

Bangunan Aman Gempa

Rangkaian Artikel Pengetahuan untuk Meningkatkan
Keamanan Bangunan terhadap Gempa

Andrew Charleson

Februari 2024

World Housing Encyclopedia, EERI

AARGI



Bangunan Aman Gempa

Rangkaian Artikel Pengetahuan untuk Meningkatkan
Keamanan Bangunan terhadap Gempa

Edisi Bahasa Indonesia

Penyunting:

Dyah Kusumastuti
Rildova

Penerjemah:

Abdul Hakam
Aris Aryanto
Erwin Lim
Hanafiah
Helmy Hermawan Tjahjanto
Hery Riyanto
I Gde Susila
Iman Satyarno
Ivan Sandi Darma
Krishna S. Pribadi
Muhammad Riyansyah
Patria Kusumaningrum
Prasanti Widyasih Sarli
Rijalul Fikri
Siti Aisyah Nurjannah
Tavio
Wayan Sengara
Wisena Perceka
Wivia Octarena Nugroho

Februari 2024

World Housing Encyclopedia, EERI

Asosiasi Ahli Rekayasa Kegempaan Indonesia (AARGI)

Publikasi ini pertama kali diterbitkan pada tahun 2022 oleh Earthquake Engineering Research Institute (EERI). EERI adalah organisasi nirlaba terkemuka yang ditujukan untuk mendalami risiko gempa dan meningkatkan ketahanan gempa pada masyarakat di seluruh dunia.

Publikasi ini ditulis dan diterjemahkan oleh sukarelawan, yang semuanya berpartisipasi di EERI dan proyek World Housing Encyclopedia dari International Association for Earthquake Engineering (IAEE).

Pendapat, temuan, kesimpulan, atau rekomendasi apapun yang disampaikan adalah milik penulis dan tidak mencerminkan pandangan organisasi manapun.

Tulisan asli dari publikasi ini yang berbahasa Inggris dapat diunduh di situs World Housing Encyclopedia pada <http://www.world-housing.net/>.

Publikasi ini dimaksudkan untuk diterjemahkan dalam berbagai bahasa dan dapat disesuaikan dengan kondisi masing-masing negara, dengan merujuk kepada EERI dan menghilangkan logo EERI. Izin dari penerbit untuk menyebarkan sebagian atau seluruh publikasi ini tidak diperlukan.

Ucapan Terima Kasih

Dokumen ini dikembangkan dan diterjemahkan oleh tim ahli internasional dari proyek World Housing Encyclopedia, yang menyumbangkan waktu dan pengetahuan mereka. Masukan dari pengulas berikut sangat dihargai: Svetlana Brzev, Marjorie Greene, Shannon Spiers, Dustin Cook, Lars Abrahamczyk dan Rezi Imani. Terima kasih kepada Brijhette Farmer yang telah menggambar berbagai diagram. Kecuali disebutkan lain, semua foto diambil oleh Andrew Charleson.

Tentang World Housing Encyclopedia

World Housing Encyclopedia (WHE) adalah ensiklopedia konstruksi perumahan di daerah seismik aktif di dunia, yang diselenggarakan oleh EERI dan IAEE. Tujuan dari WHE adalah untuk:

- Menyebarkan pengetahuan dalam praktik konstruksi perumahan yang baik
- Mendorong penggunaan teknologi tahan gempa
- Mengembangkan pedoman teknis untuk meningkatkan kualitas konstruksi terhadap gempa
- Memberikan layanan dan bantuan teknis kepada komunitas di seluruh dunia mengenai teknologi perumahan tahan gempa

Tentang Edisi Bahasa Indonesia

Publikasi ini dikembangkan dan diterjemahkan berdasarkan tulisan aslinya oleh Asosiasi Ahli Rekayasa Kegempaan Indonesia (AARGI) yang didukung oleh pakar-pakar di bidangnya.

Bab 6 merupakan tambahan yang dimaksudkan untuk menjawab permasalahan bangunan rumah yang ada di Indonesia, khususnya terkait dinding bata.

Daftar Isi

1. Gempa Bumi dan Bangunan
2. Menghindari Masalah Tanah dan Fondasi saat Gempa Bumi
3. Tiga Sistem Struktur Penahan Gempa
4. Mengapa Dinding Merupakan Elemen Struktur Penahan Gempa Terbaik?
5. Apakah Dinding Bangunan Bermanfaat Ketika Terjadi Gempa?
6. Dinding Bata Terkekang dan Pengaruhnya pada Bangunan Saat Gempa
7. Bagaimana Cara Kerja Bangunan dengan Sistem Rangka Kolom dan Balok Beton Bertulang Saat Terjadi Gempa Bumi?
8. Prinsip Bangunan Bata Aman Gempa
9. Mengikat Komponen Bangunan Menjadi Satu Untuk Menahan Gempa
10. Kearifan Lokal dan Keamanan Bangunan terhadap Gempa Bumi
11. Dinding Pengisi dan Pengaruhnya pada Bangunan Saat Gempa
12. Tingkat Lunak (Soft Story): Kelemahan Struktur yang Harus Dihindari
13. Dinding Tak Menerus: Kelemahan Struktur yang Harus Dihindari
14. Kolom Pendek: Kelemahan Struktur yang Harus Dihindari
15. Mencegah Puntir pada Bangunan Saat Gempa
16. Mengapa Bangunan Saling Berbenturan Saat Gempa Bumi
17. Peraturan dan Standar Konstruksi
18. Apa yang Perlu Diperhatikan dalam Peraturan Bangunan
19. Apa yang Diharapkan dari Bangunan yang Dirancang Berdasarkan Peraturan
20. Pentingnya Pemeriksaan Saat Merancang Bangunan
21. Pentingnya Pemeriksaan Saat Pelaksanaan Konstruksi Bangunan
22. Mencegah Kerusakan Komponen Nonstruktural
23. Perkuatan Bangunan Terhadap Gempa Bumi
24. Teknologi Lanjut untuk Bangunan Aman Gempa
25. Perencanaan Wilayah and Keamanan Gempa
26. Tsunami dan Bangunan

Pengantar

Kebutuhan akan publikasi ini dirasakan setelah survei tahun 2019 terhadap para pemangku kepentingan di bidang industri konstruksi di Yogyakarta, Indonesia. Seratus empat puluh insinyur, arsitek, kontraktor, dan pemilik bangunan diminta untuk memberikan saran terkait perubahan yang dapat dilakukan oleh dinas bangunan untuk meningkatkan keamanan bangunan terhadap gempa bumi. Saran yang paling banyak adalah dinas bangunan harus berperan lebih besar dalam mengedukasi masyarakat. Responden menyatakan bahwa informasi mengenai bahaya gempa bumi serta pengaruhnya pada bangunan, dan peraturan terkait keamanan bangunan harus tersedia untuk semua pihak.

Publikasi ini awalnya ditulis untuk berbagai pihak di industri konstruksi serta masyarakat umum di Bandung, dimana penulis pernah cukup lama tinggal di sana. Meskipun bersifat khusus, tetapi tulisan ini juga dimaksudkan untuk menjadi kerangka. Tujuannya agar publikasi ini dapat disesuaikan dengan kondisi setempat, termasuk bahan dan metode konstruksi. Sehingga, jika diperlukan, dapat diterjemahkan ke dalam bahasa setempat, untuk berbagai wilayah di dunia yang terkena dampak gempa bumi.

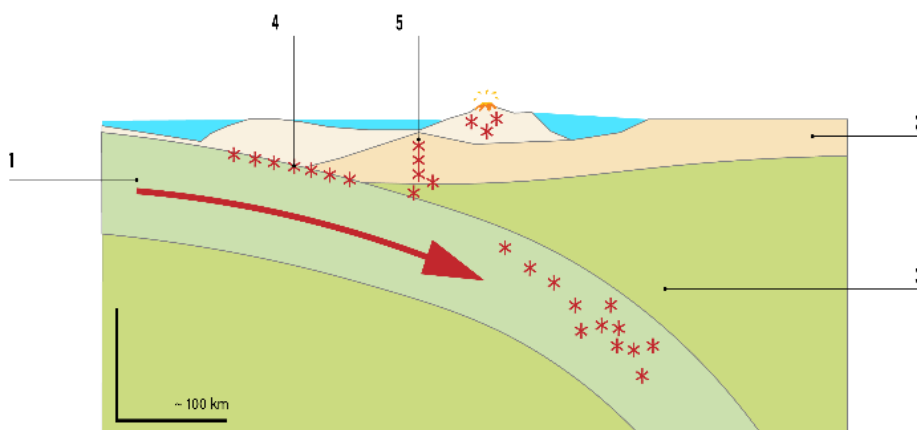
Setelah mengembangkan publikasi ini, World Housing Encyclopedia mencari mitra di negara berkembang untuk menerjemahkan, menyunting, dan menyebarkan. Mitra harus memiliki keinginan untuk meningkatkan keamanan bangunan terhadap gempa, berpengalaman dalam desain bangunan tahan gempa, bereputasi tinggi, dihormati di lingkungannya, dan memiliki pengaruh pada industri konstruksi setempat. Setelah menerjemahkan, menyunting, dan mengembangkan relevansi lokal, mitra dapat menyebarkan tulisan ini.

Salah satu mitra strategis yang diharapkan adalah dinas bangunan setempat. Idealnya, dinas bangunan menyebarkan publikasi versi lokal ini melalui situs webnya, dan menyediakan edisi cetak untuk pihak yang mengajukan izin bangunan serta masyarakat umum. Mitra alternatif adalah kementerian terkait, asosiasi kegempaan nasional, akademisi, atau konsultan teknik terkemuka. Masukan mitra dalam publikasi versi lokal akan diakui, dan akan meningkatkan profil mitra. Mitra dapat juga menawarkan untuk menjawab pertanyaan yang muncul dari publikasi tersebut.

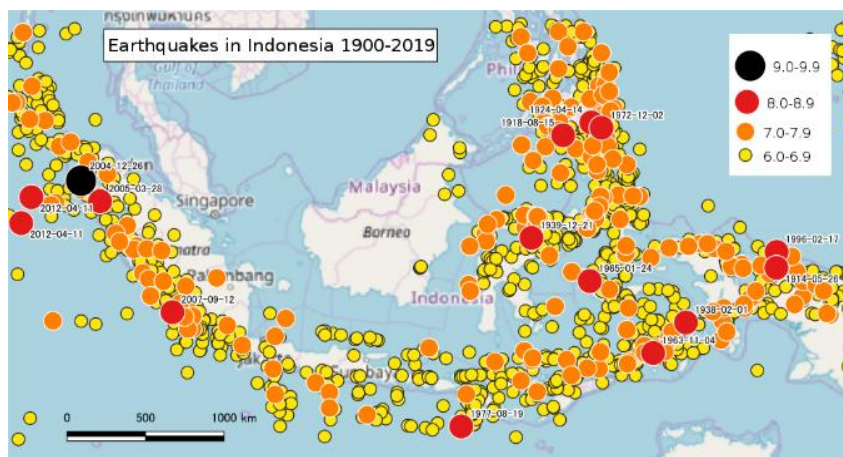
Selain mengunggah publikasi di situs web dan atau mencetak publikasi ini, metode penyebaran lain juga dimungkinkan. Misalnya, tulisan ini dapat diterbitkan sebagai rangkaian artikel surat kabar atau majalah, seperti majalah yang dibaca oleh para pihak di bidang industri konstruksi serta pemilik bangunan. Tulisan ini juga dapat dipromosikan ke lembaga pendidikan profesional dan pelatihan konstruksi yang sesuai.

1. Gempa Bumi dan Bangunan

Banyaknya gunung api di Indonesia yang membentang dari Sumatra hingga Nusa Tenggara dan Sulawesi hingga Papua mengingatkan bahwa kita hidup di wilayah cincin api (*rings of fire*). Selain rawan terhadap erupsi gunung api, masyarakat Indonesia juga hidup di tepi lempeng tektoknik yang terus bergerak. Pergerakan lempeng ini menyebabkan satu lempeng “masuk” ke bawah lempeng yang lain, yang disebut “subduksi”. Contoh pergerakan lempeng di wilayah Indonesia terlihat pada Gambar 1, dimana lempeng Australia bergerak ke bawah lempeng Eurasia di bawah pulau Sumatra. Pergerakan lempeng ini terjadi perlahan-lahan, dan tidak selalu mulus. Ada kalanya, pergerakan ini terhambat dan tegangan terakumulasi. Keruntuhan batuan pada pertemuan lempeng akan menyebabkan pergerakan yang mendadak dan melepaskan akumulasi tegangan dan energi. Inilah yang menyebabkan terjadinya gempa bumi. Gempa bumi dapat juga disebabkan oleh pergerakan yang terjadi di dalam lempeng itu sendiri, dimana jalur pergerakan ini dikenal sebagai sesar. Gambar 2 menunjukkan lokasi dan besar gempa bumi yang pernah terjadi di Indonesia antara tahun 1900-2019.



Gambar 1. Penampang lapisan bumi yang menunjukkan lempeng pertama (1) bergerak subduksi ke bawah lempeng lainnya (2) di atas lapisan mantel (3). Gempa bumi dapat disebabkan oleh pergerakan di tepi lempeng (4) atau di sepanjang sesar (5).



Gambar 2. Gempa besar di Indonesia, yang dikelompokkan sesuai dengan magnitudo atau energi yang dilepaskan (sumber: Wikipedia).

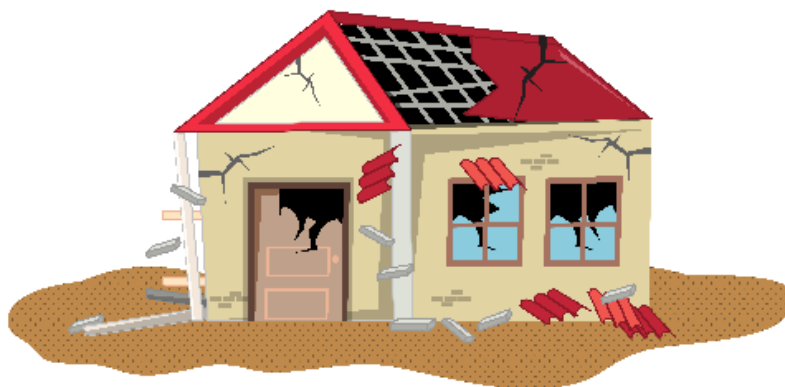
Sebagian besar daerah di Indonesia yang sering mengalami gempa bumi berada di tepi lempeng tektonik, tetapi ada juga daerah lain yang mengalami gempa akibat sesar lokal, seperti di kawasan Bandung dan sekitarnya. Sesar Lembang membentang dari Timur ke Barat antara Bandung Utara dan Lembang (Gambar 3). Penelitian menunjukkan terdapat peluang terjadi gempa yang cukup kuat dari sesar ini yang dapat merusak dan meruntuhkan bangunan di sekitarnya.



Gambar 3. Sesar Lembang di dekat Kota Bandung (Direktorat Geologi Bandung)

Saat gempa bumi, tanah bergerak cepat ke segala arah. Pergerakan tanah saat gempa besar dapat menyebabkan kita sulit berdiri dengan stabil. Tanah juga dapat terpengaruh guncangan ini, sehingga timbul longsor, dan likuifaksi (dimana tanah berubah perilakunya menjadi cair). Tetapi, umumnya yang paling terkena dampak gempa adalah bangunan tempat kita tinggal dan bekerja setiap hari.

Bangunan bergetar, bergoyang kiri-kanan saat terjadi gempa. Lantai atas bangunan akan bergoyang lebih jauh daripada lantai di bawahnya, dan bangunan terdistorsi. Sama seperti ketika kita berdiri dan seseorang mendorong kita dari belakang. Kepala dan bahu akan bergerak lebih jauh daripada kaki. Otot-otot di kaki akan bekerja keras untuk menjaga kita supaya tidak jatuh. Hal ini mirip dengan apa yang dialami bangunan saat gempa. Akibat gerakan bangunan, akan terjadi tegangan yang sangat besar pada elemen bangunan seperti kolom, balok, dan dinding, sehingga dapat terjadi kerusakan (Gambar 4). Kolom dan dinding adalah elemen yang paling rentan. Apabila kolom atau dinding rusak, bangunan dapat roboh. Kita, keluarga, teman, atau penghuni lainnya, dapat menjadi korban.



Gambar 4. Bangunan yang rusak akibat gempa

Untungnya, merancang dan membangun bangunan tahan gempa tidak terlalu sulit dan tidak juga mahal. Kerusakan bangunan akibat gempa dapat dicegah! Buku ini akan menjelaskan caranya dengan lebih rinci pada bab-bab selanjutnya. Kita hanya perlu memperbaiki praktek konstruksi dengan menerapkan prinsip-prinsip yang sudah dikenal dan terbukti berhasil. Inilah cara kita menjaga diri kita, keluarga, dan saudara-saudara kita dari bencana akibat gempa.

Meskipun daerah kita bukan merupakan daerah yang kegempaanannya paling aktif, tetapi peluang terjadinya gempa bumi yang dapat merusak bangunan relatif tinggi. Bangunan aman gempa dapat diperoleh, namun harus diusahakan dengan sungguh-sungguh.

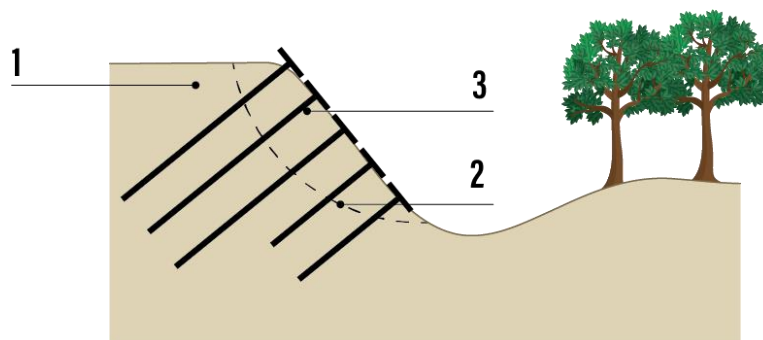
Daftar Pustaka

Daryono, M. R., Natawidjaja, D. H., Sapiie, B., and Cummins, P., 2019. Earthquake Geology of the Lembang Fault, West Java, Indonesia, *Tectonophysics*, Volume 751, 20 January, pp. 180-191.

2. Menghindari Masalah Tanah dan Fondasi saat Gempa Bumi

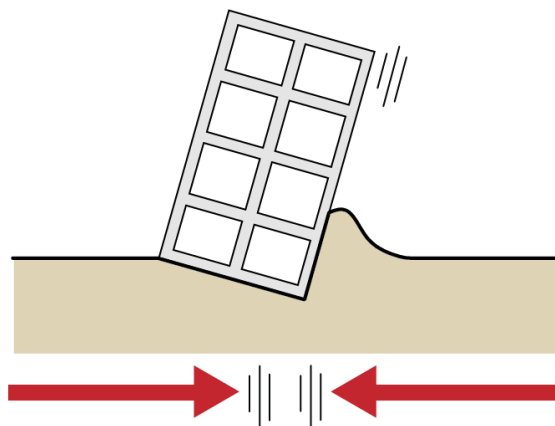
Idealnya, kita menginginkan rumah atau bangunan yang kita huni berdiri di atas batuan yang kokoh. Dengan begitu, kita dapat menghindari kegagalan tanah yang serius yang dapat merusak bangunan. Selama terjadinya gempa bumi, tanah dapat berperilaku tak terduga dan bahkan membahayakan bangunan.

Bahaya yang mungkin paling tampak adalah pada daerah lereng yang curam. Daerah ini rentan terhadap runtuh batuan dan tanah longsor, yang dapat menghancurkan bangunan dan isinya. Umumnya, rekayasa sipil dapat menjadi solusi untuk mencegah masalah tersebut. Misalnya, saluran air permukaan dapat mencegah air hujan meresap dan melunakkan tanah, dan menghindari kemungkinan longsor. Stabilisasi aktif lereng dapat juga dilakukan dengan cara membuat lubang bor panjang dan memasang 'angkur tanah' untuk mencegah terjadinya gelincir. Gambar 1 memberikan ilustrasi metode ini, yang memerlukan tingkat intervensi dan investasi yang lebih besar.



Gambar 1. Potongan penampang lereng yang tidak stabil (1). Permukaan gelincir potensial bentuk melengkung (2) dicegah terhadap longsor dengan ankur tanah baja (3) yang dibor dan dicor ke dalam lereng.

Masalah serius yang diakibatkan gempa bumi dapat mengintai bahkan pada tanah yang datar. Terutama jika terdapat lapisan pasir lepas di bawah muka air tanah. Guncangan gempa mengaduk pasir dan air menjadi seperti bubur cair. Dari sinilah dikenal istilah 'likuifaksi' atau 'pencairan tanah'. Bangunan yang berada di atas tanah yang berubah menjadi bubur cair ini dapat tenggelam ke dalamnya. Bangunan dapat miring, atau bahkan terguling sepenuhnya (Gambar 2). Dalam kasus ekstrim, seperti saat gempa Palu 2018, banyak rumah yang hanyut atau masuk ke dalam tanah yang tiba-tiba berubah menjadi lumpur. Gambar-gambar bangunan yang mengalami kerusakan akibat likuifaksi dapat ditemukan di internet dengan kata kunci "*buildings liquefaction*".



Gambar 2. Guncangan gempa menyebabkan sebagian tanah kehilangan kekuatan dan terlikuifaksi, mengakibatkan bangunan miring.

Potensi bahaya yang melibatkan tanah dan gempa bumi ini mengingatkan perlunya penyelidikan tanah sebelum dilakukan perancangan dan konstruksi bangunan. Pengujian tanah wajib dilakukan! Pengujian tanah sederhana untuk bangunan kecil, dan pengujian yang lebih kompleks untuk proyek yang lebih besar. Insinyur sipil membutuhkan hasil pengujian ini agar yakin bahwa tanah mampu menopang beban bangunan.

Pengujian biasanya berarti melakukan pemboran ke bawah permukaan tanah untuk memastikan jenis tanah yang ada (Gambar 3). Sampel tanah yang diambil selanjutnya diuji di laboratorium. Khusus untuk bangunan-bangunan yang besar, pemilik bangunan harus melibatkan insinyur geoteknik untuk merencanakan pengujian, menginterpretasikan hasil, dan merekomendasikan kriteria perancangan bangunan. Untuk lokasi pada daerah lereng atau rawan likuifaksi, insinyur geoteknik dapat menyarankan langkah-langkah yang diperlukan untuk mengatasi potensi masalah yang dapat membahayakan keselamatan bangunan.



Gambar 3. Contoh peralatan pemboran untuk pengambilan sampel tanah yang akan diuji di laboratorium.

Sangat penting bagi pemilik bangunan untuk melakukan penyelidikan tanah yang cukup selama tahap perancangan dan sebelum masa konstruksi. Terutama untuk bangunan yang akan dibangun pada tanah yang dikategorikan sebagai tanah lunak.

Daftar Pustaka:

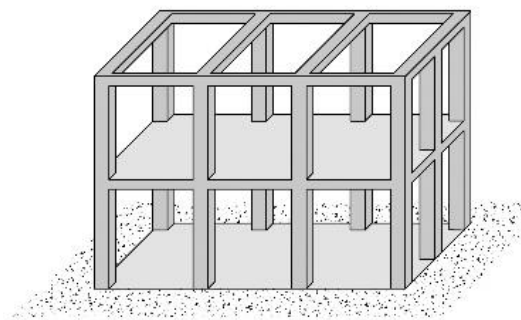
Charleston, A. W., 2008. *Seismic design for architects: outwitting the quake*. Oxford, Elsevier. Chapter 7, pp. 113-123.

Moller, E., 2016. Demonstrate liquefaction: shaky sediments. Exploratorium Teacher Institute. <https://www.youtube.com/watch?v=Kkgt-cPjBwA> (diakses 8 Mei 2020).

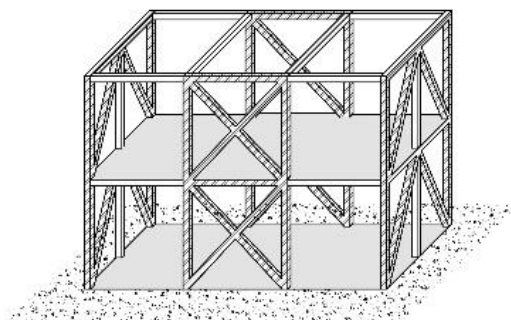
Murty, C. V. R., 2005. Earthquake Tip 30: What is important in foundations of earthquake-resistant Buildings? IITK-BMTPC "Learning earthquake design and construction", NICEE, India. <http://www.iitk.ac.in/nicee/EQTips/EQTip30.pdf> (diakses 5 Mei 2020).

3. Tiga Sistem Struktur Penahan Gempa

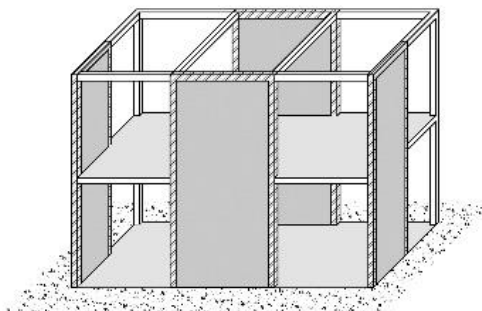
Bangunan-bangunan sangat beragam. Ada yang bertingkat rendah dan ada yang bertingkat tinggi, ada yang kecil seperti rumah dan ada yang besar seperti pusat perbelanjaan. Walaupun bangunan-bangunan tersebut terlihat sangat berbeda, umumnya terdapat tiga jenis sistem struktur yang banyak digunakan untuk menahan goncangan gempa. Ketiga sistem tersebut adalah rangka momen (*moment frame*), rangka dengan pengaku yang pada peraturan bangunan disebut “rangka terbreis” (*braced frame*), dan dinding geser atau dinding struktural (*shear wall*), seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



a. Rangka momen



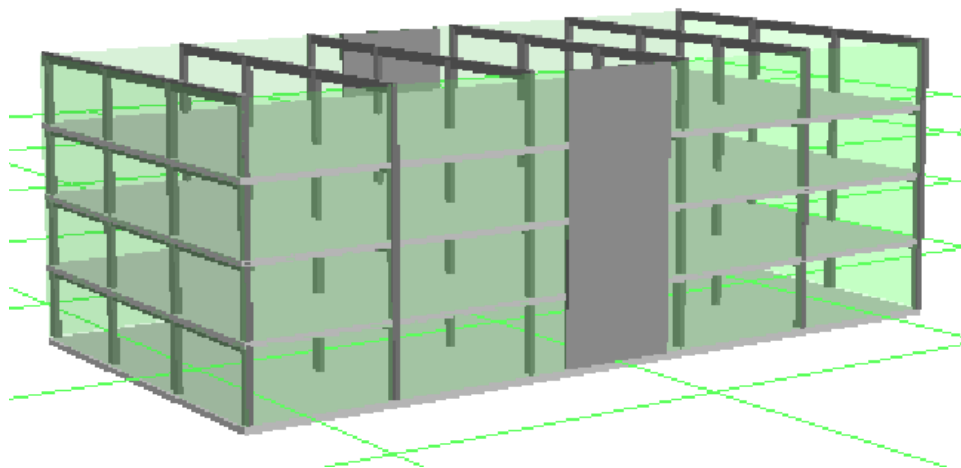
b. Rangka terbreis



c. Dinding geser

Gambar 1. Tiga jenis sistem struktur yang umum digunakan untuk menahan gempa.

Ketika arsitek dan insinyur sipil merancang sebuah bangunan baru, mereka memilih salah satu sistem struktur untuk menahan beban gempa. Kadang-kadang, jenis sistem struktur yang berbeda dapat dipilih untuk menahan guncangan gempa di arah melintang dan memanjang bangunan (Gambar 2). Jika di kedua arah tersebut terdapat sistem struktur penahan gempa, maka bangunan dapat menahan guncangan dari arah mana pun.



Gambar 2. Enam rangka momen, masing-masing terdiri dari tiga bentang, menahan guncangan dalam arah melintang bangunan, dan dua dinding geser menahan guncangan dalam arah memanjang bangunan. (pelat atap tidak diperlihatkan)

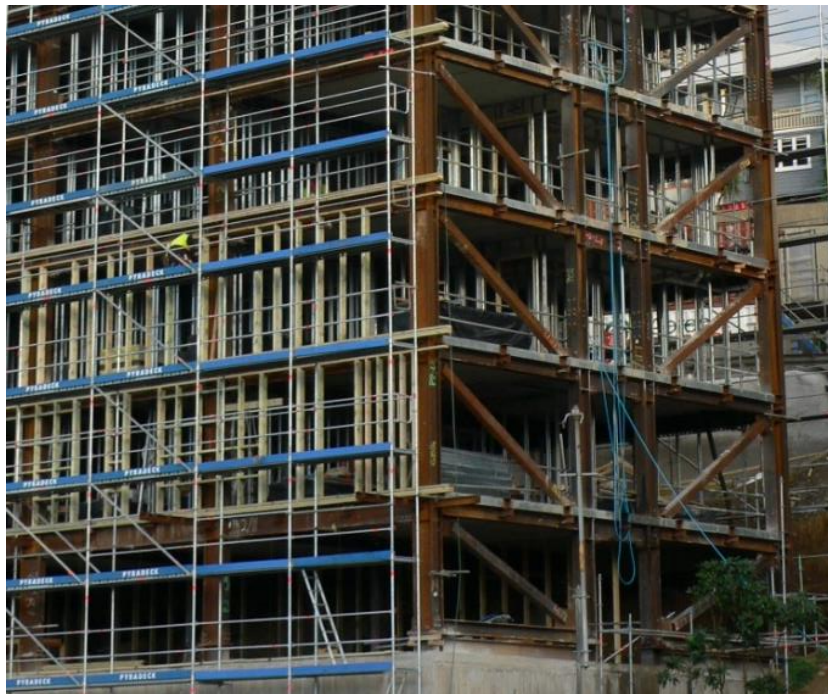
Setiap sistem penahan gempa dipasang secara vertikal dari fondasi hingga atap. Jumlah dinding geser, rangka terbreis, atau rangka momen yang dibutuhkan tergantung pada risiko kegempaan setempat, ukuran bangunan, dan tingkat keutamaan atau kepentingan bangunan bagi masyarakat.

Rangka momen merupakan sistem yang cukup populer (Gambar 3). Kolom dan balok tersambung secara kaku dan kuat untuk menahan guncangan gempa (lihat Bab 6). Sistem rangka memberikan keleluasaan untuk perencanaan ruang-ruang interior dan penempatan jendela. Namun, rangka momen biasanya lebih fleksibel daripada kedua sistem struktur yang lain dalam menahan beban gempa. Sistem ini dapat mengalami goyangan bolak-balik yang besar dan rentan terhadap kerusakan. Perancangan dan konstruksi rangka momen sulit dilakukan dengan benar, serta sensitif terhadap kesalahan konstruksi. Material konstruksi yang digunakan untuk rangka momen biasanya berupa beton bertulang atau baja struktural. Rangka kayu dapat juga digunakan untuk bangunan bertingkat rendah.

Pada rangka terbreis terdapat komponen struktur diagonal yang membentuk formasi segitiga dengan balok dan kolom (Gambar 4). Rangka tersebut tersusun dari komponen-komponen baja dan pada umumnya digunakan dalam konstruksi bertingkat rendah, seperti gudang. Kualitas pengelasan dapat menjadi titik lemah pada sambungan, kecuali jika dilakukan penjaminan mutu yang baik, serta breis baja dapat mengalami tekuk saat menahan gaya yang besar.



Gambar 3. Dua rangka momen empat bentang yang menahan gempa dalam arah memanjang bangunan. Rangka serupa juga digunakan pada sisi lain bangunan.



Gambar 4. Rangka terbreis baja yang menahan beban gempa dalam arah melintang bangunan. Rangka momen digunakan untuk menahan gaya dalam arah memanjang bangunan.

Dinding geser atau dinding struktural kemungkinan merupakan sistem struktur terkuat terhadap guncangan gempa (Gambar 5). Sistem ini sudah digunakan secara luas di seluruh dunia. Semakin lebar dan semakin banyak dinding geser, bangunan akan menjadi lebih kuat dan lebih kaku. Sehingga goyangan bolak-balik yang dapat merusak gedung menjadi semakin berkurang. Beton bertulang merupakan material yang paling banyak digunakan untuk dinding struktural bertingkat tinggi. Dinding bata terkekang (lihat Bab 4) dapat digunakan pada bangunan bertingkat rendah. Di beberapa negara rawan gempa, seperti Amerika Serikat dan Selandia Baru, konstruksi kayu bertingkat rendah memanfaatkan dinding struktural kayu lapis (*plywood*) atau papan gipsum untuk menahan gempa. Produk kayu olahan seperti kayu laminasi silang (*cross-laminated timber*) juga mulai banyak digunakan sebagai dinding geser pada bangunan bertingkat menengah.



Gambar 5. Dinding struktural beton bertulang menahan gaya dalam arah memanjang gedung.
Dinding serupa juga digunakan pada sisi lain gedung.

Daftar Pustaka

Braced Frame. Glossary for GEM Taxonomy. Global Earthquake Model.
<https://taxonomy.openquake.org/terms/braced-frame-lfbr>.

Charleson, A. W., 2008. *Seismic design for architects – outwitting the quake*. Elsevier: Oxford. Chapter 4
“Vertical structure”, pp. 63-91.

Moment Frame. Glossary for GEM Taxonomy. Global Earthquake Model.
<https://taxonomy.openquake.org/terms/moment-frame-lfm>.

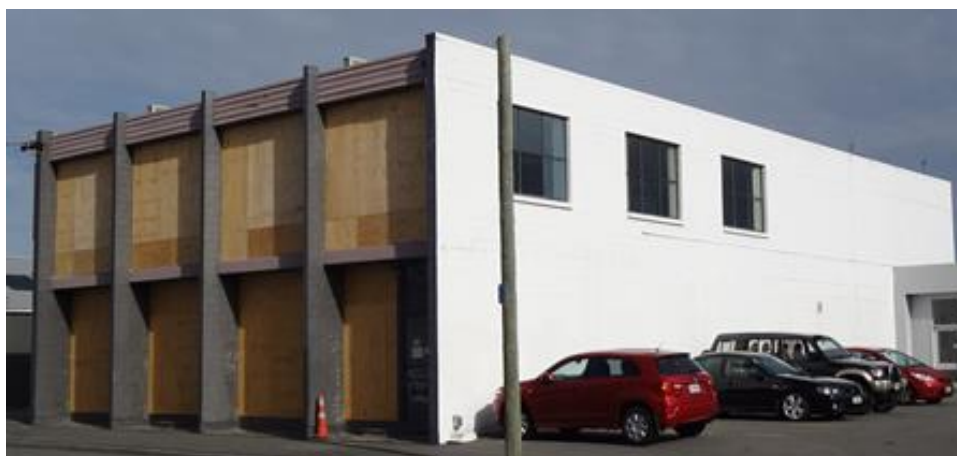
Murty, C. V. R., 2005. *How do earthquakes affect reinforced concrete buildings – Earthquake Tip 17*. IITK-BMTPC “Learning earthquake design and construction”, NICEE, India. <http://www.iitk.ac.in/nicee/EQTips/EQTip17.pdf> (diakses 5 Mei 2020).

Murty, C. V. R., 2005. *Why are buildings with shear walls preferred in seismic regions?– Earthquake Tip 23*. IITK-BMTPC “Learning earthquake design and construction”, NICEE, India. <http://www.iitk.ac.in/nicee/EQTips/EQTip17.pdf> (diakses 5 Mei 2020).

Wall. Glossary for GEM Taxonomy. Global Earthquake Model. <https://taxonomy.openquake.org/index.php/terms/wall-lwal>.

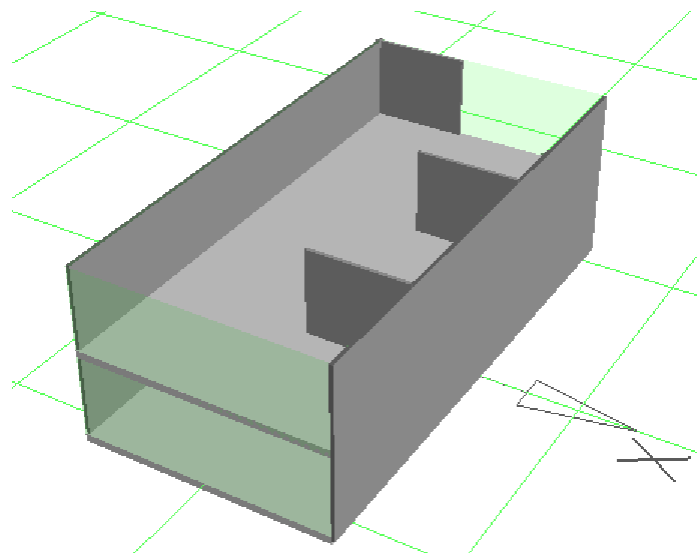
4. Mengapa Dinding Merupakan Elemen Struktur Penahan Gempa Terbaik?

Seperti yang dijelaskan pada Bab 3, dinding merupakan salah satu dari tiga sistem umum yang digunakan dalam bangunan untuk menahan guncangan horizontal. Dari ketiga sistem tersebut, dinding berpotensi menjadi yang paling kuat, yang paling kaku, dan paling tidak sensitif terhadap kesalahan konstruksi. Dinding juga memiliki rekam jejak yang baik di seluruh dunia berdasarkan pengamatan terhadap bangunan yang rusak akibat gempa bumi (Gambar 1). Meskipun dinding struktural lebih jarang ditemui dibandingkan dengan rangka momen pada bangunan bertingkat menengah hingga tinggi, rangka momen jauh lebih rentan terhadap kerusakan. Karena alasan ini, banyak bangunan di Chile menggunakan dinding geser daripada rangka momen. Dinding-dinding geser tersebut berkinerja baik dalam gempa bumi besar baru-baru ini.



Gambar 11. Bangunan yang rusak akibat gempa. Kekuatan dan kekakuan dinding bata panjang berwarna putih telah mencegah kerusakan. Sistem struktur yang lebih fleksibel di arah melintang bangunan mengalami deformasi yang lebih besar dan menyebabkan kerusakan pada fasad depan (untuk sementara ditutup dengan lembaran kayu lapis).

Dinding dapat menjadi elemen struktural terbaik untuk menahan gempa. Pemilihan material dinding tergantung pada ketinggian bangunan. Pada bangunan bertingkat rendah, seperti rumah dengan satu atau dua lantai, dinding bata terkekang (*confined masonry walls*, lihat Bab 7) lebih cocok digunakan, dengan pertimbangan aspek konstruksi dan biaya (Gambar 2). Dimensi kolom dan balok pengekan untuk bangunan ini lebih kecil daripada bangunan serupa yang menggunakan rangka momen (Bab 6). Adanya dinding menyebabkan goyangan bolak balik yang lebih kecil. Akibatnya, dinding dan elemen bangunan lainnya, seperti partisi, mengalami lebih sedikit kerusakan karena guncangan gempa. Namun, dibandingkan dengan rangka momen, dinding lebih membatasi dalam perencanaan interior dan pencahayaan alami. Biaya fondasi dinding juga mungkin lebih besar.



Gambar 2. Rumah dua lantai dengan dinding bata terkekang dan pelat atap beton (tidak ditampilkan). Dua dinding tepi yang panjang menahan guncangan di arah memanjang bangunan. Tiga dinding yang lebih pendek menahan guncangan di arah melintang (arah-X). Kolom dan dinding partisi tidak ditampilkan.²

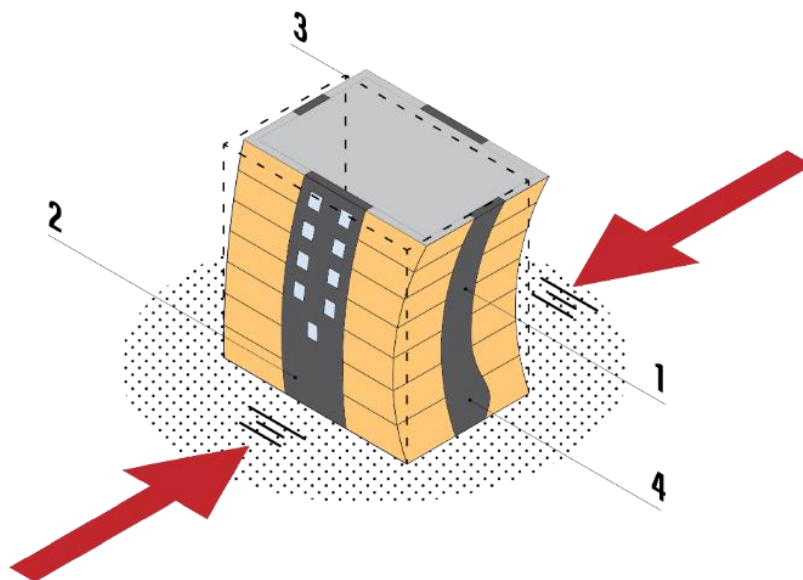
Dinding beton bertulang umum digunakan pada gedung-gedung tinggi di negara-negara yang mengalami gempa. Dinding-dinding ini menjulang secara menerus dari fondasi yang kuat ke atap, dengan atau tanpa tiang dan tanpa bukaan besar di lantai bawah (Gambar 3). Setiap pelat lantai beton serta pelat atap perlu sambungan yang kuat ke dinding tersebut.



Gambar 3. Bangunan yang sedang dibangun. Sebagian besar gaya gempa di kedua arah ditahan oleh dinding struktural beton bertulang. Pada kasus ini, rangka momen baja di sekeliling bangunan juga ikut menahan gaya gempa.³

Supaya aman, dinding struktural harus memiliki ketebalan yang cukup dan lebar yang cukup. Jika terlalu tipis, dinding dapat tertekuk dan rusak saat terjadi guncangan gempa. Jika lebarnya kurang (langsing), dinding menjadi terlalu lemah dan fleksibel, dan bangunan dapat bergoyang bolak balik terlalu besar (Gambar 4) dan menyebabkan kerusakan yang berlebihan. Untuk bangunan dinding bata

bertingkat rendah, jumlah dinding yang diperlukan untuk dapat menahan guncangan pada kedua arah, persyaratan lebar dan ketebalan dinding dapat ditemukan pada berbagai pedoman konstruksi, seperti Meli (2011). Detailing penulangan yang benar untuk dinding juga penting dalam memastikan keamanan terhadap gempa (Carlevaro, 2018). Untuk bangunan yang lebih tinggi, dinding struktural harus dirancang oleh insinyur sipil yang terqualifikasi.



Gambar 4. Saat gempa bumi, dua dinding yang langsing (1) menahan guncangan gempa tetapi mengalami goyangan yang besar di arah melintang bangunan. Dinding juga mengalami tekuk di dasar. Sementara, dua dinding yang lebih lebar (2) membatasi pergerakan di arah memanjang bangunan. Posisi awal yang ditandai dengan garis putus-putus (3) dan (4) menunjukkan dinding mengalami tekuk di dasar karena terlalu tipis. 4

Daftar Pustaka

Carlevaro, N., Roux-Fouillet, G., and Schacher, T., 2018. Guide book for building earthquake-resistant houses in confined masonry. Swiss Agency for Development and Cooperation Humanitarian Aid and Earthquake Engineering Research Institute. http://www.world-housing.net/wp-content/uploads/2018/11/Guide-book-for-building-eq-re-houses-in-cm_version-1806.pdf (diakses Desember 2019).

Charleson, A. W., 2008. Seismic design for architects: outwitting the quake. Oxford, Elsevier. Chapter 5, pp. 66-76.

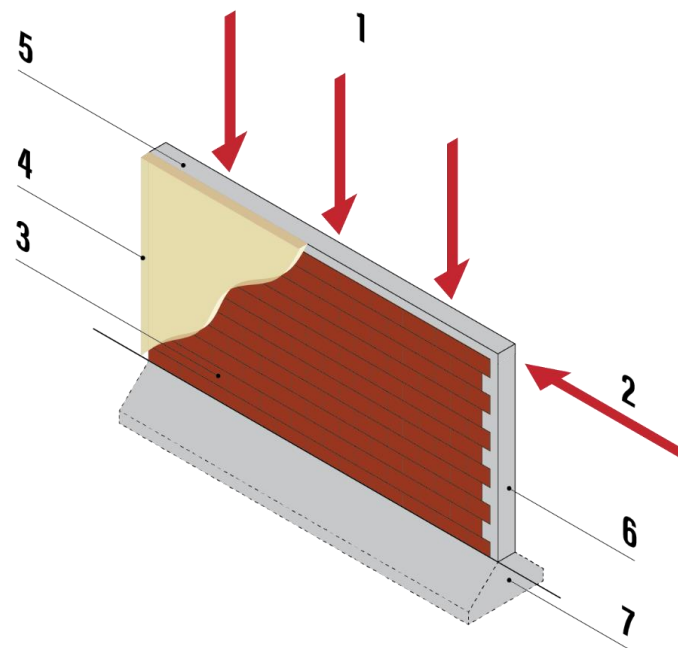
Meli, R., Brzev, S., Astroza, M., Boen, T., et al., 2011. Seismic design guide for low-rise confined masonry buildings. EERI and IAEE. <http://www.world-housing.net/wp-content/uploads/2011/08/ConfinedMasonryDesignGuide82011.pdf> (diakses April 2020).

Murty, C. V. R., 2005. *Why are buildings with shear walls preferred in seismic regions?– Earthquake Tip 23*. IITK-BMTPC “Learning earthquake design and construction”, NICEE, India. <http://www.iitk.ac.in/nicee/EQTips/EQTip17.pdf> (diakses 5 Mei 2020).

5. Apakah Dinding Bangunan Bermanfaat Ketika Terjadi Gempa?

Rumah dan bangunan, semuanya memiliki dinding. Dinding melindungi kita. Mayoritas dinding bangunan terbuat dari batu bata atau batako, yang kemudian diplester dan dicat. Dinding biasanya berada di sekeliling bangunan, serta di dalam bangunan. Dinding menciptakan ruang yang kita tempati. Bersama dengan bukaan pintu dan jendela, dinding menjadikan ruangan layak huni. Dinding juga menumpu atap bangunan.

Dinding bata memiliki kelebihan dan kekurangan. Dinding cukup kuat untuk menumpu beban konstruksi di atasnya. Dinding juga kuat menahan gaya horizontal yang bekerja pada bidang dinding (*in-plane*), misalnya ketika gempa. Konstruksi dinding umumnya dilakukan terlebih dahulu, diikuti oleh pengecoran kolom praktis dan balok ikat (*tie beam*). Konstruksi seperti ini sangat luas diterapkan di Indonesia, dan dikenal juga dengan istilah sistem dinding bata terkekang. Kolom dan balok beton bertulang mengekang dinding bata, mencegahnya lepas dari struktur, dan secara umum mengikat semua menjadi satu kesatuan (Gambar 1 dan 2). Dinding bata yang dibuat tanpa perkuatan kolom dan balok beton bertulang tidak aman ketika terjadi gempa.

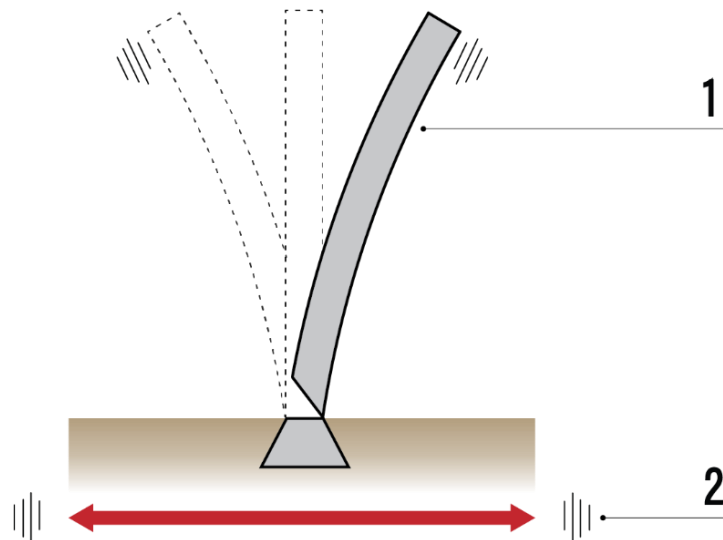


Gambar 1. Dinding mampu menahan gaya ke bawah (1) dan gaya horizontal (dari gempa) (2) yang bekerja pada bidang dinding. Unit-unit bata (3) menumpu pada fondasi (7) dan diplester (4). Dinding bata dikekang oleh balok ikat (5) dan kolom ikat atau kolom praktis (6).



Gambar 2. Rumah menggunakan sistem bata terkekang dalam tahap konstruksi

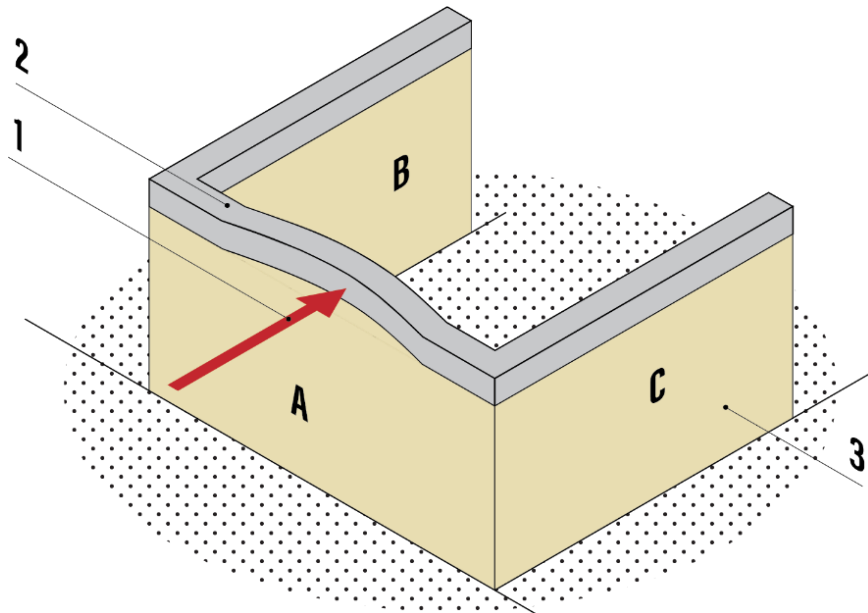
Bagaimana dengan kelemahan dari dinding? Lokasi di mana dinding tipis dan tidak didukung oleh dinding tepi atau lantai atau atap sangat lemah terhadap guncangan gempa yang tegak lurus bidang dinding (*out-of-plane*) (Gambar 3). Ingat betapa sulitnya membangun rumah model dari kartu. Kartu yang dipasang vertikal sebagai dinding akan jatuh kecuali jika ditopang oleh satu atau dua kartu yang dipasang tegak lurus terhadapnya. Cobalah sendiri!



Gambar 3. Suatu potongan dinding (1) yang menunjukkan dinding sangat lemah terhadap gaya horizontal akibat guncangan gempa yang bekerja tegak lurus bidang dinding.

Semua dinding membutuhkan topangan dari samping untuk mengatasinya, dan pada saat yang sama juga harus menopang dinding-dinding lain. Pada bangunan, kita mengatasi kelemahan dinding terhadap gaya gempa (dan angin) ini dengan menggunakan dinding lain yang membentuk sudut siku-siku dan menggunakan balok ikat. Balok ikat di atas dinding yang rentan dihubungkan pada balok serupa di atas dinding yang membentuk sudut siku-siku terhadap dinding yang rentan tadi

(Gambar 4). Jika dinding tidak dihubungkan menyiku dengan dinding lain seperti yang dijelaskan, dinding tersebut sangat mungkin runtuh saat terjadi gempa. Kolom praktis yang umumnya tertanam pada dinding rumah terlalu lemah jika diandalkan sebagai penopang untuk dinding di sekitarnya.



Gambar 4. Bagian dari rumah tanpa atap. Dinding A yang mengalami gaya tegak lurus bidang dinding (1) akibat gerakan gempa ditopang terutama oleh balok ikat (2) yang menghubungkan puncak dinding A ke dinding B dan C (3).

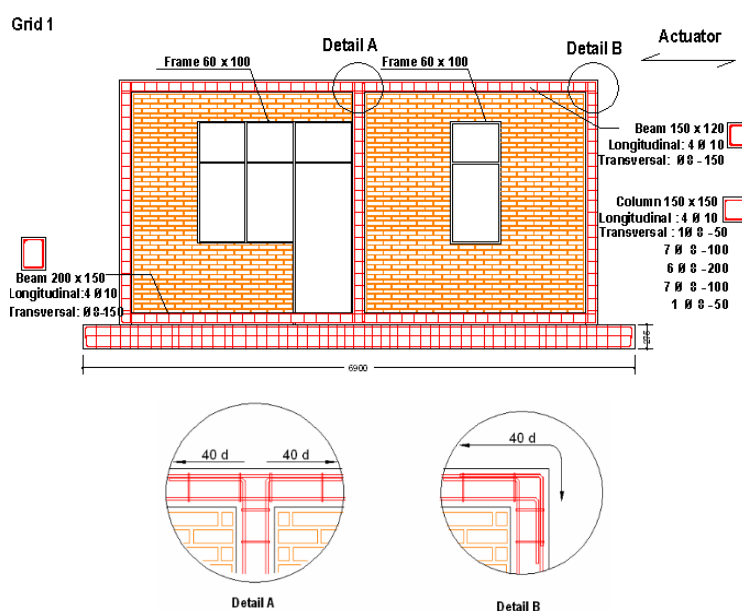
Pada bangunan yang lebih besar dengan balok dan kolom beton bertulang, dinding tidak menumpu beban bangunan. Namun, dinding tetap memerlukan penopang untuk mencegahnya jatuh ke samping, baik ke dalam atau ke luar bangunan, ketika terjadi guncangan gempa.

Daftar Pustaka

Carlevaro, N., Roux-Fouillet, G., and Schacher, T., 2018. Guide book for building earthquake-resistant houses in confined masonry. Swiss Agency for Development and Cooperation Humanitarian Aid and Earthquake Engineering Research Institute. http://www.world-housing.net/wp-content/uploads/2018/11/Guide-book-for-building-eq-re-houses-in-cm_version-1806.pdf (diakses Desember 2019).

6. Dinding Bata Terkekang dan Pengaruhnya pada Bangunan Saat Gempa

Bab 5 telah menjelaskan bahwa banyak rumah dan bangunan dengan 1 atau 2 lantai di Indonesia yang memiliki sistem dinding bata terkekang. Dinding bata terkekang dibuat dari pasangan bata atau batakko yang direkatkan dengan mortar. Pasangan dinding bata ini dikekang oleh kolom dan balok beton bertulang pada keempat sisi dinding, sehingga semuanya bekerja sebagai satu kesatuan. Pasangan dinding bata terkekang ini dapat memiliki bukaan seperti pintu dan jendela.



Gambar 1. Tipikal bangunan sederhana dengan sistem dinding pasangan bata terkekang

Pembuatan dinding bata terkekang umumnya dilakukan dengan membuat pasangan bata di atas fondasi atau sloof, kemudian membuat kolom-kolom praktis setiap jarak tertentu atau pada setiap pertemuan dinding, dan terakhir membuat balok ikat (*tie beam*) di atas pasangan bata. Pengalaman menunjukkan bahwa kinerja dinding bata terkekang pada saat gempa sangat bervariasi. Kerusakan bangunan pasca gempa memperlihatkan bahwa bangunan yang terbuat dari pasangan dinding bata terkekang rentan terhadap beban gempa jika tidak direncanakan sesuai standar dan tidak dikonstruksi dengan baik.

Beberapa penyebab kerusakan bangunan dengan sistem struktur dinding bata terkekang saat gempa, antara lain adalah: (i) sambungan balok kolom dengan detail tulangan yang kurang baik, (ii) detail penulangan yang tidak memenuhi standar, (iii) mortar yang berkualitas rendah baik dari segi komposisi material maupun pelaksanaannya, (iv) tidak ada ankur pasangan bata terhadap komponen pengekangnya, (v) mutu bata yang tidak konsisten dan pemasangan yang tidak rapi. Adanya bukaan yang luas pada dinding bata juga dapat mempengaruhi kinerja dinding.



(a)

(b)

(c)

Gambar 2. Pembuatan kolom dan balok yang kurang baik: (a) Sambungan balok kolom yang kurang baik karena tidak adanya panjang penyaluran yang cukup untuk tulangan, (b) Detail penulangan yang kurang baik karena penggunaan tulangan polos, diameter tulangan yang terlalu kecil, jarak sengkang yang terlalu jauh, dan tidak adanya kait seismik, (c) Sambungan kolom ke fondasi yang tidak sesuai standar.



Gambar 3. Penggunaan material konstruksi yang kurang baik akan menghasilkan kualitas bangunan yang kurang baik pula



Gambar 4. Konstruksi pasangan dinding bata yang kurang baik, dimana bata tidak tersusun rapi dan mortar yang mengisi ruang di antara bata terlalu tebal.

Jika kualitas material dan pelaksanaan konstruksi tidak sesuai standar, tidak heran jika dinding pasangan bata dapat rubuh, bahkan jika tidak terjadi gempa!

Agar bangunan dengan sistem dinding pasangan bata terkekang bekerja baik saat gempa, maka beberapa hal perlu dipenuhi. Pertama, pada tahap perencanaan, usahakan agar denah bangunan sederhana dan simetris dimana bidang-bidang dinding membentuk kotak tertutup dan tidak terlalu banyak memiliki bukaan (jendela atau pintu). Kedua, pastikan pula bahwa bangunan memiliki semua

komponennya secara lengkap, yaitu fondasi, kolom, dinding, balok, pelat lantai dan atap, yang semuanya tersambung dengan baik. Ketiga, pada waktu konstruksi, gunakan material dengan kualitas yang baik, serta mudah didapat agar terjamin terus tersedia selama konstruksi. Keempat, pelaksanaan konstruksi haruslah mengikuti peraturan konstruksi yang berlaku. Terakhir, lakukan pengawasan selama konstruksi untuk menjamin kualitas bangunan.

Berbagai peraturan dan standar untuk bangunan sederhana yang tersedia memberikan panduan bagaimana merencanakan dan membangun bangunan dengan dinding pasangan bata terkekang. Ikutilah panduan tersebut!

Daftar Pustaka

Boen, T., 2014. Challenges and Potentials of Retrofitting Masonry Non-Engineered Construction in Indonesia.

Kusumastuti, D. et al., 2012. 'Experimental Study on Typical Confined Masonry Structure under Cyclic Lateral Load', in. Proceedings of 15th WCEE, Portugal.

Suarjana, M., Kusumastuti, D. and Pribadi, K.S., 2012. 'An Experimental Study on the Effect of Opening on Confined Masonry Wall Under Cyclic lateral Loading', in. Proceedings of 15th WCEE, Portugal.

Wijaya, W. et al., 2011 'Experimental study on wall-frame connection of confined masonry wall', in Procedia Engineering, pp. 2094–2102. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.263>.

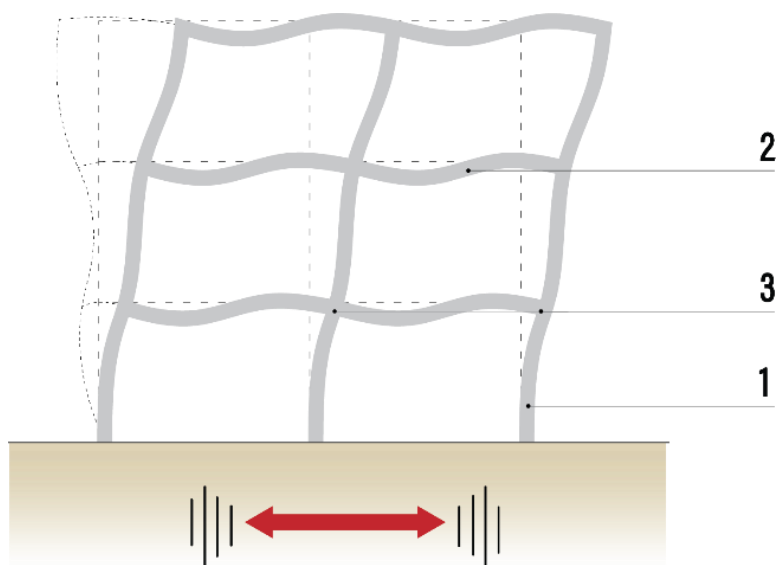
7. Bagaimana Cara Kerja Bangunan dengan Sistem Rangka Kolom dan Balok Beton Bertulang Saat Terjadi Gempa Bumi?

Sementara bangunan bertingkat rendah seperti rumah satu atau dua lantai mengandalkan dinding pasangan bata atau kayu terkekang untuk menerima guncangan gempa, bangunan yang lebih tinggi mengandalkan sistem rangka kolom dan balok beton bertulang yang menopang pelat lantai. Sistem rangka tersebut juga dapat dibuat dari baja. Elemen struktur vertikal dan horizontal ini bekerja sama untuk menopang beban bangunan dan menahan guncangan gempa horizontal.

Cara terbaik untuk memahami bagaimana rangka beton bertulang menahan gaya gempa adalah dengan melihatnya secara terbuka. Artinya, dengan cara melihat kerangka struktur sebelum dinding-dinding luar dan dalam dipasang (Gambar 1). Sehingga hanya terdapat empat komponen yang terlihat, yaitu atap, pelat lantai, kolom, dan balok. Dibandingkan dengan dinding yang relatif lebar, kolom jauh lebih ramping. Kolom adalah bagian struktural yang penting pada bangunan sistem rangka. Kolom menahan seluruh berat bangunan. Saat gempa, kolom harus melentur dan bergoyang ke samping tanpa patah dalam menahan gaya horizontal (Gambar 2).



Gambar 1. Bangunan sistem rangka menahan gempa melalui kekuatan kolom dan balok. Dinding dan penutup eksterior (cladding) belum dibangun.



Gambar 2. Kolom (1) dan balok (2) rangka bangunan bergoyang saat terjadi gempa. Perhatikan bahwa kolom dan balok melentur. Kolom dan balok terhubung pada sambungan yang kuat dan kaku (3).

Kolom tidak dapat bekerja sendiri. Kolom membutuhkan balok untuk bekerja. Balok lebih tebal daripada pelat lantai yang didukungnya dan terhubung secara kaku ke kolom. Diperlukan tulangan baja tulangan khusus di daerah sambungan antara kolom dan balok. Sambungan kolom-balok yang kaku berarti bahwa ketika kolom melentur, maka balok juga melentur. Hal ini membuat bangunan lebih kuat secara keseluruhan, lebih kaku dan tidak terlalu fleksibel, dan tidak mudah rusak.

Karena kolom adalah elemen struktur yang penting kritis, maka kolom harus dilindungi. Jika kolom rusak parah, maka seluruh bangunan berisiko runtuh. Insinyur menggunakan dua strategi untuk melindungi kolom.

Pertama, kolom harus besar dan kuat. Kolom langsing akan melentur hingga patah saat gempa, sehingga ukuran kolom harus memadai. Selain cukup besar, kolom membutuhkan banyak tulangan memanjang dan tulangan pengikat (sengkang) di sepanjang kolom (Gambar 3). Sengkang mencegah kolom patah saat melentur. Kolom harus jauh lebih tebal daripada dinding pasangan bata yang tersambung dengannya. Ukuran kolom harus direncanakan berdasarkan perhitungan struktur.

Strategi kedua untuk melindungi kolom adalah merancang agar kolom lebih kuat dari balok. Ini berarti bahwa selama guncangan gempa kuat, balok yang dirancang lebih lemah dari kolom akan rusak tetapi tidak kritis, sehingga pada saat yang sama melindungi kolom.



Gambar 3. Tulangan kolom terlihat sebelum dicor. Tulangan terdiri dari tulangan vertikal yang menahan lentur, dan sengkang horizontal yang mengikat beton kolom agar tidak hancur dan terlepas.

Kedua strategi ini berarti bahwa sistem rangka struktur aman gempa biasanya memiliki kolom yang relatif besar, balok yang sedikit lebih kecil, dan sambungan balok-kolom yang kuat dan kaku.

Daftar Pustaka

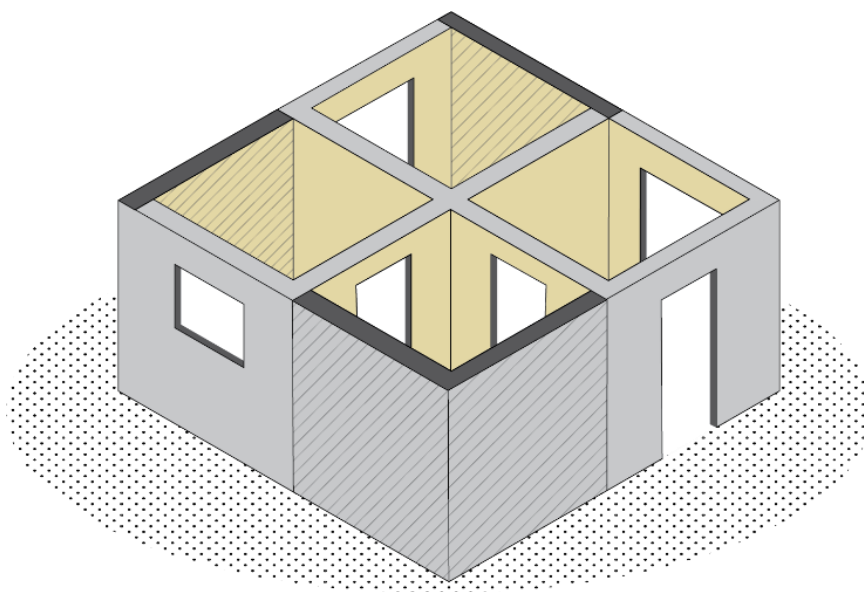
Murty, C. V. R., et al., 2006. At risk: the seismic performance of RC frame buildings with masonry infill walls. California, World Housing Encyclopedia. http://www.world-housing.net/wp-content/uploads/2011/05/RCFrame_Tutorial_English_Murty.pdf (diakses 8 Juni 2020).

8. Prinsip Bangunan Bata Aman Gempa

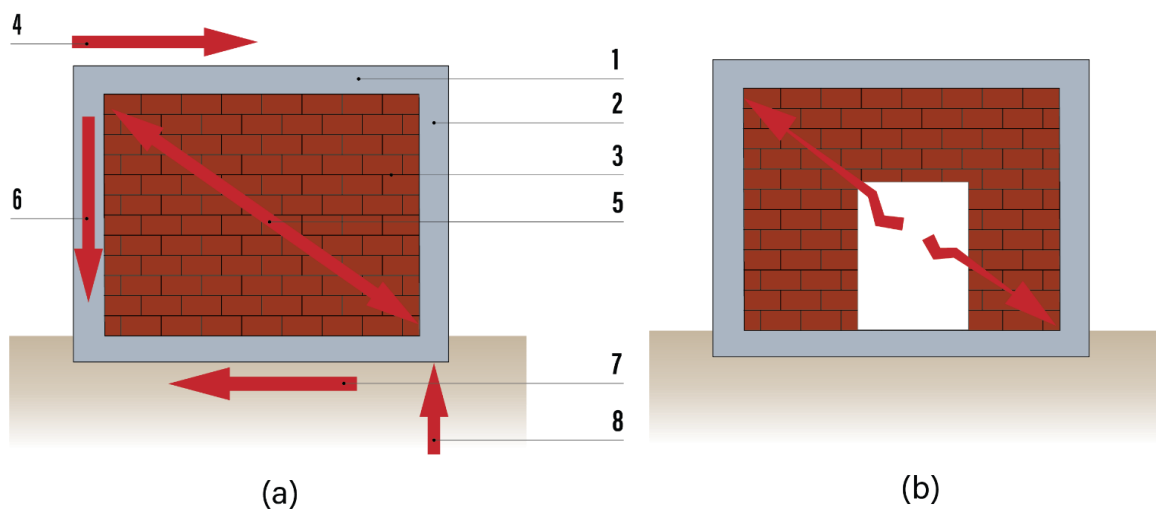
Bab 5 telah memberikan informasi dasar mengenai dinding pasangan bata, salah satu komponen penahan gempa yang paling umum untuk bangunan bertingkat rendah di Indonesia. Dinding bersifat kuat pada bidangnya tetapi rentan terhadap guncangan di arah yang lain. Dinding pasangan bata harus menggunakan bahan berkualitas baik dan dibangun sebagai dinding bata terkekang. Ini berarti setiap panel pasangan bata harus dikekang oleh kolom praktis atau kolom pengikat dan balok pengikat di sekelilingnya. Balok pengikat harus dipasang di atas dinding pada level pelat lantai dan pelat atap.

Lalu bagaimana kita menggunakan dinding-dinding ini pada suatu bangunan, misalnya rumah dua lantai? Pertama, kita harus ingat bahwa dinding melindungi bangunan dari guncangan gempa. Maka kita perlu menerapkan empat prinsip berikut:

1. Setiap rumah membutuhkan minimal dua dinding kuat yang sejajar di arah memanjang bangunan dan dua dinding kuat di arah melintang. Guncangan gempa datang dari segala arah sehingga setiap bangunan membutuhkan kekuatan baik di arah memanjang maupun melintang (Gambar 1). Meskipun semua dinding pasangan bata harus berupa konstruksi pasangan bata terkekang, dinding kuat tidak boleh memiliki bukaan besar yang mencegah terbentuknya gaya diagonal di dalam dinding dan melemahkannya (Gambar 2). Selanjutnya, ketebalan pasangan bata dengan plester harus sebanding dengan tinggi dinding, dan terakhir, setiap dinding kuat harus lebih lebar dari setengah tinggi lantai. Lihat Meli (2011) dan lainnya untuk informasi lebih rinci.

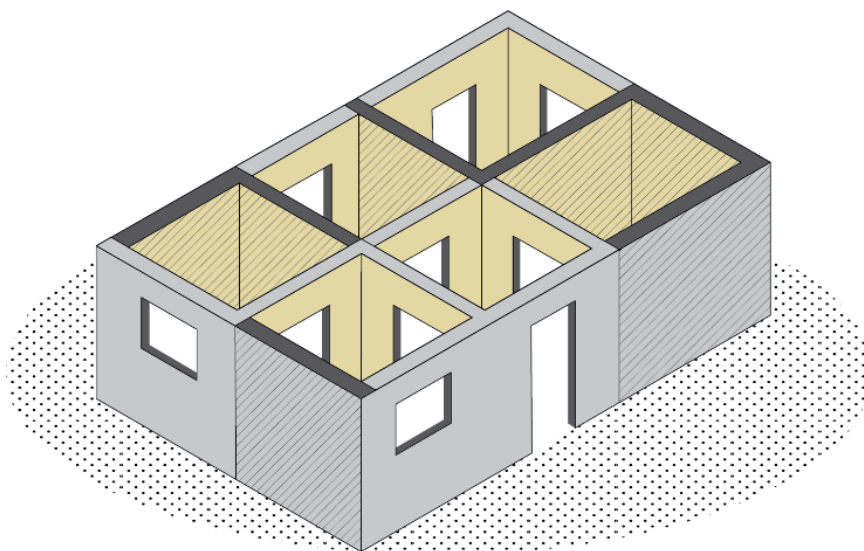


Gambar 1. Pada rumah sederhana ini, dua dinding kuat (ditunjukkan dengan arsiran) tanpa bukaan besar, menahan guncangan gempa di arah memanjang dan melintang bangunan.



Gambar 2. (a) Dinding bata terkekang yang kuat dengan balok pengikat (1), kolom (2) dan pasangan bata (3). Gaya gempa (4) ditahan oleh gaya tekan diagonal pada dinding (5) dan gaya tarik pada kolom pengikat (6). Gaya gempa horizontal ditahan oleh fondasi (7) dan gaya vertikal juga ditahan oleh fondasi (8). (b) Dinding memiliki bukaan yang mencegah terbentuknya garis gaya diagonal dan sangat melemahkan dinding.

2. Dinding kuat harus disebar secara teratur pada bangunan di kedua arah (Gambar 3). Dinding yang searah perlu diatur lokasinya dengan baik untuk mencegah bangunan terpuntir saat terjadi gempa. Sangat penting untuk memiliki dinding kuat yang cukup, baik dalam hal lebar dan ketebalan, pada setiap arah. Seberapa cukupnya ditentukan oleh ukuran bangunan dan kualitas bata atau batako.



Gambar 3. Dinding kuat tersebar dengan baik pada bangunan. Empat dinding kuat menahan guncangan di arah melintang, dan tiga dinding kuat menahan guncangan di arah memanjang bangunan. Semua dinding harus diikat menjadi satu dengan balok ikat (tidak terlihat di gambar).

3. Balok ikat harus mengikat bagian atas dinding-dinding menjadi satu. Balok ikat tidak hanya mengekang panel pasangan bata, tetapi juga mengikat semua elemen konstruksi agar bekerja secara bersama-sama sehingga bangunan tetap menjadi satu kesatuan.
4. Dinding kuat pada setiap bangunan harus vertikal dan menerus dari fondasi ke balok pengikat atap. Misalnya, pada rumah dua lantai, dinding kuat di lantai atas harus berada tepat di atas dinding kuat lantai dasar.

Daftar Pustaka

Boen, T., et al., 2009. Buku saku Persyaratan pokok rumah yang lebih aman. PU and JICA. https://www.jica.go.jp/indonesia/indonesian/office/topics/pdf/buku_saku_0.pdf (diakses 11 April 2020).

Carlevaro, N., Roux-Fouillet, G., and Schacher, T., 2018. Guide book for building earthquake-resistant houses in confined masonry. Swiss Agency for Development and Cooperation Humanitarian Aid and Earthquake Engineering Research Institute. http://www.world-housing.net/wp-content/uploads/2018/11/Guide-book-for-building-eq-re-houses-in-cm_version-1806.pdf (diakses Desember 2019).

Meli, R., Brzev, S., Astroza, M., Boen, T., et al., 2011. Seismic design guide for low-rise confined masonry buildings. EERI and IAEE. <http://www.world-housing.net/wp-content/uploads/2011/08/ConfinedMasonryDesignGuide82011.pdf> (diakses April 2020).

Public Works Department, 2016. Izin mendirikan bangunan Gedung, No. 05/PRT/M/2016. <http://ciptakarya.pu.go.id/pbl/index.php/preview/55/permen-pupr-no-05-tahun-2016-tentang-izin-mendirikan-bangunan-gedung> (diakses 11 April 2020).

Untuk informasi rinci lain yang dapat diunduh gratis, kunjungi <https://confinedmasonry.org/>.

9. Mengikat Komponen Bangunan Menjadi Satu Untuk Menahan Gempa

Bangunan terdiri dari berbagai komponen. Ada yang merupakan komponen utama struktur, seperti pelat lantai, atap, kolom, balok, dan dinding. Ada juga komponen lain yang tidak menahan beban, seperti dinding partisi, dinding penutup (*cladding*), dan tangga. Komponen yang tidak menahan beban tersebut diperlukan untuk membuat bangunan layak huni, tetapi jika tidak tersedia maka bangunan tidak akan runtuh.

Saat gempa, bangunan dan seluruh komponennya akan terguncang hebat. Guncangan yang sangat merusak adalah gerakan horisontal bolak-balik dalam arah sembarang. Guncangan gempa berpotensi meruntuhkan bangunan jika bangunan tidak dirancang dan dibangun dengan baik. Skenario mengerikan tersebut telah terjadi di banyak negara pasca gempa bumi.

Kerusakan parah di atas sangat mungkin untuk dicegah. Yang diperlukan adalah mengikat komponen-komponen utama struktur menjadi satu di setiap level pelat lantai dan atap. Elemen vertikal seperti kolom dan dinding, juga perlu diikat pada setiap level oleh balok keliling atau balok ikat yang umumnya terbuat dari beton bertulang. Konsep ini serupa dengan melilitkan sabuk atau pengikat yang kuat di setiap tingkat bangunan untuk mencegah dinding-dinding mengembang dan hancur saat terjadi guncangan gempa (Gambar 1).



Gambar 1. Balok ikat dan balok keliling berfungsi seperti sabuk yang menyatukan elemen-elemen bangunan pada level lantai dan atap, sehingga mencegah kerusakan bangunan yang lebih parah akibat gempa.

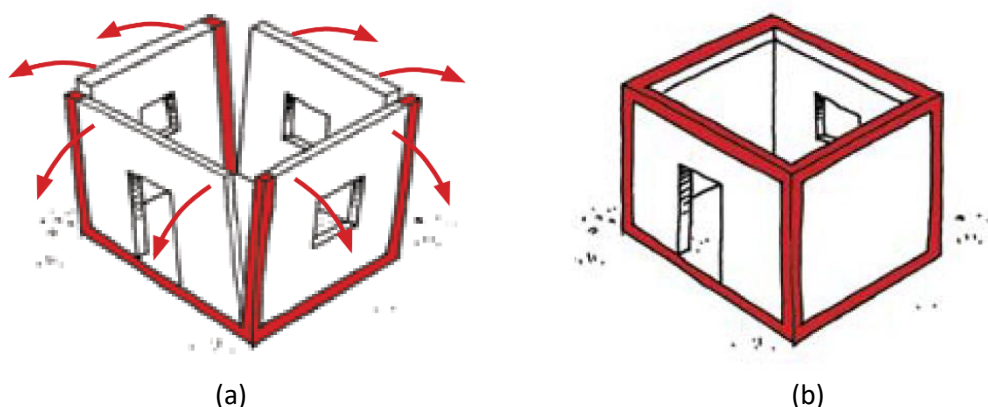
Jika terbuat dari beton bertulang, pelat lantai bangunan umumnya cukup untuk menyatukan bangunan pada level lantai tersebut. Tentu saja fungsi utama lantai adalah sebagai permukaan rata untuk berjalan atau menaruh barang. Tetapi ketika guncangan horisontal terjadi, maka lantai mengikat bangunan pada tingkat dimana lantai tersebut berada (Gambar 2). Lantai memaksa semua komponen utama struktur untuk bergerak bersama sebagai satu kesatuan, dan mencegah terlepasnya

komponen-komponen tersebut dari bangunan. Tulangan baja tambahan pada pelat lantai beton bahkan mungkin tidak diperlukan untuk mewujudkan pengikatan ini.



Gambar 2. Lantai beton bertulang pada bangunan ini mengikat balok dan kolom menjadi satu dan memaksa semua bagian untuk bergerak bersama secara horizontal saat gempa.

Akan lebih sulit untuk mengikat suatu tingkat bangunan jika tidak ada pelat lantai atau atap, atau jika bangunan memiliki dinding pasangan bata dengan lantai kayu. Dalam hal ini, diperlukan balok keliling atau balok ikat (Gambar 3). Balok-balok ini membuat sistem rangka horizontal di dalam dan di sekeliling bangunan untuk menyatukan semuanya, serta menahan dinding dan kolom agar tidak terlepas. Balok-balok ini juga mencegah bagian atap bergeser dari tumpuannya dan jatuh. Sistem rangka balok keliling lebih fleksibel daripada pelat beton, tetapi terbukti dapat berfungsi sebagai sabuk pengikat.



Gambar 3. (a) Keruntuhan dinding bangunan sederhana tidak dapat dicegah oleh kolom saja. (b) Balok keliling atau balok ikat di level atap dapat mengikat bangunan menjadi satu (SDC, 2018).

Sebagai kesimpulan, setiap level bangunan, mulai dari fondasi sampai dengan level atap perlu diikat kuat menjadi satu kesatuan dengan pelat lantai, pelat atap, atau balok keliling.

Daftar Pustaka

Bothara, J., and Brzev, S., 2011. A Tutorial: Improving the Seismic Performance of Stone Masonry Buildings. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, U.S.A., Publication WHE-2011-01, 78 pp. www.world-housing.net/tutorials/stone-tutorials (diakses 10 Juli 2020).

Carlevaro, N., Roux-Fouillet, G., and Schacher, T., 2018. Guide book for building earthquake-resistant houses in confined masonry. Swiss Agency for Development and Cooperation Humanitarian Aid and Earthquake Engineering Research Institute. http://www.world-housing.net/wp-content/uploads/2018/11/Guide-book-for-building-eq-re-houses-in-cm_version-1806.pdf (diakses 5 Mei 2019).

Charleson, A. W., 2008. Seismic design for architects – outwitting the quake. Elsevier: Oxford. Chapter 4 “Horizontal structure”, pp. 49-61.

Murty, C. V. R., 2005. Why are horizontal bands necessary in masonry buildings – Earthquake Tip 14. IITK-BMTPC “Learning earthquake design and construction”, NICEE, India. <http://www.iitk.ac.in/nicee/EQTips/EQTip14.pdf> (diakses 5 Mei 2020).

10. Kearifan Lokal dan Keamanan Bangunan terhadap Gempa Bumi

Di Indonesia, seperti negara-negara lain, observasi pasca-gempa terkadang menunjukkan bahwa bangunan tradisional lebih aman dibandingkan dengan bangunan yang lebih baru. Bangunan tradisional menyertakan kearifan lokal dalam memilih material, bentuk, sistem struktur, dan sambungan antar elemen struktur.

Pertanyaan yang perlu dijawab oleh perancang dan kontraktor adalah: Prinsip-prinsip apa dari kearifan lokal yang dapat diterapkan pada bangunan baru untuk menambah keamanan bangunan terhadap gempa? Sebelum menjawab pertanyaan ini, kita perlu mengingat kembali fitur-fitur konstruksi tradisional yang berhubungan dengan kinerja bangunan terhadap gempa. Konstruksi tradisional biasanya mencakup:

- struktur dari kayu atau bambu untuk lantai, atap, dan dinding;
- konstruksi ringan, mungkin dengan pengecualian atap genteng;
- sambungan yang relatif fleksibel antara balok dan kolom; serta
- sambungan yang fleksibel atau dengan sengaja dibuat lemah antara bangunan dengan fondasinya.

Bangunan yang menggabungkan kearifan lokal dalam konstruksinya bersifat ringan dan fleksibel (Gambar 1 dan 2). Bangunan seperti ini lebih bergoyang ketika terjadi gempa. Dan jika bangunan disambung dengan lemah terhadap fondasinya, bangunan dapat dianggap terisolasi parsial terhadap gerakan tanah. Menurut praktik bangunan tahan gempa sekarang, karakteristik seperti ini mungkin menguntungkan. Sebagai contoh, beban gempa yang terjadi pada bangunan sebanding dengan beratnya. Oleh karena itu, bahan bangunan harus dipilih seringan mungkin. Bangunan yang ringan akan lebih aman terhadap gempa dibandingkan bangunan yang berat.



Gambar 1. Bangunan yang sangat fleksibel dan akan bergoyang cukup besar saat gempa.



Gambar 2. Konstruksi tradisional yang lain yang juga fleksibel.

Fleksibilitas bangunan dapat menguntungkan, kecuali jika bangunan terletak di atas tanah lunak. Sambungan fleksibel ke fondasi dapat menjadi keunggulan dalam mengurangi gaya gempa, dengan catatan bahwa bangunan tidak boleh jatuh dari fondasinya. Sistem isolasi dasar modern (Bab 24), yang direkomendasikan untuk bangunan penting seperti rumah sakit, memiliki fleksibilitas horizontal pada level fondasi.

Sayangnya, kesempatan untuk menyertakan kearifan lokal ke dalam bangunan baru sangat terbatas. Alasan utamanya adalah bangunan di masa lampau dan bangunan modern sangat berbeda. Mayoritas bangunan baru menggunakan material yang berat, seperti bata dan beton bertulang (Gambar 3). Bangunan juga didesain lebih kaku untuk membatasi pergerakan, kerusakan, dan menghemat biaya perbaikan. Terakhir, dibutuhkan keterampilan yang tinggi serta biaya yang besar untuk membuat sambungan yang fleksibel antara bangunan dengan fondasi.



Gambar 3. Konstruksi sistem dinding bata terkekang menggunakan beton bertulang dan bata yang relatif berat.

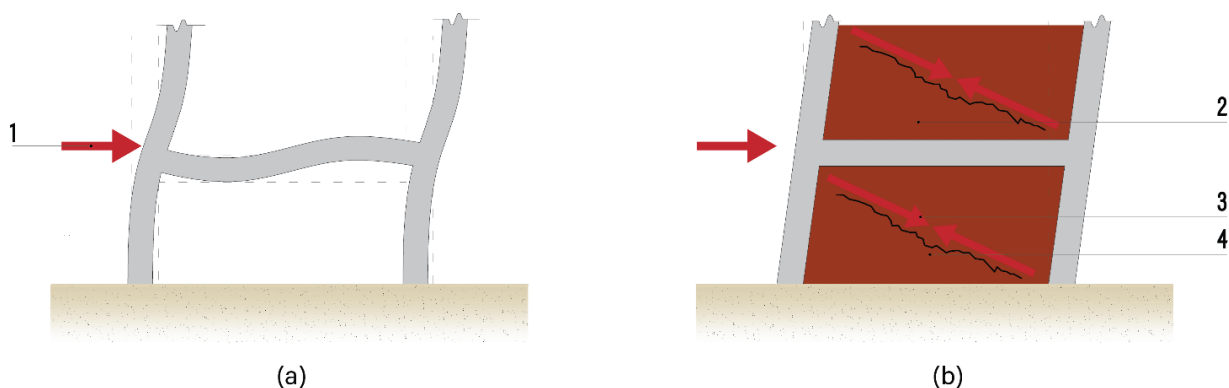
Secara teori, beberapa prinsip kearifan lokal dapat meningkatkan keamanan terhadap gempa. Namun karena bangunan sekarang dibangun dengan metode yang sangat berbeda, banyak prinsip yang tidak dapat diterapkan secara langsung. Satu-satunya pengecualian adalah penggunaan material bangunan yang lebih ringan, daripada material yang berat.

11. Dinding Pengisi dan Pengaruhnya pada Bangunan Saat Gempa

Dinding pengisi adalah dinding pasangan bata yang mengisi ruang antar kolom dan antar balok, dan dipasang setelah kolom dan balok beton bertulang dibangun. Dinding pengisi umumnya ada pada bangunan yang mengandalkan sistem struktur rangka kolom dan balok sebagai penahan gempa. Rangka beton bertulang dengan dinding pengisi mungkin terlihat mirip dengan konstruksi dinding bata terkekang (Bab 6), namun ini adalah dua sistem yang sama sekali berbeda.

Dinding pengisi dibuat dari pasangan bata atau batako yang direkatkan dengan mortar. Meskipun memiliki jendela dengan bukaan kecil, dinding pengisi biasanya lebih kaku dan kuat terhadap gerakan horizontal akibat gempa daripada struktur rangka utama. Kadangkala dinding pengisi dapat mengurangi kerusakan akibat gempa, namun seringkali malah memperburuk.

Saat rangka kolom dan balok mengalami guncangan gempa, semua elemen akan melentur dan struktur bergerak ke samping (Gambar 1a). Namun, jika bukaan rangka kolom dan balok terisi, dinding pengisi akan membatasi lenturan kolom dan balok. Dinding pengisi akan menerima gaya tekan diagonal yang besar. Retakan diagonal juga dapat terbentuk. Gaya tekan memberikan tekanan pada bagian atas dan bawah kolom, seringkali menyebabkan kerusakan (Gambar 1b). Retak diagonal meningkatkan kerentanan dinding pengisi terhadap guncangan tegak lurus terhadap bidang dinding. Sebagian atau seluruh dinding pengisi dapat jatuh dari bangunan (Gambar 2). Cari gambar “masonry infill earthquake damage” di internet untuk informasi lebih lanjut.



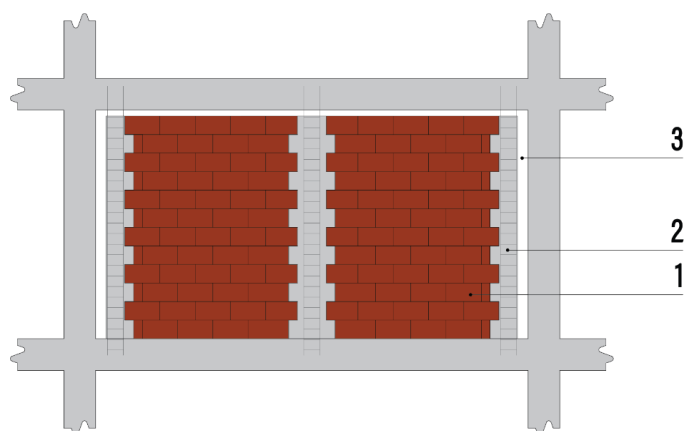
Gambar 1. (a) Tampak rangka terbuka kolom balok melentur ke samping saat gempa (1). (b) Memperlihatkan bagaimana dinding pengisi (2) mencegah lenturan, mengalami strut tekan diagonal (3) dan retak diagonal (4).



Gambar 2. Dinding pengisi yang rusak akibat gempa, beberapa di antaranya telah jatuh dari bangunan.

Dinding pengisi dapat meningkatkan keamanan bangunan terhadap gempa, tetapi hanya jika kondisi berikut dipenuhi. Dinding pengisi yang berada di arah memanjang dan melintang bangunan haruslah simetris, dan harus menerus dari lantai dasar hingga ke atap. Juga, dinding harus diperkuat terhadap guncangan yang tegak lurus dengan bidangnya seperti yang akan dibahas selanjutnya. Terakhir, kolom dan balok, serta dinding pengisi itu sendiri, perlu dirancang oleh insinyur sipil yang berkualifikasi.

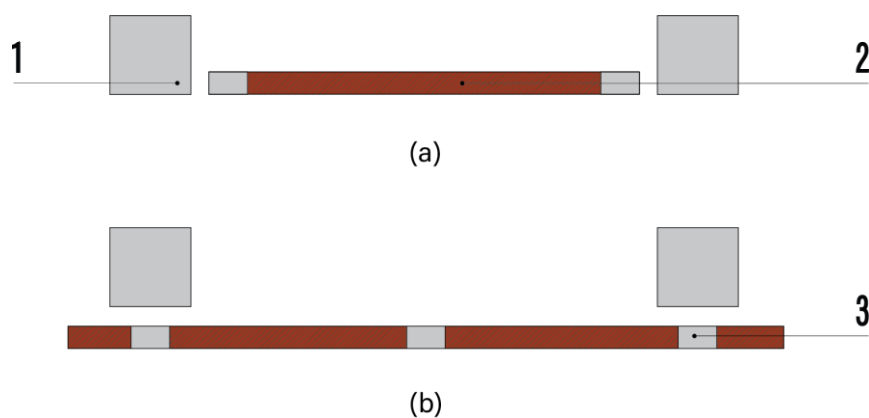
Jika kondisi ini tidak terpenuhi, dinding pengisi akan mengalami kerusakan dan menyebabkan kerusakan serius pada kolom-kolom yang berdekatan dengannya. Pilihan rancangan untuk konstruksi dinding pengisi aman gempa terbatas. Sejauh ini, pilihan terbaik adalah mengganti dinding pengisi dengan bahan ringan yang tidak mudah terbakar dan lebih fleksibel, seperti papan gipsum. Sebagai alternatif lain, dapat digunakan kaca (*glazing*) dengan menyediakan ruang gerak di sekeliling semua panel kaca. Dengan demikian, korban jiwa dan kerusakan pada struktur utama dapat dicegah. Pilihan lain saat diperlukan dinding solid, adalah dengan memisahkan dinding pengisi dari kolom dan balok di sekitarnya dengan menggunakan celah sempit yang diisi dengan bahan yang dapat mampat (Gambar 3). Celah memungkinkan kolom dan balok melentur, tetapi diperlukan perkuatan atau braket baja untuk menstabilkan dinding terhadap guncangan yang tegak lurus dinding. Pilihan lainnya adalah dengan menempatkan dinding di depan atau di belakang kolom, sehingga kolom dan balok dapat bebas melentur (Gambar 4 dan 5).



*Gambar 3. Dinding pengisi pasangan bata (1), diperkuat terhadap guncangan tegak lurus bidang dengan kolom praktis (2), dan dipisahkan dari kolom dan balok dengan celah sempit (3) yang kemudian diisi dengan bahan lunak dan ditutup dengan lapisan penutup (*flashing*).*



Gambar 4. Contoh kolom praktis untuk menstabilkan dinding pasangan bata (S.Brzev).



Gambar 5. (a) Tampak atas kolom (1) yang terpisah dari dinding pengisi (2) yang memiliki kolom praktis di tiap ujungnya untuk stabilitas. (b) Dinding pasangan bata dengan kolom praktis (3) yang digeser dari kolom struktural agar tidak menghalangi lenturan kolom struktural.

Daftar Pustaka

Charleson, A. W., 2008. Seismic design for architects: outwitting the quake. Oxford, Elsevier, pp. 159-168.

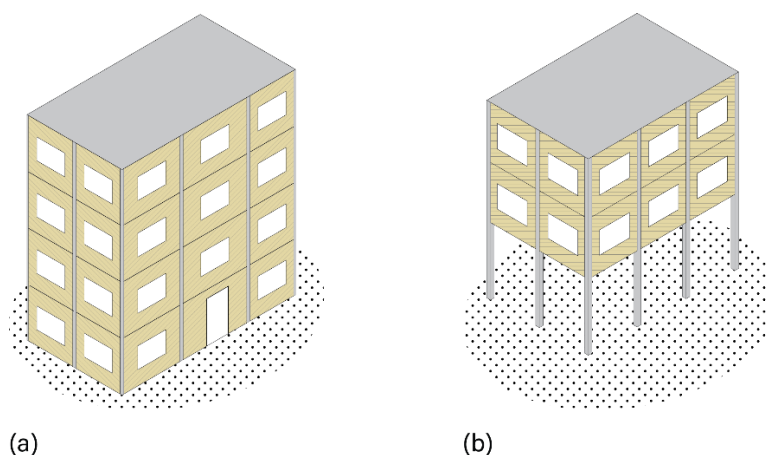
Infilled frame. Glossary for GEM Taxonomy. Global Earthquake Model. <https://taxonomy.openquake.org/terms/infilled-frame>.

Murty, C. V. R., et al., 2006. At risk: the seismic performance of RC frame buildings with masonry infill walls. California, World Housing Encyclopedia. http://www.world-housing.net/wp-content/uploads/2011/05/RCFrame_Tutorial_English_Murty.pdf (diakses 8 Juni 2020).

Semnani, S. J., Rodgers, J. E., and Burton, H. V., 2014. Seismic Design Guidance for New Reinforced Concrete Framed Infill Buildings. Geohazards International. https://4649393f-bdef-4011-b1b6-9925d550a425.filesusr.com/ugd/08dab1_5710341c7b304eef9d79bfd50efe839a.pdf (diakses 8 Juni 2020).

12. Tingkat Lunak (*Soft Story*): Kelemahan Struktur yang Harus Dihindari

Bandingkan kedua bangunan pada Gambar 1. Kolom dan balok kedua bangunan cukup kuat untuk menahan beban vertikal ke bawah. Tapi bagaimana perilaku kedua bangunan ketika gaya horizontal terjadi? Angin menyebabkan gaya horizontal, tetapi gaya terbesar terjadi akibat gempa bumi ketika tanah mengguncang bangunan bolak balik di setiap arah horizontal.



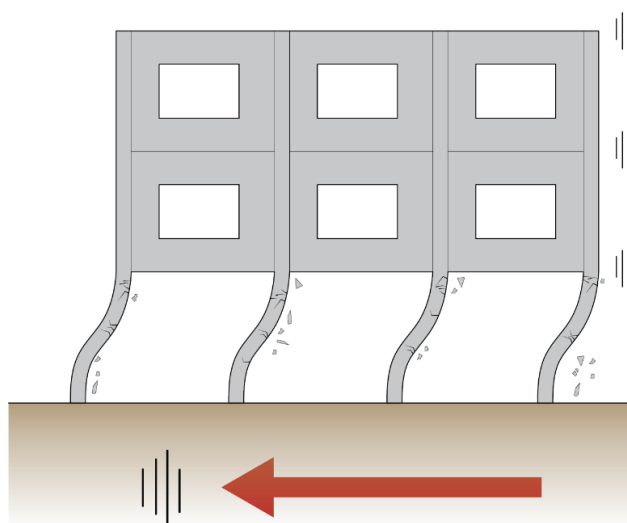
Gambar 1. Pada bangunan (a) dinding pengisi ada di setiap lantai, tetapi pada (b) dinding ini tidak ada di lantai dasar sehingga lantai dasar terbuka.

Bangunan pertama (Gambar 1a) relatif kuat terhadap gaya horizontal. Pada setiap lantai, kombinasi kolom dan balok beton bertulang, bersama dengan dinding pengisi dan partisi, bekerja sama untuk menahan gaya gempa horizontal. Setiap lantai tampaknya memiliki kekuatan yang sama. Namun berbeda sekali dengan bangunan kedua (Gambar 1b) yang tidak memiliki dinding penguat di lantai dasar. Sehingga lantai ini menjadi jauh lebih lemah daripada lantai di atasnya. Idealnya, lantai-lantai terbawah dari sebuah bangunan lebih kuat daripada lantai di atasnya. Perhatikan bentuk batang pohon (Gambar 2). Batang pohon umumnya paling kuat di permukaan tanah karena di situlah beban tertinggi akibat angin kencang. Bangunan harus mengikuti prinsip yang sama, dimana bagian terkuat berada di level permukaan tanah.



Gambar 2. Batang pohon umumnya paling kuat di permukaan tanah.

Saat bangunan kedua (Gambar 1b) diguncang gempa, kerusakan terjadi di area terlemah, yaitu kolom lantai dasar (Gambar 3). Kolom melentur ke samping hingga rusak. Tingkat kerusakan sering sedemikian rupa sehingga kolom tidak dapat lagi menopang berat bangunan. Kolom patah dan bangunan runtuh. Lantai terbawah hancur seluruhnya. Mungkin beberapa lantai di atas juga mengalami kerusakan yang sama. Korban jiwa tidak bisa dihindari.



Gambar 3. Kolom-kolom pada tingkat lunak melentur berlebihan dan mengalami kerusakan serius.

Tingkat lunak atau lemah hampir selalu terjadi pada gempa yang merusak (Gambar 4). Gambar-gambar terkait "soft story building" dapat dicari di internet. Meskipun demikian, jenis kerusakan ini dapat dicegah. Jika insinyur dan arsitek mengikuti peraturan bangunan yang berlaku dan pedoman dalam merancang dan mengkonstruksi bangunan baru, maka tingkat lunak dapat dihindari.



Gambar 4. Bangunan bertingkat lunak ini kehilangan lantai dasarnya akibat gempa (N. Vesho).

Bagaimana dengan bangunan lama (existing building) yang memiliki tingkat lunak (Gambar 5)? Bangunan ini masih mungkin ditingkatkan kinerjanya dalam menahan gempa. Beberapa kota di berbagai negara telah memulai program perkuatan bangunan (retrofitting). Namun, perkuatan mungkin melibatkan penambahan sistem struktur baru, seperti rangka terbreis atau dinding geser. Perkuatan ini seringkali sulit bagi kontraktor, tidak nyaman bagi penghuni, dan mahal. Jauh lebih baik untuk menghindari tingkat lunak pada konstruksi baru dengan kerjasama yang baik antara arsitek dan insinyur sipil, sehingga biaya konstruksi hanya sedikit meningkat atau tidak sama sekali.



Gambar 5. Tipikal bangunan dengan tingkat lunak, dimana lantai dasar adalah yang terlemah.

Daftar Pustaka

Charleston, A. W., 2008. Seismic design for architects: outwitting the quake. Oxford, Elsevier, pp. 144-148.

Murty, C. V. R., 2005. Why are Open-Ground Storey Buildings Vulnerable in Earthquakes? Earthquake Tip 21. IITK-BMTPC "Learning earthquake design and construction", NICEE, India. <http://www.iitk.ac.in/nicee/EQTips/EQTip17.pdf> (diakses 5 Mei 2020).

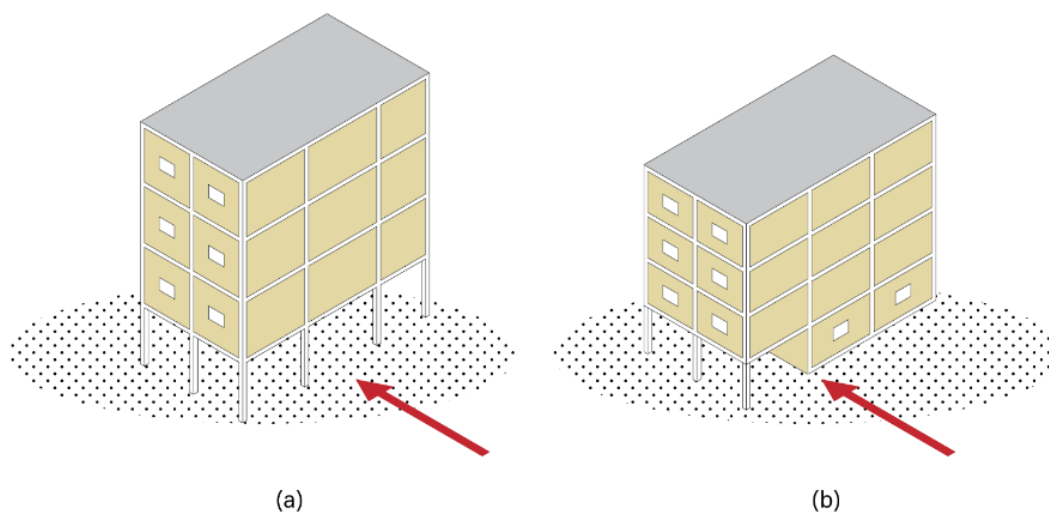
Soft Storey. Glossary for GEM Taxonomy. Global Earthquake Model. <https://taxonomy.openquake.org/terms/soft-storey-sos#>.

13. Dinding Tak Menerus: Kelemahan Struktur yang Harus Dihindari

Untuk bangunan yang menggunakan struktur dinding sebagai penahan beban gempa, sangat penting bahwa dinding tersebut harus dibangun secara menerus dari fondasi hingga ke level atap. Prinsip ini diterapkan untuk semua jenis material bangunan, termasuk dinding beton bertulang dan dinding pasangan bata. Hal tersebut juga berlaku untuk dinding pengisi yang bukan merupakan elemen struktur. Kekuatan dan kekakuan dari dinding pengisi membuatnya bertindak seperti elemen struktur meskipun tidak dirancang sebagai elemen struktur bangunan.

Ada dua tipe tata letak dinding tak menerus. Yang pertama adalah kondisi dimana struktur rangka kolom dan balok diisi oleh dinding kecuali pada lantai dasar (Gambar 1a). Struktur tersebut terbuka pada lantai dasar. Susunan seperti ini kemungkinan besar akan menyebabkan kegagalan tingkat lunak ketika terjadi gempa besar. Bahaya dari kegagalan tingkat lunak telah dijelaskan pada Bab 12.

Tipe kedua dinding tak menerus terjadi ketika dinding pengisi terdapat pada setiap lantai, tetapi pada lantai dasar agak masuk ke dalam bangunan (*setback*) dibandingkan dengan dinding pada lantai-lantai di atasnya (Gambar 1b). Dengan kata lain, dinding pada lantai di atas terlihat menonjol keluar dibandingkan dinding pada lantai di bawahnya (Gambar 2). Ketidakteraturan ini menyebabkan kelemahan lokal yang serius pada dinding, khususnya ketika dinding tersebut menerima gaya gempa horizontal.



Gambar 1. Dua tipe dinding tak menerus. Pada (a) tidak terdapat dinding pengisi pada lantai dasar, dan pada (b) tata letak dinding pengisi di lantai dasar tidak sama dengan dinding di lantai atasnya.



Gambar 2. Bangunan-bangunan dengan dinding pengisi tak menerus tampak di sepanjang jalan.

Dinding tak menerus ini dapat disamakan dengan batang pohon yang bengkok (Gambar 3). Angin kencang dapat menyebabkan pohon kayu tersebut patah pada bagian yang bengkok tersebut. Sama halnya dengan bangunan, gaya-gaya yang bekerja pada struktur tidak bisa berubah secara tiba-tiba. Bagaimana cara mengatasi masalah tersebut?



Gambar 3. Batang pohon yang bengkok sehingga memiliki kelemahan local.

Pendekatan terbaik adalah memastikan dinding tak menerus tersebut adalah non-struktural. Sistem rangka balok kolom harus dirancang untuk menahan seluruh gaya gempa horizontal. Dinding tak menerus harus dirancang terbuat dari material ringan yang tidak mudah terbakar seperti papan gipsium atau kaca. Material tersebut terlalu lemah untuk berfungsi sebagai elemen struktur penahan beban gempa. Sebagai alternatif, dinding pasangan bata tak menerus dapat dipisahkan dari struktur rangka untuk mencegah dinding tersebut berfungsi sebagai elemen struktur (Bab 11).

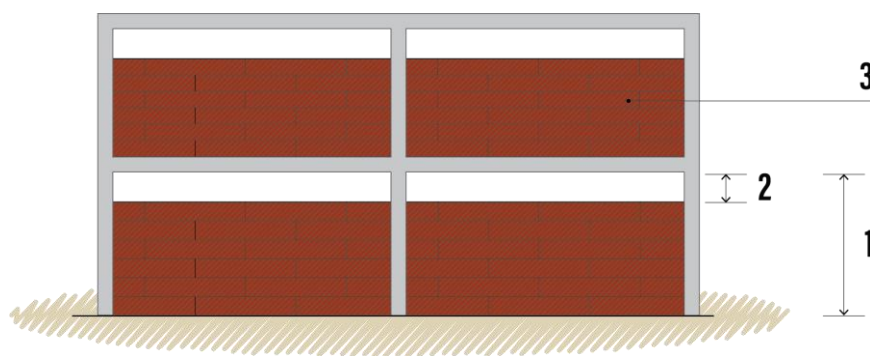
Daftar Pustaka

Charleson, A. W., 2008. Seismic design for architects: outwitting the quake. Oxford, Elsevier, pp. 151-153.

14. Kolom Pendek: Kelemahan Struktur yang Harus Dihindari

Dalam memikul beban bangunan, kolom yang langsing dapat menimbulkan masalah karena rentan terhadap tekuk. Namun, dari perspektif perancangan bangunan aman gempa, kolom yang pendek dapat menyebabkan kelemahan struktural yang kritis. Meski bahayanya tidak sebesar tingkat lunak, kinerja kolom pendek sangat buruk saat gempa.

Kolom pendek umumnya terbentuk jika dinding pengisi tidak setinggi kolom pada suatu sistem rangka kolom dan balok (Gambar 1 dan 2). Saat gempa dengan guncangan horizontal bolak-balik, bagian bawah kolom yang tertahan oleh dinding pengisi tidak dapat melentur dengan bebas, sehingga semua gerakan horizontal terjadi pada bagian atas kolom yang tidak dibatasi oleh dinding pengisi. Inilah masalahnya!

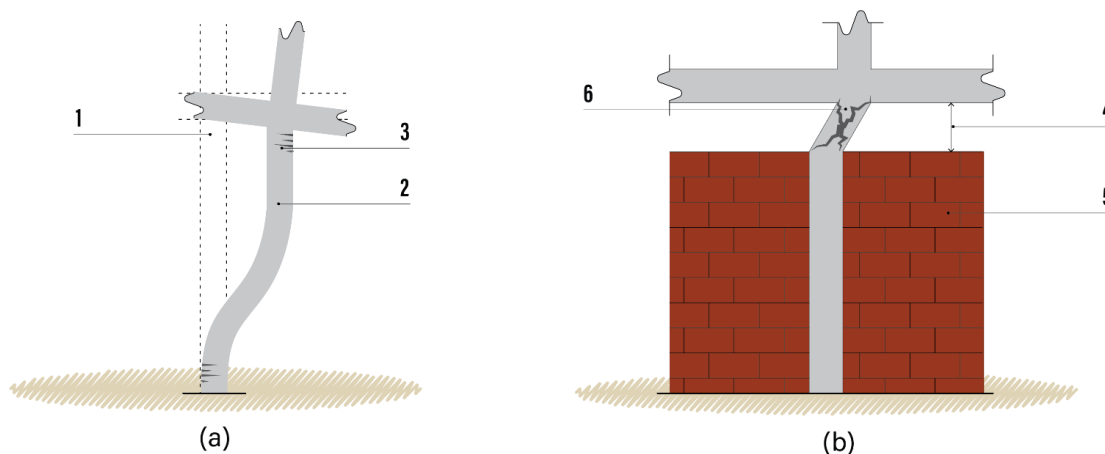


Gambar 1. Tampak bangunan dengan kolom pendek. Kolom tidak melentur pada seluruh ketinggiannya (1), melainkan hanya melentur setinggi bukaan (2) akibat adanya dinding pengisi (3).



Gambar 2. Tinggi kolom normal menjadi berkurang dalam menahan gaya horizontal akibat adanya dinding pengisi yang tidak setinggi kolom.

Kolom normal yang tidak memiliki dinding pengisi dapat melentur secara fleksibel saat gempa. Dalam proses melentur tersebut, kolom mengalami keretakan minor yang tidak berbahaya. Tetapi jika kolom terkekang sebagian oleh dinding pengisi, pergerakan yang seharusnya terjadi di seluruh tinggi kolom akan terkonsentrasi pada 'kolom pendek' di bagian atas (Gambar 3). Pergerakan horizontal yang terjadi pada jarak vertikal yang sangat pendek menyebabkan kerusakan struktural yang parah pada kolom pendek. Kolom pendek terlalu kaku untuk melentur sehingga keruntuhan yang terjadi adalah keruntuhan geser, dimana kolom patah. Hal ini ditandai dengan terbentuknya keretakan diagonal pada area yang rusak (Gambar 4). Kerusakan ini tidak dapat diperbaiki dan mengakibatkan bangunan harus dibongkar. Gambar-gambar kerusakan seperti ini dapat ditemukan online dengan kata "short column effect".



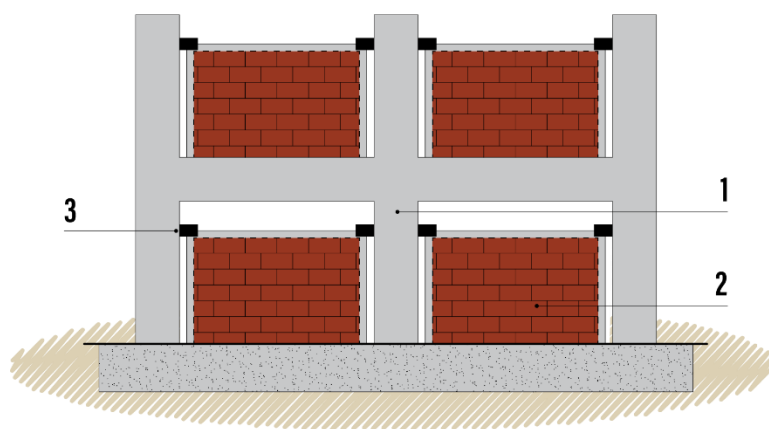
Gambar 3. (a) Saat gempa, kolom normal (1) melentur di seluruh tingginya (2). Dalam prosesnya terbentuk keretakan minor (3). (b) Bukaan atas (4) dan dinding pengisi (5) menyebabkan keretakan diagonal yang serius pada kolom pendek (6) yang dapat menyebabkan kegagalan kolom.



Figure 1. Kerusakan pada kolom pendek akibat gempa

Ada beberapa metode untuk menghindari kolom pendek. Yang pertama, lebar bukaan dikurangi sehingga tepi bukaan jauh dari kolom. Kedua, dinding pengisi dibuat dari material ringan yang tidak mudah terbakar, seperti papan gipsum, yang terlalu lemah untuk membatasi bagian bawah kolom sehingga kolom dapat melentur secara normal. Terakhir, jika diperlukan dinding pengisi dari bata

dengan tinggi yang tidak penuh, maka dinding tersebut harus dipisahkan secara fisik dari kolom dengan suatu celah vertikal. Celah ini memerlukan perlakuan khusus untuk menjamin ketahanan terhadap cuaca. Braket baja diperlukan untuk menstabilkan dinding pengisi sehingga selama guncangan gempa tidak jatuh (Gambar 5).



Gambar 5. Sistem rangka beton bertulang dengan potensi kolom pendek (1) yang terbentuk kolom ikat dan balok ikat serta dinding pengisi bata (2) pada sebagian tinggi kolom. Dinding pengisi dipisahkan dari rangka dengan celah vertikal, dan ditahan di sudut-sudut atasnya dengan braket baja yang dibaut ke kolom (3). Braket memungkinkan pergerakan antara kolom dan dinding, tetapi mencegah dinding jatuh saat gempa.

Daftar Pustaka

Charleson, A. W., 2008. Seismic design for architects: outwitting the quake. Oxford, Elsevier, pp. 148-151.

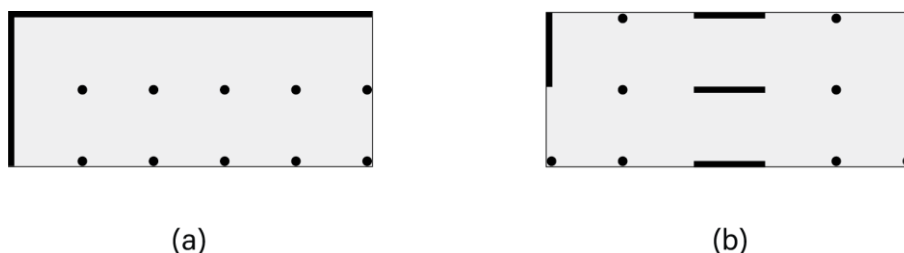
Murty, C. V. R., 2005. Why are Short Columns more Damaged During Earthquakes? Earthquake Tip 22. IITK-BMTPC "Learning earthquake design and construction", NICEE, India. <http://www.iitk.ac.in/nicee/EQTips/EQTip17.pdf> (diakses 5 Mei 2020).

Short Column. Glossary for GEM Taxonomy. Global Earthquake Model. <https://taxonomy.openquake.org/terms/short-column-shc>.

Video: Captive column by Cale Ash, Academy of Earthquake Safety. <https://www.youtube.com/watch?v=kRG3XwOvzuo>.

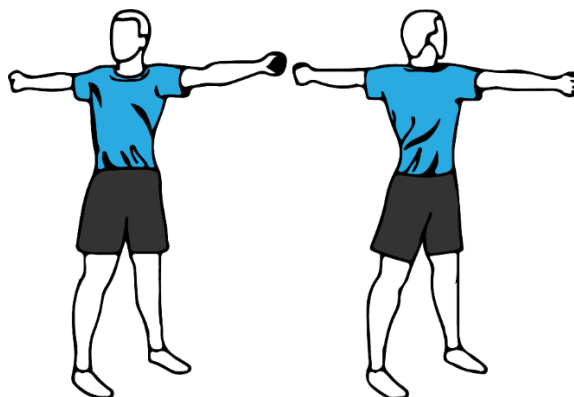
15. Mencegah Puntir pada Bangunan Saat Gempa

Pada dasarnya semua bangunan mengalami puntir saat gempa. Puntir berarti bagian atas bangunan berotasi terhadap bagian bawahnya jika ditinjau dari denah bangunan. Puntir akan lebih parah jika denah sistem struktur bangunan tidak simetris (Gambar 1a). Puntir terjadi karena gaya-gaya pada sistem struktur yang tidak simetris ini menghasilkan torsi.



Gambar 1. Dua denah bangunan. Pada (a) gaya gempa pada arah memanjang dan melintang ditahan oleh dinding yang tidak simetris di sisi bangunan. Bangunan ini akan mengalami puntir yang besar saat gempa. Pada (b) dinding diletakkan simetris di kedua arah. Puntir yang dialami bangunan akan lebih kecil dengan konfigurasi seperti ini.

Untuk memahami persoalan ini, cobalah eksperimen berikut. Gunakan badan kita untuk merasakan apa yang terjadi pada bangunan saat mengalami puntir. Pertama, berdiri tegak dan rentangkan tangan kita ke samping. Lalu, putar kepala dan bahu ke kiri atau kanan (Gambar 2). Kita akan merasakan torsi saat badan kita mengalami puntir.



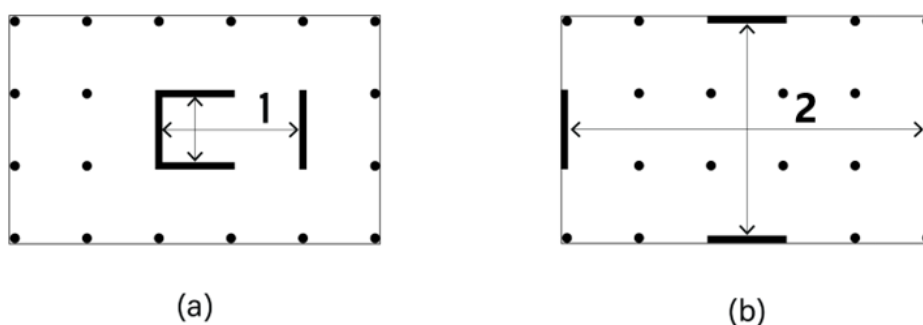
Gambar 2. Gerakan memuntir badan untuk merasakan torsi.

Ketika kita merentangkan tangan dan memuntir tubuh, perhatikan seberapa jauh tangan kita bergerak, dan bandingkan dengan badan kita. Bayangkan badan kita sebagai inti (*core*) struktur dari bangunan yang jauh lebih luas (Gambar 3) dengan lebar bangunan sampai ke ujung jari, dimana terdapat beberapa kolom di sepanjang tangan kita yang menopang lantai bangunan. Ketika kita memuntir, kolom yang paling jauh dari inti bangunan akan bergerak lebih banyak. Jika gerakan ini terjadi secara berlebihan, kolom-kolom ini akan mengalami kerusakan parah dan mungkin tidak mampu lagi menopang beban bangunan.



Gambar 3. Contoh bangunan beton bertulang yang sedang dibangun dan tampak struktur inti berupa dinding geser.

Ada dua cara untuk mengontrol torsi dan mengurangi kerusakan kolom. Pertama, dinding struktural dan sistem rangka balok kolom ditempatkan secara simetris pada denah lantai (Gambar 1b). Kedua, pada arah memanjang dan melintang bangunan disediakan setidaknya dua elemen struktural vertikal yang kuat dan terpisah satu sama lain. Jika kedua elemen ini ditempatkan di sisi luar bangunan, maka torsi dapat dikontrol dengan lebih efektif (Gambar 4b). Elemen ini mencegah pergerakan kolom berlebihan dan menghindari kerusakan.



Gambar 4. Dua denah lantai bangunan. Pada (a) gaya gempa pada arah memanjang dan melintang ditahan oleh dua dinding yang terpisah tetapi tidak cukup jauh (1). Pada (b) dinding di arah memanjang dan melintang dipisahkan sejauh mungkin (2) dan memberikan kontrol terbaik terhadap torsi.

Daftar Pustaka

Charleson, A. W., 2008. Seismic design for architects: outwitting the quake. Oxford, Elsevier, pp. 128-132.

Murty, C. V. R., 2005. How Buildings Twist During Earthquakes?: Earthquake Tip 7. IITK-BMTPC “Learning earthquake design and construction”, NICEE, India. <http://www.iitk.ac.in/nicee/EQTips/EQTip07.pdf> (diakses 5 Mei 2020).

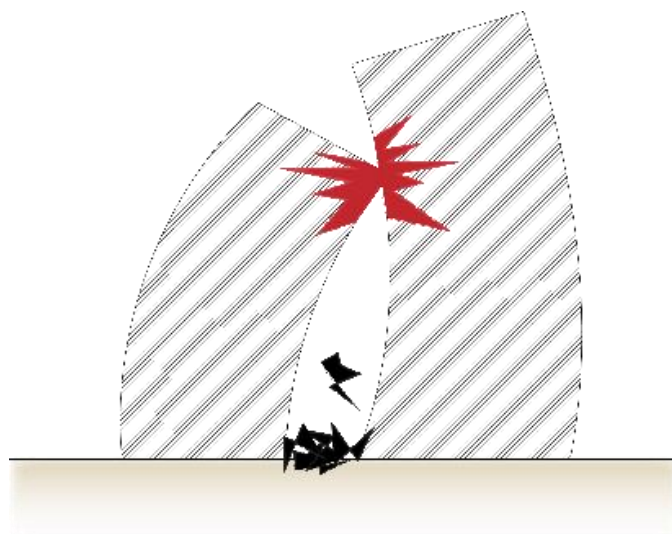
Torsion eccentricity. Glossary for GEM Taxonomy. Global Earthquake Model. <https://taxonomy.openquake.org/terms/torsion-eccentricity-tor>.

16. Mengapa Bangunan Saling Berbenturan Saat Gempa Bumi

Apa yang terjadi jika kita bepergian dengan transportasi umum yang padat, seperti bus atau kereta api? Kita mungkin berdiri dekat dengan orang lain tetapi tidak saling menyentuh. Namun, saat bus berubah kecepatan atau arah, kita dan penumpang lain dapat berbenturan.

Hal seperti ini dapat terjadi saat gempa bumi. Ketika tanah berguncang, bangunan ikut berguncang. Tetapi bangunan tidak selalu berguncang bersamaan atau pada fase getaran yang sama. Setiap bangunan unik dan akan bergerak secara berbeda saat terjadi gempa. Setiap bangunan juga memiliki frekuensi getar yang berbeda sehingga beresonansi terhadap frekuensi yang berbeda. Akibatnya, gerakan bolak-balik yang terjadi memiliki dampak yang berbeda untuk setiap bangunan, dan semakin terasa dengan peningkatan tinggi bangunan.

Jika dibangun terlalu berdekatan satu sama lain, gerakan bangunan yang berbeda saat gempa dapat menyebabkan bangunan berbenturan (*pounding*), yang terkadang menyebabkan kerusakan serius (Gambar 1 dan 2). Pencarian online untuk gambar dengan kata kunci "earthquake building pounding" menghasilkan banyak contoh kerusakan akibat benturan yang terjadi akibat berbagai gempa bumi di seluruh dunia.

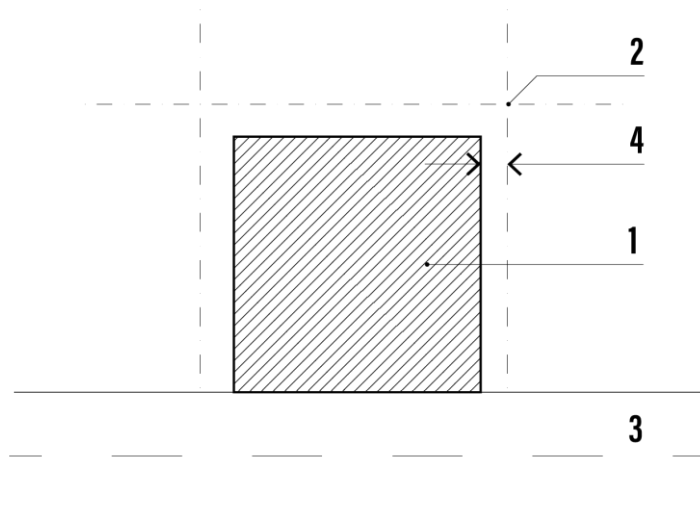


Gambar 1. Dua bangunan yang berjarak tidak cukup lebar satu sama lain saling berbenturan saat terjadi gempa.

Prinsip pencegahan terjadinya benturan antar bangunan untuk bangunan baru sangat sederhana – buatlah bangunan lebih kecil dari batas lahan, dan tidak berada pada tepi lahan (Gambar 3). Celah yang disediakan di sepanjang sisi bangunan harus cukup lebar, sehingga saat terjadi gempa setiap bangunan tidak bergoyang melewati batas lahannya. Celah ini disebut sebagai celah seismik (*seismic gap*). Penyediaan celah semacam ini umum dilakukan di seluruh dunia.



Gambar 2. Dua bangunan saling berbenturan, dimana salah satu bangunan mengalami kerusakan yang lebih parah daripada bangunan lainnya.



Gambar 3. Denah bangunan (1) dengan batas lahan (2) dan tepi jalan (3). Bangunan dibangun lebih ke dalam dari batas lahan, sehingga terdapat celah seismik pada ketiga sisinya (4).

Lebar celah seismik yang diperlukan tergantung pada ketinggian bangunan dan kekakuannya. Untuk bangunan paling fleksibel yang diizinkan oleh peraturan gempa, celah seismik ke batas lahan adalah 2% dari ketinggian bangunan. Untuk bangunan empat lantai dengan ketinggian 12 m, celah seismik yang diperlukan adalah 240 mm. Penggunaan celah seismik yang lebih kecil dapat dilakukan jika bangunan dirancang lebih kaku, misalnya dengan kolom dan balok yang lebih besar, atau dengan dinding struktural yang lebih lebar. Jika jarak antara bangunan yang berdampingan cukup dekat, celah seismik dapat ditutupi oleh pelat tipis yang fleksibel (Gambar 4 dan 5).



Gambar 4. Dua bangunan yang dipisahkan oleh celah seismik, yang ditutupi oleh pelat tipis yang fleksibel.



Gambar 5. Tampak dekat dari pelat tipis yang menutupi celah seismik.

Sangat sulit untuk mencegah benturan antar bangunan eksisting dengan celah seismik yang sempit atau tidak ada sama sekali, ketika terjadi gempa kuat. Jika lantai antar bangunan yang berdekatan sejajar, benturan pelat lantai antara satu dengan lainnya umumnya lebih tidak merusak dibandingkan jika lantai bangunan yang berdekatan tidak berada pada level yang sama. Dalam hal ini, pelat lantai dari salah satu bangunan dapat merusak kolom dari bangunan lainnya. Salah satu solusinya adalah menyediakan kolom 'cadangan' jika kolom eksterior atau kolom yang paling rentan mengalami kerusakan.

Daftar Pustaka

Charleson, A. W., 2008. Seismic design for architects: outwitting the quake. Oxford, Elsevier, pp. 137-139.

Pounding potential. Glossary for GEM Taxonomy. Global Earthquake Model. <https://taxonomy.openquake.org/terms/pounding-potential-pop>.

17. Peraturan dan Standar Konstruksi

Tujuan dari peraturan dan standar konstruksi adalah untuk memastikan, yang pertama, bahwa bangunan aman. Kedua, bangunan bebas dari cacat seperti balok yang melendut berlebihan selama masa pakainya, dengan menggunakan material secara efisien.

Peraturan dan standar umumnya dibuat oleh suatu tim ahli dari perguruan tinggi, praktisi keinsinyuran, lembaga pemerintah, dan kontraktor. Penyusunan peraturan dan standar didasarkan pada penelitian dan pengalaman terkait (Gambar 1). Selain itu, tim ahli juga memperhatikan perkembangan terbaru di luar negeri, yang dapat dimasukkan ke dalam peraturan atau standar yang baru jika dipandang sesuai dengan kondisi lokal. Sehingga ketika diterbitkan, sebuah peraturan mencerminkan rekomendasi mutakhir untuk konstruksi yang aman, tahan lama, dan ekonomis.



Gambar 1. Contoh penelitian dimana kolom dan balok beton bertulang skala penuh sedang diuji di laboratorium.

Seperti pada industri lain, industri konstruksi selalu mengalami perubahan. Material baru, teknik konstruksi baru, dan pendekatan perancangan baru terus dikembangkan (Gambar 2). Perubahan dan inovasi muncul dari peneliti dan kontraktor. Dengan demikian, peraturan dan standar perlu diperbarui secara berkala. Jika hal ini tidak dilakukan, bangunan dapat menjadi tidak aman atau tidak ekonomis.



Gambar 2. Bangunan ini memperlihatkan contoh inovasi berupa penggunaan beton pracetak.

Peraturan menetapkan standar praktik terbaik konstruksi. Aturan-aturannya wajib diikuti untuk kebaikan kita sendiri sebagai pemilik ataupun penghuni bangunan gedung, dan untuk kebaikan masyarakat luas. Kegagalan untuk mematuhi standar tertentu dapat berakibat serius. Bayangkan apa yang dapat terjadi dalam situasi lain di mana standar tidak diikuti. Misalnya seorang dokter memeriksa kita ketika sakit. Jika dokter mengambil jalan pintas untuk menghemat waktu, seperti tidak mengukur tekanan darah atau tidak meminta rontgen sementara tindakan tersebut seharusnya dilakukan, diagnosis-nya mungkin salah. Sehingga, obat yang diresepkan tidak akan efektif dan penyakit akan semakin parah. Peraturan dan standar medis yang ada melindungi kita.

Mengikuti peraturan sangatlah penting terutama ketika situasi yang dihadapi rumit, dan pengetahuan serta pengalaman kita terbatas. Contohnya merancang dan membangun bangunan tahan gempa. Banyak insinyur sipil, arsitek, dan kontraktor yang belum pernah secara langsung menyaksikan apa yang terjadi pada bangunan saat gempa – bagaimana bangunan mengalami kerusakan yang semakin parah hingga akhirnya runtuh. Banyak juga tenaga ahli bangunan yang belum pernah secara langsung mengamati uji eksperimental di laboratorium terhadap elemen bangunan, seperti kolom dan balok, yang dikenai beban gempa. Peraturan mengisi kekurangan kita dalam hal pengalaman, pengetahuan dan kearifan tentang gempa. Mengikuti peraturan adalah satu-satunya cara untuk mendapatkan konstruksi yang aman.

Peraturan memberikan panduan pada setiap tahap perancangan dan konstruksi bangunan (Gambar 3). Insinyur sipil dan arsitek harus mematuhi standar tertentu selama tahap perancangan dan konstruksi. Kontraktor juga harus memastikan material dan metode konstruksi mengikuti standar. Mengikuti standar adalah untuk kebaikan kita sendiri. Jika kita melakukan kesalahan atau mengambil jalan pintas, maka bangunan kita mungkin sekali tidak aman pada saat gempa.

Peraturan dan standar harus selalu dipatuhi!



Gambar 3. Fondasi bangunan yang sedang dibangun. Insinyur harus mengikuti peraturan untuk menentukan jumlah baja tulangan serta lokasinya yang benar.

18. Apa yang Perlu Diperhatikan dalam Peraturan Bangunan

Peraturan bangunan adalah ketentuan untuk bangunan. Peraturan ini dibuat untuk melindungi kita semua, mendukung terciptanya lingkungan yang aman dan sehat, serta memastikan berdirinya bangunan yang aman untuk tempat tinggal, bekerja, berbelanja, beribadah, dan lain-lain. Peraturan bangunan mencerminkan bahwa bangunan dapat dirancang agar aman terhadap gempa bumi dan memuat ketentuan-ketentuan untuk mencapai tujuan tersebut.

Jadi, apa yang kita harapkan dari peraturan bangunan? Apa yang dapat membuat peraturan bangunan lebih efektif untuk menghasilkan bangunan yang aman? Berikut adalah lima hal yang perlu dipenuhi:

1. **Mencerminkan situasi dan harapan masyarakat:** Peraturan harus sesuai untuk masyarakat secara keseluruhan, baik situasi budaya dan ekonomi, maupun harapan masyarakatnya (Gambar 1). Standar yang diberlakukan di Indonesia mungkin tidak setinggi di negara-negara berpenghasilan tinggi. Akan tetapi, seperti yang disepakati oleh berbagai pemangku kepentingan, standar tetap harus sesuai dengan kondisi lokal dan terjangkau. Peraturan juga diperlukan untuk menangani praktik konstruksi umum yang tidak melibatkan para profesional atau insinyur, konstruksi tradisional, termasuk konstruksi bertahap (Gambar 2).



Gambar 1. Masyarakat ingin tinggal pada bangunan yang aman terhadap gempa bumi.

2. **Adil untuk semua pihak:** Peraturan harus adil bagi semua orang. Peraturan tidak boleh memihak salah satu pihak, baik di luar ataupun di dalam industri konstruksi, seperti produsen bahan bangunan yang mungkin mendapat manfaat dari peraturan tertentu.
3. **Mudah diakses dan jelas untuk dipahami:** Peraturan bangunan harus mudah diakses oleh publik dan pemangku kepentingan industri konstruksi, seperti insinyur sipil, arsitek, dan kontraktor. Dokumen yang dapat diakses juga diperlukan untuk tujuan pelatihan. Peraturan bangunan dapat dibuat tersedia secara daring. Peraturan ini juga harus jelas. Pembaca harus dapat memahami dan menafsirkan persyaratan dan ketentuan yang ada dalam peraturan. Tujuannya adalah untuk keterbukaan dan transparansi.



Gambar 2. Peraturan dan penerapannya diperlukan untuk meningkatkan keamanan bangunan seperti ini terhadap gempa.

- 4. Responsif terhadap perubahan keadaan dan informasi baru:** Meskipun industri konstruksi berubah lebih lambat dibandingkan beberapa industri lain, seperti teknologi informasi, peraturan bangunan tetap harus selalu diperbarui. Jika tidak, peraturan dapat menghambat inovasi dan mengurangi peluang tercapainya praktik konstruksi yang lebih terjangkau dan efisien. Selain itu, praktik konstruksi yang dianggap tidak aman oleh penelitian terbaru perlu diperbaiki. Peraturan bangunan perlu mencerminkan pengetahuan terkini, serta kompetensi dan praktik industri konstruksi (Gambar 3).



Gambar 3. Peraturan bangunan perlu menentukan cara yang aman namun praktis dalam penggunaan material baru, seperti bata ringan ini.

5. **Bagian dari regulasi yang lebih luas:** Peraturan bangunan memerlukan dukungan hukum dan administrasi. Penerapan peraturan memerlukan edukasi dan penegakan hukum. Edukasi kepada seluruh pemangku kepentingan mengenai bangunan aman gempa memerlukan masukan dari penyelenggara pendidikan di setiap level industri konstruksi, serta dari kalangan profesional. Pemerintah dapat membantu, tetapi tugas utamanya adalah menegakkan peraturan dengan cara yang hemat biaya, efisien, dan transparan.

Daftar Pustaka

Hoover, C. A. and Greene, M. eds, 1996. Construction quality, Education, and Seismic Safety. EERI, Oakland, U.S.A., 68pp.

Moullier, T., 2015. Building regulation for resilience: managing risks for safer cities. Word Bank Group and GFDRR, Washington, U.S.A. 136 pp. <https://www.preventionweb.net/publications/view/48493> (diakses 23 April 2020).

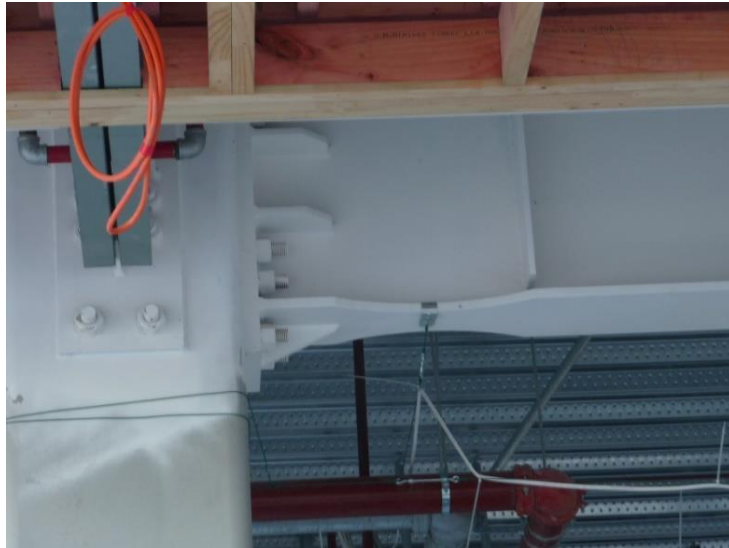
19. Apa yang Diharapkan dari Bangunan yang Dirancang Berdasarkan Peraturan

Agar bangunan aman terhadap gempa bumi, bangunan harus dirancang dan dibangun sesuai dengan peraturan setempat. Jika tidak, maka bangunan tersebut dapat rusak parah atau runtuh akibat gempa sedang hingga gempa kuat. Sekalipun sebuah bangunan sepenuhnya memenuhi peraturan bangunan, bangunan masih dapat mengalami kerusakan serius akibat gempa kuat. Beberapa alasan yang dijelaskan pada bagian selanjutnya akan menghilangkan persepsi bahwa bangunan yang memenuhi peraturan tidak akan rusak sama sekali akibat gempa.

Alasan pertama bahwa bangunan yang memenuhi peraturan tetap akan mengalami kerusakan akibat gempa kuat adalah karena peraturan menetapkan standar minimum. Jika sebuah bangunan memenuhi standar ini, bangunan dapat dianggap aman, tetapi bukan berarti sepenuhnya tidak rusak atau tahan gempa. Perancang peraturan memahami bahwa masyarakat tidak dapat mengeluarkan biaya yang terlalu tinggi untuk memperoleh bangunan yang aman terhadap gempa. Karena itu, bangunan tidak dirancang untuk skenario gempa terburuk karena kecil kemungkinannya untuk terjadi selama umur bangunan. Bangunan dirancang untuk gempa yang lebih kecil, umumnya dengan probabilitas terjadi sepuluh persen dalam lima puluh tahun. Itu sebabnya, tujuan utama peraturan bangunan adalah untuk menyelamatkan nyawa dan mengurangi korban, dan bukan melindungi bangunan itu sendiri. Ini berarti, saat gempa kuat terjadi bangunan yang memenuhi peraturan tidak boleh runtuh, tetapi akan mengalami kerusakan serius yang mungkin tidak ekonomis untuk diperbaiki.

Kedua, untuk mengurangi biaya tambahan dari konstruksi bangunan yang sangat kuat, yang tidak akan rusak sama sekali saat gempa bumi, peraturan mengizinkan insinyur untuk merancang bangunan terhadap sebagian dari kekuatan gempa yang mungkin terjadi, sehingga kerusakan kolom, balok, dan dinding tidak dapat dihindari. Meskipun mengalami kerusakan, struktur tetap dirancang untuk tidak runtuh secara tiba-tiba. Insinyur merancang elemen yang berfungsi sebagai "sekring struktural", terutama pada balok (Gambar 1). Sama seperti sekring pada rangkaian listrik yang melindungi komponen elektronik yang sensitif, sekring struktural di lokasi non-kritis seperti di ujung balok, melindungi elemen struktural yang lebih kritis, seperti kolom. Jika struktur bangunan dirancang untuk menghindari kerusakan, maka bangunan tersebut harus jauh lebih kuat. Hal ini akan menyebabkan kolom dan balok memiliki ukuran yang jauh lebih besar dari umumnya.

Terakhir, bangunan yang memenuhi peraturan akan tetap mengalami kerusakan pada dinding penutup (*cladding*) dan dinding partisi, serta benda-benda di dalamnya, termasuk peralatan mekanis. Selama gempa bumi, lantai dan atap berguncang bolak-balik. Gerakan ini merusak dinding bata dengan plesteran (Gambar 2), kecuali jika dindingnya telah dirancang dengan baik, dan juga melemparkan isi bangunan seperti peralatan dan barang-barang kecil.



Gambar 1. Bangunan yang sedang dibangun dengan kolom di sebelah kiri dan balok baja yang terhubung dengannya. Perhatikan bagaimana pelat bawah (sayap) balok yang dekat dengan kolom telah diperkecil ukurannya. Daerah pelemahan yang disengaja ini akan menjadi tempat dimana sekring struktural akan terbentuk saat gempa kuat. Baja di daerah ini akan meregang tetapi tidak patah.



Gambar 2. Contoh bangunan yang rusak akibat gempa dimana dinding pengisi tidak dirancang dengan baik untuk menerima gaya dan gerakan gempa.

Peraturan mencoba menyeimbangkan antara kemungkinan terjadinya gempa kuat dengan biaya dan implikasi lain dari perancangan bangunan. Peraturan menentukan standar minimum berdasarkan

jenis bangunan. Misalnya, rumah sakit harus dirancang dengan standar yang lebih tinggi daripada gedung perkantoran. Mengingat peraturan menentukan standar minimum, pemilik bangunan dapat meminta bangunan dirancang untuk memiliki kinerja yang lebih baik. Hal ini dapat dicapai dengan struktur yang lebih kuat dan biasanya lebih besar, atau dengan menerapkan sistem penahan gempa khusus seperti isolasi dasar (lihat Bab 24). Teknologi ini telah diterapkan di beberapa gedung di Indonesia (Gambar 3 dan 4) dan semakin banyak digunakan di gedung-gedung penting, seperti rumah sakit. Penggunaan isolasi dasar memang lebih mahal, tetapi hal tersebut merupakan salah satu cara untuk memastikan bahwa bangunan dapat beroperasi segera setelah gempa bumi, dan untuk memastikan bangunan terhindar dari kerusakan serius.



Gambar 3. Bangunan hotel di Padang yang menggunakan sistem isolasi dasar



Gambar 4. Bantalan berbentuk silinder yang terbuat dari lapisan karet dan pelat baja tipis diletakkan di antara bagian bawah setiap kolom dengan fondasinya untuk mengisolasi bangunan dari gerakan gempa horizontal.

20. Pentingnya Pemeriksaan Saat Merancang Bangunan

Kesalahan mungkin terjadi. Sebagian besar tidak berakibat serius, namun sebagian lagi dapat berakibat fatal. Kesalahan dapat muncul dari berbagai penyebab. Kesalahan mungkin tidak disengaja, akibat kurang perhatian atau konsentrasi, atau mungkin akibat kurang mengerti. Namun, kesalahan lainnya dapat disengaja, akibat mengambil jalan pintas, tidak mengikuti rencana, atau menggunakan bahan berkualitas rendah untuk keuntungan pribadi. Kesalahan yang terjadi saat proses perancangan atau pelaksanaan konstruksi (Gambar 1) mungkin tidak langsung terlihat efeknya, tapi dapat mengakibatkan bangunan runtuh ketika terjadi gempa.



Gambar 1. Kerusakan parah ketika gempa dapat terjadi pada dinding beton bertulang jika sejumlah tulangan tidak terpasang.

Untuk mengurangi kesalahan dan meningkatkan keamanan, beberapa industri menerapkan sistem pemeriksaan. Contoh yang baik adalah industri penerbangan. Membaca deskripsi pekerjaan kopilot, kita akan melihat bahwa pemeriksaan adalah bagian penting dari pekerjaan kopilot. Ada begitu banyak aspek dalam penerbangan yang perlu diperiksa dengan baik. Jika salah satu aspek terlewatkan, misalkan kebutuhan bahan bakar, maka dapat berakibat bencana besar. Daftar pemeriksaan atau *checklist* adalah alat yang penting untuk memastikan keamanan.

Tidak ada yang suka jika pekerjaannya diperiksa oleh pihak lain, tapi proses ini harus dilakukan, terutama jika kesalahan dapat berakibat fatal. Perancangan dan pelaksanaan konstruksi bangunan termasuk dalam hal ini. Meskipun seorang insinyur sipil sudah biasa merancang bangunan untuk menerima beban layan, akan lebih sulit untuk merancang bangunan untuk menerima beban gempa

kuat. Dibutuhkan tingkat pengetahuan yang lebih tinggi, pemahaman dan pengalaman agar kesalahan tidak terjadi. Pemeriksaan oleh pihak lain yang independen juga diperlukan. Perhitungan, perencanaan, dan spesifikasi perlu diperiksa untuk memastikan semuanya sesuai dengan peraturan dan standar yang berlaku (Gambar 2).



Gambar 2. Selama perancangan dan pelaksanaan konstruksi, dinding beton bertulang ini diperiksa untuk memastikan rancangannya benar dan pelaksanaannya sesuai dengan rencana.

Tanyakan pada insinyur sipil yang terlibat pada proses konstruksi bangunan kita, pemeriksaan apa saja yang telah dilakukan. Apakah pekerjaannya sudah diperiksa secara independen oleh insinyur lain dari perusahaannya, atau lebih baik lagi, dari perusahaan lain? Jika belum, maka harus dilakukan, meskipun perlu biaya tambahan. Setelah diperiksa, dokumen konstruksi siap diajukan untuk izin pembangunan. Sehingga jika otoritas yang berwenang tidak melakukan pemeriksaan teknis untuk keamanan bangunan sebelum mengeluarkan izin, kita seharusnya akan tetap mendapatkan bangunan aman gempa jika dokumen konstruksi diikuti di lapangan.

21. Pentingnya Pemeriksaan Saat Pelaksanaan Konstruksi Bangunan

Bab 20 menjelaskan pentingnya pemeriksaan independen terhadap perhitungan, perencanaan, dan spesifikasi teknis sebelum pengajuan untuk izin bangunan, dan tentu saja sebelum konstruksi dimulai. Pemeriksaan ini akan meyakinkan pemilik bangunan bahwa peraturan dan standar telah diikuti sehingga bangunan kemungkinan besar aman terhadap bahaya gempa.

Tantangan selanjutnya adalah menjadwalkan pemeriksaan saat pelaksanaan konstruksi. Seperti kita, kontraktor juga dapat melakukan kesalahan. Beberapa kontraktor mungkin memilih untuk tidak mengikuti gambar rencana dan spesifikasi. Mereka mungkin memasang jumlah tulangan yang kurang dari seharusnya, salah membengkokkan tulangan, mengurangi semen, atau menggunakan material dengan mutu rendah (Gambar 1). Tanpa pemeriksaan, bahkan bangunan baru pun bisa saja tidak aman terhadap gempa. Banyak sekali contoh konstruksi yang berkualitas rendah dan tidak aman (Gambar 2). Jika kontraktor mengikuti gambar rencana dan spesifikasi, bangunan diharapkan akan aman terhadap gempa rencananya.



Gambar 1. Pengujian tarik tulangan baja untuk memeriksa kualitasnya

Dinas bangunan mungkin memiliki beberapa ketentuan untuk menjaga kualitas konstruksi. Ikutilah ketentuan tersebut. Jika tidak ada, minta insinyur sipil yang merancang bangunan tersebut untuk turut mengamati dan mengawasi pelaksanaan konstruksi. Biasanya insinyur tersebut akan mengunjungi lokasi proyek secara berkala terutama sebelum tahapan pekerjaan penting (Gambar 3). Sebagai contoh, penulangan baja kolom harus diperiksa sebelum ditutup oleh papan bekisting dan beton dicor. Mintalah rekomendasi kepada insinyur apa yang harus dilakukan, agar di akhir proyek didapatkan surat pernyataan bahwa konstruksi sudah dilakukan sesuai dengan gambar rencana dan spesifikasi.



Gambar 2. Penulangan pada kolom ini melanggar banyak sekali ketentuan peraturan dan standar bangunan. Kolom ini dapat rusak parah saat gempa



Gambar 3. Insinyur perlu meninjau lokasi konstruksi secara berkala untuk memastikan konstruksi sesuai dengan gambar rencana dan spesifikasi

Mungkin ada orang yang berusaha berhemat dengan mengabaikan penjaminan mutu. Akibatnya, kesalahan dan perubahan rancangan tanpa izin tidak dapat terdeteksi. Hal-hal rinci yang penting untuk keamanan bangunan saat gempa mungkin saja dibuat secara salah atau bahkan tidak dibuat sama sekali. Mengapa mengambil risiko saat gempa akibat konstruksi yang tidak aman? Penghematan yang didapat tidak sepadan dengan risiko keselamatan kita!

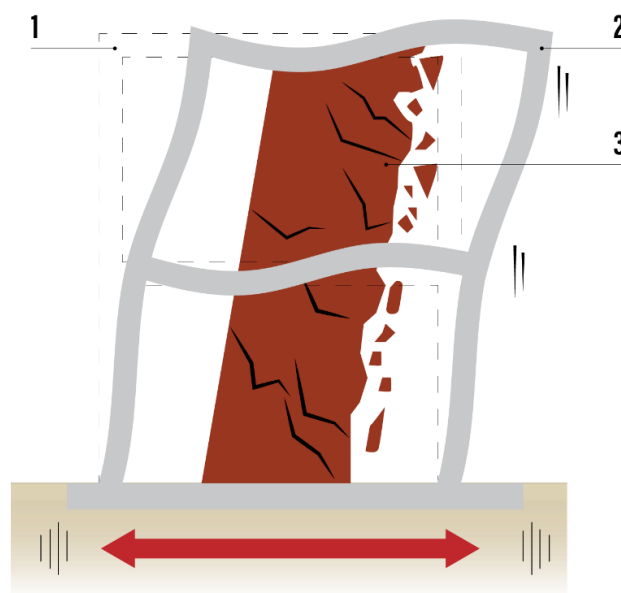
22. Mencegah Kerusakan Komponen Nonstruktural

Sebagian besar tulisan pada buku ini memfokuskan bahwa struktur bangunan melindungi penghuni selama gempa terjadi. Tujuannya adalah untuk menghindari kerusakan struktural yang serius. Jika tujuan ini tercapai, nyawa terselamatkan. Memperbaiki struktur pasca gempa juga mungkin untuk dilakukan, baik secara teknis maupun ekonomis. Bagaimana dengan kerusakan lain pada bangunan?

Dari segi biaya, struktur utama mengambil porsi relatif kecil terhadap keseluruhan biaya bangunan. Biasanya, sekitar 70 persen biaya bangunan berasal dari bagian selain struktur yang sering disebut sebagai “komponen nonstruktural”, seperti penutup atap (misalnya genteng), dinding penutup dan partisi, kaca, plafon, sistem mekanikal dan elektrikal, dan lain-lain. Selain itu kita tidak boleh lupa pada isi bangunan, yang juga mungkin sangat mahal. Semua komponen nonstruktural ini tidak hanya merupakan investasi yang sangat besar, namun banyak juga yang dapat membahayakan saat gempa.

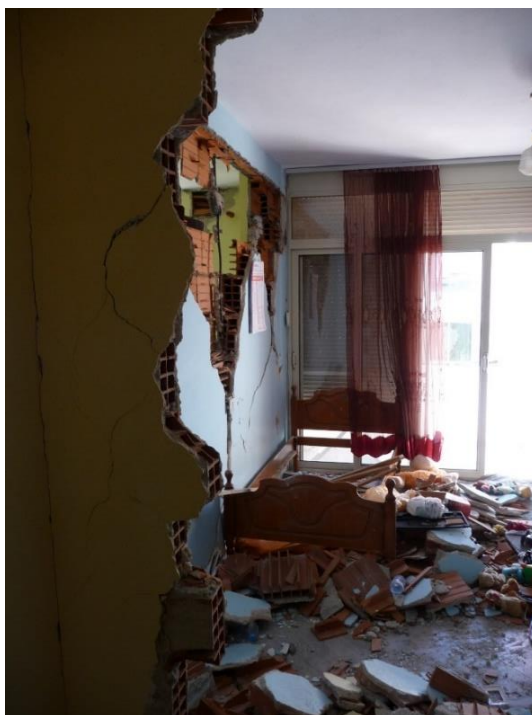
Ada dua penyebab kerusakan komponen nonstruktural. Pertama, kerusakan karena gerakan horizontal struktur. Kedua, kerusakan akibat percepatan dari guncangan gempa. Gambar-gambar yang berkaitan dapat dilihat dengan menelusuri “nonstructural earthquake damage” di internet.

Gerakan bergoyang yang terjadi selama gempa cenderung merusak komponen seperti pasangan bata pada dinding penutup (*cladding*) dan partisi. Ketika lantai atas bangunan bergerak secara horizontal lebih jauh daripada lantai di bawahnya, kerusakan terjadi pada komponen-komponen ini (Gambar 1). Dinding yang kaku dan getas tidak kompatibel dengan kerangka struktural yang relatif fleksibel. Kerusakan elemen seperti dinding dapat dikurangi dengan membuatnya fleksibel, atau memisahkannya dari kolom dan lantai di atasnya. Perlu detail arsitektur yang cermat untuk hal ini.



Gambar 1. Rangka struktur sebelum (1) dan saat terjadi gempa (2). Partisi (3) yang disambung dengan lantai di atas dan di bawahnya rusak akibat gerakan horizontal rangka yang bergoyang

Sebagian besar komponen nonstruktural lainnya rusak akibat percepatan gempa. Guncangan hebat dapat merusak komponen dan melepaskannya dari tambatannya hingga terjatuh (Gambar 2 sampai 4). Isi bangunan yang tidak ditahan akan terlempar, menyebabkan cedera dan kerusakan. Belajar dari gempa sebelumnya, komponen nonstruktural harus ditambatkan. Semua benda, termasuk tangki air dan peralatan mekanikal dan elektrikal, harus ditambatkan juga (Gambar 5). Jika tidak, saat guncangan benda-benda tersebut akan tergeser atau terguling, dan menyebabkan lebih banyak kerusakan. Lihat FEMA E-74 untuk contoh-contoh metode penambatan komponen nonstruktural. Banyak metode penambatan yang relatif murah dan merupakan investasi yang bijak untuk mencegah kerusakan akibat gempa.



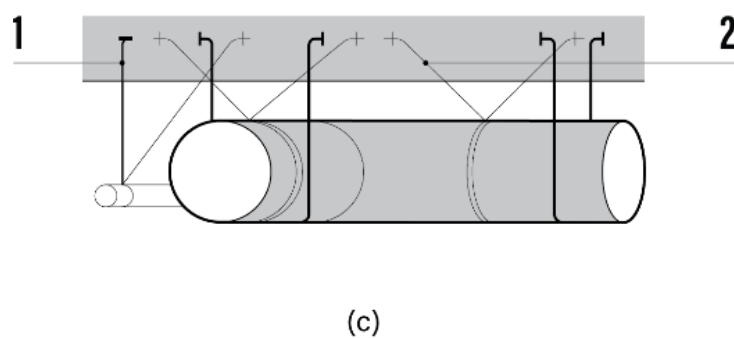
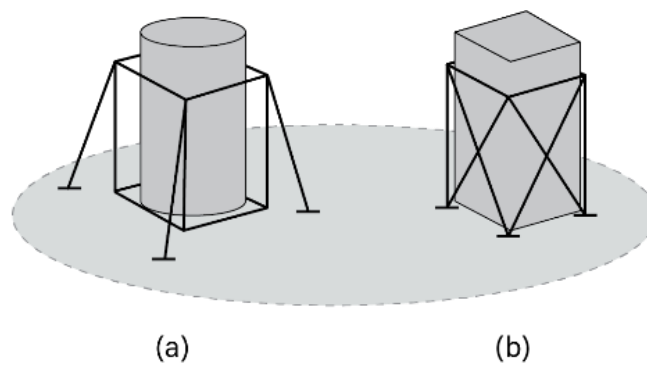
Gambar 2. Dinding yang rusak akibat guncangan gempa dapat membahayakan penghuni



Gambar 3. Cerobong asap pasangan bata di atap terlepas dan jatuh. Sisanya mengalami kerusakan (N. Allaf).



Gambar 4. Gempa menghancurkan sebagian besar cladding bata dan kaca bangunan



Gambar 5. Tangki (a) dan peralatan mekanikal (b) harus dibreis terhadap gempa. Juga pada (c), gantungan pipa (1) dan saluran perlu dibreis (2)

Daftar Pustaka

Charleston, A. W., 2008. Seismic design for architects: outwitting the quake. Oxford, Elsevier, pp. 173-186.

FEMA, 2012. Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage—A Practical Guide (FEMA E-74) https://www.fema.gov/media-library-data/1398197749343-db3ae43ef771e639c16636a48209926e/FEMA_E-74_Reducing_the_Risks_of_Nonstructural_Earthquake_Damage.pdf.

Murty, C. V. R., 2005. How can Non-structural Elements be protected against Earthquakes? Earthquake Tip 27. IITK-BMTPC “Learning earthquake design and construction”, NICEE, India. <http://www.iitk.ac.in/nicee/EQTips/EQTip27.pdf> (diakses 5 Mei 2020).

Nonstructural. Mitigation Center. Earthquake Engineering Research Institute. <https://mitigation.eeri.org/category/structures/non-structural-abc-testing>.

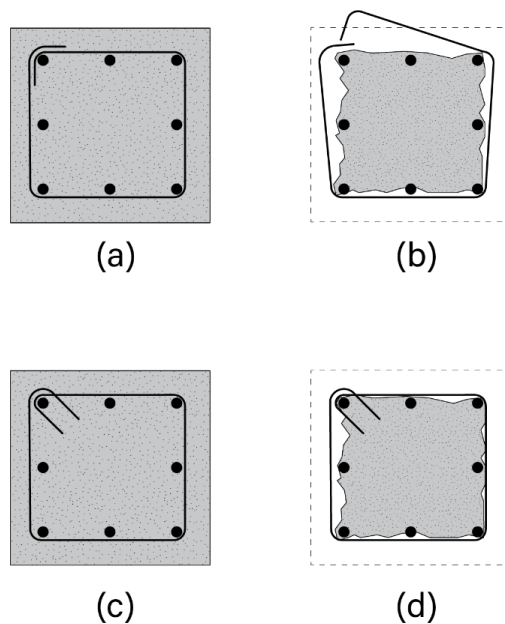
23. Perkuatan Bangunan Terhadap Gempa Bumi

Perkuatan (*retrofit*) adalah proses peningkatan kinerja bangunan eksisting agar aman terhadap gempa. Ini mirip seperti seseorang dengan penyakit serius yang memerlukan operasi agar kembali sehat. Beberapa proyek *retrofit* juga dideskripsikan sebagai bedah seismik.

Banyak alasan mengapa bangunan di daerah rawan gempa perlu diperkuat. Terutama karena peraturan bangunan mensyaratkan *retrofit* untuk bangunan eksisting yang dinilai rentan terhadap gempa. Tujuannya untuk meningkatkan ketahanan daerah dan masyarakat dengan cara mengurangi kerusakan dan trauma akibat gempa besar. *Retrofit* merupakan salah satu cara yang dapat dilakukan untuk menghindari bencana di masa depan yang berpotensi menimbulkan cedera atau bahkan korban jiwa, serta menyebabkan kehilangan tempat tinggal dan pekerjaan. Sehingga, bangunan yang sangat penting seperti rumah sakit dan sekolah biasanya diutamakan untuk diperkuat.

Langkah pertama dalam *retrofit* bangunan adalah penilaian keamanan bangunan terhadap gempa. Insinyur yang berpengalaman dapat menentukan dengan cepat apakah bangunan memiliki kelemahan yang serius. Misalnya, tingkat lunak (Bab 12) atau dinding tak menerus (Bab 13) dapat menyebabkan keruntuhan saat terjadi gempa. Selain itu, usia bangunan juga memberikan perkiraan peraturan yang digunakan pada saat perancangan dan konstruksi bangunan. Misalnya, bangunan beton baru dirancang untuk menahan guncangan gempa sejak 1980-an. Selain itu, material konstruksi juga sangat menentukan. Berdasarkan kinerjanya yang buruk pada gempa-gempa terdahulu, bangunan bata tanpa perkuatan (*unreinforced masonry*) biasanya perlu *retrofit*.

Jika penilaian awal menunjukkan perlunya *retrofit*, maka penyelidikan dan analisis rinci perlu dilakukan. Pembongkaran pada sebagian kecil area dapat menunjukkan apakah detail penulangan yang ada telah memenuhi syarat (Gambar 1).



Gambar 1. (a) menunjukkan penampang kolom dengan sengkang yang memiliki kait 90°. Ketika kolom rusak dan selimut beton hancur saat gempa, kait akan terbuka dan sengkang menjadi tidak berguna (b). Pada (c) sengkang dibengkokkan dengan benar sesuai standar, dengan kait 135°. Ketika selimut beton hilang, sengkang masih bekerja dengan baik (d).

Pertanyaan penting yang perlu didiskusikan dengan dinas bangunan adalah sejauh mana perkuatan harus dilakukan. Apakah bangunan harus diperkuat menggunakan standar untuk bangunan baru? Atau dapatkah menggunakan standar yang lebih rendah dengan konsekuensi risiko kerusakan yang lebih besar? Mengingat biaya *retrofit* yang relatif mahal, sering diperlukan kompromi. Semua ini akan berdampak pada perencanaan rinci *retrofit* dan spesifikasinya.

Solusi *retrofit* sangat bervariasi. Setiap bangunan harus diperlakukan berbeda, seperti halnya dokter dalam merawat pasien. Beberapa bangunan perlu lebih banyak tindakan daripada yang lain. Contohnya penambahan beberapa elemen baru seperti dinding struktural atau breis silang (*cross-bracing*) dalam arah memanjang dan melintang bangunan (Gambar 2 sampai Gambar 5). Bangunan lain mungkin hanya membutuhkan elemen struktural baru dalam satu arah saja. Bangunan lainnya lagi mungkin hanya perlu mengurangi berat bangunan dengan membongkar dan mengganti dinding bata yang berat. Terkadang struktur eksisting tidak dapat lagi diperkuat dan perlu diganti dengan bangunan baru. Cari di internet dengan kata kunci "*retrofitting buildings for earthquakes*" untuk melihat contoh-contoh perkuatan yang ada.



Gambar 2. Retrofit seismik bangunan rumah sakit ini mencakup dua dinding struktural baru dan fondasinya di setiap ujungnya.



Gambar 3. Konstruksi yang lebih tebal di ujung bangunan ini adalah rangka beton baru yang dipasang pada struktur eksisting untuk meningkatkan kinerja terhadap gempa.



Gambar 4. Bentang-bentang breis baja ditambahkan pada bangunan sebagai bagian dari retrofit.



Gambar 5. Beis baja dipasang di bawah lantai kayu dari bangunan pasangan bata untuk menahan gempa.

Sebagai penutup, *retrofit* biasanya relatif mahal. Bahkan sering tidak terjangkau. Meskipun mungkin tidak ada pilihan selain tinggal dan bekerja di bangunan yang rentan gempa untuk saat ini, tetapi kita perlu memastikan bangunan baru aman gempa. Sehingga, seiring waktu jumlah bangunan yang lebih aman terhadap gempa akan semakin meningkat.

Daftar Pustaka

Charleson, A. W., 2008. *Seismic design for architects: outwitting the quake*. Oxford, Elsevier, pp. 187-205.

Retrofit. Mitigation Center. Earthquake Engineering Research Institute. <https://mitigation.eeri.org/category/structures/retrofit-abc-testing>.

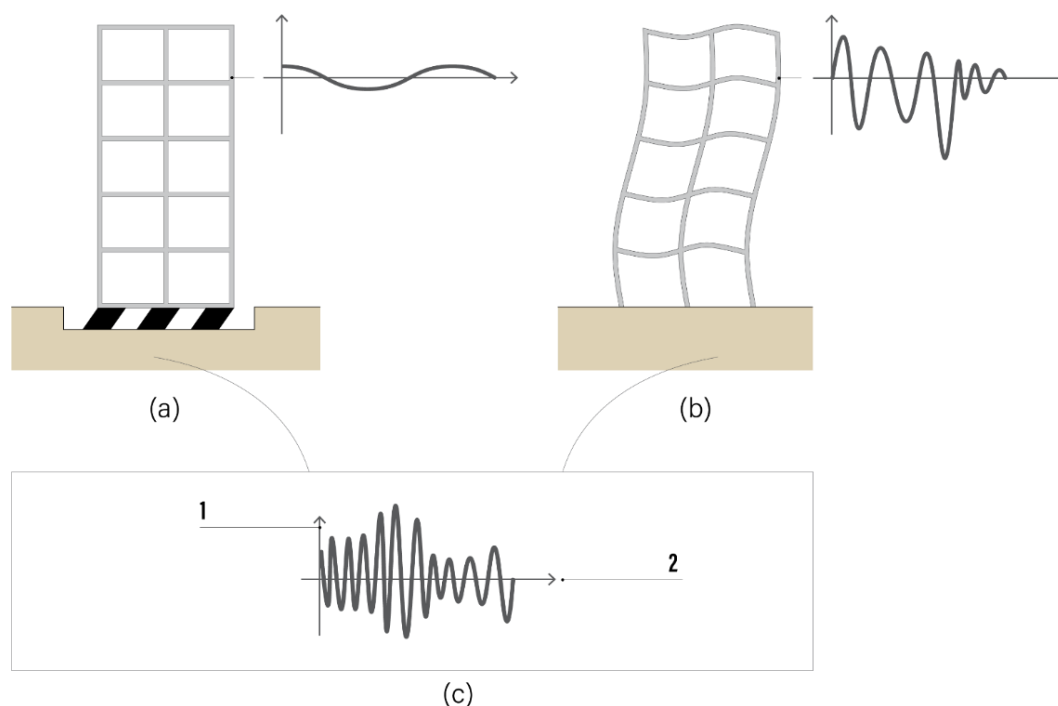
Murty, C. V. R., et al., 2006. At risk: the seismic performance of RC frame buildings with masonry infill walls. California, World Housing Encyclopedia. http://www.world-housing.net/wp-content/uploads/2011/05/RCFrame_Tutorial_English_Murty.pdf (diakses 8 Juni 2020).

Vargas-Neumann, J., et al., 2011. Building hygienic and earthquake-resistant adobe houses using geomesh reinforcement. http://www.world-housing.net/wp-content/uploads/2011/06/Adobe-Geomesh-Arid_Tutorial_English_Blondet.pdf.

24. Teknologi Lanjut untuk Bangunan Aman Gempa

Insinyur sipil di seluruh dunia percaya bahwa salah satu prinsip perencanaan bangunan adalah dengan menciptakan fondasi yang kuat untuk mendukung struktur atas. Ironisnya, meskipun fondasi yang kuat mencegah bangunan turun atau terguling saat gempa, fondasi tersebut juga meneruskan guncangan tanah ke struktur atas. Ini menyebabkan guncangan yang lebih kuat pada lantai-lantai di atas permukaan tanah.

Pemisahan seismik (*seismic isolation*) merupakan terobosan dalam penggunaan perangkat untuk mengurangi guncangan bangunan saat gempa. Sistem ini pertama kali diterapkan pada 1960an. Dalam pendekatan ini, struktur atas bangunan sebagian besar diisolasi atau dilepaskan dari efek guncangan tanah. Hal ini biasanya dicapai dengan menempatkan bantalan di dasar bangunan, antara fondasi dan bangunan di atasnya, yang fleksibel terhadap gerakan horizontal (Gambar 1 dan 2). Perangkat ini dikenal sebagai pengisolasi dasar (*base isolator*). Saat tanah berguncang, hanya sebagian kecil dari gaya gempa yang diteruskan melalui bantalan fleksibel ke struktur di atasnya. Ini seperti menempatkan struktur atas pada bantalan bola (*ball-bearings*)!



Gambar 1. Bangunan dengan pengisolasi dasar (a) bergerak sebagai satu kesatuan kaku di atas bantalannya, sementara bangunan konvensional (b) melentur sepanjang ketinggian bangunan. Kedua bangunan tersebut mengalami gempa (c) di mana (1) adalah percepatan dan (2) adalah waktu. Perhatikan bagaimana guncangan pada (a) lebih kecil dan lebih lembut daripada guncangan pada (b).



Gambar 2. Dua pengisolasi dasar berbentuk silinder dan berwarna hitam di bawah bangunan. Setiap bantalan dibaut ke dasar beton yang melekat pada fondasi dan ke dasar kolom yang menjulang ke atas bangunan.

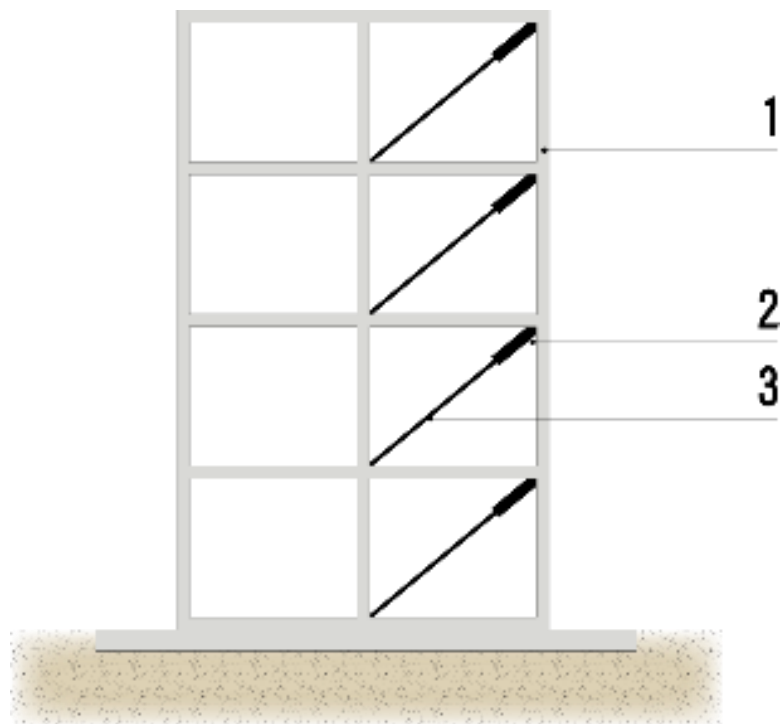
Bantalan atau pengisolasi dasar pertama berupa blok besar dari karet dan pelat baja yang dikonstruksi berlapis seperti *sandwich*. Dalam perkembangannya, inti timah ditambahkan untuk menyerap sebagian energi gempa. Sejak itu, jenis-jenis bantalan lain telah diproduksi, seperti sistem pendulum friksi. Sistem ini bekerja dengan mengizinkan adanya pergeseran di antara dua permukaan halus yang melengkung. Gambar-gambar perangkat pengisolasi dasar ini dapat dicari di internet dengan kata kunci "*seismic isolation devices*".

Isolasi seismik menawarkan perlindungan terbaik terhadap gempa untuk struktur, elemen non-struktural seperti partisi dan *cladding*, serta isi bangunan. Sebagian besar rumah sakit baru di wilayah rawan gempa seperti Jepang, California, dan Selandia Baru menerapkan isolasi seismik.

Pendekatan lain juga diperkenalkan untuk membuat bangunan lebih aman terhadap gempa bumi. Misalnya, peredam (*damper*) yang dipasang untuk mengurangi intensitas guncangan bangunan akibat gempa. Peredam bekerja seperti *shock breaker* pada mobil (Gambar 3). Peredam sangat efektif dalam meredam getaran, dan sering dipasang pada breis diagonal bangunan (Gambar 4). Sebagai alternatif, terdapat juga breis tahan tekuk (*buckling restrained brace*) di mana seluruh breis berfungsi sebagai breis dan *damper* (Gambar 5).



Gambar 3. Peredam untuk mengurangi gerakan bangunan akibat gempa.

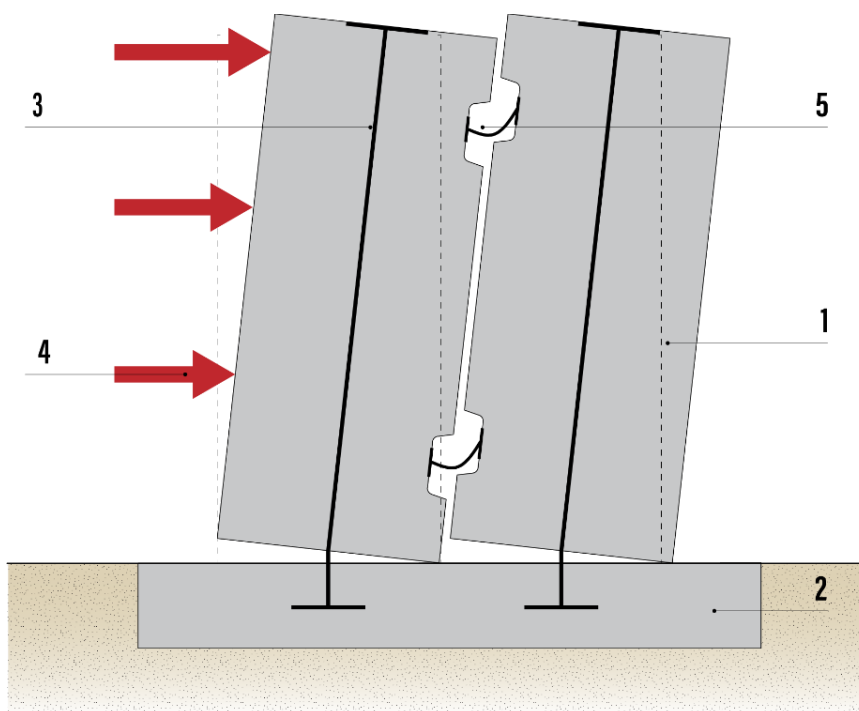


Gambar 4. Rangka bangunan (1) yang terdiri dari kolom dan balok dengan peredam (2) yang dipasang pada bagian atas breis diagonal (3).



Gambar 5. Dua breis tahan-tekek (*buckling-restrained braces*) menahan dan meredam gerakan bangunan saat gempa.

Pendekatan lainnya adalah konsep rancangan yang menghindari kerusakan (*damage-avoidance*). Struktur dinding ataupun struktur rangka dirancang khusus agar komponen utamanya tidak rusak saat terjadi gempa. Kerusakan struktural dirancang terjadi pada perangkat penyerap energi yang dapat diganti (Gambar 6 dan 7).



Gambar 6. Dua dinding beton yang berdampingan (1) dihubungkan ke fondasi (2) oleh tendon baja (3) yang meregang saat terkena beban gempa (4). Pelat baja (5) terdistorsi, menyerap energi gempa.



Gambar 7. Pelat baja sebagai perangkat penyerap energi gempa yang terletak di antara dua dinding beton yang bergoyang.

Semua teknik yang dibahas di atas jauh lebih canggih daripada pendekatan konvensional dalam perancangan dan konstruksi bangunan. Karena itu, hanya insinyur sipil yang berpengalaman dan kompeten yang dapat menerapkan teknik-teknik tersebut.

Daftar Pustaka

Advanced Technologies Introduction. World Housing Encyclopedia, EERI. <https://www.world-housing.net/major-construction-types/advanced-technologies-introduction>.

BRANZ. Concrete structures: techniques and devices used to create a low-damage buildings using concrete. <http://www.seismicresilience.org.nz/topics/superstructure/commercial-buildings/concrete-structures/> (diakses 15 Juni 2020).

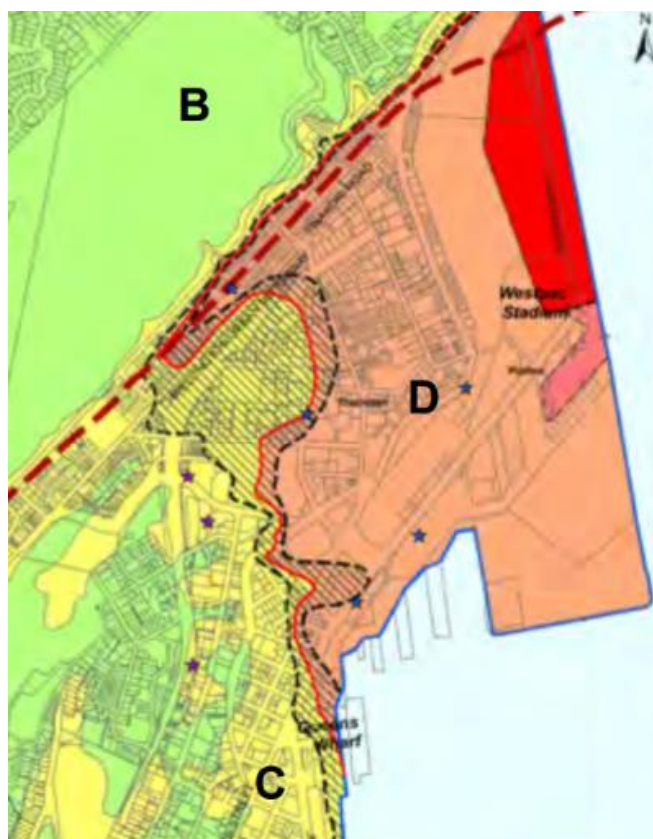
Charleson, A. W., and Guisasola, A., 2017. Seismic isolation for architects. London, Routledge.

Equipped with base isolation and/or energy dissipation devices. Glossary for GEM Taxonomy. Global Earthquake Model. <https://taxonomy.openquake.org/terms/equipped-with-base-isolation-and-or-energy-dissipation-devices-dbd>.

25. Perencanaan Wilayah and Keamanan Gempa

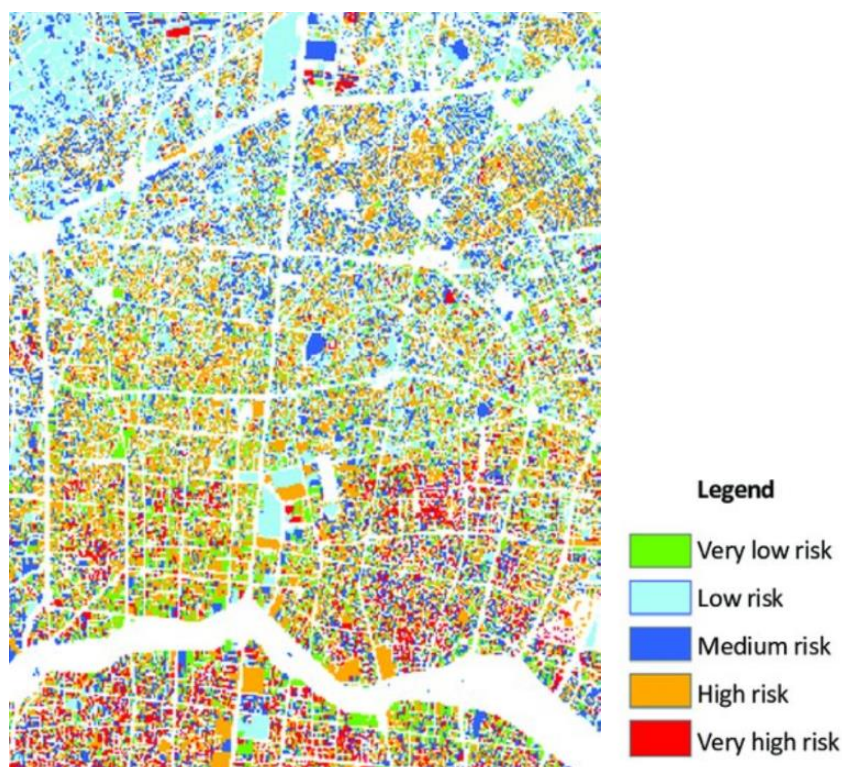
Bab ini mengambil perspektif yang lebih luas dibandingkan dengan bab-bab sebelumnya. Bab ini membahas bagaimana perencanaan wilayah dapat mengurangi dampak kerusakan gempa pada suatu daerah, kota, atau masyarakat. Sama halnya dengan kebijakan kesehatan masyarakat, seperti penyediaan air minum dan sanitasi untuk mencegah penyebaran penyakit, perencanaan wilayah dapat mengurangi dampak gempa dan memfasilitasi pemulihan.

Perencana wilayah memerlukan peta bahaya gempa bumi (Gambar 1) sebagai panduan pembangunan. Peta tersebut mengidentifikasi keberadaan zona sesar aktif (yang sedapat mungkin harus dihindari dalam pembangunan), dan daerah yang berpotensi mengalami guncangan lebih besar akibat tanah lunak yang tebal. Peta ini juga menunjukkan daerah rawan likuifaksi, tanah longsor, atau runtuh batu akibat gempa, dan juga tsunami. Dengan informasi ini, perencana dapat menempatkan fasilitas penting seperti pemadam kebakaran dan rumah sakit di daerah yang aman dan menghindari menempatkan perumahan di daerah yang tidak aman. Area yang paling berbahaya dapat direncanakan sebagai daerah yang tidak boleh dibangun. Pencarian di internet untuk “*city seismic hazard map*” akan menunjukkan banyak contoh peta sejenis dari seluruh dunia.



Gambar 1. Peta intensitas gempa untuk sebagian daerah Wellington, Selandia Baru. Zona B akan mengalami intensitas gempa paling ringan, diikuti oleh Zona C. Zona D adalah area dengan intensitas gempa paling tinggi, dengan puncak di daerah berwarna merah (Wellington City Council).

Panduan lain yang berguna untuk perencana wilayah adalah peta kerentanan seismik (Gambar 2). Peta ini menunjukkan kerentanan relatif bangunan terhadap beban gempa pada suatu daerah, berdasarkan survei bangunan dan analisis teknik. Ketika digunakan bersama dengan peta bahaya gempa, distribusi geografis dari potensi kerusakan bangunan akibat gempa dapat membantu proses perencanaan wilayah. Sebagai contoh, pemerintah daerah mungkin akan menggunakan informasi ini untuk membebaskan lahan di daerah yang paling rentan untuk proyek pelebaran jalan. Hal ini akan mengurangi kemacetan sehari-hari, meningkatkan kemudahan akses untuk layanan darurat, dan menyediakan pemecah api yang lebih lebar untuk mengantisipasi kebakaran pascagempa. Atau pemerintah daerah dapat meminta dan membantu pemilik bangunan-bangunan penting atau bersejarah yang rentan terhadap gempa untuk melakukan *retrofit* bangunan guna melindunginya dari keruntuhan akibat gempa besar.



Gambar 2. Peta kerentanan seismik suatu kota yang menunjukkan risiko berdasarkan jenis bangunan dan faktor-faktor lainnya (M. Tafti).

Perencana wilayah perlu bekerja sama dalam tim multidisiplin, yang juga melibatkan insinyur struktur. Pengalaman menunjukkan bahwa beberapa kota di masa lalu pernah memberlakukan peraturan dan kebijakan yang secara tidak sengaja menyebabkan berdirinya bangunan-bangunan yang kurang aman terhadap gempa. Sebagai contoh, persyaratan untuk meningkatkan tinggi lantai dasar untuk parkir dapat menyebabkan bangunan memiliki tingkat lunak (Bab 12), dan izin yang membolehkan bentuk bangunan menonjol di atas trotoar ke arah jalan dapat menyebabkan adanya dinding tak menerus (Bab 13).

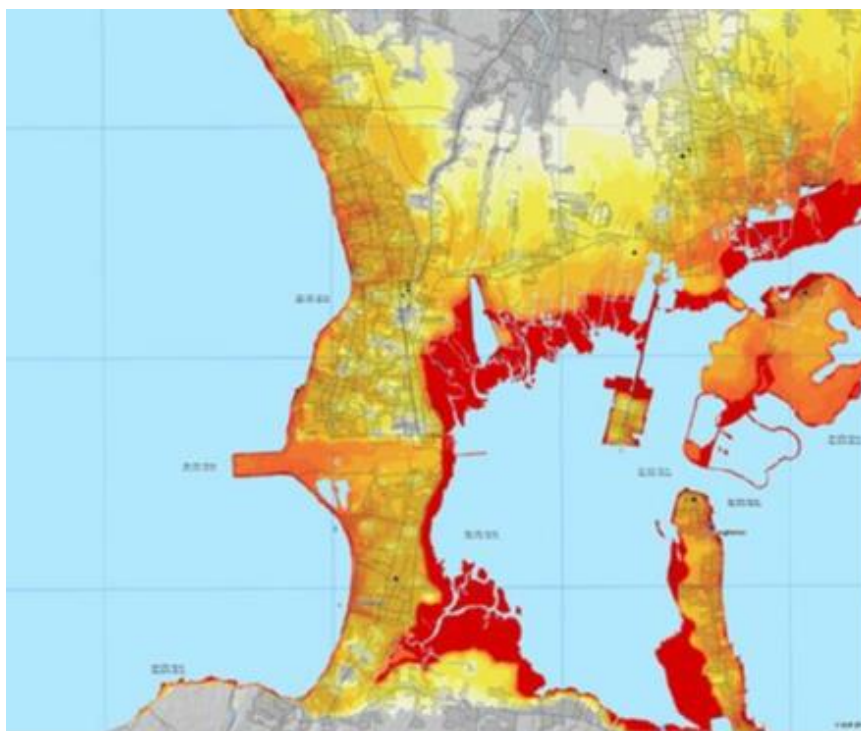
Daftar Pustaka

Charleson, A. W., 2008. Seismic design for architects: outwitting the quake. Oxford, Elsevier, pp. 233-242.

26. Tsunami dan Bangunan

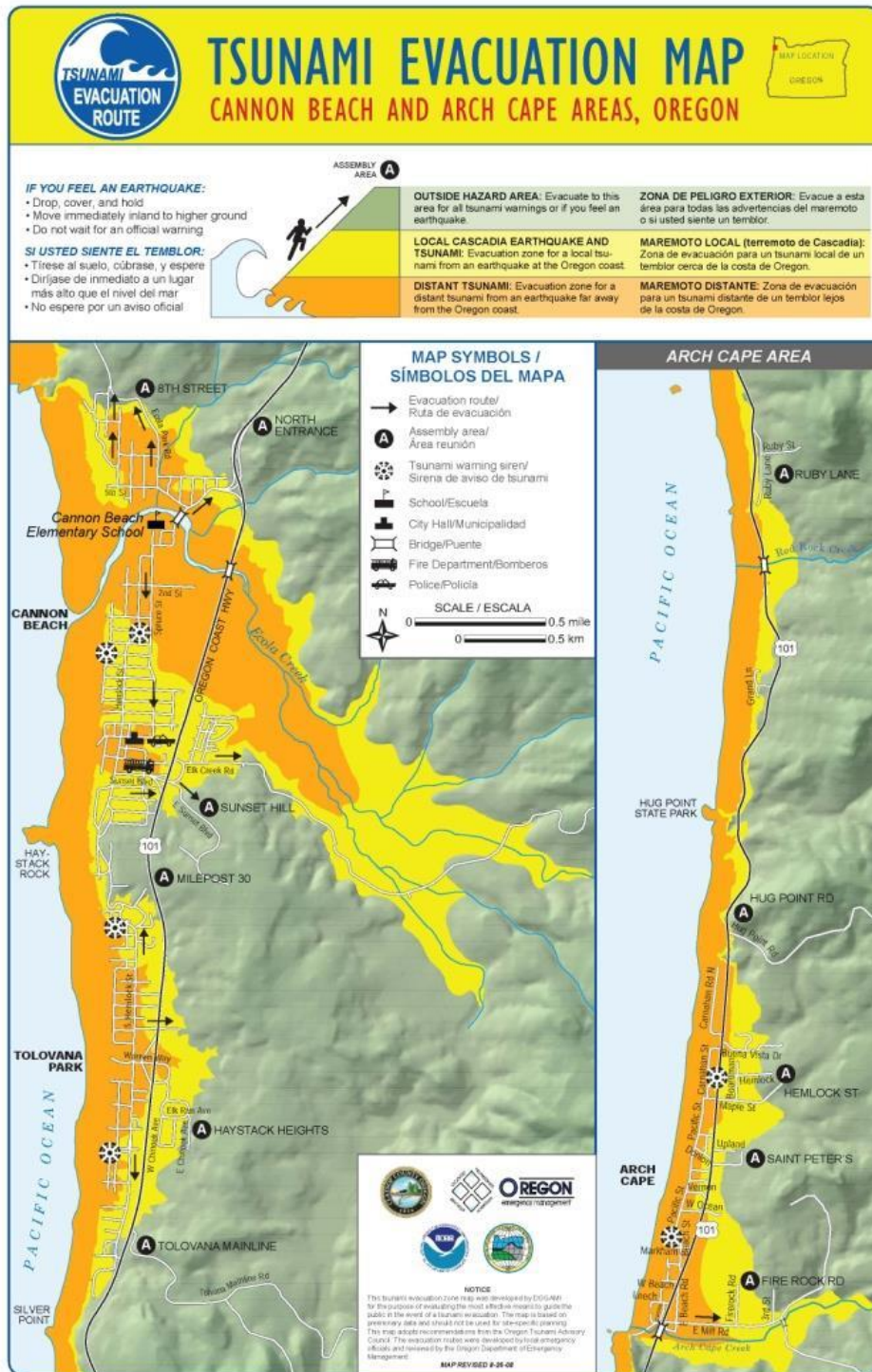
Tsunami Aceh akibat gempa bumi besar di Samudera Hindia pada 26 Desember 2004 telah membangkitkan kesadaran akan bahaya tsunami. Garis pantai Indonesia yang panjang dan banyaknya sumber gempa di laut menyebabkan kita berada di wilayah yang berisiko terdampak tsunami. Sejarah kehancuran dan hilangnya nyawa akibat tsunami telah banyak didokumentasikan di seluruh dunia. Tsunami memberikan gaya horizontal yang besar pada semua benda yang berada dalam arah alirannya. Bangunan kayu sama sekali tidak dapat menahan tsunami, dan bangunan dari batu, bata, serta beton juga dapat hancur karena kecepatan aliran air.

Langkah awal bagi perencana wilayah dalam memastikan risiko tsunami adalah dengan mendapatkan peta bahaya tsunami di area tinjauan (Gambar 1). Informasi ini dapat dimasukkan dalam peta bahaya gempa (Bab 24). Dengan memperhitungkan ketidakpastian dan asumsi yang mempengaruhi akurasi informasi tersebut, dapat dipertimbangkan kebijakan atau tindakan untuk mengurangi kerusakan akibat tsunami. Pilihan seperti itu terbatas pada pembangunan dinding penahan tsunami, penanaman pohon-pohon yang rapat di daerah pantai, dan relokasi. Orang Jepang telah melindungi desa-desa nelayan dengan tembok beton bertulang yang besar. Pembangunan tembok ini lebih mahal dan memiliki dampak lingkungan yang lebih buruk, namun jauh lebih efektif dibandingkan dengan penanaman pohon. Meskipun pohon dapat menyerap sebagian energi tsunami, bagian-bagian pohon juga dapat menambah puing yang terbawa aliran tsunami. Relokasi pemukiman di daerah yang terdampak tsunami telah dilakukan di sejumlah negara.



Gambar 1. Peta bahaya tsunami untuk sebagian wilayah di Bali. Warna yang lebih merah mengindikasikan kemungkinan bahaya yang lebih besar (S. Wegscheider).

Sistem peringatan dini tsunami dan penyediaan jalur evakuasi (Gambar 2) juga merupakan metode yang efektif untuk mengurangi korban jiwa. Namun, di beberapa daerah, tsunami dapat mengalir hingga beberapa kilometer ke arah darat. Dengan waktu peringatan yang hanya dalam hitungan menit, tidak cukup waktu untuk mencapai tempat yang aman dari tsunami. Untuk kondisi seperti ini, satu-satunya solusi adalah membangun shelter tsunami atau *tsunami vertical evacuation centers* (Gambar 3).



Gambar 2. Contoh peta evakuasi tsunami (Oregon State University).



Gambar 3. Pusat evakuasi tsunami setempat. Umumnya pusat evakuasi dirancang untuk masyarakat sekitar.

Persyaratan utama shelter tsunami adalah dapat menampung pengungsi di atas tinggi genangan tsunami yang diperkirakan. Struktur shelter tsunami juga harus dirancang tahan terhadap gempa. Hal ini berarti shelter tsunami harus dirancang dengan standar yang lebih tinggi dari biasanya. Kemudian, struktur shelter harus diperiksa ketahanannya terhadap tekanan air yang besar ditambah dengan gaya tumbukan dari puing yang terbawa aliran air.

Daftar Pustaka

National Tsunami Hazard Mitigation Program, 2001. Designing for tsunamis: seven principles for planning and designing for tsunami hazards. <https://nws.weather.gov/nthmp/documents/designingfortsunamis.pdf> (diakses 16 Juni 2020).

Wegscheider, S, et al., 2011. Generating tsunami risk knowledge at community level as a base for planning and implementation of risk reduction strategies, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 249–258.