

BERESIKO : Perilaku Bangunan Struktur Rangka Beton Bertulang Dengan Dinding Pengisi Dari Bata Terhadap Gempa

**Bahan tutorial ini dikembangkan oleh suatu komite
World Housing Encyclopedia
sebuah proyek bersama antara
Earthquake Engineering Research Institute
dan International Association for Earthquake Engineering**



**Laboratorium Beton FTSP Universitas Trisakti
dan PT. Gistama Intisemesta**

Perilaku Bangunan Struktur Rangka Beton Bertulang Dengan Dinding Pengisi Dari Bata Terhadap Gempa

**Bahan tutorial ini dikembangkan oleh suatu komite
World Housing Encyclopedia
sebuah proyek bersama antara
Earthquake Engineering Research Institute
dan International Association for Earthquake Engineering**

Alih Bahasa:

Sugeng Wijanto dan Takim Andriono

Pengarang:
C. V. R. Murty
Svetlana Brzev
Heidi Faison
Craig D. Comartin
Ayhan Irfanoglu

**Oktober 2009
Nomor Publikasi WHE-2009-01**



Hak cipta dilindungi Undang-undang. Tidak ada suatu bagianpun dari buku ini yang boleh digandakan dalam bentuk apapun atau dengan cara apapun tanpa terlebih dahulu meminta ijin dari penerbit Earthquake Engineering Research Institute, 499 14th St., Suite 320, Oakland, CA 94612-1934. Dokumen ini diterbitkan oleh Earthquake Engineering Research Institute, sebuah institusi nirlaba. Tujuan dari Earthquake Engineering Research Institute adalah untuk mengurangi resiko gempa dengan meningkatkan sains dan praktik rekayasa gempa dengan cara memperbaiki pemahaman dampak gempa pada lingkungan secara fisik, sosial, ekonomi, politik, dan budaya, dan dengan menganjurkan langkah-langkah komprehensif dan realistis untuk mengurangi bahaya gempa.

Pencetakan tutorial ini (dalam bahasa Inggris) didukung oleh Bangladesh University of Engineering berkerja sama dengan Technology-Virginia Tech Partnership for Reduction of Seismic Vulnerability, dengan pendanaan dari U.S. Agency for International Development. Proses penerjemahan kedalam bahasa Indonesia ini dapat terwujud atas bantuan yang sangat berharga dari Audrie Angelina dan Stefan Wijanto. Sedangkan pencetakan dalam bahasa Indonesia didukung oleh Laboratorium Beton Universitas Trisakti dan konsultan perencanaan struktur PT. Gistama Intisemesta.

Bentuk asli dokumen ini ditulis dalam bahasa Inggris oleh sebuah komite yang terdiri dari penulis-penulis sukarelawan, semuanya berpartisipasi di proyek EERI dan IAEE's World Housing Encyclopedia. Semua pendapat, temuan, kesimpulan, atau rekomendasi dikemukakan oleh para penulis dan tidak harus berarti mencerminkan pandangan organisasi-organisasi mereka.

Selama persediaan masih tersedia dokumen dalam bahasa Inggris dapat dipesan melalui:

National Information Center of Earthquake Engineering
Indian Institute of Technology Kanpur
Kanpur 208016 INDIA
Fax: (91-512) 259-7794
E-mail: nicee@iitk.ac.in
Atau

Earthquake Engineering Research Institute
499 14th Street, Suite 320
Oakland, CA 94612-1934 USA
Telephone: 510/451-0905; Fax: 510/451-5411
E-mail: eeri@eeri.org; Web site: www.eeri.org
ISBN: 1-932884-22-X
EERI Publication Number WHE-2006-03

Selama persediaan masih tersedia dokumen dalam bahasa Indonesia dapat dipesan melalui:

Laboratorium Beton FTSP Universitas Trisakti
Kampus A, Gedung C, Lantai dasar
Jalan Kyai Tapa No. 1, Grogol
Jakarta 11440; Indonesia

Cetakan pertama
ISBN: 978-1-932884-43-2

Para koordinator produksi dokumen: Marjorie Greene, C. V. R. Murty, Svetlana Brzev dan Heidi Faison
Tata letak: Marjorie Greene, Heidi Faison

Gambar sampul depan: Bangunan rumah tinggal lima lantai berstruktur rangka beton bertulang dengan dinding pengisi dari bata tak bertulang yang terletak sekitar 50 km dari episenter dan mengalami keruntuhan akibat gempa Bhuj (India) tahun 2001 yang berskala M7,7. Bangunan ini mempunyai lantai parkir setinggi setengah tinggi tingkat dasar, dengan lantai apartemen yang terletak pada setengah tinggi yang lain. Dewasa ini sebagian besar bangunan rumah tinggal di India dan banyak di negara lain dibangun dengan cara seperti ini, tanpa perencanaan formal terhadap beban gravitasi dan gempa. Ukuran kolom tipikal bangunan-bangunan ini 230 mm x 450 mm dengan sengkang yang dibengkokkan 90°. Detail penulangan balok dan pelat dibuat sama untuk semua lantai; bangunan pada foto tampak terbelah secara vertikal tepat di tengahnya akibat pendetailan tulangan yang dilakukan secara persis sama pada seluruh lantai. Pendetailan ini menghasilkan sambungan-sambungan lewat pada balok dan pelat seluruh lantai yang terletak pada titik lokasi yang sama. Praktik ini berbahaya dan dapat mengakibatkan keruntuhan bangunan ketika terjadi gempa. Foto: C.V.R. Murty

Ucapan terima kasih

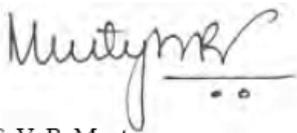
Proyek World Housing Encyclopedia (WHE) bermula dari visi Chris Arnold, yang pertama kali mengusulkan ide ini kepada EERI Endowment Fund. Dokumen ini dikembangkan dan ditinjau oleh sebuah tim ahli internasional. Para penulis utama adalah C.V.R. Murty (India), Svetlana Brzev (Kanada), Heidi Faison (U.S.A.), Craig D. Comartin (U.S.A.) dan Ayhan Irfanoglu (U.S.A.). Masukan tambahan diberikan oleh Ahmet Yakut (Turki), Durgesh Rai (India) dan Marjorie Greene (U.S.A.). Para penulis secara khusus mengucapkan terima kasih kepada Andrew Charleson (Selandia Baru) yang memberikan banyak saran yang berguna selaku peninjau. Disamping itu, Randolph Langenbach (U.S.A.) memberikan saran yang berguna tentang perlunya sistem-sistem alternatif, serta Eduardo Fierro (U.S.A.) dan Cynthia Perry (U.S.A.) yang memberikan saran-saran bermanfaat pada saat draf awal. Para penulis berbagai laporan WHE tentang bangunan pemukiman yang disebutkan namanya di bawah ini telah memberikan informasi-informasi berguna dalam laporan mereka. Kepada mereka para penulis tutorial ini sangat berterima kasih.

Ascheim, M. (U.S.A.)
Bostenaru, M.D. (Rumania)
Brzev, S. (Kanada)
Comartin, C. (U.S.A.)
Elwood, K. (Kanada)
Faison, H. (U.S.A.)
Farsi, M. (Aljazair)
Gomez, C. (Cile)
Goyal, A. (India)
Gulkan, P. (Turki)

Jaiswal, K. (India)
Jarque, F.G. (Meksiko)
Mejia, L. (Kolombia)
Pao, J. (Kanada)
Rodriguez, M. (Meksiko)
Sandu, I. (Rumania)
Sheu, M.S. (Taiwan)
Sinha, R. (India)
Spence, R. (U.K.)
Yao, G. (Taiwan)
Yakut, A. (Turki)

Situs dan *database* WHE telah didesain oleh sebuah tim dari John A. Martin and Associates of Los Angeles, CA, sebagai upaya sukarela: Farzad Naeim, Ketua Tim; Mark Day, Manajer Proyek, Desainer Utama, dan Pemrogram Situs; Scott Hagie, *Database Interface* dan Pemrogram *Web Server*; Kostas Skliros, Insinyur Piranti Lunak dan Pengembang Utama *Database*.

Proyek ini tidak mungkin terwujud tanpa dedikasi lebih dari 190 insinyur profesional yang berasal dari seluruh dunia. Mereka telah secara sukarela mencurahkan waktu dan keahlian untuk memberikan sumbangan informasi tentang bangunan pemukiman di negara mereka masing-masing, juga sebagai sesama mitra bestari. Tutorial ini didedikasikan bagi semua kontributor yang namanya dicantumkan dalam dua halaman berikut ini.



C. V. R. Murty
Editor-in-Chief
Nopember 2006



WORLD HOUSING ENCYCLOPEDIA EDITORIAL BOARD



2009

Editor-in-Chief

Andrew W. Charleson
University of Wellington
New Zealand



Managing Editor

Marjorie Greene
Earthquake Engineering Research
Institute
U.S.A.

Associate Editor

Heidi Faison
Pacific Earthquake Engineering Research Center
USA

Associate Editor

Dominik H. Lang
NORSAR foundation
Norway

Members

Qaisar Ali

NWFP University of Engineering & Technology
Pakistan

Chitr Lilavivat

Consulting Engineer
Thailand

Takim Andriono

Petra Christian University
Indonesia

Marjana Lutman

Slovenian National Building & Civil Engineering Institute
Slovenia

Marcial Blondet

Catholic University of Peru
Peru

Ofelia Moroni

University of Chile
Chile

Jitendra K. Bothara

National Society for Earthquake Technology
Nepal

C.V.R. Murty

Indian Institute of Technology, Kanpur
India

Svetlana N. Brzev

British Columbia Institute of Technology
Canada

Farzad Naeim

John A. Martin & Associates
USA

Craig D. Comartin

CD Comartin Inc.
USA

Sahar Safaie

Risk Management Solutions Inc.
USA

Dina D'Ayala

University of Bath
United Kingdom

Baitao Sun

Institute of Engineering Mechanics
China

Jorge Gutierrez

University of Costa Rica
Costa Rica

Sugeng Wijanto

Trisakti University
Indonesia

Andreas D. Kappos

University of Thessaloniki
Greece

WORLD HOUSING ENCYCLOPEDIA PARA KONTRIBUTOR

Abdibaliev, Marat
Agarwal, Abhishek
Ahari, Masoud Nourali
Ait-Méziane, Yamina
Ajamy, Azadeh
Al Dabbeek, Jalal N.
Alcocer, Sergio
Alemi, Faramarz
Alendar, Vanja
Ali, Qaisar
Alimoradi, Arzhang
Al-Jawhari, Abdel Hakim W.
Almansa, Francisco López
Al-Sadeq, Hafez
Ambati, Vijaya R.
Ambert-Sanchez, Maria
Ansary, Mehedi
Arnold, Chris
Arze L., Elias
Aschheim, Mark
Ashimbayev, Marat U.
Ashtiany, Mohsen Ghafory
Astroza, Maximiliano
Awad, Adel
Azarbakht, Alireza
Bachmann, Hugo
Baharudin, Bahiah
Bassam, Hwajja
Bazzurro, Paolo
Begaliev, Ulugbek T.
Belash, Tatyana
Benavidez, Gilda
Benin, Andrey
Bento, Rita
Bhatti, Mahesh
Bin Adnan, Azlan
Blondet, Marcial
Bogdanova, Janna
Bommer, Julian
Bostenaru Dan, Maria
Bothara, Jitendra Kumar
Brzev, Svetlana
Cardoso, Rafaela
Castillo G., Argimiro
Ceì, Chiara
Chandrasekaran, Rajarajan
Charleson, Andrew
Chernov, Nikolai Borisovich
Cherry, Sheldon
Choudhary, Madhusudan
Cleri, Anacleto
Comartin, Craig
D'Ayala, Dina
D'Ercole, Francesco
Davis, Ian
Deb, Sajal K.
Desai, Rajendra
Dlaz, Manuel
Dimitrijevic, Radovan
Dowling, Dominic
Eisenberg, Jacob
Eisner, Richard
Ellul, Frederick
Elwood, Kenneth
Faison, Heidi
Farsi, Mohammed
Feio, Artur
Fischinger, Matej
French, Matthew A.
Gómez, Cristian
Gordeev, Yuriy
Goretti, Agostino
Goyal, Alok
Greene, Marjorie
Guevara-Perez, Teresa
Gülkan, Polat
Gupta, Brijbhushan J.
Gutierrez, Jorge A.
Hachem, Mahmoud M.
Hashemi, Behrokh Hosseini
Irfanoglu, Ayhan
Itskov, Igor Efroimovich
Jain, Sudhir K.
Jaiswal, Kishor S.
Jarque, Francisco Garcia
Kante, Peter
Kappos, Andreas
Kaviani, Peyman
Khakimov, Shamil
Khan, Akhtar Naeem
Khan, Amir Ali
Kharrazi, Mehdi H. K.
Klyachko, Mark
Kolossova, Freda
Koumousis, Vlasis
Krimgold, Fred
Kumar, Amit
Lacava, Giuseppe
Lang, Kerstin
Lazzali, Farah
Leggeri, Maurizio
Levtchitch, Vsevolod
Lilavivat, Chitr
Liu, Wen Guang
Loaiza F., Cesar
Lopes, Mário
Lopez, Walterio
Lopez M, Manuel A.
Lourenco, Paulo B.
Lutman, Marjana
Maki, Norio
Malvolti, Daniela
Manukovskiy, V.
Martindale, Tiffany
Meguro, Kimiro
Mehrain, Mehrdad
Mejía, Luis Gonzalo
Meli, Roberto P.
Moin, Khalid
Mollaioli, Fabrizio
Moroni, Ofelia
Mortchikchin, Igor
Mucciarella, Marina
Muhammad, Taj
Muravljov, Nikola
Murty, C. V. R.
Naeim, Farzad
Naito, Clay J.
Ngoma, Ignasio
Nienhuys, Sjoerd
Nimbalkar, Sudhir
Nudga, Igor
Nurtaev, Bakhtiar
Olimpia Niglio, Denise U.
Ordonez, Julio
Ortiz R, Juan Camilo
Osorio G., Laura Isabel
Ottazzi, Gianfranco
Palanisamy, Senthil Kumar
Pantelic, Jelena
Pao, John
Papa, Simona
Parajuli, Yogeshwar
Krishna
Pradhan, Prachand Man
Pundit, Jeewan
Quiun, Daniel
Rai, Durgesh
Reiloba, Sergio
Rodriguez, Virginia I
Rodriguez, Mario
Samant, Laura
Samanta, R. Bajracharya
Samaroo, Ian
Sandu, Ilie
Saqib, Khan
Sassu, Mauro
Schwarzmueller, Erwin
Shabbir, Mumtaz
Sharpe, Richard
Sheth, Alpa
Sheu, M.S.
Singh, Narendrapal
Singh, Bhupinder
Sinha, Ravi
Skliros, Kostas
Smillie, David
Sophocleous, Aris
Sanchez, De la Sotta
Spence, Robin
Speranza, Elena
Sun, Baito
Syrmakezis, Kostas
Taghi Bekloo, Nima
Talal, Isreb
Tanaka, Satoshi
Tassios, T. P.
Tomazevic, Miha
Tuan Chik, Tuan
Norhayati
Tung, Su Chi
Upadhyay, Bijay
Kumar
Uranova, Svetlana
Valluzzi, Maria Rosa
Ventura, Carlos E.
Vetturini, Riccardo
Viola, Eugenio
Wijanto, Sugeng
Xu, Zhong Gen
Yacante, Maria I
Yakut, Ahmet
Yao, George C.
Zhou, Fu Lin

Tutorial

Bangunan Struktur Rangka Beton Bertulang Dengan Dinding Pengisi Dari Bata

Sekilas Tentang Dokumen Ini

Dokumen ini ditulis untuk para profesional di bidang bangunan dengan dua tujuan utama : 1) meningkatkan pemahaman mengenai perilaku yang kurang baik dari bangunan beton bertulang dengan dinding pengisi dari bata pada saat terjadi gempa, dan 2) menawarkan suatu teknologi alternatif dalam hal konstruksi yang dapat memberikan tingkat keamanan yang lebih tinggi terhadap bahaya gempa. Beberapa hal yang menyebabkan perilaku bangunan beton bertulang kurang baik tergantung pada a) kesalahan dalam pemilihan suatu lokasi bangunan, b) ketidak tepatan dalam pemilihan bentuk arsitektur bangunan yang menyebabkan jeleknya perilaku bangunan pada saat menerima beban gempa, c) kealpaan dalam mendesain struktur yang diharapkan untuk dapat menerima beban gempa, d) kekurangan/ketiadaan dalam pendetailan pada elemen-elemen struktur utama, e) kurangnya tenaga kerja ahli, f) kualitas material bangunan yang buruk, dan g) kurangnya supervisi selama masa konstruksi. Masalahnya menjadi lebih parah akibat penggunaan dinding pengisi dari bata tak bertulang, yang biasanya terbuat dari susunan bata merah atau bata merah berlubang. Pengaruh dinding pengisi ini biasanya tidak diperhitungkan dalam perencanaan, tetapi keberadaan dinding pengisi ini dapat sangat mempengaruhi perilaku bangunan

dalam merespon guncangan gempa dan bahkan dapat menyebabkan bangunan runtuh (seperti seringkali dilaporkan setelah terjadi gempa besar di berbagai belahan dunia)

Pada umumnya, mengupayakan bangunan dengan struktur rangka beton bertulang agar berperilaku memuaskan pada saat dilanda beberapa kali beban siklis gempa merupakan suatu tantangan bahkan di negara-negara industri yang telah memiliki teknologi konstruksi maju. Untuk memenuhi tantangan tersebut, dokumen ini mengusulkan dua alternatif teknologi bangunan yang dapat dibedakan dari karakteristiknya berdasarkan tingkat keamanan seismik yang lebih tinggi namun dengan biaya yang sebanding dengan struktur rangka beton bertulang. Kedua alternatif tersebut adalah konstruksi dengan dinding pengisi dari bata terkekang (*confined masonry construction*) dan kombinasi antara struktur rangka dan dinding geser beton bertulang.

Mengingat banyaknya jumlah bangunan eksisting berupa struktur rangka beton bertulang dengan dinding pengisi yang terletak di daerah gempa dengan kategori menengah hingga tinggi, dokumen ini juga akan membahas beberapa strategi perkuatan bangunan tersebut agar dapat mengurangi resiko akibat beban gempa.

Sangat penting bagi semua yang berkecimpung di dalam proses pembangunan untuk mengetahui bagaimana perilaku bangunan-bangunan tersebut pada saat terjadi gempa bumi, tantangan utama apa yang terkait dengan keamanan sewaktu terjadi gempa, dan berbagai alternatif teknologi konstruksi yang cocok. Penyusun dokumen ini percaya, bahwa pengetahuan yang lebih baik mengenai isu kritis ini akan menghasilkan konstruksi dan praktik-praktik penguatan bangunan yang lebih baik, serta mengurangi korban jiwa dan harta benda pada saat terjadi gempa bumi di kemudian hari.

Tentang WHE

World Housing Encyclopedia (WHE) adalah suatu proyek bersama antara Earthquake Engineering Research Institute dan International Association for Earthquake Engineering. Sukarelawan insinyur gempa dan para ahli bangunan pemukiman dari seluruh dunia berpartisipasi dalam proyek berbasis situs internet (*web-based*) dengan mengembangkan laporan tentang praktik pembangunan pemukiman di negara mereka masing-masing. Tambahan pula, para relawan mempersiapkan tutorial beraneka konstruksi teknologi serta meluangkan waktu mereka pada beberapa proyek khusus, seperti pada *World Adobe Forum* dan pengumpulan informasi beberapa alternatif pemukiman sementara. Semua informasi yang diberikan oleh para relawan akan diperiksa terlebih dahulu oleh mitra bestari. Kunjungi situs www.world-housing.net untuk informasi lebih lanjut.



**Kunjungi situs
www.world-housing.net
untuk informasi lebih
lanjut tentang *World
Housing Encyclopedia***

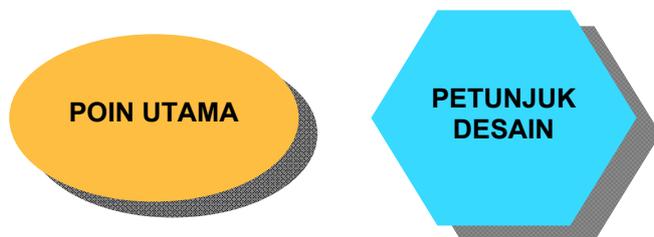
Daftar Isi :

1. PENDAHULUAN	1
2. PERTIMBANGAN-PERTIMBANGAN PERENCANAAN DAN DESAIN KONSEPTUAL	7
Bentuk Bangunan	7
Denah Yang Tidak Simetris	9
Dinding Pengisi Dari Bata	10
<i>Ketahanan dinding pengisi dari bata dalam arah tegak lurus bidang muka</i>	13
Kolom Pendek	13
Modifikasi Bangunan Eksisting	15
<i>Modifikasi</i>	15
<i>Penambahan arah vertikal</i>	15
Bangunan Bersebelahan : Pengaruh Benturan	16
Tingkat Yang Lemah dan Lunak	17
<i>Bagaimana menghindari tingkat yang lemah</i>	19
Keruntuhan Balok Kuat – Kolom Lemah	20
3. PERSYARATAN PENDETAILAN	23
Daktilitas	23
Balok	24
<i>Ragam kegagalan</i>	24
<i>Lokasi dan jumlah tulangan longitudinal</i>	24
<i>Sengkang</i>	27
Kolom	27
<i>Ragam kegagalan</i>	27
<i>Tulangan longitudinal</i>	28
<i>Tulangan transversal</i>	28
Pertemuan Balok-Kolom	30
Dinding Pengisi Dari Bata	33
Elemen Non-Struktural	34
4. PERTIMBANGAN-PERTIMBANGAN DALAM KONSTRUKSI	37
Kualitas Material	37
<i>Pemilihan dan pengontrolan kualitas material</i>	38
<i>Persiapan, perawatan dan pemeliharaan beton</i>	38
<i>Pemilihan dan kontrol pada baja tulangan</i>	39
Keahlian Pekerja (<i>Workmanship</i>)	40
Pemeriksaan (<i>Inspection</i>)	42
5. BEBERAPA ALTERNATIF STRUKTUR RANGKA BETON BERTULANG DENGAN DINDING PENGISI DARI BATA PADA WILAYAH DENGAN RESIKO GEMPA TINGGI	43
Mengapa Diperlukan Beberapa Alternatif	43
Alternatif-Alternatif	43
Bangunan Dengan Dinding Pengisi Dari Bata Yang Terkekang	44
<i>Latar belakang</i>	44
<i>Keuntungan-keuntungan</i>	45

Bangunan Struktur Rangka Beton Bertulang Dengan Dinding Geser	
Beton Bertulang	46
<i>Latar belakang</i>	46
<i>Keuntungan-keuntungan</i>	48
6. PERKUATAN BANGUNAN STRUKTUR RANGKA BETON BERTULANG	51
Pendahuluan	51
Asesmen Ketahanan Bangunan Terhadap Gempa	52
Cara Perkuatan Bangunan Eksisting Berstruktur Rangka Beton Bertulang	52
<i>Pemasangan dinding geser beton bertulang baru atau pengaku baja baru</i>	55
<i>Pelapisan (Jacketing)</i>	57
Perkuatan Dinding Pengisi Dari Bata Eksisting	61
Perkuatan Bangunan Berstruktur Rangka Beton Bertulang dengan -	
Tingkat Dasar Terbuka	61
<i>Tujuan Jangka Pendek = Mencegah Keruntuhan</i>	62
<i>Tujuan Jangka Panjang = Meningkatkan Ketahanan Terhadap Gempa</i>	63
Bagaimana Perkuatan Struktur Terhadap Gempa Berdampak Pada -	
Karakteristik Struktur Tersebut	63
Perkuatan Struktur Rangka Beton Bertulang Dengan Dinding Pengisi	
Dari Bata:Tantangan-Tantangan Dalam Penerapan	64
7. KESIMPULAN	67
Tantangan Secara Teknis	67
Para Pemangku Kepentingan (<i>Stakeholders</i>)	68
Penutup	68
8. DAFTAR PUSTAKA	69

CATATAN:

Di dalam dokumen ini **POIN UTAMA** dan **PETUNJUK DESAIN** ditempatkan pada margin tepi halaman – poin-poin ini ditujukan bagi pembaca yang tidak begitu tertarik pada penjelasan teknis dalam dokumen. **POIN UTAMA** dalam bentuk elips berwarna emas; **PETUNJUK TEKNIS** dalam bentuk heksagon berwarna biru.



1. Pendahuluan

Beton bertulang adalah salah satu material yang banyak dipergunakan pada bangunan modern. Beton adalah suatu “batu buatan” yang diperoleh dari hasil mencampur semen, pasir dan agregat dengan air. Beton segar dapat dicetak dalam berbagai bentuk, sehingga memberikan kepadanya sifat yang lebih menguntungkan dibandingkan material lainnya. Beton menjadi lebih populer setelah adanya penemuan semen Portland pada abad ke 19; tetapi dengan keterbatasan kekuatan tariknya, beton pada awalnya mengalami kendala untuk dipergunakan secara meluas dalam konstruksi bangunan. Untuk mengatasi kelemahan kekuatan tarik, baja tulangan ditanam dalam beton untuk membentuk bahan komposit yang lebih dikenal dengan beton bertulang. Penggunaan konstruksi beton bertulang dalam dunia modern berasal dari kemudahan didapaknya bahan dasar – baja tulangan dan juga beton. Selain produksi baja tulangan dan semen, pembuatan beton tidak memerlukan sarana produksi yang mahal. Tetapi, pembangunan dengan beton memerlukan tingkat teknologi tertentu, keahlian dan kualitas tenaga kerja, khususnya selama proses konstruksi di lapangan. Meskipun memerlukan pengalaman dan masukan dari profesional, banyak bangunan rumah tinggal atau bangunan hunian bertingkat rendah di seluruh dunia telah dan sedang dibangun mempergunakan beton bertulang tanpa dukungan rekayasa apapun. Bangunan-bangunan sejenis ini, di daerah rawan gempa, dapat menjadi perangkat yang mematikan. Hal ini menjadi motivasi di balik

pengembangan bahan pembelajaran ini.

Suatu bangunan beton bertulang tipikal (seperti terlihat pada Gambar 1) pada umumnya terdiri dari beberapa elemen horizontal (seperti pelat lantai dan balok), elemen vertikal yang langsing (kolom) dan elemen vertikal yang pipih (dinding). Pada umumnya, keseluruhan elemen tersebut dicor sehingga monolit – yaitu balok-balok dan kolom-kolom dicor di lapangan dalam suatu kesatuan pengecoran agar dapat bekerja sebagai satu kesatuan. Beton basah dituangkan pada bekisting kayu atau bekisting besi yang membungkus baja tulangan untuk elemen bangunan yang berbeda-beda. Bangunan seperti ini disebut sebagai bangunan beton bertulang monolit (dicor di tempat), untuk membedakan dengan bangunan beton pracetak, dimana masing-masing elemen dicor terpisah (biasanya dilakukan di lokasi pabrik) dan kemudian di rangkai di lokasi pembangunan. Pada bangunan beton bertulang monolit, sambungan antara elemen didapat dengan adanya baja tulangan yang menerus dari satu elemen ke elemen lainnya. Pertemuan antara balok dan kolom, dikenal sebagai sambungan balok-kolom, memainkan peran yang penting dalam menentukan kapasitas bangunan tersebut untuk menahan beban lateral.

Pada struktur rangka beton bertulang kesatuan aksi dari balok, kolom dan pelat lantai, memberikan kekuatan untuk memikul beban gravitasi dan beban lateral melalui aksi lentur di balok-balok dan kolom-kolom. Struktur rangka beton bertulang

yang dibangun di daerah rawan gempa harus memiliki daktilitas, atau kemampuan untuk menerima deformasi yang cukup berarti pada saat beban ekstrim; aspek ini akan dibahas di Bab 3. Struktur rangka yang didesain hanya untuk menahan beban gravitasi sering disebut struktur rangka tidak berdaktilitas (*non-ductile frames*). Struktur rangka beton bertulang yang tidak daktail dengan atau tanpa dinding pengisi banyak dijumpai dalam teknologi konstruksi bangunan yang diterapkan di seluruh dunia (Gambar 2).



Sejumlah besar bangunan rangka beton bertulang didirikan di seluruh dunia tanpa engineering input

Struktur rangka non-daktail tidak didesain untuk menahan beban gempa, tetapi sangat umum dijumpai di daerah rawan gempa

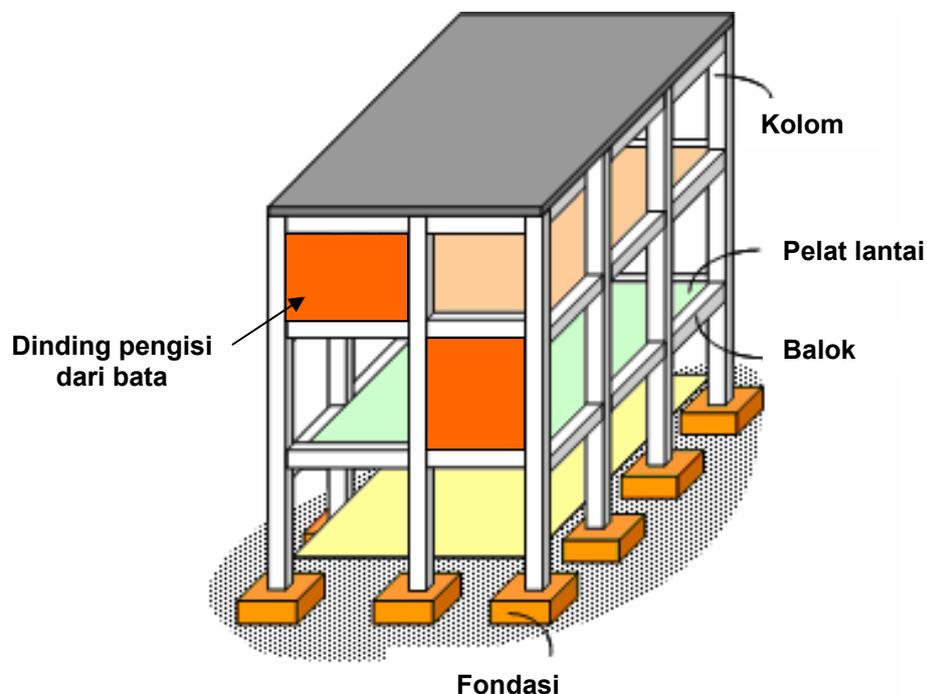
Dari 37 negara yang terwakili saat ini dalam *database* WHE, 23 di antaranya telah menyerahkan laporan tentang konstruksi beton yang rentan terhadap gempa; ini termasuk banyak negara padat penduduk yang ada di dunia.

Struktur rangka beton bertulang tiga dimensi (yaitu sistem balok-kolom-pelat lantai) dengan dinding bangunannya yang berupa dinding pengisi akan membuatnya cocok berfungsi sebagai rumah tinggal. Dinding-dinding ini dibangun pada lokasi yang diinginkan dalam bangunan, biasanya pada bidang vertikal di antara balok-balok dan kolom-kolom. Material yang paling populer dipakai di seluruh dunia sebagai dinding pengisi ini adalah bata merah dengan mortar semen. Akhir-akhir ini, penggunaan bata beton pejal atau berlubang dan bata merah berlubang sangat meningkat di seluruh belahan dunia. Dalam kasus tertentu, dinding pengisi ini di bagian dalamnya diberi baja tulangan, baik dalam arah vertikal maupun horizontal. Baja tulangan ini dijangkar pada balok dan kolom di sekitarnya.

Dengan pesatnya perkembangan populasi penduduk di perkotaan, struktur rangka beton bertulang

banyak dipergunakan sebagai konstruksi bangunan pemukiman baik di negara berkembang maupun negara industri. Pada saat penulisan dokumen ini (Oktober 2006), *database* global tentang konstruksi bangunan pemukiman di "World Housing Encyclopedia" (WHE) berisi lebih dari 110 laporan yang menjelaskan konstruksi bangunan pemukiman di 37 negara (lihat www.world-housing.net).

Bersama dengan bata, beton bertulang merupakan material yang banyak dipakai dalam konstruksi bangunan pemukiman – *database* saat ini berisi 26 laporan (kira-kira 25% dari seluruh laporan yang ada) menjelaskan konstruksi bangunan dari struktur rangka beton bertulang di Aljazair, Cile, Kolombia, Siprus, Yunani, India, Italia, Kirgistan, Malaysia, Meksiko, Teritori Palestina, Republik Arab Siria, Taiwan, Turki, Uzbekistan, Venezuela, Serbia, Rumania, dan Amerika Serikat.



Gambar 1. Tipikal Bangunan Rangka Beton Bertulang dengan dinding pengisi dari bata dan komponen-komponennya (sumber: C.V.R. Murty)



Gambar 2. Aljazair, daerah perkotaan banyak bangunan struktur rangka beton bertulang, seperti halnya dengan kota-kota di seluruh belahan dunia (foto: S. Brzew)

Sistem konstruksi ini secara ekstensif dipraktikkan di banyak bagian belahan dunia, pada khususnya di negara berkembang. Pada saat ini, penggunaan struktur rangka beton bertulang mencapai 75% dari seluruh bangunan yang ada di Turki, sekitar 80% di Meksiko dan lebih dari 30% di Yunani (Yakut, 2004). Aplikasi desain tersebut mencakup bangunan pemukiman satu lantai seperti di negara Aljazair dan Kolombia, hingga bangunan apartemen bertingkat tinggi di Cile, Kanada, Meksiko, Turki, India dan China. Bangunan apartemen bertingkat tinggi seperti ini mempunyai tingkat hunian yang cukup padat, dalam kasus tertentu mencapai beberapa ratus penghuni per bangunan. Contoh dari bangunan dengan struktur rangka beton bertulang dari berbagai negara diperlihatkan pada Gambar 3 dan Gambar 4.

Banyaknya penggunaan bangunan beton bertulang, terutama di negara berkembang, disebabkan karena relatif rendahnya biaya awal pembangunan dengan material ini dibandingkan

material lainnya seperti baja, misalnya. Biaya konstruksi bergantung pada lokasi dan praktik-praktik pembangunan setempat. Sebagai contoh, biaya bangunan satu unit tipikal bangunan pemukiman dari beton bertulang mencapai sekitar Rp. 1.000.000,- - Rp. 4.000.000,-*/ m² di India, Rp. 2.500.000,-*/ m² di Turki dan Rp. 5.000.000,-*/ m² di Italia (Yakut, 2004).

Struktur rangka beton bertulang sering dipergunakan di daerah beresiko gempa tinggi, seperti di Amerika Selatan, Eropa bagian selatan, Afrika Utara, Timur Tengah dan Asia Tenggara. Gempa bumi di dunia akhir-akhir ini, termasuk gempa Izmit dan Duceze di Turki tahun 1999, gempa Bhuj di India tahun 2001, gempa Chi-Chi di Taiwan tahun 2001 dan gempa Boumerdes di Aljazair tahun 2003, menunjukkan kelemahan bangunan-bangunan ini, beberapa diantaranya menyebabkan keruntuhan fatal yang menyebabkan ribuan korban jiwa. Salah satu penyebab kerusakan bangunan tersebut akibat gempa, seperti

yang banyak terjadi di negara-negara berkembang, adalah karena sebagian besar bangunan dengan struktur rangka beton bertulang yang ada didesain oleh arsitek dan insinyur yang tidak memperoleh bimbingan formal dalam perencanaan dan pelaksanaan bangunan tahan gempa serta dibangun oleh para pekerja bangunan yang kurang terlatih.

Konstruksi beton membutuhkan teknologi tingkat tinggi, juga dalam hal keahlian dan kualitas pekerja

* dengan asumsi US\$1 = Rp. 10.000,-

Kecuali apabila perhatian diberikan kepada banyak isu-isu desain dan pelaksanaan, bangunan-bangunan ini dapat mengalami kerusakan dan bahkan keruntuhan ketika terjadi gempa kuat

Para insinyur menggunakan kegagalan dalam peristiwa gempa yang lalu untuk belajar bagaimana memperbaiki kinerja struktur rangka beton bertulang

Tingginya tingkat hunian pada bangunan-bangunan ini, serta kehadirannya hampir di semua tempat di seluruh dunia, sering menjadi penyebab kehilangan jiwa dan harta dalam jumlah yang cukup berarti akibat buruknya perilaku bangunan pada saat terjadi gempa. Oleh sebab itu, perhatian secara khusus dibutuhkan untuk memahami berbagai tantangan akibat gempa bumi dan untuk memastikan bahwa fitur-fitur yang sesuai perlu dipertimbangkan dalam desain arsitektur, desain struktur dan pelaksanaan konstruksi bangunan beton bertulang. Gambar 5 menunjukkan pelaksanaan sebuah bangunan modern dengan struktur rangka beton bertulang di Meksiko. Berbagai pertimbangan utama yang berhubungan dengan pembangunan struktur rangka beton bertulang akan dibahas lebih lanjut dalam dokumen ini.

Estimasi jumlah bangunan dengan struktur rangka beton bertulang yang rentan rusak di daerah rawan gempa sangat mengejutkan, termasuk di negara

berkembang dan negara industri. Di negara industri, ribuan bangunan lama dengan struktur rangka beton bertulang termasuk dalam kategori berbahaya karena peraturan bangunan sebelum tahun 1970-an tidak memasukkan persyaratan-persyaratan pendetailan khusus untuk bangunan beton bertulang tahan gempa di mana dari beberapa kejadian gempa menunjukkan perlunya desain yang lebih daktail. *Database* WHE mencatat kerusakan yang dialami bangunan-bangunan lama dengan struktur rangka beton bertulang akibat beberapa gempa besar yang mengguncang Amerika dalam kurun waktu 50 tahun, seperti gempa Anchorage, Alaska tahun 1964, gempa San Fernando, California tahun 1971, dan gempa Northridge, California tahun 1994. Gempa-gempa ini menampakkan kerentanan bangunan dengan struktur rangka beton bertulang, dan telah mendorong pengembangan teknologi modern untuk perkuatan bangunan (Faison, Comartin dan Elwood, 2004).



Gambar 3. Bangunan rendah hingga menengah berstruktur rangka beton bertulang: Turki (kiri atas; dari Gulkan et al. 2002); Kolombia (kanan atas; dari Mejia 2002); Taiwan (kiri bawah; dari Yao dan Sheu 2002); India (kanan bawah; dari Jaiswal et al. 2002)



Gambar 4. Contoh-contoh bangunan beton bertulang bertingkat tinggi di Kanada (kiri; dari Pao dan Brzev 2002) dan Chile (kanan; dari Maroni dan Gomez 2002). Dinding geser beton bertulang memberikan ketahanan terhadap dampak gempa pada bangunan-bangunan ini, sedangkan kolom-kolom didesain untuk memikul beban gravitasi

Secara ideal, upaya terbaik adalah memperkuat dan melindungi semua bangunan ini dari pengaruh gempa di masa mendatang agar memperkecil kerusakan dan kehilangan properti. Tetapi, dalam situasi belum terjadinya gempa, biasanya tidak tersedia dana untuk memperkuat bangunan dalam jumlah besar yang ada pada sebuah komunitas. Oleh karenanya ada sebuah kebutuhan untuk mengembangkan berbagai strategi dan kebijakan untuk menetapkan prioritas bangunan mana yang perlu diperkuat sesuai dengan sumber dana dan kepentingannya. *Database* WHE memuat beberapa laporan yang menjelaskan teknik perkuatan untuk bangunan dengan struktur rangka beton bertulang di negara-

negara seperti Amerika, Meksiko, Aljazair, India, Yunani, Kolombia, Chile, Italia, Rumania, Taiwan, Turki, dll. Secara umum strategi perkuatan yang cocok untuk struktur rangka beton bertulang akan dibahas dalam dokumen ini (lihat Bab 6).

Sehubungan dengan rentannya bangunan dengan struktur rangka beton bertulang terhadap gempa besar, penting kiranya untuk mempertimbangkan beberapa alternatif pembangunan struktur rangka beton bertulang, yang dapat memberikan keamanan seismik yang lebih baik sebanding dengan biaya dan kompleksitas pembangunan; beberapa alternatif akan diusulkan kemudian dalam dokumen ini (lihat Bab 5)

Oleh karena adanya resiko keruntuhan yang tinggi, pelaksanaan struktur rangka beton bertulang harus dihindari, kecuali apabila didesain oleh seorang insinyur yang berkualifikasi



Gambar 5. Sebuah contoh pelaksanaan konstruksi struktur rangka beton bertulang di Mexico (sumber: Rodriguez dan Jarque 2005): pemasangan tulangan kolom (kiri) dan struktur rangka dengan dinding pengisi yang telah selesai dibangun (kanan).

2. Pertimbangan-Pertimbangan Perencanaan Dan Desain Konseptual

Bentuk Bangunan

Perilaku bangunan selama terjadinya gempa bumi tergantung pada beberapa faktor, termasuk apakah bentuknya sederhana dan simetris. Beberapa bangunan berperilaku sangat jelek saat dilanda gempa bumi yang terjadi akhir-akhir ini disebabkan oleh bentuk bangunan yang tidak beraturan (lihat Gambar 6). Karena bentuk bangunan ditentukan pada awal pengembangan suatu proyek, sangatlah penting para arsitek dan perencana struktur bekerja sama pada tahap perencanaan guna menjamin bahwa hal-hal yang tidak menguntungkan dapat dihindari dan konfigurasi bangunan yang terbaik dapat dipilih. Hal-hal penting berkaitan dengan peran konfigurasi bangunan akan diuraikan di bawah ini.

- Bangunan dengan bentuk denah yang sederhana umumnya akan berperilaku lebih baik sewaktu ada gempa besar dibandingkan dengan bangunan yang mempunyai

sudut-sudut tonjolan dari denah yang berbentuk U, V, H dan + (lihat Gambar 7a). Ini dikarenakan bangunan dengan geometri yang sederhana memastikan alur beban gaya inersia yang langsung dan sependek mungkin ke fondasi sewaktu menerima guncangan gempa (lihat Gambar 7b)

- Salah satu cara untuk mengurangi ketidak teraturan adalah memisahkan bangunan ke blok-blok yang sederhana dengan suatu celah (biasa disebut juga “*separation joint*”). Desain seperti ini mengijinkan konfigurasi bangunan yang sederhana untuk bekerja sendiri-sendiri, sehingga dapat menghindari konsentrasi gaya yang besar pada daerah sudut tonjolan bangunan yang seringkali menyebabkan kerusakan. Sebagai contoh, suatu bangunan dengan denah berbentuk – L dapat dibagi menjadi dua denah bangunan

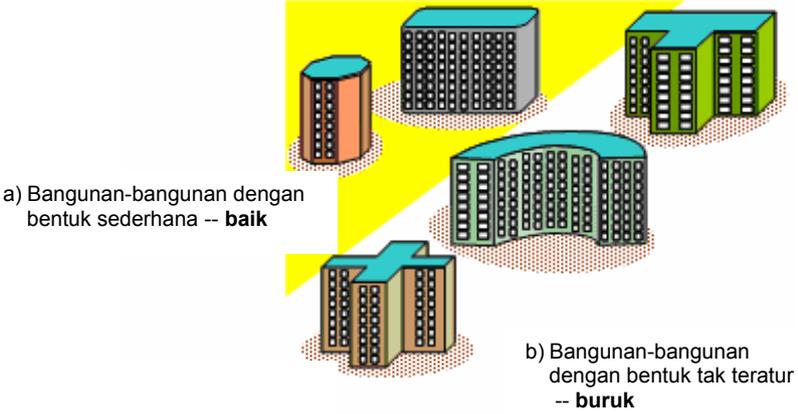
persegi empat mempergunakan sistem celah pada area pertemuannya (lihat Gambar 8). Tetapi konsekwensi dari pemisahan ini menyebabkan kedua bagian bangunan dapat beradu (atau hancur) pada saat terjadi gempa jika tidak dipisahkan dengan celah yang cukup.

Bangunan-bangunan dengan bentuk-bentuk sederhana menunjukkan kinerja yang baik ketika terjadi gempa

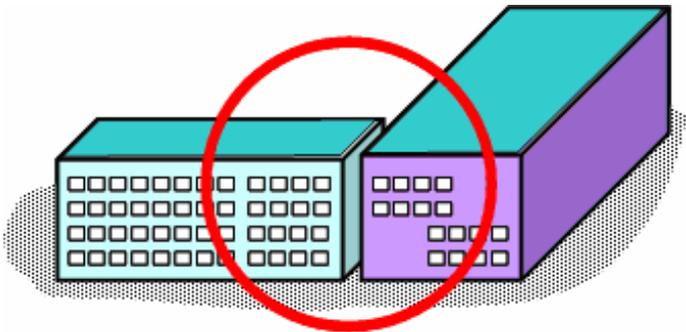


Gambar 6. Sebuah bangunan dengan bentuk yang tidak beraturan mengalami kerusakan yang ekstensif pada gempa Bhuj, India tahun 2001 (sumber: EERI 2001).

Hindari bangunan-bangunan dengan loncatan bidang muka dan tinggi tingkat yang bervariasi



Gambar 7. Pengaruh bentuk bangunan: a) bangunan-bangunan dengan bentuk sederhana memungkinkan gaya inersia akibat gempa mengalir terus ke fondasi; b) bangunan-bangunan dengan bentuk tak teratur memaksa gaya inersia gempa berbelok pada setiap sudut coakan, yang mengakibatkan kerusakan pada sudut-sudut ini dan mengakibatkan kinerja seismik bangunan yang buruk (sumber : Murty 2005).



Gambar 8. Celah pemisah membantu penyederhanaan denah bangunan (sumber: Murty 2005).

Hubungkan semua elemen struktur dengan baik sepanjang alur beban

- Ketidak teraturan dalam arah vertikal dapat menyebabkan pengaruh yang jelek pada perilaku bangunan ketika terjadi gempa. Bangunan dengan loncatan bidang muka (*vertical setbacks*), seperti bangunan hotel dengan podium di bagian dasar, menyebabkan adanya perubahan ketahanan terhadap gempa yang mendadak pada level yang tidak menerus (lihat Gambar 9a). Bangunan dengan sedikit jumlah kolom atau dinding pada lantai

tertentu atau dengan ketinggian lantai yang tidak seperti biasanya (lihat Gambar 9.b) menunjukkan adanya tingkat yang lemah (*soft or weak story*) dan cenderung untuk menimbulkan kerusakan atau keruntuhan yang berawal dari tingkat yang tidak beraturan tersebut. Bangunan yang terletak pada suatu permukaan tanah miring (*sloping ground*) dengan kolom yang tidak sama tinggi sepanjang lereng tersebut, sering menunjukkan adanya kerusakan pada kolom-kolom pendek (lihat Gambar 9c)

- Diskontinuitas atau ketidak menerus pada elemen-elemen yang perlu menyalurkan beban inersia gempa dari bangunan atas ke fondasi perlu diperhatikan secara seksama. Sebagai

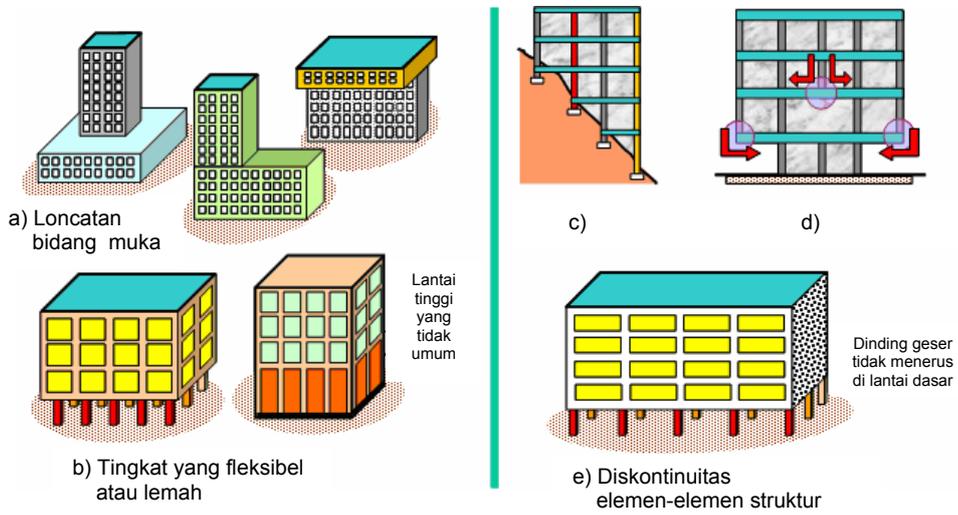
contoh, bangunan akan menjadi rentan jika kolom menggantung atau mengambang di atas balok pada lantai tengah dan tidak menerus ke fondasi (lihat Gambar 9d). Begitupun dengan bangunan yang mempunyai dinding beton bertulang yang direncanakan untuk menerima beban inersia gempa dan menyalurkannya ke fondasi tapi tidak menerus akan sangat rentan terhadap kerusakan akibat gempa (lihat Gambar 9e). Apabila pada suatu lantai bangunan, dinding tersebut tidak menerus ke lantai di bawahnya, bangunan dapat dipastikan akan mengalami kerusakan yang berat sewaktu terjadi guncangan gempa kuat.

Denah yang Tidak Simetris

Bangunan dengan bentuk tidak beraturan mempunyai denah yang tidak sederhana/simetris, hal ini dapat mengakibatkan terjadi puntir ketika mengalami guncangan gempa (lihat Gambar 10). Sebagai contoh, bangunan dengan lantai gantung yang ditopang di bawahnya (lihat Gambar 11). Bagian yang bergantung akan terpuntir pada kolom langsung di bawahnya.

Sangat penting untuk mengurangi puntir pada suatu bangunan pada saat terjadi gempa. Puntir pada sebuah bangunan, biasa disebut torsi oleh para insinyur, menyebabkan elemen-elemen struktur (seperti dinding) pada lantai yang sama mengalami pergerakan horizontal dengan besaran yang berbeda. Akibat adanya torsi, kolom dan dinding pada bagian tepi akan mengalami pergerakan yang relatif lebih besar daripada kolom dan dinding pada bagian tengah denah bangunan sehingga akan mengalami kerusakan yang besar (lihat Gambar 12)

Bangunan-bangunan dengan alur beban tak langsung menunjukkan kinerja yang buruk ketika terjadi gempa



Pastikan bangunan-bangunan memiliki denah dan bentuk yang simetris

Gambar 9. Perubahan yang mendadak pada alur gaya menyebabkan kinerja seismik yang buruk pada bangunan: a) loncatan bidang muka; b) tingkat yang fleksibel atau lemah; c) permukaan tanah yang miring; d) kolom menggantung atau melayang; e) diskontinuitas elemen-elemen struktur (sumber: Murthy 2005).



Elemen-elemen struktur (seperti kolom dan dinding) tidak seharusnya mengalami diskontinuitas (tak menerus) pada lantai-lantai bawah

Gambar 10. Contoh-contoh ketidak teraturan dalam arah vertikal (dari Bangladesh) yang dapat menyebabkan terjadinya pengaruh torsi yang tidak diharapkan (sumber: M. A. Noor).

Pastikan elemen-elemen arsitektural tidak mengubah respons struktural bangunan

Banyak bangunan mengalami efek torsi yang sangat besar ketika dilanda gempa-gempa yang selama ini pernah terjadi. Cara terbaik untuk mengurangi (jika tidak dapat menghilangkan sama sekali) torsi adalah dengan menjamin bahwa bangunan mempunyai denah simetris (yaitu, massa yang terdistribusi merata dan elemen-elemen vertikal penahan beban gempa horizontal yang ditempatkan secara merata). Struktur rangka penahan gempa sangat dianjurkan untuk ditempatkan secara simetris pada bagian perimeter luar bangunan; penempatan seperti ini akan menambah ketahanan bangunan dari pengaruh torsi/puntir.

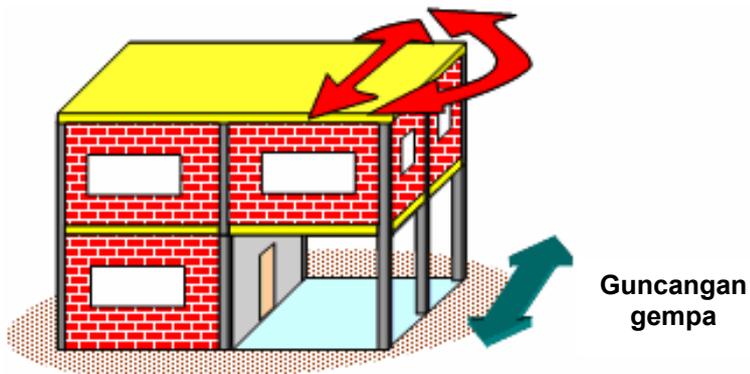
Memang penting memperhatikan estetika dalam proses perencanaan. Tetapi, ini harus dilakukan dengan pertimbangan biaya agar perilaku bangunan juga baik dan mempunyai keamanan yang cukup terhadap gempa. Fitur-fitur arsitek yang

mengganggu perilaku bangunan pada saat terjadi gempa harus dihindarkan. Apabila fitur-fitur arsitek yang tidak beraturan tetap ada dalam desainnya, upaya rekayasa yang secara signifikan lebih tinggi tingkatannya diperlukan dalam perencanaan struktur.

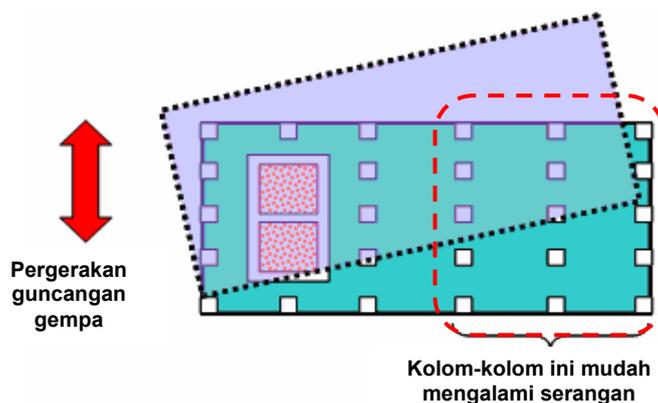
Dinding Pengisi Dari Bata

Di beberapa belahan dunia, terutama di negara berkembang, dinding bata dipergunakan sebagai dinding pengisi baik di bagian interior maupun eksterior struktur rangka beton bertulang (lihat Gambar 13). Material dari dinding pengisi sangat bervariasi, mulai dari potongan batu alam (seperti granit, *sandstone* atau *laterite*) sampai ke bata buatan manusia (seperti bata merah pejal, bata merah berlubang, batako dari beton pejal dan yang berlubang) seperti terlihat pada Gambar 14.

Sediakan struktur rangka penahan gempa yang simetris di sekeliling perimeter luar bangunan



Gambar 11. Sebuah bangunan dengan lantai dasar yang terbuka pada satu sisi mengalami puntir ketika terjadi gempa (sumber: Murty 2005).



Gambar 12. Elemen-elemen vertikal bangunan yang bergerak lebih besar ke arah horizontal akan menderita lebih banyak kerusakan (sumber: Murthy 2005).

Mendesain bangunan-bangunan dengan dinding pengisi dari bata agar berperilaku baik pada saat terjadinya gempa merupakan sebuah tantangan tersendiri. Perilaku bangunan seperti ini pada gempa-gempa yang pernah terjadi menunjukkan bahwa adanya dinding pengisi dari bata justru memperlemah perilaku bangunan pada saat terjadinya gempa. Dinding pengisi dari bata seharusnya tidak dipergunakan KECUALI secara spesifik didesain oleh perencana struktur untuk :

- bekerja sama dengan struktur rangka untuk menahan gaya lateral, atau
- tidak dihubungkan dengan struktur rangka

Beberapa praktisi bangunan secara keliru beranggapan bahwa adanya dinding pengisi dari bata pada panel struktur rangka akan memperbaiki perilaku bangunan

pada saat terjadinya gempa, tetapi dari kejadian beberapa gempa sebelumnya anggapan tersebut umumnya salah (lihat Gambar 15). Anggapan tersebut hanya akan benar apabila bangunan telah didesain dengan seksama oleh seorang perencana struktur sedemikian sehingga dinding pengisi dari bata memberikan sumbangan sebagai batang diagonal tanpa menyebabkan kerusakan pada struktur rangka. Struktur rangka terbuka (tanpa dinding bata pengisi) seharusnya dapat bertahan terhadap pengaruh gempa (lihat Gambar 16a). Dinding pengisi dari bata harus terdistribusi merata dalam bangunan (lihat Gambar 16b). Dinding pengisi dari bata yang tidak menerus pada lantai di bagian tengah atau lantai bagian dasar, akan menimbulkan pengaruh yang tidak diinginkan pada alur gaya (lihat Gambar 16c)

Pengaruh dinding pengisi harus diperhitungkan dalam perencanaan struktur



Gambar 13. *Tipikal konstruksi dinding pengisi dari bata merah di Turki: dinding pengisi dari bata ditambahkan setelah pelaksanaan konstruksi struktur rangka selesai (sumber: Gulkan et al. 2002).*



(a)



(b)

Gambar 14. *(a) Aneka unit bata untuk dinding pengisi dari Peru; (b) Tipikal unit bata merah kosong dari Peru (foto: H.Faison).*



(a)



(b)

Dinding pengisi dari bata mempengaruhi kinerja seismik sebuah bangunan rangka secara signifikan

Dinding pengisi dari bata yang terkekang adalah alternatif yang fisibel bagi struktur rangka beton bertulang dengan dinding-dinding pengisi

Dinding-dinding pengisi harus didistribusikan secara seragam dalam sebuah bangunan

Dinding pengisi dari bata berperilaku seperti batang diagonal tekan dan menambah kekakuan dari struktur rangka beton bertulang pada suatu bangunan. Penambahan kekakuan tergantung dari ketebalan dinding dan jumlah panel struktur rangka

Gambar 15. Bangunan dengan struktur rangka beton bertulang dengan dinding pengisi dari bata di Aljazair (setelah gempa Boumerdes 2003): (a) dinding pengisi dari bata gagal dalam dua arah; (b) Kegagalan dinding pengisi dari bata memperlihatkan retak diagonal akibat aksi batang tekan (foto: S. Brzev).

yang mempunyai dinding bata pengisi, serta bisa sangat berarti dalam beberapa kasus (lebih dari 20 kali dibandingkan dengan struktur rangka terbuka beton bertulang). Penambahan kekakuan pada bangunan yang diakibatkan oleh adanya dinding pengisi akan mengurangi kemampuan struktur rangka untuk melentur dan berdeformasi. Pada struktur rangka daktail beton bertulang, dinding pengisi dari bata akan menghalangi elemen utama struktur (seperti kolom dan balok) untuk berperilaku daktail, sebaliknya beberapa struktur memperlihatkan perilaku yang getas (tidak daktail). Ini akan mencapai puncaknya dalam suatu keruntuhan yang tiba-tiba dan sangat dramatis.

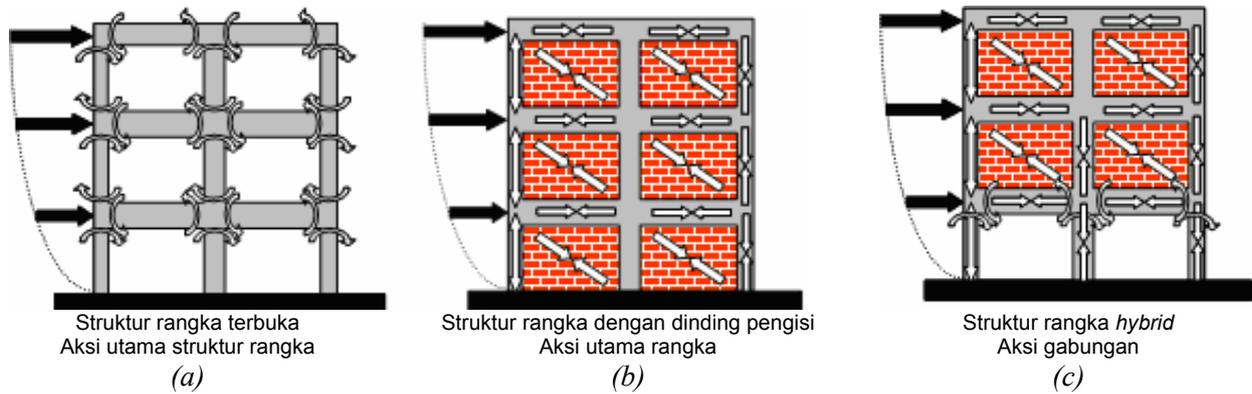
Bagaimanapun, sebagian besar bangunan berstruktur rangka beton bertulang dengan dinding pengisi dari bata tidak didesain untuk memperhitungkan pengaruh perilaku dinding bata, oleh karenanya tutorial ini menganjurkan upaya untuk menghindari sama sekali sistem konstruksi ini -- baik dengan cara mengekang dinding pengisi dari bata atau dengan mempergunakan dinding geser beton bertulang (lihat bahasan pada Bab 5)

Pada saat struktur rangka daktail beton bertulang didesain untuk mampu menerima pergerakan

yang besar tanpa mengalami keruntuhan, dinding pengisi dari bata perlu dipisahkan dari struktur rangka dengan celah yang cukup, sehingga dinding pengisi dari bata tidak akan mempengaruhi perilaku struktur rangka dan pergerakan struktur rangka tidak akan tertahan. Keuntungan lain dari terpisahnya dinding pengisi dari bata adalah dinding tidak akan mengalami kerusakan, oleh sebab itu akan mengurangi biaya perbaikan setelah gempa.

Untuk mengontrol kondisi cuaca di dalam bangunan, celah tersebut perlu ditutup dengan material yang elastis; persyaratan ini sedikit mahal dan memerlukan detail konstruksi yang baik agar dapat dilakukan secara tepat.

Secara keseluruhan, berdasarkan perilaku seismik yang kurang baik dari bangunan dengan struktur rangka non-daktail beton bertulang dan juga bangunan dengan dinding bata pemikul beban, konstruksi dinding pengisi dari bata yang terkekang (*confined masonry*) dapat diunggulkan sebagai alternatif yang terbaik untuk bangunan rendah di negara berkembang (Brzev 2007, Blondet 2005). Tipe bangunan ini lebih mudah dibangun dibandingkan dengan struktur rangka daktail yang dipisahkan dari dinding pengisinya.



Gambar 16. Dinding-dinding pengisi mempengaruhi perilaku sebuah struktur rangka beton bertulang: (a) struktur rangka tanpa dinding pengisi (b) dinding pengisi harus terdistribusi merata didalam bangunan (c) jika dinding pengisi tidak ada di tingkat dasar akan merubah alur beban, yang mana akan merupakan kerugian terhadap perilaku seismik (sumber: C.V.R. Murty).

Ketahanan dinding pengisi dari bata dalam arah tegak lurus bidang muka

Kesulitan untuk memisahkan dinding pengisi dari bata dari struktur rangka beton bertulang menyebabkan dinding tersebut rentan untuk runtuh dalam arah tegak lurus bidang permukaan dinding. Hal ini akan menjadi kenyataan apabila tinggi antar lantai besar atau jarak antar kolom juga besar. Begitu dinding bata mengalami retak, guncangan yang berkelanjutan akan meruntuhkan dengan mudah dinding pengisi yang relatif berat dan memunculkan ancaman yang serius bagi keamanan penghuni bangunan.

Kolom Pendek

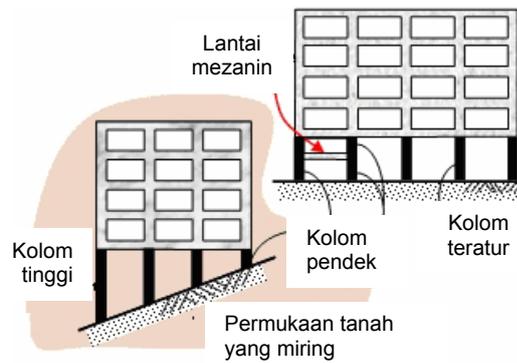
Beberapa kolom pada struktur rangka beton bertulang dapat lebih pendek dibandingkan

dengan kolom lainnya pada tingkat yang sama (lihat Gambar 17). Kolom pendek dijumpai pada bangunan yang dibangun di daerah lereng atau di bangunan dengan lantai mezanin atau pelat lantai loteng yang ditambahkan di antara dua lantai yang beraturan (lihat Gambar 18). Pada peristiwa gempa yang pernah terjadi, bangunan dengan struktur rangka beton bertulang yang mempunyai kolom dengan ketinggian yang berbeda dalam satu tingkat akan mengalami banyak kerusakan di bagian kolom pendek dibandingkan dengan kolom yang lebih tinggi yang terletak pada tingkat yang sama. Kolom pendek lebih kaku, dan memerlukan gaya yang lebih besar untuk berdeformasi dengan besaran yang sama dibandingkan dengan kolom yang lebih tinggi yang lebih fleksibel. Gaya yang lebih besar ini menyebabkan kerusakan yang intensif pada kolom pendek, seperti terilustrasi pada foto kerusakan akibat gempa (lihat Gambar 19)

Hindari desain-desain bangunan yang memiliki kolom pendek atau kolom tertahan (captive column)



Gambar 17. Sebuah bangunan dengan kolom-kolom pendek pada level basemen di Siprus (sumber: Levitch 2002).



Gambar 18. Contoh-contoh tipe bangunan yang umum dengan kolom-kolom pendek (sumber: Murthy 2005).



(a)



(b)

Gambar 19. Kerusakan kolom tertahan dari (a) Gempa Bourmerdes 2003 di Aljazair (foto: M.Farsi), dan (b) Gempa Bhuj 2001 di India (sumber: EERI).

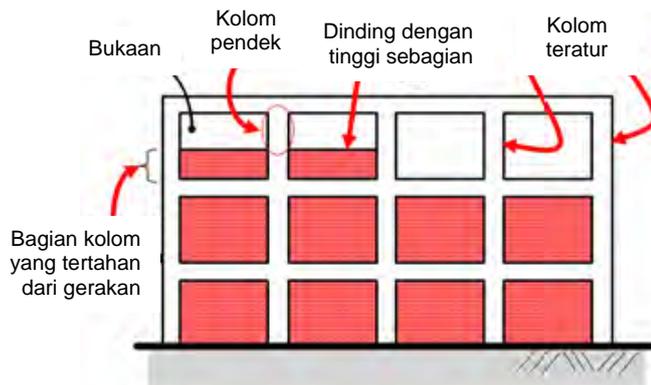
Pada berbagai peristiwa gempa di masa lampau, kolom-kolom pendek pada bangunan berstruktur rangka beton bertulang dengan kolom-kolom yang berbeda tinggi pada satu lantai, mengalami kerusakan yang signifikan

pengaruh kolom pendek terjadi. Bila suatu dinding bata mengisi sebagian tinggi dengan jendela di atasnya (lihat Gambar 20). Bagian atas kolom yang berada di samping jendela akan seperti kolom pendek diakibatkan oleh adanya dinding pengisi di bagian bawah jendela, yang akan membatasi pergerakan bagian bawah dari kolom tersebut. Kolom ini disebut kolom-kolom tertahan (*captive columns*) karena kolom tersebut tertahan sebagian oleh dinding yang tingginya tidak penuh. Dalam banyak kasus, kolom-kolom lainnya pada tingkat yang sama mempunyai ketinggian yang reguler, karena tidak ada dinding yang ada di antara kolom-kolom ini. Pada saat pelat lantai bergerak secara horizontal ketika terjadi gempa, bagian atas semua kolom akan bergerak dengan besaran deformasi yang sama. Tetapi, dinding yang kaku akan menahan pergerakan horizontal bagian bawah kolom, sehingga kolom tertahan bergerak dengan besaran deformasi yang sama untuk

ketinggian yang lebih kecil di samping bukaan jendela. Di lain pihak, kolom reguler berdeformasi dengan ketinggian penuh kolom. Tinggi efektif pada bagian mana kolom pendek dapat dengan bebas untuk melengkung sangatlah kecil, oleh karenanya kolom pendek akan menyerap gaya gempa yang lebih besar dibandingkan dengan kolom reguler lainnya. Sebagai hasilnya, kolom pendek mengalami kerusakan lebih banyak. Kerusakan pada kolom pendek ini biasanya berupa retak ber bentuk-X, yang merupakan ciri khas keruntuhan geser (*shear failure*)

Pada bangunan-bangunan baru, pengaruh kolom pendek harus dihindari pada tahap perencanaan arsitektur. Untuk bangunan eksisting, dinding pengisi pada bagian terjadinya kolom pendek harus dipisahkan dari kolom. Celah yang cukup sebaiknya disediakan agar kolom dapat bergerak bolak-balik tanpa terganggu dinding pengisi dari bata tersebut;

Di samping itu ada situasi khusus lain pada bangunan di mana



Gambar 20. Kolom-kolom tertahan umum dijumpai pada bangunan beton bertulang ketika dinding dengan tinggi sebagian dipasang terhubung dengan kolom-kolom dan dinding-dinding dianggap sebagai elemen-elemen non-struktural (sumber: Murthy 2005).

Ini sangat penting karena kolom-kolom tersebut mungkin tidak direncanakan untuk menahan gaya geser besar yang akan diserap akibat adanya kolom pendek.

Barangkali ada beberapa situasi dimana penggunaan kolom pendek tidak dapat dihindarkan. Bangunan tersebut harus direncanakan dan dibangun dengan meminimalkan kerentanannya terhadap kerusakan akibat gempa. Kolom-kolom pendek tersebut harus diketahui pada tahap analisis struktur dilakukan; masalah kolom pendek menjadi nyata ketika elemen-elemen seperti ini menyerap gaya geser yang besar.

Modifikasi Bangunan Eksisting

Modifikasi

Modifikasi bangunan umum dilakukan pada bangunan dengan struktur rangka beton bertulang dan dinding pengisi. Sebagai contoh: di Aljazair, India, dan Turki, modifikasi tipikal termasuk menutup area balkon untuk memperluas dimensi ruang atau membongkar dinding partisi

interior untuk memperluas ruang apartemen. Dalam beberapa kasus, kolom atau dinding penahan beban gravitasi (*bearing walls*) dihilangkan untuk memperluas dimensi apartemen; kemungkinan lain, tangga baru dibangun dengan melubangi pelat lantai; pada beberapa kasus dinding dilubangi untuk membuat bukaan. Apabila perubahan-perubahan ini tidak diperhitungkan dalam desain aslinya dan/atau dilakukan tanpa keterlibatan tenaga profesional, hal ini akan menambah resiko kerusakan bangunan akibat gempa.

Penambahan arah vertikal

Dalam beberapa kasus, penambahan lantai dilakukan di atas bangunan eksisting dengan struktur rangka beton bertulang tanpa memperhitungkan kapasitas kekuatan struktur eksisting. Pemilik bangunan biasanya memutuskan untuk membangun tambahan lantai ini apabila keperluan penambahan ruang dibutuhkan dan peraturan tata kota setempat lemah terhadap batasan ketinggian bangunan. Beberapa kasus, perluasan/penambahan ini dikerjakan tanpa Ijin Mendirikan Bangunan. Patut

disayangkan, perencanaan untuk menambah luas bangunan di kemudian hari tidak selalu memperhitungkan penambahan beban pada fondasi atau penambahan gaya-gaya yang akan membebani struktur rangka beton bertulang eksisting.

Modifikasi bangunan dapat memberikan pengaruh buruk pada kinerjanya saat dilanda gempa

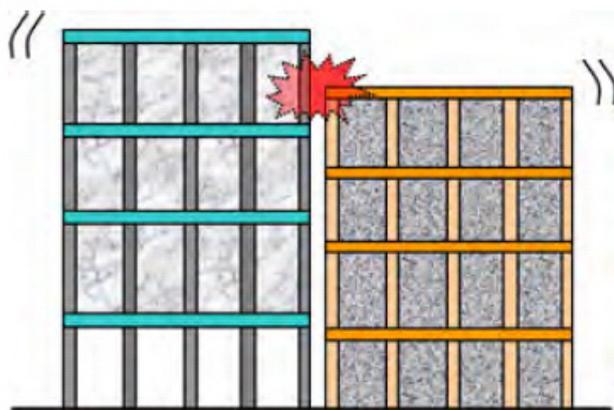
Di beberapa negara, bangunan rendah satu hingga tiga lantai dilengkapi dengan keluarnya tulangan *dowel* pada kolom-kolom di lantai atap untuk konstruksi tambahan lantai di kemudian hari. Secara umum, tulangan *dowel* yang tidak diproteksi akan mengalami korosi apabila bagian konstruksi yang akan diperluas tidak dilanjutkan dalam beberapa tahun. Karena bagian bawah dari kolom akan mengalami tegangan yang besar pada saat terjadi gempa, sebuah bidang pelemahan terbentuk pada lantai bangunan yang baru membuatnya rentan terhadap keruntuhan. Sebagai contoh nyata penambahan lantai pada bangunan di Siprus dapat dilihat pada Gambar 21.

Bangunan Bersebelahan: Pengaruh Benturan

Apabila dua bangunan berdekatan satu dengan lainnya, kemungkinan kedua bangunan akan berbenturan pada saat diguncang gempa kuat; pengaruh ini dikenal sebagai benturan (*pounding*). Efek benturan ini lebih berpengaruh pada bangunan tinggi. Apabila tinggi bangunan tidak sama, bagian atap dari bangunan yang lebih rendah kemungkinan akan membentur bagian tengah dari kolom bangunan yang lebih tinggi. Ini akan sangat berbahaya, dan dapat menjurus kepada keruntuhan lantai (lihat Gambar 22 dan Gambar 23).



Gambar 21. Contoh sebuah bangunan rangka beton bertulang di Siprus yang menunjukkan kolom-kolom lemah, rangka tak lengkap dan dinding parapet yang berat dan kaku (sumber: Levitch 2002).



Gambar 22. Benturan dapat terjadi pada bangunan-bangunan bersebelahan yang sangat dekat satu dengan yang lain akibat guncangan gempa (sumber: Murthy 2005).



(a)



(b)

Figure 23. (a) Benturan antara sebuah bangunan 6-lantai dan sebuah bangunan 2-tingkat di Golcuk, Turki mengakibatkan kerusakan pada kolom bangunan 6-lantai ketika terjadi gempa 1999; (b) Detail kerusakan akibat benturan pada bangunan 6-lantai yang diperlihatkan pada gambar (a) (sumber : Gulkan et al. 2002).

Tingkat Yang Lemah dan Lunak

Pada umumnya ketidak teraturan unsur vertikal pada bangunan terjadi ketika ada tingkat yang terbuka di bagian dasar bangunan. Tingkat dasar yang terbuka dari sebuah bangunan mempunyai kolom dan dinding pengisi dari bata di lantai atasnya tapi hanya ada kolom di lantai dasar (lihat Gambar 24). Secara sederhana bangunan ini seperti ditopang oleh sumpit. Tingkat dasar bangunan yang terbuka secara konsisten menunjukkan perilaku yang buruk pada saat terjadi gempa bumi di seluruh belahan dunia akhir-akhir ini. Sebagai contoh, pada saat gempa Turki di tahun 1999, Taiwan di tahun

1999, India di tahun 2001 dan gempa Aljazair tahun 2003, sebagian besar bangunan seperti ini mengalami kehancuran. Dalam banyak kasus, bagian atas dari tingkat dasar yang terbuka bergerak seperti satu blok yang kaku; ini membuat bangunan bergerak seperti pendulum terbalik, dengan kolom bagian lantai dasar seperti batang pendulum dan bagian lain dari bangunan berperan sebagai massa pendulum yang kaku. Sebagai konsekwensi, pergerakan yang besar terjadi secara lokal di bagian tingkat dasar saja. Hal ini menyebabkan kerusakan yang besar pada kolom-kolom tersebut pada saat terjadi gempa (lihat Gambar 25).



Gambar 24. Bangunan tipikal dengan sebuah tingkat dasar yang “lunak” di India (sumber: EERI 2001).

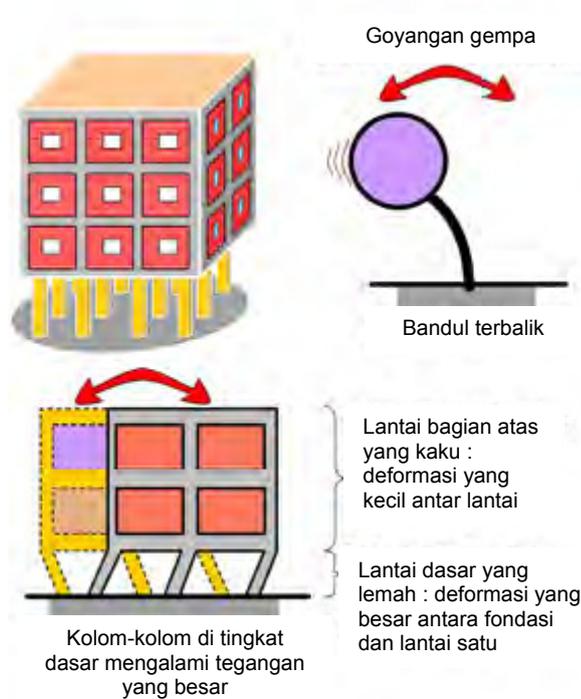
Tingkat yang lemah juga dapat terjadi di bagian tengah bangunan, dan menyebabkan kerusakan dan keruntuhan pada tingkat tersebut (lihat Gambar 26).

Berikut dua ciri karakteristik dari tingkat dasar bangunan yang terbuka:

- a). Secara relatif tingkat dasar lebih fleksibel dibandingkan dengan lantai di atasnya, yaitu, pergerakan level tingkat dasar dalam arah horizontal relatif lebih besar

dibandingkan dengan lantai di atasnya. Tingkat dasar yang lebih fleksibel ini disebut tingkat yang lunak (*soft story*), lihat Gambar 24.

- b). Secara relatif tingkat dasar lebih lemah dibandingkan dengan tingkat di atasnya, yaitu, total besarnya gaya inersia gempa arah horizontal yang ditahan oleh tingkat dasar lebih kecil daripada tingkat di atasnya. Ini dikatakan, tingkat dasar terbuka adalah tingkat yang lemah (*weak story*).



Gambar 25. Deformasi berlebihan yang terpusat pada tingkat dasar saja tidak dikehendaki, karena kolom-kolom pada tingkat dasar akan mengalami konsentrasi tegangan melampaui besaran yang direncanakan (sumber: Murthy 2005).



Gambar 26. Sebuah contoh bangunan yang roboh akibat tingkat “lunak” di tengah tinggi bangunan pada gempa Bhuj 2001 di India (sumber: EERI 2001).

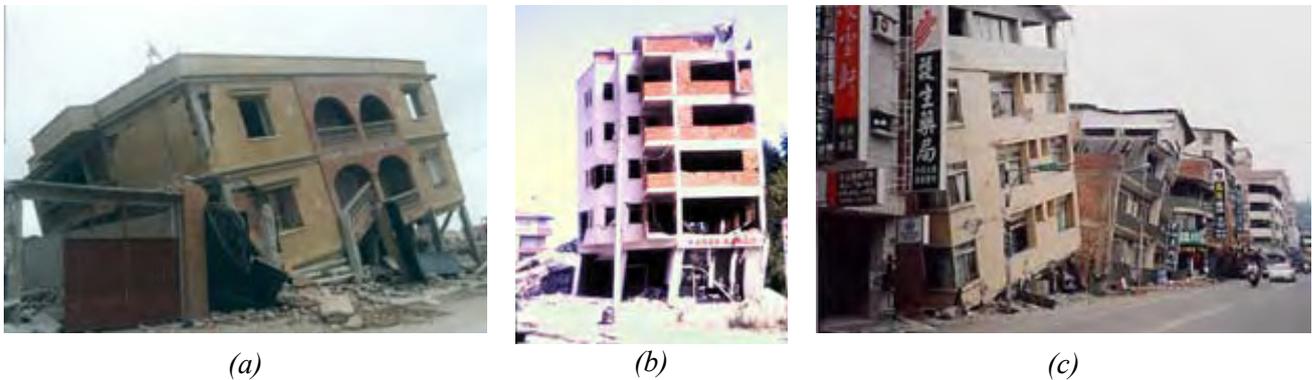
Bangunan dengan tingkat dasar yang terbuka biasanya disebut sebagai bangunan dengan tingkat yang lunak (*soft story buildings*), walaupun tingkat dasar bangunan ada kemungkinan lunak dan lemah. Umumnya, tingkat yang lunak atau lemah berada di lantai dasar (Gambar 27), tetapi dapat juga dijumpai di level lantai lainnya juga.

Bagaimana menghindari tingkat yang lemah

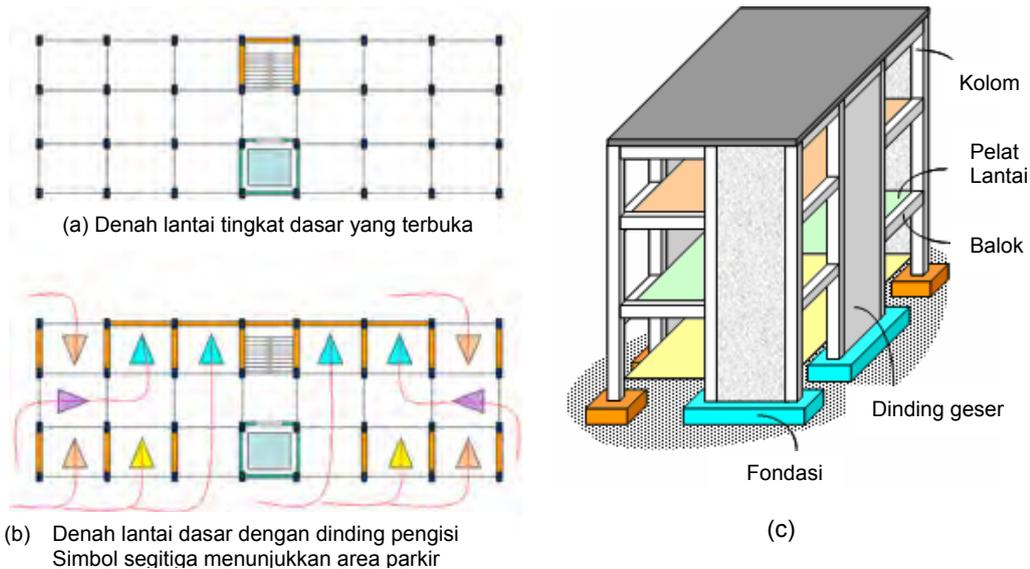
Arsitek dan perencana struktur dapat menggunakan strategi-strategi desain konseptual berikut ini untuk menghindari perilaku seismik yang kurang memuaskan dari bangunan dengan tingkat dasar yang terbuka:

- Sediakan beberapa dinding geser pada tingkat yang terbuka; Ini masih dapat dilakukan walaupun lantai dasar yang terbuka dipergunakan sebagai area parkir mobil (lihat Gambar 28 b)

Bangunan-bangunan dengan tingkat yang lunak sangat rentan terhadap kerusakan akibat gempa dan bahkan dapat runtuh



Gambar 27. Berbagai keruntuhan bangunan akibat pengaruh tingkat “lunak”: (a) Sebuah bangunan bertingkat rendah runtuh pada saat gempa Boumerdes 2003 di Aljazair (foto: S. Brzev); (b) Sebuah mekanisme tingkat lemah terjadi pada lantai pertama sebuah bangunan multi fungsi – lantai dasar digunakan untuk keperluan komersial dan mengalami kekurangan kekakuan yang disediakan oleh dinding-dinding pengisi pada lantai-lantai di atasnya (sumber: Gulkan et al. 2002); (c) Keruntuhan tingkat “lunak” pada gempa Chi Chi 1999 di Taiwan (sumber: Yao dan Sheu 2002).



Gambar 28. Bangunan perlu didesain dengan memperhatikan pengaruh tingkat yang terbuka pada kinerjanya (a). Ini bisa meliputi (b) menyediakan dinding-dinding pada semua panel yang mungkin, atau (c) memilih sistem struktur alternatif, misalnya dinding-dinding geser untuk memikul beban lateral akibat gempa (sumber: Murthy et al. 2006).

Hindari secara keseluruhan tingkat-tingkat terbuka - gunakan strategi desain alternatif

- Pilih sebuah alternatif sistem struktur (contoh, dinding geser beton bertulang) yang dapat memberikan ketahanan terhadap gempa. Apabila jumlah panel pada tingkat dasar yang dapat diisi dengan dinding bata tidak cukup menyumbangkan kekakuan lateral dan ketahanan pada tingkat dasar, struktur rangka daktail bukan merupakan pilihan yang tepat. Dalam kasus seperti ini, sebuah sistem alternatif, seperti dinding geser beton bertulang, diperlukan untuk memberikan ketahanan terhadap gempa (lihat Gambar 28 c)

daripada kolomnya. Kolom dapat dibuat lebih besar kuat lenturnya dibandingkan balok-baloknya dengan cara merencanakannya berpenampang yang lebih besar dan dengan jumlah baja tulangan longitudinal yang lebih banyak dibandingkan baloknya.

- b). Sambungan antara balok dan kolom juga antara kolom dan fondasi harus direncanakan sedemikian agar keruntuhan dapat dihindari, harus diyakini bahwa gaya-gaya dapat ditransfer dengan aman di antara elemen-elemen tersebut

Keruntuhan Balok Kuat - Kolom Lemah

Pada sebuah bangunan dengan struktur rangka beton bertulang yang menerima guncangan gempa, pengaruh gempa ditransfer dari balok ke kolom kemudian turun ke fondasi. Sambungan antara balok-kolom juga kritis untuk meyakinkan perilaku seismik bangunan tersebut cukup memuaskan. Konsep yang saat ini diterima untuk perencanaan seismik struktur rangka beton bertulang adalah pendekatan kolom kuat - balok lemah (*strong column-weak beam*). Prinsip perencanaan dengan pendekatan konsep ini dapat disimpulkan seperti di bawah ini :

- a). Kolom-kolom (yang menerima gaya-gaya dari balok) harus direncanakan dengan kuat lentur yang lebih besar dibandingkan balok-baloknya, dan pada gilirannya fondasi (yang menerima gaya-gaya dari kolom) harus direncanakan lebih kuat

Laporan dari gempa terdahulu di seluruh belahan dunia membuktikan bahwa bangunan-bangunan yang direncanakan berlawanan dengan konsep kolom kuat - balok lemah biasanya akan gagal pada saat gempa bumi.

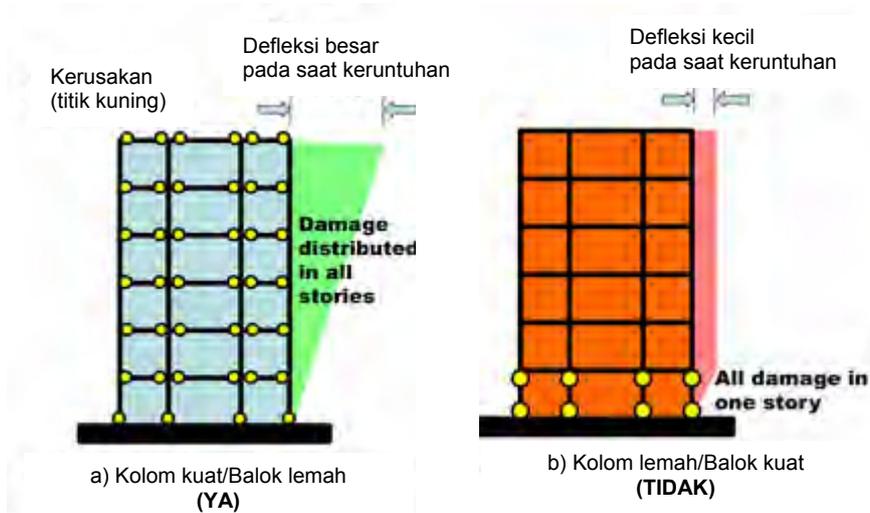
Apabila konsep kolom kuat - balok lemah diikuti dalam perencanaan, kerusakan pertama kali diharapkan terjadi pada balok terlebih dahulu. Apabila pendetailan balok dilakukan dengan baik maka perilaku daktail dapat dipastikan, struktur rangka bangunan dapat berdeformasi secara berarti, meskipun mengalami kerusakan secara progresif yang disebabkan oleh lelehnya tulangan balok. Pada gempa besar, tipe kerusakan terjadi pada beberapa balok di seluruh struktur tersebut; tetapi, ini dapat dipertimbangkan sebagai “kerusakan yang dapat diterima” karena tidak menyebabkan keruntuhan bangunan secara mendadak (lihat Gambar 29a). Di lain pihak, kolom yang lebih lemah dibandingkan balok akan menerima kerusakan berat secara lokal pada bagian atas dan bawah kolom pada lantai tertentu (lihat Gambar 29b);

Bangunan rangka beton bertulang yang didesain secara tepat akan mengalami kerusakan pada balok-balok ketika dilanda gempa kuat; tetapi kerusakan tipe ini tidak menyebabkan keruntuhan bangunan

Ini dapat menyebabkan keruntuhan pada keseluruhan bangunan, sekalipun kolom-kolom di lantai atasnya masih dalam kondisi tidak rusak.

Struktur yang rentan ini ditandai dengan dimensi kolom yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan dimensi balok dan dikenal sebagai struktur “balok kuat – kolom lemah” (seperi terlihat pada Gambar 30 - kanan). Keruntuhan dari kolom lemah dan kecil akibat gempa di berbagai

belahan dunia telah dilaporkan (lihat Gambar 31 dan Gambar 32). Sebagai contoh, beberapa bangunan beton bertulang runtuh akibat pengaruh ini pada peristiwa gempa Turki tahun 1999 (lihat Gambar 32). Walaupun keruntuhan total bangunan tidak terjadi, kerusakan yang terjadi umumnya ekstensif, membuat perbaikan tidak mungkin dilakukan. Bangunan seperti itu biasanya harus dibongkar setelah terjadi gempa.



Hubungan balok- kolom sangat menentukan terwujudnya kinerja seismik bangunan yang memuaskan

Gambar 29. Dua pendekatan desain yang berbeda menghasilkan kinerja seismik yang berbeda pula (sumber: Murthy 2005).



Kolom-kolom seharusnya lebih kuat daripada balok-balok

Gambar 30. Balok-balok harus didesain untuk beraksi sebagai penghubung-penghubung yang lemah pada sebuah struktur rangka beton bertulang; ini dapat dicapai dengan mendesain kolom-kolom lebih kuat daripada balok-balok (sumber: C.V.R. Murthy).



Gambar 31. Keruntuhan sebuah bangunan struktur rangka bertingkat akibat desain dengan prinsip “kolom lemah - balok kuat” pada gempa Bhuj 2001 di India (foto: C.V.R. Murthy).

Bangunan-bangunan dengan kolom-kolom lemah dan balok-balok kuat mengalami kerusakan pertama pada kolom; ini dapat mengakibatkan keruntuhan bangunan



Gambar 32. Keruntuhan tingkat berganda pada sebuah bangunan 6-tingkat akibat desain dengan balok kuat – kolom lemah pada gempa Turki 1999 (sumber: Gulkan et al. 2002).

3. Persyaratan Pendetailan

Daktilitas

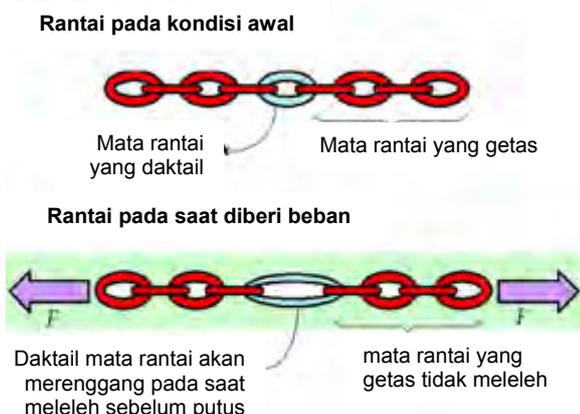
Getaran gempa menyebabkan pergerakan kuat di bawah bangunan dan juga menyebarkan energi ke bangunan tersebut. Filosofi desain tahan gempa adalah untuk membuat agar bangunan menyerap energi ini dengan membiarkan terjadi kerusakan di lokasi yang tepat pada elemen-elemen struktur tertentu. Kerusakan-kerusakan ini berhubungan dengan pengaruh deformasi yang terjadi secara signifikan, dan kelelahan yang menyebar (meluas) pada baja tulangan di dalam elemen beton bertulang. Perilaku ini disebut sebagai perilaku daktil. Daktilitas menunjukkan kemampuan struktur dalam menahan pengaruh deformasi akibat kondisi pembebanan yang berlebihan dan oleh karenanya menyerap pengaruh energi gempa. Mengupayakan daktilitas pada elemen beton bertulang merupakan tantangan tersendiri karena perilaku beton dan baja tulangan yang berbeda: beton adalah material getas, yang hancur ketika terkena tekan dan retak jika terkena tarik; sebaliknya, baja tulangan menunjukkan perilaku daktil

ketika terkena tarik. Sehingga, struktur beton bertulang dapat berperilaku daktil jika didesain dengan memanfaatkan sifat material baja yang daktil.

Walaupun demikian, salah satu tantangan utama yang berhubungan dengan desain ketahanan gempa pada struktur beton bertulang adalah memastikan agar elemen-elemennya berperilaku daktil dan kerusakan dapat terjadi pada lokasi yang sudah ditentukan sebelumnya. Hal ini dapat dicapai dengan menerapkan *Pendekatan Desain Kapasitas* yang dijelaskan melalui analogi rantai (lihat Gambar 33). Mempertimbangkan bahwa sebuah rantai terbuat dari sambungan-sambungan yang getas; ketika ditarik, kegagalan pada beberapa sambungan menyebabkan kegagalan pada keseluruhan rantai. Namun, ketika diberikan sebuah sambungan yang daktil pada rantai, ragam kegagalan yang daktil dapat terjadi jika sambungan yang daktil tersebut dibuat sebagai bagian terlemah dan gagal terlebih dahulu. Agar kegagalan daktil terjadi pada struktur ini, sambungan yang getas harus dibuat lebih kuat daripada sambungan yang daktil.

Baja dan beton dikombinasikan untuk memperoleh keuntungan dari sifat-sifat terbaik setiap material

Perencanaan bangunan tahan gempa bertujuan untuk memastikan bahwa kerusakan terjadi pada lokasi-lokasi tertentu di dalam bangunan



Gambar 33. Metode Desain Kapasitas dapat memastikan rantai gagal dengan perilaku daktil (sumber: Murthy 2005).

Struktur daktail menyerap energi gempa melalui kerusakan lokal, oleh karena itu mencegah keruntuhan

Balok, kolom, pertemuannya dapat direncanakan dengan hati-hati sehingga keruntuhan dapat dicegah bahkan ketika dilanda gempa yang sangat merusak

Perilaku daktail bangunan dengan struktur rangka beton bertulang pada saat terjadi gempa sangat diharapkan karena perilaku tersebut memberi keamanan kepada para penghuni gedung. Perilaku daktail dapat dipastikan dengan mendesain balok, kolom, dan pertemuannya dengan hati-hati, sehingga keruntuhan dapat dihindari, bahkan ketika terjadi gempa yang menghancurkan. Perlu dicatat, dalam kasus-kasus ekstrim, kerusakan yang berarti mungkin terjadi pada gedung-gedung yang daktail. Strategi utama adalah untuk mencegah terjadinya ragam kegagalan yang getas sebelum ragam kegagalan daktail terjadi terlebih dahulu.

Pendetailan yang daktail adalah suatu proses untuk memastikan bahwa ketentuan di atas diberlakukan ketika memproporsikan elemen-elemen struktur rangka beton bertulang dan menyediakan baja tulangan yang dibutuhkan. Hal ini dapat dicapai melalui pemilihan dimensi dan pengaturan tulangan balok, kolom, dan titik pertemuannya dengan tepat, seperti yang dibahas di berikut ini.

Balok

Ragam kegagalan

Dua ragam kegagalan yang mungkin terjadi pada balok

(a). Kegagalan lentur (getas atau daktail); kegagalan getas terjadi ketika terdapat baja tulangan longitudinal yang terlalu banyak pada wilayah tarik balok, sedangkan kegagalan daktail terjadi jika balok didesain kebalikannya dengan jumlah baja tulangan yang relatif lebih sedikit pada area tarik.

(b). Kegagalan geser; kegagalan ini terjadi ketika jumlah (ukuran dan/atau jarak) sengkang tidak cukup. Kegagalan ini, yang ditandai dengan terjadinya retak diagonal pada bagian ujung balok, selalu getas dan harus dihindari dengan menyediakan sengkang tertutup dengan spasi rapat.

Ragam kegagalan getas tidak diharapkan dan harus dihindari dengan melakukan desain dan pendetailan terhadap tulangan longitudinal dan sengkang secara terampil, seperti yang dibahas pada bagian ini.

Lokasi dan jumlah tulangan longitudinal

Tulangan longitudinal sebaiknya disediakan sepanjang balok untuk menahan retak lentur pada permukaan balok yang disebabkan oleh tarik. Tidak seperti beban gravitasi dimana arah beban sudah diketahui, gaya lateral mempunyai arah yang berubah-ubah selama terjadi getaran tanah akibat gempa. Hal ini menyebabkan baik permukaan atas maupun bawah balok mengalami tarik dan membutuhkan tulangan longitudinal (lihat Gambar 34). Perilaku balok berbeda jika beban yang diberikan berbeda. Balok dalam kondisi awal tanpa beban tidak memiliki tarik pada permukaannya (kondisi A). Begitupun, akibat beban gravitasi ketika arahnya tidak berubah (kondisi B), bagian bawah permukaan tengah balok mengalami tarik (lihat poligon merah yang lebih besar daripada kotak yang aslinya dalam A), sedangkan permukaan atas mengalami tekan (lihat poligon biru yang sekarang lebih kecil dari kotak aslinya pada kondisi A). Sebaliknya, untuk getaran gempa dalam satu arah

(kondisi C), permukaan atas pada salah satu ujung balok mengalami tarik dan permukaan bawah pada ujung yang sama mengalami tekan (lihat poligon merah dan biru). Pada saat yang bersamaan, karena lentur yang berbalik arah pada ujung yang lain, maka permukaan atas mengalami tarik sedangkan bawah mengalami tekan. Jika arah pembebanan dibalik, situasi yang dialami balok menjadi kebalikannya. Bagian balok yang diharapkan menerima tarik harus memiliki tulangan longitudinal untuk menghindari retak pada beton. Akibat pembebanan gempa, kedua permukaan balok membutuhkan tulangan, tidak seperti akibat beban gravitasi dimana arah beban tidak berubah dan tegangan tarik terjadi hanya pada satu sisi saja. Jadi, bagian-bagian yang berbeda pada balok membutuhkan tulangan tergantung dari kondisi pembebanan. Secara umum, praktik desain seismik yang baik menyediakan sedikitnya dua tulangan (dengan total luas tidak kurang dari desain luas baja tulangan dari perhitungan) pada permukaan

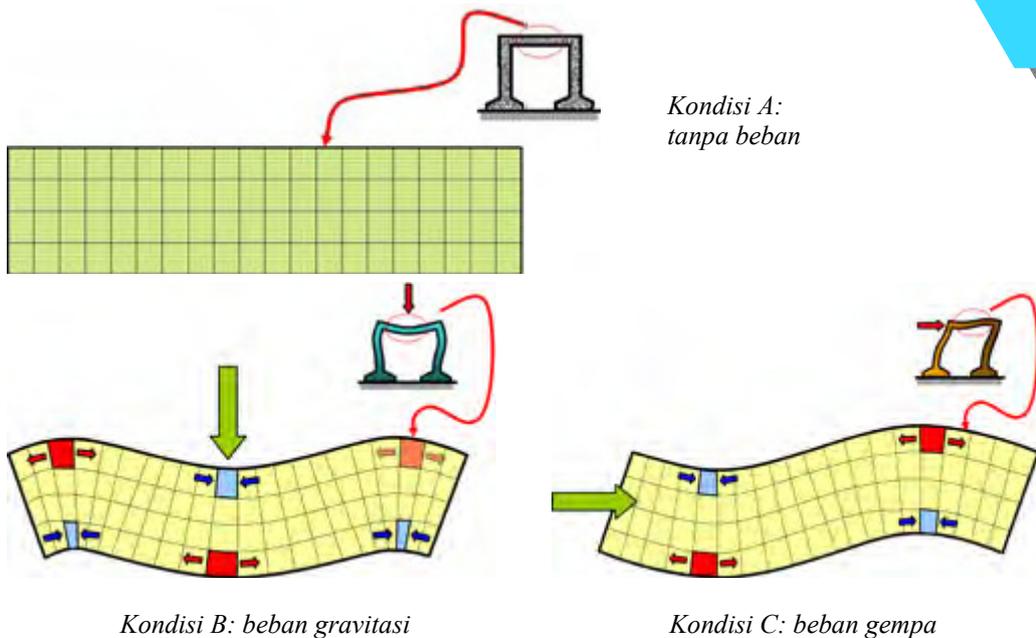
atas dan bawah balok sepanjang bentangnya. Pada ujung-ujung balok, jumlah tulangan bawah sebaiknya paling sedikit setengah dari yang tersedia di atasnya.

Karena secara praktis tidaklah mungkin menggunakan tulangan yang sangat panjang dalam konstruksi, umumnya orang menggunakan baja tulangan yang lebih pendek dan menyambungkannya sehingga dapat memenuhi panjang bentang yang dibutuhkan. Untuk memastikan bahwa baja tulangan cukup kuat ketika satu tulangan disambung dengan yang lain, tulangan tersebut harus disalurkan sepanjang jarak tertentu, tergantung diameter tulangan. Panjang penyambungan ini disebut sambungan lewatan (*lap splice*). Penyambungan harus dihindari pada daerah di mana tulangan longitudinal diharapkan akan mengalami leleh akibat tarik. Tulangan atas seharusnya disambung pada area sepertiga bentang balok (lihat Gambar 35). Penyambungan tersebut harus dilakukan dengan jarak yang cukup dan pada daerah

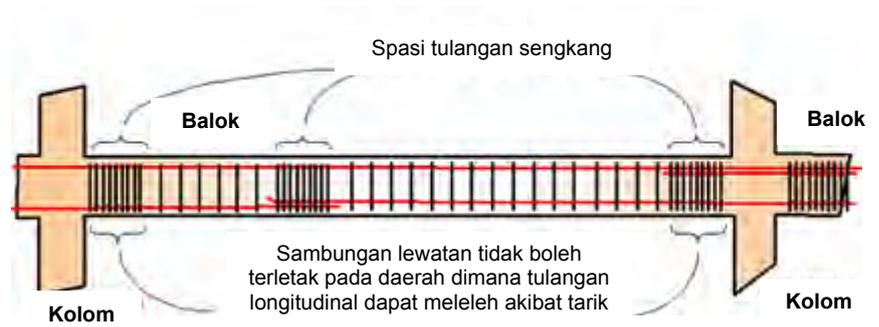
sambungan lewatan diberi sengkang dengan spasi yang lebih rapat. Secara umum, peraturan gempa menyebutkan bahwa tidak lebih dari 50% tulangan boleh disambung pada bagian tertentu.

Kegagalan getas balok akibat geser harus dihindari

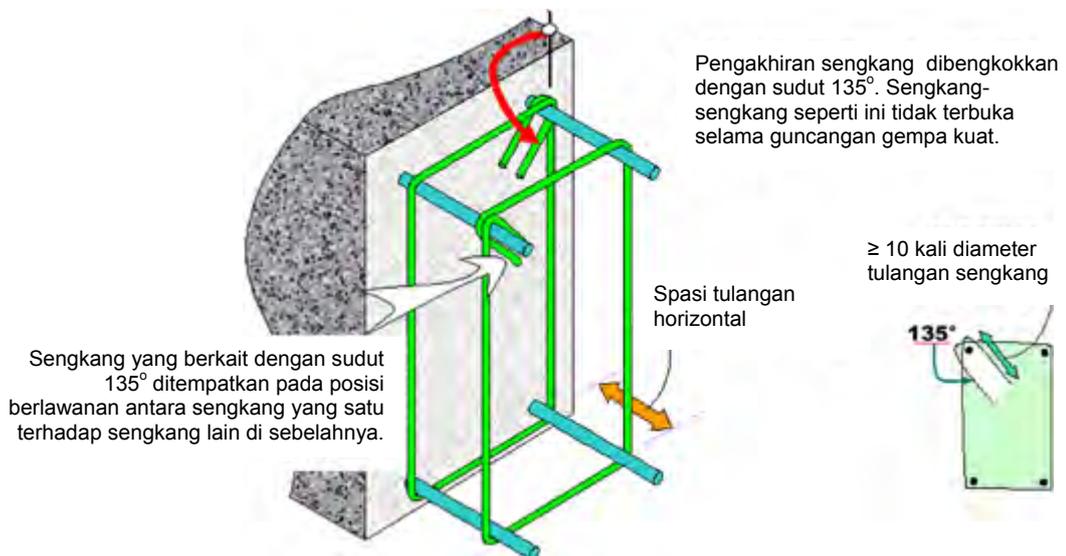
Sengkang yang diatur berdekatan harus disediakan pada daerah ujung balok dan sambungan lewatan



Gambar 34. Perilaku balok pada berbagai kondisi pembebanan yang berbeda-beda: (A) tanpa beban; (B) beban gravitasi; (C) gempa dari satu arah; persyaratan penulangan pada balok di lokasi yang berbeda-beda bergantung pada kondisi pembebanan (sumber: H. Faison).



Gambar 35. Sengkang harus dipasang secara rapat pada ujung-ujung balok dan sambungan-sambungan lewatan (sumber: Murthy 2005).



Gambar 36. Balok beton bertulang harus memiliki sengkang dengan kait 135° mengelilingi tulangan-tulangan longitudinal (sumber: Murthy 2005).

Sengkang

Sengkang mencegah kegagalan geser yang getas pada balok beton bertulang dengan membatasi retak geser diagonal dan dengan melindungi beton dari menonjol keluar (*bulging outward*) akibat lentur; sengkang juga menyediakan pengekangan dan mencegah terjadinya tekuk pada tulangan longitudinal yang tertekan.

Semua sengkang tertutup sebaiknya memiliki kait bersudut 135° yang ditempatkan pada posisi berlawanan antara sengkang yang satu terhadap sengkang lain di sebelahnya. Sengkang-sengkang seperti ini tidak terbuka selama guncangan gempa (lihat Gambar 36) karena ujung sengkang tertanam pada bagian inti penampang balok yang terkekang. Secara sederhana, sengkang ini berlaku seperti tali pengikat baja (*metal straps*) di sekeliling tong kayu air. Air di dalam tong memberikan tekanan yang mendorong kayu pada tong ke arah luar. Tali pengikat baja yang membungkus tong menahan tekanan tersebut dan mencegah tong dari pecah (*bursting*). Serupa dengan hal ini, sengkang pada balok menahan tekanan dari dalam balok, dan menjaga agar penampang inti beton tetap menyatu. Jarak sengkang pada balok sebaiknya ditentukan berdasarkan perhitungan desain. Secara umum, peraturan gempa menunjukkan bahwa jarak sengkang yang rapat diletakkan di kedua ujung kolom sepanjang dua kali tinggi balok.

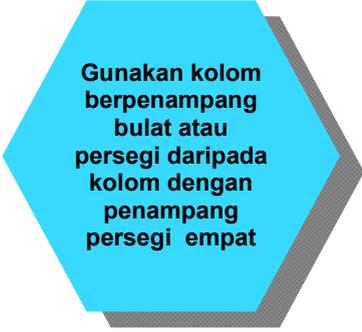
Kolom

Ragam kegagalan

Kolom beton bertulang dapat mengalami dua ragam kegagalan,

yaitu kegagalan aksial lentur dan kegagalan geser. Ketahanan kolom akibat aksial lentur sebaiknya dibatasi dengan membuat kolom lebih kuat dari balok (seperti yang dibahas pada Bab 2). Akibatnya, balok, dan bukannya kolom, menyerap energi gempa dan menghindari kerusakan selama proses tersebut. Ketahanan ini dihitung, berdasarkan faktor-faktor, antara lain total luas tulangan longitudinal. Kegagalan geser sangat getas dan harus dihindari pada kolom dengan menyediakan tulangan transversal dengan jarak yang rapat mengelilingi semua tulangan longitudinal.

Kolom tinggi dan langsing seringkali lebih lemah daripada balok pada struktur rangka, khususnya jika lebar kolom dalam arah rangka kecil. Untuk mencegah dampak kolom lemah – balok kuat (dibahas pada Bab 2), peraturan desain gempa mensyaratkan kolom yang lebih kuat dari balok. Karena kolom umumnya menjadi tempat tumpuan balok-balok yang mengelilinginya dan memiliki jumlah baja tulangan yang lebih banyak dari balok, lebar kolom dalam arah rangka sebaiknya sama atau lebih besar dari lebar balok yang menumpu padanya. Selain itu, kolom bulat dengan tulangan spiral cenderung menunjukkan ketahanan gempa yang lebih superior dari kolom persegi dengan luas penampang yang sama. Namun demikian, tulangan spiral jarang digunakan dalam praktik desain, khususnya pada kolom persegi atau persegi panjang. Lebih jauh, pada seluruh panjang spiral harus terdiri dari satu tulangan. Juga, ujung spiral perlu diangkur secara aman ke sambungan balok – kolom atau sistem balok – pelat.



Gunakan kolom berpenampang bulat atau persegi daripada kolom dengan penampang persegi empat



Sengkang tertutup harus disediakan sepanjang bentang balok

Tulangan kolom ekstension yang dimaksudkan untuk melanjutkan pembangunan di masa depan akan berkarat setelah beberapa tahun dan harus dihindari

Tulangan longitudinal

Tulangan longitudinal menahan beban aksial dan momen lentur pada kolom baik akibat beban gravitasi maupun getaran gempa. Tulangan longitudinal sebaiknya didistribusikan ke semua sisi kolom. Lebih baik menggunakan lebih banyak tulangan dengan diameter kecil daripada menggunakan lebih sedikit tulangan dengan diameter besar, sekalipun keduanya memiliki jumlah luas penampang tulangan yang sama. Seyogyanya tidak lebih dari 50% tulangan yang disambung pada satu lokasi (lihat Gambar 37). Sambungan lewatan disediakan hanya di tengah bentang – tidaklah disarankan untuk meletakkan sambungan lewatan pada bagian atas atau bawah kolom (lihat Gambar 38).

Tulangan transversal

Sewaktu beban vertikal dan momen lentur pada kolom ditahan oleh tulangan longitudinal, gaya gempa lateral ditahan oleh tulangan transversal yang dipasang secara rapat (lihat Gambar 39). Tulangan transversal

sebaiknya didesain untuk menahan pengembangan retak geser diagonal. Lebih lanjut, tulangan longitudinal diikat bersama tulangan transversal dan mencegahnya dari tekuk yang berlebihan, dan mengekang beton di dalam kolom. Tulangan sengkang ini membantu mencegah hancurnya beton pada penampang inti kolom sehingga kolom dapat menahan beban vertikal yang lebih besar. Beberapa gempa mengakibatkan kegagalan pada kolom disebabkan oleh tulangan sengkang yang dipasang terlalu jauh, satu terhadap yang lain, tanpa kait yang ditekuk dengan sudut 135° , atau memang tidak didesain sebagaimana mestinya (lihat Gambar 40).

Tulangan sengkang seharusnya diakhiri dengan kait bersudut 135° dengan panjang tambahan yang cukup pada ujung tulangan untuk memastikan pengekanan yang cukup pada beton yang dilingkupi oleh tulangan sengkang. Panjang tambahan ini biasanya ditetapkan berdasarkan standar nasional yang relevan

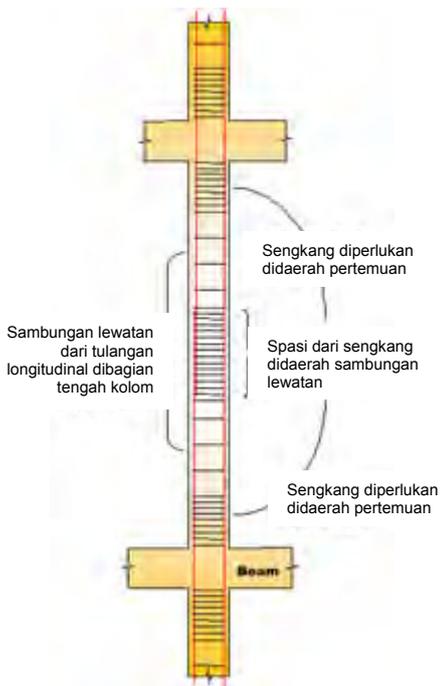
Sambungan lewatan baja tulangan longitudinal hanya boleh dipasang di tengah-tengah tinggi kolom



Gambar 37. Panjang lewatan yang tidak cukup dan lokasi untuk pembangunan yang akan datang – 100% sambungan lewatan pada bagian bawah dasar kolom (sumber: Mejia 2002).

Kait harus ditanam dalam penampang inti beton sehingga tulangan tidak akan terbuka sewaktu terjadi gempa dan memberikan integritas pada penampang inti beton. Jika panjang sisi kolom dan oleh karenanya juga panjang kaki sengkang terlalu besar, maka sengkang silang (*cross ties*)

sebaiknya ditambahkan untuk mencegah terjadinya pembengkakan sengkang ke arah keluar penampang (*bulging outwards*) (lihat Gambar 41). Tulangan sengkang sebaiknya disediakan dengan jarak yang rapat pada kedua ujung kolom untuk setidaknya sesuai dengan standar nasional yang relevan.

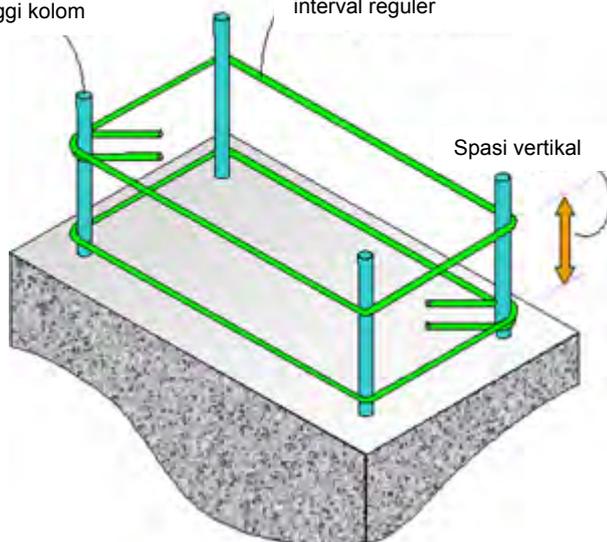


Gambar 38. Sengkang-sengkang harus dipasang secara rapat pada daerah ujung atas dan bawah kolom dan pada sambungan lewatan (sumber: Murthy 2005).

Tulangan sengkang tertutup mengikat penampang inti beton sehingga bangunan tidak kehilangan kapasitasnya dalam memikul beban vertikal

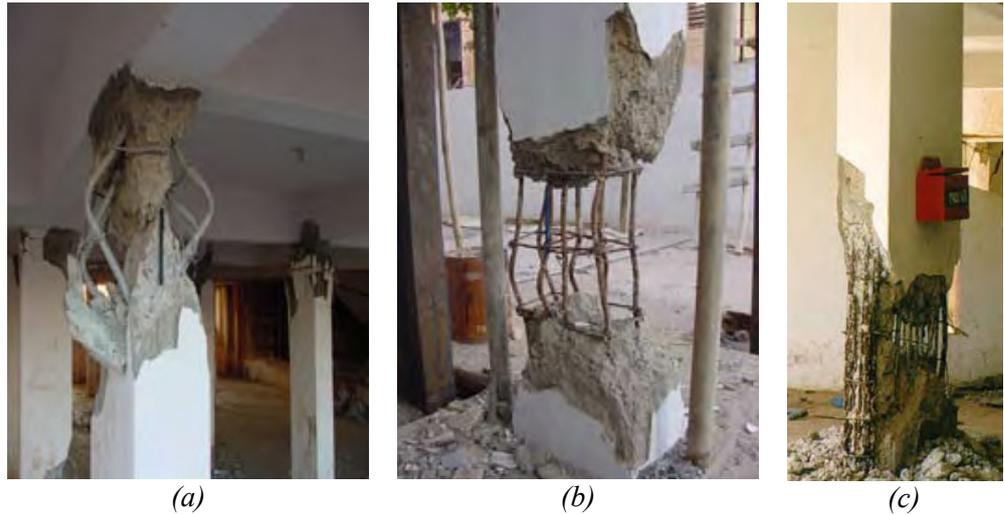
Tulangan longitudinal: Baja tulangan berdiameter lebih besar menerus sepanjang tinggi kolom

Sengkang tertutup: Baja tulangan berdiameter lebih kecil yang dibuat persegi empat tertutup dipasang sepanjang tinggi kolom dengan interval reguler



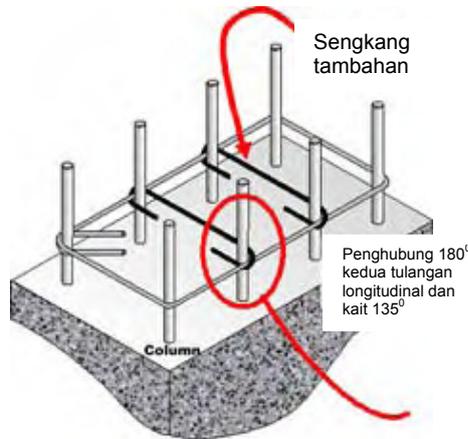
Semua tulangan sengkang kolom, balok dan pertemuannya harus mempunyai kait bersudut 135°

Gambar 39. Baja tulangan pada kolom harus mempunyai sengkang dengan kait 135° yang mengelilingi tulangan-tulangan longitudinal (sumber: Murthy 2005).



Gambar 40. Contoh-contoh kegagalan kolom pada gempa Bhuj 2001 di India: (a) tulangan longitudinal kolom tertekuk akibat sengkang tak terpasang dalam jarak yang cukup rapat (sumber: EERI 2001); (b) kerusakan parah dari kolom lantai dasar akibat pengengkangan penampang inti beton dan pemasangan tulangan lewatan yang tak memenuhi syarat (sumber: Jaiswal et al. 2002); (c) sengkang-sengkang dengan kait 90° yang terpasang dengan jarak antara relatif jauh, tak mampu memberikan kekangan pada penampang inti beton (kait 135° seharusnya yang digunakan) (sumber: Jaiswal et al. 2002).

Di pertemuan harus memiliki kekuatan beton yang cukup untuk mentransfer beban-beban yang bekerja di antara balok dan kolom



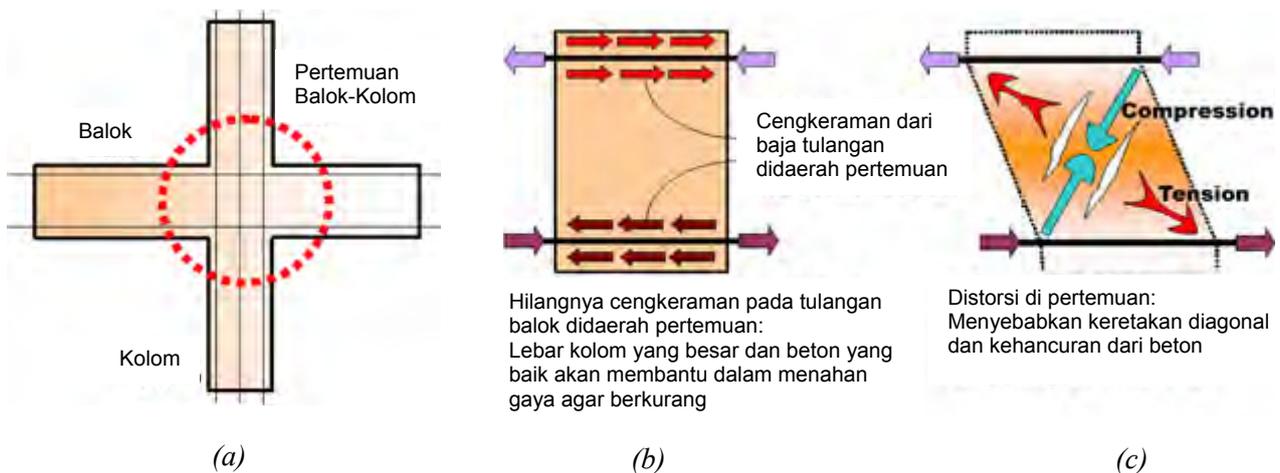
Gambar 41. Sengkang-sengkang tambahan dibutuhkan dalam arah horizontal dengan spasi regular agar beton tetap pada tempatnya dan untuk mencegah tulangan-tulangan longitudinal kolom tidak mengalami tekuk (sumber: Murthy 2005).

Tulangan longitudinal balok dan kolom harus dilindungi dengan tulangan sengkang tertutup di daerah pertemuannya

Pertemuan Balok – Kolom

Pertemuan balok-kolom merupakan area di mana balok dan kolom bertemu (lihat Gambar 42a). Selama getaran gempa bumi, pertemuan balok-kolom akan menderita beberapa kerusakan jika perhatian yang seharusnya tidak diberikan pada tahap desain dan pendetailannya. Gaya gempa

menyebabkan pertemuan balok-kolom ditarik pada satu arah di tulangan atas dan arah sebaliknya di bagian bawah tulangan (lihat Gambar 42b). Gaya-gaya ini ditahan oleh ikatan antara beton dan baja tulangan pada daerah pertemuan. Ketika kolom tidak cukup lebar atau kekuatan beton pada daerah pertemuan terlalu lemah, maka tidak ada cengkraman yang kuat dari beton ke baja;



Gambar 42. Pertemuan balok-kolom: (a) pertemuan antara balok-balok dan kolom-kolom dikenal dengan nama pertemuan balok-kolom; (b) gaya-gaya dorong dan tarik pada pertemuan menyebabkan gaya tekan dan tarik yang mengakibatkan kerusakan yang tak dapat diperbaiki pada daerah pertemuan saat terjadi gempa kuat; (c) perubahan bentuk pada daerah pertemuan menyebabkan keretakan dan kehancuran beton (sumber: C.V.R. Murthy).

hal ini menyebabkan tulangan bergeser dan kehilangan kapasitasnya dalam menerima beban. Jika gaya tarik – tekan yang bekerja terlalu besar pada pertemuan untuk menahannya, maka deformasi geometris mungkin terjadi pada wilayah pertemuan menghasilkan retak geser diagonal (lihat Gambar 42c).

Tegangan yang terjadi pada baja tulangan dan beton pada pertemuan balok-kolom mengharuskan diberikannya perhatian khusus pada desain dan pendetailan untuk bagian ini. Ketika pertemuan balok-kolom tidak dapat menyalurkan gaya dalam dari balok ke kolom, bagian tersebut akan gagal secara getas, oleh sebab itu akan mengancam keamanan seluruh bangunan (lihat Gambar 43)

Dua faktor penting yang harus diperhatikan dalam mendesain pertemuan balok-kolom adalah :

a. Baja tulangan sebaiknya menerus pada daerah pertemuan; hal ini berlaku untuk pertemuan interior dan

eksterior (lihat Gambar 44); dan
 b. Tulangan longitudinal kolom perlu diikat dengan sengkang yang rapat di dalam area pertemuan balok-kolom (lihat Gambar 45). Penelitian laboratorium memperlihatkan bahwa semakin besar volume beton yang terkekang pada pertemuan balok-kolom, semakin baik ketahanannya terhadap gempa.

Pada pertemuan exterior dimana balok berakhir di kolom, tulangan longitudinal balok perlu diangkur ke kolom untuk memastikan lekatan yang cukup untuk tulangan ini di daerah pertemuan. Selain itu dapat juga dilakukan dengan menekuk tulangan membentuk kait bersudut 90° (lihat Gambar 46). Pada pertemuan interior, tulangan balok sebaiknya diteruskan ke dalam daerah pertemuan. Selanjutnya, tulangan ini harus diletakkan di bagian dalam rangkaian tulangan kolom (tersusun dari tulangan longitudinal dan horizontal) dan tanpa perlu adanya tekukan (lihat Gambar 47).

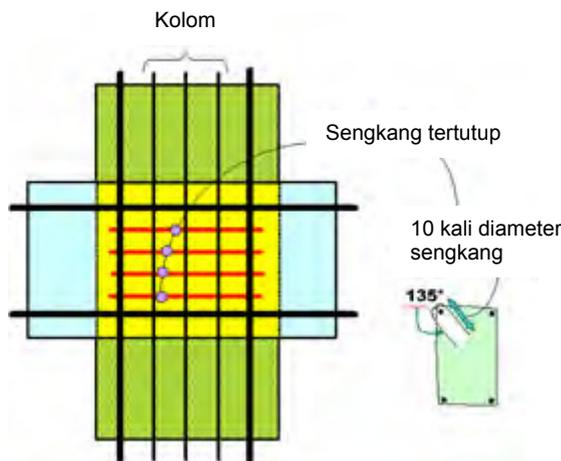
Pertimbangkan penggunaan sengkang tambahan untuk menghindari terjadinya tekuk pada tulangan longitudinal apabila kolom dengan bentuk penampang empat persegi panjang diperlukan



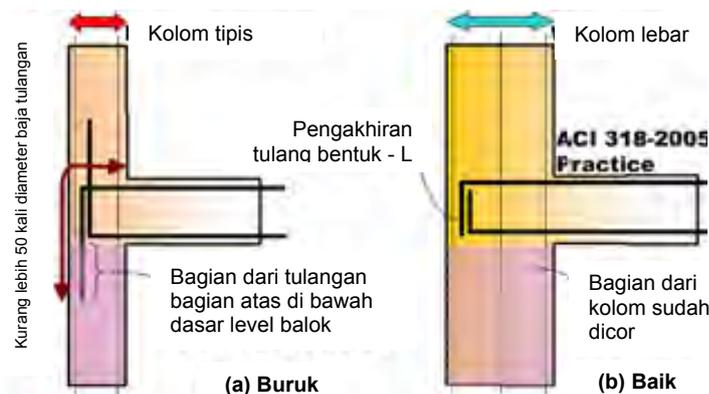
Gambar 43. Kegagalan geser pada pertemuan balok-kolom beton bertulang saat gempa Meksiko 1985, disebabkan oleh tulangan balok dipasang di luar penampang kolom (sumber: EERI 2000).



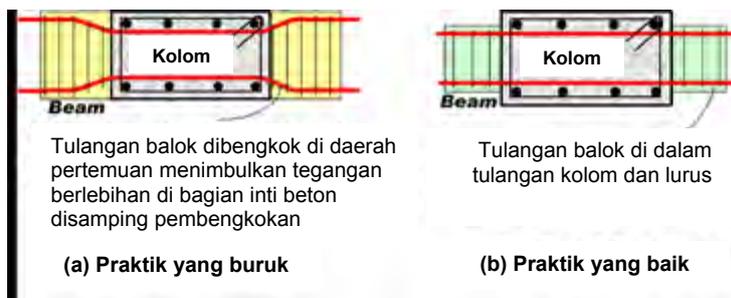
Gambar 44. Detail tulangan pertemuan balok-kolom yang kurang tepat: diskontinuitas tulangan balok pada pertemuan balok-kolom; tulangan-tulangan ini disyaratkan menerus dan memberikan kekangan pada beton di daerah pertemuan (tidak adanya sengkang pada pertemuan) (sumber: Jaiswal et al. 2002).



Gambar 45. Sengkang transversal tertutup yang dipasang dengan spasi rapat harus dapat dipasang di dalam daerah pertemuan balok-kolom (sumber: Murthy 2005).



Gambar 46. Detail pengankuran tulangan balok pada pertemuan eksterior (sumber: Murthy 2005).



Gambar 47. Detail penulangan pertemuan yang menunjukkan pentingnya penempatan tulangan longitudinal balok pada sisi dalam rangkaian tulangan kolom (sumber: Murthy 2005).

Dinding Pengisi Dari Bata

Seperti yang dibahas dalam Bab 2, terdapat dua pendekatan yang terkait dengan dinding pengisi dari bata pada struktur rangka beton bertulang, yaitu:

- Mengisolasi material pengisi dari rangka (maka harus didesain sebagai struktur rangka daktail), dan
- Mengintegrasikan material pengisi dengan struktur rangka (harus didesain sebagai struktur rangka daktail dengan dinding pengisi).

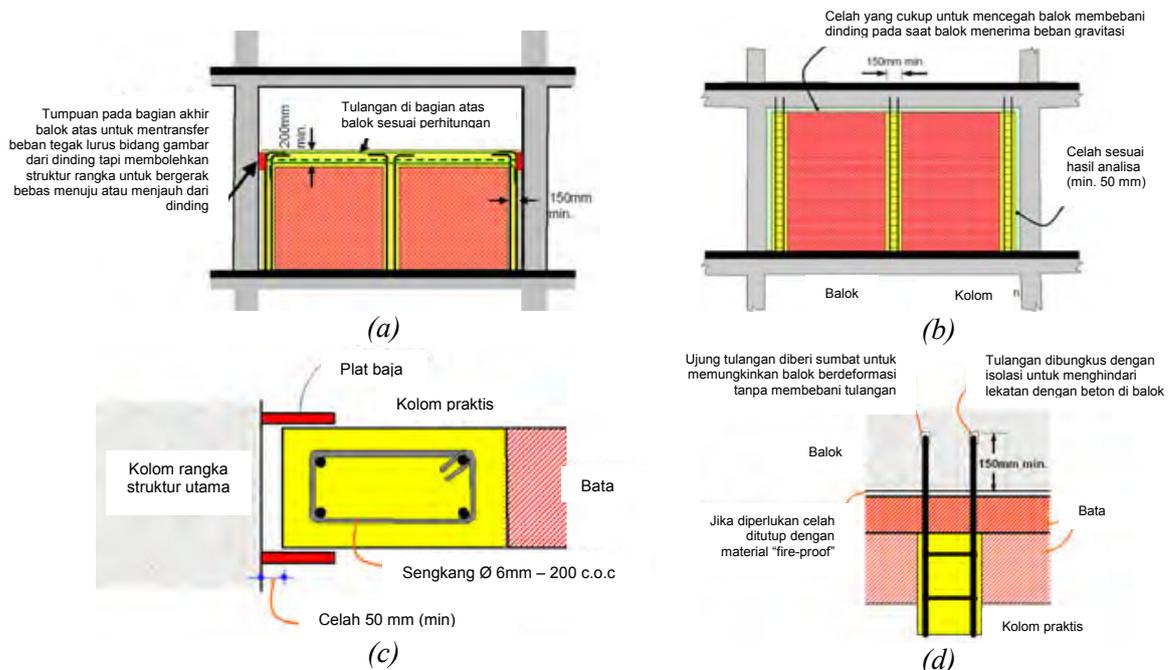
Setiap pendekatan ini membutuhkan pendetailan dan pelaksanaan desain yang berbeda untuk dinding bata pengisi. Ketika dinding pengisi dari bata diisolasi dari struktur rangka yang membatasinya, terdapat dua cara dalam memastikan stabilitas di luar dinding pengisi dari bata yang terpisah dari struktur rangka beton bertulang, adalah:

- (a) Dengan membagi panel dinding pengisi dari bata besar menjadi lebih kecil; hal ini dapat dilakukan dengan menyediakan elemen kaku yang terbuat dari kayu atau beton bertulang ringan dalam arah vertikal, diagonal dan/atau horizontal, dan
- (b) Dengan menyediakan tulangan di dalam dinding

pengisi; Penulangan sebaiknya disediakan dengan jarak regular dalam arah vertikal dan horizontal. Peraturan desain beberapa negara (contohnya, Indonesia) berisi ketentuan-ketentuan tentang bagaimana meningkatkan perilaku tegak lurus bidang gambar dari dinding pengisi dari bata tanpa mengganggu elemen rangka. Disarankan untuk memasang kolom praktis, yaitu kolom beton bertulang ringan dengan baja tulangan longitudinal yang dimasukkan ke balok, pada sepanjang dinding dengan teratur dan juga pada ujung dinding. Ketentuan ini digambarkan pada Gambar 48. Pengisolasi dinding pengisi ini bukan merupakan tugas yang mudah. Kesulitannya adalah untuk menjaga jarak antara kolom praktis dengan kolom-kolom struktur rangka, dan memastikan kondisi cuaca di luar tidak berpengaruh ke bagian dalam bangunan.

Ketika dinding pengisi dari bata digabungkan dengan struktur rangka di sebelahnya, angkur baja horizontal perlu disediakan untuk mengikat dinding dengan kolom struktur rangka; angkur-angkur ini perlu dipasang dengan jarak regular dengan tujuan untuk memastikan transfer gaya antara dinding dengan struktur rangka (lihat Gambar 49). Ketika

panjang panel dinding besar, kolom praktis harus disediakan untuk memperbaiki ketahanan dinding pengisi dari bata dalam arah tegak lurus bidang gambar. Selain itu, tidak mudah untuk memperkuat dinding bata dengan material bata merah pejal. Telah diteliti bahwa baja tulangan dapat mengalami korosi, memuai dan menyebabkan retak pada dinding bata pengisi. Dalam beberapa proyek, baja tulangan tahan karat digunakan untuk menghindari masalah ini. Akan tetapi, secara umum, tidak ada hubungan tegas antara material dinding pengisi dengan rangka; cukup dibangun sederhana rata dengan permukaan struktur rangka.



Gambar 48. Kolom-kolom praktis disediakan untuk mengisolasi dinding pengisi dari bata sebagaimana dipraktikkan di Indonesia: (a) dinding pengisi dengan tinggi sebagian, (b) dinding pengisi dengan tinggi penuh, (c) detail kolom praktis, dan (d) detail pengangkuran kolom praktis ke balok atas tetapi tanpa memberikan halangan bagi deformasi lateral struktur rangka (sumber: Murthy et al.).

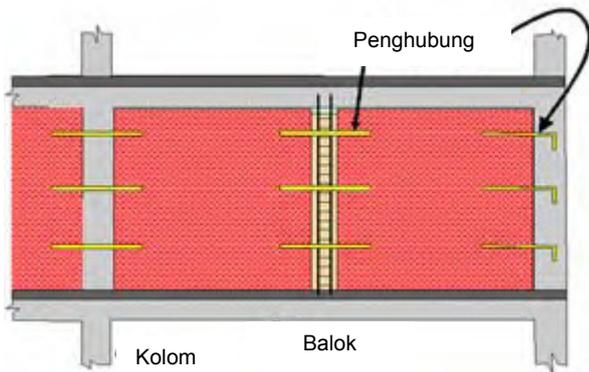
Elemen Non-Struktural

Bagian gedung yang menahan dan meneruskan gaya akibat getaran tanah gempa disebut elemen struktural (contohnya, balok, kolom, dinding, dan pelat), sedangkan isi gedung dan elemen lainnya disebut elemen non-struktural. Sama halnya dengan elemen struktural, elemen non-struktural perlu didesain agar mampu menahan akibat gempa (gaya inersia dan pergerakan relatif). Lebih jauh, hubungan yang baik diperlukan untuk meneruskan semua gaya dengan aman dari elemen non-struktural ke elemen struktural (lihat Gambar 50a). Biasanya, gaya yang terjadi pada elemen non-struktural tidak sebesar seperti pergerakan relatif pelat lantai. Sebagai contoh, ketika pipa air kotor melewati satu lantai ke lantai lainnya, pipa tersebut perlu untuk memiliki kemampuan untuk bergerak secara lateral dalam besaran yang berbeda-beda pada berbagai level lantai tanpa

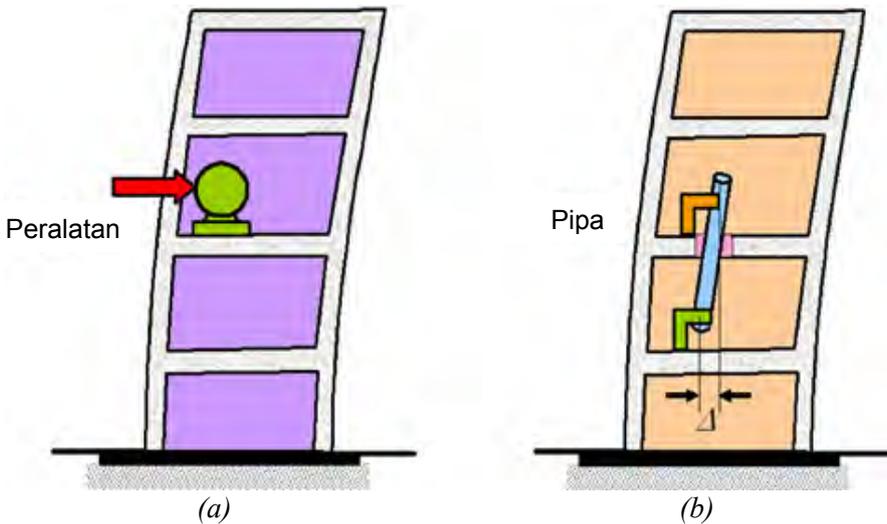
kehilangan fungsinya (lihat Gambar 50b).

Cara pemasangan elemen non-struktural di dalam sistem struktur memberikan dampak yang berarti bahkan seringkali membahayakan sistem struktur. Sebagai contoh, dinding pengisi dari bata yang dibuat monolit dengan kolom dan balok sering disebut sebagai elemen non-struktural, tanpa diperhatikan dampaknya pada bangunan. Namun demikian, dalam kenyataannya, dinding-dinding ini merupakan elemen struktural karena dinding-dinding tersebut tidak bebas dari pengaruh pergerakan lateral kolom dan mampu mengubah perilaku bangunan (lihat pembahasan pada Bab 2). Dalam semua kasus, tidak diperbolehkan adanya penambahan, pembuangan, atau perubahan material, yang dapat mengubah perilaku elemen struktural dari desain aslinya. Desain dan pemasangan semua elemen non-struktural harus memenuhi spesifikasi dan peraturan yang diterapkan (lihat Gambar 51).

Elemen-elemen non-struktural, seperti tangga, dapat mengubah respon bangunan terhadap gempa dan mengakibatkan kerusakan yang parah apabila tidak diperhitungkan dalam perencanaan struktur



Gambar 49. Detail angkur antara dinding pengisi dan struktur rangka ketika dinding bata perlu diintegrasikan dengan struktur rangka (sumber: Murthy et al. 2006).



Gambar 50. Desain elemen-elemen non-struktural seharusnya memperhitungkan hal-hal sebagai berikut: (a) gaya-gaya lateral yang ditransfer ke elemen-elemen struktural, dan (b) gerakan lateral relatif sepanjang tinggi bangunan (sumber: C.V.R. Murthy).

Dalam beberapa kasus, elemen struktural yang sangat kaku dan kuat dapat dipisahkan dari sistem struktur bangunan, dan diperlakukan sebagai elemen non-struktural. Sebagai contoh, di area tangga bangunan, pelat miring dan balok tangga memberikan kekakuan yang besar dan menghalangi gerakan simetris bolak – balik akibat gempa yang

seharusnya dapat terjadi pada bangunan. Pada beberapa kasus seperti ini, memisahkan elemen diagonal dari struktur utama sedemikian sehingga elemen tersebut hanya menumpu dan dapat bergerak bebas dalam arah horizontal (lihat Gambar 52), akan meningkatkan kinerja bangunan secara signifikan.

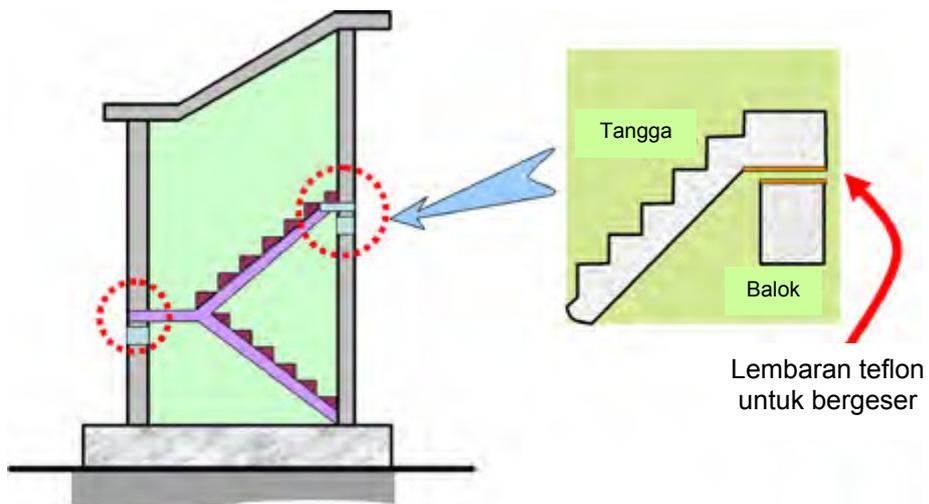


(a)



(b)

Gambar 51. Contoh-contoh praktik konstruksi yang buruk: (a) pemasangan instalasi pipa di dalam rangkaian tulangan kolom yang tak bisa diterima, dan (b) pemasangan instalasi listrik dengan merusak sebuah balok beton bertulang eksisting yang tak dapat diterima (foto: A. Irfanogulu).



Gambar 52. Pelat dan balok diagonal pada tangga menampung konsentrasi gaya inersia gempa yang besar, dan oleh karenanya menyebabkan kerusakan: persyaratan landasan yang bisa bergeser (sliding) efektif untuk membatasi magnitude gaya-gaya inersia gempa (sumber: C.V.R. Murthy).

4. Pertimbangan–Pertimbangan Dalam Konstruksi

Kualitas konstruksi memberikan pengaruh penting pada kinerja seismik yang daktail dari sebuah bangunan; – konstruksi yang buruk akan menghasilkan kinerja seismik bangunan yang buruk pula. Oleh karenanya, struktur tahan gempa yang baik membutuhkan keberhasilan penyelesaian seluruh langkah yang dibutuhkan dalam membangun sebuah gedung, yaitu:

- Desain: Pengembangan konsep desain yang rasional berdasarkan pada standar tata cara perencanaan yang berlaku secara umum.
- Konstruksi: pelaksanaan pembangunan secara fisik, yaitu penerapan desain, dan
- Pemeliharaan: inspeksi, pemeliharaan, pemantauan, dan pemodelan ulang selama umur bangunan.

Proses di atas seperti membuat sebuah rantai: untuk mendapatkan sebuah rantai yang kuat, hubungan antar komponen harus cukup kuat. Sama halnya untuk membangun sebuah bangunan yang bagus, semua langkah dalam proses konstruksi juga harus dilaksanakan memenuhi spesifikasi minimum dalam desain. Pembahasan mengenai desain bangunan rangka beton bertulang dikemukakan pada awal dokumen ini, sedangkan pembahasan yang terkait dengan konstruksi disajikan secara ringkas di bawah ini; pembahasan mengenai pemeliharaan tidak dibahas dalam dokumen ini. Pembangunan fisik sebuah bangunan beton bertulang dapat dikategorikan sukses hanya jika:

- (a) Bangunan dibangun berdasarkan pada gambar struktur yang diproduksi selama tahap desain;
- (b) Material bangunan yang digunakan sesuai dan berkualitas baik, dalam arti

dapat diterima berdasarkan standar yang berlaku.

- (c) Konstruksi dilakukan sesuai dengan prosedur yang ada pada peraturan–peraturan dalam pelaksanaan, dengan inspeksi yang dapat dipertanggung jawabkan, teliti, dan jujur.

Jauh lebih mudah dan murah untuk membangun suatu bangunan berkualitas dari awal, dari pada membangun suatu konstruksi yang jelek dan kemudian menanggung biaya, ketidak nyamanan dan akibat berbagai penundaan sehubungan dengan proses perbaikan konstruksi yang jelek atau sistem struktur yang tidak sempurna. Aspek–aspek konstruksi berikut ini merupakan bagian dari praktik–praktik pelaksanaan yang biasa dilakukan sebagaimana dispesifikasi dalam standar nasional:

- Kualitas material,
- Kualitas pekerja (*workmanship*),
- Inspeksi.

Untuk pembahasan yang lebih mendalam mengenai topik ini, pembaca dipersilahkan membaca, “*Built to Resist Earthquakes*”, yang membahas isu-isu desain dan konstruksi untuk para arsitek, insinyur, dan pengawas (ATC/SEAOC 1999). Berikut ini adalah ringkasan dari beberapa isu utama yang berhubungan dengan kualitas konstruksi.

Kualitas Material

Pemilihan dan penggunaan material yang sesuai dan berkualitas merupakan suatu persyaratan bagi sebuah pelaksanaan konstruksi yang sukses.



Desain, pelaksanaan, dan pemeliharaan yang tepat sangat menentukan tercapainya kinerja bangunan yang baik ketika terjadi gempa



Kualitas material, kualitas pekerja, dan inspeksi – semuanya sama penting untuk keamanan seismik

Campuran beton yang digunakan dalam konstruksi harus dipersiapkan oleh seorang insinyur

Pemilihan dan pengontrolan kualitas material

Elemen–elemen dalam campuran beton, yaitu, semen, agregat, air, dan bahan tambahan pada campuran, perlu dipilih dan dimanfaatkan secara tepat. Beberapa poin utama dalam pemilihan material termasuk:

- Insinyur sipil atau insinyur bahan bangunan yang kompeten harus mengembangkan desain campuran beton atau proporsi dari bahan–bahan pembentuk beton. Sangat penting untuk tidak merubah proporsi dari campuran setelah campuran direncanakan oleh seorang insinyur.
- Semen yang sesuai dengan standar harus digunakan. Perhatian perlu diberikan dalam memilih semen dan/atau agregat untuk menghindari reaksi yang berbahaya antara pasta semen dan agregat.
- Agregat harus dipilih untuk menyesuaikan dengan tipe dan distribusi ukuran butirannya sebagaimana dispesifikasi dalam perencanaan campuran beton. Pasir pantai disarankan tidak pernah digunakan.
- Ikatan antara pasta semen dan kerikil penting untuk kualitas beton. Untuk itu agregat perlu dicuci dengan air bersih dan dikeringkan untuk menyingkir-

kan kotoran, debu, dan material organik (lihat Gambar 53).

- Air bersih digunakan dalam penyiapan campuran beton. Performa yang tidak memenuhi syarat dapat terjadi karena air garam, air kotor atau berlumpur, atau air dengan organik material digunakan dalam proses penyiapan campuran beton. Air yang tidak tepat menyebabkan kerusakan yang cepat pada beton dan korosi pada baja tulangan.

Persiapan, perawatan dan pemeliharaan beton

Tempat yang paling baik dalam pembuatan beton adalah di tempat produksi beton (*concrete batch plant*) di mana hal ini mempermudah untuk mencapai tingkat kualitas pengontrolan yang tinggi. Selain itu beton juga dapat dibuat menggunakan molen (*on-site concrete mixers*). Pilihan terakhir adalah mempersiapkan beton secara manual di lapangan. Cara terakhir ini sebaiknya dihindari karena hampir tidak mungkin mempersiapkan beton dengan kualitas yang baik secara manual (lihat Gambar 54). Pertimbangan–pertimbangan penting dalam pengontrolan beton adalah sebagai berikut:

Beton seharusnya dibuat di *batching plant*



Gambar 53. Ukuran agregat yang tak memenuhi syarat; perhatikan beton berkualitas rendah dan porous dengan tulangan polos berkarat (foto: A. Irfanoglu).



Gambar 54. Pencampuran dan penyiapan beton secara manual adalah pilihan terakhir karena ketidak mampuan menjaga konsistensi kualitas (foto: Irfanoglu).

Campuran Beton Segar

Ketika campuran beton sudah siap, campuran beton tersebut harus ditangani dengan benar dan digunakan dalam konstruksi secepat mungkin. Beton segar sebaiknya jangan pernah dibiarkan mengeras sebelum pengecoran. Selama perjalanan dari tempat pembuatan beton sampai lokasi pembangunan, beton mungkin mengalami segregasi. Dengan kata lain, agregat-agregat berkumpul membentuk anomali agregat, atau air berkumpul pada permukaan atau keluar dari beton segar. Dalam beberapa kasus seperti ini, campuran beton yang benar sebaiknya dibuat ulang dengan pencampuran ulang. Air perlu ditambahkan untuk menggantikan air yang keluar. Perlu diingat bahwa penambahan atau peningkatan rasio air dan semen akan mengurangi kekuatan beton.

Pengerasan Beton (Concrete Setting)

Begitu beton segar dicor, perawatan yang benar harus segera dilakukan pada beton selama proses pengerasan. Melapisi elemen beton dengan lembaran plastik seringkali memberikan dampak yang baik dalam proses pengerasan. Saat

beton mengeras, yang mana membutuhkan beberapa jam pada kondisi normal, proses pemeliharaan segera dimulai. Selama pemeliharaan, hal yang penting dilakukan adalah menjaga tingkat kandungan kelembaban dan suhu di dalam serta di sekeliling elemen yang dicor. Biasanya baik dilakukan untuk melapisi elemen yang dicor dengan karung goni lembab dan melapisinya lagi dengan plastik. Pembasahan berkala pada kain goni lembab seringkali menjadi cara untuk memelihara kandungan kelembaban yang benar. Jika material kayu digunakan sebagai bekisting, tingkat kelembaban sebaiknya dikontrol karena kayu menyerap sejumlah air selama beton dalam pemeliharaan.

Pemilihan dan kontrol pada baja tulangan

Baja tulangan harus sesuai dengan apa yang dispesifikasikan dalam gambar struktur. Pertimbangan-pertimbangan spesifik termasuk:

- Hanya baja tulangan, yang bersertifikat dan sesuai dengan tipe yang dibutuhkan, yang diperbolehkan untuk digunakan dalam konstruksi bangunan tahan gempa.

- Mutu baja tulangan harus sesuai dengan spesifikasi dalam gambar struktur.



Mutu baja tulangan yang berbeda dari spesifikasi yang ditetapkan dapat membahayakan bangunan

Para perencana harus memastikan bahwa gambar konstruksi adalah sederhana dan dapat dilaksanakan

Kualitas pekerja adalah faktor terakhir, namun sangat vital, menghubungkan desain ke realita pelaksanaannya

- Apabila mungkin, tulangan polos sebaiknya dihindarkan pemakaiannya (kecuali kalau dihitung dalam desain struktur).
- *Cold-formed steel*, yaitu baja yang dibentuk ulang dari besi tua (*scrap steel*) harus dihindari. Baja tersebut memiliki kualitas yang bervariasi dan tidak cocok untuk digunakan dalam konstruksi beton bertulang.
- Tulangan yang tidak terbentuk dengan baik tidak boleh digunakan dalam konstruksi. Segmen yang dibengkok atau ditarik secara berlebihan dapat membentuk bagian lemah dalam tulangan. (lihat Gambar 55).
- Tulangan yang berkarat harus dihindari. Ketentuan ini tidak hanya mengharuskan pembelian baja tulangan dengan kualitas yang baik dan penyimpanan yang benar, tetapi juga pengurutan proses konstruksi untuk meminimalkan kontak antara tulangan dengan elemen-elemen korosif (air/kelembaban ditambah udara alamiah).



Gambar 55. Baja tulangan polos yang dikirim ke sebuah lokasi konstruksi di Turki, ditekuk hingga berbentuk "U" (sumber: Gulkan et al. 2002).

Partikel-partikel lepas perlu dihilangkan dari permukaan baja dengan menggunakan sikat kawat. Pada semua kasus, tingkat korosi tidak boleh berlebihan sehingga baja tulangan tidak dapat diterima berdasarkan standar material yang diterapkan.

Keahlian Pekerja (*Workmanship*)

Dalam konstruksi bangunan beton bertulang, sangatlah penting untuk mempunyai pekerja-pekerja yang berkualitas dengan pengalaman yang cukup dan keahlian pekerja yang kompeten. Selain itu sangatlah penting untuk memiliki prosedur kerja yang bisa dilaksanakan dan telah dipikirkan dengan baik agar memungkinkan para pekerja melakukan pekerjaan mereka secara tepat cara dan waktu. Para pekerja konstruksi merupakan bagian akhir namun merupakan untaian mata rantai penting dalam proses konstruksi.

Insinyur perencana dan arsitek memainkan peranan yang penting dalam membuat desain yang dapat diwujudkan dan dapat dimengerti oleh para pekerja konstruksi.

Insinyur perencana sebaiknya mengupayakan konfigurasi struktur dan sistem pendetailan struktur serta elemen-elemen lainnya dengan jelas dan sesederhana mungkin. Menggunakan pendetailan yang tipikal dan standar sebanyak mungkin adalah sebuah praktik yang baik. Tentunya, hal ini menjadi tanggung jawab seluruh tim mulai dari arsitek dan insinyur perencana sampai dengan para pekerja lapangan -- untuk membangun sebuah gedung berkualitas.

Proses utama dimana keahlian pekerja menjadi kritis dalam konstruksi adalah:

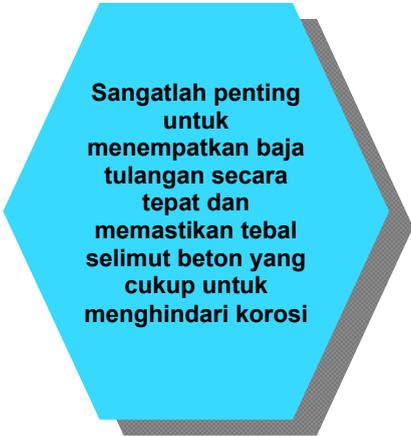
- 1) Pembesian (*steelwork*): pembesian harus menghasilkan pemasangan tulangan sesuai spesifikasi dalam gambar struktur. Elemen–elemen tulangan sebaiknya bersih dan tidak ada kotoran atau minyak di permukaannya (lihat Gambar 56).
- 2) Bekisting (*formwork*): untuk melakukan pengecoran elemen beton bertulang dengan tepat, cetakan dengan kualitas baik perlu dibuat. Tentunya membutuhkan sistem bekisting yang rapat, bersih, anti bocor, ditandai oleh adanya kekakuan dan kekuatan yang cukup. Jika diperlukan, perancah yang tepat perlu disertakan untuk menopang cetakan.
- 3) Penempatan pekerjaan baja tulangan yang tepat pada cetakan: baja tulangan perlu diletakkan pada cetakan sesuai spesifikasi desain (seperti tebal minimum selimut beton). Hal ini dapat mencegah terjadinya korosi pada tulangan dan pengelupasan beton. Pembesian tidak boleh bergeser atau berubah bentuk ketika beton segar dimasukkan ke dalam cetakan.
- 4) Pekerjaan Beton: transportasi, penanganan, penempatan dan pemadatan beton segar sebaiknya dilakukan dengan benar. Penambahan atau kehilangan air, atau pemisahan agregat pada campuran beton sebaiknya dihindari sebisa mungkin. Jika terjadi perubahan pada komposisi beton, maka campuran beton sebaiknya dibuat ulang sebelum menuangkan beton segar pada cetakan (*forms*). Beton segar sebaiknya dituangkan dan didistribusi-

kan secara merata sampai mengelilingi elemen baja tulangan. Penggunaan alat penggetar (*vibrators*) atau peralatan lainnya yang membantu pendistribusian beton ke seluruh cetakan sangat diperlukan. Sangatlah penting agar terjadi ikatan yang kuat antara beton dengan baja tulangan. Pada bagian akhir, sebaiknya tidak ada rongga yang berlebihan atau titik-titik lemah pada beton yang dicor. Pemadatan beton segar yang tidak tepat akibat penggunaan alat penggetar yang tidak tepat menyebabkan penumpukan air yang berlebihan di sekeliling baja tulangan. Hasilnya adalah terjadi kuat lekatan yang lemah antara baja tulangan dan beton.

- 5) Elemen–elemen non-struktural: Penempatan elemen–elemen non-struktural pada bangunan dapat mengakibatkan dampak yang seringkali membahayakan kinerja seismik bangunan tersebut. Sebagai contoh, akibat penggunaan dinding pengisi yang dibahas pada bagian lain di buku ini. Dalam semua kasus, tidak diperbolehkan adanya penambahan, penempelan, pembuangan material bangunan atau perubahan dalam bentuk apapun yang dapat mengubah perilaku elemen struktur dari desain awal. Contoh–contoh pemasangan elemen non-struktural yang dapat membahayakan ketahanan gempa pada keseluruhan gedung seperti terlihat pada Gambar 51. Desain dan pemasangan semua bahan non-struktural tersebut harus sesuai dengan spesifikasi dan peraturan yang berlaku.



Penggunaan penggetar (*vibrator*) direkomendasikan untuk memadatkan beton segar



Sangatlah penting untuk menempatkan baja tulangan secara tepat dan memastikan tebal selimut beton yang cukup untuk menghindari korosi

Semua pihak yang terlibat dalam proses konstruksi harus memiliki pemahaman yang jelas tentang tanggung jawab masing-masing

Pemeriksaan harus dilakukan oleh para inspektor bersertifikat yang tidak memiliki kepentingan pribadi dalam melaksanakan tugas mereka



Gambar 56. Kualitas pekerja yang buruk: pekerjaan tanah yang kotor dan tulangan kolom serta pengangkurannya yang kurang tepat (sumber: Mejia 2002).

Anggota tim pembangunan, mulai dari insinyur perencana dan arsitek sampai tim lapangan dan insinyur yang bertugas di lapangan, harus mengerti dengan jelas tanggung jawab dan tugas masing-masing serta orang lain. Mereka harus menyadari rantai komando dan posisi mereka dalam rantai tersebut. Hal ini berarti, sebagai contoh, jangan memotong sudut penampang atau mengizinkan anak buah memotong bagian sudut tanpa pertimbangan yang rasional terhadap akibat tindakan tersebut dan tanpa persetujuan secara langsung dari insinyur yang bertugas selama konstruksi. Harus diperhatikan bahwa sekali membangun elemen yang salah, maka akan menghabiskan waktu yang lama dan biaya yang besar untuk memperbaikinya.

Pemeriksaan (*Inspection*)

Pekerjaan konstruksi sebaiknya tidak hanya diawasi oleh pengawas internal (seringkali disebut *site engineer*), tetapi juga oleh pengawas independen yang bersertifikat. Proses pemeriksaan sebaiknya dilakukan dengan tepat dan oleh pengawas kompeten yang jujur. Pemeriksaan merupakan tugas yang penting dalam proses konstruksi—hanya kekurangan beberapa tulangan sengkang kolom atau ketiadaan kait dengan bengkokan 135° dapat menyebabkan keruntuhan seluruh bangunan.

Hal-hal yang harus diperhatikan oleh pengawas gedung adalah sebagai berikut:

1) Pengawas harus bebas dari semua bentuk kepentingan pribadi (saat ini ataupun masa yang akan datang) dalam melakukan pemeriksaan.

- 2) Pengawas harus memiliki akses yang bebas – tanpa halangan kepada aktifitas di lapangan dan dokumen–dokumen konstruksi setiap waktu.
- 3) Setidaknya, pengawas harus hadir kapanpun dan di manapun ketika peraturan pelaksanaan konstruksi mensyaratkan perlunya sebuah pemeriksaan independen untuk dilakukan. Seringkali, jika beton sudah dicor, maka tidak banyak yang bisa dilakukan pengawas dalam kaitannya dengan upaya memastikan kualitas konstruksi dan kesesuaian dengan gambar konstruksi, spesifikasi dan peraturan yang berlaku.
- 4) Pengawas harus mendokumentasikan hasil pengawasannya dan menyimpannya.
- 5) Pengawas sebaiknya berinteraksi, dan jika perlu memberikan umpan balik pada insinyur lapangan mengenai tugas observasinya.
- 6) Pengawas harus segera melaporkan kepada insinyur yang bertugas (*engineer in charge*) segala sesuatu terkait dengan kualitas konstruksi.

Pengawas bertanggung jawab untuk melakukan pengawasan dan pemeriksaan pelaksanaan konstruksi secara kompeten dan seksama. Dan tentunya, menjadi tanggung jawab kontraktor dan tim pekerja untuk melakukan pekerjaan mereka dengan tingkat kompetensi yang tidak lebih rendah dari yang dipersyaratkan peraturan, dokumen dan gambar konstruksi.

5. Beberapa Alternatif Struktur Rangka Beton Bertulang Dengan Dinding Pengisi Dari Bata Pada Wilayah Dengan Resiko Gempa Tinggi

Mengapa Diperlukan Beberapa Alternatif

Dalam beberapa dekade terakhir ini, para insinyur struktur di seluruh dunia telah mendesain bangunan dengan struktur rangka beton bertulang. Pengalaman-pengalaman dari berbagai gempa yang pernah terjadi di seluruh dunia jelas menunjukkan bahwa bangunan tahan gempa dengan sistem rangka pemikul momen tidak cukup aman (kecuali jika pendetailan dibuat secara khusus). Masalahnya diperparah dengan adanya penggunaan material dinding bata pengisi.

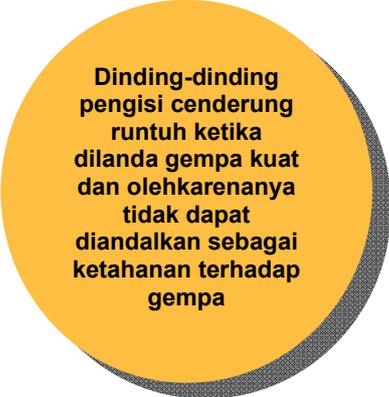
Ketika dinding-dinding pengisi dengan material tersebut dibutuhkan sebagai penyekat ruangan-ruangan fungsional pada sebuah bangunan, keberadaan dinding-dinding ini membahayakan sistem ketahanan gempa bangunan dengan struktur rangka beton bertulang. Tidak mudah untuk mencapai kinerja seismik yang daktail dalam struktur rangka beton bertulang; pendetailan khusus yang dilakukan dengan tingkat keahlian konstruksi tinggi dan pengontrolan kualitas yang ketat sangat diperlukan. Melakukan konstruksi bangunan rangka beton bertulang merupakan pekerjaan yang tidak mudah, dan membutuhkan keahlian yang tinggi terkait dengan konstruksi balok, kolom, dan pertemuan balok-kolom. Pertemuan balok-kolom yang tidak dibuat sebagaimana mestinya dapat menimbulkan konsekuensi

kerusakan, termasuk keruntuhan bangunan secara keseluruhan. Secara umum, upaya mencapai ketahanan gempa yang memuaskan dalam bangunan dengan struktur rangka beton bertulang yang dapat menahan beban inersia gempa bolak balik menjadi tantangan bahkan dalam negara-negara maju dengan teknologi konstruksi yang maju.

Terlepas dari adanya keterbatasan-keterbatasan tersebut di atas, para perancang dan pelaksana pembangunan di banyak negara tetap menggunakan struktur rangka pemikul momen dari beton bertulang sebagai sistem struktur utama untuk bangunan tinggi, dan sistem ini berkembang di seluruh dunia. Para penulis buku ini menggaris bawahi bahwa struktur rangka pemikul momen beton bertulang dengan dinding pengisi tidak dapat diandalkan sebagai sistem yang memberikan tingkat keamanan bangunan yang memuaskan pada wilayah yang beresiko gempa. Oleh karenanya, sistem bangunan alternatif yang dibicarakan dalam bab ini diharapkan untuk menyediakan tingkat ketahanan gempa yang lebih baik daripada sistem bangunan rangka beton bertulang non daktail dengan dinding bata pengisi.

Alternatif-Alternatif

Dua alternatif sistem yang digunakan yaitu dengan dinding pengisi dari bata yang dikekang dan struktur rangka beton bertulang dengan dinding beton bertulang.



Dinding-dinding pengisi cenderung runtuh ketika dilanda gempa kuat dan oleh karenanya tidak dapat diandalkan sebagai ketahanan terhadap gempa



Gunakan sistem struktur alternatif selain struktur rangka beton bertulang

Bangunan dengan dinding pengisi dari bata terkekang tampak serupa dengan bangunan berstruktur rangka beton bertulang dengan dinding pengisi, tetapi berperilaku jauh lebih baik ketika dilanda gempa

Gunakan konstruksi dinding pengisi dari bata yang terkekang untuk bangunan-bangunan dengan tinggi 1 – 4 lantai

Sistem pertama dapat digunakan untuk bangunan rendah (antara 3 sampai 4 lantai), sedangkan yang kedua dapat digunakan untuk bangunan dengan ketinggian yang lebih beragam, namun demikian sistem ini dipertimbangkan sangat ekonomis untuk bangunan sedang sampai tinggi. Beberapa aspek dari dua sistem tersebut dijelaskan berikut ini.

Bangunan Dengan Dinding Pengisi Dari Bata Yang Terkekang

Latar belakang

Konstruksi dinding bata yang terkekang terdiri dari dinding bata (terbuat dari bata merah atau blok beton) dan bagian pengikat beton bertulang dalam arah horizontal dan vertikal pada keempat sisi dinding bata. Batang vertikal, disebut sebagai kolom praktis atau kolom pengikat (*tie-columns*), sama seperti yang biasa terdapat pada struktur rangka beton bertulang. Elemen horizontal, disebut balok pengikat (*tie-beams*), sama seperti balok yang biasa terdapat pada struktur rangka beton bertulang. Komponen-komponen struktural dalam bangunan dinding bata yang terkekang adalah :

- (a) Dinding bata – menyalurkan beban gravitasi dari pelat ke fondasi, dan juga menahan gaya inersia gempa. Dinding tersebut harus diikat dengan balok beton pengikat dan kolom praktis untuk menjamin ketahanan gempa yang memuaskan.
- (b) Elemen – elemen pengikat (kolom praktis dan balok pengikat) – memberikan ketahanan pada dinding bata dan menjaga dari kerusakan akibat gempa besar sekalipun; elemen-elemen ini tidak menahan beban gravitasi.
- (c) Lantai dan pelat atap – menyalurkan baik beban gravitasi maupun beban lateral pada dinding. Pada saat terjadi gempa, pelat berperilaku seperti balok horizontal dan disebut diafragma.
- (d) Balok sloof keliling – menyalurkan beban dari dinding ke fondasi. Balok sloof keliling juga melindungi dinding pada lantai dasar dari penurunan yang berlebihan pada kondisi tanah lunak.
- (e) Fondasi – menyalurkan beban dari struktur ke tanah. Komponen-komponen dari bangunan dinding bata yang terkekang yang tipikal ditunjukkan pada Gambar 57.



Gambar 57.
Bangunan tipikal dengan dinding pengisi dari bata terkekang (sumber: Blondet 2005).

Tabel 1: Perbandingan Struktur Rangka Beton Bertulang dan Bangunan Dengan Dinding Pengisi Dari Bata yang Terkekang

Item	Struktur Rangka Beton Bertulang	Bangunan Dengan Dinding Pengisi Dari Bata yang Terkekang (<i>Confined Masonry Building</i>)
Sistem penahan beban gravitasi dan lateral	Struktur Rangka Beton Bertulang memikul baik beban gravitasi maupun lateral melalui balok, kolom, dan sambungannya.	Dinding bata merupakan elemen utama pemikul beban dan diharapkan menerima beban gravitasi dan lateral. Beban lateral ditahan oleh batang tekan diagonal di dalam dinding serta gaya tarik dan gaya tekan pada ujung kolom.
Konstruksi Fondasi	Fondasi telapak pada bagian bawah setiap kolom.	Fondasi telapak menerus di bawah dinding dengan balok <i>sloof</i> beton bertulang.
Tahap Pelaksanaan Pekerjaan Struktur Atas	1. Struktur rangka dibangun terlebih dahulu. 2. Dinding bata dibangun pada tahap konstruksi selanjutnya.	1. Dinding bata dibangun terlebih dahulu. 2. Kemudian, kolom praktis atau kolom pengikat dicor di tempat. 3. Terakhir, balok pengikat dibangun di atas dinding, bersamaan dengan konstruksi lantai/pelat atap.

Penampilan dari konstruksi dinding bata yang terkekang dan struktur rangka dengan dinding pengisi dari bata sekilas terlihat sama. Padahal, dua tipe konstruksi ini berbeda. Perbedaan utama terkait dengan proses konstruksi dan juga perilakunya pada saat dilanda gempa.

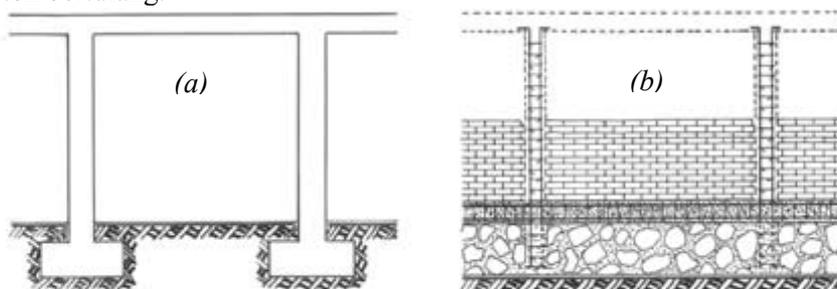
Perbedaan antara kedua sistem diuraikan pada Tabel 1 dan digambarkan pada Gambar 58. Pada konstruksi dinding bata terkekang, elemen-elemen pengikat tidak didesain untuk berperilaku sebagai struktur rangka pemikul momen; akibatnya detail penulangan menjadi sederhana. Secara umum, elemen-elemen pengikat memiliki dimensi penampang yang lebih kecil dibandingkan dengan balok dan kolom pada rangka beton bertulang. Elemen-elemen pengikat membutuhkan penulangan yang lebih kecil daripada balok dan kolom pada struktur rangka beton bertulang.

Keuntungan – keuntungan

Konstruksi dinding bata terkekang menawarkan alternatif, baik untuk konstruksi dinding bata tak bertulang (*unreinforced masonry*) maupun untuk struktur rangka beton bertulang. Praktik pelaksanaan konstruksi ini sebenarnya berkembang melalui sebuah proses informal berdasarkan pada kinerjanya yang memuaskan pada peristiwa beberapa gempa yang lalu. Penggunaan konstruksi dinding bata terkekang pertama kali dilaporkan pada rekonstruksi bangunan yang telah rusak akibat gempa Messina, Italia (*Magnitude* 7,2) pada tahun 1908, yang memakan korban jiwa lebih dari 70.000 orang. Selanjutnya, pada tahun 1940-an teknologi ini diperkenalkan di Cile dan Meksiko.

Pendetailan tulangan konstruksi untuk dinding pengisi dari bata yang terkekang adalah sederhana

Konstruksi untuk dinding pengisi dari bata yang terkekang membutuhkan lebih sedikit baja tulangan daripada struktur rangka beton bertulang



Gambar 58. (a) Bangunan dengan struktur rangka beton bertulang, dan (b) dinding pengisi dari bata terkekang dalam tahap konstruksi, sebelum seluruh tinggi dinding terpasang (sumber: Brzev 2006).

Dinding geser beton bertulang mengurangi goyangan ke samping dari bangunan yang pada umumnya memperkecil kerusakan struktural dan non-struktural

Gunakan dinding geser beton bertulang untuk bangunan bertingkat menengah dan tinggi

Lebih dari 30 tahun terakhir, konstruksi dinding bata terkekang sudah dilaksanakan di wilayah Mediterania Eropa (Italia, Slovenia, Serbia), Amerika Latin (Meksiko, Chile, Peru, Argentina, dan negara lainnya), Negara Timur Tengah (Iran), dan Asia (Indonesia, China). Perlu dicatat bahwa konstruksi dinding bata terkekang dilaksanakan di negara-negara dengan resiko gempa tinggi. Beberapa contoh penggunaan konstruksi dinding bata terkekang di dunia, dari Argentina, Chile, Iran, Serbia dan Slovenia, ditampilkan dalam WHE (EERI/IAEE2000). Keterangan lebih lanjut mengenai konstruksi dinding bata terkekang terdapat dalam publikasi yang dipublikasikan oleh Blondet (2005), Brzev (2006) dan Anthoine dan Taucer (2006).

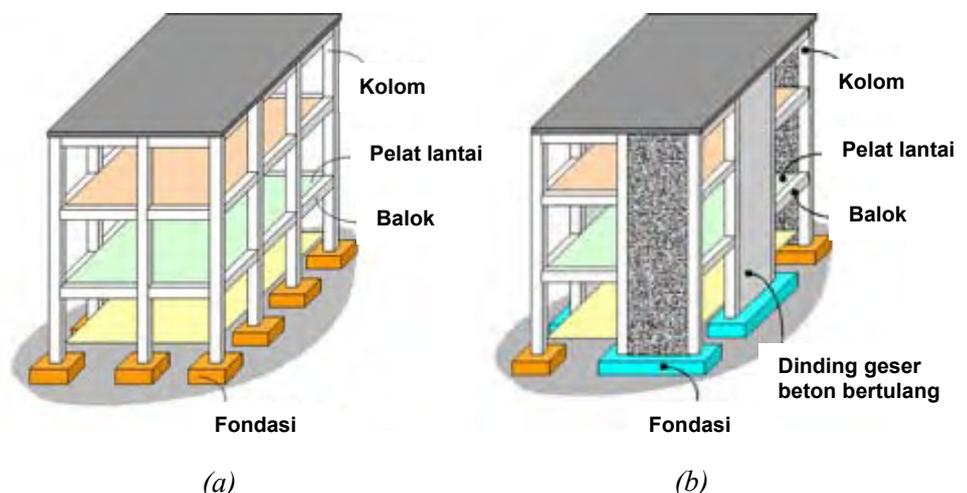
Bangunan Struktur Rangka Beton Bertulang dengan Dinding Geser Beton Bertulang

Latar belakang

Bangunan dengan struktur rangka beton bertulang bisa dilengkapi

dengan dinding beton bertulang (seringkali disebut dinding geser), sebagai tambahan dari elemen pelat, balok, kolom dan dinding pengisi rangka, seperti terlihat pada Gambar 59. Dinding beton bertulang ini sebaiknya menerus sampai keseluruhan tinggi bangunan mulai dari level fondasi. Ketebalan dinding mulai dari 150 mm untuk bangunan rendah sampai 400 mm untuk bangunan tinggi. Dinding-dinding struktural ini biasanya dipasang dalam arah panjang dan/atau lebar bangunan. Dinding tersebut berperilaku sebagai balok yang berorientasi secara vertikal yang menerima beban gempa sampai fondasi. Jadi, bangunan dengan struktur rangka beton bertulang yang dilengkapi dengan dinding geser beton bertulang memiliki dua sistem untuk menahan dampak dari guncangan gempa kuat, yaitu:

- Struktur rangka pemikul momen beton bertulang tiga dimensi (dengan kolom, balok, dan pelat yang terhubung) (lihat Gambar 59a), dan
- Dinding geser beton bertulang yang berorientasi sepanjang satu atau dua arah horizontal gedung (lihat Gambar 59b).



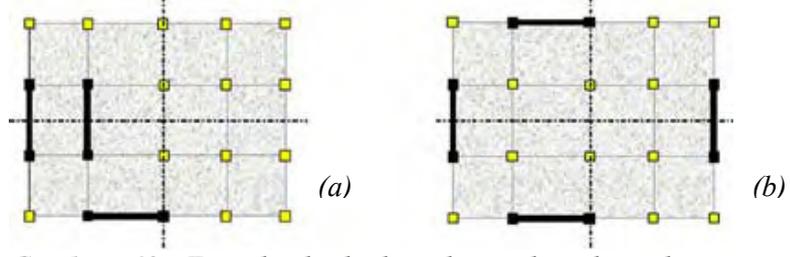
Gambar 59. Bangunan dengan struktur rangka beton bertulang: (a) dengan struktur rangka 3-D kolom-balok-pelat saja, dan (b) dengan struktur rangka 3-D kolom-balok-pelat dan dinding geser (sumber: Murthy 2005).

Kolom-kolom pada bangunan dengan struktur rangka beton bertulang, yang dilengkapi dengan dinding geser beton bertulang, pada dasarnya menerima beban gravitasi (misalnya, berat sendiri dan isi gedung). Dinding geser beton bertulang memberikan kekuatan dan kekakuan yang besar pada bangunan dalam arahnya; hal ini tentunya mengurangi goyangan akibat beban lateral pada bangunan sehingga mengurangi kerusakan secara struktural maupun non-struktural. Oleh karena dinding geser juga memikul gaya inersia yang besar dalam arah horizontal akibat gempa, maka pengaruh momen guling yang didapat juga menjadi besar. Dengan demikian, desain fondasinya harus benar-benar diperhatikan. Dinding geser beton bertulang lebih baik diletakkan pada kedua arah panjang dan lebar bangunan. Dengan kata lain, jika hanya diletakkan pada salah satu arah saja, sebuah struktur rangka pemikul momen tahan gempa (yaitu, balok dan kolom) harus diletakkan pada arah yang lain untuk menahan gempa. Pada dinding beton bertulang

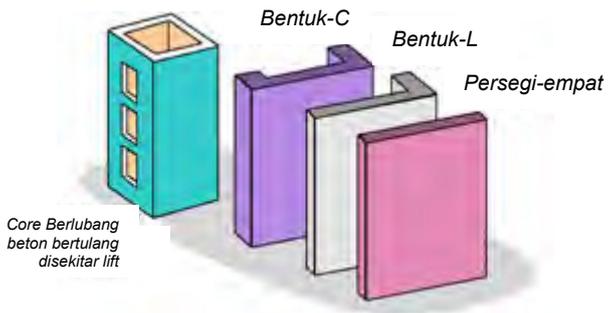
diperbolehkan terdapat pintu atau jendela, akan tetapi ukurannya harus dibatasi agar tidak mengganggu penyaluran gaya pada dinding. Selanjutnya, bukaan-bukaan tersebut harus diletakkan secara simetris. Kontrol desain secara khusus diperlukan untuk meyakinkan bahwa luas dinding dengan bukaan cukup menerima gaya gempa horizontal. Dinding geser beton bertulang harus diletakkan secara simetris untuk mengurangi dampak torsi pada bangunan (lihat Gambar 60). Dinding tersebut harus diletakkan secara simetris pada satu atau dua arah denah bangunan. Dinding beton bertulang lebih efektif ketika diletakkan di sepanjang perimeter luar bangunan: tata letak seperti ini meningkatkan ketahanan bangunan terhadap torsi.

Dinding beton bertulang biasanya berbentuk persegi panjang, yaitu satu dimensi penampangnya lebih besar dari yang lainnya. Sekalipun bentuk penampang dinding pada umumnya adalah persegi panjang, namun penampang dengan bentuk L dan U juga digunakan (lihat Gambar 61).

Penempatan dinding geser secara simetris pada perimeter bangunan memastikan kinerja seismik yang terbaik



Gambar 60. Tata letak dinding beton bertulang harus simetris untuk menghindari pengaruh puntir yang tak dikehendaki: (a) Penempatan dinding beton bertulang asimetris yang tak dikehendaki, dan (b) Tata letak dinding beton simetris terhadap kedua arah sumbu bangunan dan sepanjang keliling bangunan yang dikehendaki (sumber: Murthy 2005).



Gambar 61. Dinding-dinding geser dalam bangunan beton bertulang – geometris yang berbeda sangat dimungkinkan (sumber: Murthy 2005).

Ruang *shaft* di sekeliling dinding lift pada bangunan juga berperilaku sebagai dinding geser. Dinding geser beton bertulang perlu didesain dan dikonstruksi agar berperilaku daktail. Secara keseluruhan bentuk geometris, tipe, dan jumlah tulangan, serta sambungan dengan elemen lainnya pada bangunan juga mendukung daktilitasnya. Ketentuan seismik pada standar tata cara perencanaan bangunan di beberapa negara memberi petunjuk mengenai cara pendetailan tulangan dinding geser beton bertulang yang daktail. Pada dinding geser beton bertulang, baja tulangan dipasang dalam arah vertikal dan horizontal secara teratur (lihat Gambar 62a). Tulangan longitudinal dan horizontal pada dinding dapat dibuat satu maupun dua lapis (sering disebut juga *curtains*).

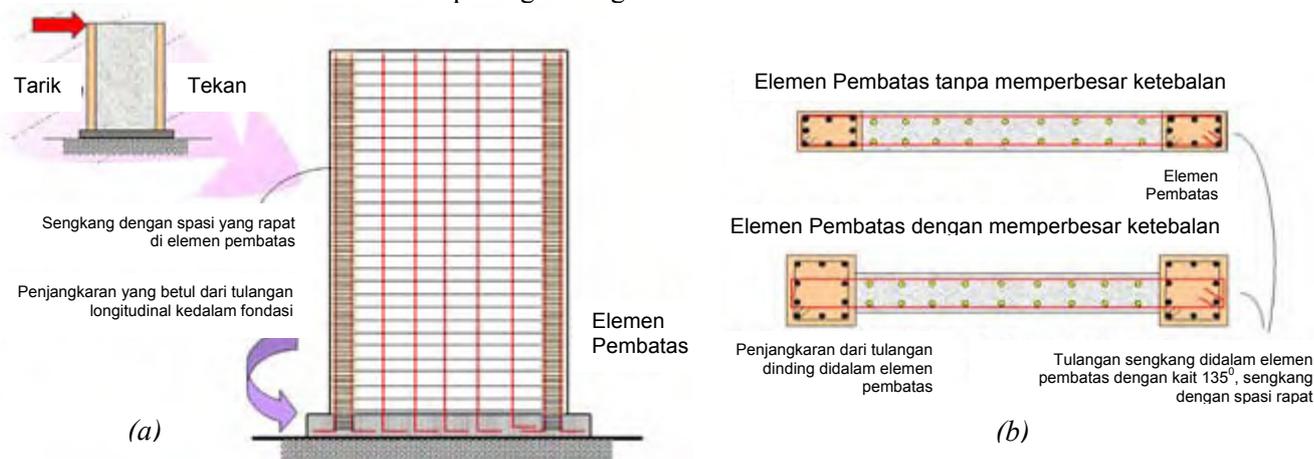
menahan beban bolak-balik ini (lihat Gambar 62b). Bagian ujung penampang dinding dengan tulangan pengekok tambahan disebut elemen pembatas (*boundary elements*). Tulangan pengekok khusus pada elemen pembatas hampir sama seperti kolom pada struktur rangka beton bertulang. Kadang-kadang, ketebalan dinding pada elemen pembatas ini ditambah. Dinding beton bertulang dengan elemen pembatas memiliki kapasitas kuat lentur dan gaya geser horizontal lebih tinggi, sehingga mengurangi resiko kerusakan akibat gempa daripada dinding tanpa elemen pembatas. Keterangan lebih lanjut mengenai dinding geser beton bertulang dapat dilihat pada Paulay & Priestley (1992).

Elemen pembatas = area dengan penulangan yang padat dan dilengkapi dengan tulangan sengkang tertutup terletak pada ujung-ujung dinding geser

Tulangan longitudinal perlu diangkur pada bagian ujung dinding. Tulangan ini sebaiknya didistribusikan secara seragam sepanjang dinding. Akibat dampak guling (*overturning*) yang besar yang disebabkan oleh gaya gempa horizontal, bagian ujung dinding mengalami tegangan tarik dan tegangan tekan yang tinggi. Untuk meyakinkan bahwa struktur dinding berperilaku daktail, bagian ujung penampang dinding harus dipasang tulangan khusus untuk

Keuntungan – keuntungan

Pada gempa yang terjadi belakangan ini, bangunan menggunakan dinding geser beton bertulang yang didesain dan dibuat pendetailannya dengan benar memperlihatkan kinerja yang sangat baik. Gempa Lolloo, Chile tahun 1985 (M 7,8) menunjukkan bahwa beberapa bangunan beton bertulang dengan dinding geser mampu menahan dampak guncangan tanah yang besar.

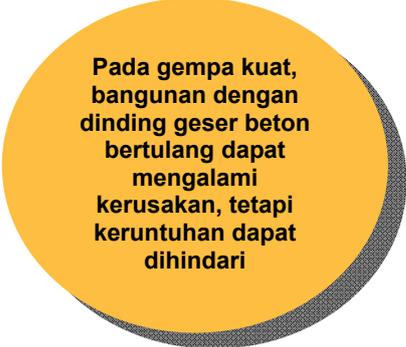


Gambar 62. Tata letak tulangan utama pada dinding geser sesuai IS: 13920-1993 – pendetailan adalah kunci menuju kinerja seismik yang baik (sumber: Murthy 2005).

Kebanyakan bangunan dengan tipe ini menderita kerusakan kecil atau bahkan tidak rusak (Moroni and Gomez, 2002). Pada gempa Izmit tahun 1999 dan Bingol (Turki) tahun 2003, ribuan orang meninggal, beberapa orang meninggal karena terjebak di dalam reruntuhan bangunan berstruktur rangka beton bertulang dengan dinding pengisi. Tetapi, bangunan berbentuk mirip terowongan yang terdiri dari dinding geser beton bertulang tetap berdiri dengan baik dan tidak ada kerusakan yang dilaporkan (Yakut and Gulkan, 2003). Hal yang sama juga terjadi pada tipe bangunan “*Fagure*” di Rumania setelah gempa Vrancea (M 7,2) tahun 1977 (Bostenaru and Sandu, 2002). Bangunan dengan dinding geser beton bertulang juga diperlihatkan setelah gempa Montenegro tahun 1979 (M 7,2) dan gempa Boumerdes, Aljazair (M 6,8) tahun 1993. Bangunan tersebut mengalami kerusakan akibat guncangan tanah yang besar, walaupun kehancuran dapat dihindari. Dinding geser beton bertulang pada wilayah beresiko gempa tinggi membutuhkan pendetailan khusus. Tetapi, pada gempa yang terjadi akhir-akhir ini, bangunan dengan jumlah

dinding geser beton bertulang yang cukup tetapi tidak dilakukan pendetailan secara khusus terhadap gempa (akan tetapi tulangnya sudah terdistribusi dengan baik) memperlihatkan perilaku yang baik. Bangunan dengan struktur rangka beton bertulang dengan dinding geser menjadi pilihan yang populer pada beberapa negara rawan gempa, seperti Cile, Selandia Baru dan Amerika Serikat, karena beberapa keuntungan berikut:

- (a) Dinding geser beton bertulang efektif dalam menyediakan keamanan terhadap gempa dan keruntuhan dapat dihindari.
- (b) Detail penulangan pada dinding geser beton bertulang sedikit lebih kompleks dari pada struktur rangka beton bertulang yang daktail.
- (c) Biaya konstruksi untuk bangunan dengan struktur rangka beton bertulang yang dilengkapi dengan dinding geser biasanya lebih rendah daripada bangunan dengan struktur rangka beton bertulang yang sama tanpa dinding geser.



Pada gempa kuat, bangunan dengan dinding geser beton bertulang dapat mengalami kerusakan, tetapi keruntuhan dapat dihindari

6. Perkuatan Bangunan Struktur Rangka Beton Bertulang

Pendahuluan

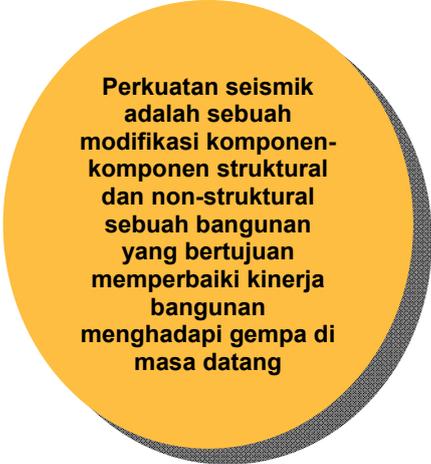
Sedemikian jauh, buku ini telah banyak menyoroti masalah-masalah yang berhubungan dengan perencanaan dan desain bangunan baru berstruktur rangka beton bertulang dengan dinding bata pengisi. Namun, banyak bangunan dengan struktur rangka beton bertulang yang telah ada (eksisting) di negara-negara rawan gempa dengan resiko sedang ataupun tinggi. Bangunan-bangunan ini umumnya terkonsentrasi di daerah urban dengan pertumbuhan yang cepat. Dalam beberapa kasus, masyarakat setempat menganggap bangunan-bangunan ini sebagai tipe pilihan yang cocok untuk bangunan apartemen untuk tempat tinggal. Sayangnya, salah satu penyebab utama ketahanan seismik yang lemah pada bangunan-bangunan tersebut, di negara-negara berkembang, adalah banyak bangunan beton bertulang eksisting yang didesain oleh arsitek dan insinyur yang tidak menguasai desain dan konstruksi tahan gempa dan/atau bangunan tersebut dibangun oleh pekerja lapangan yang tidak terlatih.

Perkiraan jumlah bangunan dengan struktur rangka beton bertulang yang rawan tersebut pada wilayah gempa di seluruh dunia cukup mengejutkan. Secara ideal, akan lebih baik jika dilakukan perkuatan pada bangunan-bangunan tersebut untuk melindungi dari dampak gempa di masa yang akan datang serta mengurangi kerugian dan kehancuran bangunan.

Perkuatan ketahanan terhadap gempa (disebut juga *seismic*

retrofitting) diwujudkan dalam bentuk modifikasi yang dilakukan secara seksama pada komponen-komponen struktur bangunan dengan tujuan untuk meningkatkan ketahanan bangunan tersebut terhadap gempa di masa yang akan datang. Perkuatan ketahanan terhadap gempa dapat dilakukan sebelum maupun setelah terjadinya gempa, di mana biasanya dilakukan bersamaan dengan perbaikan kerusakan akibat gempa. Harus dicatat bahwa perkuatan ketahanan terhadap gempa tidak hanya dilakukan pada struktur bangunan (termasuk fondasi) tetapi juga untuk komponen-komponen non-struktural, seperti penyelesaian arsitektur bangunan dan isinya. Dengan biaya arsitektur bangunan dan isinya yang dapat mencapai dua per tiga dari total biaya, perkuatan ketahanan terhadap gempa untuk komponen non-struktural perlu memperoleh perhatian khusus agar kerugian akibat kerusakan bangunan dapat diminimalisasikan ketika terjadi gempa.

Secara teoritis, perbaikan tersebut mungkin dilakukan pada bangunan-bangunan eksisting dengan struktur rangka beton bertulang. Namun demikian, dalam situasi sebelum terjadinya gempa, kecil kemungkinan tersedianya dana untuk memperbaiki sejumlah besar bangunan ini. Akibatnya, perlu dikembangkan strategi dan aturan untuk memprioritaskan perbaikan gedung sesuai dengan tingkat kepentingan dan ketersediaan sumber dananya. Bagian ini akan membahas beberapa strategi yang tepat dalam memperbaiki struktur rangka beton bertulang akibat gempa.



Perkuatan seismik adalah sebuah modifikasi komponen-komponen struktural dan non-struktural sebuah bangunan yang bertujuan memperbaiki kinerja bangunan menghadapi gempa di masa datang

Asesmen kerentanan seismik membantu menunjukkan adanya kemungkinan kegagalan akibat gempa dan membantu menentukan perlu tidaknya perkuatan struktur

Kinerja sebuah bangunan ketika terjadi gempa dapat diperbaiki dengan meningkatkan kapasitas seismiknya atau mengurangi respons seismiknya

Di beberapa negara, tata cara perkuatan yang ditetapkan dengan suatu cara tertentu sedang diterapkan. Di sini, tidak ada perhitungan yang dilakukan untuk mengerti kapasitas kekuatan dan daktilitas bangunan eksisting; rekomendasi secara umum dibuat untuk semua bangunan. Cara tersebut bukan merupakan pendekatan yang dapat diterima dan dapat menyebabkan bangunan-bangunan eksisting menjadi tidak aman.

Asesmen Ketahanan Bangunan Terhadap Gempa

Prosedur asesmen ketahanan bangunan terhadap gempa sudah tersedia. Tiga tahapan asesmen mengenai resiko gempa yang diterapkan pada bangunan, adalah Penilaian Cepat Secara Visual (*Rapid Visual Screening*), Evaluasi Struktur Secara Cepat (*Quick Structural Evaluation*), and Asesmen Rinci (*Detailed Assessment*). Asesmen-asesmen ini ditampilkan dalam urutan *telescopic*; ketika bangunan gagal pada satu tahapan asesmen, maka asesmen akan difokuskan pada tahapan yang selanjutnya. Penilaian Cepat Secara Visual merupakan asesmen cepat yang dibuat dengan tujuan menetapkan bangunan-bangunan beresiko. Asesmen tersebut terdiri dari pemeriksaan terhadap konfigurasi bangunan berdasarkan tata letak bangunan dan konfigurasinya seperti yang dibahas dalam Bab 2 buku ini, termasuk alur pembebanan, lantai lemah (*weak story*), lantai lunak (*soft story*), bentuk geometri, massa efektif, torsi, dan benturan.

Ketika sebuah bangunan diidentifikasi sebagai bangunan yang beresiko melalui

Penilaian Cepat Secara Visual, hal itu berlanjut pada prosedur perhitungan kedua, yaitu Evaluasi Struktur Secara Cepat. Evaluasi ini meliputi pemeriksaan kekuatan secara umum terkait dengan aspek desain struktur seperti geser dan tegangan aksial pada elemen vertikal penahan beban gempa. Selanjutnya, ketika bangunan diidentifikasi beresiko melalui Evaluasi Struktur Secara Cepat, maka dilakukan asesmen tahap berikutnya dengan Asesmen Rinci. Asesmen ini merupakan evaluasi yang kuantitatif dan akurat terhadap bangunan yang beresiko.

Asesmen Rinci termasuk perhitungan secara detail mengenai sistem struktur pemikul beban gempa, begitu pula pada elemen-elemen non-struktural (sebagai contoh, isi bangunan, elemen-elemen arsitektur dan elemen-elemen yang tidak tahan terhadap beban gempa). Ketentuan standar perkuatan pada elemen non-struktural dipaparkan di dalam FEMA 274 (1994). Telah tersedia kepustakaan yang membahas mengenai hal ini, yaitu FEMA 154 (1988), ATC 20 (1989), FEMA 310 (1998), FEMA 356 (2000), dan yang terbaru ASCE (2003), ASCE (2006), dan ICC (2006).

Cara Perkuatan Bangunan Eksisting Berstruktur Rangka Beton Bertulang

Biasanya, para insinyur struktur memfokuskan pada perbaikan elemen struktural sedangkan para arsitek memfokuskan pada elemen non-struktural. Cara perbaikan elemen non-struktural pada umumnya sama, tetapi tidak

demikian halnya dengan perbaikan secara struktural. Cara perkuatan ketahanan bangunan terhadap gempa untuk satu struktur rangka beton bertulang belum tentu sama dengan bangunan yang lainnya. Oleh karenanya sangatlah penting mengembangkan solusi perbaikan masing-masing bangunan kasus per kasus.

Ketahanan seismik bangunan dengan struktur rangka beton bertulang dapat ditingkatkan dengan salah satu cara berikut ini:

- (a) Meningkatkan kapasitas seismiknya—meningkatkan kekakuan, kekuatan dan daktilitas, dan mengurangi bentuk yang tidak teratur—hal ini merupakan pendekatan konvensional *seismic retrofitting* yang sudah dilakukan dalam beberapa dekade terakhir ini, atau;
- (b) Mengurangi respons gempa — meningkatkan redaman (*damping*) yaitu disipasi energi, pengurangan massa, atau pemisahan bangunan dengan tanah

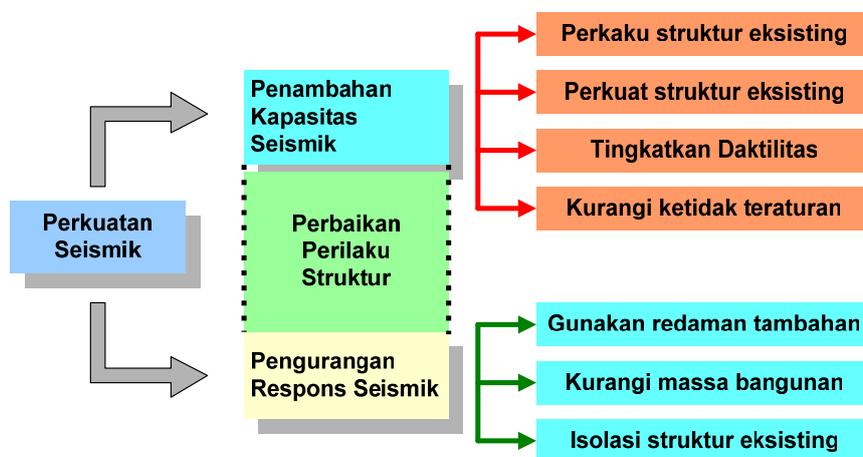
Kedua cara tersebut di atas memerlukan pemahaman terhadap respons seismik bangunan secara keseluruhan, dan tidak hanya elemen struktur secara individual (lihat Gambar 63).

Kapasitas gempa pada bangunan eksisting meningkat akibat bertambahnya kekuatan atau daktilitas dari masing-masing elemen strukturnya (contohnya, melapisi balok dan kolom yang sudah ada dengan baja, beton, atau serat fiber) atau dengan adanya penambahan elemen struktur baru (sebagai contoh adanya dinding geser). Pada umumnya, tujuan perbaikan adalah untuk meningkatkan kemampuan struktur bangunan untuk menahan efek gempa.

Pendekatan alternatif untuk mengurangi gaya gempa pada struktur adalah dengan memasang peralatan khusus yang dapat meningkatkan redaman pada struktur (yang disebut *seismic dampers*), atau memisahkan bangunan dengan tanah dengan memasang alat-alat *base isolation*. Perkembangan teknologi ini dapat digunakan untuk memperbaiki struktur rangka beton bertulang eksisting; walaupun, tingginya biaya dan keahlian yang diperlukan dalam desain dan implementasi proyek-proyek semacam ini memperlihatkan adanya hambatan bagi penerapannya secara luas pada saat ini.

Untuk meningkatkan kapasitas sebuah sistem struktur, komponen-komponennya secara individual dapat diperkuat dan/atau elemen-elemen struktural baru dapat ditambahkan

Cara memperkuat bangunan berstruktur rangka beton bertulang yang paling efektif adalah dengan memasang dinding-dinding geser baru pada lokasi-lokasi yang strategis



Gambar 63. Strategi sistem perkuatan untuk sistem struktur penahan beban lateral (sumber: Durgesh C. Rai).

Dinding geser beton bertulang harus dipasang sedemikian sehingga efek torsi dapat diminimalkan

Dinding-dinding geser baru harus diberi penulangan sedemikian agar dapat berperilaku menyatu dengan struktur rangka eksisting

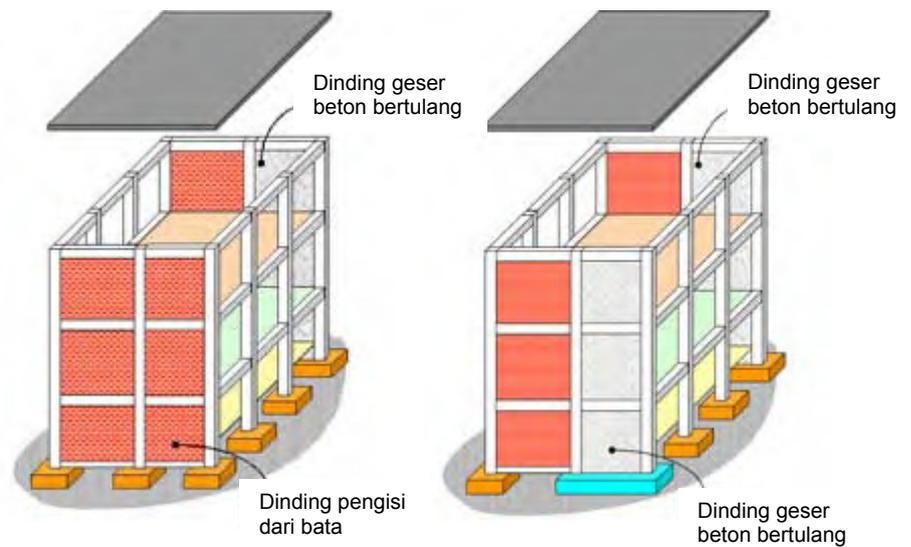
Gunakan dowel untuk menghubungkan dinding geser baru dengan pelat lantai dan balok eksisting

Strategi perbaikan terhadap bangunan beton bertulang yang digambarkan dalam buku ini sudah digunakan setelah terjadinya beberapa gempa akhir-akhir ini di beberapa negara, atau bahkan bermanfaat untuk mengantisipasi gempa di masa yang akan datang, yaitu:

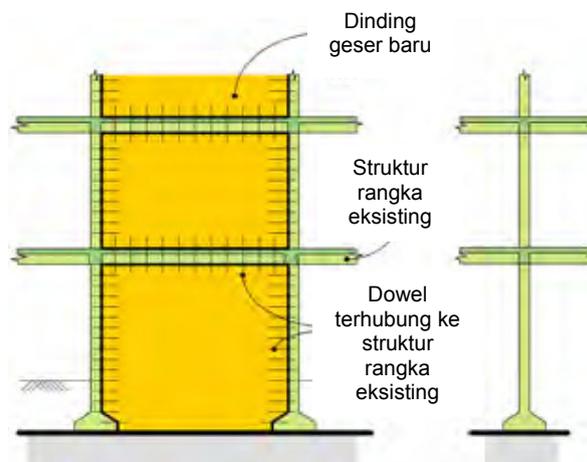
- Memasang dinding geser beton bertulang baru atau pengaku-pengaku baja (*steel braces*)

yang diikatkan pada rangka eksisting.

- Perkuatan dinding pengisi dari bata eksisting dengan bahan-bahan fiber komposit.
- Melapisi komponen-komponen struktur, seperti kolom dan balok, dengan lapisan beton atau baja, atau lapisan fiber komposit (*composite fiber-wrap overlays*).



Gambar 64. Pemasangan dinding-dinding geser yang baru (sumber: C.V.R. Murthy).



Gambar 65. Pemasangan dinding geser baru pada bangunan dengan struktur rangka beton bertulang eksisting – perhatikan dowel yang disediakan untuk mengikat struktur lama dan baru (sumber: C.V.R. Murthy, diadaptasi dari Gulkan et al. 2002).

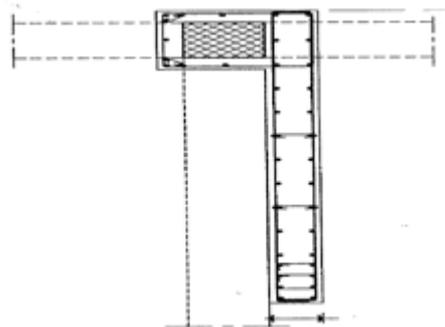
Pemasangan dinding geser beton bertulang baru atau pengaku baja baru

Metode perkuatan struktur rangka beton bertulang yang biasa digunakan dan mungkin paling efektif adalah pemasangan dinding geser beton bertulang baru, seperti diperlihatkan pada Gambar 64. Dinding ini biasanya dibuat dari beton bertulang atau konstruksi dinding bata bertulang (agak jarang). Dinding geser tersebut harus dipasang pada lokasi yang tepat dengan tujuan untuk meminimalkan efek torsi. Juga, dinding ini harus diberi tulangan yang dapat bekerja sama dengan struktur yang telah ada. Pendetailan yang teliti dan pemilihan material juga diperlukan untuk memastikan adanya hubungan yang efektif antara bangunan baru dengan eksisting. Dinding geser baru memperbaiki distribusi gaya pada struktur akibat beban lateral, dan tentunya membutuhkan perkuatan fondasi. Metode ini telah digunakan di Turki setelah terjadinya gempa tahun 1999 (Gulkan et al. 2002) dan di Taiwan setelah gempa Chi Chi

tahun 2001 (Yao and Sheu 2002). Gambar 65 menunjukkan konsep perbaikan struktur rangka beton bertulang dengan pemasangan dinding geser baru.

Pada beberapa kasus, pemasangan dinding geser beton bertulang baru dikombinasikan dengan pelapisan kolom (*column jacketing*), seperti terlihat pada Gambar 66. Pelapisan kolom juga memberikan dampak yang menguntungkan yaitu meningkatnya kekuatan dan daktilitas kolom beton bertulang eksisting, seperti yang dibahas sebelumnya. Teknik ini biasanya diterapkan jika ada kemungkinan memperoleh hubungan yang efektif antara struktur yang lama dan yang baru dengan menggunakan *steel dowels*. (Pada beberapa negara, praktik penggunaan *chemical anchors*, yang berfungsi sebagai *dowels*, tidak terlalu berkembang).

Sebagai alternatif dalam pemasangan dinding geser beton bertulang baru atau dinding geser dari bata baru, pengaku baja (*steel braces*) dapat digunakan untuk meningkatkan ketahanan gempa pada bangunan tersebut. Gambar 67 menggambarkan contoh perbaikan dari sebuah tes yang dilakukan di Jepang baru-baru ini.



Gambar 66. Perkuatan bangunan beton bertulang eksisting menggunakan dinding-dinding geser beton bertulang dan pelapisan (*jacketing*) kolom-kolom eksisting setelah gempa Boumerdes 2003 di Aljazair (foto: M. Farsi; gambar milik CTC Aljazair).

Gambar 67. Perkuatan struktur rangka beton bertulang dengan baja diagonal silang – test meja getar di E-Defence, Japan: (a) kegagalan kolom pendek pada lantai dasar; (b) perkuatan menggunakan baja diagonal silang (sumber: C. Comartin).



(a)



(b)

Pelapisan (Jacketing)

Pelapisan berupa pemasangan baja tulangan (tulangan longitudinal dan tulangan sengkang dalam arah lateral) dengan tujuan untuk meningkatkan kekuatan dan daktilitas elemen kolom yang sudah ada (biasanya kolom), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 68. Sebagai hasilnya, penampang kolom juga diperbesar. Ketika tulangan baru dipasang pada area pertemuan balok kolom, beton yang telah ada pada area pertemuan harus diperbaiki dengan hati-hati. Gambar 69 dan 70 memperlihatkan pelapisan pada struktur rangka beton bertulang di Kolombia.

Sebagai alternatif, pelapisan dapat dilakukan dengan cara memasang baja strip dan baja siku, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 71. Dalam kasus ini, baja strip berfungsi sebagai tulangan lateral, sedangkan baja siku berfungsi sebagai tulangan longitudinal. Komponen-komponen ini dilas untuk memastikan integritas dari sistem perbaikan.

Perbaikan struktur rangka beton bertulang dengan pelapisan pada kolom digunakan untuk memperbaiki bangunan di India setelah terjadinya gempa Bhuj tahun 2001, dan sebelumnya juga digunakan di Rumania setelah gempa Vrancea tahun 1977 (Bostenaru 2004). Berikut adalah hasil observasi yang menunjukkan kesalahan dalam penerapan yaitu:

- Pada beberapa kasus, perkuatan dibatasi hanya untuk kolom pada lantai dasar, yang kemungkinan tidak cukup; pada beberapa kasus, tulangan

longitudinal yang ditambahkan pada beton dan ujung-ujungnya dibiarkan begitu saja tanpa dikaitkan pada elemen balok dan kolom beton di atasnya, serta fondasi di bawahnya (lihat Gambar 72).

- Pada kebanyakan kasus, kolom eksisting diikat dengan baja siku dan baja strip (lihat Gambar 72) sebelum beton pada kolom dibobok. Dan, dalam banyak kasus, pelapisan dilakukan tanpa persiapan pada permukaan beton eksisting (selimut kolom eksisting sebaiknya dikupas/diketrik terlebih dahulu).
- Dalam kebanyakan kasus, ukuran pelapisan kolom tidak cukup bahkan untuk beban gravitasi; walaupun, pada beberapa kasus ukuran kolom menjadi luar biasa besar setelah pelapisan (lihat Gambar 73).
- Dalam beberapa kasus, pelapisan pada kolom hanya dilakukan sampai lantai dasar dan tidak diteruskan ke fondasi.

Pada beberapa tahun terakhir ini, penggunaan pembungkus komposit fiber (*composite fiber wraps*) untuk mengekang kolom beton bertulang meningkat. Teknologi ini lebih sederhana dan lebih murah daripada menggunakan baja tulangan. *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) dapat diaplikasikan pada sekeliling kolom beton bertulang untuk memberikan tulangan pengekang; yang dapat meningkatkan baik kekuatan maupun daktilitasnya. Teknologi pembungkus fiber ini sudah digunakan secara luas untuk perbaikan akibat gempa pada jembatan dan kolom pada gedung dalam dekade terakhir. Prosedur desain yang lebih lengkap disajikan dalam publikasi yang diterbitkan oleh ISIS Kanada (2001, 2003, dan 2004).



Pelapisan (jacketing) dapat meningkatkan kekuatan dan daktilitas kolom-kolom



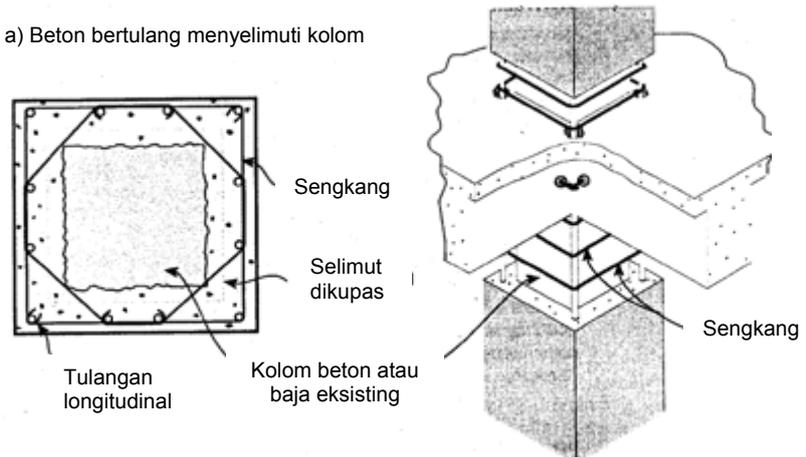
Lapisan *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) dapat digunakan untuk memperkuat dinding pengisi dari bata eksisting atau untuk melapisi kolom-kolom



Perkuatan menggunakan FRP perlu dilakukan dengan seksama, mempertimbangkan perilaku getas FRP

Pelapisan (*jacketing*) harus dipasang menerus melalui pelat lantai agar efektif

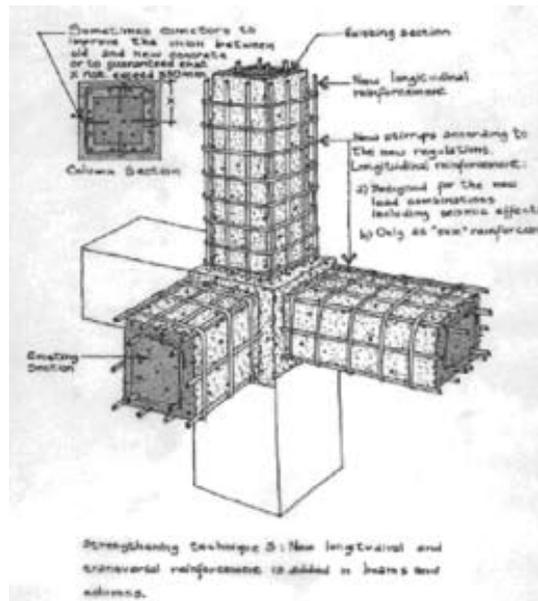
a) Beton bertulang menyelimuti kolom



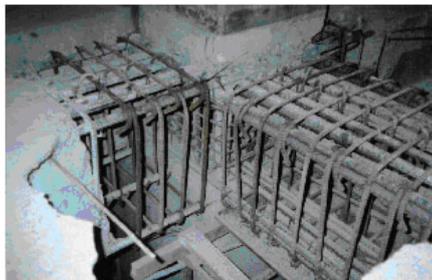
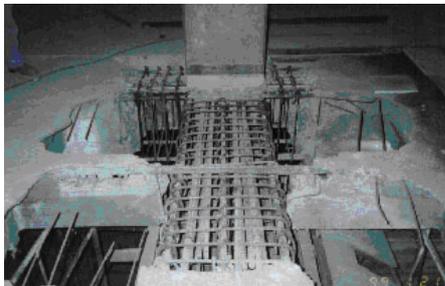
Gambar 68. Pelapisan (*jacketing*) kolom-kolom beton bertulang eksisting menggunakan selimut beton bertulang baru (sumber: NRC 1995).



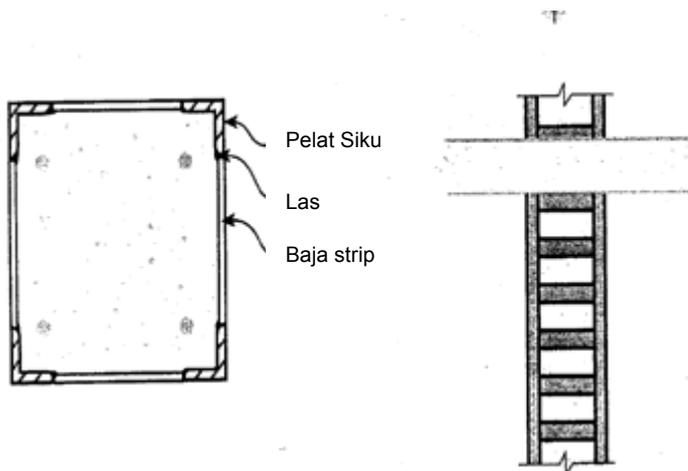
Gambar 69. Pemasangan lapisan beton bertulang dari level fondasi sampai ke bagian bawah balok; contoh dari Kolombia (sumber: Mejia 2002).



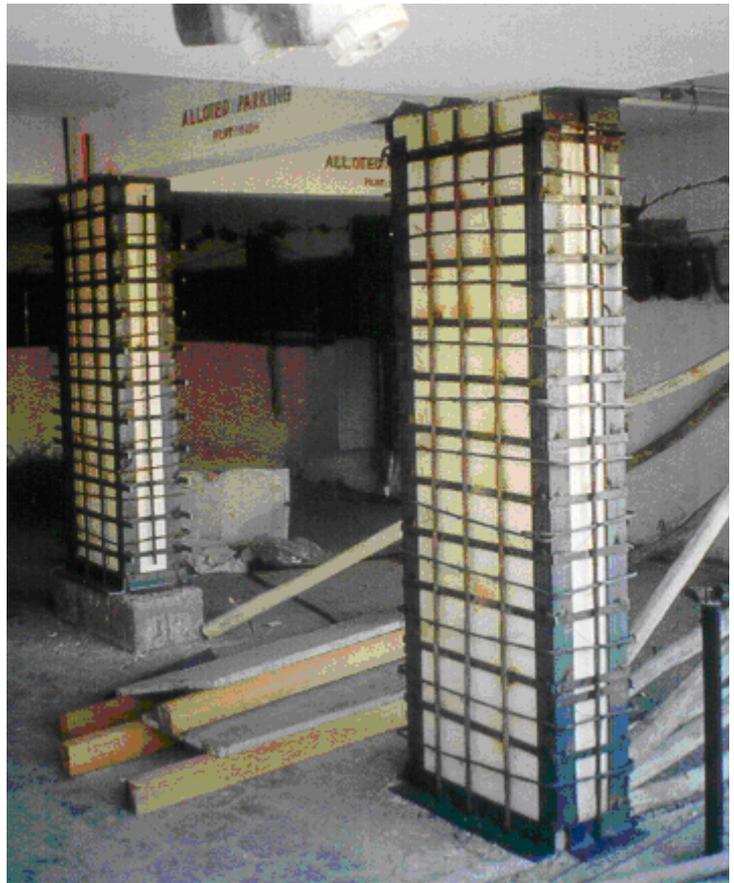
Pelapisan (*jacketing*) terdiri dari pemasangan tulangan baja baru (longitudinal dan sengkang) sehingga memperbesar luas penampang kolom



Gambar 70. Pelapisan (*jacketing*) daerah pertemuan balok-kolom, sebuah contoh dari Kolombia (sumber: Mejia 2002).



Gambar 71. Pelapisan (*jacketing*) baja pada kolom beton bertulang eksisting (sumber: NRC 1005)



Gambar 72. Sebuah contoh pelapisan yang kurang tepat: baja siku yang memanjang dalam arah vertikal disambung/dilekatkan dengan pengelasan dalam arah horizontal pada baja tulangan, diikuti dengan pengecoran beton; sambungan ini tidak menerus di bagian balok lantai atas serta tidak dimulai dari level fondasi (sumber: C.V.R. Murty).



Gambar 73. Sebuah contoh praktik perkuatan yang kurang tepat: pelapisan (jacketing) kolom beton bertulang menyebabkan ukuran dimensi kolom menjadi sangat besar (perhatikan ketiadaan kontinuitas antara lantai-lantai atas dan fondasi) (foto: C.V.R. Murty).

Perkuatan Dinding Pengisi Dari Bata Eksisting

Pemasangan dinding geser beton bertulang baru pada bangunan eksisting banyak menghabiskan waktu. Aplikasi dari metode ini mungkin digunakan pada situasi setelah terjadi gempa, ketika bangunan telah mengalami kerusakan dan perlu dievakuasi. Namun, ada kemungkinan mengevakuasi bangunan yang rusak tidak layak. Keperluan untuk melaksanakan perkuatan pada sebuah bangunan secara cepat dan efektif telah dilakukan penelitian yang difokuskan pada penggunaan *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) untuk memperkuat dinding pengisi dari bata eksisting. Teknologi ini semakin banyak digunakan pada perbaikan jembatan dan bangunan pada kondisi sebelum dan setelah gempa. FRP merupakan material ringan yang memiliki kuat tarik tinggi jika dibandingkan dengan baja tulangan. Beberapa tipe fiber (termasuk yang terbuat dari kaca dan karbon) dilapisi bahan dasar *epoxy-resin* untuk membentuk lembaran atau tulangan. Karakteristik lain FRP adalah perilaku yang getas, sekali kekuatannya terlampaui, material ini dapat mengalami kegagalan secara tiba-tiba (hampir sama dengan kaca).

Keuntungan utama dari sistem perkuatan ini adalah penerapannya yang cepat, di mana hanya membutuhkan waktu dalam hitungan hari bahkan jam (tergantung pada lingkup pekerjaannya) dan tidak memerlukan pemindahan penghuni gedung. Penting untuk dicatat, bahwa biaya material lembaran FRP ini terlalu mahal bagi beberapa pemilik gedung.

Penelitian secara ekstensif telah dilakukan di the Middle East Technical University (METU), Turki (Erdem et al 2004; Ozcebe et al. 2004). Lembaran *Carbon Fibre Reinforced Polymer* (CFRP) dalam bentuk strip-strip diagonal digunakan untuk memperkuat dinding pengisi dari bata yang terbuat dari bata merah berlubang. Tujuan akhir perkuatan adalah untuk mengubah panel non-struktural ini menjadi dinding geser yang memiliki ketahanan terhadap beban gempa lateral. Strip diikatkan dengan rangka beton bertulang dengan menggunakan *dowels* khusus dari lembaran CFRP. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode ini dapat digunakan secara efektif untuk meningkatkan kekuatan dan kekakuan struktur rangka beton bertulang; walaupun keefektifannya bergantung dari pemasangan angkur antara strip dengan rangka tersebut. Perlu dicatat pula bahwa dengan sifat getas material CFRP dan dinding pengisi dari bata tak bertulang, metode perbaikan ini hanya memberikan solusi terbatas pada daktilitas struktur eksisting. Gambar 74 memperlihatkan tes yang dilakukan oleh the METU.

Perkuatan Bangunan Berstruktur Rangka Beton Bertulang dengan Tingkat Dasar Terbuka

Sejumlah besar bangunan eksisting dengan struktur rangka beton bertulang di seluruh dunia memiliki tingkat dasar yang terbuka, fleksibel atau lemah; bangunan seperti ini benar-benar rawan terhadap gempa, seperti yang dibahas pada bagian awal buku ini. Karena bangunan yang beresiko ini masih dikonstruksi,

maka pelaksanaan sistem perkuatannya dibahas dalam buku ini.



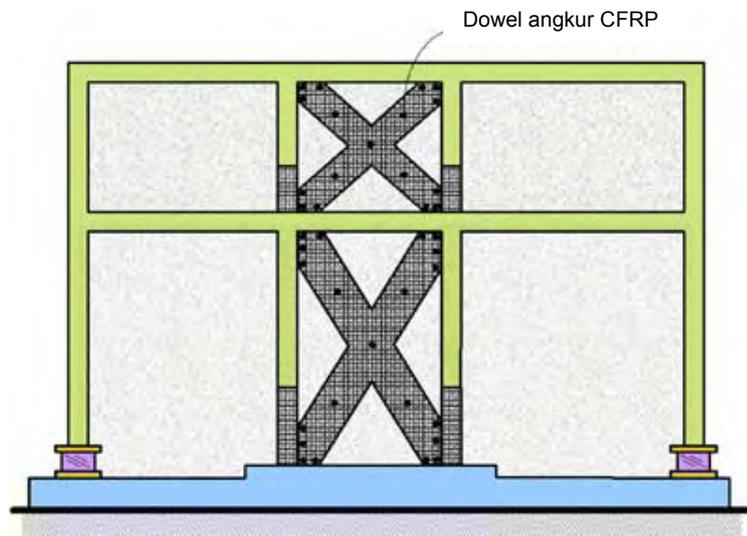
Bangunan-bangunan dengan tingkat-tingkat yang terbuka, fleksibel, dan lemah sangat rentan terhadap gempa

Secara umum, perbaikan bangunan seperti ini memastikan bahwa penurunan secara tiba-tiba pada kekakuan dan kekuatan pada setiap tingkat dari bangunan tidak akan terjadi. Terdapat beberapa pilihan untuk memperbaiki bangunan eksisting dengan tingkat dasar yang terbuka, seperti pada Gambar 75. Adalah mungkin untuk tetap menjaga fungsi asli dari lantai dasar (contohnya lantai parkir) ketika berupaya mengurangi fleksibilitas atau kelemahan pada bangunan. Pengembangan solusi perkuatan merupakan tugas yang menghabiskan banyak waktu dan membutuhkan keahlian tingkat

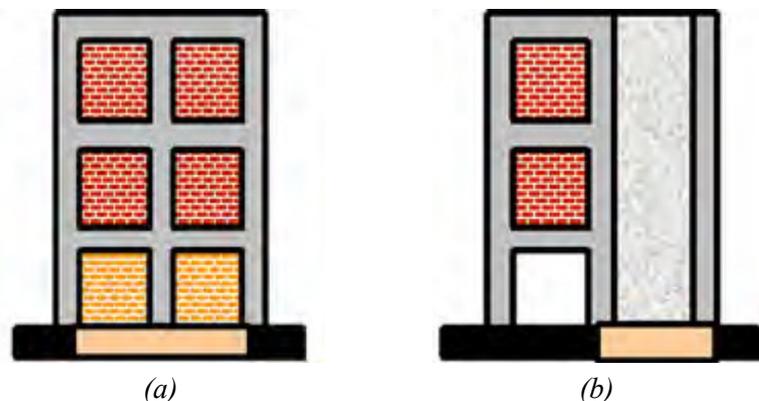
tinggi. Karena beberapa keterbatasan, termasuk sumber ekonomi dan manusianya, tidak mungkin untuk melakukan perkuatan semua bangunan beresiko pada daerah rawan gempa. Oleh karenanya, dua strategi berikut dapat digunakan untuk mengatasi masalah tersebut: tujuan jangka pendek (untuk mencegah keruntuhan), dan jangka panjang (untuk memastikan peningkatan ketahanan gempa akibat perkuatan).

Tujuan Jangka Pendek = Mencegah Keruntuhan

Sekali bangunan rentan dengan tingkat dasar terbuka diidentifikasi, timbul tanggung jawab untuk segera memperbaiki tingkat keamanan bangunan ini, sebelum terkena gempa dimasa datang dan dapat mengalami keruntuhan. Satu solusi cepat adalah dengan memasang dinding-dinding pengisi dari bata pada lantai dasar di antara kolom sebanyak mungkin (lihat Gambar 75a dan 76).



Gambar 74. Konfigurasi lembaran CFRP dan lokasi dowel angkur (sumber: C.V.R. Murthy, diadaptasi dari Erdem et al. 2004).



Gambar 75. Berbagai pilihan untuk perkuatan bangunan dengan tingkat dasar terbuka: (a) pengisian bukaan pada level lantai dasar; dan (b) pemasangan dinding geser beton bertulang yang menerus (sumber: C.V.R. Murthy).

Tujuan Jangka Panjang = Meningkatkan Ketahanan Terhadap Gempa

Beberapa bangunan eksisting dan bangunan baru dengan tingkat dasar terbuka, kekuatan dan kekakuan yang tidak teratur pada lantai dasar sebaiknya diminimalkan, jika tidak bisa dihilangkan. Pada lantai dasar, dinding beton bertulang dapat dibangun di tempat-tempat tertentu tetapi secara menerus sepanjang tinggi bangunan (lihat Gambar 75b dan 77); tempat lain dapat diisi dengan dinding bata. Dengan menggunakan solusi ini (didesain oleh insinyur berkompeten untuk masing-masing gedung), perilaku seismik bangunan yang baik akan dapat dijamin.

Bagaimana Perkuatan Struktur Terhadap Gempa Berdampak pada Karakteristik Struktur Tersebut

Metode perbaikan di atas, apabila diterapkan dengan baik, mempengaruhi satu atau beberapa karakteristik struktur sebagai berikut:

- *Kekuatan* – perkuatan diharapkan dapat meningkatkan kekuatan pada struktur eksisting, yaitu pada tingkat di mana struktur atau komponennya akan mulai gagal.
- *Kekakuan* – kebanyakan metode perkuatan juga mempengaruhi kekakuan struktur, yaitu kemampuannya untuk berdeformasi (bergoyang) ketika terjadi gaya gempa – struktur yang kaku lebih sedikit bergoyang daripada struktur yang fleksibel ketika terkena gaya inersia gempa yang sama.
- *Daktilitas* – sangat dikehendaki metode perkuatan dengan meningkatkan daktilitas pada struktur eksisting, yaitu kemampuan untuk berdeformasi secara berulang-ulang sebelum mengalami kegagalan.

Ketidak seragaman kekakuan dan kekuatan pada tingkat dasar seharusnya diminimalkan atau bahkan ditiadakan sama sekali



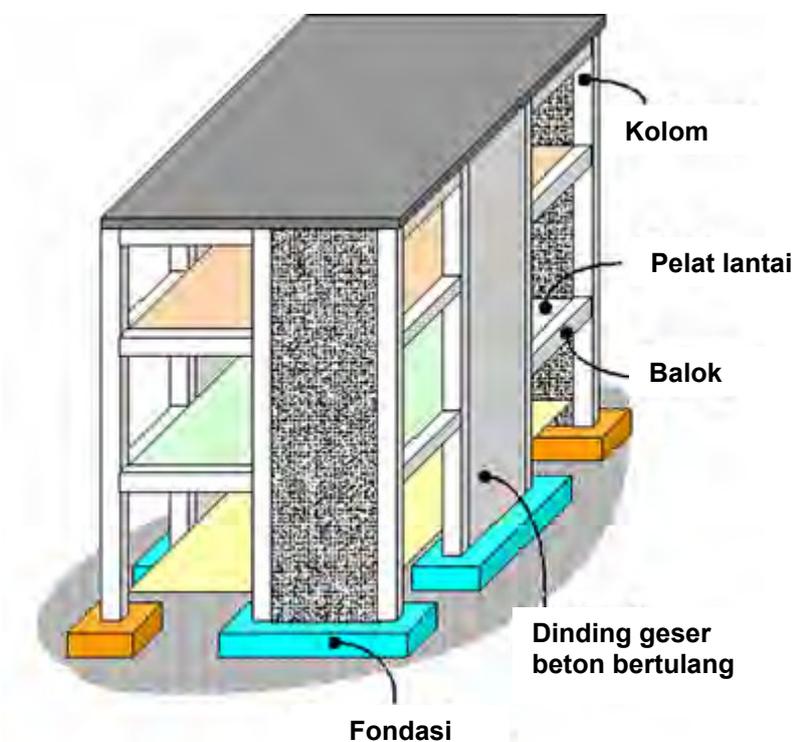
Gambar 76. Solusi jangka pendek bagi kerentanan seismik sebuah bangunan dengan tingkat dasar terbuka setelah gempa Bhuj 2001: perhatikan bidang bentangan yang terbuka pada tingkat dasar diisi dengan dinding bata baru (foto: C.V.R. Murthy).

Biasanya, sebuah metode perkuatan mempengaruhi satu atau lebih karakteristik struktur. Dampak metode perkuatan yang dibahas pada buku ini diringkas dalam Tabel 2.

Perkuatan Struktur Rangka Beton Bertulang dengan Dinding Pengisi Dari Bata: Tantangan-Tantangan Dalam Penerapan

Beberapa metode perkuatan yang sesuai untuk struktur rangka beton bertulang dengan material pengisi akan dibahas pada bagian ini. Penjelasan-penjelasan ini dimaksudkan untuk lebih memaparkan konsep perkuatan daripada menawarkan solusi yang detail. Desain perkuatan harus

dilakukan oleh para profesional yang berkompeten sebelum penerapannya di lapangan. Analisis seismik yang seksama harus dilakukan, di mana dikembangkan model analisis bangunan eksisting, dan dampak perkuatan masing-masing elemen struktur diperhitungkan. Elemen struktur baru (contohnya dinding geser beton bertulang) yang ditambahkan pada struktur eksisting harus dimasukkan dalam model struktur pada proses analisis. Beberapa perangkat lunak komputer yang mendukung dalam analisis sudah tersedia. Namun, kunci sukses bagi para pemilik gedung dan agen terkait lainnya adalah dengan mempekerjakan para insinyur struktur yang berpengalaman dan memiliki pengetahuan mengenai desain gempa dan metode perkuatan serta rekayasa struktur secara umum.



Gambar 77. Solusi jangka panjang untuk bangunan-bangunan dengan tingkat dasar terbuka: dinding geser beton bertulang menerus disediakan sepanjang tinggi bangunan untuk mengatasi kekakuan dan kekuatan yang berkurang disebabkan oleh tingkat dasar yang terbuka (sumber: Murthy 2005).

Tabel 2: Metode Perkuatan dan Dampaknya pada Karakteristik Struktur

Metode Perkuatan	Hasil peningkatan terhadap		
	Kekuatan	Kekakuan	Daktilitas
Pemasangan dinding beton bertulang baru	YA	BERPENGARUH	BERPENGARUH
Perkuatan dinding pengisi dari bata dengan CFRP	YA	BERPENGARUH	SANGAT KECIL
Pelapisan (<i>Jacketing</i>)	YA	SEDANG	SEDANG

Dalam sebuah situasi pasca gempa, pemerintah dan lembaga-lembaga swasta dihadapkan pada tugas yang menantang terkait dengan penanganan sejumlah besar proyek yang terfokus pada upaya memperbaiki ratusan atau bahkan ribuan bangunan. Namun, harus disadari bahwa masing-masing bangunan adalah unik dan sistem perkuatan terhadap gempa yang diberlakukan pada satu bangunan belum tentu sama dengan sistem perkuatan untuk bangunan yang lainnya. Ketentuan-ketentuan dalam perkuatan tergantung pada banyak faktor, termasuk resiko gempa pada suatu lokasi bangunan, kondisi tanah setempat, ketahanan gempa yang diharapkan, serta tipe dan umur struktur. Jadi, strategi perkuatan masal tidak berlaku pada kasus bangunan dengan struktur rangka beton bertulang, kecuali kalau bangunan memiliki ragam kelemahan dan kegagalan yang sama.

Sebuah tantangan lain yang terkait dengan penerapan perkuatan pada bangunan dengan struktur rangka beton bertulang dan dinding pengisi terletak pada keahlian yang terbatas terkait dengan desain maupun pelaksanaan proyek perkuatan terhadap gempa. Perkuatan merupakan sebuah proses lanjutan dan pada banyak kasus, membutuhkan tingkat keahlian yang lebih tinggi daripada yang diperlukan dalam desain dan konstruksi bangunan baru. Negara-negara berkembang berusaha mengatasi permasalahan ini, terutama pada saat kondisi

pasca gempa. Beberapa tantangan yang dihadapi lembaga-lembaga terkait disebabkan oleh kurangnya keahlian dan pengalaman yaitu:

- Menghitung biaya perkiraan untuk perkuatan bermacam-macam tipe struktur (struktur rangka beton bertulang, bangunan bata, dan sebagainya);
- Mengidentifikasi dan menggunakan peralatan yang dibutuhkan untuk melakukan modifikasi/ perbaikan elemen-elemen struktur eksisting;
- Memperkirakan waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan perkuatan untuk bangunan-bangunan tertentu, tergantung dari ukuran dan tipe konstruksinya; dan
- Menemukan pekerja lapangan dengan semua keterampilan yang dibutuhkan dalam penerapan perkuatan.

Tantangan-tantangan di atas menggaris bawahi kebutuhan-kebutuhan mendesak yang harus dibicarakan di antara semua pemangku kepentingan (*stakeholders*) antar negara dan wilayah yang rawan terhadap bencana gempa. Petunjuk-petunjuk diperlukan untuk memperkirakan sumber daya manusia dan peralatan yang dibutuhkan, dan menghadirkan sistem manajemen konstruksi yang efektif dalam penerapan perkuatan pada bangunan dengan struktur rangka beton bertulang yang beresiko, baik pada situasi sebelum maupun sesudah gempa di berbagai belahan dunia.

Strategi perkuatan perlu dievaluasi secara hati-hati berkaitan dengan pengaruhnya terhadap kekuatan, kekakuan, dan daktilitas sebuah bangunan

Pemetaan perlu dilakukan untuk memperkirakan sumber daya manusia dan peralatan yang diperlukan bagi perkuatan seismik bangunan-bangunan dengan struktur rangka beton bertulang di seluruh dunia yang rentan terhadap resiko gempa

Dalam banyak kasus, desain dan pelaksanaan konstruksi perkuatan pada bangunan-bangunan eksisting membutuhkan keahlian yang lebih tinggi daripada yang dibutuhkan untuk desain dan pelaksanaan konstruksi bangunan-bangunan baru

7. Kesimpulan

Buku ini menitikberatkan pemaparan tentang kinerja seismik yang buruk dari bangunan dengan struktur rangka beton bertulang berdinding pengisi dari bata, dan mencatat faktor-faktor utama desain dan konstruksi yang menjadi penyebab buruknya kinerja tersebut. Ada keprihatinan khusus dari komunitas insinyur gempa bahwa banyak dari bangunan-bangunan yang sudah berdiri di seluruh dunia, rawan akan terkena dampak buruk akibat gempa di masa yang akan datang. Dan bahkan bangunan baru pun rawan bahaya jika perhatian tidak diberikan pada isu-isu kritis desain, konstruksi dan manajemen.

Tantangan Secara Teknis

Desain dan konstruksi bangunan berstruktur rangka beton bertulang membutuhkan banyak faktor kecil namun penting untuk membuatnya menjadi bangunan yang tahan terhadap gempa. Seperti yang dibicarakan dalam buku ini, hal-hal yang perlu diperhatikan adalah:

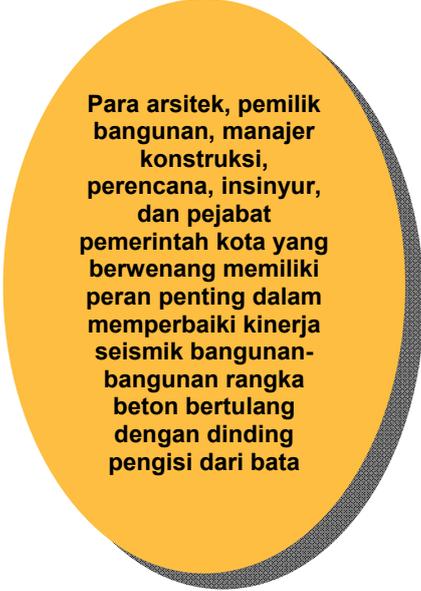
- (a) kolom lebih kuat dari pada balok.
- (b) tulangan pada pertemuan balok dan kolom dipasang secara tepat sehingga memungkinkan pengecoran pada bagian pertemuan dapat dilakukan dengan baik.
- (c) balok bersifat daktail, melalui pengaturan baja tulangan yang tepat, dan

- (d) rangka tidak lemah atau elastis dalam arah horizontal, baik pada lantai satu maupun secara keseluruhan.

Secara umum, sulit untuk mendesain, merencanakan pendetailan dan melaksanakan pembangunan rangka beton bertulang dengan ketahanan gempa yang baik, walaupun faktor-faktor tambahan yang dibutuhkan hanya bertambah secara wajar, termasuk biaya. Sebagai contoh, tulangan pengikat kolom dibuat dengan sudut 135° dibengkokkan pada bagian ujungnya, sedangkan untuk bangunan di daerah tidak rawan gempa hanya diperlukan sudut 90° . Tambahan usaha dan biaya hanya berbentuk nominal saja, namun akibat jika tidak melakukan perubahan ini sangatlah buruk. Jika perhatian khusus tidak diberikan pada desain, pendetailan, dan konstruksi, rangka beton bertulang itu sendiri sebaiknya tidak digunakan untuk menahan beban lateral. Sistem-sistem alternatif pemikul beban lateral, sangatlah dibutuhkan.

Buku mengenai bangunan dengan struktur rangka beton bertulang ini menyarankan penggunaan dua alternatif sistem struktur ketahanan terhadap beban lateral sebagai berikut:

- (a) Dinding geser beton bertulang dibuat menerus mulai dari fondasi sampai atap untuk bangunan bertingkat sedang sampai tinggi dengan struktur rangka beton bertulang .



Para arsitek, pemilik bangunan, manajer konstruksi, perencana, insinyur, dan pejabat pemerintah kota yang berwenang memiliki peran penting dalam memperbaiki kinerja seismik bangunan-bangunan rangka beton bertulang dengan dinding pengisi dari bata

- (b) Konstruksi dinding pengisi dari bata terkekang yaitu kombinasi elemen pengikat beton bertulang (balok-balok pengikat dan kolom praktis) dengan dinding bata pengisi, cocok digunakan untuk bangunan bertingkat rendah (satu sampai empat lantai).

Para Pemangku Kepentingan (*Stakeholders*)

Terdapat beberapa pemegang peran penting yang terkait dengan upaya menarik perhatian yang dibutuhkan mengenai hal-hal ini. Pembaca buku ini diharapkan mengevaluasi bagaimana mereka dapat memainkan peran masing-masing dalam proses pelaksanaan pekerjaan untuk menghasilkan desain dan konstruksi yang aman. Masalah ini dapat menjadi lebih teratur jika masing-masing individu dengan peranannya dalam proses desain dan konstruksi bertanggung jawab untuk mempelajari bagaimana mereka secara personal dapat mempengaruhi proses tersebut. Para pemangku kepentingan utama dan peran mereka masing-masing dapat dipaparkan secara ringkas sebagai berikut:

- **Para Arsitek** perlu mengerti bahwa desain mereka dapat mempengaruhi ketahanan bangunan terhadap gempa, dan sebaiknya menghindari upaya mendesain bentuk yang kompleks yang dapat menyebabkan masalah torsi. Mereka perlu mengerti bahwa dinding pengisi dari bata tidak hanya merupakan komponen arsitektural, tetapi juga memiliki pengaruh pada ketahanan struktur gedung.

- **Para pemilik bangunan** harus memainkan peran mereka yang sangat penting dengan memahami pentingnya ketahanan gempa dan memastikan bahwa fitur-fitur seismik menjadi bagian dari desain dan konstruksi baru.

- **Para manajer pelaksana** dapat meningkatkan ketahanan gempa secara tidak langsung pada bangunan-bangunan baru dengan memastikan kualitas material dan keahlian pekerja.

- **Para perencana struktur** harus mengerti bahwa desain mereka berpengaruh pada ketahanan gempa sebuah gedung. Dari isu-isu sederhana, seperti penempatan dinding atau jendela, sampai pada isu-isu konfigurasi bangunan yang kompleks, para perencana struktur perlu menyadari bahwa setiap keputusan mereka berdampak pada kinerja seismik bangunan tersebut.

- **Para insinyur** mempunyai peranan penting dalam meningkatkan ketahanan gempa pada bangunan dengan struktur rangka beton bertulang dan dalam memperhatikan secara seksama pada isu-isu desain dan konstruksi yang telah dipaparkan dalam buku ini.

- **Instansi-instansi pemerintah** seperti dinas pengawas bangunan, dinas tata kota, dan dinas-dinas terkait lainnya, perlu mendorong penggunaan tata cara perencanaan dan pelaksanaan pembangunan gedung dan standar desain gempa dalam komunitas dan jajaran masing-masing. Peranan ini penting. Tanpa dorongan dari

para pemegang otoritas, praktik desain ketahanan gempa tidak dapat diterapkan secara seragam. Pemilik yang berpendidikan dan insinyur yang berkualitas dapat bekerja sama dalam melakukan praktik seperti ini pada desain tertentu, namun instansi pemerintah memiliki kesempatan, lebih tepatnya bertanggung jawab untuk menghimbau bahwa praktik-praktik itu diperlukan untuk seluruh komunitas yang bersangkutan dan tidak hanya bangunan per bangunan.

Penutup

Seiring dengan semakin urbannya negara-negara berkembang, resiko gempa akan meningkat drastis kecuali kalau dilakukan perubahan dasar dalam kebijakan, peraturan, desain dan pelaksanaan konstruksi. Upaya melakukan perubahan-perubahan ini memang membutuhkan waktu yang lama. Hal ini menjadi tanggung jawab para pemangku kepentingan yang terlibat dalam proses desain dan konstruksi untuk mendukung desain bangunan dan pelaksanaan konstruksi yang aman.

Akhirnya, masalah konstruksi struktur rangka beton bertulang dengan dinding pengisi dari bata bukan hanya menjadi masalah teknik. Para penulis yakin bahwa komunitas global akan mendapatkan keuntungan dari desain dan proses konstruksi yang dipaparkan di dalam buku ini, dan jumlah korban jiwa dan kerugian akibat bangunan yang rusak dapat dikurangi ketika terjadi gempa pada masa yang akan datang

8. Daftar Pustaka

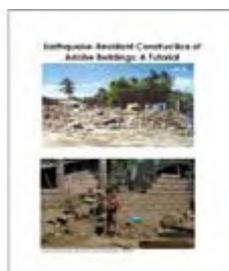
- American Concrete Institute, (2002), **Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures**, ACI 440.2R-02, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA.
- American Society of Civil Engineers/Structural Engineering Institute, (2006), **Seismic Rehabilitation of Existing Buildings**, ASCE/SEI 41-06. American Society of Civil Engineers, Washington DC.
- American Society of Civil Engineers/Structural Engineering Institute, (2003), **Seismic Evaluation of Existing Buildings**, ASCE Standard No. 31-03. American Society of Civil Engineers, Washington DC, 444 pages.
- Anthoine, A. and Taucer, F., (2006), **Seismic Assessment of a Reinforced Concrete Block Masonry House. PROARES Project in El Salvador**, European Laboratory for Structural Assessment, Joint Research Centre of the European Commission, EUR22324 EN, Ispra, Italy.
- Applied Technology Council, (1989), **Procedures for Postearthquake Safety Evaluation of Buildings, ATC-20**, Applied Technology Council, Redwood City, California.
- Applied Technology Council and SEAOC Joint Venture, (1999), **Built To Resist Earthquakes. ATC/SEAOC Training Curriculum: The Path to Quality Seismic Design and Construction**. Applied Technology Council, Redwood City, California.
- Blondet, M. ed, (2005), **Construction and Maintenance of Masonry Houses – For Masons and Craftsmen**, Pontificia Universidad Catolica del Peru, Lima, Peru, (www.world-housing.net).
- Bostenaru, M.D., (2004), “Early Reinforced Concrete Frame Condominium Building with Masonry Infill Walls Designed for Gravity Loads only,” WHE Report 96 (Romania), **World Housing Encyclopedia** (www.world-housing.net), Earthquake Engineering Research Institute and International Association for Earthquake Engineering.
- Bostenaru, M, and Sandu, I. (2002), “Reinforced concrete cast-in situ shear wall buildings “OD”-type, with “fagure” plan”, WHE Report 78 (Romania), **World Housing Encyclopedia** (www.world-housing.net). Earthquake Engineering Research Institute and International Association for Earthquake Engineering.
- Brzev, S., (2007), **Confined Masonry Construction: A Guide for Architects and Builders**, National Information Center for Earthquake Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur, India.
- EERI, (2000), **Annotated Slide Collection, CD Publication**, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.
- EERI, (2001). **Annotated Images from the Bhuj, India Earthquake of January 26, 2001 (CD)**, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.
- EERI/IAEE, (2000), **World Housing Encyclopedia** (www.world-housing.net). Earthquake Engineering Research Institute and the International Association for Earthquake Engineering.
- Englekirk, R.E., (2003), **Seismic Design of Reinforced and Precast Concrete Buildings**, John Wiley & Sons, Inc., U.S.A.
- Erdem, I., Akyuz, U., and Ozcebe, G., (2004), “Experimental and Analytical Studies on the Strengthening of RC Frames”, **Proceedings, 13th World Conference on Earthquake Engineering**, Vancouver, Canada, Paper No. 673.
- Faison, H., Comartin, C., and Elwood, K. (2004), “Reinforced Concrete Moment Frame Building without Seismic Details” WHE Report 111 (U.S.A.), **World Housing Encyclopedia** (www.world-housing.net). Earthquake Engineering Research Institute and International Association for Earthquake Engineering.
- Federal Emergency Management Agency, (2000), **Prestandard and Commentary for the**

- Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356).** Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., USA.
- Federal Emergency Management Agency, (1999a), **Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings- Basic Procedures Manual (FEMA 306)**, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- Federal Emergency Management Agency, (1999b), **Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings-Technical Resources (FEMA 307)**, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- Federal Emergency Management Agency, (1999c), **Repair of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings (FEMA 308)**, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- Federal Emergency Management Agency, (1998), **Handbook for the Seismic Evaluation of Buildings – A Prestandard (FEMA 310)**, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C. (currently ASCE Standard 31-02).
- Federal Emergency Management Agency, (1994), **Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage (FEMA 74)**, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., USA, (<http://www.fema.gov/plan/prevent/earthquake/homeowner.s.htm>).
- Federal Emergency Management Agency, (1988), **Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook (FEMA 154)**, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., USA.
- Gulkan, P., Ascheim, M. and Spence, R., (2002), “Reinforced concrete frame building with masonry infills,” WHE Report 64 (Turkey), **World Housing Encyclopedia** (www.world-housing.net), Earthquake Engineering Research Institute and International Association for Earthquake Engineering.
- International Code Council, 2006. “Appendix Chapter A5: Earthquake Hazard Reduction in Existing Concrete Buildings and Concrete with Masonry Infill Buildings”, **2006 Edition of the International Existing Building Code (IEBC)**. Available for purchase at www.iccsafe.org.
- ISIS, (2001), **Strengthening Reinforced Concrete Structures With Externally-Bonded Fibre Reinforced Polymers**, Intelligent Sensing for Innovative Structures (ISIS) Canada Research Network, Winnipeg, Manitoba.
- ISIS, (2003), **An Introduction to FRP Composites for Construction**, ISIS Educational Module No. 2, Intelligent Sensing for Innovative Structures (ISIS) Canada Research Network, Winnipeg, Manitoba (free download from <http://www.isiscanada.com/education/education.html>).
- ISIS, (2004), **An Introduction to FRP Strengthening of Concrete Structures**, ISIS Educational Module No. 4, Intelligent Sensing for Innovative Structures (ISIS) Canada Research Network, Winnipeg, Manitoba (free download from <http://www.isiscanada.com/education/education.html>).
- Jaiswal, K., Sinha, R., Goyal, A., (2003), “Reinforced Concrete Frame Building with Masonry Infill Walls Designed for Gravity Loads”. WHE Report 19 (India), **World Housing Encyclopedia** (www.world-housing.net). Earthquake Engineering Research Institute and International Association for Earthquake Engineering.
- Levtchitch, V., (2002), “Gravity designed reinforced concrete frame buildings with unreinforced masonry infill walls,” WHE Report 13 (Cyprus), **World Housing Encyclopedia** (www.world-housing.net), Earthquake Engineering Research Institute and International Association for Earthquake Engineering.
- MacGregor, J.G. and Wight, J.K., (2005), **Reinforced Concrete Mechanics and Design, Fourth Edition**, Pearson Education Inc., Upper Saddle River, NJ, U.S.A.
- Mejia, L., (2002), “Gravity Concrete Frame Building (predating seismic codes),” WHE Report 11 (Colombia), **World Housing Encyclopedia** (www.world-housing.net), Earthquake Engineering Research Institute and International Association for Earthquake Engineering.

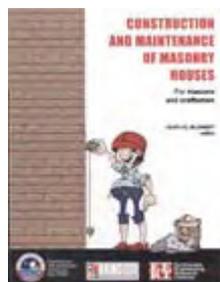
- Moroni, O. and Gomez, C., (2002a), "Concrete shear wall building" WHE Report 4 (Chile), **World Housing Encyclopedia** (www.world-housing.net). Earthquake Engineering Research Institute and International Association for Earthquake Engineering.
- Moroni, O. and Gomez, C., (2002b), "Concrete frame and shear wall building". WHE Report 6 (Chile), **World Housing Encyclopedia** (www.world-housing.net). Earthquake Engineering Research Institute and International Association for Earthquake Engineering.
- Murty, C.V.R., (2005), **IITK-BMTPC Earthquake Tips – Learning Earthquake Design and Construction**, National Information Center of Earthquake Engineering, IIT Kanpur, India, September.
- Murty, C.V.R., Charleson, A.W., and Sanyal, S.A., (2006), **Earthquake Design Concepts for Teachers of Architecture Colleges**, National Information Center of Earthquake Engineering, IIT Kanpur, India.
- Naeim, F., (2001), **The Seismic Design Handbook, Second Edition**, Kluwer Academic Publishers, Boston MA.
- Newman, A., (2001), **Structural Renovation of Buildings - Methods, Details and Design Examples**, McGraw-Hill Professional Engineering.
- NRC, (1995), **Guideline for Seismic Upgrading of Building Structures**, Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada, Ottawa.
- Ozcebe, G. et al., (2004), "Rehabilitation of Existing Reinforced Concrete Structures Using CFRP Fabrics", **Proceedings, 13th World Conference on Earthquake Engineering**, Vancouver, Canada, Paper No. 1393.
- Pao, J., and Brzev, S., (2002), "Concrete shear wall highrise buildings". WHE Report 79 (Canada), **World Housing Encyclopedia** (www.world-housing.net). Earthquake Engineering Research Institute and International Association for Earthquake Engineering.
- Paulay, T., and Priestley, M.J.N., (1992), **Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings**, John Wiley & Sons, USA.
- Penelis, G.G., and Kappos, A.J., (1997), **Earthquake Resistant Concrete Structures**, E&FN SPON, U.K.
- Rodriguez, M. and Jarque, F.G., (2005), "Reinforced concrete multistory buildings", WHE Report 115 (Mexico), **World Housing Encyclopedia** (www.world-housing.net). Earthquake Engineering Research Institute and International Association for Earthquake Engineering.
- UNIDO, (1983), **Repair and Strengthening of Reinforced Concrete, Stone and Brick Masonry Buildings**, Building Construction Under Seismic Conditions in the Balkan Region, UNDP/UNIDO Project RER/79/015, Vol. 5, Vienna, Austria.
- Yakut, A. (2004), "Reinforced Concrete Frame Construction", **World Housing Encyclopedia – Summary Publication 2004**, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, pp.9-1 to 9-8.
- Yakut, A., and Gulkan, P., (2003), "Tunnel Form Building", WHE Report 101 (Turkey), **World Housing Encyclopedia** (www.world-housing.net). Earthquake Engineering Research Institute and International Association for Earthquake Engineering.
- Yao, G.C., and Sheu, M.S., (2002), "Street-front building with arcade at the first floor (contemporary construction)", WHE Report 62 (Taiwan), **World Housing Encyclopedia** (www.world-housing.net). Earthquake Engineering Research Institute and International Association for Earthquake Engineering.

WHE TUTORIALS

developed by volunteers in the World Housing Encyclopedia project of EERI and IAEE available for free download at <http://www.world-housing.net/Tutorials/Tutorial.asp> or hard copies can be purchased from EERI online bookstore at www.eeri.org



Earthquake-Resistant Construction of Adobe Buildings (available in Spanish and English) EERI Publication # WHE-2006-01 (published on the web in 2003; hard copy in 2006, USD \$10)



Construction and Maintenance of Masonry Dwellings for Masons and Builders (available in Spanish and English) EERI Publication # WHE-2006-02 (published on the web in 2005; hard copy in 2006, USD \$15)

OTHER WHE PUBLICATIONS



World Housing Encyclopedia summary publication 2004 (Technical Editors: Svetlana Brzev, Marjorie Greene). Includes one page summary of all WHE reports as of August 2004, as well as overview of construction technologies represented on the WHE website. EERI Publication # WHE-2004-01, USD \$25 with CD-ROM.

Sugeng Wijanto. Saat ini sebagai tenaga pengajar di Fakultas Teknik Sipil Universitas Trisakti untuk mata kuliah Rekayasa Gempa dan Struktur Beton Bertulang, serta dosen tamu Program Pasca Sarjana Magister Teknik Sipil di Universitas Kristen Petra untuk mata kuliah Beton Pracetak/Prategang. Menyelesaikan studi S-1 Teknik Sipil di Universitas Trisakti pada tahun 1985, studi S-2 (M.Eng.) di University of Canterbury, New Zealand pada tahun 1989 dan studi S-3 (Ph.D.) di University of Canterbury, New Zealand pada tahun 2008.

Pada tahun 1989 mendirikan konsultan perencana struktur PT. Gistama Intisemesta dan menjabat sebagai Direktur Utama hingga saat ini. Banyak menangani jasa konsultasi struktur bangunan bertingkat rendah maupun bertingkat tinggi di daerah rawan gempa. Saat ini menjadi salah satu *Editorial Board Member World Housing Encyclopedia* dan anggota komite penyusun RSNI : Beban Desain Minimum Untuk Gedung dan Struktur Lain. Ia juga aktif menulis di berbagai seminar teknik sipil baik di dalam negeri maupun di luar negeri, serta menjadi anggota dari beberapa asosiasi teknik sipil di beberapa negara.

Takim Andriono. menyelesaikan studi S-1 Teknik Sipil di Universitas Kristen Petra pada tahun 1984. Ia kemudian memperoleh kesempatan melanjutkan studi di University of Canterbury, New Zealand untuk meraih gelar S-2 (M.Eng.) dan S-3 (Ph.D.) masing-masing diselesaikannya pada tahun 1986 dan 1990. Saat ini ia tercatat sebagai pengajar pada Program Pasca Sarjana Universitas Kristen Petra dan salah seorang *Editorial Board Member World Housing Encyclopedia*.

Sejak 1990 hingga sekarang ia juga menjadi salah seorang pimpinan PT Gistama Intisemesta, sebuah perusahaan konsultan perencana struktur yang banyak menangani perencanaan bangunan di daerah rawan gempa. Di samping itu ia aktif terlibat dalam berbagai kegiatan pelayanan masyarakat untuk memajukan kualitas pendidikan dan SDM di Indonesia, antara lain melalui program pengembangan profesionalisme guru dan kepala sekolah di berbagai daerah di Indonesia.