pada sistem isolasi. Ketika sistem

isolasi menerima gaya geser S_1 , maka terjadi perpindahan sebesar X_1 , dan seterusnya. Perbandingan S/X adalah linier membentuk lintasan kekakuan berbentuk garis lurus. Lintasan kekakuan tersebut dimulai dari titik O bergerak menurut arah sumbu positif membesar seiring membesarnya gaya geser gempa sampai dengan batas kekakuan efektif ('secant' stiffness) K_b , di mana $K_b = S_b/X_b$ (Gambar 86b). Ketika arah gaya geser berbalik, besarnya gaya geser dan perpindahan mengecil sampai pada titik O dan membesar kembali ke arah negatif sampai dengan batas kekakuan efektifnya, dan seterusnya makin lama pergerakan tersebut makin mengecil sampai berhenti. Seluruh lintasan yang terbentuk dalam diagram tersebut disebut lintasan histeris (dalam Gambar 86b digambarkan dalam bentuk elips). Salah satu contoh sistem isolasi linier adalah *laminated-rubber bearing base isolation*.

Laminated Rubber Bearing Base-Isolation

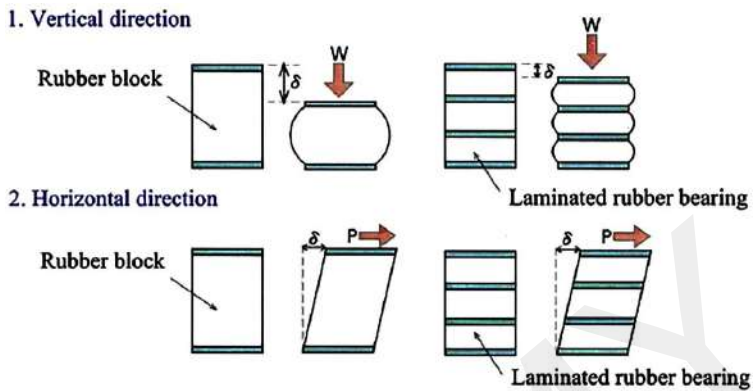
Laminated rubber bearing base-isolation terbuat dari lapisan-lapisan karet isolasi yang diletakkan secara berlapis bergantian dengan pelat baja, dan masing-masing bagian tersebut direkatkan dengan sangat kuat. Kemampuan *base-isolation* untuk melakukan simpangan elastik horizontal dihasilkan dari sifat fleksibel lapisan-lapisan karet, sedangkan pelat-pelat baja berfungsi untuk memperkaku *base-isolation* dalam arah vertikal.

Dengan adanya sisipan lapis-lapis pelat baja tersebut, tinggi karet per segmen menjadi kecil-kecil. Dengan demikian, deformasi terhadap beban vertikal menjadi terbagi-bagi tiap segmen karet dan menjadi kecil-kecil, namun simpangan horizontal tetap sama besarnya dengan isolator tanpa pelat-pelat sisipan (Gambar 87).

Untuk menjamin kapasitas dukung gravitasi tetap besar, maka fleksibilitas horizontalnya dibatasi. Pembatasan ini diperlukan agar luas penampang efektif isolator untuk mendukung beban gravitasi masih cukup besar (Gambar 88).

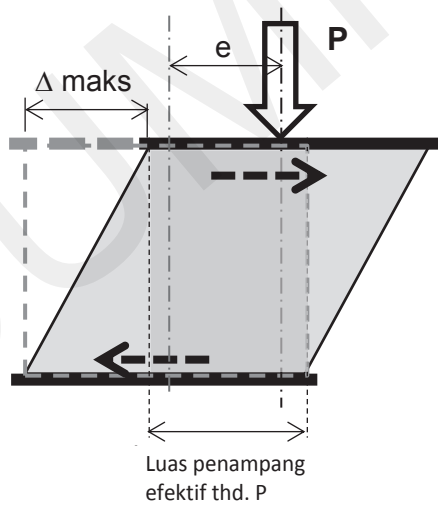
Gambar 89a menunjukkan salah satu contoh *laminated rubber bearing base-isolation* dalam keadaan utuh, sedangkan Gambar 89b adalah

Gambar irisannya. Gambar 90 menunjukkan uji coba gaya tekan dan gaya geser pada *rubber base-isolation*.



Gambar 87. Kekakuan Vertikal dan Lateral *Laminated-Rubber Bearing*

https://pt.slideshare.net/mahadianto/base-isolation20001228?next_slideshow=467626,
diunduh Juni 2022

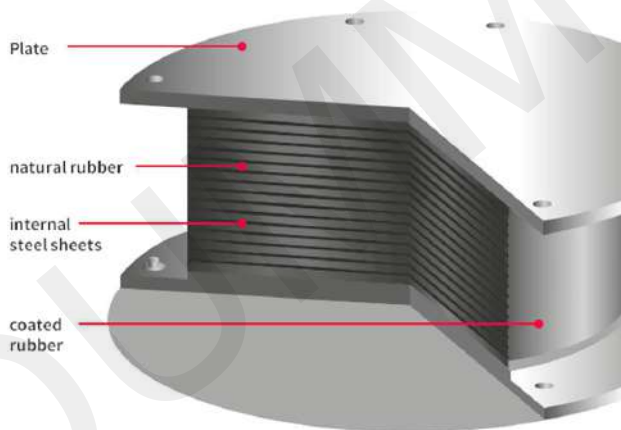


Gambar 88. Luas Penampang Efektif Isolator terhadap Gaya Gravitasi



Gambar 89a. *Laminated Rubber Bearing Base-Isolation*

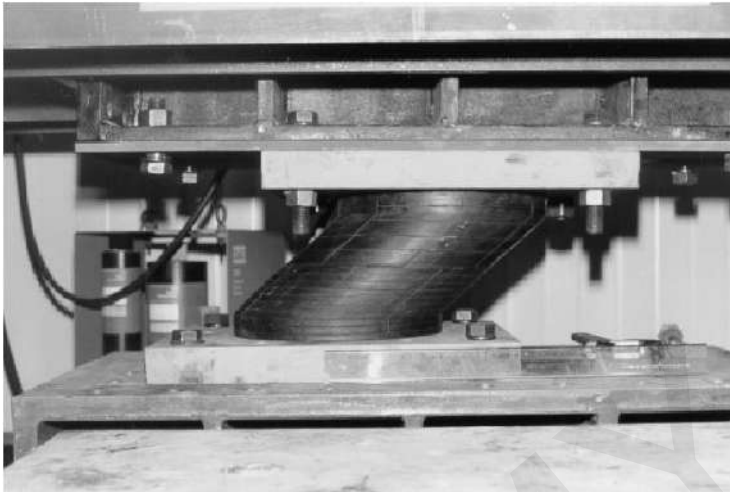
<http://www.prolianz.com/bridge-bearing-series/4.html>, diunduh Juni 2022



Gambar 89b. *Irisan Laminated Rubber Bearing Base-Isolation*

<http://www.drbworld.com/en/business/seismic-isolation-and-vibration-control/isolation-system.php>, diunduh Juni 2022

Base-isolation dapat ditempatkan di bawah kolom paling dasar, atau di puncak kolom lantai dasar/*basement*. Gambar 91a menunjukkan perspektif *basement* (parkir) yang di bawahnya ada ruang tempat *rubber base-isolation* dipasang. Gambar 91b menunjukkan sebuah *rubber base-isolation* yang terpasang di dasar kolom sebuah bangunan, sedangkan Gambar 91c menunjukkan *rubber base-isolation* yang terpasang di puncak kolom *basement* sebuah bangunan.



Gambar 90. Uji Tekan dan Geser pada Karet Isolasi

https://www.researchgate.net/figure/Shear-compression-test-of-1-scale-laminated-rubber-bearing-8_fig2_230260632, diunduh Juni 2022



Gambar 91a. Contoh *Base-Isolation* pada Bangunan,
Tokyo DIA Building (1973-1985)

http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_1905.pdf, diunduh Juni 2022



Gambar 91b. Contoh Penempatan *Base-Isolation* di Dasar Kolom

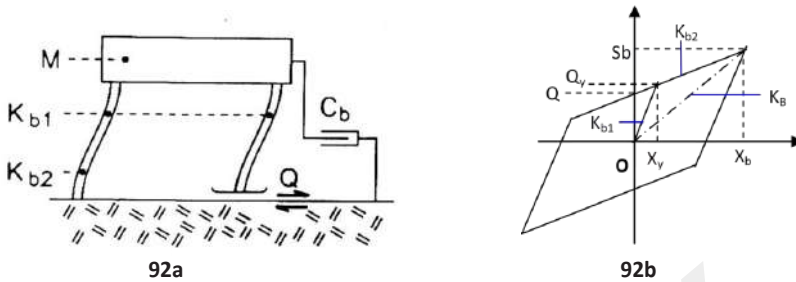
<https://m.made-in-china.com/product/High-Quality-Seismic-Isolators-for-Base-Isolation-711900732.html>, diunduh Juni 2022



Gambar 91c. Contoh Penempatan *Base-Isolation* di Puncak Kolom *Basement*

<https://www.numeria-eng.it/w48-Seismic-retrofit-of-residential-buildings.php>, diunduh Juni 2022

Isolasi Dasar dengan Sistem Peredaman Nonlinier



Catatan:

M = massa

C_b = viscous damper

K_b = kekakuan isolator bilinear

K_{b1} = kekakuan fase-elastik

K_{b2} = kekakuan fase-plastik

Q = gaya geser

(X_y, Q_y) = yield point (titik leleh)

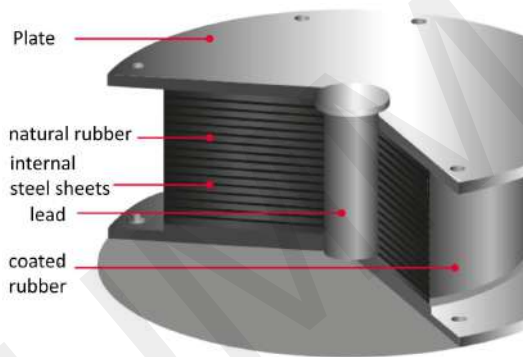
Gambar 92a. Idealisasi *Base-Isolation* dengan Sistem Peredaman Nonlinear
92b. Lintasan Histeresis Gaya Geser S vs Displacement X Peredaman Nonlinear

Sumber: Skinner, R. Ivan *et al.*, (1993)

Massa M (Gambar 92a) didukung oleh isolator *nonlinear* dengan komponen kekakuan K_{b1} dan K_{b2} . Gaya geser S_b dibanding dengan simpangan X_b (Gambar 92b) memperlihatkan lintasan histeresis *nonlinear* dan batas kekakuan efektif ('secant' stiffness) dari isolasi dasar *nonlinear*: $K_b = S_b/X_b$. Pada saat isolator melakukan simpangan horizontal akibat getaran gempa, maka lintasan kekakuan fase elastik K_{b1} dimulai dari titik O bergerak sampai titik leleh (X_y, Q_y) , kemudian selanjutnya masuk ke fase inelastik dan membentuk lintasan kekakuan K_{b2} dimulai dari titik (X_y, Q_y) sampai pada saat mencapai simpangan horizontal maksimal lintasan berhenti dititik (X_b, S_b) , kemudian isolator melakukan simpangan ke arah sebaliknya sehingga simpangan horizontal mengecil sampai kembali keposisi vertikal, kemudian simpangan horizontal mengalami perilaku yang sama dengan sebelumnya membesar lagi kearah yang berlawanan, dan seterusnya bolak-balik sampai akhirnya berhenti. Ada beberapa perangkat sistem isolasi nonlinier, di antaranya adalah: *lead-rubber bearing base isolation*, *friction pendulum bearings* (FPB), *triple friction pendulumTM bearing* (TFPB).

Lead-Rubber Bearing Base-Isolation

Lead-rubber bearing (Gambar 93) merupakan *laminated-rubber bearing isolation* dengan inti (*core*) pasak-timah (*lead-plug*). Daya dukung gravitasi diperoleh dari kapasitas dukung *rubber*, sedangkan peredaman dihasilkan dari sifat fleksibel karet dan dari proses pelelehan (*yielding*) pasak-timah. Karet bersama-sama dengan pasak-timah melakukan simpangan horizontal akibat getaran gempa, di mana karet tetap bersifat elastis, sedangkan pasak-timah dengan sifatnya yang plastis akan mengalami pelelehan (*yielding*) pada saat tegangan elastisnya dilampaui. Apabila getaran berhenti, pasak timah kembali ke posisi dan sifat asalnya.



Gambar 93. Irisan *Lead Rubber Bearing Base-Isolation*

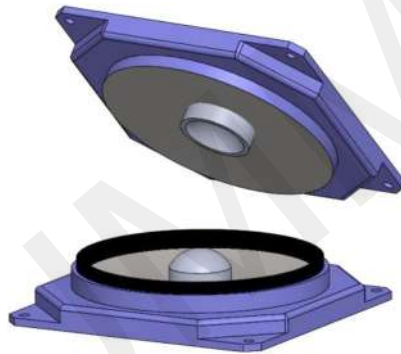
<http://www.drbworld.com/en/business/seismic-isolation-and-vibration-control/isolation-system.php>, diunduh Juni 2022

Friction Pendulum Bearings (FPB)

Friction Pendulum Bearings (FPB) adalah tipe isolasi dasar yang bekerja berdasarkan geser pada *bearingnya*. FPB terbuat dari baja, terdiri dari *bearing top plate*, *bearing bottom plate* yang permukaannya dalamnya berbentuk cekung *spherical* sebagai *sliding interface*, atau *concave slider bearing* (Gambar 94a dan 94b). Fungsi cekung *spherical bearing* adalah untuk memungkinkan FPB melakukan ayunan menurut waktu getar alami selama kejadian gempa. FPB dirancang secara khusus untuk tiap-tiap fasilitas berdasarkan kapasitas beban, kapasitas perpindahan (*displacement*), kondisi tanah dan ukuran struktur yang didukung.

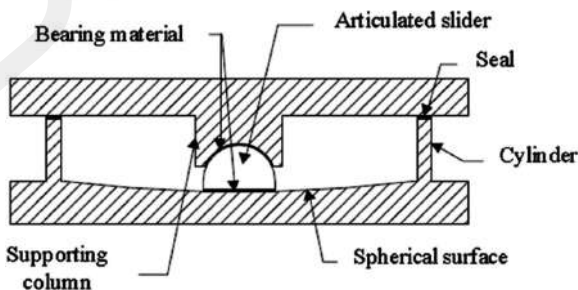
Perpindahan lateral sangat mereduksi gaya gempa yang ditransmisikan ke struktur, sedangkan gesekan bidang temu pada *bearing* tersebut menghasilkan gaya geser dinamis yang bekerja sebagai sistem peredam pada saat terjadi gempa. Permukaan cekung *spherical bearing* dan gaya gravitasi menyebabkan tipe ini mempunyai kemampuan melakukan *re-centering*, yaitu kemampuan struktur kembali ke sumbu utama ketika getaran gempa berhenti.

Bearing dapat didesain untuk mengakomodasi besaran *displacement* yang berbeda-beda hanya dengan menyesuaikan kelengkungan dan diameter permukaan. Dimensi FPB adalah bervariasi, misalnya diameter 91,44 cm, tinggi 20,32 cm dan berat 2.000 lbs (907,2 kgf), saat ini yang terbesar berukuran 396,24 cm.



Gambar 94a. Friction Pendulum Bearing dalam Keadaan Terbuka

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/294/1/012025/pdf>, diunduh Juni 2022



Gambar 94b. Potongan Friction Pendulum Bearing dalam Keadaan Sentris

https://www.researchgate.net/figure/Scheme-of-the-Friction-Pendulum-System-FPS_fig4_210109277, diunduh Juni 2022

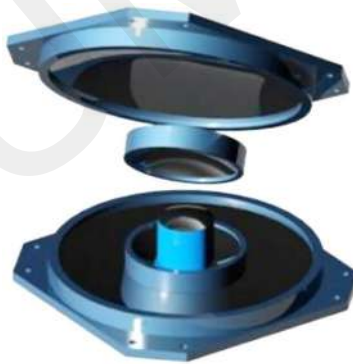


Gambar 94c. Friction Pendulum Bearing dalam Keadaan Bergeser

http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_0275.pdf, diunduh Juli 2019

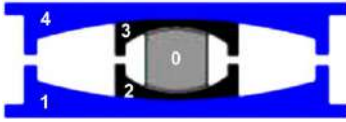
Triple Friction Pendulum™ Bearing (TFPB)

Triple Pendulum™ bearing merupakan pengembangan dari *Friction Pendulum Bearing*, merupakan *multiple pendulum isolators*. Bagian-bagiannya terdiri dari: *bearing bottom plate* (1) dan *bearing top plate* (4), *inner slider* (0), *bottom articulate slider* (2) dan *top articulate slider* (3). Properti dari TFPB tersebut bekerja bertahap menurut level kekuatan gempa. Bila terjadi gempa kecil (pada level gempa batas layan) pergeseran *slider* 3 bersama *top plate* 4 menggerakkan *inner slider* yang bergeser dan berputar pada permukaan 2 dan 3. Bila terjadi gempa sedang (pada level kerusakan yang dikontrol), slider 2 bergeser pada permukaan *bearing plate* 1. Bila terjadi gempa besar (kondisi *live safety*), bearing plate 4 bergeser terhadap slider 3 (Gambar 95a s.d. 95d).

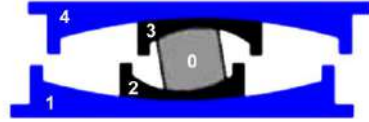


Gambar 95a. *Triple Friction Pendulum™ Bearing* TFPB

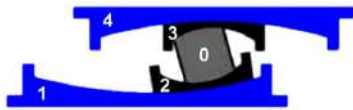
https://opensees.berkeley.edu/wiki/images/5/5a/TPB_Nhan_Fig1.jpg, diunduh Juni 2022



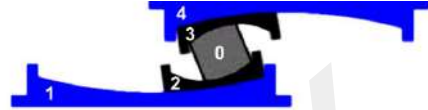
Gambar 95b.
TFPB dalam Posisi Sentris



Gambar 95c.
Pergeseran Pendulum pada Level Gempa Batas Layan



Gambar 95d. Pergeseran Pendulum pada Level Kerusakan yang Dikontrol



Gambar 95e. Pergeseran Pendulum pada kondisi *Live Savety*

Notasi:

0 = inner slider; 1 = bottom bearing plate; 2 = bottom articulate slider; 3 = top articulate slider; 4 = top bearing plate.

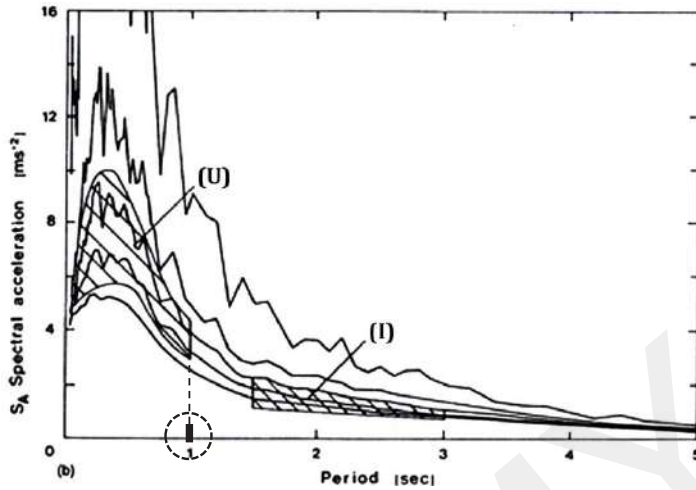
http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_0275.pdf, diunduh 10 Juli 2019

Kelebihan TFPB adalah tegangan geser pada bidang temu slider berbeda-beda dari yang kecil (*inner slider*) yang lebih besar (*articulate slider* bawah) dan yang terbesar (*articulate slider* atas) sehingga dapat mengantisipasi perubahan percepatan dan kerusakan peralatan yang sensitif.

Di samping tipe-tipe isolasi dasar yang dibahas masih banyak tipe-tipe isolasi dasar lain yang telah dipatenkan.

Pengaruh Isolasi Dasar pada Respons Struktur Bangunan terhadap Gempa

Isolasi dasar tidak selalu memberikan respons yang menguntungkan pada semua struktur bangunan, hanya struktur bangunan dengan rentang periode getar tertentu saja memberikan respons yang baik apabila dipasang isolasi dasar, sebaliknya ada rentang periode getar bangunan tertentu yang memberikan respons tidak baik bila dipasang isolasi dasar. Pada dasarnya struktur yang kaku (periode getar pendek) memberikan respons lebih baik bila dipasang isolasi dasar.



Gambar 96. Diagram Spektrum Respons Percepatan Rata-rata dari 8 Accelerogram, Peredaman 2, 5, 10 dan 20%

Gaya Inersia Paling Besar Sekitar Periode Getar 0,1 – 0,6 et
(Bangunan 1 – 10 Lantai)

Sumber: Skinner R. Ivan *et al.*, (1993)

Area yang diarsir dengan tanda (U) dalam Gambar 96 menampilkan respons spektra linier untuk periode getar alami pertama sampai dengan 1.0 detik (tanda lingkaran) dan peredaman struktur sampai dengan 10% dari peredaman kritis, area yang diarsir dengan tanda (U) tersebut menunjukkan rentang periode getar yang berpeluang bagus untuk menggunakan *isolasi dasar*. Sementara itu, pada area yang diarsir dengan tanda (I), memberikan respons spektra percepatan untuk rentang periode getar pertama dan peredaman pada struktur yang perlu diseleksi dengan sistem isolasi yang sesuai. Maka, untuk memilih menggunakan isolasi dasar dan tipenya harus dilakukan oleh ahli di bidangnya.

2. Sistem Kontrol Pemencar Energi Pasif

Sistem yang tergantung pada kecepatan:

- Viscoelastic solid
- Viscoelastic fluid

Sistem yang tergantung pada perpindahan (*displacement*):

- Friction
- Metal yielding
- Lead extursion

Viscoelastic Damper (Solid)

Elastisitas adalah kecenderungan material solid untuk kembali ke bentuk dan ukuran semula setelah gaya tidak bekerja. Jadi peregang material elastis tergantung pada gaya.

Viskositas adalah ukuran ketahanan cairan untuk mengalir. Cairan dengan viskositas rendah mudah mengalir. Contohnya air lebih mudah mengalir daripada sirup, madu atau gel. Material viskos bersifat kental, lengket atau perekat. Viskositas berkurang kalau material dipanasi, contohnya sirup yang dipanaskan lebih mudah mengalir. Regangannya tergantung pada waktu.

Viskoelastisitas adalah sifat bahan yang menunjukkan karakteristik viskos dan elastis ketika mengalami deformasi. Regangannya tergantung dari gaya dan waktu. Bahan tersebut bila mendapat gaya kejut (percepatan tinggi) menampilkan sifat yang elastis, kaku dan memantulkan, misalnya material viscoelastik dipukul dengan palu, maka material tersebut relatif tidak berubah bentuk dan memantulkan palu tersebut (seperti karet keras). Sementara itu, apabila mendapat gaya yang bekerjanya lambat material tersebut menampilkan sifat yang viskos dan lunak, misalnya ketika palu ditekan dengan lambat pada permukaan material *viscoelastic* material akan desok kemudian seiring berjalannya waktu secara lambat kembali ke bentuk asalnya.

Viscoelastic damper terdiri dari material *viscoelastic* direkatkan pada pelat baja. Pelat baja berfungsi sebagai komponen penghubung antara *damper* dengan komponen struktur bangunan. *Viscoelastic damper* secara alami menampilkan sifat elastis dan viskos (yaitu tergantung perpindahan dan waktu). Material yang digunakan pada umumnya polimer sintetik berbahan dasar acrylic polimer, umumnya adalah *solid elastomeric*. (sumber: <http://multimedia.3m.com/mws/>)

media/828134O/3m-viscoelastic-damping-polymer-112-series.pdf?&fn=Viscoelastic%20Damping%20Polymers%2011, diunduh Juni 2022).

Viscoelastic damper umumnya dipasang pada *bracing chevron*, *bracing diagonal*, atau pada pertemuan balok rangka batang (*open web joist*) dengan kolom, seperti yang dipasang pada bangunan WTC (yang telah roboh).

Ketika struktur *braced frame* mengalami deformasi siklik lateral, material *viscoelastic* di ujung batang diagonal mengalami deformasi geser bolak-balik secara berulang. Pergeseran tersebut menghasilkan panas yang dibuang ke lingkungan, serta menghasilkan disipasi energi.

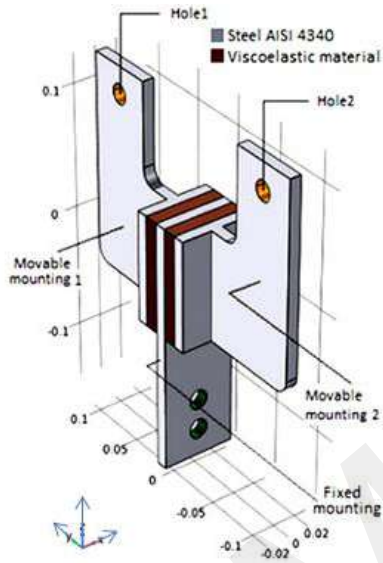
Penggunaan *viscoelastic damper* sampai dengan saat ini relatif sedikit dibandingkan dengan *fluid viscous damper*, namun belakangan ini ada penelitian penggunaan *viscoelastic damper* untuk rangka pemikul momen yang menggunakan Reduced Beam Section.

Kelebihan *viscoelastic damper*:

- keandalan tinggi;
- memungkinkan dianalisis dengan analisis linier;
- agak lebih murah.

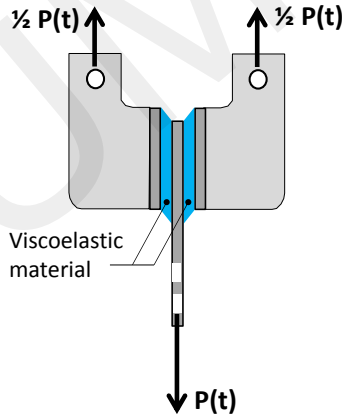
Kekurangan *viscoelastic damper*:

- sangat tergantung pada suhu;
- kapasitas gaya dan perpindahan lebih rendah;
- tidak ada pembatasan gaya (*not force limited*);
- kebutuhan dilakukan analisis nonlinier dalam kebanyakan kasus praktis. (http://www.ce.memphis.edu/7119/PDFs/FEAM_Notes/Topic15-6%20PassiveEnergySystemsNotes.pdf), diunduh Januari 2021.

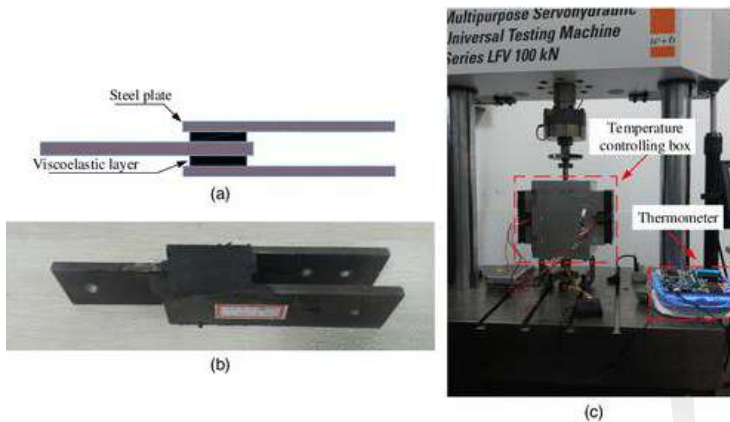


Gambar 97a. *Viscoelastic Damper*

<https://www.comsol.com/blogs/app-analyze-the-design-of-a-viscoelastic-structural-damper/>,
diunduh Juni 2022

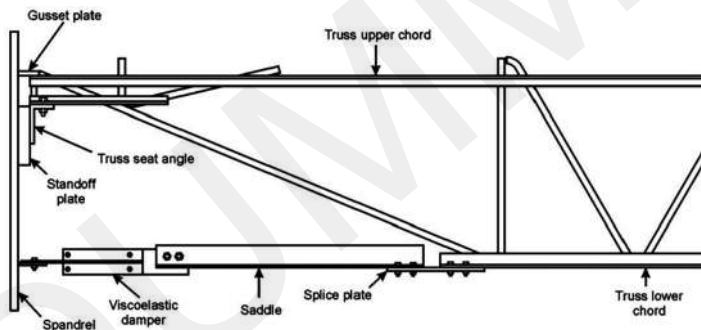


Gambar 97b. Deformasi Geser pada *Viscoelastic Damper*
Ketika Menerima Gaya



Gambar 97c. Tes Viscoelastic Damper

https://www.google.com/search?q=viscoelastic%20dampers%20in%20building&tbm=isch&rlz=1C1CHBF_enID917ID917&hl=en&sa=X&ved=0CB0Qql8BKABqFwoTCLDPu9n71_gCFQAAAAAdAAAAABBN&biw=1579&bih=690#imgsrc=HFxiQzVtE1tRM&imgdii=18jBe-LWyl9_OM, diunduh Juni 2022



Gambar 97d. Viscoelastic Damper pada Pertemuan Open Web Joist dengan Kolom

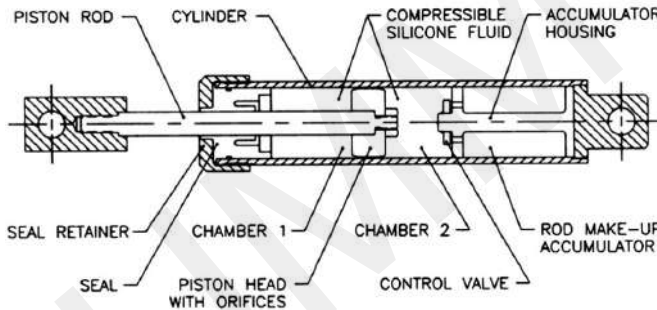
https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=910105&fbclid=IwAR1mzD-6iPgIFG2GHDqvBGw2EX82JQj-OC7P8y_2St4TJ4hDRf9YNIFNWR8, diunduh Juni 2022

Fluid Viscous Damper

Fluid viscous damper terdiri dari pipa silinder yang diisi dengan cairan yang mempunyai viskositas rendah. Ketika piston dan kepala piston dipukul, cairan dipaksa mengalir melalui lubang di sekitar dan di kepala piston. Cairan mengalir dengan kecepatan tinggi, menghasilkan pengembangan panas. Panas tersebut dilepaskan ke lingkungan.

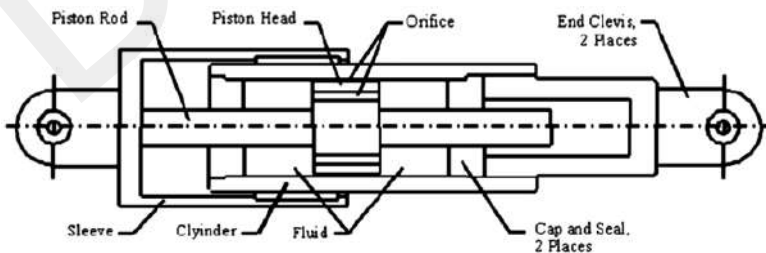
Ada dua tipe *Fluid viscous damper*:

- Damper dengan piston “*single-ended*” di mana batang piston hanya berada di satu sisi kepala piston (Gambar 98, 99a). Jenis ini relatif kompak, tetapi dapat mengarah pada pengembangan kekakuan pada frekuensi gerak yang relatif rendah.
- Damper dengan piston di sekitar “*double-ended*” atau “*run-through*” yang banyak digunakan hingga saat ini di Amerika Serikat. Pada tipe ini, batang piston menembus kedua kepala piston dan keluar dari peredam ke kedua ujung silinder utama (Gambar 99b). Meskipun ukurannya lebih besar dan lebih rentan untuk menutup kebocoran (karena ada segel kedua), keuntungan dari konfigurasi ini adalah bahwa hampir tidak ada kekakuan atas berbagai frekuensi.



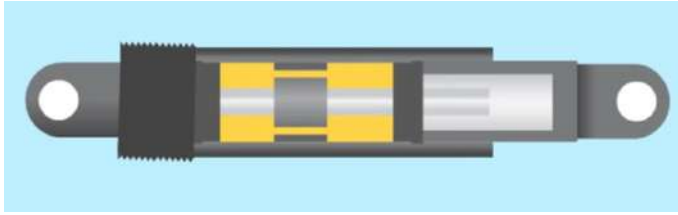
Gambar 98. *Fluid Viscous Damper, Piston Single-Ended*

http://www.ce.memphis.edu/7119/PDFs/FEAM_Notes/Topic15-6%20PassiveEnergySystemsNotes.pdf, diunduh Juni 2022



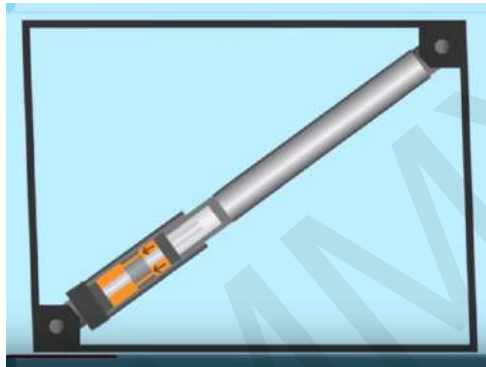
Gambar 99a. *Fluid Viscous Damper, Piston Double-Ended*

https://www.researchgate.net/figure/3-Viscous-damper-courtesy-of-Taylor-Devices_fig3_269875610, diunduh Juni 2022



Gambar 99b. *Fluid Viscous Damper, Piston Double-Ended*

<https://www.youtube.com/watch?v=OoWtKmNoz6Q>, diunduh Juni 2022



Gambar 100. Contoh Pemasangan *Fluid Viscous Damper* pada *Truss*

<https://www.youtube.com/watch?v=OoWtKmNoz6Q>, diunduh Juni 2022

Friction Damper

Friction damper mengandalkan pergeseran ketika melakukan peredaman, ada bermacam tipe *friction damper*, seperti: peredam *slotted-bolted* (baut slip), *cross-bracng friction damper*, *friction damper* untuk *chevron-brace* dan masih ada beberapa paten *friction damper*.

- ***Sloted Bolt Friction Damper***

Terdiri dari pelat baja (a) dengan lubang baut berbentuk memanjang, diapit oleh 2 buah pelat baja atau kanal U (b) yang dibuat bersama dan diketatkan dengan kekuatan tertentu (Gambar 101). Pengetatan baut tersebut menghasilkan gaya penjepit sedemikian rupa sehingga slip geser dapat terjadi apabila terjadi gempa menengah atau besar.

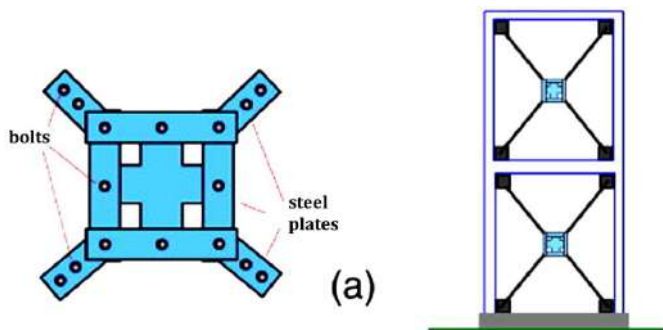
Lubang baut memanjang pada pelat baja (a) memberi ruang gerak baut pada saat terjadi slip antara pelat baja (a) dengan pelat-pelat baja (b). Pada bidang temu pelat-pelat baja disisipkan bahan khusus untuk memberikan koefisien gesekan yang stabil.



Gambar 101. “Pall” *Friction Slotted-Bolted Damper* Terpasang di *Truss Baja*
https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_1955.pdf, diunduh Juni 2022

- ***Cross-Bracing Damper dan Friction Damper untuk Chevron Braced Frame***

Perangkat peredam jenis ini terdiri dari baja strip dan baut baja kekuatan tinggi, bentuk geometrisnya adalah persegi untuk X bracing dan bentuk T terbalik untuk *Chevron-bracing* (Gambar 102a, 102b). Pelat-pelat ini dijepit bersama dengan baut dengan keketatan tertentu sehingga ketika mengalami gempa kecil tidak terjadi slip, dan ketika mengalami gempa besar terjadi slip rotasi antara baut dan baja strip. Slip tersebut dapat terjadi karena bentuk geometri perangkat tersebut dan sistemnya dapat berdeformasi bila kapasitas kekuatan jepitan bautnya terlampaui.



Gambar 102a. “Pall” Cross-Bracing Damper

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X13001077>, diunduh Juni 2022



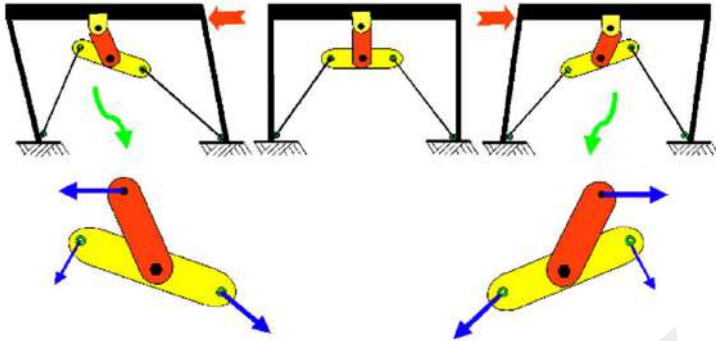
Gambar 102b. “Pall” Cross-Bracing Damper dalam Posisi Bergeser

<https://www.youtube.com/watch?v=T6vMH-gZjN4>, diunduh Juni 2022



Gambar 102c. Cross-Bracing Friction Damper Terpasang pada Bangunan

<https://www.youtube.com/watch?v=T6vMH-gZjN4>, diunduh Juni 2022



Gambar 103. *Friction Damper untuk Chevron Braced Frame*

<http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/1048.pdf>, diunduh Juni 2022

Kelebihan *Friction Damper*:

- Gaya dibatasi.
- Mudah dikonstruksikan.
- Relatif tidak mahal.

Kekurangan *Friction Damper*:

- Gaya geser peredam cenderung berubah seiring waktu, maka perlu pemeliharaan secara periodik.
- Berperilaku sangat nonlinier.
- Menambah besar kekakuan inisial pada sistem.
- Kemungkinan ada deformasi sisa yang tidak diharapkan.

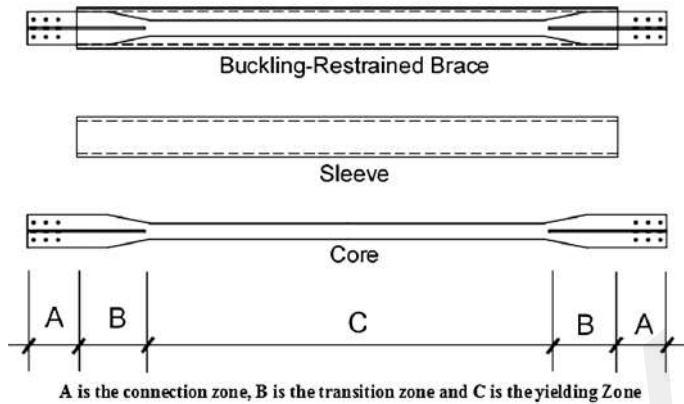
Steel Buckling-Restrained Braced Frame (BRBF)

BRBF termasuk peredam berdasarkan *yielding* material dan merupakan pemecahan inovatif untuk *braced-frame* konsentrik yang populer di Jepang dan Amerika. Pada dasarnya BRBF menggunakan batang baja langsing sebagai bracing diagonal (disebut *steel-core*), yang dibungkus dengan pipa baja (CHS/RHS/SHS) yang dicor dengan beton sebagai penghambat terjadinya tekuk pada *steel-core* tersebut. Konsep ini berbeda dengan konsep konvensional, di mana konsep konvensional mengeliminir terjadinya tekuk pada batang tekan dengan memperbesar dimensi batang sampai kekakuan batang cukup untuk tidak tertekuk,

atau memperpendek batang tekan dengan memasang penahan pada sumbu lemahnya untuk memperkecil angka kelangsingannya. Tujuan menghambat tekuk pada BRBF tersebut adalah agar *steel-core* dapat mengerahkan seluruh kekuatan elastiknya sampai mengalami *yielding* bila terjadi beban tekan lebih (*over loading*) dan dapat melakukan disipasi energi. Untuk beban tarik lebih pada *steel-core* tidak ada perilaku tekuk, maka *yielding* baru akan terjadi ketika terjadi beban lebih.

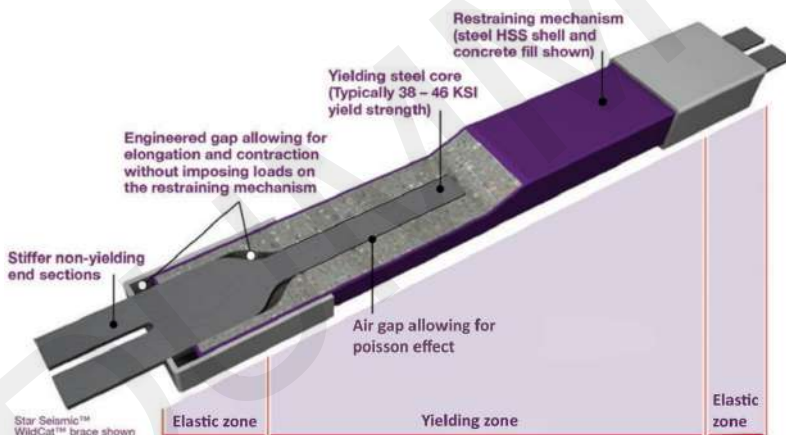
Steel core tersebut harus dapat bekerja menerima gaya tekan dan tarik tanpa diintervensi oleh pembungkusnya, maka sebelum dimasukkan ke dalam pipa baja, *steel-core* dilapisi dengan material *debonding* agar terpisah dari mortar, antara lain dengan: *rubber*, *polyethyelene*, *silicon grees* (ini yang paling efektif sebagai material *debonding*), dan *mastic tape*.

Efek poisson atau mengembangnya *steel-core* akibat gaya tekan dapat mengakibatkan badan *steel-core* saling bergesekan dengan mortar. Apabila hal tersebut terjadi, maka mortar bersama dengan pipa pembungkus ikut bekerja menahan gaya tekan dan tarik. Perilaku ini harus dihindari agar disipasi energi melalui proses *yielding* tekan dan tarik *steel-core* dapat terjadi. Oleh karena itu, selain dilapisi material *debonding*, badan *steel-core* sampai perbatasan dengan kepala diberi celah terhadap mortar untuk memberi kesempatan pemuluran/pemendekan *steel-core*, sedangkan sebagian kepala yang masih berada di dalam pipa tidak dipisahkan dari mortar. Lebar celah tersebut diperhitungkan terhadap rasio poisson, yaitu pada keadaan elastik = 0.3 dan pada keadaan *yielding* = 0.5, selain itu lebar celah didesain tidak berlebihan agar amplitudo tekuk tidak terlalu besar. Dimensi kedua kepala *steel core* dibuat lebih besar daripada *steel core*-nya untuk menjamin bagian tersebut tetap elastis.



Gambar 104a. Penampang Logitudinal BRBF

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016816303179>, diunduh Juni 2022



Gambar 104b. Perspektif Penampang BRBF

https://www.aisc.org/globalassets/modern-steel/steelwise/112009_nov09_steelwise_web.pdf, diunduh Juni 2022

Steel Plate Dampers (Added Damping and Stiffness System - ADAS)

Sistem ADAS merupakan perangkat peredam yang dipatenkan, terdiri dari satu seri pelat-pelat baja. Dasar dari pelat-pelat dipasang pada *chevron bracing* di puncak pertemuan batang diagonal pada dasar batang horizontal (balok lantai). Pelat-pelat baja tersebut diletakkan tegak lurus

pada arah datangnya gaya atau terhadap bidang kerja bracing sehingga relatif lemah terhadap lentur. Ketika balok lantai di atas peredam berdeformasi lateral, *chevron bracing* juga akan berdeformasi, maka pelat-pelat baja menerima gaya geser lentur. Gaya geser tersebut meneruskan momen lentur pada bagian atas pelat-pelat dan melenturkan pelat-pelat pada sumbu lemah.

Konfigurasi geometris pelat dibuat sedemikian rupa sehingga momen lentur menghasilkan distribusi tegangan lentur seragam di seluruh tinggi pelat-pelat, dengan demikian aksi inelastik (disipasi energi) terjadi di seluruh tinggi pelat-pelat. Contohnya bila pelat ditumpu jepit-sendi maka pelat berbentuk segitiga (T-ADAS) (Gambar 105), di mana bagian pelat paling lebar menerima momen maksimal, sedangkan bagian pelat paling sempit menerima momen negatif. Bila ditumpu jepit-jepit, bentuk pelat seperti gelas pasir (X-ADAS) (Gambar 106), yaitu bagian pelat yang tertumpu dimensinya paling lebar sedangkan bagian tengah pelat paling tipis.

Ketika pelat-pelat baja berdeformasi, pelat-pelat tersebut memberikan kekakuan yang tergantung dari perpindahan (*displacement*), dan disipasi energi, oleh karena itu ratio kekakuan antara kekakuan batang bracing (B) terhadap kekakuan ADAS (D) sangat penting untuk menjamin agar ADAS mengalami *yielding* sebelum batang bracing mengalami tekuk. Xia dan Hanson 1992 merekomendasikan ratio B/D sebesar kurang-lebih 2, atau bracing 2 kali lebih kaku daripada ADAS (http://prof.khuisf.ac.ir/images/Uploaded_files/1_ADAS%5B4013707%5D.PDF). Hal ini merupakan salah satu kelemahan ADAS karena dapat menyebabkan *chevron bracing* menjadi lebih mahal daripada perangkat ADASnya.

Selain kelemahan tersebut, kelebihan dan kekurangan ADAS kurang lebih sama dengan *unbonded damper (buckling restrained)*, yaitu sebagai berikut.

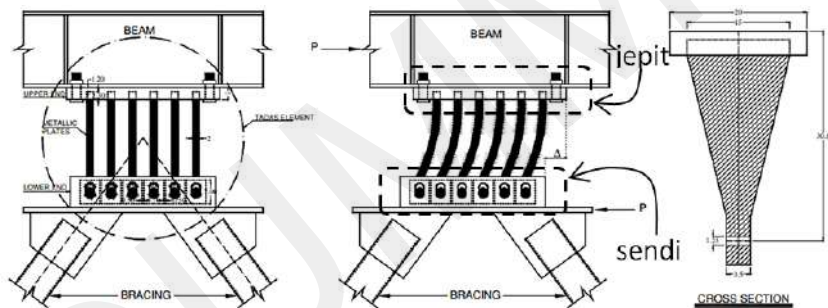
Kelebihan ADAS dan *Unbonded Damper*

- Disipasi energi terkonsentrasi di lokasi yang telah dirancang untuk tujuan ini.

- Tuntutan disipasi energi pada anggota struktural lainnya dapat dikurangi secara substantial.
- Menghasilkan perangkat ADAS tidak akan memengaruhi kapasitas layanan beban gravitasi dari sistem struktural, karena perangkat adalah bagian dari penahan beban lateral.
- Mudah dikonstruksikan.
- Relatif tidak mahal.

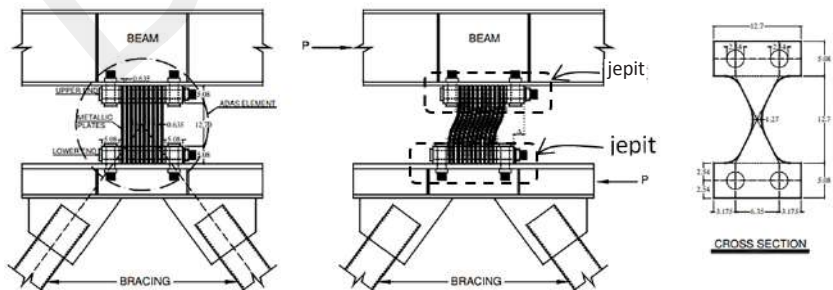
Kekurangan ADAS dan *Unbonded Damper (buckling restrained)*

- Harus diganti setelah gempa besar.
- Berperilaku sangat nonlinier.
- Menambah kekakuan pada sistem.
- Kemungkinan ada sisa deformasi yang tidak diinginkan.



Gambar 105. Deformasi T-ADAS

https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14_S25-003.PDF, diunduh Juni 2022



Gambar 106. Deformasi X-ADAS

https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14_S25-003.PDF, diunduh Juni 2022

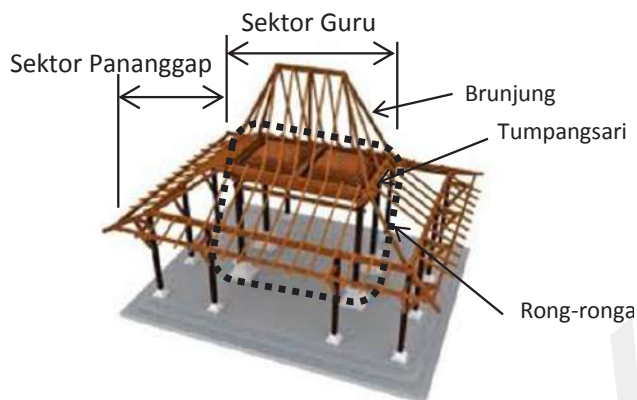


Gambar 107. Contoh Penerapan ADAS pada *Chevron Braced-Frame*
http://article.sapub.org/image/10.5923.c.jce.201402.33_017.gif, diunduh Juni 2022

Santen-Fuse

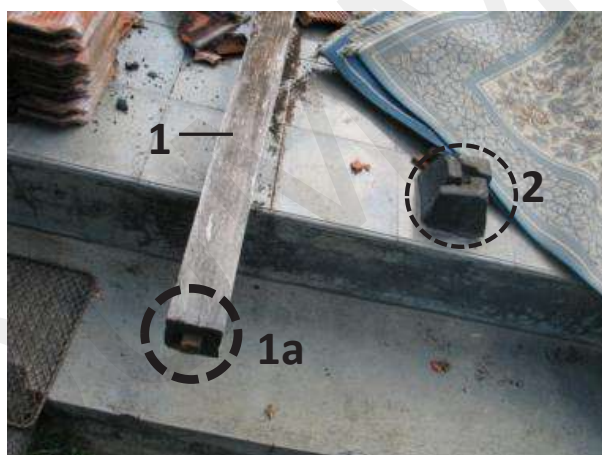
Pendopo joglo Yogyakarta memiliki struktur *rong-rongan* yang berfungsi menjamin stabilitas dan kekakuan struktur. Struktur *rong-rongan* terdiri dari 4 buah saka guru, 2 buah blandar dan 2 buah pangeret (balok ring), 2 buah sunduk dan 2 buah kili (balok portal), dadapeksi, dan santen (Gambar 108a dan 108c). Struktur *rong-rongan* tersebut merupakan struktur rangka pemikul momen, di mana join momennya adalah pertemuan antara *sunduk* dengan *sakaguru* untuk arah panjang, dan *kili* dengan *sakaguru* untuk arah pendek (Gambar 108d, 110a). Gambar 108b adalah *saka guru* dari sebuah bangunan *joglo* yang runtuh karena gempa Yogyakarta 2006, dalam gambar tersebut terlihat sebuah *sakaguru* yang dasarnya ada pennya (1, 1a) dan umpak yang ada lubang di atasnya (2). Pada saat *rong-rongan* berdiri, pen di dasar *sakaguru* tersebut dimasukkan ke dalam lubang umpak, sehingga dapat disimpulkan tumpuan tersebut bersifat sendi. Ketika menerima gaya geser gempa yang besar, *rong-rongan* tersebut runtuh.

Bangunan joglo Yogyakarta mengandalkan fleksibilitas join momennya untuk melakukan disipasi energi gempa, di mana ketika terjadi momen, maka join tersebut dapat berputar secara terbatas sehingga sebagian energi gempa terlepas. Namun, menurut Prihatmaji (2007) dalam “Perilaku Rumah Tradisional Jawa Joglo terhadap Gempa”, bangunan joglo tidak stabil terhadap gempa wilayah 3 dengan waktu getar yang panjang (frekuensi rendah).



Gambar 108a. Struktur Bangunan Joglo

Emper tidak ada dalam gambar ini <http://achmad-jf.blogspot.com/2012/06/mengulas-sistem-struktur-joglo-dan-arti.html>, diunduh Mei 2019

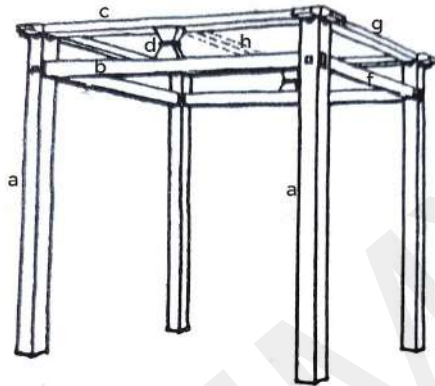


Gambar 108b. *Sakaguru* dan Umpak dari Sebuah Bangunan Joglo yang Runtuh Pascagempa Yogyakarta 2006

1 = sakaguru, 1a = pen di dasar sakaguru, 2 = umpak dengan lubang pen (Dokumen Maria I. Hidayatun)

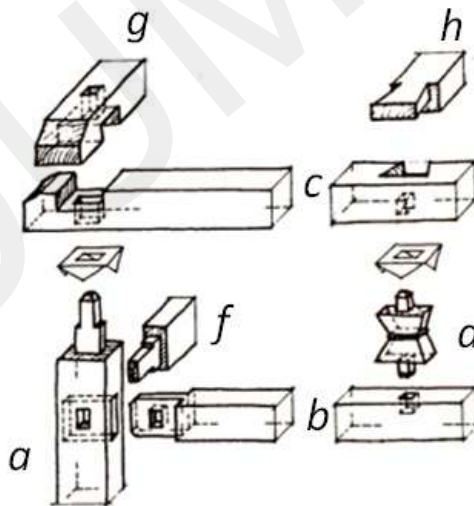
Dalam “Santen-Fuse as an Earthquake Damper for Pendopo Joglo”, Maer dan Pujisuryadi (2015) mencoba menemukan alternatif yang dapat lebih mengamankan pendopo joglo terhadap keruntuhan ketika dilanda gempa bumi melalui disipasi energi gempa secara lebih optimal. Ada dua peluang yang dapat diterapkan, pertama tumpuan

sakaguru hanya diletakkan di atas umpak seperti rumah Srotong dan beberapa rumah tradisional Sumatra agar *sakaguru* dapat slip ketika menerima gaya geser yang besar (Bab 6); kedua dengan memodifikasi santen serta model struktur *rong-rongan*. Dari dua alternatif tersebut dipilih alternatif kedua karena alternatif pertama sudah banyak diteliti.



Gambar 108c. *Rong-rongan*

Sumber: Frick, 1997



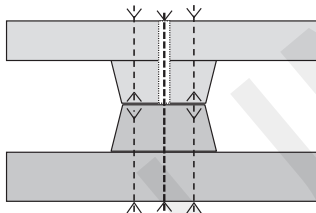
Gambar 108d. Detail Konstruksi Join Kolom-Balok

Sumber: Frick, 1997

Keterangan Gambar 108c dan 108d:

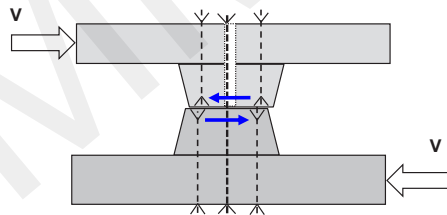
a = saka, b = sunduk, c = blandar, d = santen, f = kili, g = pangeret, h = dadapeksi

Santen (Gambar 109c dan 109d) merupakan komponen penggenap/pelengkap yang berfungsi meneruskan beban atap pada *blandar/pangeret* ke *sunduk/kili*. Fungsi *santen* tersebut, dalam penelitian ini dikembangkan menjadi sebagai penahan gaya geser lateral dan sebagai komponen/perangkat disipasi energi gempa, selanjutnya disebut “SANTEN-fuse”. Untuk dapat memenuhi fungsi tersebut, dilakukan modifikasi pada *santen* dengan membelah *santen* menjadi dua bagian atas dan bawah, kedua bagian tersebut diikat dengan baut yang menekan kedua bagian tersebut dengan besar gaya tekan yang diperhitungkan agar gaya geser maksimal (V) yang bekerja pada perangkat SANTEN-fuse menghasilkan simpangan geser yang tidak melampaui angka tertentu yang ditetapkan. Lubang baut *santen* bagian atas dibuat berbentuk memanjang sehingga ketika menerima gaya geser yang besar, *santen* bagian atas tersebut dapat bergeser terhadap *santen* bagian bawah sampai batas simpangan yang ditetapkan sehingga terjadi disipasi energi gempa (Gambar 109a dan 109b).



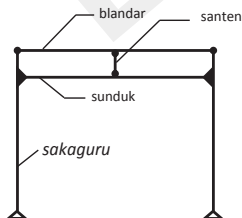
Gambar 109a.

Bentuk dan Konstruksi SANTEN-Fuse
Sumber: Maer B.W., Pujisuryadi, 2015



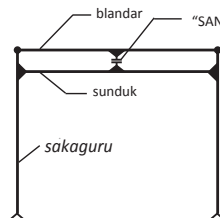
Gambar 109b.

Perilaku Slip SANTEN-fuse terhadap
Gaya Geser Lateral
Sumber: Maer B.W., Pujisuryadi, 2015



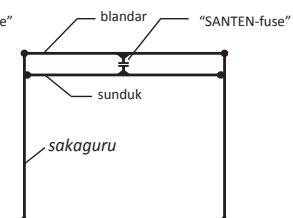
Gambar 110a.

Model Struktur
Rong-rongan Asli (M)



Gambar 110b.

Model Struktur Rong-rongan
Eksperimen 1 (M1)



Gambar 110c.

Model Struktur Rong-rongan
Eksperimen 2 (M2)

Dengan perangkat tersebut dicoba dua buah model (idealisasi) struktur: 1) menggunakan SANTEN-fuse dan semua kondisi model sama dengan struktur *rong-rongan* asli (join *sakaguru* dengan sunduk dan dengan kili sama dengan yang asli berupa join momen) (Gambar 110b); 2) menggunakan SANTEN-fuse dan join momen antara *sakaguru* dengan sunduk dan dengan kili diubah menjadi join sendi, jadi tidak menerima momen (Gambar 110c). Kedua model tersebut terbukti mengurangi gaya-gaya dalam yang bekerja di dalam struktur *rong-rongan* dibandingkan dengan model *rong-rongan* asli. Model-2 berkinerja lebih optimal, di mana pengurangan gaya-gaya dalam tersebut sangat signifikan dibandingkan model-1. Adanya perbedaan kinerja kedua model alternatif ini karena pada model-1, join antara *sakaguru* dengan sunduk dan dengan kili menerima momen sehingga gaya geser yang diterima oleh perangkat SANTEN-fuse hanya sebagian saja, sedangkan pada model alternatif-2 join antara *sakaguru* dengan sunduk dan dengan kili tidak menerima momen sehingga gaya geser sepenuhnya diterima oleh perangkat SANTEN-fuse. Oleh karena itu, pengurangan gaya-gaya dalam struktur *rong-rongan* model alternatif-2 sangat signifikan dibandingkan dengan model alternatif-1.

3. Dynamic Vibration Absorber (DVA)

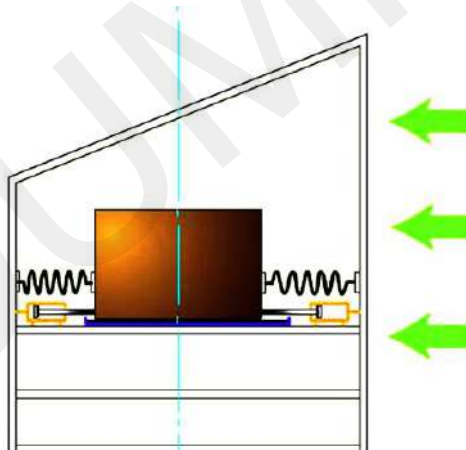
a. Tuned Mass Damper (TMD)

TMD dikenal sebagai absorber harmonik atau peredam seismik, yaitu perangkat yang dirancang untuk mengontrol getaran dinamik angin atau gempa bumi yang terdiri dari massa, pegas (kekakuan), dan peredam viskos yang dihubungkan ke struktur bangunan, dipasang di lantai tingkat tertentu bagian atas atau di puncak gedung bertingkat tinggi/pencakar langit, atau pada bangunan lain seperti jembatan atau menara.

TMD secara optimal mengatur frekuensi alami sistem, sehingga dihasilkan interferensi (perpaduan) gelombang yang saling

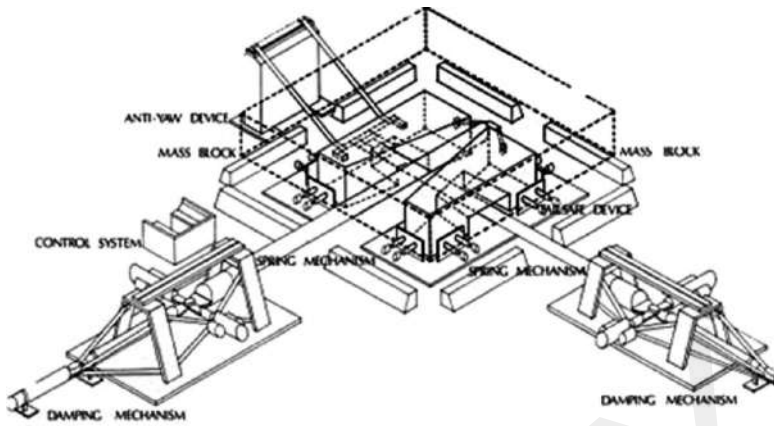
meniadakan/melemahkan mengurangi respons *mode* pertama untuk struktur bangunan bertingkat banyak yang dalam kondisi elastik. Parameter pengaturan frekuensi TMD adalah: massa, kekakuan dan koefisien peredaman. Massa merupakan faktor penting dalam pengaturan frekuensi alami sistem, menurut Farghaly dan Ahmed (2012) ratio massa TMD terhadap massa bangunan berkisar antara 1% sampai 10%. Beberapa peneliti membuktikan apabila rasionya tepat, maka hasilnya sangat positif, sebaliknya apabila tidak tepat dampaknya bisa negatif.

Untuk menghasilkan massa yang besar, TMD dibuat dari blok massa beton atau baja. Blok massa tersebut diletakkan di atas landasan licin (misalnya cairan licin) atau digantung sehingga dapat bergerak bebas secara lateral atau berayun kemudian dihubungkan ke struktur dengan pegas dan peredam di sekitarnya. Kombinasi massa, kekakuan pegas dan koefisien peredaman perangkat ini diatur untuk menghasilkan frekuensi/waktu getar yang sesuai.



Gambar 111a. Prinsip TMD

http://www.vibrationdata.com/Newsletters/January2002_NL.pdf, diunduh November 2021



Gambar 111b. Komponen-komponen TMD

<http://winddesign4.blogspot.com/2012/>, diunduh Januari 2021



Gambar 111c. 1 Set TMD Taipei 101 (Baja)

<https://www.civilengineeringweb.com/2021/04/what-is-tuned-mass-damper.html>, diunduh Juni 2022



Gambar 111d. TMD Taipei 101

http://www.ahcustom.com/featured_projects/damping_system.html, diunduh Januari 2021

Tuned Liquid Dampers (TLD)

TLD adalah tipe TMD yang menggunakan massa cairan (pada umumnya air). Ada dua tipe TLD:

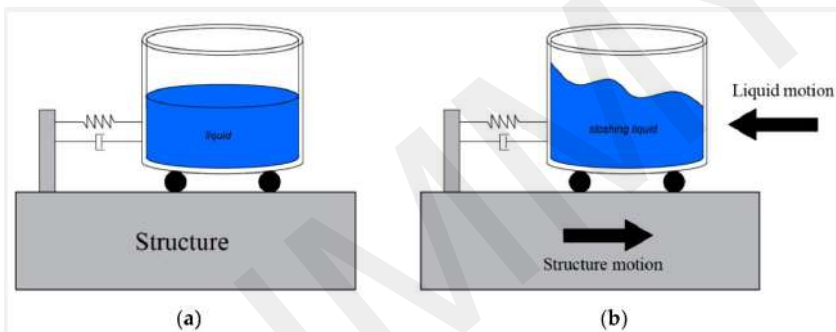
- ***Tuned Liquid Sloshing Damper (TLSD)***, yaitu tipe TLD yang mengandalkan guncangan cairan dalam tabung untuk meredam getaran struktur.
- ***Tuned Liquid Column Dampers (TLCD)***, yaitu tipe TLD yang mengandalkan gerakan naik-turun cairan di dalam kolom tabung U (bejana berhubungan) untuk meredam getaran struktur.

Tuned Liquid Slosh Dampers TLSD

TLSD adalah bentuk paling sederhana dari perangkat kontrol respons struktural pada kelompok TLD. TLSD tidak memerlukan struktur permanen, bisa berupa tanki berbentuk prisma segiempat atau silinder yang diisi air atau cairan.

Pergerakan cairan di dalam tanki secara dinamis menggeser pusat massanya untuk merespons getaran struktur, berarti TLSD dapat mengurangi getaran struktur melalui gaya reaksi yang diberikan oleh guncangan cairan dalam wadah yang melawan getaran struktur karena efek inersia (Gambar 112a).

Parameter TLSD yang memengaruhi peredaman adalah kedalaman air dan rasio massa air (sebagai rasio massa air terhadap struktur), yang akan menghasilkan bentuk mode dari guncangan cairan dengan frekuensi mendekati frekuensi alami struktur yang ingin diredam. Untuk struktur dengan beberapa derajat kebebasan TLSD dapat diatur menurut setiap mode getarnya.



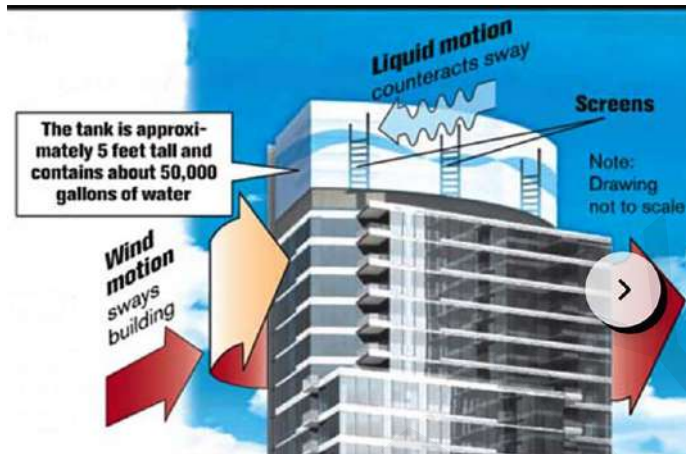
Gambar 112a. Goyangan Struktur yang Dipasang TLD

<https://www.mdpi.com/2075-5309/12/3/377/htm>, diunduh Juli 2022

Kelebihan TLSD adalah sebagai berikut.

1. Mudah pemasangan dan pemeliharannya.
2. Ruang tangki air dapat digabungkan dengan sistem penyimpanan air atau tanki bahan bakar cair untuk pasokan cairan, darurat kebakaran atau banyak keperluan lainnya.
3. Mudah untuk mengatur (*tuning*) parameter-parameter efektif seperti kedalaman cairan, atau dimensi tanki untuk aplikasi yang berbeda, untuk meredam getaran struktur *Multi Degree-of-Freedom* (MDOF) karena angin dan gempa bumi.

4. Dapat didesain untuk meredam ke segala arah (*multi-directional*).
5. Efektif untuk getaran dengan amplitudo kecil maupun besar.



Gambar 112b. Bangunan dengan Perangkat TLD

<https://www.sfgate.com/bayarea/article/One-Rincon-tower-features-water-tank-on-top-to-3299035.php>, diunduh Juli 2022



(a)



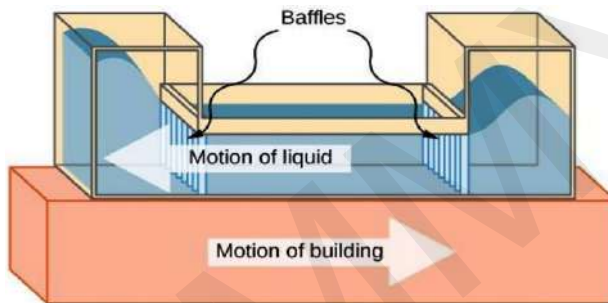
(b)

Gambar 112c. Simulasi Perbandingan Goyangan Struktur Tanpa TLD dengan Struktur (a) 2 Buah Model diberi Simpangan yang sama, (b) Model dengan TLD Simpangannya Lebih Kecil dan Berhenti Lebih Awal

<https://www.youtube.com/watch?v=DrAMcSf6TH0>, diunduh Januari 2021

Tuned Liquid Column Dampers (TLCD)

TLCD adalah perangkat peredam yang berbentuk pipa U atau 2 buah tanki yang dihubungkan dengan tabung/pipa horizontal di bagian bawahnya sehingga cairan dari masing-masing tabung dapat saling berhubungan. Ketika bangunan bergoyang horizontal secara siklik, cairan di dalam kolom akan bergerak naik-turun, di mana cairan di dalam kolom yang satu bergerak turun, sedangkan cairan di kolom yang lain bergerak naik. Pergerakan tersebut mengakibatkan cairan di dalam tabung horizontal juga bergerak bolak-balik.



Gambar 113. Mekanisme Goyangan Struktur F dengan TLCD yang sudah dikembangkan

<https://www.irjet.net/archives/V7/i3/IRJET-V7I3693.pdf>, diunduh Juli 2022



(a)



(b)

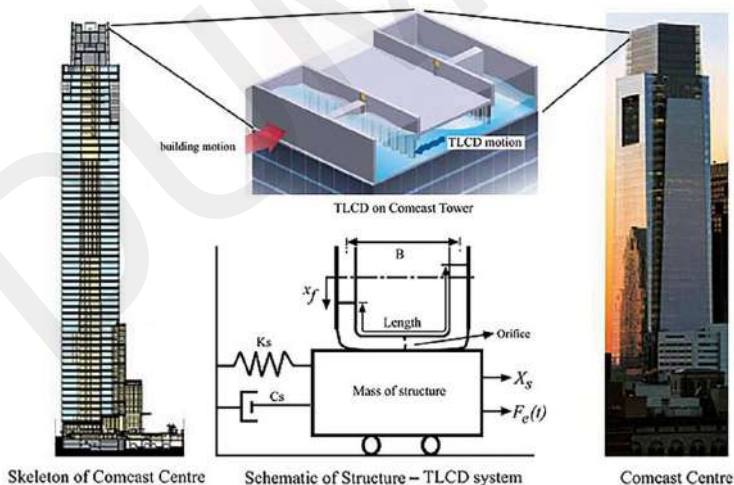
Gambar 114. Simulasi Perbandingan Goyangan Struktur Tanpa TLCD (a) dengan Struktur yang Diberi TLCD (b)

<https://www.youtube.com/watch?v=JaIdGw2lQ7g>, diunduh Januari 2021

Gerakan cairan di dalam tabung horizontal melawan gerakan struktur dan menghasilkan disipasi energi. Frekuensi goyangan cairan berhubungan langsung dengan panjang kolom cairan, yang merupakan satu-satunya parameter yang dapat disesuaikan untuk menetapkan karakteristik penyetaraan (*tuning*) yang diinginkan. Tabung horizontal dapat juga digunakan untuk menempatkan elemen (biasanya katup atau pelat lubang) yang memberikan pembuangan energi (peredam). Tingkat peredam dapat dikontrol secara pasif atau semi aktif.

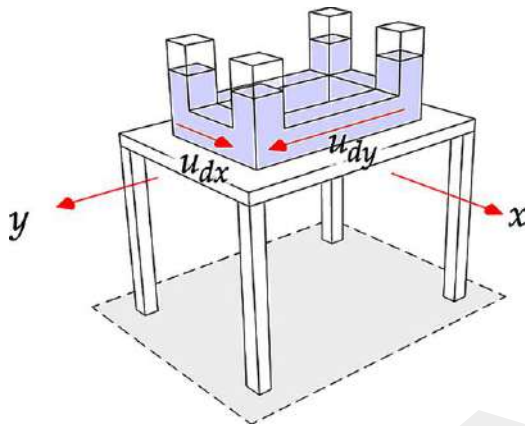
Perangkat TLCD ini terbatas dapat mengakomodasi gerakan satu arah saja. Untuk mengakomodasi gerakan dua arah digunakan dua buah alat yang saling tegak lurus, atau menggunakan bidirectional TLCD seperti pada Gambar 115b.

Gambar 114a dan 114b menunjukkan perbandingan struktur tanpa TLCD dengan struktur yang dipasang TLCD. Gambar 114a ketika model dalam keadaan belum digetarkan, Gambar 114b ketika model dalam keadaan bergetar, dan tampak struktur dengan TLCD deformasinya lebih kecil dan lebih awal berhenti ketika digoyangkan.



Gambar 115a. TLCD pada Bangunan *Comcast Centre*

<https://benthamopen.com/FULLTEXT/TOBCTJ-13-289/FIGURE/F3/>, diunduh Juli 2022



Gambar 115b. Bidirectional Tuned Liquid Column Damper (BTLCD)

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/stc.1784>, diunduh November 2022

DUMMY

5

TEKNOLOGI GEMPA TRADISIONAL

Bangunan-bangunan peninggalan masa lampau atau bangunan-bangunan tradisional tertentu, banyak yang terbukti dapat bertahan terhadap guncangan gempa bumi. Bangunan-bangunan pasangan batu atau bata lebih rentan terhadap guncangan gempa bumi, sedangkan bangunan-bangunan konstruksi kayu lebih ramah terhadap guncangan gempa bumi.

Beberapa bangunan masa lampau ternyata telah menampilkan teknologi sangat maju dalam hal ketahanan terhadap gempa bumi, beberapa di antaranya dibahas dalam tulisan ini.

A. Teknologi Bangunan Batu di Eropa

Teknologi konstruksi bangunan batu pada awalnya berkembang di Mesir (ada piramida yang dibangun sekitar 2500 SM tahun yang lalu), Yunani, dan negara-negara Eropa lainnya. Sementara itu, di negara-negara timur pada awalnya berkembang konstruksi bangunan kayu, seperti di Jepang, Tiongkok, Indonesia, dan lain-lain.

Properti mekanis material batu cukup terbatas, yaitu: berat sendiri batu besar, kekuatan terhadap gaya tekan besar, sedangkan kekuatan terhadap gaya tarik kecil. Massa yang berat akan menimbulkan gaya inersia yang besar apabila diguncang oleh gempa bumi. Namun, orang-

orang zaman lampau mampu mengembangkan teknologi konstruksi bangunan batu dengan sangat luar biasa, misalnya Piramida Mesir, kuil-kuil di Yunani dan Romawi, dan Bangunan Ghotik.

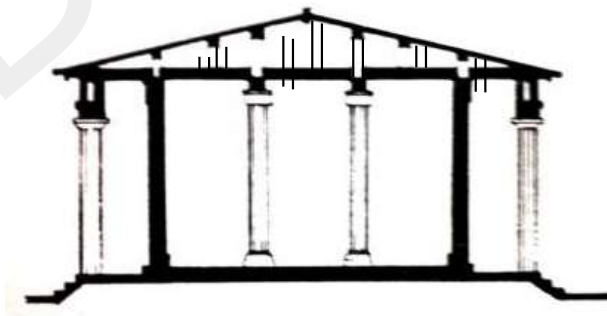
Pada masa itu pengetahuan tentang teknologi gempa belum ada, bangunan-bangunan batu didesain terhadap beban gravitasi. Ada bangunan-bangunan yang dapat bertahan terhadap gempa bumi, ternyata konfigurasinya beraturan dan mempunyai kepadatan material (rasio jumlah luas penampang kolom-kolom dan dinding-dinding dibanding luas denah bangunan) besar.

1. Kuil Parthenon, Yunani



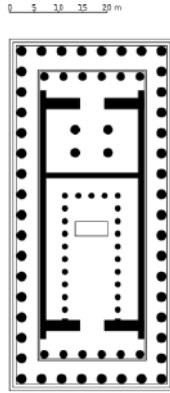
Gambar 116a. Perspektif Eksterior Kuil Parthenon

<http://ilmupengetahuan.org/ciri-khas-arsitektur-yunani/>, diunduh Juni 2019



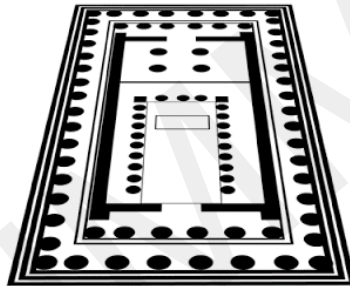
Gambar 116b. Potongan Kuil Parthenon

Sumber: Arnold (1982)



Gambar 116c. Denah Kuil Parthenon

<https://bs.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Parthenon-top-view.svg>, diunduh Juni 2019



© Ancient-Greece.org

Gambar 116d. Perspektif Denah Kuil Parthenon

<https://meiharls.blogspot.com/2016/01/kuil-parthenon.html>, diunduh Juni 2019

Kuil Parthenon dibangun dengan dinding-dinding, kolom-kolom dan balok-balok girder dari material batu alam. Karena keterbatasan properti mekanis material batu, maka bentang-bentang balok terbatas, jarak antar kolom rapat, serta dimensi kolom-kolom dan balok-baloknya besar-besar. Hal tersebut membatasi bentang ruang-ruang.

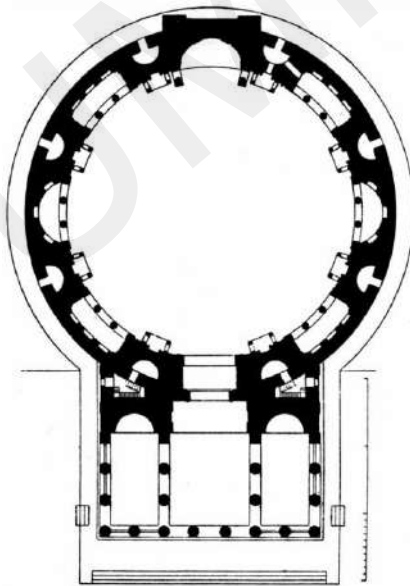
Bentuk dan denah segiempat dikelilingi oleh dinding-dinding dan kolom-kolom yang sangat rapat membentuk konfigurasi bangunan sangat beraturan dan struktur yang kokoh. Konfigurasi yang sangat beraturan tersebut ditambah dengan kepadatan material yang besar menyebabkan struktur Kuil Parthenon dapat bertahan terhadap guncangan gempa bumi, walaupun materialnya dari batu alam.

2. Kuil Pantheon, Romawi



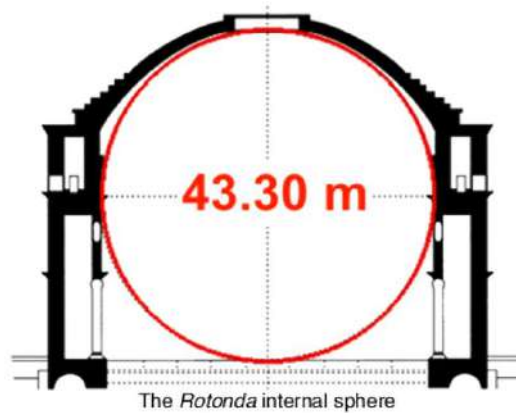
Gambar 117a. Perspektif Eksterior Kuil Pantheon

<https://www.ikons.id/pantheon-romawi-kaisar-hadrian/>, diunduh Juni 2019



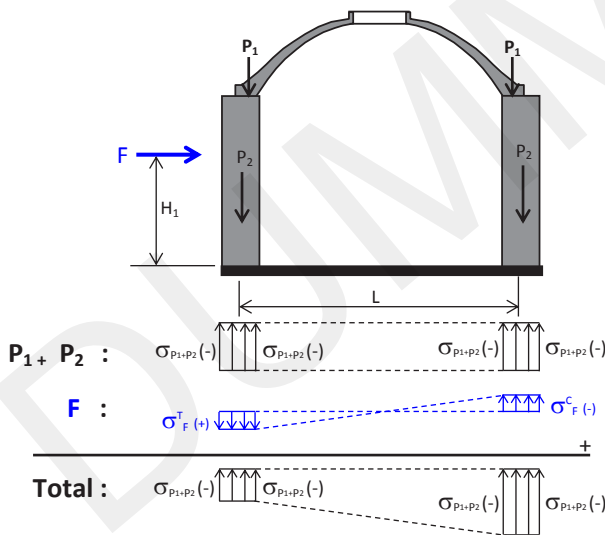
Gambar 117b. Denah Kuil Pantheon

<https://www.ikons.id/pantheon-romawi-kaisar-hadrian/>, diunduh Juni 2019



Gambar 117c. Potongan Kuil Pantheon

https://www.researchgate.net/figure/Scheme-and-dimensions-of-the-Pantheon-from-Pulvirenti-2014_fig1_325781268, diunduh Juli 2022



Catatan:

$\sigma_{P_1+P_2} (-)$ = tegangan tekan, reaksi terhadap P_1 dan P_2

$\sigma_F^T (+)$ dan $\sigma_F^C (-)$ = tegangan tarik dan tekan, reaksi terhadap momen guling karena F pada struktur keseluruhan

$\sigma_F (+)$ dan $\sigma_F (-)$ = tegangan lentur tarik dan tekan pada penampang melintang, reaksi terhadap momen lentur karena F pada dinding

T_F dan C_F = Gaya tarik dan gaya tekan pada penampang melintang dinding terhadap momen guling karena F pada struktur keseluruhan

Gambar 117d. Efek Pratekan pada Dinding

Kuil Pantheon Romawi mempunyai bentuk yang sederhana, yaitu atap kubah $\frac{1}{2}$ bola dari pasangan batu berbentuk 43,30m, ditumpu oleh dinding pemikul beban dari pasangan batu yang sangat tebal di sekeliling denah berbentuk lingkaran. Bangunan entrance berbentuk kotak ditempelkan pada dinding keliling tersebut, atapnya ditumpu oleh deretan kolom-kolom besar yang disusun dengan rapat. Akhirnya terbentuk bangunan berbentuk silinder dengan atap kubah saling menempel dengan bangunan kotak.

Dinding pemikul beban bangunan ini sangat tebal dan padat memberikan kekuatan dan stabilitas pada struktur bangunan. Berat sendiri yang besar dari kubah atap batu (P_1) dan berat sendiri dinding-dinding batu yang tebal (P_2) memberi efek pratekan pada seluruh penampang dinding dan kolom-kolom, sehingga ketika menerima gaya lateral gempa (F), seluruh struktur masih dalam keadaan tekan dan bangunan material batu yang dibangun dengan material tekan dapat bertahan terhadap getaran gempa (Gambar 117d). Hal tersebut dapat dijelaskan secara sederhana (disederhanakan) sebagai berikut: beban P_1 dan P_2 dilawan oleh reaksi tumpuan dengan tegangan tekan $\sigma_{P_1+P_2}$ ($-$). Gaya lateral F menghasilkan momen guling pada seluruh struktur dan gaya geser pada bidang dinding. Momen guling sebesar $M = F \times H_1$ dilawan oleh reaksi tumpuan dengan gaya tarik T dan gaya tekan C , atau dengan tegangan tarik σ_T ($+$) dan tegangan tekan σ_C ($-$). Pada bangunan Phanteon ini tegangan tekan $\sigma_{P_1+P_2}$ ($-$) akibat dari berat sendiri kubah dan dinding, lebih besar daripada tegangan tarik σ_T ($+$) akibat dari momen guling, maka pada seluruh penampang dinding hanya bekerja gaya tekan saja.

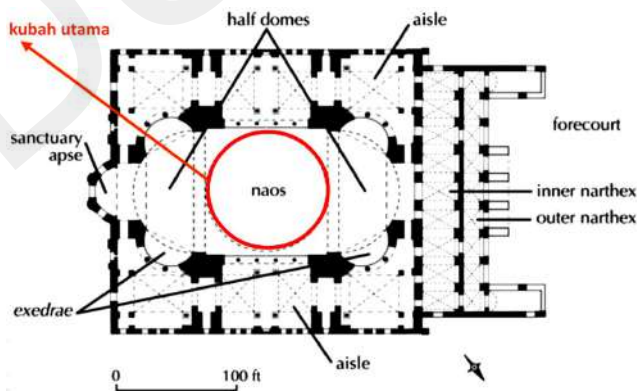
3. Hagia Sophia, Istambul (sebelumnya “Santa Sophia”)



Gambar 118. Perspektif Eksterior Hagia Sophia

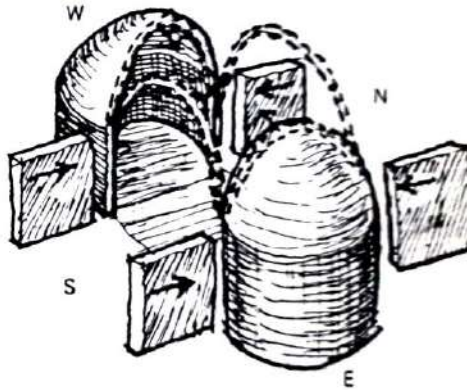
<https://kontraktorkubahmasjid.com/wp-content/uploads/2017/12/masjid-sophia....png>,
diunduh 16/09/2019

Museum Hagia Spohia pada mulanya adalah Gereja bernama Santa Sophia, kemudian pada 1453 berubah menjadi Masjid dengan nama Hagia Sophia dan pada 1923 berubah lagi fungsinya menjadi Museum. Bangunan ini beberapa kali mengalami kerusakan yang disebabkan oleh peperangan, gempa bumi dan struktur yang kurang stabil, dan telah dilakukan beberapa kali perbaikan. Setelah perbaikan terakhir struktur telah menjadi cukup kuat dan stabil menghadapi gempa bumi.



Gambar 118a. Denah Hagia Sophia

<https://docplayer.info/57656434-Jelajah-arsitektur-klasik-pendahuluan.html>, diunduh 16/07/2019



Gambar 118b. Perspektif Struktur Hagia Sophia

Sumber: Arnold (1982)

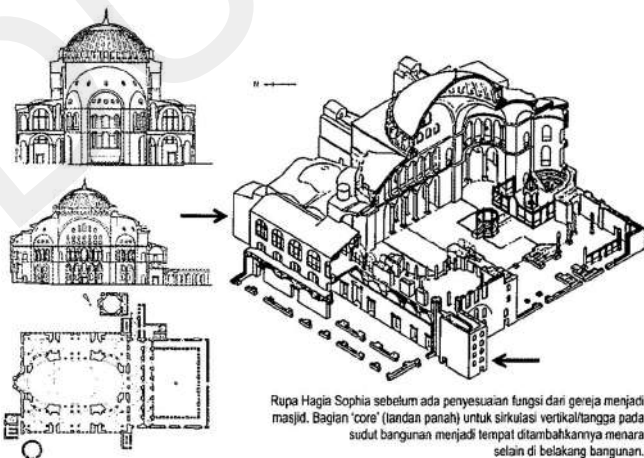


Gambar 118c. Perspektif Busur Penopang Kubah Utama Hagia Sophia

Sumber: Arnold (1982)

Gambar 118d. Perspektif Struktur Kubah Utama Hagia Sophia

Sumber: Arnold (1982)



Rupa Hagia Sophia sebelum ada penyesuaian fungsi dari gereja menjadi masjid. Bagian 'core' (landan panah) untuk sirkulasi vertikal/tangga pada sudut bangunan menjadi tempat ditambahkannya menara selain di belakang bangunan.

Gambar 118e. Denah, Potongan Axonometri Hagia Sophia

<https://docplayer.info/57656434-Jelajah-arsitektur-klasik-pendahuluan.html>, diunduh 16/07/2019

Konfigurasi bangunan Santa Sophia cukup beraturan. Dari segi bentuk bangunan, ada lengan-lengan denah namun tidak terlalu ekstrem, satu sumbu simetri, sumbu lain hampir simetri. Denah bangunan terdiri dari bangunan inti yang berbentuk empat persegi panjang, dikelilingi ruang-ruang lain yang atapnya lebih pendek dan secara keseluruhan berbentuk bujursangkar dengan dimensi $32,6 \times 32,6 \text{ m}^2$. Atap bangunan inti terdiri dari 1 buah kubah puncak berbentuk segmen bola dan 2 buah kubah samping berbentuk $\frac{1}{2}$ bola seperti Gambar 118a s.d 118e.

Tata letak elemen-elemen strukturalnya dipertimbangkan dari gaya-gaya yang timbul karena beban atap kubah (beban gravitasi), bukan karena gempa bumi, namun pemecahannya kebetulan kompatibel dengan pemecahan struktur terhadap gempa bumi. Beban atap kubah puncak menyebabkan komponen gaya meridian vertikal dan horisontal mendorong tumpuan ke bawah dan ke luar. Pada arah longitudinal, gaya-gaya vertikal dan horizontal tersebut didukung oleh kubah $\frac{1}{2}$ bola dan diteruskan ke dinding $\frac{1}{2}$ silinder, sedangkan gaya vertikal arah transversal diteruskan ke bawah melalui lengkung busur dan gaya horizontal didukung oleh *buttress/shear wall* (Gambar 118b).

Kerusakan bangunan ketika mengalami gempa bumi bukan disebabkan karena konfigurasinya kurang beraturan, namun karena dimensi komponen-komponen strukturalnya tidak cukup besar, dan kelemahan properti material serta join-join. Kubah pusat diberi busur-busur rib yang rapat. Di dasar kubah di antara rib-rib tersebut ada 40 buah jendela, mungkin lubang-lubang jendela tersebut memperlemah kubah sehingga terjadi kerusakan.

Perbaikan dilakukan dengan membongkar kubah sentral dan membangun ulang kubah menjadi lebih tinggi 20-25 feet (6,09 – 762 m) dan kelengkungan kubah lebih dalam. Kedalaman lengkung kubah menyebabkan komponen horizontal gaya-gaya meridian lebih kecil sehingga mengurangi gaya lateral pada dinding silinder dan pada *buttress*, dengan demikian kubah menjadi lebih stabil. Setelah perbaikan tersebut sistem struktur bangunan ini mampu bertahan terhadap gempa bumi.

4. Katedral Gotik

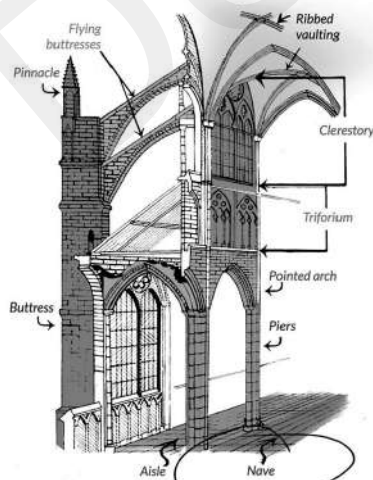
Struktur bangunan Katedral Ghotik terkenal dengan penggunaan “*flying buttress*”, yaitu struktur berbentuk busur yang meneruskan gaya ke *buttress vertikal* (Gambar 119a dan 119b). Fungsi *buttress* pada bangunan Katedral Cologne ini adalah mendukung komponen gaya horizontal dari plafon berbentuk kubah yang terbuat dari pasangan bata. Pada beberapa bangunan gereja terdapat *pinnacles* (menara hiasan) di atas *butrressnya*.



Gambar 119a.

Katedral Cologne, Jerman

https://www.123rf.com/photo_131752996_facade-of-cologne-cathedral-in-cologne-city-germany.html, diunduh Juli 2022



Gambar 119b. Flying Buttress

<http://www.culturaltravelguide.com/what-is-a-gothic-cathedral>, diunduh Juli 2022

Flying buttress berbentuk busur dapat terbentang lebar karena bentuknya adalah *form-active*, sedangkan berat *pinnacles* memberi efek pratekan pada *buttress*. Pengaruh efek gaya pratekan dari *pinnacle* pada *buttress* dapat dilihat pada Gambar 119c, 119d dan 119e.

Dari Gambar 119d dan 119e:

- Berat sendiri *buttress* (P_1), menyebabkan bekerjanya tegangan tekan (σ_{CP1}) pada penampang maksimal *buttress*.
- Gaya horizontal (H), menyebabkan bekerjanya tegangan lentur tekan-tarik (σ_{CH} dan σ_{TH}) pada penampang maksimal *buttress*.
- Kombinasi dari tegangan-tegangan tersebut menghasilkan tegangan tekan σ_{C1} di sisi kiri dan σ_{T1} di sisi kanan.
- Resultan tegangan lentur tekan adalah C_1 dan tegangan lentur tarik adalah T_1 .
- Apabila di sisi kanan bekerja gaya tarik T_1 , maka *buttress* akan runtuh.

Dari Gambar 119e:

- Berat sendiri *buttress* (P_1), menyebabkan bekerjanya tegangan tekan (σ_{CP1}) pada penampang maksimal *buttress*.
- Berat sendiri *pinnacle* (P_2), menyebabkan bekerjanya tegangan tekan (σ_{CP2}) pada penampang maksimal *buttress*, dan momen eksentris $P_2.e$ yang arahnya berlawanan dengan arah rotasi momen terhadap H dan menghasilkan tegangan lentur tarik (σ_{Te}) dan tekan (σ_{Ce}).
- Gaya horizontal (H), menyebabkan bekerjanya tegangan lentur tekan (σ_{CH}) dan tarik (σ_{TH}) pada penampang maksimal *buttress*.
- Kombinasi dari tegangan-tegangan tersebut menghasilkan tegangan tekan σ_{C2a} di sisi kiri dan σ_{C2b} di sisi kanan, di mana σ_{C2a} lebih besar daripada σ_{C2b} karena hasil penjumlahan tegangan tekan dan tarik di sisi kiri lebih besar hasil penjumlahan tegangan tekan dan tarik di sisi kanan.
- Resultan tegangan lentur tekan adalah C_2 dan tegangan lentur tarik adalah T_2 .

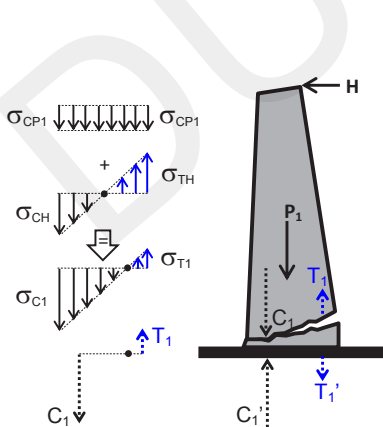
- Karena di seluruh penampang hanya bekerja gaya tekan, *buttress* tetap berdiri dengan kokoh.

Hasil penjumlahan tersebut menunjukkan bahwa berat *pinnacle* dengan penempatan di sisi kanan memberi efek prategang yang menghilangkan tegangan tarik pada *buttress*.



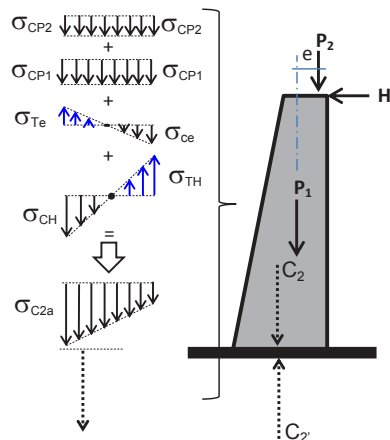
Gambar 119c. Mekanisme Gaya pada *Buttress*

Sumber: Arnold (1982)



Gambar 119d. Mekanisme Gaya pada Dasar *Buttress* Tanpa *Pinnacle*

Sumber: Arnold (1982)



Gambar 119e. Efek Gaya Prategang pada Dasar *Buttress* dengan *Pinnacle*

Sumber: Arnold (1982)

5. *Dry Stone* di Manchu Picchu Peru

Tidak semua bangunan batu di Manchu Picchu dapat bertahan utuh terhadap gempa bumi. Kelemahan konstruksi batu adalah berat sendirinya yang besar sehingga mengakibatkan gaya inersia terhadap gempa menjadi besar. Batu pada dinding-dinding tidak direkatkan dengan luluh sehingga dapat bergeser apabila digetarkan gempa bumi dan dapat melakukan disipasi energi. Kemampuan pasangan batu melakukan disipasi energi tersebut ternyata tidak mengamankan semua bagian bangunan terhadap kegagalan struktur terhadap gempa bumi. Cuadra *et al.*, (2004), melakukan penelitian di kompleks bangunan di di Manchu Picchu. Kompleks tersebut disebut “*cancha*”, yaitu rangkaian ruang-ruang berbentuk segiempat yang terbuat dari pasangan batu granit seperti pada Gambar 120. Struktur batu tersebut mendukung beban vertikal dengan baik karena batu granit memiliki kekuatan tekan yang besar. Namun, untuk kasus beban gempa lateral, ketahanan struktur sebagian besar ditentukan oleh gesekan antara sambungan atau permukaan kontak elemen dinding batu.



Gambar 120. Kompleks Inca di Machu Picchu

https://id.wikipedia.org/wiki/Berkas:Machu_Picchu,_Peru.jpg, diunduh Juli 2022

Hasil penelitian yang dilakukan oleh Cuadra menunjukkan bahwa struktur ini dapat menahan gaya inersia yang dihasilkan oleh gempa bumi yang diprediksi, namun beberapa elemen struktur dapat menimbulkan ketidakstabilan, khususnya dinding *topgevel* yang digunakan untuk membentuk atap struktur. Pada umumnya dinding *topgevel* mengalami kerusakan di bagian puncaknya (Gambar 120, 121a, 121b). Apabila struktur masih lengkap dengan atapnya, dinding pelana lebih stabil karena atapnya bekerja sebagai diafragma yang menyatukan semua dinding-dinding. Namun jika atapnya tidak cukup kaku atau atapnya runtuh terlebih dahulu, maka efek penahan tersebut kurang atau hilang. Ada konstruksi alternatif seperti dalam Gambar 121c, yaitu adanya sebuah dinding menghubungkan 2 buah dinding *topgevel*, posisinya di tengah dan tegak lurus pada dinding-dinding *topgevel* tersebut. Dinding tersebut dapat menahan gaya tegak lurus dinding *topgevel*. Jenis konstruksi ini diamati juga dalam konstruksi utama kompleks arkeologi Choquequirao (Gambar 121d). Uraian ini lebih jelas pada Gambar 121d dan 121e.

Cuadra meneliti lebih lanjut tentang stabilitas dinding *topgevel* tanpa penahan dengan memasukkan gaya inersia lateral tegak lurus terhadap bidang dinding. Sebagai kasus ditetapkan level dasar *topgevel* adalah 6 m, dan diambil dua kasus dengan tinggi *topgevel* 3m dan 6m. Berat sendiri dinding menghasilkan gaya normal tekanan di dasar dinding *topgevel*. Kemudian gaya inersia lateral tegak lurus dinding dianggap berada di pusat massa pada sepertiga ketinggian *topgevel* sehingga beban ini menghasilkan momen guling di dasar dinding *topgevel*. Jika tegangan lentur tekan-tarik akibat momen guling lebih besar dari tegangan tekan akibat gaya normal berat sendiri, berarti terjadi tegangan tarik di dinding dan *topgevel* akan runtuh. Untuk memperkirakan ketahanan lateral terhadap gempa, digunakan rasio antara tegangan normal (akibat berat sendiri) terhadap tegangan lentur (akibat gaya gempa lateral) dengan beberapa PGA (*Peak Ground Acceleration*, atau percepatan tanah maksimal). Apabila ratio di bawah 1, tegangan tekan lebih kecil dari tegangan lentur, berarti dinding akan mengalami kegagalan struktur. Ternyata dinding-dinding yang diteliti menunjukkan nilai ratio PGA 0,4 g untuk *topgevel* dengan ketinggian

3 m, dan 0,2 g untuk ketinggian 6 m, masing-masing < dari 1. Berarti *topgevel* 3 m akan runtuh apabila PGA 0,4 g, sedangkan *topgevel* 6 m akan runtuh apabila PGA 0,2 g.



Gambar 121a. Dinding Gevel Bagian Puncak Runtuh

<http://www.enjoy-machu-picchu.org/architecture/three-windowed-temple.php>, diunduh Juni 2019



© Can Stock Photo - csp16717563

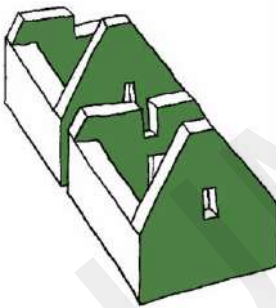
Gambar 121b. Dinding Gevel Bagian Puncak Runtuh

<https://www.canstockphoto.com/inca-wall-in-machu-picchu-peru-south-16717563.html>,
diunduh Juni 2019



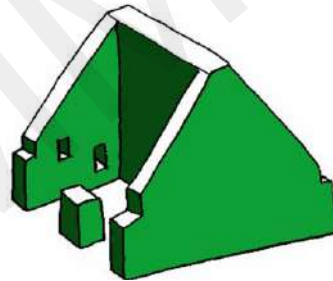
Gambar 121c. Dinding Gevel dengan Dinding Penahan

<https://www.ollantaytambo.org/en/news/choquequirao-another-wonder-of-cusco>, diunduh Juli 2022



Gambar 121d. Dinding Gevel Mengalami Kegagalan Struktur pada Puncak Gevel

<http://www.akita-pu.ac.jp/system/aes/riki/new/IncaRisk.pdf>, diunduh Juli 2022



Gambar 121e. Dinding Gevel dengan Dinding Penahan

<http://www.akita-pu.ac.jp/system/aes/riki/new/IncaRisk.pdf>, diunduh Juli 2022

B. Teknologi Bangunan Kayu di Asia

1. Pagoda Jepang

Belahan bumi bagian timur kaya akan kayu. Material kayu mempunyai properti yang menguntungkan untuk menahan gempa, yaitu: ringan, kekuatan tekan dan tarik sama besar, serta ratio kekuatan dibanding beratnya besar.

Beberapa bangunan masa lalu seperti di Jepang, Tiongkok, Indonesia telah menampilkan teknologi bangunan terhadap gempa bumi yang unggul. Pagoda-pagoda kayu di Jepang, bangunan-bangunan Kota Terlarang di Tiongkok dan bangunan-bangunan tradisional di Indonesia ternyata telah menerapkan konsep peredaman gempa yang canggih.

Konsep peredaman tersebut serupa dengan teknologi inovatif yang dikembangkan pada zaman modern, yang membedakan adalah teknologinya dan pengembangan ilmu pengetahuannya.

Jepang adalah negeri yang sangat rawan gempa bumi, bangunan-bangunan bersejarah dibangun dengan konstruksi kayu. Selain gempa bumi, di Jepang juga sering dilanda angin topan. Salah satu tipikal konstruksi kayu yang berkembang di Jepang, pertama kali telah diperkenalkan di Tiongkok daratan yaitu bangunan pagoda bertingkat banyak.



Gambar 122a. Kuil Budhis Hōryū-ji

<https://en.wikipedia.org/wiki/H%C5%8Dry%C5%AB-ji#/media/File:Horyu-ji06s3200.jpg>,
diunduh Juni 2019

Di Jepang terdapat Pagoda kayu 5 tingkat yang tidak mengalami kerusakan signifikan ketika terjadi gempa bumi, sedikit kerusakan terjadi pada tiang dekoratif akibat gempa besar tahun 1361 pada pagoda di Asakusa Kannon, Tokyo. Pagoda tersebut telah berdiri selama 13 abad. Sekarang ada 22 pagoda kayu bertingkat lima bersejarah yang ada di Jepang, yang telah dibangun sebelum pertengahan abad ke-19. Semua pagoda bersejarah tersebut terdaftar dan dilindungi sebagai properti budaya yang penting oleh Pemerintah Jepang. Kuil Hōryū-ji di Nara merupakan Warisan Dunia yang dibangun pada akhir abad ke-7 adalah Pagoda kayu tertua di Dunia (Gambar 122a).

Pagoda kayu bertingkat banyak di Jepang mempunyai konfigurasi terhadap gempa yang beraturan. Bangunan kayu yang ringan bagus untuk bertahan terhadap gempa bumi namun kurang aman terhadap terpaan angin topan yang besar. Pagoda kayu lima lapis di Kuil Shitenno-ji, Osaka, rusak total dilanda angin topan terbesar tahun 1934. Tidak semua pagoda rusak karena angin topan, seperti pagoda-pagoda kayu bertingkat lima dan tiga yang ada di distrik Kaisai (Osaka, Kyoto, Nara) tidak mengalami kerusakan ketika diterpa angin topan kuat.

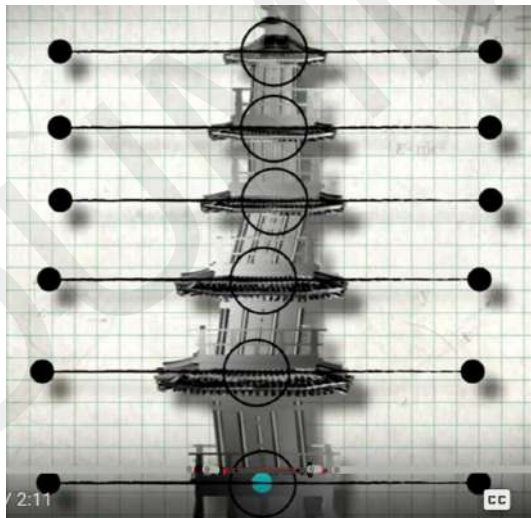
Konsep struktur pagoda Jepang:

- Struktur bersifat fleksibel baik terhadap goyangan gempa dan angin.
- Dalam bahasa Jepang pagoda disebut “Goju-no-to” (“menara lima lapis”), bukan lima tingkat atau lima lantai, karena pagoda secara struktural dapat dipandang sebagai “kotak-kotak” rangka yang ditumpuk (Karlovic, 2017).
- Antar “kotak-kotak” tersebut semuanya diikat bersama dengan sambungan *mortise-tenon* (alur/lubang dan pen/batang). Ketika tanah berguncang, masing-masing lapisan kotak ini bergoyang perlahan secara lateral dan yang satu bebas dari yang lain, sehingga terjadi perilaku struktur nonlinear (Gambar 122b dan 122c).

Periode getar bangunan pagoda lebih panjang daripada periode getar alami tanah, sehingga terhindar dari efek resonansi getaran dan amplifikasi gaya gempa.

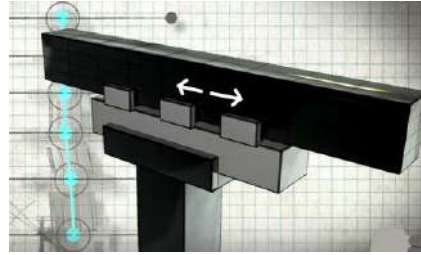
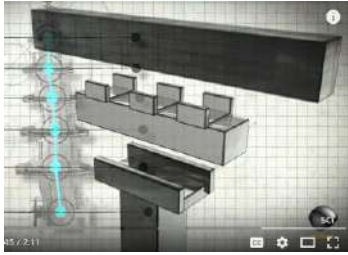
Di pusat denah pagoda terdapat tiang kayu yang besar yang disebut *shinbashira*, yang ditumpu di tanah dan menjulang ke atas sampai keluar dari atap, dan dipegang di puncak atap pagoda. Tiang tersebut tidak terikat dan berjarak terhadap rangka dan lantai tiap-tiap “kotak” (Gambar 122d). *Shinbashira* pada pagoda tertentu ditumpu di tingkat 1 (Gambar 121e).

Ishida, S. *et al.*, (1994), melakukan ujicoba model struktur dengan meja getar dan memperkirakan terjadi pelepasan energi ketika terjadi tumbukan antara rangka struktur dan lantai dengan *shinbashira* ketika terjadi deformasi besar pada rangka tiap “kotak”. Tumbukan tersebut juga kemungkinan berpengaruh membatasi deformasi lateral berlebihan tiap lapis rangka “kotak” pagoda.



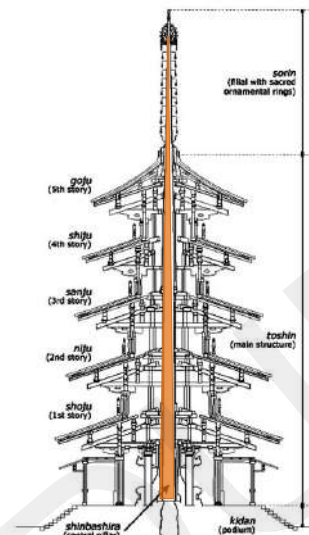
Gambar 122b. Goyangan Per Lapis Pagoda Soji

<https://www.youtube.com/watch?v=uG37gQSvrf4>, diunduh Juni 2019



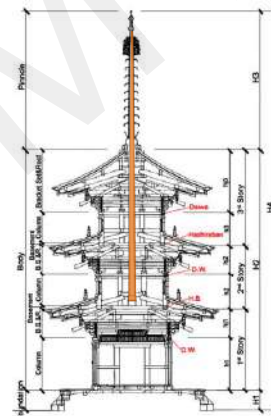
Gambar 122c. Detail Mortise Pagoda Soji

<https://www.youtube.com/watch?v=uG37gQSVrf4>, diunduh Juni 2019



Gambar 122d. *Shinbashira*
pada Kuil Hōryū-ji 5 Lapis

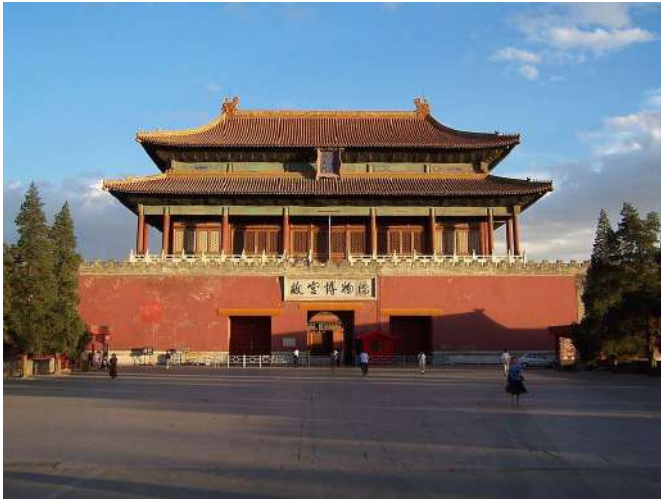
<https://web-japan.org/nipponia/nipponia33/en/topic/index02.html>, diunduh Juni 2019



Gambar 122e. *Shinbashira*
pada Kuil 3 Lapis

https://www.researchgate.net/publication/277899623_Investigation_into_the_Architectural_Design_of_a_Traditional_Japanese_Wooden_Pagoda, diunduh Juni 2019

2. Bangunan di Kota Terlarang Tiongkok



Gambar 123a. Forrbiden City di Tiongkok

https://en.wikipedia.org/wiki/Forbidden_City#/media/File:Forbidden_City_Beijing_Shennwenmen_Gate.JPG Beijing-far-off-view-of-one-of-the-pavilions.jpg diunduh Juni 2019

Bangunan berdiri di atas platform yang tinggi, dengan struktur bangunan yang terbuat dari kayu. Konfigurasi bangunannya ditinjau dari bentuk denah dan ketinggian bangunan termasuk beraturan, denah berbentuk persegi dan simetri. Struktur bangunan terdiri dari: kolom dan balok besar membentuk Rangka Pemikul Momen, sedangkan dinding pasangan bata merupakan elemen nonstruktural, yang pemasangannya diberi gap terhadap kolom sehingga tidak menghambat deformasi kolom ketika digetarkan gempa bumi.

Kolom-kolom dan balok-balok kayu membentuk struktur Rangka Pemikul Momen (RPM), dengan join kolom-balok menggunakan teknik pen-lubang (*mortise-tenon*). Balok mempunyai kedalaman (h) yang besar sehingga pertemuan balok dengan kolom mampu menerima momen dan joinnya bersifat semi-kaku. Ketika bekerja gaya gempa lateral, terjadi deformasi pada RPM yang mengakibatkan sambungan pen dan lubang mengalami perputaran dan pergeseran terbatas, namun karena balok mempunyai kedalaman yang besar, maka join tersebut tetap mempunyai kapasitas yang cukup untuk menahan momen. Perputaran

dan pergeseran pada join tersebut menghasilkan disipasi energi gempa yang berdampak mengurangi momen pada join dan gaya-gaya yang bekerja pada struktur, dan setelah gempa bumi berhenti konstruksi dapat diperbaiki dengan mudah. Perilaku ini berbeda dengan join kolom-balok beton bertulang yang melakukan disipasi energi gempa dengan mengandalkan *yielding* pada materialnya, sehingga terjadi kerusakan terbatas pada materialnya.

Di atas kolom dan balok terdapat rangkaian 1 set *bracket* yang disebut *dougong/tou-kung*. *Bracket* terdiri dari satu set blok (*tou*) dan lengan (*kung*) seperti pada Gambar 123c (Minggang, Xu & Hongxing, Qiu, 2008). Fungsi *bracket* adalah untuk mentransfer beban dari batang-batang horisontal (lengan) ke batang vertikal di bawahnya melalui blok. Kekakuan *dougong* pada arah horisontal lebih kecil daripada kekakuannya pada arah vertikal, karena arah horisontal dihubungkan dengan sambungan terbuka (*ming-fu*) sehingga lengan bisa bergeser, maka pada arah horisontal lebih fleksibel. Lengan-lengan *bracket* yang saling bertumpuk bekerja sebagai bantalan pegas yang cukup fleksibel untuk getaran vertikal gempa. Selain itu ikatan antarblok dan lengan pada *bracket* menggunakan pasak dan lubang sehingga berpotensi mengalami perputaran dan pergeseran terbatas ketika menerima getaran gempa. Ketika menerima gaya gempa lateral, sambungan-sambungan pen antara blok dan lengan berpotensi mengalami distorsi, termasuk mengalami perputaran dan pergeseran, selain itu *bracket* akan mengalami slip terhadap puncak kolom. Perilaku tersebut menghasilkan disipasi energi gempa pada *bracket*, akibatnya gaya inersia dari atap terhadap RPM menjadi berkurang. Ketika terjadi getaran vertikal, *bracket* bekerja seperti pegas karena lengan-lengan mempunyai sedikit fleksibilitas (tidak seperti skur pada konstruksi kayu modern) sehingga impak pada kolom di bawahnya teredam. Perputaran horisontal antara lengan dan blok dibatasi dengan sambungan *mortise-tenon*, sedangkan pergeserannya dibatasi oleh rangkaian *bracket*.

Hasil ujicoba getar pada model struktur bangunan kayu Kota Terlarang dengan skala 1:5 oleh Zhou:

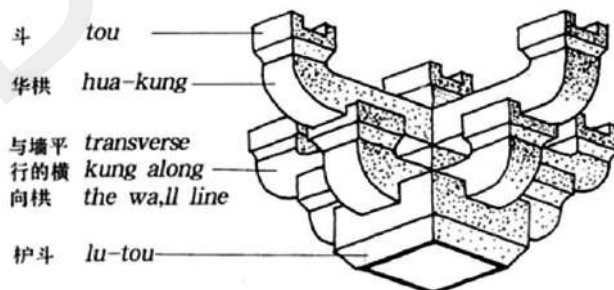
- Terhadap gempa M5 dinding di sekitar bangunan kayu runtuh, bangunan kayu tetap berdiri dalam keadaan utuh.
- Terhadap gempa M9 (setara dengan 200T TNT), tumpuan bergerak, tapi bangunan kayu tetap berdiri dan tidak retak.
- Terhadap gempa M10,1 bangunan kayu masih tetap berdiri.

Hasil ujicoba menunjukkan mengapa bangunan di Kota Terlarang dapat bertahan terhadap gempa besar.



Gambar 123b. *Dougong* pada Bangunan

<https://inhabitat.com/the-2500-year-old-bracket-that-protects-chinas-forbidden-city-against-earthquakes/>, diunduh Juni 2019 <https://inhabitat.com/the-2500-year-old-bracket-that-protects-chinas-forbidden-city-against-earthquakes/>



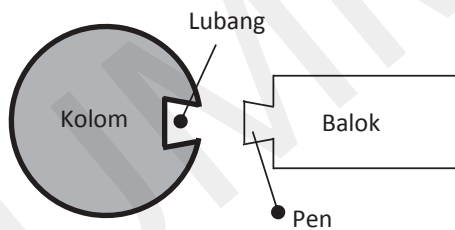
Gambar 123c. *Dougong/Tou-kung*

<https://www.aesdes.org/2019/02/27/main-project-inspiration-dougong/>, diunduh Juli 2022



Gambar 123d. Model *Dougong/Tou-kung*

<https://sarawing.weebly.com/design-build-chinese-pavilion-project-habitat-for-humanity.html>, diunduh Juli 2022



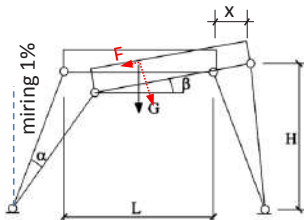
Gambar 123e. Denah Sambungan Kolom-Balok Pen-Lubang

http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14_05-04-0113.PDF, diunduh Juni 2019

Ada pengaturan untuk penataan kolom dan balok khusus, yaitu *ch'e-chiao* yaitu kemiringan kolom tepi ke arah dalam sebesar 1:100 (Gambar 124a) dan *sheng-ch'I* yaitu penambahan ketinggian kolom secara gradual dari dalam ke arah sudut bangunan. Konfigurasi ini memberi stabilitas yang lebih baik (Hongxing & Qiu, 2008), hal ini dapat dijelaskan dari Gambar 124b.

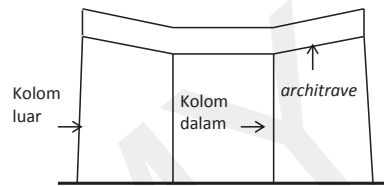
Hongxing menurunkan persamaan dari geometri *ch'e-chiao*: $F = 2Gx^2/H^2$, F adalah komponen sumbu lateral gaya berat G , x adalah perpindahan lateral kolom. Persamaan tersebut dihasilkan dengan

asumsi $L = H$. Dari persamaan tersebut tampak bahwa semakin besar perpindahan lateralnya (x), maka F semakin besar. Gaya F arahnya berlawanan dengan arah gerakan lateral menuju ke titik keseimbangan. Maka energi gempa yang masuk selalu harus melawan berat atap sepanjang *architrave* (gaya F). Mekanisme *ch'e-chiao* tersebut selalu terjadi selama sambungan *tenon-mortise* tidak rusak. Dampak *sheng-ch'i* pada struktur adalah mengurangi deformasi lateral rangka.



Gambar 124a. Ch'e-chiao

http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14_05-04-0113.PDF, diunduh Juni 2019



Gambar 124b. Sheng-ch'i

Dikutip dari: http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14_05-04-0113.PDF, diunduh Juni 2019

C. Bangunan Tradisional di Indonesia

Telah banyak penelitian tentang struktur bangunan tradisional di Indonesia, antara lain rumah adat Omo Hada (Lumantarna, B., Pudjisuryadi, P., 2012), rumah tradisional Sumatra (rumah adat Omo Sebua dan Bolon Simalungun) (Ichsan, M., 2018), Rumah Srotong Suku Samin (Sunansyah, H. dan Yulita, E. N., 2018).

Penelitian sebelumnya oleh Lumantarna dan Pudjisuryadi tentang *friction damper* pada rumah tradisional dengan hubungan kolom kayu yang terletak di atas batu, menunjukkan bahwa sistem *friction base-isolation* menghasilkan performa yang baik terhadap beban gempa. Konsep yang dipakai adalah memanfaatkan slip pada dasar kolom dan fondasi. Konsep *base-isolation* ini terbukti dapat mengurangi gaya dalam yang terjadi pada struktur di atasnya. Penelitian yang dilakukan oleh peneliti lain dibahas di bawah ini.

1. Rumah Adat Nias Omo Sebua dan Rumah Adat Batak Bolon Simalungun

Struktur rumah adat Nias Omo Sebua, dan rumah adat Batak Bolon Simalungun ada beberapa kesamaan:

- Masing-masing bangunan berupa rumah panggung.
- Tumpuan kolom masing-masing bangunan diletakkan bebas di atas umpak atau batu. Namun pada beberapa rumah adat Omo Sebua ada yang pertemuan kolom dengan umpak yang dicor dengan beton.
- Stabilitas dan pengaku horizontal di bagian panggung:
 - Rumah Omo Sebua menggunakan bracing diagonal.
 - Rumah Bolon Simalungun menggunakan bracing horizontal (Mohammad Ihsan, 2018).



Gambar 125a. Rumah Omo Sebua

<https://www.merdeka.com/sumut/mengenal-omo-sebua-rumah-tradisional-nias-yang-kokoh-dan-tahan-gempa.html>, diunduh Juli 2022



Gambar 125b. Rumah Bolon Simalungun

<https://www.dicio.id/t/apa-yang-anda-ketahui-tentang-rumah-bolon/114906>, diunduh Juli 2022

Pada umumnya bangunan tradisional di Indonesia mempunyai konfigurasi bangunan yang beraturan dan dibangun dengan material kayu, termasuk rumah adat Omo Sebua di Nias dan rumah adat Bolon Simalungun di Sumatra Utara. Bangunan kedua rumah adat tersebut masing-masing berupa rumah panggung, di mana stabilitas dan pengaku bagian panggung pada rumah adat Omo Sebua menggunakan bracing-diagonal konsentris, sedangkan pada rumah adat Bolon Simalungun menggunakan bracing horisontal dengan pasak (Gambar 125a dan 125b). Tumpuan kolom masing-masing bangunan diletakkan bebas di atas umpak atau batu, namun pada beberapa rumah yang pertemuan kolom dengan umpaknya yang dicor dengan beton.

Konfigurasi beraturan menguntungkan terhadap perilaku struktur apabila digetarkan oleh gempa bumi karena dapat menyederhanakan perilaku dinamis bangunannya. Material kayu mempunyai berat yang ringan sehingga gaya inersia yang terjadi karena getaran gempa tidak besar, selain itu ratio kekuatan dibanding dengan berat kayu besar, sehingga relatif tidak dibutuhkan dimensi yang besar untuk komponen-komponen strukturalnya.

Sistem fondasi umpak (tiang diletakkan di atas umpak batu tanpa diikat) dapat melakukan disipasi energi ketika mengalami slip karena gempa yang besar sehingga berfungsi sebagai *base-isolation* (Gambar 125c).

Ada perbedaan kinerja antara pengaku diagonal dan pengaku horisontal pada struktur panggung. Pengaku diagonal lebih kaku daripada pengaku horisontal, hal ini tampak dari hasil penelitian Ichsan M. (2018), namun masing-masing pengaku terbukti efektif untuk menahan getaran gempa bumi. Pengaku diagonal stabil secara geometri karena bentuk segitiga tidak dapat berubah bentuk, maka menghasilkan kekakuan yang besar dan membatasi deformasi. Sementara itu, pengaku horisontal secara geometri bentuknya tidak stabil sehingga join pertemuan pengaku horisontal dengan kolom harus join momen. Konstruksi join tersebut dibuat dengan membuat lubang pada kolom, kemudian balok besar dimasukkan ke dalam lubang pada kolom tersebut dan dipasak. Join tersebut bersifat semi kaku, mampu bertahan terhadap momen, namun mengalami sedikit perputaran sudut bila menerima getaran gempa bumi, dan apabila terjadi gempa yang besar pasaknya dapat mengendur dan perputaran sudut menjadi lebih besar. Perputaran sudut tersebut mengakibatkan deformasi yang lebih besar daripada pengaku diagonal, namun dengan adanya perputaran sudut terjadi pelepasan sebagian energi.



Gambar 125c. Tiang di Atas Umpak Tanpa Ikatan Rumah Omo Sebua

<https://www.arsitag.com/article/omo-sebua-dan-omo-hada-rumah-tradisional-nias-yang-tahan-gempa>, diunduh Juni 2019

Uraian di atas menunjukkan bahwa struktur bangunan rumah adat Omo Sebua dan Bolon Simalungun telah menerapkan prinsip konfigurasi bangunan terhadap gempa bumi yang baik dan prinsip peredaman terhadap getaran gempa bumi yang konsepnya sama dengan teknologi inovatif.

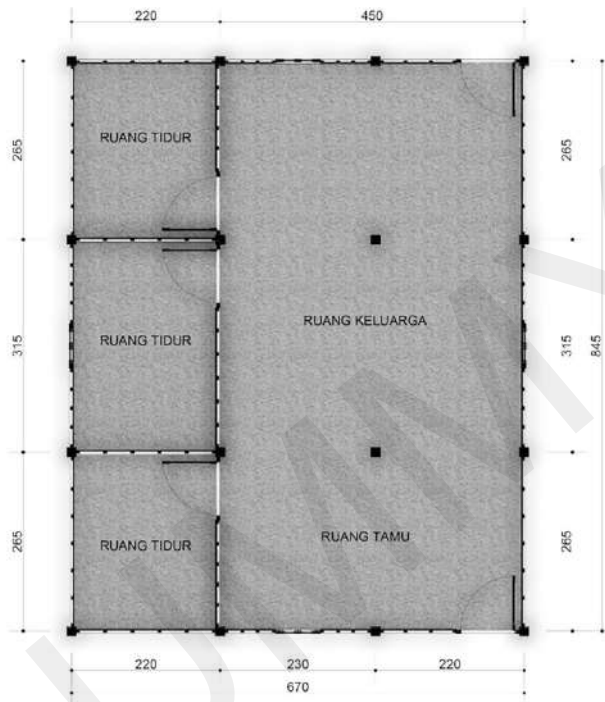
2. Rumah Srotong Suku Samin

Rumah Srotong suku Samin mempunyai konfigurasi bangunan yang beraturan, seperti tampak dalam Gambar 126a sampai dengan 126f. Struktur bangunan utama menggunakan material kayu jati, terdiri dari 8 buah kolom utama yang disebut *sokoguru* diletakkan di bagian tengah dan 8 buah kolom tepi disebut *goco*. Balok-baloknya terdiri dari *blandar* (1) yang terletak di puncak *sokoguru* dan *goco* dan mengikat semua *sokoguru* dan *goco*, *sunduk* (2) yang menghubungkan *sokoguru* dengan *sokoguru*, *pemeret* (3) yang menghubungkan *sokoguru* dengan *sokoguru* dan berfungsi menopang atap, *polangan* (4) yang menghubungkan *sokoguru* dengan *goco* (Gambar 126c dan 126d).

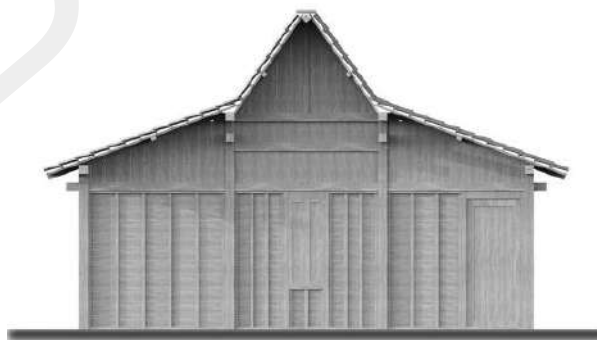
Konstruksi sambungan antara *sokoguru/goco* dengan *blandar* menggunakan pen dan lubang sederhana, di mana pen pada puncak *sokoguru/goco* masuk ke dalam lubang pada *blandar*, maka sambungan ini bersifat sendi dan tidak ikut menahan momen. Konstruksi sambungan antara *sokoguru* dengan *sunduk* dan antara *goco* dengan *polangan* menggunakan *purusan* dan *negel* (pasak) sebagai pengunci (Gambar 126g). Ketika bekerja momen pada sambungan tersebut, maka sambungan cenderung melakukan perlawanan momen melalui bidang temu antara pen dan lubang dan dikunci oleh *negel*, namun tetap dapat terjadi perputaran sudut terbatas dan *negel* dapat mengendur apabila mendapat getaran gempa berulang. Perputaran sudut dan pengenduran sambungan dapat melepaskan sebagian energi (disipasi energi) ketika terjadi gempa bumi.

Sokoguru/goco hanya diletakkan tanpa ikatan di atas fondasi umpak, maka ketika terjadi gempa bumi kolom dapat mengalami slip terhadap permukaan umpak, sehingga dapat melepaskan sebagian energi ketika digetarkan gempa bumi.

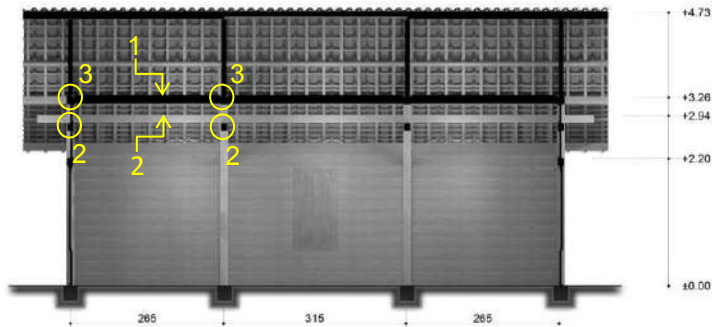
Hal-hal tersebut menunjukkan bahwa rumah Srotong telah menerapkan prinsip konfigurasi bangunan terhadap gempa bumi yang baik dan prinsip peredaman terhadap getaran gempa bumi yang konsepnya sama dengan teknologi inovatif.



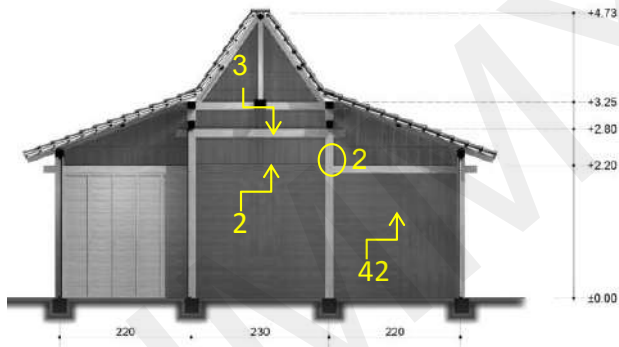
Gambar 126a. Denah Rumah Srotong



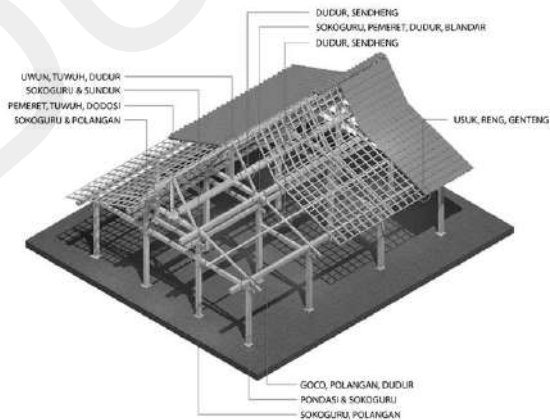
Gambar 126b.
Tampak Depan Rumah Srotong



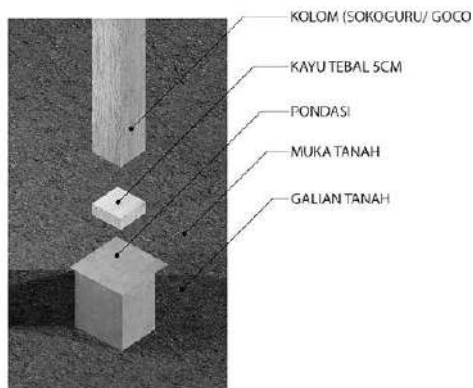
Gambar 126c. Potongan Membujur Rumah Srotong



Gambar 126d.
Potongan Melintang Rumah Srotong

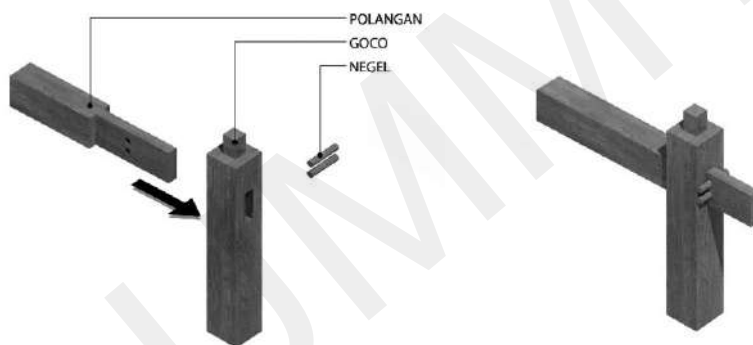


Gambar 126e.
Perspektif Struktur Rumah Srotong



Gambar 126f. Pertemuan Kolom dengan Umpak Rumah Srotong

Sumber: 125a s/d 125f: <http://repository.ub.ac.id/id/eprint/9769/5/BAB%20IV.pdf>, diunduh Juli 2022



Gambar 126g. Konstruksi Pertemuan Goco dengan Polangan

<http://arsitektur.studentjournal.ub.ac.id/index.php/jma/article/viewFile/522/489>, diunduh Juli 2022

6

RETROFIT SEISMIK

A. Tentang Retrofit Seismik

Retrofitting bangunan adalah usaha untuk meningkatkan performa bangunan karena berbagai kebutuhan, misalnya karena perubahan fungsi bangunan yang menyebabkan tuntutan ruang berubah, kerusakan bangunan karena siklon tropis, tornado, dan angin kencang dari badai petir, karena problem fondasi, karena gempa bumi, dan lain-lain. Buku ini hanya membahas retrofit untuk perkuatan struktur terhadap gempa bumi, atau disebut retrofit seismik.

Retrofit seismik adalah modifikasi struktur eksisting untuk membuatnya lebih tahan terhadap aktivitas kegempaan, gerakan tanah, atau kegagalan tanah akibat gempa bumi.

Tujuan Retrofit Seismik

Di masa lalu, retrofit seismik terutama diterapkan untuk mencapai keselamatan publik, dengan solusi rekayasa, dibatasi oleh pertimbangan ekonomi dan politik. Saat ini, dikembangkan tujuannya dengan beberapa tingkat kinerja (*Perancangan Berbasis Kinerja/Performance Base Design*).

- Keselamatan publik. Tujuannya adalah untuk melindungi nyawa manusia, memastikan bahwa struktur tidak akan runtuh menimpa

penghuninya atau orang yang lewat, dan bahwa ada jalur evakuasi yang aman. Terhadap gempa besar struktur boleh rusak parah, tetapi tidak roboh, dan dibongkar total dan dibangun ulang.

- Mempertahankan struktur. Tujuannya adalah agar struktur bertahan dan tetap aman untuk evakuasi, dimungkinkan ada perbaikan ekstensif (tetapi bukan penggantian) sebelum digunakan atau dianggap aman untuk digunakan. Ini biasanya tingkat retrofit terendah yang diterapkan pada jembatan.
- Fungsionalitas struktur. Struktur utama tidak rusak dan penggunaan untuk kegiatan utama tidak berkurang. Setiap perbaikan yang diperlukan misalnya kerusakan ringan, retakan kecil di plesteran, *drywall* dan hiasan dari plesteran. Ini adalah tingkat retrofit minimum yang dapat diterima untuk rumah sakit.
- Struktur tidak mengalami kerusakan. Tingkat retrofit ini lebih sesuai untuk struktur bersejarah yang memiliki signifikansi budaya tinggi.

Ada dua penyebab dibutuhkannya retrofit seismik.

- Bangunan sudah rusak akibat gempa bumi.
- Bangunan rawan terhadap gempa bumi, tetapi belum mengalami gempa bumi besar.

Bangunan yang mengalami kerusakan akibat gempa bumi dan masih bisa dipertahankan, selain diperbaiki perlu ditingkatkan kinerjanya dengan melakukan retrofitting untuk mengantisipasi kejadian gempa besar.

Peraturan gempa perlu dievaluasi dan diperbarui secara berkala. Bangunan yang belum pernah mengalami gempa bumi ada kemungkinan harus diretrofit apabila ada perubahan peraturan perencanaan gempa setempat yang mengakibatkan desain struktur bangunan tersebut ternyata tidak memadai ketika dikontrol dengan standar peraturan baru. Salah satu contoh adalah pengalaman gempa Northridge 1994, di mana ada banyak bangunan mengalami kegagalan struktur sampai keruntuhan pascagempa, padahal sudah didesain dengan mengikuti

standar perencanaan yang berlaku dan dilaksanakan dengan benar. Pengalaman tersebut mengharuskan diadakannya evaluasi dan perubahan signifikan pada peraturan gempa di Amerika. Dengan demikian, bangunan-bangunan yang tidak mengalami kegagalan struktur pada saat itu harus dikontrol dengan standar peraturan baru dan dilakukan retrofit apabila ternyata tidak memenuhi.

Praktik retrofit seismik saat ini terutama berkaitan dengan perbaikan **struktural** untuk mengurangi bahaya seismik terhadap struktur, namun juga sama pentingnya untuk mengurangi bahaya dan kerugian pada elemen **nonstruktural**, misalnya untuk rumah sakit atau bangunan yang punya nilai kesejarahan tinggi.

Ada dua kategori retrofit seismik pada bangunan:

1. retrofit global, yaitu retrofitting untuk meningkatkan kinerja struktur bangunan secara keseluruhan;
2. retrofit lokal, yaitu retrofitting untuk meningkatkan kinerja elemen, komponen, atau konstruksi detail tertentu.

Strategi dan Teknik Retrofit

Retrofit Global:

- Meningkatkan keteraturan konfigurasi bangunan terhadap gempa bumi, tujuannya adalah untuk meningkatkan keteraturan distribusi kekakuan, resistensi dan massa pada potongan dan denah bangunan.

Strategi ini dapat dilaksanakan antara lain dengan menambahkan *shear wall* atau *braced frame* pada posisi yang dapat meningkatkan keteraturan konfigurasi bangunannya.

Menyatukan dua bangunan yang secara struktural terpisah apabila setelah disatukan dapat meningkatkan kekakuan konfigurasi bangunannya.

- Memperkuat struktur atau meningkatkan kapasitas struktur secara keseluruhan dengan menambahkan *shear wall* atau *braced frame* atau rangka pemikul momen di tempat yang tepat.

Teknik ini bisa dilakukan untuk berbagai bangunan, seperti bangunan lama yang menggunakan konstruksi dinding pemikul pasangan bata, bangunan modern dengan konstruksi beton bertulang atau baja.

- Mengurangi deformasi atau meningkatkan kapasitas disipasi energi, mengurangi percepatan dalam struktur dengan menggunakan teknologi nonkonvensional, seperti: *base isolation*, peredam pada elemen-elemen struktur, *Tuned Mass Damper*, *Slosh Tank Damper*, sistem kontrol aktif.
- Mengurangi massa bangunan dengan tujuan memperkecil gaya inersia akibat gempa bumi. Hal ini hanya mungkin dilakukan apabila fungsi ruangan memungkinkan untuk pengurangan tersebut. Hal yang mungkin dilakukan adalah mengubah elemen nonstruktural yang berat dengan material yang ringan, misalnya dinding-dinding bata diubah dengan *dry-wall*.
- Mengubah fungsi bangunan menjadi fungsi yang menuntut performa lebih rendah.

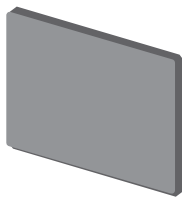
Retrofit Lokal:

- Meningkatkan kapasitas lokal elemen struktur dengan meningkatkan kekuatan, kekakuan dan daktilitas/deformasi struktur. Strategi ini digunakan untuk struktur yang secara global tidak diperlukan penambahan elemen struktur tambahan, sehingga retrofitingnya diterapkan pada komponen strukturnya sendiri, seperti kolom dan balok.
 - Penguatan komponen struktur kolom dan balok rangka pemikul momen dilakukan dengan teknik *jacketing*.
 - Prategang eksternal (*external post-tension*) untuk meningkatkan kapasitas elemen struktur seperti sambungan kolom, sambungan balok dan sambunga kolom-balok.
- Meningkatkan daktilitas struktur, misalnya untuk menjamin sendi plastis terjadi di balok pada lokasi yang diharapkan, salah satu teknik yang dapat diterapkan adalah penambahan haunch pada flens bawah balok baja IWF konstruksi rangka pemikul momen baja (Bruneau, 2005).

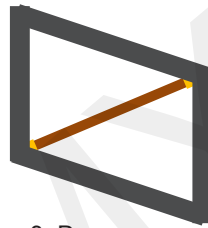
B. Penambahan Elemen Pendukung Struktural

Penambahan elemen-elemen penguat/pengaku harus dipertimbangkan dari beberapa hal, seperti gangguan terhadap operasi bangunan ketika proses konstruksi, kemudahan pengerjaan konstruksinya, kondisi fondasi eksisting, tata ruang, tampilan arsitektur.

Elemen-elemen penguatan terhadap gempa bumi:



1. Shear Wall



3. Damper

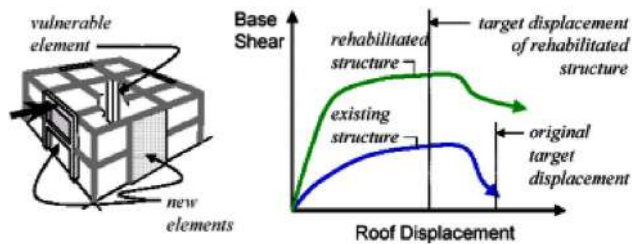


2A. Steel brace



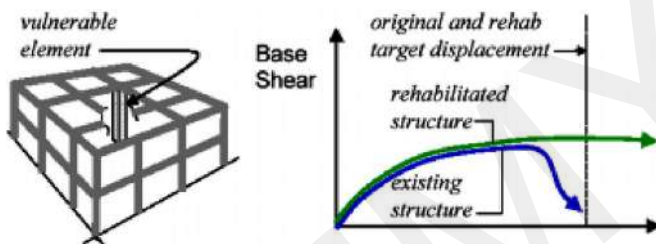
2B. Steel Moment Frame

Perbandingan retrofit global dengan retrofit lokal pada Gambar 127a dan 127b menunjukkan performa yang berbeda. Retrofit global dengan menambahkan *shear wall* dan rangka pemikul momen kaku pada perimeter bangunan meningkatkan kekakuan struktur sehingga gaya geser dasar meningkat, namun deformasi strukturnya menjadi lebih kecil. Sementara itu, retrofit lokal elemen struktur yang rentan diterapkan dengan meningkatkan daktilitas agar memenuhi *limit state* yang spesifik, tidak memperkecil deformasi struktur, namun meningkatkan daktilitas elemen strukturnya. Pembahasan studi kasus berikut diharapkan dapat memperjelas uraian sebelumnya.



Gambar 127a. Retrofit Global

Sumber: Jong (2003)



Gambar 127b. Retrofit Lokal

Sumber: Jong (2003)

1. Holiday Inn, Van Nuys, CA

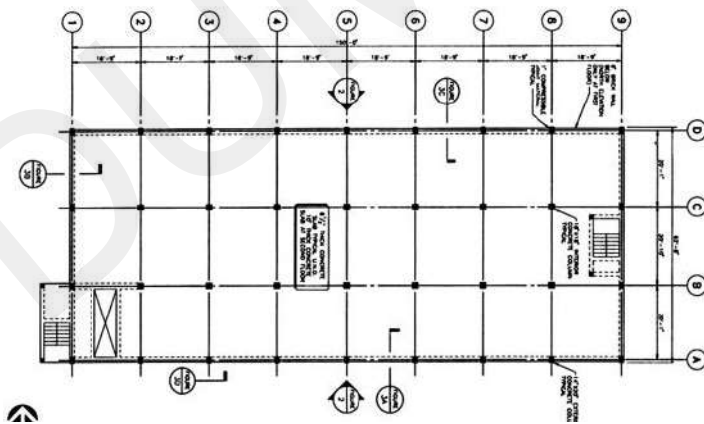


Gambar 128a. Holiday Inn, Van Nuys, CA

<https://www.rewerts.com/holiday-inn-van-nuysca.html>, diunduh Juni 2022

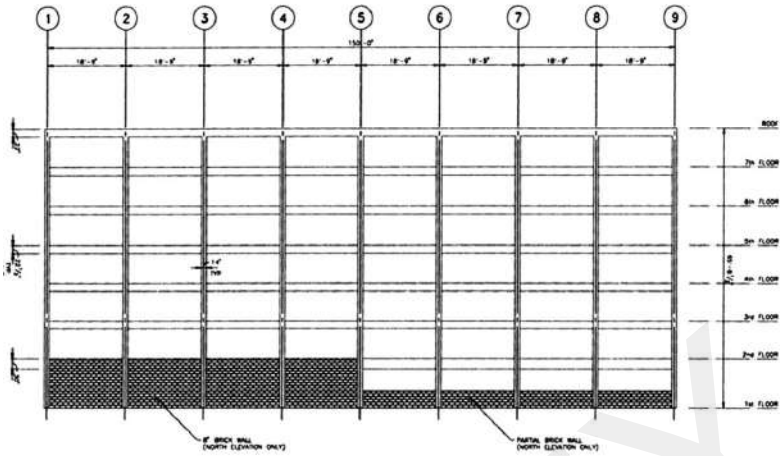
Bangunan ini terletak di Lembah San Fernando di Los Angeles County (34.221° lintang utara, 118.471° bujur barat), dibangun pada tahun 1966 mengikuti Kode Bangunan Kota Los Angeles tahun 1964. Bangunan mengalami kerusakan ringan terhadap gempa San Fernando M6.6 tahun 1971, dan rusak parah terhadap gempa bumi Northridge M6.7 tahun 1994. Dimensi denah bangunan adalah 19.2 m (63') x 45.72m (150'). Sistem strukturnya menggunakan rangka pemikul momen beton bertulang cor di tempat dengan kolom nonductile. Gaya lateral dipikul terutama oleh rangka pemikul momen perimeter, meskipun kolom interior dan pelat datar juga berkontribusi terhadap kekakuan lateral. Sistem gravitasi terdiri dari pelat datar beton bertulang 2 arah yang didukung oleh kolom persegi di interior dan rangka perimeter. Tebal pelat lantai 2 adalah 25.4 cm (10"), lantai 3 sampai dengan lantai 7 adalah 21,6 cm, dan di atap 20.3 cm (8").

Setelah gempa tahun 1994, bangunan tersebut diretrofit dengan penambahan “dinding geser” beton bertulang yang berbentuk rangka pemikul momen yang gemuk (Gambar 128d dan 128e). (https://peer.berkeley.edu/sites/default/files/peer_511_krawinkler_testbed.pdf)



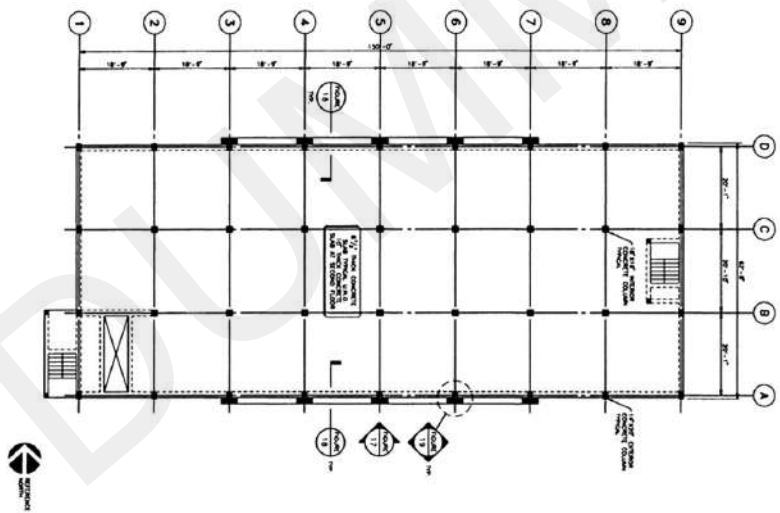
Gambar 128b. Denah Holiday Inn, Van Nuys, CA

http://db.world-housing.net/pdf_view/111/, diunduh Juni 2022



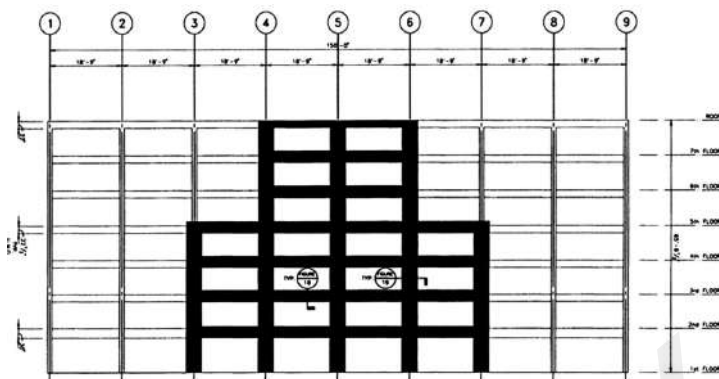
Gambar 128c. Potongan Holiday Inn, Van Nuys, CA

http://db.world-housing.net/pdf_view/111/, diunduh Juni 2022



Gambar 128d. Denah Holiday Inn, Van Nuys Sesudah Retrofit

http://db.world-housing.net/pdf_view/111/, diunduh Juni 2022



Gambar 128e. Tampak Holiday Inn, Van Nuys, CA Sesudah Retrofit
http://db.world-housing.net/pdf_view/111/, diunduh Juni 2022

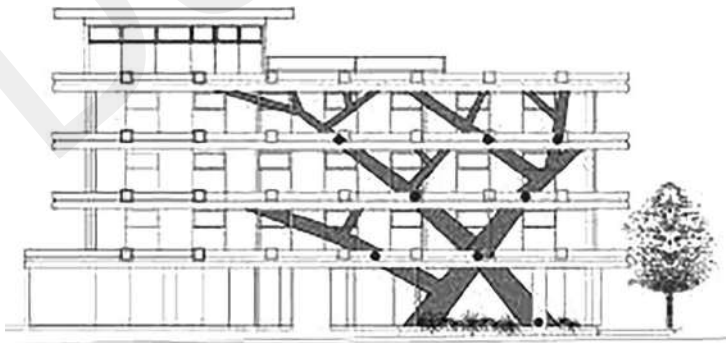
2. Tioga Building

Tioga building merupakan salah satu contoh pengembangan struktur *braced-frame* eksentris yang didesain secara kreatif membentuk citra pohon dengan batang-batangnya menunjang bangunan. Bangunan ini didesain oleh R. Gary Black, Abolhassan Astaneh-Asl tahun 2011 (<https://zenodo.org/record/1090982#.YrlCIHZBw2w>), bangunan terdiri dari 2 blok massa dengan bentuk melebar ke atas. Struktur bangunan menggunakan kolom dengan pelat (*flat slab*) di antara kedua massa dihubungkan dengan core. Ternyata struktur bangunan tersebut kekuatannya tidak memenuhi standar bangunan ‘The International Building Code’ (IBC) and ‘the California Building Code’ (CBC), sehingga harus dilakukan *retrofitting*. Core yang ada di antara 2 buah massa hanya mampu menahan setengah beban gempa. Konfigurasi bangunan 2 massa yang dipegang oleh core di tengahnya mengakibatkan bangunan berpotensi mengalami torsi apabila digetarkan oleh gempa bumi yang cukup besar. Torsi tersebut diantisipasi dengan menciptakan keseimbangan kekakuan antara dua sisi kaca dengan sisi core. Dipilih struktur penyeimbang *braced-frame* eksentrik yang diberi balok pada pertemuan dengan pelat lantai yang diletakkan di dua sisi

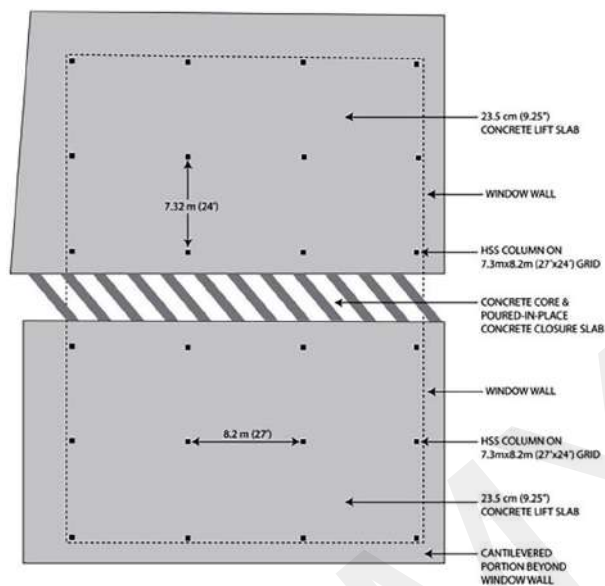
massa bangunan (Gambar 129). Pilihan *braced-frame* eksentrik telah dipertimbangkan merupakan yang paling menguntungkan. Dari segi teknis pelaksanaan dipertimbangkan agar sesedikit mungkin pekerjaan memotong fondasi bangunan yang ada dan meminimalkan pekerjaan fondasi. Pemilihan bentuk pohon merupakan pilihan yang optimal karena bentuk pohon mempunyai dua buah batang induk yang saling bersilangan sehingga pertemuan dengan fondasi hanya di dua titik pada setiap bidang fasad, dan cabang-cabang yang banyak di bagian atas memperbanyak pertemuan dengan pelat lantai.



FOTO PERSPEKTIF



TAMPAK



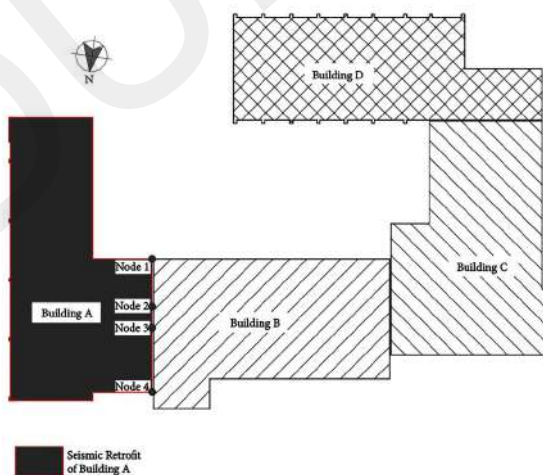
DENAH

Gambar 129. Tioga Building

Sumber: R. Gary Black, Abolhassan Astaneh-Asl, 2014

<https://zenodo.org/record/1090982#.YrCIHZBw2w>, diunduh Juni 2022

3. Bangunan Sekolah 3 Lantai di Vibo Valentia Italia

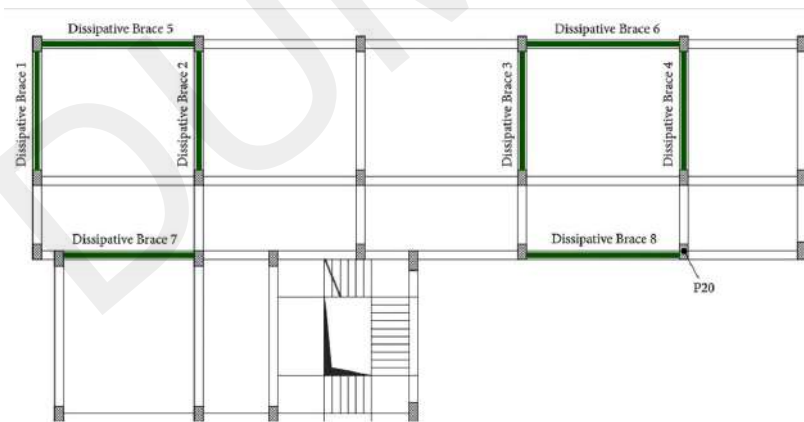


Gambar 130a. Site Plan Sekolah di Vibo Valentia Italia

<https://www.hindawi.com/journals/mpe/2018/5364564/>, diunduh Juli 2022

Bangunan ini terdiri dari 3 massa bangunan yang menggunakan struktur rangka beton bertulang, yaitu massa A, B dan C (Gambar 130a). Bangunan ini didesain tahun 1962 dengan mengacu pada Italian *code* yang diterbitkan tahun 1937. Bangunan A sebagai kasus, denah bangunan tersebut berbentuk L, dengan dimensi 17,70 x 35,50 m (Gambar 130b). Ketika dikontrol dengan *code* yang baru ternyata struktur tersebut banyak kelemahannya, yaitu: 1) kekakuannya tidak memadai untuk *Immediate Occupancy* (IO), *Damage Limitation* (DL), 2) komponen getas, kapasitas gesernya kecil, 3) efek torsi dalam arah-x menyebabkan mekanisme kegagalan parsial, 4) kapasitas rotasi *member chord* tidak memadai untuk Keadaan Batas Live Savety, 5) lebar celah/siar antar bangunan tidak memadai terhadap bangunan yang berdekatan.

Retrofit seismik pada bangunan tersebut dilakukan dengan menggunakan *hysteretic dissipative braces* yang ditempatkan sedemikian rupa untuk membatasi area pendukungnya terhadap fondasi eksisting (Gambar 130c), meminimalkan efek torsi, dan menjaga sebagian besar area bangunan untuk dapat beroperasi selama proses konstruksi retrofit.



Gambar 130b. Denah Struktur Massa A Sekolah di Vibo Valentia Italia

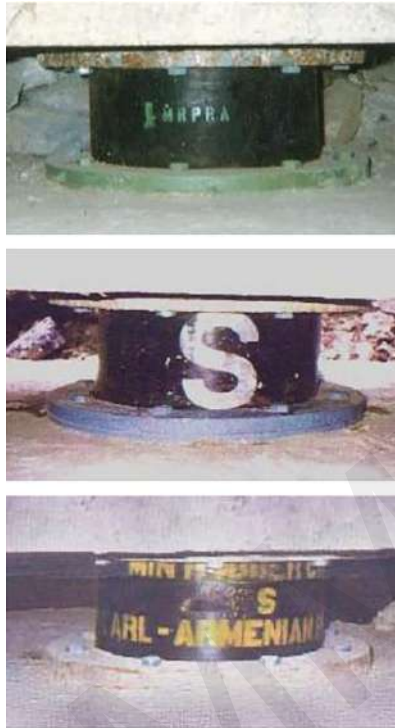
<https://www.hindawi.com/journals/mpe/2018/5364564/>, diunduh Juli 2022

Dimensi denah bangunan adalah 52x15 m, bentuknya simetris pada sisi panjang dan dinding pemikul beban (*load bearing walls*) dengan ketebalan 45-50 cm terletak terutama dalam arah melintang. Kekakuan horizontal dalam arah memanjang sebagian disediakan oleh rangka beton bertulang dengan balok dan kolom yang kuat di dalam dinding tersebut, pada sisi memanjang di bagian tepi bangunan.

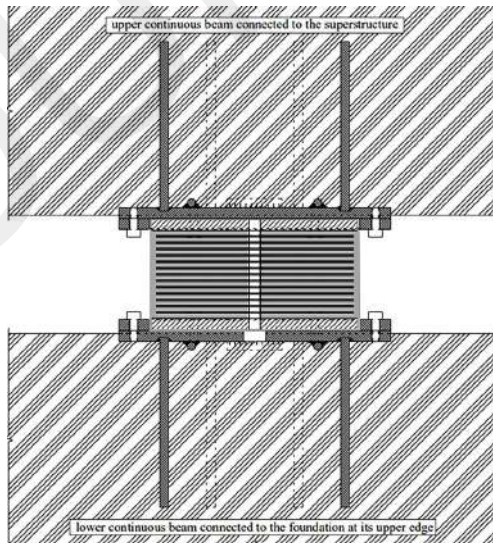
Analisis akibat gempa Spitak 1988 menunjukkan bahwa zona yang paling rentan pada bangunan ini adalah bagian tepi pada sudut pertemuan dinding transversal dan longitudinal. Di zona ini terjadi deformasi plastis intensif, sehingga bangunan mengalami kegagalan struktur karena hubungan yang lemah antara dinding longitudinal dan transversal. Konsep retrofit bangunan adalah dengan memasang base isolator yang dipasang di atas fondasi bangunan. Dalam penelitiannya Melkumyan membuat perbandingan biaya antara retrofit seismik menggunakan *base-isolation* dengan retrofit seismik konvensional pada bangunan dinding pemikul pasangan batu. Retrofit seismik konvensional diasumsikan menerapkan penguatan dengan jaket beton, rangka dan palat lantai, dan sebagai acuan diasumsikan biayanya 100%. Bangunan yang menerapkan *base-isolation* dan penguatan injeksi portland semen pada seluruh dinding biayanya hanya 31%.

Tipe base isolator yang dipilih adalah High Damping Rubber Bearing (HDRB) untuk memberikan periode getaran yang panjang (biasanya 2 detik) agar jauh dari waktu getar dinding pemikul beban. Redaman yang dibutuhkan untuk membatasi perpindahan struktur dan mengurangi respon pada frekuensi isolasi dimasukkan ke dalam komponen karet sehingga pada umumnya tidak diperlukan alat disipasi tambahan. Dalam bangunan eksisting, bantalan tidak ditempatkan di ruang bawah tanah yang tertutup, tetapi akan terkena lingkungan luar. Karena kisaran beban vertikal pada bantalan cukup tinggi maka diputuskan untuk memiliki dua jenis bantalan, tetapi hanya berbeda dalam modulus geser karet.

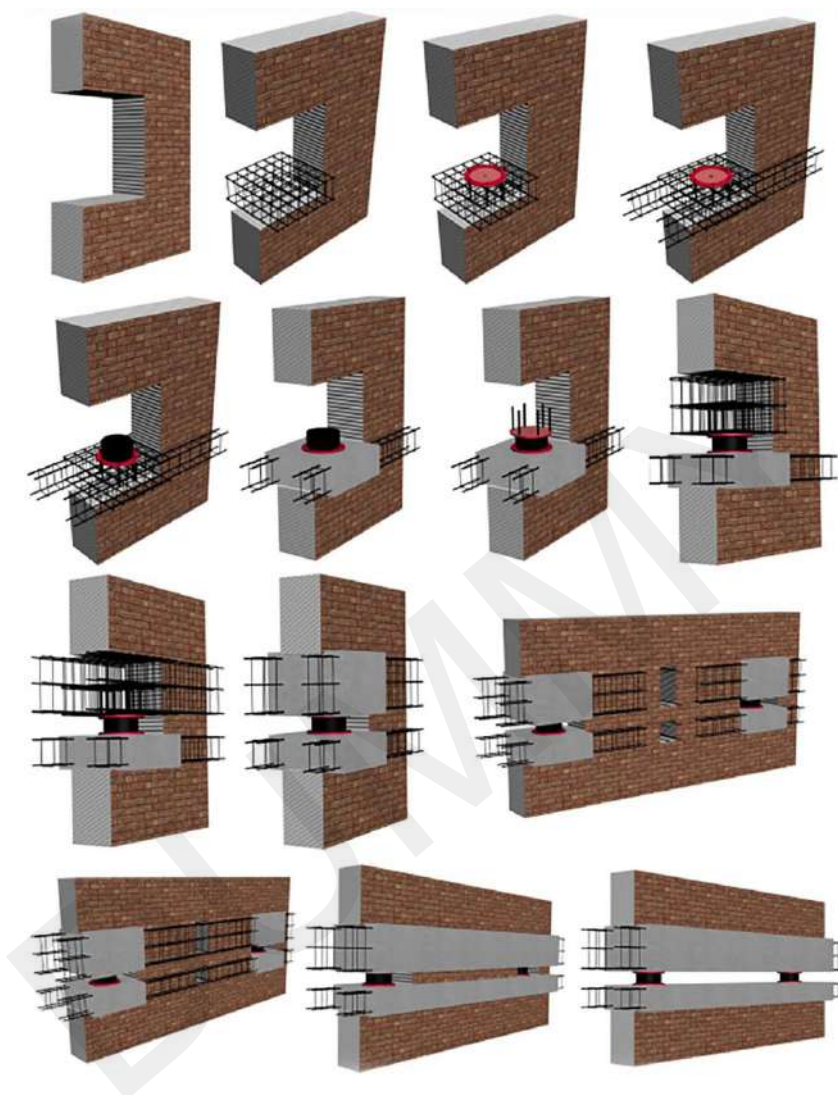
Gambar 131b. Denah Fondasi dan Posisi *Base-Isolation*



Gambar 131c. *Base-Isolation*



Gambar 131d. *Pemasangan Base-Isolation*



Gambar 131e. Tahap Pelaksanaan Pemasangan *Base-Isolation*

Sumber: Gambar 130 a s/d 130e: Melkumyan, 2011, http://congress.cimne.com/eccomas/proceedings/compdyn2011/compdyn2011_full/121.pdf, diunduh Mei 2022

C. Jacketing Kolom dan Balok



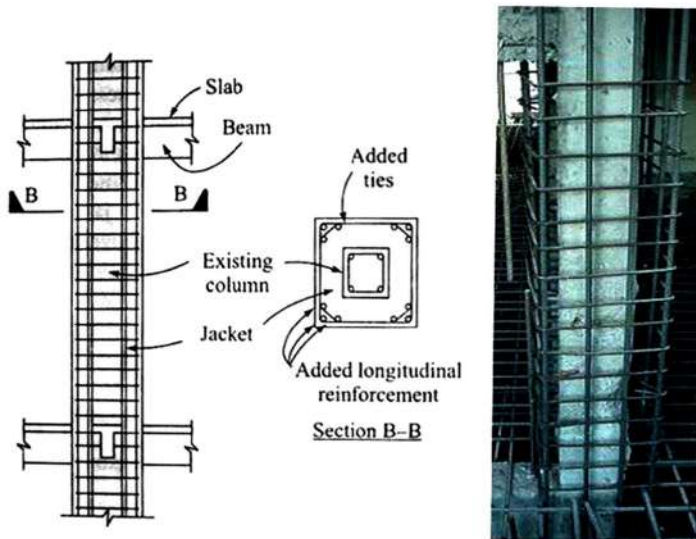
Gambar 132a. Penguatan Kolom Beton Bertulang Pelingkup Pelat Baja Eliptikal dengan Grouting

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BandedRetroColumn.jpg>, diunduh Mei 2022



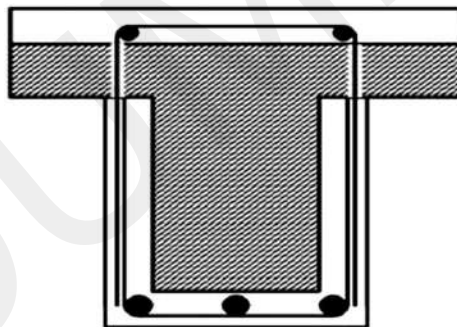
Gambar 132b. Penguatan Kolom dan Balok Beton Bertulang

<https://www.indiamart.com/proddetail/retrofitting-services-7401966848.html>, diunduh Mei 2022



Gambar 132c. Detail Column Jacketing

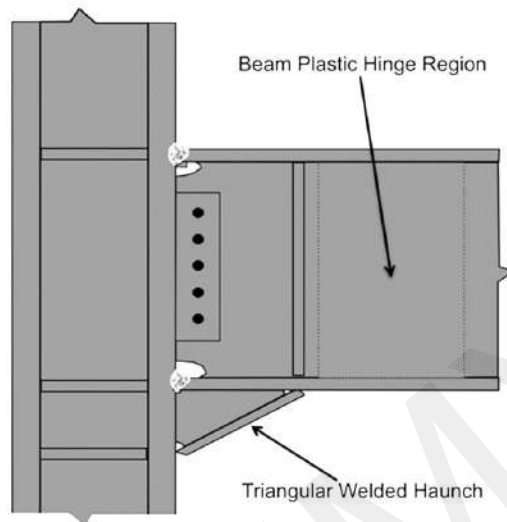
<https://theconstructor.org/concrete/seismic-retrofitting-techniques-concrete-structures/11767/>, diunduh Mei 2022



Gambar 132d. Detail Beam Jacketing

<https://theconstructor.org/concrete/seismic-retrofitting-techniques-concrete-structures/11767/>, diunduh Mei 2022

D. Penambahan Haunch pada Flens Bawah



Gambar 133a. Pembahan Haunch pada Flens Bawah

<https://gcris.iyte.edu.tr/bitstream/11147/6526/1/6526.pdf>, diunduh Juni 2022



Gambar 133b. Deformasi terhadap Beban Siklik pada Spesimen Nonkomposit

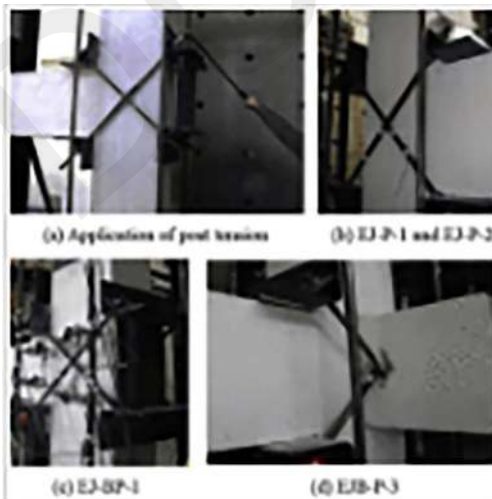
Sumber: Yu (2000), <https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/0660.pdf>, diunduh Mei 2022



Gambar 133c.
Deformasi terhadap
Beban Siklik pada
Spesimen Komposit
Sumber: Yu (2000), [https://
www.iitk.ac.in/nicee/wcee/
article/0660.pdf](https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/0660.pdf), diunduh Mei
2022

E. Prategang Eksternal

Beberapa kelemahan pelaksanaan join kolom-balok struktur rangka pemikul momen beton bertulang seperti mutu beton kurang baik, kurangnya tulangan geser (sengkan horisontal) dalam join kolom balok, penggunaan tulangan polos, sangat rentan mengalami kegagalan struktur ketika terjadi gempa bumi. Join tersebut dapat diperkuat dengan menggunakan prategang *post-tension* yang diletakkan secara diagonal di luar join tersebut seperti yang dikemukakan oleh Özgür Yurdakul *et al.*, (2016) menunjukkan hasil yang sangat baik dalam uji laboratoriumnya (Gambar 134).



Gambar 134. Uji-coba
Retrofitting Join Kolom
Balok dengan *External
Post-Tension*
Sumber: Yurdakul (2016)

DUMMY

7

TEKNOLOGI GEMPA DALAM ARSITEKTUR

A. Keterkaitan Teknologi Gempa dengan Arsitektur

Pemahaman unsur-unsur arsitektur akan ditinjau dari triloginya Vitruvius. Pemilihan ini semata-mata untuk menyederhanakan dan memudahkan pembahasannya karena konteks yang dibahas terbatas pada fisik bangunan saja, tidak sampai pada pembahasan makna yang dalam.

Menurut Vitruvius bangunan harus dibangun dengan mengacu pada *durability* (daya tahan), *convenience* (kenyamanan), dan *beauty* (keindahan). Ketahanan akan terjamin ketika fondasi berdiri di tanah secara kokoh dan material dipilih dengan bijak dan bebas; kenyamanan, bila penataan apartemen tidak bercacat dan tidak menimbulkan halangan untuk digunakan, dan bila setiap kelas bangunan ditetapkan dengan pembukaan yang sesuai; dan *beauty* (keindahan), ketika penampilan karya itu menyenangkan dan dalam citarasa yang baik, dan ketika bagian-bagiannya dalam proporsi yang tepat menurut prinsip-prinsip simetri yang benar (<https://www.chenarch.com/images/arch-texts/0000-Vitruvius-50BC-Ten-Books-of-Architecture.pdf>, diunduh Juni 2022).

Sir Hery Wotton (1624) menginterpretasikan sebagai: *'firmness'*, *'commodity'* and *'delight'*; *firmness* berhubungan dengan kekuatan, *commodity* berhubungan dengan fungsi praktis sebuah bangunan,

delight berhubungan dengan estetika. Wotton menginterpretasikan: “bangunan yang ideal memiliki tiga unsur, yaitu kokoh, berguna, dan indah.” (https://id.wikipedia.org/wiki/De_Architectura, diunduh Juni 2022)

Pembahasan selanjutnya akan meninjau sejauh mana struktur bangunan dan teknologi gempa berpengaruh pada kekokohan, kegunaan dan keindahannya.

Definisi struktur menurut Clark dan Pause, (diadaptasi oleh Charleson, 2005) “... Struktur adalah batang, bidang atau kombinasi keduanya, yang dapat digunakan oleh perancang untuk memperkuat atau mewujudkan ide-ide. Dalam konteks ini, kolom, dinding dan balok dapat dipikirkan sebagai konsep tentang frekuensi (kerapatan/kerenggangan, patra/pola, kesederhanaan, keteraturan, keacakan, dan kompleksitas. Dengan demikian, struktur dapat digunakan untuk mendefinisikan ruang, membuat unit, mengartikulasikan sirkulasi, menunjukkan gerakan, atau mengembangkan komposisi dan modulasi. Dengan cara ini, semua itu menjadi terkait erat dengan berbagai elemen yang menghasilkan arsitektur, kualitas dan antusiasme.

Dalam definisi tersebut, struktur dipandang sebagai bagian yang terintegrasi dengan arsitektur, dan sebagai bagian dari komposisi dalam desain arsitektur yang dapat memperkaya arsitektur. Penataan elemen-elemen struktur dapat “berbicara” dalam pembentukan komposisi ruang dan bentuk bangunan berdasarkan kebutuhan kekuatan, kefungsian dan estetika. Kefungsian berhubungan dengan kegiatan dan aktivitas untuk menjawab kebutuhan fisik dan kebutuhan, kenyamanan beraktivitas. Kebutuhan-kebutuhan tersebut harus diwadahi dalam ruang/ruang-ruang yang butuh penataan tertentu dan secara fisik adalah berupa bangunan yang mempunyai bentuk. Untuk mewujudkan bentuk bangunan diperlukan struktur, dan sistem-sistem bangunan yang lain, sedangkan untuk memenuhi estetika dituntut kepekaan dan kreativitas arsitek. Maka ada banyak aspek yang terintegrasi dalam sebuah desain arsitektur.

Dari sudut pandang teknologi gempa, penataan elemen-elemen struktur berkaitan erat dengan konfigurasi bangunan terhadap

gempa bumi, khususnya berkaitan dengan dimensi/bentuk/proporsi bangunan, penataan elemen-elemen struktural dan penataan elemen-elemen nonstruktural (Bab IV). Oleh karena itu, meninjau keterkaitan teknologi gempa dengan kekuatan, kefungsian dan estetika akan sangat terkait dengan konfigurasi bangunan. Bangunan dengan konfigurasi beraturan memberi respons bangunan terhadap gempa bumi relatif sederhana dan perilaku struktur bangunan dapat diprediksi lebih tepat, selain itu konstruksi bangunannya lebih efisien dibandingkan dengan bangunan dengan konfigurasi tidak beraturan.

Adalah tidak benar apabila setiap desain arsitektur dituntut untuk selalu menghasilkan konfigurasi beraturan karena desain arsitektur bersifat integratif yang melibatkan banyak aspek yang dipikirkan secara holistik. Ada kalanya bangunan menuntut efisiensi yang tinggi, maka usaha arsitek adalah menciptakan desain dengan konfigurasi yang beraturan, sebaliknya ada desain yang sarat dengan makna, maka konfigurasi bangunan tidak menjadi pertimbangan yang utama. Tentu saja ada batas-batas kepantasan dari segi finansial pemilik bangunan dan kepantasan sebuah desain arsitektur.

Sementara itu, ada pandangan keliru yang menganggap bahwa konfigurasi beraturan membatasi kreativitas arsitek dalam mendesain bangunan, padahal bangunan yang mempunyai konfigurasi beraturan dan bentuk geometrinya sederhana dapat tampil sangat ekspresif dan menarik, salah satu contoh adalah bangunan The Hemisfèric yang didesain oleh Santiago Calatrava (Gambar 135).



Gambar 135. The Hemisfèric, Santiago Calatrava

https://calatrava.com/projects/ciudad-de-las-artes-y-de-las-ciencias-valencia.html?view_mode=gallery&image=3, diunduh Desember 2020

Calatrava mendesain bangunan tersebut dengan konfigurasi yang beraturan kecuali dimensinya yang besar. Bentuk denah beraturan, tampak bangunan simetri namun bentuknya menampilkan ekspresi menarik dengan struktur yang diekspos secara estetik. Hal tersebut terbentuk dari kemampuan Calatrava memilih bentuk dan penataan elemen-elemen strukturnya dengan sangat kreatif. Bila dikaji dari definisinya Clark dan Pause, bidang atap dipilih berbentuk busur kubah eliptik yang mampu terbentang lebar diarahkan pada panjang bangunan, tumpuan busur berbentuk poligon segitiga/*truss* yang kemiringannya mengikuti sudut kemiringan atap sehingga dapat meneruskan beban atap ke fondasi dengan gaya aksial dan sekaligus memberikan stabilitas pada struktur. Di kiri dan kanan kubah ada 2 pasang busur, masing-masing terdiri dari 2 buah busur yang dihubungkan dengan batang-batang tegak sehingga dapat bekerja sebagai kesatuan mendukung gaya meridian kubah arah transversal (melintang). Penerangan atap dimasukkan melalui deretan batang-batang tegak tersebut. Komposisi elemen-elemen struktur tersebut menghasilkan bentuk arsitektur yang estetik. Penguasaan tentang kinerja elemen-elemen struktural (mekanika gaya) dan persyaratan yang baik dapat membantu arsitek untuk menemukan ide-ide struktural yang kreatif.

Hal lain yang berpengaruh terhadap keterkaitan teknologi gempa dengan kekuatan, kefungsian dan estetika bangunan adalah bentuk dan detail konstruksi elemen struktural penahan gaya gempa dan detail-detail konstruksi join antarelemen struktural. Dalam hal ini detail konstruksi dipandang tidak hanya secara teknis, namun juga berperan secara estetik.

Pada dasarnya hanya ada tiga macam elemen struktur penahan gempa bumi (gaya lateral), yaitu: Rangka Pemikul Momen (RPM), *braced frame*, dan *shear wall*. Melalui koordinasi dengan perancang struktur, arsitek dapat menata elemen-elemen struktur tersebut di dalam desain bangunan dengan mengintegrasikan elemen-elemen struktur tersebut dengan tata ruang dan sistem-sistem bangunan yang lain, serta dengan bentuk dan ekspresi bangunannya.

B. Studi Kasus

1. Continental Engineering Corporation Tower (CEC), Taipei



Gambar 136a. Continental Engineering Corporation Tower (CEC)
<https://www.krisyaoartech.com/en/projects/corporate/Continental-Engineering-Corporation-Headquarters>, diunduh Juli 2022



Gambar 136b.
Sistem Struktur CEC Tower
Sumber: (Bellen, 2000)

Kantor pusat Continental Engineering Corporation Tower (CEC) terletak di Taipei (Gambar 136a), adalah perusahaan konstruksi yang besar. Ketinggian bangunan dari lantai dasar adalah sekitar 60 m terdiri dari 13 lantai *upper floors* dan 4 lantai basement. Denah bangunan berbentuk bujursangkar dengan dimensi 25m x 25m. Lobby mempunyai tinggi ruang lebih dari 2x tinggi lantai-lantai tipikal (dilihat dari proporsi pada gambar). Bangunan ini berada di daerah rawan gempa risiko tinggi, dan mempunyai periode getar tanah yang panjang. Klien meminta agar tampilan bangunan merefleksikan spirit dari perusahaan konstruksi, dan ruang kantor yang fleksibel. Bangunan ini telah menunjukkan kinerja yang baik ketika mengalami gempa bumi Chi-chi 1999.

Bangunan didesain dengan struktur hybrid: *Momen Resistant Frame* (MRF) pada lantai lobby dan *Eccentrically Braced Frame* (EBF) pada lantai tipikal. Struktur bangunan menggunakan 8 buah kolom mega beton bertulang yang diekspos di perimeter bangunan menerus sampai lantai 12 dan di bagian puncak bangunan kolom mega diganti dengan baja dihubungkan dengan balok baja sehingga membentuk 2 pasang MRF yang saling berpotongan tegak lurus, dan memberi kesan lebih ringan. Di sudut-sudut bangunan dipasang EBF baja yang masing-masing bertemu dengan 2 buah kolom mega yang terletak pada sisi fasad yang saling tegak lurus. Link EBF tersebut terletak pada pertemuan *brace* diagonal dengan kolom mega dan di sudut pertemuan EBF yang saling tegak lurus (Gambar 136b, 136c). EBF tersebut dipasang di luar dinding fasad dengan jarak sekitar 90 cm, dan untuk menjaga pergerakan lateral tegak lurus bidang kerja EBF tersebut, maka pada pertemuan antara *link* sudut dengan *brace* diagonalnya ditahan dengan 2 buah baja kotak pada flens atas dan flens bawahnya (A pada Gambar 136e). Secara keseluruhan 8 buah kolom mega ditambah dengan EBF yang seolah lepas dari fasad bangunan menampilkan ekspresi kekuatan konstruksi seperti yang diharapkan oleh owner.



Gambar 136c. Kolom Mega dan EBF, CEC Tower
Sumber: (Chang, 1999)

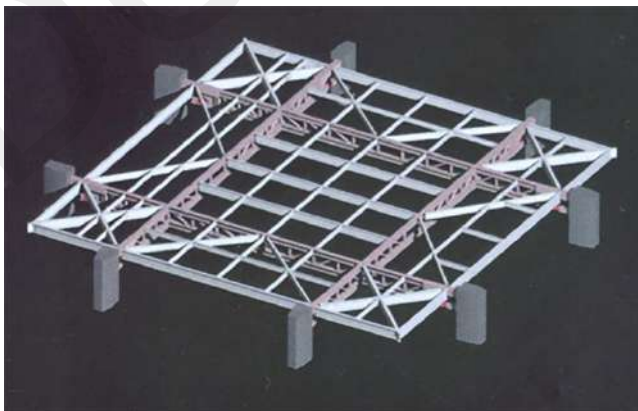


Gambar 136d. Detail Penghubung EBF dengan Balok Perimeter

<https://www.krisyaoartech.com/en/projects/corporate/Continental-Engineering-Corporation-Headquarters>, diunduh Juli 2022

Permintaan *owner* untuk ruang yang fleksibel diselesaikan dengan membuat ruang dalam bebas kolom sehingga bentang balok menjadi sekitar 25 m. Untuk mengatasi bentang lebar tersebut, struktur lantai tipikal dipilih menggunakan 4 buah balok *truss* baja yang saling bersilangan tegak lurus sehingga dapat bekerja secara *two-way* (Gambar 136e). Pertemuan balok *truss* tersebut dengan kolom mega adalah join kaku, sehingga dapat bekerja sebagai struktur MRF. Balok lantai perimeter bertumpu di atas balok *truss* tersebut dan bagian balok *truss* yang keluar dari bidang pelat lantai juga berfungsi sebagai penghubung antara lantai diafragma dengan kolom mega. Penghubung tersebut didesain untuk menahan gaya geser akibat beban gravitasi dan gaya geser terhadap gaya lateral.

Dengan konfigurasi lantai tipikal tersebut maka kekakuan torsi relatif kecil karena hanya ada 8 buah kolom mega dan bentang lantai selebar 25 m, dan bidang lantai tidak langsung bertemu dengan kolom mega. EBF di setiap sudut bangunan berfungsi untuk memperkaku struktur terhadap momen torsi tersebut dan membatasi deformasi terhadap momen torsi dan juga momen lentur lateral, namun tidak ikut mendukung beban gravitasi. Kekakuan diafragma lantai sangat dibutuhkan untuk meneruskan gaya lateral ke semua kolom mega dan EBF sehingga tercapai integritas struktur, hal ini diselesaikan dengan memberikan bracing diagonal pada bagian tepi bidang lantai.



Gambar 136e. Struktur Lantai Tipikal

Sumber: (Chang, 1999)



Gambar 136f. Interior Lobby

<https://www.krisyaoartech.com/en/projects/corporate/Continental-Engineering-Corporation-Headquarters>, diunduh Juli 2022

Di lantai dasar terdapat lobi yang didesain dengan ketinggian ruang lebih dari 2 kali tinggi antarlantai tipikal. Dari segi arsitektur skala dan proporsi ruang yang tinggi tersebut memberi kesan menerima dan megah. Problem struktural yang timbul adalah potensi terjadi *soft storey*, di mana kekakuan lateral struktur lantai dasar lebih kecil dibandingkan lantai-lantai tipikal. Untuk mengatasi masalah tersebut di lantai lobi dimensi kolom-kolom mega diperbesar dan di dalam ruang interior ditambahkan 4 buah kolom beton bertulang dengan jarak as ke as masing-masing kolom adalah 12,6 m. Keempat buah kolom tersebut dihubungkan ke kolom mega dengan balok-balok portal beton bertulang sehingga terbentuk struktur MRF yang kaku. Struktur lantai di antara balok portal dan balok perimeter diselesaikan dengan menggunakan waffle slab beton bertulang sehingga kaku (Gambar 136f).

Kinerja terhadap gempa ditentukan oleh EBF di mana EBF tersebut akan melakukan disipasi energi gempa ketika terjadi gempa besar. EBF didesain tetap dalam kondisi elastik sampai dengan beban *ultimate*. Terhadap beban gempa yang ekstrem yielding dan kerusakan pada link dibatasi ketika mengalami deformasi inelastik dengan daktilitas dan kapasitas disipasi energi yang signifikan (Chang *et al.*, 1999). Deformasi

inelastik yang terjadi pada link pojok tersebut adalah karena mekanisme geser pada batang baja link tersebut. Perilaku ini diselesaikan dengan memasang 6 buah rib sepanjang link tersebut, yang ternyata dapat menambah estetika pada detail tersebut.

Kesimpulan:

Pada bangunan CEC Tower, teknologi gempa terintegrasi dengan desain arsitektur secara keseluruhan, baik dari kefungsian, estetika dan kekuatan. Hasilnya adalah arsitektur yang secara estetika mengekspresikan kekuatan konstruksi, secara kefungsian mengakomodasi kebutuhan ruang-ruang dan secara kekuatan diselesaikan untuk menghadapi gempa kecil maupun gempa besar dengan menggunakan teknologi konvensional. Kreativitas perancang tampak dalam desain EBF pojok yang unik.

2. Manantiales Building, Santiago Chile



Gambar 137a. Manantiales Building Sudut Barat Daya

<https://www.archdaily.com/342695/flashback-manantiales-building-izquierdo-lehmann-arquitectos>, diunduh Mei 2022



Gambar 137b. Manantiales Building Sudut Tenggara

<https://www.archdaily.com/342695/flashback-manantiales-building-izquierdo-lehmann-arquitectos>, diunduh Mei 2022

Manantiales Building adalah sebuah bangunan kantor di Santiago, Chile di daerah yang padat di mana lingkungannya tumbuh secara tidak teratur. Bangunan ini didesain oleh Izquierdo Lehmann (1997). Untuk mengimbangi tata massa lingkungan yang tidak teratur tersebut, sang arsitek mendesain bangunan dengan mengembangkan komposisi bentuk geometri sederhana berbentuk kotak 17 lantai memanjang arah utara-selatan, dan kotak berbentuk denah L setinggi 10 lantai yang menempel pada massa 17 lantai di sebelah timur dan utara, serta massa 2 lantai menempel di sebelah timur massa 10 lantai. Massa 17 lantai menghadap barat ke arah plaza, massanya menerus dari lantai dasar sampai dengan lantai 17, sedangkan massa 10 lantai dan 2 lantai menghadap ke timur ke arah kompleks bangunan-bangunan lain (Arquitectos, 1997). Di daerah lokasi bangunan tersebut harga tanahnya tinggi, maka desain bangunan diusahakan untuk memaksimalkan penggunaan lahan. Denah kantor didesain dengan

pola open plan, dan dengan tipologi *double corridor* dan *triple corridor* untuk lantai yang paling lebar. Oleh karena itu, dua sisi lebar (sisi barat dan timur) diberi bukaan kaca untuk mendapatkan penerangan yang optimal. Sisi selatan yang merupakan sisi sempit masa 17 lantai juga diberi bukaan kaca di seluruh tampaknya. Tampilan fasad sisi barat sumbu a) berbeda dengan sisi timur (sumbu d dan f). Tampilan fasad sisi timur sepertinya diserasikan dengan bangunan-bangunan di lingkungannya sehingga dinding fasadnya berbentuk bidang dengan lubang jendela berbentuk kotak, sedangkan sisi barat yang menghadap plaza fasadnya didesain lebih bebas.

Manantiales Building berada di daerah risiko gempa tinggi, namun bentuk bangunannya memiliki konfigurasi terhadap gempa yang tidak beraturan. Problem konfigurasi pada bangunan ini adalah: *setback* ditinjau pada potongan A-A dan potongan B-B (Gambar 137c), fasad bangunan pada sumbu a cenderung *soft storey* bila ditinjau dari tinggi lantai ke lantai saja. Fasad pada sumbu a dibandingkan dengan fasad f kekakuannya tidak seimbang karena struktur pada fasad f adalah dinding pemikul berbentuk *vierendeel* yang kaku cenderung menimbulkan torsi. *Setback* mengakibatkan terjadinya gaya geser terpusat pada komponen-komponen struktur di posisi sudut lengan *setback* (Gambar 137i dan 137j). *Setback* pada sumbu a dan f (Gambar 137k dan 137l) tidak signifikan dibandingkan *setback* pada sumbu 1 dan 2 (Gambar 137i dan 137j) ditinjau dari ratio/perbandingan panjang denah lantai di atas lantai 10 dan panjang lantai di bawah lantai 10.

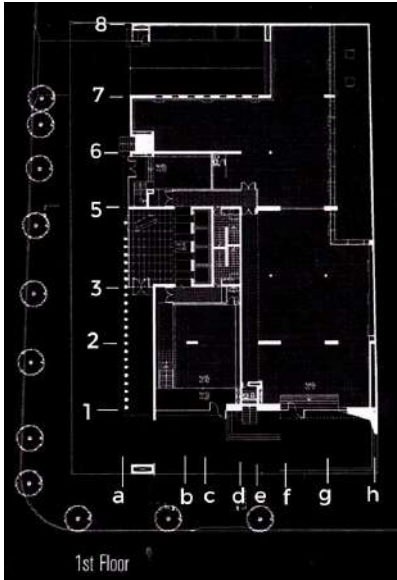
Problem konfigurasi tersebut dipecahkan dengan memberikan elemen-elemen penahan gaya lateral (gempa) pada dua arah sumbu bangunan berupa *Shear-wall*, “dinding pemikul” berbentuk bidang *Vierendeel* di fasad sumbu f dan *Eccentrically Braced Frame* (EBF) di fasad sumbu a dan sumbu 1. Penempatan semua elemen struktur penahan gaya lateral ditata agar terjadi keseimbangan kekakuan struktur bangunan di sisi utara dan selatan maupun di sisi barat dan timur untuk meminimalkan torsi. Struktur lantai menggunakan pelat beton *prestressed post-tension* yang juga berfungsi sebagai lantai diafragma untuk meneruskan gaya gempa letral ke semua elemen-elemen pendukung gaya gempa.

Ditinjau arah gaya gempa utara-selatan, dinding *shear-core* yang bekerja adalah yang berada di sumbu c. Posisi dinding tersebut cukup simetri untuk denah lantai dasar sampai dengan lantai 10 (Gambar 137c s.d. 137f), di atas lantai 10 posisinya asimetri lebih dekat ke arah timur (Gambar 137g dan 137h). Maka, kekakuan sisi timur relatif lebih besar daripada kekakuan sisi barat, khususnya di atas lantai 10. Di sumbu f terdapat dinding pemikul berbentuk *vierendeel* yang berdiri mulai dari lantai 4 sampai dengan lantai 10. Kekakuan dinding tersebut diimbangi dengan EBF pada sumbu a. Pola bracing EBF pada sumbu a tersebut sesuai dengan kebutuhan kekakuannya, yaitu dari lantai 3 sampai dengan lantai 14 lebih kaku, dan di atas lantai 14 kekakuannya dikurangi secara berjenjang (Gambar 137a). Hal tersebut disebabkan karena dinding *Vierendeel* pada sumbu f berada di lantai 4 sampai dengan lantai 10. Di lantai 1 dan 2 pada sumbu a deretan kolom-kolom disusun dengan rapat untuk mengantisipasi perilaku *soft storey*.

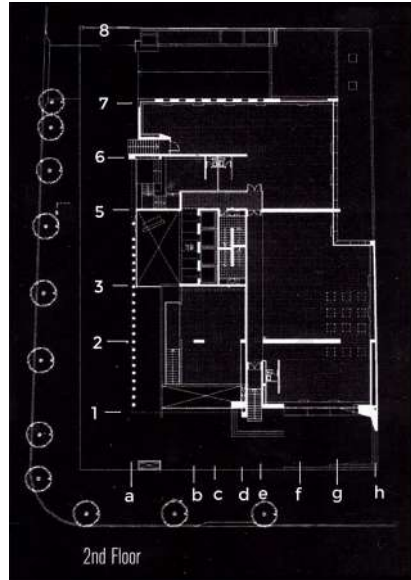
Ditinjau arah gaya gempa barat-timur, gaya gempa didukung oleh dinding *core* di sumbu 6 dan sumbu 5, *shear-wall* di sumbu 2, dan EBF + *shear-wall* di sumbu 1. Pola distribusi batang-batang EBF fasad sisi selatan massa 17 lantai di sumbu 1 sangat unik karena di bagian atas justru batang-batang diagonalnya rapat di bagian atas yaitu di atas lantai 10 sampai ke puncak bangunan. Bila dicermati tampak pola EBF tersebut adalah akibat dari konfigurasi *setback*, dan pada sumbu 1 ada *shear-wall* pada fasad bangunan 10 lantai sehingga yang perlu diperkaku adalah fasad di bagian atasnya (Gambar 137a).

Kesimpulan:

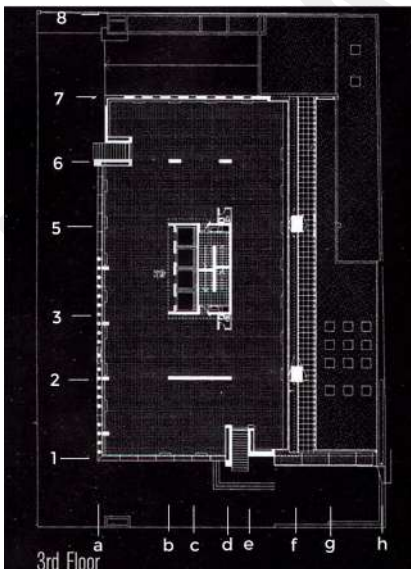
Dalam desain Manantiales Building ini, struktur bangunan diselesaikan dengan menerapkan prinsip teknologi gempa konvensional. Penataan elemen-elemen struktur pada bangunan ini sangat terkait dengan tata ruang, bentuk dan ekspresi bangunannya. Hal ini dapat tercapai kalau kolaborasi antara arsitek dengan perancang strukturnya sangat baik. Arsitek bangunan ini juga menunjukkan kreativitasnya untuk mengekspos keunikan strukturnya.



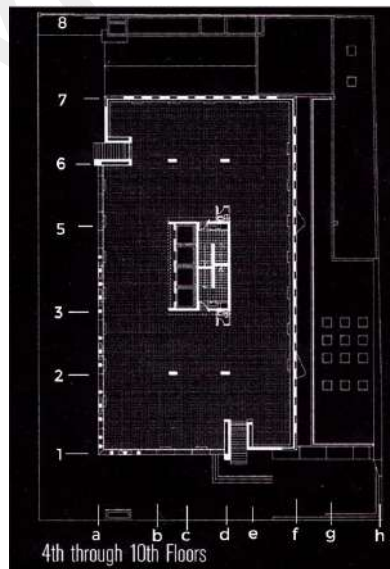
Gambar 137c.
Denah Lantai 1 Manantiales Building
Sumber: (Bellen, 2000)



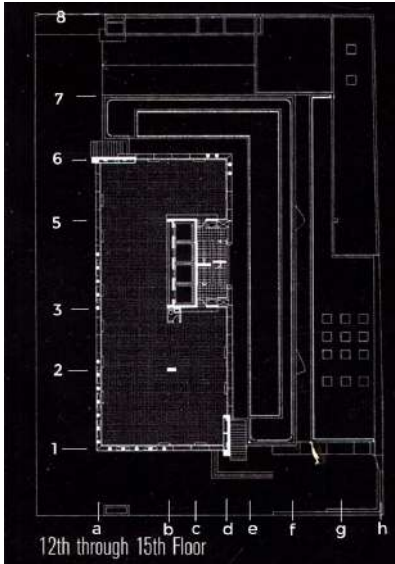
Gambar 137d. Denah Lantai 2
Manantiales Building
Sumber: (Bellen, 2000)



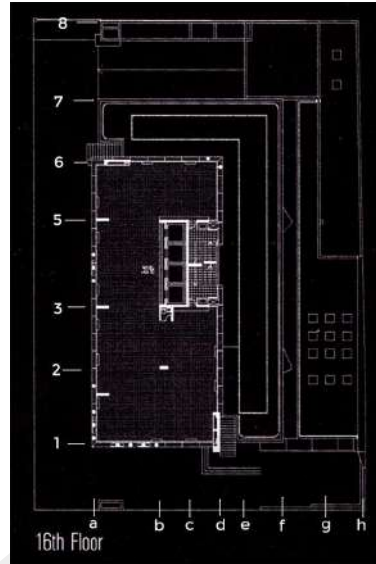
Gambar 137e.
Denah Lantai 3 Manantiales Building
Sumber: (Bellen, 2000)



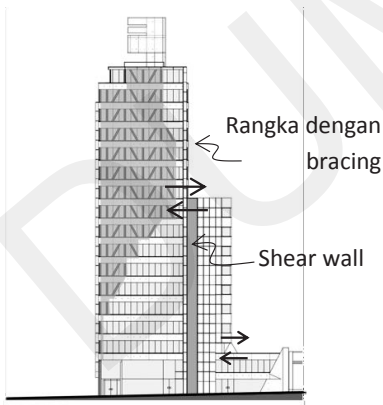
Gambar 137f.
Denah Lantai 4–10 Manantiales Building
Sumber: (Bellen, 2000)



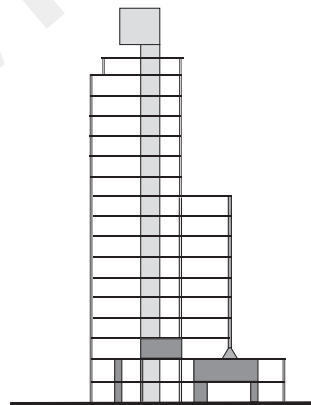
Gambar 137g. Denah Lantai 12 -15
Manantiales Building
Sumber: (Bellen, 2000)



Gambar 137h. Denah Lantai 16
Manantiales Building
Sumber: (Bellen, 2000)

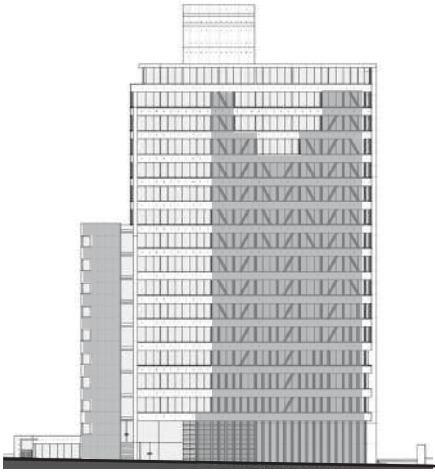


Gambar 137i. Potongan sumbu-1
Manantiales Building

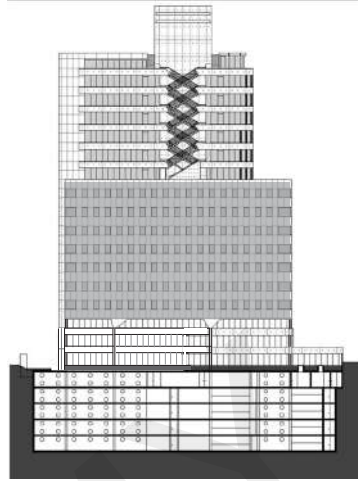


Gambar 137j. Potongan sumbu-2
Manantiales Building

Gambar 137i s.d. 137f Dimodifikasi dari: <https://www.archdaily.com/342695/flashback-manantiales-building-izquierdo-lehmann-arquitectos>, diunduh Mei 2022



Gambar 137k. Potongan sumbu-a
Manantiales Building



Gambar 137l. Potongan sumbu-a
Manantiales Building

3. Reforma, Mexico City

Torre Reforma adalah sebuah bangunan kantor di Mexico City yang didesain oleh LBR+A Arquitectos, sudah berdiri sejak tahun 2016. Bangunan berada di kawasan budaya, histori dan finansial di pojok 2 buah jalan. Luas lahan adalah 2.800m^2 , cukup sempit untuk sebuah bangunan tinggi dengan luas lantai 87.000 m^2 . Di pojok site terdapat sebuah bangunan eksisting rumah batu 2 lantai yang bersejarah. Bangunan eksisting ini tidak dibongkar dan menjadi pemicu ide geometri bangunan serta diintegrasikan dengan kantor menjadi bagian dari lobby utama.

Bangunan ini dilengkapi dengan fasilitas olah raga, ruang terbuka dan teras, bar, restoran, auditorium dan ruang rapat bersama dengan luas lantai keseluruhan 89.657m^2 yang terdiri dari 57 lantai dan ketinggian bangunan 246m. Karena sempitnya lahan dan tuntutan jumlah parkir yang banyak sampai 1.000 buah mobil, maka ruang parkir diletakkan di basement sedalam 8 lantai untuk 600 mobil dan dilengkapi dengan bangunan gedung parkir di belakang tower utama.

Denah tower berbentuk segitiga siku-siku sama sisi, di mana sisi panjang segitiga tersebut bertemu dengan bangunan rumah eksisting, sehingga di level lantai dasar bentuk denah tower bersama dengan bangunan eksisting tersebut membentuk bujursangkar (Gambar 138a). Pada lantai 2 ke atas, sisi panjang dari segitiga berupa bukaan untuk penerangan dan view yang ditutup dengan kaca, dan juga teras yang dilengkapi dengan penahan sinar matahari. Bila dilihat dari seberang sudut jalan, maka tampak tower menjadi *background* dari bangunan eksisting. Keberadaan bangunan eksisting ini menjaga agar karakter lingkungannya tetap terjaga dan bangunan eksisting tersebut menjadi bangunan perantara dari skala pedestrian ke bangunan tinggi (Gambar 138b).



Gambar 138a. Denah Lantai 1 s.d. Lantai 4 Reforma

<https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/3282-case-study-torre-reforma-mexico-city.pdf>, diunduh Februari 2022

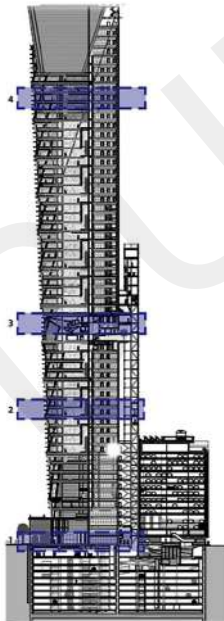


Gambar 138b. Perspektif dari Pojok Jalan Reforma

<https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/3282-case-study-torre-reforma-mexico-city.pdf>, diunduh Februari 2022

Sebagai sebuah kantor, bangunan didesain dengan ruang yang fleksibel tanpa ada kolom di dalam ruang. Secara vertikal bangunan dibagi-bagi dalam 14 klaster, masing-masing klaster terdiri dari 4 lantai, yaitu 1 lantai penuh di atas 2 lantai *mezzanine*, dan 1 lantai penuh di bawah 2 lantai *mezzanine* (138c, 138d). Void yang terbentuk oleh *mezzanine* dimanfaatkan untuk taman *indoor*.

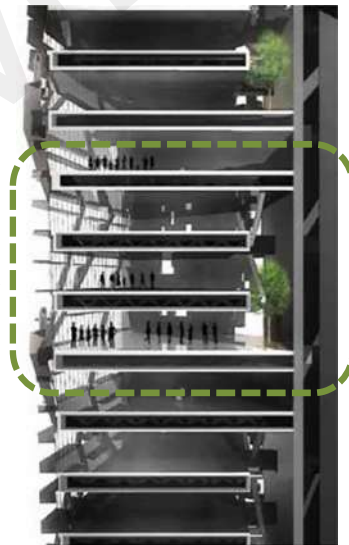
Sistem struktur bangunannya adalah *core*, perimeter *coupled shear-wall* dan *braced-frame* untuk mendukung semua beban gravitasi dan gempa. Sistem struktur tersebut bersifat kaku dan cenderung mempunyai periode getar pendek sehingga sesuai untuk diterapkan pada jenis tanah lunak yang mempunyai periode getar panjang. Penempatan *coupled shear wall* dan *chevron braced frame ganda* di perimeter bangunan dipertimbangkan untuk memberikan ruang bebas kolom yang maksimal, sedangkan dari segi struktur bangunan konfigurasi tersebut sangat menguntungkan karena memberikan perlawanan torsi yang maksimal. Di samping itu, dipertimbangkan juga tampilan dari struktur bangunannya, yaitu dengan mengadaptasi tampilan konstruksi batu bangunan bersejarah dan bangunan kolonial Mexico. Untuk pertimbangan tersebut, material *shear wall* dan *core* dipilih beton bertulang ekspos yang mempunyai karakter tampilan seperti batu sehingga dilihat dari arah tertentu tampak seperti menara batu/beton.



Gambar 138c. Potongan Reforma

<https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/3282-case-study-torre-reforma-mexico-city.pdf>, diunduh Februari 2022

1 KLASER



Gambar 138d. Potongan Klaster Reforma

<https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/3282-case-study-torre-reforma-mexico-city.pdf>, diunduh Februari 2022

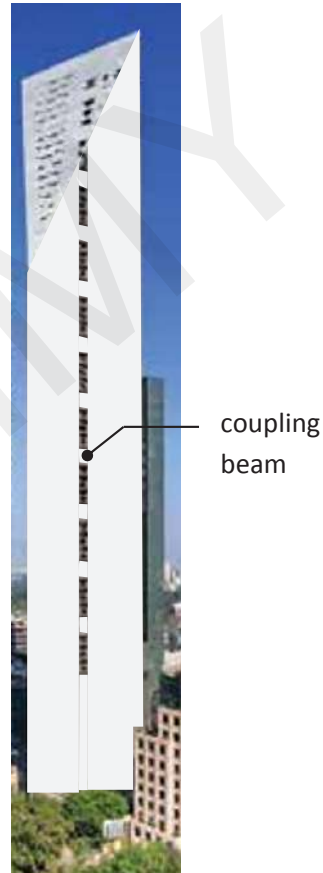
Coupled shear wall didesain dengan lubang-lubang penerangan berbentuk unik untuk memasukkan terang ke taman indoor (Gambar 138e, 138f, 138g). Bila terjadi gempa kecil, *coupled shear wall* tidak mengalami kerusakan, sedangkan terhadap gempa besar *coupling beam* pada *coupled shear wall* mengalami *yielding* sehingga terjadi disipasi energi gempa, dan terhadap gempa yang ekstrem bangunan tetap mempertahankan keselamatan pengguna.



Gambar 138e. Tampilan Beton dari Arah Belakang Reforma



Gambar 138f. Lubang Penerangan pada *Coupled Shear Wall* Reforma



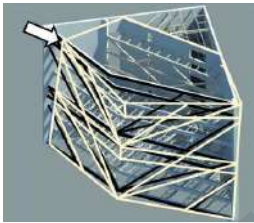
Gambar 138g. Double *Coupled Shear Wall*

Sumber Gambar 138e, 138f, 138g
<https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/3282-case-study-torre-reforma-mexico-city.pdf>, diunduh Februari 2022

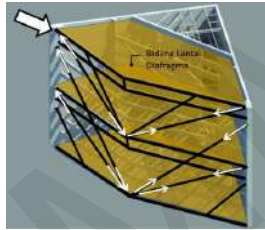
Gambar 138g adalah gambar yang dimodifikasi agar lebih jelas

menerima gaya lateral *braced-frame* tersebut bekerja secara meruang bersinergi dengan bidang lantai diafragma, dan *shear wall* (Gambar 138k). Ditinjau dari segi arsitektur, bentuk *bracing Chevron V* ganda ini sangat unik karena terdiri dari 2 pasang V yang meruang dan ujung dasarnya menuju ke sumbu tengah bangunan eksisting sehingga dari sudut pojok jalan tampak terintegrasi dengan bangunan eksisting.

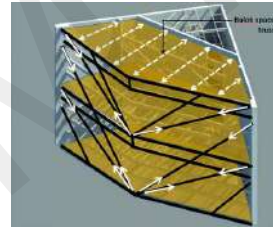
Struktur Lantai (Gambar 138l dan 138m) menggunakan balok *one way space-truss* yang ditumpu oleh balok perimeter (a dalam Gambar 138m) dan dinding *core/shear wall* untuk lantai penuh, sedangkan untuk lantai *mezzanine* balok *one way space-truss* ditumpu oleh balok perimeter dan balok tepi yang (b dalam Gambar 138m) bertumpu pada girder berbentuk kuda-kuda terbalik (c dalam Gambar 138m).



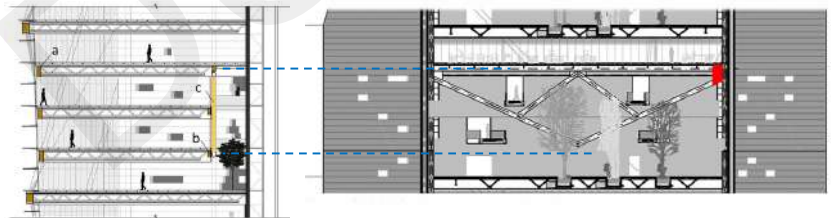
Gambar 138j. *Chevron-V Braced-Frame* Ganda Tanpa Bidang Lantai Diafragma Reforma



Gambar 138k. *Chevron-V Braced-Frame* Bekerja Meruang Reforma



Gambar 138l. Prinsip Struktur Lantai Reforma



Gambar 138m. Potongan Struktur Klaster Reforma

https://www.archdaily.mx/mx/792716/torre-reforma-lbr-plus-a/57a366e5e58ece207600000f-torre-reforma-lbr-plus-a-seccion?next_project=no, diunduh Februari 2022

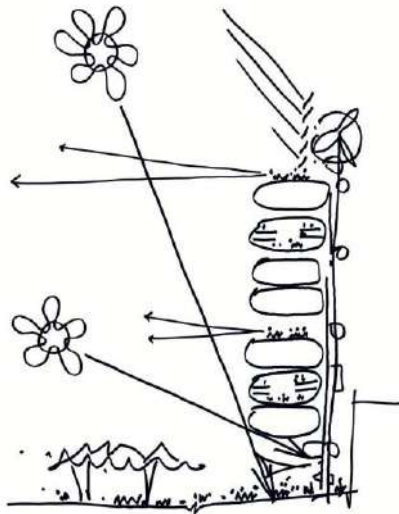
Kesimpulan:

Struktur bangunan Torre Reforma yang menerapkan teknologi gempa konvensional ternyata sangat berperan dalam membentuk arsitektur bangunan tersebut. Struktur bangunannya telah dipecahkan untuk memenuhi kebutuhan ruang yang fleksibel, mampu melindungi pengguna bangunan terhadap gempa bumi besar, serta menampilkan arsitektur yang tidak meninggalkan nilai historis, menyatu dengan lingkungannya, sederhana dan unik.

4. 8-Chifley Tower

8-Chifley merupakan Menara komersial 34 lantai setinggi 150m terletak di ujung jalan, dan 3 sisi bangunan ini menghadap ke jalan. Luas lahannya sekitar 1.300m² cukup terbatas untuk sebuah menara komersial, sehingga arsiteknya berusaha memaksimalkan ruang yang dapat disewakan dan tetap dapat terintegrasi dengan lingkungannya. Posisi bangunan ini berdampingan dengan bangunan Deutsche Bank yang sangat tinggi di sebelah timurnya dan di sebelah selatan yaitu bagian yang tidak menghadap ke jalan terdapat menara Martin Place. Setting lingkungan tersebut memunculkan denah berbentuk kotak 4 persegi panjang dan di sebelah selatan yang tertutup Menara Martin Place dimanfaatkan sebagai core utilitas. Usaha untuk memaksimalkan luas lantai yang disewakan dalam luasan lahan yang terbatas, tidak memungkinkan untuk menempatkan menara menjauh dari jalan (*setback*) dan membuat podium yang menonjol ke depan untuk memberikan skala manusia bagi pedestrian, maka lantai dasar di bawah lantai tipikal kecuali core dikosongkan setinggi 5 lantai sehingga tercipta ruang publik yang besar dengan skala manusia yang berkesan mengundang dan secara visual saling terhubung dengan *square* di depannya walaupun terpisah oleh jalan. Ekspresi ruang publik diulang di bagian tengah dan di puncak menara sehingga memberi kesan lebih ramah pada publik (Gambar 139a, 139b, 139c).

Luas denah yang dapat disewakan adalah 1.000 m² per lantai, termasuk luasan yang rendah dibandingkan dengan rentang 1.500 – 2.000m² yang menjadi tuntutan pasar. Untuk menanggapi hal tersebut



Gambar 139a.

Konsep Ruang 8-Chifley Tower

<https://www.rsh-p.com/projects/office/8-chifley/>, diunduh Maret 2022



Gambar 139b.

Sketsa Ide Bentuk 8-Chifley Tower

<https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/8-Chifley>, diunduh Maret 2022



Gambar 139c.

Bentuk Eksterior 8-Chifley Tower

<https://www.rsh-p.com/projects/office/8-chifley/>, diunduh Maret 2022

oleh arsiteknya dirancang klaster (*vertical village*) vertikal 3 dan 4 lantai yang saling terhubung dengan tangga terbuka, juga terhubung secara visual sehingga diperoleh luas lantai 1 buah klaster 2.250 – 3.000 m². Tiap klaster terdiri dari 1 buah lantai penuh dan 2 atau 3 buah lantai berbentuk U yang membentuk void antar lantai-lantai klaster tersebut (Gambar 139d, 139e).

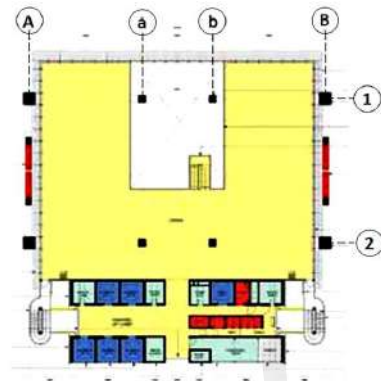
Sistem struktur terdiri dari 4 buah kolom mega beton in-situ dengan bentang 18m dari sumbu A ke sumbu B, dan 37,5m dari sumbu 1 ke sumbu 2 (Gambar 139e) yang menerus dari puncak bangunan sampai ke fondasi. Seluruh beban gravitasi dari lantai-lantai bangunan dipikul oleh kolom-kolom mega tersebut. Pada masing-masing sumbu 1 dan 2 di antara kolom-kolom mega terdapat 2 buah kolom interior yang berdiri mulai dari lantai 6 sampai dengan lantai 18, dan dari lantai 21 sampai ke puncak bangunan. Kolom-kolom interior berfungsi untuk memperpendek bentang balok induk tiap lantai yang terbentang sekitar 36m dari bidang muka kolom-kolom mega. Kolom-kolom interior tersebut didukung oleh struktur transfer dari baja komposit yang terdiri dari balok dan kolom miring yang berpangkal pada kolom-kolom mega, sehingga membentuk struktur EBF (*eccentrically braced-frame*). Struktur transfer tersebut berada di lantai dasar setinggi 5 lantai dan di lantai 18 setinggi 3 lantai (Gambar 139b, 139c, 139g).

Denah lantai didesain bebas kolom di dalam interiornya untuk mendapatkan ruang yang fleksibel. Struktur lantai terdiri dari 2 buah balok induk yang berada di sumbu 1 dan 2 sepanjang $3 \times 12\text{m}$ (=36m) dan balok anak dengan bentang 18m serta kantilever sepanjang 4,75m yang ditumpu oleh balok-balok induk tersebut. Jarak antar balok-balok anak tersebut adalah 6m (lihat Gambar 139d). Balok induk, balok anak dan balok kantilever tersebut menggunakan beton prategang *post-tension*. Pelat lantai menggunakan pelat komposit beton in-situ setebal 15cm yang dicor di atas *steel deck*.



Gambar 139d.
Klaster dan Ruang Publik di Lantai 18
8-Chifley Tower

[https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/
File:8_chifley_perspective_section.jpg](https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/File:8_chifley_perspective_section.jpg),
diunduh Maret 2022



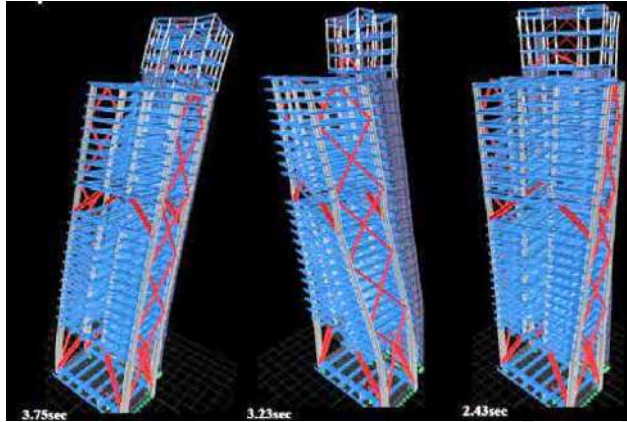
Gambar 139e.
Denah Lantai U 8-Chifley Tower

[https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/
File:8_chifley_perspective_section.jpg](https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/File:8_chifley_perspective_section.jpg),
diunduh Maret 2022

Penempatan core di sisi selatan menyebabkan konfigurasi bangunan asimetri sehingga cenderung mengakibatkan torsi apabila menerima gaya lateral gempa bumi/angin (Gambar 139f). Elemen-elemen struktur untuk mengantisipasi perilaku torsi tersebut adalah:

- *Mega-frame* pada sumbu 1 dan 2 yang terbentuk dari kolom-kolom mega dan struktur transfer yang berbentuk EBF, di mana struktur transfer tersebut bekerja sebagai *mega girder* (Gambar 139g).
- *Mega-brace* berbentuk X setinggi 6 lantai menghubungkan kolom-kolom mega pada sumbu A dan B (Gambar 139h).
- Core beton bertulang.

Terhadap gaya lateral (gempa/angin), *mega-frame*, *mega-brace* dan core bersama dengan lantai diafragma bersinergi menahan torsi dan momen lentur. Pemusatan gaya gravitasi pada 4 buah kolom mega yang terletak di tepi denah memberikan gaya tekan yang besar pada dasar kolom/fondasi, sehingga mengeliminir gaya tarik ke atas (gaya angkat) ketika menahan momen lentur (momen guling) terhadap gaya lateral, dan memberikan stabilitas struktur yang baik.



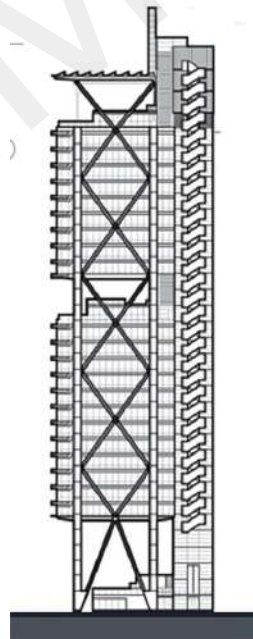
Gambar 139f. Animasi Perilaku Torsi terhadap Gaya Lateral 8-Chifley Tower

<https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/2524-8-chifley-sustainable-structural-and-fire-engineering.pdf>, diunduh Maret 2022



Gambar 139g.

Tampak Utara, Mega-frame 8-Chifley Tower
http://static.dezeen.com/uploads/2013/10/8-Chifley-by-Rogers-Stirk-Harbour-+-Partners_dezeen_14_1000.gif, diunduh Maret 2022
http://static.dezeen.com/uploads/2013/10/8-Chifley-by-Rogers-Stirk-Harbour-+-Partners_dezeen_14_1000.gif



Gambar 139h.

Tampak Barat, Mega-brace 8-Chifley Tower
<https://www.skyscrapercenter.com/building/8-chifley/1890>, diunduh Maret 2022

Kesimpulan:

Ide bangunan terutama dipicu oleh keterbatasan luas site, setting lingkungannya serta fungsi bangunannya yang membutuhkan ruang fleksibel, mampu melindungi pengguna bangunan terhadap gempa bumi. Teknologi gempa konvensional dengan prinsip pemecahan konfigurasi bangunan terhadap gempa bumi sangat berperan dalam membentuk struktur dan arsitektur bangunan 8-Chifley.

5. Tower Jakarta (Dahulu: Wisma Dharmala Sakti)

Intiland tower didesain oleh Paul Rudolph (1982), tinggi tower adalah 27 lantai atau 112,20m, tinggi podium adalah 7 lantai atau 31m. Desain diinspirasi oleh arsitektur tropis, sehingga ditampilkan sosor yang lebar di setiap lantai untuk memberi pembayangan yang cukup pada ruang-ruang dalam.

Desain menampilkan tata letak struktur yang menghasilkan konfigurasi tidak beraturan. Denah tipikal secara garis besar berbentuk bujursangkar dengan 3 buah tipe bentuk denah yang disusun dalam 3 lantai membentuk satu unit kelompok, kemudian diulang ke semua lantai tipikal. *Core lift* terletak di salah satu pojok denah, sedangkan agak di tengah denah terdapat sepasang core tangga darurat. Denah tipikal ini simetri terhadap garis sumbu y, sedangkan terhadap sumbu x denahnya asimetri. Kekakuan terbesar terhadap sumbu x berada di sisi *core lift*. Denah podium berbentuk kompleks, lantai podium tersebut tidak berada seluruhnya di bawah tower, menyisakan ruang yang membentuk atrium besar dan tinggi (31 m), serta ada sisi podium yang keluar dari denah tower (Gambar 140c s.d. 140i).

Problem konfigurasi yang timbul dari desain ini adalah: torsi karena posisi core asimetri terhadap sumbu x, *soft-storey* karena ada kolom-kolom di atrium yang langsing dibandingkan dengan kolom-kolom tipikal, dan *setback* karena ada podium yang menonjol keluar dari tower.

Sistem struktur bangunannya menggunakan *frame-shear core* yang terdiri dari kolom ganda dan balok prategang. Digunakan balok prategang untuk menanggulangi bentang yang cukup besar ± 16 m,

dan kolom ganda untuk mendapatkan kapasitas dukung dan kekakuan lateral yang cukup namun kelihatan langsing. Arah penempatan kolom ganda mengikuti arah portal utama, yaitu kolom ganda eksterior mengikuti arah perimeter, dan kolom ganda interior mengikuti arah sumbu x, masing-masing untuk mendukung gaya geser karena torsi. Diameter kolom ganda rata-rata 120 cm, kecuali kolom interior di lantai podium yang panjangnya 31 m digunakan diameter 130 cm. Karena langsingnya kolom-kolom ganda tersebut, maka digunakan kolom komposit beton dengan 4 buah baja profil I (*steel reinforced concrete*). Kolom-kolom ganda dirangkai dengan *bracing* berbentuk “butterfly” sehingga dapat bekerja sama dengan baik.



Gambar 140a. Intiland Tower

<https://transaksiproperty.com/2017/05/05/south-quarter-tower-mahakarya-terbaru-intiland-setelah-intiland-tower-regatta/>, diunduh Juli 2022

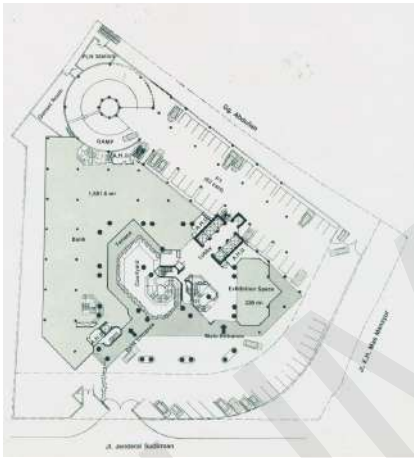


Gambar 140b. Intiland Tower

<https://i.pinimg.com/originals/9b/29/11/9b29113f10407198497fdc487ef39883.jpg>, diunduh Januari 2022

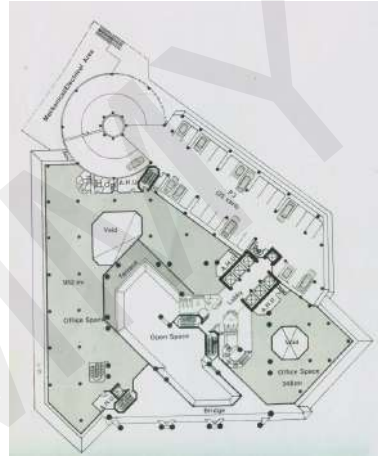
Penempatan 3 buah core diusahakan untuk mengurangi efek torsi, dan memberi kekakuan terhadap *soft storey* di lantai podium. Ketiga buah unit *core* tersebut mempunyai dimensi yang berbeda-beda, yaitu *core* lift di sudut B, sepasang *core* tangga darurat yang ditempatkan di dekat titik pusat denah lantai tipikal, 1 buah *core* tangga khusus

podium di dekat sudut A. *Core lift* dan *core tangga darurat* berdiri dari basement sampai dengan puncak bangunan, sedangkan *core tangga khusus podium* berdiri dari *basement* sampai dengan lantai 6. Dimensi *core lift* paling besar sehingga mempunyai kekakuan yang paling besar untuk kedua arah sumbu, maka penempatan sepasang *core tangga darurat* ditempatkan di dekat titik pusat denah tipikal dan *core khusus podium* di dekat sudut A untuk mengurangi torsi untuk arah sumbu x. Sepasang *core tangga* dan *core tangga khusus podium* berfungsi juga untuk memperkaku lantai podium terhadap perilaku *soft storey*.



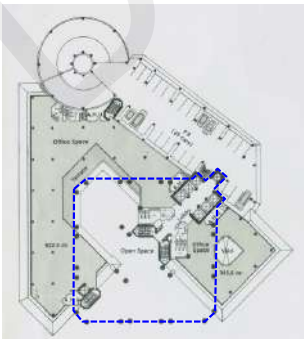
Gambar 140c.

Denah Lantai 1 Intiland Tower
Sumber: (Bellen 1989)



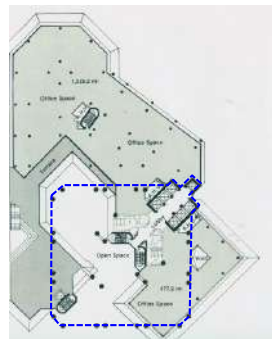
Gambar 140d.

Denah Lantai 2 Intiland Tower
Sumber: (Bellen 1989)



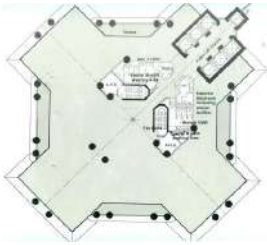
Gambar 140e.

Denah Lantai 3 Intiland Tower
Sumber: (Bellen 1989)

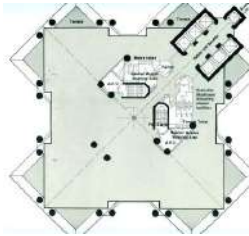


Gambar 140f.

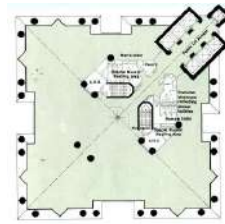
Denah Lantai 4 Intiland Tower
Sumber: (Bellen 1989)



Gambar 140g.
Denah Tipikal A Intiland Tower
Sumber: (Bellen 1989)



Gambar 140h.
Denah Tipikal B Intiland Tower
Sumber: (Bellen 1989)



Gambar 140i.
Denah Tipikal C Intiland Tower
Sumber: (Bellen 1989)

Untuk mendistribusikan gaya-gaya ke elemen-elemen semua *core* dan *frame* secara proporsional, maka lantai diafragma diperkaku dengan sabuk tembereng beton penahan sinar matahari di perimeter denah. Karena ada perilaku torsi, defleksi lateral di puncak bangunan di sisi A lebih besar daripada defleksi lateral di sisi B (Gambar 140c). Sedangkan untuk gaya gempa searah sumbu y, posisi *core* relatif simetri, dalam hal ini *core* bekerja dominan dan defleksi di puncak bangunan kecil.

Bangunan Intiland Tower ini memperlihatkan kerja sama yang erat antara arsitek dan perancang struktur. Perancang struktur sangat mengakomodasi ide arsitek yang menampilkan konfigurasi tidak beraturan, di mana arsitek mengharapkan di sisi yang menghadap sudut jalan, bagian podiumnya membentuk atrium besar yang terbuka, sedangkan di sisi sebaliknya lebih masif berisi *core lift*. Usulan perancang struktur yang berpengaruh pada tampilan bangunan dan disepakati oleh arsitek adalah perubahan kolom tunggal menjadi kolom ganda untuk mendapatkan kekakuan lateral yang dibutuhkan dan tetap memberi kesan langsung. Keutuhan arsitektur dengan struktur terekspos dengan jelas dalam bangunan ini, di mana semua elemen bangunan yang tampak, yaitu: kolom ganda, *core* dan tembereng penahan sinar matahari adalah elemen struktural.

Terkait dengan konfigurasi bangunannya, sebuah penelitian yang mengambil bangunan ini di bagian towernya saja (podium yang menonjol dianggap tidak ada) menunjukkan bahwa dengan mengubah struktur *core lift* menjadi struktur rangka pemikul momen diisi dinding

pengisi, sedangkan *core* yang dipertahankan sebagai dinding *shear core* adalah sepasang *core* tangga darurat yang berada di dekat titik pusat denah tipikal dan 1 buah tangga khusus podium setinggi 6 lantai yang berada di dekat sudut A menghasilkan deformasi puncak bangunan yang lebih kecil daripada konfigurasi eksisting (Maer, B.W. *et al.*, 2015). Hal ini memberi gambaran bahwa penataan konfigurasi bangunan yang tidak beraturan dapat direkayasa oleh arsitek untuk menghasilkan perilaku yang lebih optimal tanpa mengubah ekspresi arsitekturnya.

Kesimpulan:

Desain Intiland Tower sangat memperhatikan iklim tropis, konsep ruang kontinu dan permainan serta poporsi skala ruang sangat dominan dalam desainnya sehingga menghasilkan konfigurasi bangunan terhadap gempa tidak beraturan. Perilaku terhadap gempa yang dominan adalah torsi dan *soft-storey*, dan struktur bangunan dipecahkan dengan menarik untuk mengantisipasi hal tersebut. Semua elemen bangunan yang tampak seperti kolom, pelat lantai, tembereng dan *core* adalah elemen struktural.

Namun kolaborasi aritek dengan perancang struktur dapat mengembangkan ide dengan merekayasa konfigurasi bangunannya untuk mendapatkan perilaku struktur bangunan yang lebih optimal.

C. Pengaruh Retrofit Seismik pada Arsitektur

Retrofitting atau penguatan struktur merupakan pekerjaan yang perlu dilakukan apabila diketahui bahwa struktur bangunan berpotensi tidak memenuhi standar keamanan seismik yang baru (Bab VI). Penguatan tersebut dilakukan dengan menambahkan elemen-elemen struktur pada posisi yang direncanakan. Elemen-elemen struktur tersebut bisa berupa *shear wall*, *braced frame* atau rangka pemikul momen baik yang konvensional maupun yang menggunakan peredam. Penambahan tersebut sangat memengaruhi arsitektur, baik dari segi tampilan visualnya maupun terhadap kegiatan di dalam ruang, misalnya *bracing* yang harus dipasang di posisi selasar bisa mengganggu sirkulasi sehingga harus dipilih bentuk *bracing* yang dapat mengakomodasi kebutuhan

visual dan sirkulasi tersebut. Oleh karena itu, pemilihan bentuk elemen struktur tambahan dan penempatannya perlu diputuskan bersama oleh perancang struktur dan arsitek agar menghasilkan performa struktur dan arsitektur yang optimal.

1. Bangunan Industri di South of Market Area (SOMA), San Francisco

Sebuah bangunan industri di South of Market Area (SOMA) San Francisco yang dibangun pada tahun 1924 dan renovasinya didesain oleh Costa Brown Architecture, akan diubah oleh pemiliknya menjadi sebuah kantor yang lebih terkesan terbuka dan terang, dan 2 lantai mezanin pada bangunan ini diperluas. Struktur bangunan ini tidak memenuhi standar keamanan seismik sehingga dilakukan retrofitting. Untuk retrofitting tersebut digunakan *steel bolted eccentrically braced frames*, sehingga tidak ada pekerjaan pengelasan. *Braced frame* tersebut dengan detail-detail bautnya diekspos untuk mendapatkan ekspresi industri. *Braced frame*, diafragma lantai, atap dan interkoneksi antara dinding eksterior beton bertulang, lantai dan atap rangka kayu diperkuat.



Gambar 141. Retrofitting Sebuah Kantor 4 Lantai di San Francisco dengan *Eccentrically Braced-Frame*

<https://ashleyvance.com/projects/commercial/soma-renovation-and-seismic-upgrade>,
diunduh Januari 2022

2. Fabric Laboratory (Fa-bo)

Fa-bo adalah bekas kantor pusat Komatsu Seiren 3 lantai, merupakan bangunan dengan struktur rangka beton bertulang yang berada di

Kota Nomi, Prefektur Ishikawa Jepang. Komatsu Seiren merupakan produsen kain terkemuka di Jepang, menginginkan bangunan tersebut direnovasi menjadi sebuah kantor, ruang ekshibisi, pusat informasi dan fasilitas penelitian untuk pabrik kain, dengan intensi mengubah interior dan eksterior struktur menjadi “ruang untuk menampilkan teknologi (tekstil) Komatsu Seiren.”

Bangunan ini berada di sebuah kompleks yang terdiri dari beberapa massa, dan menempel pada salah satu massa tersebut (Gambar 142a). Untuk ketahanan terhadap gempa bumi, bangunan ini membutuhkan retrofitting, sayang tidak ditemukan cukup informasi tentang retrofitting sistem struktur secara keseluruhan bangunan yang sebenarnya diperlukan untuk kajian lebih dalam. Bahasan yang didapat dari beberapa referensi adalah retrofitting untuk bangunan kantor utamanya saja yang menempel pada bangunan lain, namun tidak jelas bangunan lain tersebut diretrofit seperti apa.



Gambar 142a. Site Plan

<https://www10.aecafe.com/blogs/arch-showcase/2017/03/24/komatsu-seima-fabric-laboratory-fa-bo-in-nomi-city-ishikawa-by-kengo-kuma-associates/>,
diunduh Juli 2022

Kengo Kuma bertindak sebagai arsitek bangunan ini menanggapi intensi owner dengan desain retrofitting yang unik. Bangunan berbentuk kotak 3 lantai tidak diubah bentuknya, sedangkan untuk retrofitting terhadap gempa bumi, Kuma memilih kabel serat karbon termoplastik komposit (*composite thermoplastic carbon fibres*) yang mempunyai kekuatan tarik sangat besar dibanding dengan beratnya¹ sebagai material penguat terhadap gempa bumi. Kabel serat karbon tersebut disusun berderet membentuk tirai tembus pandang yang melingkupi seluruh bangunan sehingga sangat kuat mengekspresikan intensi owner (Gambar 142b, 142c).

Ide *retrofitting* bangunan ini menunjukkan kreativitas arsiteknya, di mana dia dapat memanfaatkan *retrofitting* terhadap gempa bumi untuk menampilkan ekspresi bangunan yang diharapkan oleh ownernya. Selain itu, penggunaan serat karbon komposit ini sangat efisien secara struktural (berat material minimal, kapasitas dukung maksimal) dan diklaim penggunaannya untuk *retrofitting* adalah yang pertama di dunia.



Gambar 142b. Bangunan Fa-bo Sesudah Retrofit

<https://www.designboom.com/architecture/kengo-kuma-earthquake-resistant-komatsu-sirenen-fabric-laboratory-fa-bo-japan-04-06-2016/>, diunduh Januari 2022

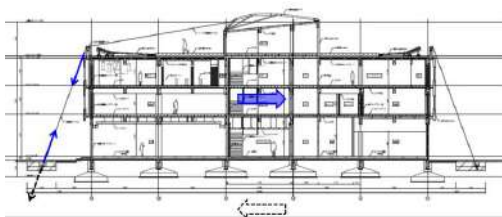
¹Serat karbon mempunyai kekutan tarik 5 kali lebih besar dan kekakuan 2 kali lebih besar daripada baja bila ditinjau dari ratio kekuatan dibanding beratnya. Berat serat karbon dibanding baja adalah adalah sekitar 1:5 (Fabio Ardito, 2021,<https://loneartisan.com/carbon-fiber-and-composites/carbon-fiber-is-stronger-than-steel-but-not-always/>)



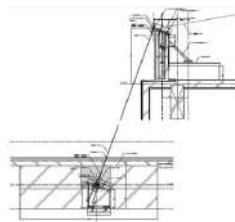
Gambar 142c. Carbon Fiber Cable

<https://www.spoon-tamago.com/2016/01/05/fa-bo-the-earthquake-resistant-office-grounded-with-hundred-of-carbon-fibres/>, diunduh Januari 2022

Kabel serat karbon tersebut dipasang membentuk sudut terhadap garis horisontal menghubungkan puncak bangunan dengan tanah dan dijangkar ke dalam tanah serta disusun melingkupi 3 bidang bangunan, yaitu sisi bangunan yang tidak menempel pada bangunan lain (Gambar 142f). Kabel serat karbon tersebut dimanfaatkan sebagai *bracing* tarik memanfaatkan kekuatan tariknya yang besar. Oleh karena itu, bekerjanya kabel-kabel tersebut sangat dipengaruhi oleh arah gaya lateral, bila gaya lateral bekerja dari arah kiri, maka kabel serat karbon yang bekerja adalah yang berada di sebelah kiri, sedangkan yang di sebelah kanan tidak bekerja karena mengalami tekan (Gambar 142d dan 142e). Menurut Wright (2016), penguatan yang pada bangunan ini tidak hanya memanfaatkan tirai serat karbon saja, tetapi juga lebih dari 20 buah *bracing* di dalam bangunan dan di fasad bangunan yang terbuat dari batang serat karbon di lantai 2 dan lantai 3, selain itu dari gambar nampak di lantai 1 dan sebagian lantai 2 dan 3 sudah ada *shear wall* eksisting (Gambar 142g). Tirai serat karbon memberikan penguatan sebesar 3%, sedangkan *bracing* di dalam bangunan memberikan penguatan sebesar 10%.



Gambar 142d.
Potongan dan Kinerja Kabel Fa-bo



Gambar 142e.
Potongan Detail Pemasangan Kabel Fa-bo



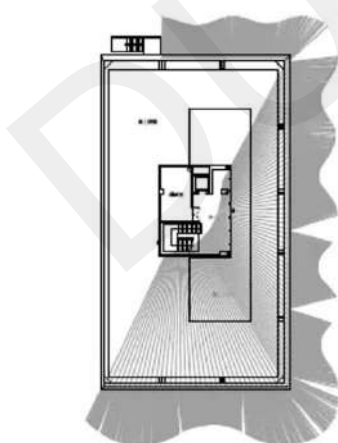
***Gambar 142f.**
Denah Fa-bo Lantai 1



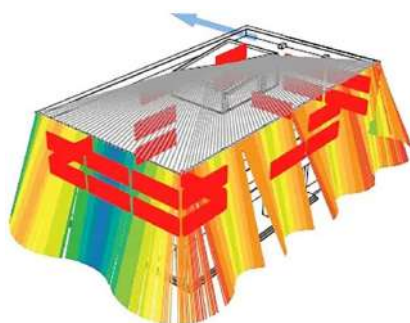
Gambar 142g.
Denah Fa-bo Lantai 2



Gambar 142h.
Denah Fa-bo Lantai 3



***Gambar 142i.**
Denah Atap Fa-bo dan Tirai Serat Karbon
Sumber Gambar 142d s.d 142j: <https://architizer.com/projects/fa-bo/>,
diunduh April 2022



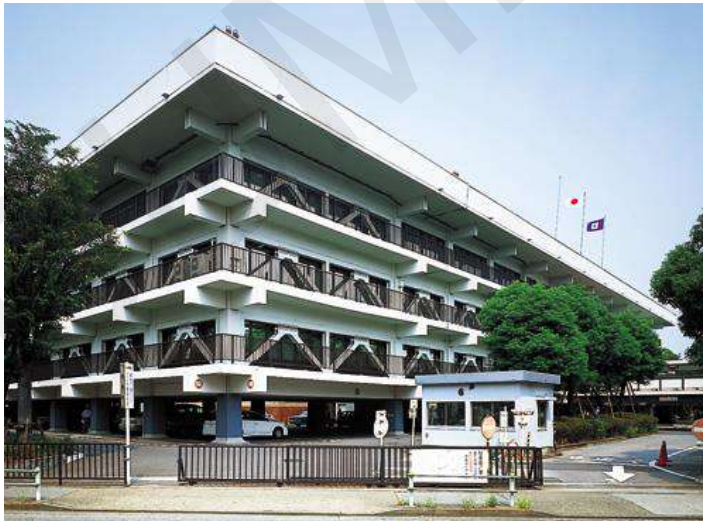
Gambar 142j. Skema Kinerja dan Penataan
Bracing dan Tirai Serat Karbon Fa-bo

3. Contoh Lain Pengaruh Retrofitting pada Tampilan Arsitektur



Gambar 143. Tioga Building

R. Gary Black, Abolhassan Astaneh-Asl, 2013 <https://zenodo.org/record/1090982#.Yr1CIHZ>,
diunduh Juni 2022Bw2w, diunduh Juni 2022



Gambar 144. Katsushika Ward Office Sesudah Retroffit

https://www.kajima.co.jp/english/tech/seishin_menshin_e/ex/hds_01/index.html,
diunduh Juli 2022



Gambar 145. Tampilan Eksterior Bangunan Sekolah di Vibo Valentia Italia Setelah Retrofit

<https://www.hindawi.com/journals/mpe/2018/5364564/>, diunduh Juli 2022

Tidak semua retrofit seismik yang diekspos menghasilkan ekspresi arsitektural yang menarik. Dari contoh-contoh di atas, retrofit seismik yang menarik adalah Tiago Building, di mana *bracing* didesain dengan kreatif sehingga menghasilkan tampilan yang unik, dan secara teknis telah dipertimbangkan yang paling optimal (dibahas dalam retrofit seismik hlm. 209); serta Fa-bo yang memanfaatkan retrofitting untuk mengubah ekspresi arsitektur yang dapat mengakomodasi intensi owner.

D. Tampilan Arsitektur dan Detail Elemen Struktural

Detail konstruksi dan elemen konstruksi bangunan bersifat teknis, namun dapat ditampilkan secara estetis. Hal tersebut dapat dilihat pada beberapa contoh berikut.

- Detail konstruksi tumpuan *external bracing* pada gedung parkir Berkeley (Gambar 146) ditampilkan dengan tumpuan sendi yang menampilkan karakter sendi sebenarnya. Eksternal *bracing* pada Gedung parkir Berkeley diekspos dengan warna yang mencolok dan menampilkan detail konstruksi yang mengekspos arah gaya pada tumpuannya.

- Bentuk *bracing* yang unik pada CEC Tower dan detail konstruksi ujung *bracing* tersebut diberi rib-rib pengaku untuk menahan gaya-gaya yang bekerja seperti diuraikan sebelumnya memberikan tampilan arsitektur yang unik (Gambar 147).
- Detail konstruksi kepala kolom beton bertulang Gedung-P U.K. Petra dibuat berbentuk cincin. Detail tersebut merupakan detail “sendi plastis” yang didesain untuk memastikan sendi plastis tidak terjadi di kolom (Gambar 148).
- Elemen *bracing* pada bangunan Washington County’s Law Enforcement Center (Gambar 149) merupakan elemen tambahan ketika perlu dilakukan retrofit pada bangunan tersebut. Bentuk *bracing* didesain dengan bentuk yang cukup unik dengan harapan tampak menyatu dengan keseluruhan bangunan. Pertemuan batang diagonal dengan pelat buhul dibentuk melengkung sehingga tampak lebih lembut.
- Detail pertemuan kolom-balok yang mengekspos detail penulangan sendi plastis dengan stub yang ditonjolkan (Gambar 150, lihat Gambar 63b Bab 4).
- *Base-isolation* bisa diekspos, diletakkan di kolom dan dapat didetail dengan menarik (Gambar 151).



Gambar 146. *External Bracing* pada Gedung Parkir Berkeley

https://www.wikiwand.com/en/Seismic_retrofit, diunduh Juni 2011



Gambar 147. Detail Bracing CEC Tower Taipei

[//www.krisyaoartech.com/en/projects/corporate/Continental-Engineering-Corporation-Headquarters](http://www.krisyaoartech.com/en/projects/corporate/Continental-Engineering-Corporation-Headquarters), diunduh Juli 2022



Gambar 148. Kepala Kolom Gedung P U.K.Petra, Surabaya

Sumber: (Dokumen pribadi)



Gambar 149. Washington County's Law Enforcement Center

<https://www.seradesign.com/2018/03/braced-for-safety-washington-countys-law-enforcement-center/>, diunduh Januari 2022



Gambar 150.
Detail Pertemuan
Kolom-Balok

Sumber: (Charleson, 2008)



Gambar 151.
Detail *Base-Isolation*

<http://kerabatrumah.blogspot.com/2016/01/base-isolation.html>

DUMMY

DAFTAR PUSTAKA

- Arnold, Christopher. 1982. *Building Configuration and Seismic Design*. New York: Wiley & Sons Incorporated.
- Arnold, Christopher. 2006. *Earthquake effects on buildings*. Dalam *designing for earthquakes a manual for architects*, FEMA 454/December 2006 (ch. 4, ch. 5). https://archexamacademy.com/download/Structural%20Systems/structures%20university/fema454_complete.pdf, diunduh Desember 2020.
- Alehashem, Seyed Masoud Sajjadi; Keyhani, Ali; dan Pourmohammad, Hassan (2008). *Behavior and Performance of Structures Equipped With ADAS & TADAS Dampers (a Comparison with Conventional Structures)*. The 14 th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14_S25-003.PDF, diunduh Juni 2022.
- Badan Standardisasi Nasional – BSN. *Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung*. SSNI 03 – 1726 – 2002.
- Black, R. Gary and Astaneh-Asl, Abolhassan. 2014. *Design of Seismically Resistant Tree-Branching Steel Frames Using Theory and Design Guides for Eccentrically Braced Frames*. <https://zenodo.org/record/1090982#.YrnEdH2Bw2w>, diunduh April 2022.
- Belen, Garcia. 2001. *Earthquake Architecture*. New York: Watson-Guption Publications.

- Bertero Vitelmo V., Bozorgnia, Yousef, 2004. *The Early Years of Earthquake Engineering and Its Modern Goal*. Dalam Bozorgnia, Yousef & Bertero, Vitelmo V. (Eds). *Earthquake Engineering from Engineering Seismology to Performance-Based Engineering* (ch 1-1 s.d. 1-5). New York Washington, D.C: CRC Press.
- Bruneau, Michel, 2005. *Seismic Retrofit of Steel Structure*. 1st Canadian Conference on Effective Design of Structures McMaster University Hamilton, Ontario, Canada July 10 – 13, 2005. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.571.5615&rep=rep1&type=pdf>, diunduh Juli 2022.
- Chang, King-Le; Jin, Limin; Zekioglu, Atila. 1999. “Resisting seismic forces: the CEC building, Taiwan”. *THE ARUP JOURNAL* Vol 34 No3/1999, hal. 18-20. <https://www.scribd.com/document/490703525/The-Arup-Journal-Issue-3-1999>.
- Cuadra, Carlos; Karkee, Madan B.; Ogawa, Junji; Rojas, Julio. *An evaluation of earthquake risk to inca’s historical constructions*. 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 1-6, 2004 Paper No. 150 <https://pdfs.semanticscholar.org/0578/92d44e45983dcaa9527fcef6ede181616e02.pdf>, diunduh Juli 2019.
- Depatemen Pekerjaan Umum, Ditjen Ciptakarya, Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan. *Buku Pedoman Perencanaan untuk Struktur Beton Bertulang Biasa dan Struktur Tembok Bertulang untuk Gedung*. Bandung: DPMB, 1981.
- FEMA 350/June, 2000. *Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame*. <https://www.nehrp.gov/pdf/fema350.pdf>, diunduh April 2021.
- Fussell; A.J.; Cowie, K.A.; Clifton, G.C.; Mago, N. 2014. *Development and research of eccentrically braced frames with replaceable active links*. 2014 NZSEE Conference.
- Hamburger, Ronald O.; Krawinkler, Helmut, Malley, James O., Adan Scott M. 2009. *Seismic Design of Steel Special Moment Frames: A Guide for Practicing Engineers*, NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 2., NIST GCR 09-917-3.

- Haris, Sunansyah; Yulita, Eryani Nurma. 2018. "Prinsip Struktur Rumah Srotong Suku Samin sebagai Dasar Perancangan Rumah Tinggal Tahan Gempa". *Jurnal Mahasiswa Jurusan Arsitektur*, vol. 06 no. 02.
- Hongxing, Xu Minggang Qiu. 2008. *Analysis of seismic characteristics of Chinese ancient timber structure*. The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China. http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14_05-04-0113.PDF, diunduh Juli/2019.
- Ichsan, Mohammad. 2018. "Bracing sebagai Teknologi Kontrol Seismik pada Rumah Tradisional Sumatra". *Jurnal CESD*, Vol. 01 no. 02 Desember 2018.
- Johnson, Andrew. 2015. *8-chifley-sustainable structural and fire engineering* <https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/2524-8-chifley-sustainable-structural-and-fire-engineering.pdf>, diunduh Maret 2022.
- Karlovic, Alen. 2017. *Shinbashira—pagoda's exceptional earthquake resistance*. <https://medium.com/konsiteo-today/shinbashira-pagodas-exceptional-earthquake-resistance-9d7e3eac1d6d>, diunduh Juli 2019.
- Kelly, James M. 2004. "Seismic Isolation". Dalam Borzognia, Yousef & Bertero, Vitelmo V. (Eds). *Earthquake Engineering from Engineering Seismology to Performance-based Engineering* (ch 11-1 s.d. 11-6), New York Washington, D.C: CRC Press.
- Lehmann, Izquierdo, 1997. *Manantiales Building*. <https://www.archdaily.com/342695/flashback-manantiales-building-izquierdo-lehmann-arquitectos>, diunduh Mei 2022.
- Maer, Bisatya Widadya, Lumantarna, Benyamin; Laurence, Joyce Marcella. 2010. *Penataan Elemen Struktur untuk Menyederhanakan Perilaku Bangunan dengan Studi Kasus Intiland Tower Jakarta*. Program studi S2 Universitas Kristen Petra.
- Maer, Bisatya Widadya & Pudjisuryadi, Pamuda. 2015. "SANTEN-fuse as an earthquake damper for pendopo joglo". *Dimensi*, 42 (1). pp. 1-8.

- Melkumyan, Mikayel, Mihul Valentin, Gevorgyan Emm. 2011. *Retrofitting by base isolation of existing buildings in armenia and in romania and comparative analysis of innovative vs. Conventional retrofitting*. COMPDYN 2011 III ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering M. Papadrakakis, M. Fragiadakis, V. Plevris (eds.) Corfu, Greece, 26–28 May 2011. <https://www.researchgate.net/publication/324138538>, diunduh Mei 2022.
- Minggang, Xu & Hongxing, Qiu. 2008. *Analysis of seismic characteristics of chinese ancient timber structure*. The 14 th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China. https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14_05-04-0113.PDF, diunduh Juni 2022.
- Naeimi, S.; Shahmari, A.; H. Kalehsar, Eimani. *Study of the Behavior of Zipper Braced Frames*.15 WCEE, Lisboa 2012. https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_5325.pdf
- Oliveto, Giuseppe and Marletta, Massimo. 2005. “Seismic Retrofitting Strategies of Reinforced Concrete Buildings“. *ISET Journal of Earthquake Technology*, Paper No. 454, Vol. 42, No. 2-3, June-September 2005, pp. 21-46. <http://home.iitk.ac.in/~vinaykg/Iset454.pdf>, diunduh Juni 2022.
- Skinner, R.; Robinson W.H.; Mc Verry,G.H. 1993. *An Introduction to Seismic Isolation*. John Willey & Sons, England.
- SNI-1726-2001. Standar perencanaan tahan gempa untuk gedung 2022. Departemen permukiman dan prasarana wilayah, PUSKIM, Bandung <http://sipil.upi.edu/wp-content/uploads/2016/11/SNI-03-1726-2002-STD-PERC-KETAHANAN-GEMPA-STR-BANG-GEDUNG.pdf>, diunduh Juli 2022.
- SNI-1726-2012. Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung <http://staff.uny.ac.id/sites/default/files/pendidikan/dr-slamet-widodo-st-mt/sni-1726-2012.pdf>, diunduh Juli 2022.

- Uang, Chia-Ming; Nakashima, Masayoshi. 2004. *Steel buckling restrained braced frame*. Dalam Borzognia, Yousef & Bertero, Vitelmo V. (Eds). *Earthquake Engineering from Engineering Seismology to Performance-based Engineering* (ch 16-1 s.d. 16-4). New York Washington, D.C: CRC Press.
- Wada, Akira; Huang Yihua, and Bertero Vitelmo V. 2004. *Innovative Strategies in Earthquake Engineering*. Dalam Borzognia, Yousef & Bertero, Vitelmo V. (Eds). *Earthquake Engineering from Engineering Seismology to Performance-based Engineering*. New York Washington, D.C: CRC Press.
- Wilckok, Tom; Easton, Marc; Algaard, William; Tavelaro, Tabitha. *Grade of office space in mexico city: tight site and shaky ground*. <https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/2445-grade-a-office-space-in-mexico-city-tight-sites-and-shaky-ground.pdf>
- Wenk, Thomas, 2008. *Seismic retrofitting of structures strategies and collection of examples in Switzerland*. <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/152142/eth-1643-01.pdf>, diunduh Juni 2022.
- Wright, Bruce N., 2016. Textile fibers reinforced a building. <https://fabricarchitecturemag.com/2016/08/30/textile-fibers-reinforce-a-building/>, diunduh April 2022.
- Xiao, Nan. 2017. *Seismic mechanism analysis of chinese ancient buildings*. Advanced Materials Research, Online: 2011-05-17.
- Xia, Chuan dan Hanson, Robert D. 1992 Influence of ADAS element parameters on building seismic response http://prof.khuisf.ac.ir/images/Uploaded_files/1_ADAS%5B4013707%5D.PDF, diunduh Juni 2022.
- Yu, Qi-Song and Uang, Chia-Ming. 2000. *Cyclic performance and retrofit design of pre-northridge steel moment connection with welded haunch*. 12 World Conference on Earthquake Engineering (WCEE) 2000. <https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/0660.pdf>, diunduh Mei 2022.

Tambahkan
di sini -->

DUMMY

LAMPIRAN

1. Skala Magnitudo Richter

Richter scale of earthquake magnitude			
magnitude level	category	effects	earthquakes per year
less than 1.0 to 2.9	micro	generally not felt by people, though recorded on local instruments	more than 100,000
3.0–3.9	minor	felt by many people; no damage	12,000–100,000
4.0–4.9	light	felt by all; minor breakage of objects	2,000–12,000
5.0–5.9	moderate	some damage to weak structures	200–2,000
6.0–6.9	strong	moderate damage in populated areas	20–200
7.0–7.9	major	serious damage over large areas; loss of life	3–20
8.0 and higher	great	severe destruction and loss of life over large areas	fewer than 3

Lampiran 1. Skala Magnitudo Richter

<https://www.britannica.com/science/Richter-scale>, diunduh November 2022

2. Skala Intensitas Modified Mercalli

Intensity	Witness Perceptions and Damage
I	Felt by very few people; barely noticeable.
II	Felt by a few people, especially on upper floors.
III	Noticeable indoors, especially on upper floors, but may not be recognized as an earthquake.
IV	Felt by many indoors, few outdoors. May feel like heavy truck passing by.
V	Felt by almost everyone, some people awakened. Small objects moved. Trees and poles may shake.
VI	Felt by everyone. Difficult to stand. Some heavy furniture moved, some plaster falls. Chimneys may be slightly damaged.
VII	Slight to moderate damage in well built, ordinary structures. Considerable damage to poorly built structures. Some walls may fall.
VIII	Little damage in specially built structures. Considerable damage to ordinary buildings, severe damage to poorly built structures. Some walls collapse.
IX	Considerable damage to specially built structures, buildings shifted off foundations. Ground cracked noticeably. Wholesale destruction. Landslides.
X	Most masonry and frame structures and their foundations destroyed. Ground badly cracked. Landslides. Wholesale destruction.
XI	Total damage. Few, if any, structures standing. Bridges destroyed. Wide cracks in ground. Waves seen on ground.
XII	Total damage. Waves seen on ground. Objects thrown up into air.

Lampiran 2. Skala Intensitas Modified Mercalli

<https://www.mtu.edu/geo/community/seismology/learn/earthquake-measure/intensity/>, diunduh November 2022

DUMMY

BIODATA PENULIS

Bisatya W. Maer lahir di Surabaya pada tahun 1949. Pada tahun 1976 menerima gelar Insinyur dari Fakultas Teknik Arsitektur Institut Teknologi 10 November Surabaya, pada tahun 2010 menerima gelar Magister Teknik dari Program Pascasarjana Universitas Kristen Petra, Surabaya.

Karier sebagai dosen di Jurusan Teknik Arsitektur Universitas Kristen Petra Surabaya dimulai sejak tahun 1980 hingga sekarang sebagai dosen, pernah mengampu mata kuliah Merancang di semester 2 dan semester 7, Struktur Bangunan bertingkat tinggi, Struktur Bangunan bentang lebar, dan belakangan mengampu Struktur Bangunan bertingkat rendah, Struktur Bangunan bertingkat menengah, Bentuk-Struktur-Material dan mata kuliah pilihan Teknologi Gempa dalam Arsitektur. Posisi akademik saat ini adalah Lektor pada Program Studi Arsitektur Universitas Kristen Petra, Surabaya, Indonesia. Memublikasikan beberapa tulisan di Jurnal Nasional. Di bidang Administrasi Universitas pernah menjabat sebagai Ketua Jurusan Arsitektur dan Kepala Bidang Struktur Bangunan. Di bidang profesional pernah mendesain dan melaksanakan pembangunan beberapa bangunan seperti kantor, sekolah, rumah tinggal, resor, kolam renang, serta renovasi bangunan gereja.

