

EVALUASI CEPAT SISTEM RANGKA PEMIKUL MOMEN TAHAN GEMPA

Rachmat Purwono¹, Tavio²

1. Pendahuluan

Tertarik pada Kata Pengantar Ketua Haki di *Newsletter* HAKI Volume 12, terbit bulan Januari 2007 [1] yang lalu, yang menyatakan "...melihat keruntuhan yang terjadi pada gedung-gedung di Yogyakarta saat gempa Mei 2006, seluruh tatanan yang ada ternyata belum mampu menghadirkan konstruksi tahan gempa yang kita inginkan. Pada tahun 2007 HAKI akan memfokuskan diri pada berbagai program yang bertujuan membantu masyarakat, khususnya para pelaku teknis bangunan untuk lebih memahami teknik tahan gempa dan mampu menghadirkan bangunan tahan gempa di Indonesia", maka tulisan ini menyajikan suatu *Checklist* evaluasi cepat salah satu sistem bangunan tahan gempa yang banyak dipakai di Indonesia, yaitu Sistem Rangka Pemikul Momen (SRPM), untuk menjawab apakah SRPM itu sudah dapat dikatakan tahan gempa. Sistem evaluasi ini diambil dari FEMA 310 [2] dan 356 [3] yang aslinya bertujuan untuk mengevaluasi apakah suatu bangunan itu setelah terkena gempa resiko menengah atau kuat dapat langsung dihuni kembali dan aman bagi jiwa penghuninya. Evaluasi FEMA 310 [2] dan 356 [3] itu setelah diadakan modifikasi seperlunya dipandang cocok pula untuk dipakai mengevaluasi bangunan SRPM baru yang sedang dibangun, yaitu dengan mengadakan evaluasi cepat apakah syarat dan perangkat-perangkat yang dibutuhkan oleh sistem dan komponen struktur tahan gempa sudah terdapat dalam gambar atau terlihat pada kerangka tulangan yang sedang terpasang. Makalah ini membatasi pada penilaian ketahanan sistem struktur beton terhadap beban gempa, belum mencakup penilaian pada bagian bangunan yang bersifat non-struktural.

2. Manfaat Evaluasi

Tulisan ini ditujukan pada para pelaku industri konstruksi beton bertulang, yaitu perencana, pengawas konstruksi bangunan dan praktisi atau pelaksana struktur beton bertulang tahan gempa, khususnya SRPM, untuk bersama-sama berpartisipasi dalam mewujudkan bangunan tahan gempa itu. Dengan memperhatikan atau mempelajari gambar-gambar pelaksanaan, *Checklist* di Tabel 1 dan 2 harus diisi seluruhnya oleh masing-masing pelaku tersebut di atas dengan melingkari pernyataan OK atau NG. OK menunjukkan kriteria dalam *Checklist* sudah dipenuhi dan NG (*No Good*) menyatakan pendapat sebaliknya. Pernyataan dalam *Checklist* ini merupakan masukan yang berharga bagi Perencana SRPM tersebut.

Walaupun tiap kriteria *Checklist* tersedia penjelasan singkat, namun strategi perbaikan dari *item* NG tidak termasuk dalam tulisan ini. Selanjutnya, untuk kelancaran pengisian *Checklist* ini, diharapkan isi SNI 03-1726-2002 [4] dan SNI 03-2847-2002 [5] sudah

¹ Dosen Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya

² Dosen Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya

cukup dipahami dan semua dokumen perhitungan, spesifikasi teknik, dan gambar pelaksanaan bangunan telah terkumpul dan selesai dipelajari.

2.1. SRPM Tahan Gempa

SRPM ini mengembangkan kemampuan menahan beban gempa melalui kuat lentur dari komponen-komponen struktur balok dan kolom. Menurut SNI 03-2847-2002 [5] Pasal 23, SRPM yang tahan terhadap beban gempa resiko tinggi dan menengah, harus berturut-turut didesain yang memenuhi persyaratan desain SRPMK dan SRPMM, yaitu suatu rangka struktur dengan pendetailan yang secukupnya sehingga dapat terbentuk sendi-sendi plastis di ujung-ujung balok dan kolom yang akan menyerap energi dan memungkinkan rangka tetap berdiri pada penyimpangan (*displacement*) yang jauh lebih besar dari kemampuan berdasarkan desain elastis. Karena itu, persyaratan *fundamental* dalam *Checklist* untuk SRPMK atau SRPMM yang daktail adalah:

- a. Sedapatnya menjaga keteraturan sistem struktur.
- b. Cukup kuat menahan gempa normatif yang ditentukan berdasarkan kemampuan disipasi energi.
- c. Cukup kaku untuk membatasi penyimpangan (*displacement*).
- d. Hubungan balok-kolom cukup daktail menahan rotasi yang terjadi.
- e. Komponen-komponen balok dan kolom mampu membentuk sendi plastis tanpa mengurangi kekuatannya yang berarti.
- f. Balok-balok mendahului pembentukan sendi-sendi plastis yang tersebar di seluruh sistem struktur sebelum terjadi di kolom-kolom (konsep kolom kuat-balok lemah).
- g. Tidak ada kolom yang lebih lemah yang akan menyebabkan pembentukan sendi-sendi plastis di ujung atas dan bawah pada kolom-kolom lain di tingkat itu yang menjurus pada keruntuhan seluruh struktur.
- h. Mencegah pembentukan "kolom pendek" tak terduga yang menjurus pada kegagalan getas kolom.

Kriteria di atas akan dicantumkan lebih mendetail di *Checklist* bernomor 1 sampai 30.

2.2. Checklist Kriteria SRPMK yang Tahan Gempa

Checklist ini harus dilakukan pada tiap struktur SRPM yang akan dibangun dan yang berlokasi di daerah gempa beresiko menengah dan/atau resiko tinggi. Patut dicatat, perencana yang menyatakan struktur telah didesain sesuai persyaratan SRPMK sesungguhnya sudah cukup memberi garansi atas *performance* bangunan terhadap *life safety*, namun demikian instansi pemberi ijin bangunan dan pengawas pembangunan, dipandang bijaksana bersikap hati-hati sebelum ikut berpendapat bahwa semua kriteria yang menjamin struktur benar-benar tahan gempa telah dievaluasi secara seksama.

Sebagaimana diharapkan, tiap pernyataan hasil evaluasi kriteria dalam *Checklist* ini harus dilingkari tanda OK atau NG. Pernyataan yang melingkari NG berarti pendapat bahwa kriteria yang dimaksud diperkirakan belum cukup memadai atau memenuhi syarat yang tercantum dalam kolom kriteria *life safety*. Penjelasan latar belakang penetapan kriteria ini sesuai FEMA 310 dan/atau SNI 2847 dan 1726 diberikan di Butir 5. Informasi NG ini dimaksud untuk disampaikan pada perencana guna memperoleh evaluasi lebih lanjut. Ada dua kelompok *Checklist* untuk evaluasi SRPM. Yang pertama adalah *Checklist* Dasar yang terdiri dari Sistem Bangunan, Sistem Penahan Gaya Lateral, dan Hubungan Kolom-Fondasi; sedangkan yang kedua adalah *Checklist*

Pelengkap yang mengevaluasi kelengkapan dan keberadaan pendetailan komponen-komponen struktur. *Checklist* Dasar harus dilengkapi sebelum melengkapi *Checklist* Pelengkap. *Checklist* Dasar dan Pelengkap yang dimaksud masing-masing diberikan dalam Tabel 1 dan 2.

Tabel 1 Checklist dasar

SISTEM BANGUNAN			
Checklist #	Kriteria Keamanan Jiwa (<i>Life Safety</i>)	Hasil Evaluasi	
1	ALUR BEBAN: Struktur harus mempunyai sebuah alur beban untuk pengaruh gaya gempa dari segala arah horisontal yang berfungsi untuk menyalurkan gaya inersia dari masa bangunan ke fondasi (lihat Butir 5.1.1).	OK	NG
2	BANGUNAN BERSEBELAHAN: Bangunan bersebelahan tidak boleh berada di dekat bangunan yang dievaluasi dengan jarak kurang dari 4% tinggi bangunan (lihat Butir 5.1.2).	OK	NG
3	MESANIN: Tingkat mesanin interior harus diperkaku (<i>braced</i>) dan bebas dari struktur utama, atau harus diangkur ke komponen struktur utama penahan gaya lateral (lihat Butir 5.1.3).	OK	NG
4	TINGKAT LEMAH: Kekuatan sistem penahan gaya lateral di semua tingkat harus tidak kurang dari 80% kekuatan di tingkat yang berdekatan di atas atau di bawahnya (lihat Butir 5.1.4).	OK	NG
5	TINGKAT LUNAK: Kekakuan sistem penahan gaya lateral di semua tingkat harus tidak kurang dari 70% kekakuan di tingkat yang berdekatan di atas atau di bawahnya atau kurang dari 80% kekakuan rata-rata tiga tingkat di atas atau di bawahnya (lihat Butir 5.1.5).	OK	NG
6	GEOMETRI: Perubahan dimensi horisontal dari sistem penahan gaya lateral tidak boleh ada yang lebih dari 30% di suatu tingkat relatif terhadap tingkat-tingkat yang berdekatan, kecuali untuk griya tawang (<i>penthouse</i>) satu tingkat (lihat Butir 5.1.6).	OK	NG
7	KETIDAKSINAMBUNGAN VERTIKAL: Semua komponen struktur vertikal pada sistem penahan gaya lateral harus menerus ke fondasi (lihat Butir 5.1.7).	OK	NG
8	MASA: Perubahan masa efektif harus tidak lebih dari 50% dari suatu tingkat ke tingkat berikutnya (lihat Butir 5.1.8).	OK	NG
9	PUNTIR: Jarak antara pusat masa tingkat dan pusat kekakuan tingkat harus kurang dari 20% lebar bangunan dalam kedua arah dimensi denah bangunan (lihat Butir 5.1.9).	OK	NG
SISTEM PENAHAN GAYA LATERAL			
Checklist #	Kriteria Keamanan Jiwa (<i>Life Safety</i>)	Hasil Evaluasi	
10	REDUNDANSI: Jumlah lajur rangka momen dalam setiap	OK	NG

	arah utama harus lebih besar dari atau sama dengan 2. Jumlah bentang rangka momen dalam setiap lajur harus lebih besar dari atau sama dengan 2 (lihat Butir 5.1.10).		
11	DINDING YANG BERPENGARUH: Semua dinding pengisi dalam rangka momen harus terpisah dari komponen struktur (lihat Butir 5.1.11).	OK	NG
12	PEMERIKSAAN TEGANGAN GESER: Tegangan geser dalam kolom beton dihitung dengan prosedur pemeriksaan cepat (FEMA 310, Sect. 3.5.3.2) harus kurang dari 0,69 MPa atau $0,166\sqrt{f'_c}$ (lihat Butir 5.1.12).	OK	NG
13	PEMERIKSAAN TEGANGAN AKSIAL: Tegangan aksial akibat beban gravitasi dalam kolom yang dikenai oleh gaya guling harus kurang dari $0,10f'_c$. Sebagai alternatif, tegangan aksial akibat gaya guling saja dihitung dengan prosedur pemeriksaan cepat (FEMA 310, Sect. 3.5.3.6) harus kurang dari $0,30f'_c$ (lihat Butir 5.1.13).	OK	NG
14	RANGKA LANTAI DATAR: Dalam wilayah gempa dengan resiko gempa tinggi, sistem penahan gaya lateral harus bukan merupakan rangka yang terdiri dari kolom dan lantai/pelat datar tanpa balok (lihat Butir 5.1.14).	OK	NG
15	KOMPONEN STRUKTUR PRATEGANG: Rangka penahan gaya lateral harus tidak melibatkan komponen struktur prategang atau pasca tarik (lihat Butir 5.1.15).	OK	NG
Hubungan Kolom-Fondasi			
Checklist #	Kriteria Keamanan Jiwa (Life Safety)	Hasil Evaluasi	
16	PENGANGKURAN KOLOM BETON: Semua tulangan kolom beton harus dilengkapi panjang penyaluran (l_d) ke dalam fondasi dan l_d tersebut harus dapat mengembangkan kapasitas tarik kolom (lihat Butir 5.1.16).	OK	NG

Tabel 2 Checklist Pelengkap

Sistem Penahan Gaya Lateral			
Checklist #	Kriteria Keamanan Jiwa (Life Safety)	Hasil Evaluasi	
17	KOLOM PENDEK TERKEKANG: Rasio tinggi/dalam (h_e/d) kolom di suatu tingkat harus tidak kurang dari 50% rasio tinggi/dalam (h_e/d) nominal kolom tipikal di tingkat tersebut (lihat Butir 5.2.1).	OK	NG
18	TIDAK ADA KEGAGALAN GESER: Kuat geser komponen struktur rangka harus dapat mengembangkan kuat lebih momen di ujung atas dan bawah kolom, tampak tulangan transversal yang rapat di bagian tersebut (lihat Butir 5.2.2).	OK	NG
19	KOLOM KUAT/BALOK LEMAH: Jumlah kuat nominal momen kolom yang terkecil harus 20% lebih besar dari jumlah kuat nominal momen balok di muka hubungan balok-kolom rangka (lihat Butir 5.2.3).	OK	NG

20	TULANGAN BALOK: Paling sedikit dua batang tulangan atas longitudinal dan dua batang tulangan bawah longitudinal harus menerus sepanjang panjang setiap balok rangka. Paling sedikit 25% batang tulangan longitudinal di muka hubungan balok-kolom baik untuk momen positif ataupun negatif harus menerus sepanjang panjang komponen struktur (lihat Butir 5.2.4).	OK	NG
21	SAMBUNGAN LEWATAN TULANGAN KOLOM: Semua panjang sambungan lewatan batang tulangan kolom harus lebih besar dari $50d_b$ dan harus dilindungi oleh pengikat/sengkang tertutup dengan spasi sama dengan atau kurang dari $8d_b$. Sambungan lewatan tulangan kolom hanya boleh ditempatkan di tengah tinggi kolom (lihat Butir 5.2.5).	OK	NG
22	LOKASI SAMBUNGAN LEWATAN TULANGAN BALOK: Sambungan lewatan untuk penulangan balok longitudinal harus ditempatkan $\geq l_b/4$ dari muka hubungan balok-kolom dan tidak boleh ditempatkan di sekitar lokasi yang berpotensi terjadinya sendi plastis (lihat Butir 5.2.6).	OK	NG
23	SPASI SENGGANG/PENGIKAT KOLOM: Kolom rangka harus mempunyai sengkang berkait gempa (dan pengikat silang seperlunya) dengan spasi sama dengan atau kurang dari $d/4$ sepanjang panjangnya dan sengkang tertutup dengan spasi sama dengan atau kurang dari $6d_b$ di semua lokasi yang berpotensi terjadinya sendi plastis (lihat Butir 5.2.7).	OK	NG
24	SPASI SENGGANG BALOK: Semua balok harus mempunyai sengkang dengan spasi sama dengan atau kurang dari $d/2$ sepanjang panjangnya. Di lokasi yang berpotensi terjadinya sendi plastis sengkang tertutup pertama harus dipasang tidak lebih dari 50 mm dari muka kolom, dan sisanya harus dipasang dengan spasi sama dengan atau kurang dari minimum sebesar $8d_b$ atau $d/4$ (lihat Butir 5.2.8).	OK	NG
25	PENULANGAN HUBUNGAN BALOK-KOLOM: Hubungan balok-kolom harus mempunyai sengkang/pengikat tertutup dengan spasi sama dengan atau kurang dari $6d_b$ (lihat Butir 5.2.9).	OK	NG
26	EKSENTRISITAS HUBUNGAN BALOK-KOLOM: Eksentrisitas tidak boleh lebih besar dari 20% dimensi penampang kolom yang terkecil antara garis pusat balok dan kolom (lihat Butir 5.2.10).	OK	NG
27	SENGKANG DAN PENGIKAT: Sengkang/pengikat yang dipasang di lokasi sendi plastis balok dan kolom harus berupa sengkang/pengikat tertutup dengan kait gempa. Sengkang balok dan pengikat kolom tersebut harus diangkur ke dalam inti komponen struktur dengan kait sebesar 135° atau lebih. Pengikat silang yang dipasang berurutan harus ditempatkan secara berselang-seling berdasarkan bentuk kait ujungnya (lihat Butir 5.2.11).	OK	NG
28	KOMPATIBILITAS SIMPANGAN: Komponen struktur yang bukan merupakan bagian sistem penahan gaya lateral tetap harus mampu menahan beban gravitasi dan daktail terhadap	OK	NG

	simpangan sistem penahan gaya lateral akibat gempa (lihat Butir 5.2.12).		
29	MUTU TULANGAN MEMANJANG: Mutu tulangan 300 MPa dan 400 MPa boleh digunakan dalam komponen struktur sistem penahan gaya lateral bila (a) Kuat leleh pengujian pabrik tidak melampaui f_y yang ditetapkan (<i>specified</i>) lebih dari 120 MPa, (b) Rasio kuat tarik aktual terhadap kuat leleh aktual $\geq 1,25$ (lihat Butir 5.2.13).	OK	NG
Hubungan Pancang-Poer			
Checklist #	Kriteria Keamanan Jiwa (<i>Life Safety</i>)	Hasil Evaluasi	
30	BEBAN LATERAL DI POER: <i>Poer</i> harus mempunyai tulangan atas, ujung pancang harus diberi cukup pengekangan, kemudian tulangan pancang harus diangkur ke dalam <i>poer</i> , sehingga mampu mencapai tegangan tarik lelehnya oleh gaya lateral/gempa siklik (lihat Butir 5.2.14).	OK	NG

3. Penjelasan Kriteria SRPM yang Tahan Gempa

Dari evaluasi *Checklist* di atas, informasi NG harus disampaikan kepada perencana struktur untuk memperoleh perhatian/evaluasi lebih lanjut. Adapun penjelasan singkat kriteria setiap butir dalam *Checklist* di atas sesuai FEMA 310 *Chapter 4* diuraikan dalam butir-butir berikut ini.

3.1. Penjelasan *Checklist* Dasar

Penjelasan *Checklist* Kriteria Dasar yang terdiri dari 9 butir untuk Sistem Bangunan (Butir 5.1.1 sampai 5.1.9), 6 butir untuk Sistem Penahan Beban Lateral (Butir 5.1.10 sampai 5.1.15), dan 1 butir untuk Hubungan Kolom-Fondasi (Butir 5.1.16) diberikan dalam sub-sub butir berikut ini.

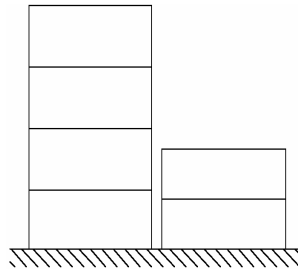
3.1.1 Penjelasan *Checklist* #1: Alur Beban

Alur beban yang umum adalah sebagai berikut: gaya gempa yang menyeluruh pada bangunan diteruskan melalui sambungan-sambungan struktur ke diafragma horisontal; diafragma mendistribusikan gaya-gaya ini ke elemen-elemen penahan gaya lateral vertikal seperti dinding geser dan rangka; elemen-elemen vertikal mentransfer gaya-gaya ke dalam fondasi; dan fondasi mentransfer gaya-gaya ke dalam tanah yang mendukungnya. Jika terdapat ketidaksinambungan dalam alur beban, bangunan tersebut tidak mampu untuk menahan gaya-gaya gempa tanpa memperdulikan kuat elemen-elemen yang ada. Perencana harus waspada terhadap adanya jeda dalam alur beban. Alur beban yang lengkap merupakan sebuah persyaratan dasar untuk semua bangunan. Identifikasi alur beban yang lengkap merupakan langkah pertama yang diperlukan.

3.1.2 Penjelasan *Checklist* #2: Bangunan Bersebelahan

Ketentuan ini juga tercantum di SNI 1726 Pasal 8.2.3. Bangunan seringkali dibangun sampai dengan garis batas lahan untuk memperoleh luas denah yang maksimum, dan

umumnya bangunan dirancang seakan-akan bangunan yang bersebelahan tidak pernah ada. Sebagai akibatnya, bangunan-bangunan tersebut akan bertabrakan satu sama lain, atau berbenturan, pada saat terjadi gempa. Benturan bangunan dapat merubah respons dinamis kedua bangunan tersebut, dan memberikan beban tambahan inersia pada kedua struktur. Bila bangunan mempunyai tinggi yang berbeda, bangunan yang lebih rendah dapat bertindak sebagai penyangga bagi bangunan yang lebih tinggi. Bangunan yang lebih rendah menerima beban yang tak terduga sementara bangunan yang lebih tinggi menderita dari ketidaksinambungan kekakuan yang besar yang merubah respons dinamisnya (lihat Gambar 1). Karena kedua bangunan dirancang untuk kondisi ini, maka ada potensi terjadinya kerusakan yang parah, atau bahkan keruntuhan.



Gambar 1 Bangunan dengan tinggi berbeda

3.1.3 Penjelasan Checklist #3: Mesanin

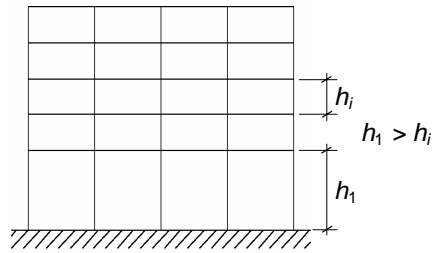
Mesanin pada umumnya mempunyai kelemahan tidak sebagai suatu sistem penahan gaya lateral. Mesanin seringkali ditambahkan oleh pemilik bangunan. Mesanin yang bergoyang (*unbraced*) berpotensi terhadap bahaya keruntuhan, dan harus diperiksa terhadap stabilitasnya sesuai SNI 2847 Pasal 23.9.

3.1.4 Penjelasan Checklist #4: Tingkat Lemah

Kuat tingkat adalah kuat total semua elemen penahan gaya lateral di suatu tingkat tertentu untuk arah yang ditinjau. Jika kolom telah dikendalikan oleh lentur, kuat geser merupakan geser yang sesuai dengan kuat lenturnya. Tingkat lemah biasanya dijumpai bilamana terdapat ketidaksinambungan, atau bilamana ukuran komponen struktur atau tulangan telah direduksi. Oleh karena itu, perlu untuk menghitung kuat semua tingkat serta membandingkannya. Tingkat lemah akan mengakibatkan terjadinya konsentrasi perilaku inelastis yang dapat mengakibatkan keruntuhan sebagian atau total tingkat tersebut.

3.1.5 Penjelasan Checklist #5: Tingkat Lunak

Kondisi ini biasanya terjadi pada bangunan komersial dengan bagian depan yang terbuka di depan toko lantai dasar, dan hotel atau bangunan perkantoran dengan sebagian tingkat pertama yang tinggi. Gambar 2 menunjukkan sebuah contoh tingkat tinggi di lantai dasar. Kasus seperti itu tidak selalu mengakibatkan tingkat lunak karena kolom yang tinggi tersebut mungkin telah dirancang dengan kekakuan yang sesuai, tetapi kolom-kolom tersebut mungkin merupakan tingkat lunak jika dirancang tanpa mempertimbangkan simpangan antar tingkatnya. Kondisi ini dapat berpotensi mengakibatkan terjadinya keruntuhan.

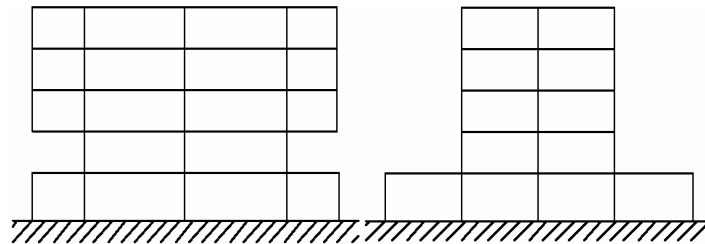


Gambar 2 Tingkat tinggi

Gambar 2 –

3.1.6 Penjelasan *Checklist* #6: Geometri

Ketidakteraturan geometri biasanya ditentukan dengan pemeriksaan variasi dimensi antar tingkat sistem penahan gaya lateral (lihat Gambar 3). Sebuah bangunan dengan tingkat-tingkat atas mundur dari permukaan terluar struktur merupakan contoh yang umum. Contoh lainnya adalah sebuah tingkat pada struktur tingkat tinggi yang mundur ke dalam karena alasan arsitektural. Harus dicatat bahwa kekuatiran akan ketidakteraturan adalah dalam hal dimensi sistem penahan gaya lateral yang menyebabkan konsentrasi pembebanan yang tidak dirancang pada komponen struktur tertentu.



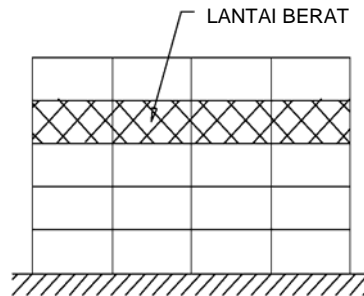
Gambar 3 Ketidakteraturan geometri

3.1.7 Penjelasan *Checklist* #7: Ketidaksinambungan Vertikal

Ketidaksinambungan vertikal biasanya ditentukan dengan pemeriksaan secara visual. Contoh yang paling umum adalah ketidaksinambungan dinding geser atau rangka tak bergoyang (*braced*). Elemennya tidak menerus ke dalam fondasi tetapi berhenti di tingkat atasnya. Geser di tingkat ini ditransfer melalui diafragma ke kolom-kolom di bawahnya. Kekuatiran adalah dalam hal dinding atau rangka tak bergoyang (*braced*) yang mungkin mempunyai kapasitas geser yang dapat melampaui kapasitas kolom-kolomnya.

3.1.8 Penjelasan Checklist #8: Masa

Ketidakteraturan masa dapat ditentukan dengan perbandingan berat antar tingkat (lihat Gambar 4). Masa efektif terdiri dari beban mati tributari struktur pada tiap tingkat, ditambah berat aktual partisi dan peralatan permanen di setiap lantai. Bangunan dirancang secara tipikal untuk pengaruh ragam pertama. Validitas pendekatan ini tergantung pada distribusi vertikal masa dan kekakuan bangunan. Ketidakteraturan masa mempengaruhi respons dinamis struktur, dan dapat membawa pada pengaruh-pengaruh ragam lebih tinggi yang tidak terduga.



Gambar 4 Lantai berat

3.1.9 Penjelasan Checklist #9: Puntir

Bilamana terdapat puntir yang signifikan dalam bangunan, dikhawatirkan terjadi tambahan deformasi dan simpangan lateral yang dikenakan pada elemen-elemen vertikal oleh rotasi diafragma. Bangunan dapat dirancang untuk memenuhi gaya gempa nominal termasuk puntirnya, tetapi bangunan dengan puntir yang besar bisa berperilaku kurang baik bila terkena gempa. Hal yang terbaik adalah membuat sistem struktur tersebut seimbang pada saat perancangan, daripada memperhitungkan puntir tersebut di dalam perancangan struktur.

3.1.10 Penjelasan Checklist #10: Redundansi

Redundansi merupakan karakteristik dasar sistem penahan gaya lateral dengan kinerja gempa yang baik. Redundansi struktur akan memastikan jika sebuah elemen sistem penahan gaya lateral mengalami kegagalan, maka terdapat elemen-elemen lain yang bisa menyediakan ketahanan gaya lateral. Redundansi juga menyediakan banyak lokasi yang berpotensi untuk terjadinya pelepasan, mendistribusikan perilaku inelastis ke seluruh struktur dan memperbaiki daktilitas serta disipasi energinya. Bilamana redundansi tidak ada pada struktur, analisis yang menunjukkan kecukupan elemen-elemen gaya lateral diperlukan.

3.1.11 Penjelasan Checklist #11: Dinding yang Berpengaruh

Bila dinding pengisi mempengaruhi rangka momen, dinding tersebut menjadi bagian yang tidak dikehendaki dari sistem penahan gaya lateral. Secara tipikal, dinding ini tidak dirancang dan didetail untuk berpartisipasi dalam sistem penahan gaya lateral dan mungkin akan mengalami kerusakan yang berat. Dinding yang berpengaruh harus diperiksa terhadap gaya-gaya yang ditimbulkan oleh rangka, terutama bila kerusakan pada dinding ini dapat membawa pada bahaya keruntuhan. Rangka tersebut harus

diperiksa terhadap gaya-gaya yang ditimbulkan oleh kontak dengan dinding, terutama jika tinggi dinding tersebut tidak penuh, atau tidak pada bentang penuh.

3.1.12 Penjelasan Checklist #12: Pemeriksaan Tegangan Geser

Pemeriksaan tegangan geser memberikan penaksiran cepat tingkat kebutuhan keseluruhan struktur. Kekuatiran adalah pada kekuatan bangunan keseluruhan. Tegangan geser ini dihitung dengan Pers. (3-10) FEMA 310 berikut ini:

$$V_{avg} = \frac{1}{m} \left(\frac{n_c}{n_c - n_f} \right) \frac{V_j}{A_c} \quad (1)$$

dimana:

n_c = jumlah kolom total;

n_f = jumlah rangka total dalam arah pembebanan;

A_c = penjumlahan luas penampang semua kolom di suatu tingkat yang ditinjau;

V_j = gaya geser tingkat;

m = faktor modifikasi komponen struktur, diambil sama dengan 2,0 untuk Keamanan Jiwa (*Life Safety*).

3.1.13 Penjelasan Checklist #13: Pemeriksaan Tegangan Aksial

Kolom-kolom yang menahan jumlah beban gravitasi yang besar dapat mempunyai kapasitas tambahan yang terbatas untuk menahan gaya gempa. Bila gaya aksial akibat momen guling gempa ditambahkan, kolom-kolom tersebut dapat hancur secara tidak daktail akibat tekan aksial yang berlebihan. Tegangan aksial dihitung dengan Pers. (3-14) FEMA 310 berikut ini:

$$p_{ot} = \frac{1}{m} \left(\frac{2}{3} \right) \left(\frac{Vh_n}{Ln_f} \right) \quad (2)$$

dimana:

m = faktor modifikasi komponen struktur, diambil sama dengan 2,0 untuk Keamanan Jiwa (*Life Safety*);

V = gaya gempa dasar;

h_n = tinggi dari dasar sampai atap bangunan;

L = panjang rangka total;

n_f = jumlah rangka total dalam arah pembebanan.

3.1.14 Penjelasan Checklist #14: Rangka Lantai Datar

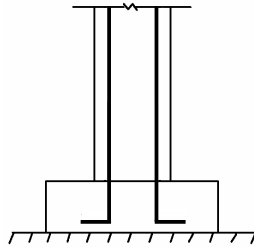
Kekuatiran terletak pada kemampuan transfer gaya geser dan lentur dari pelat ke kolom, yang dapat terjadi kegagalan berupa geser pons dan keruntuhan parsial. Kegagalan getas ini merusak ketahanan sistem penahan gaya lateral. Di daerah gempa resiko menengah maupun untuk sistem bukan penahan gaya lateral sebaiknya tulangan tepi bawah pelat/lantai datar (tanpa balok) ini diteruskan melewati hubungan pelat/lantai-kolom untuk mencegah keruntuhan getas struktur.

3.1.15 Penjelasan *Checklist* #15: Komponen Struktur Prategang

Kekuatan terletak pada kemampuan daktilitas baik komponen struktur prategang maupun pasca-tarik. SNI 2847 tidak mengatur ini.

3.1.16 Penjelasan *Checklist* #16: Pengangkuran Kolom Beton

Kolom beton yang merupakan bagian sistem penahan gaya lateral harus dihubungkan untuk mentransfer gaya angkat dan gaya geser ke fondasi (lihat Gambar 5). Ketidakberadaan hubungan yang kuat antara kolom dan fondasi dapat mengakibatkan kolom terangkat atau tergeser dari pendukung tumpuannya yang akan membatasi kemampuan kolom tersebut dalam mendukung beban vertikal atau menahan gaya lateral.



Gambar 5 Kolom dipasak ke dalam fondasi

3.2. Penjelasan *Checklist* Pelengkap

Penjelasan *Checklist* Pelengkap yang terdiri dari 13 butir untuk Sistem Penahan Gaya Lateral (Butir 5.2.1 sampai 5.2.12), dan 1 butir untuk Hubungan Pancang-*Poer* (Butir 5.2.13) diberikan sesuai FEMA 310 dan/atau SNI 2847 dan 1726 dalam sub-sub butir berikut ini.

3.2.1 Penjelasan *Checklist* #17: Kolom Pendek Terkekang

Panjang kolom nominal yang direncanakan dalam kenyataan menjadi lebih pendek antara lain oleh pasangan tembok, sehingga kekakuannya relatif menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan kolom-kolom lain di tingkat tersebut. Akibatnya, akan menyerap gaya gempa yang lebih tinggi yang dapat menderita kegagalan geser yang bersifat tidak daktil dan keruntuhan parsial struktur tersebut.

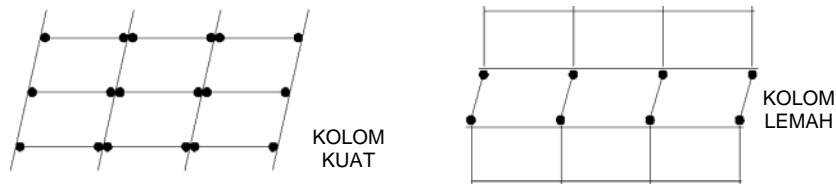
3.2.2 Penjelasan *Checklist* #18: Tidak Ada Kegagalan Geser

Ketentuan ini ditetapkan juga oleh SNI 03-2847-2002 Pasal 23.4.5 dan Ref. [6]. Bila kegagalan oleh kapasitas geser tercapai lebih dahulu sebelum terjadinya kegagalan lentur, maka kolom sistem penahan gaya lateral berpotensi mengalami kegagalan mendadak yang menjurus pada keruntuhan struktur. Kuat geser yang lebih besar dari kuat lentur dicapai dengan merancang kuat perlu berdasarkan pada kuat lentur maksimum, yaitu $M_{pr} = M_b$ dari kedua ujung kolom.

3.2.3 Penjelasan *Checklist* #19: Kolom Kuat/Balok Lemah

Ketentuan ini ada di SNI 03-2847-2002 Pasal 23.4.2.2. Bila kolom tidak cukup kuat untuk membuat balok-balok terbentuk sendi plastis lebih dahulu (lihat Gambar 6), dikuatirkan sendi plastis pada kolom akan menjurus pada *story mechanisms* dan terjadi konsentrasi

perubahan bentuk inelastis di suatu tingkat. Hal ini akan mengakibatkan ketidakstabilan sistem penahan gaya lateral karena pengaruh $P-\Delta$ yang besar.



Gambar 6 Pembentukan sendi plastis

3.2.4 Penjelasan *Checklist* #20: Tulangan Balok

Ketentuan dua tulangan menerus adalah sesuai SNI 03-2847-2002 Pasal 23.3.2.2.5 untuk memudahkan pelaksanaan juga untuk tindakan pencegah keruntuhan total. Bila terjadi kegagalan balok, tulangan yang menerus itu akan mencegah keruntuhan total lantai yang didukungnya, dan menahan balok tetap di tempat. Sedangkan syarat seperempat tulangan menerus digunakan untuk menampung pengaruh pergeseran titik belok oleh gaya gempa.

3.2.5 Penjelasan *Checklist* #21: Sambungan Lewatan Tulangan Kolom

Ketentuan mengenai lokasi dan panjang sambungan lewatan kolom ini diatur dalam SNI 03-2847-2002 Pasal 23.4.3.2. Harus diingat, bila sambungan lewatan diletakkan di kolom persis setingkat dengan lantai, maka berarti akan berada di lokasi sendi plastis. Hal ini akan sama dengan perilaku sambungan lewatan yang pendek yang akan mendadak kehilangan lekatan antara tulangan dan beton. Sengkang dengan spasi lebar akan menyebabkan pengelupasan selimut beton dan kehilangan lekatannya. Kegagalan pada sambungan bersifat mendadak dan tidak daktail.

3.2.6 Penjelasan *Checklist* #22: Lokasi Sambungan Lewatan Tulangan Balok

Ketentuan ini diatur dalam SNI 03-2847-2002 Pasal 23.3.2.3. Sambungan lewatan yang diletakkan di ujung balok dan di dekat tempat-tempat yang potensial terbentuk sendi plastis, kemungkinan besar tidak dapat mengembangkan kapasitas lentur karena lekatan antara tulangan dan beton rusak oleh degradasi beton akibat beban siklik gempa. Sepanjang sambungan lewatan yang sudah dipasang jauh dari sendi plastis perlu diikat oleh sengkang tertutup dengan spasi kurang atau sama dengan $d/4$ atau 100 mm.

3.2.7 Penjelasan *Checklist* #23: Spasi Sengkang/Pengikat Kolom

Spasi sengkang/pengikat kolom, termasuk pengikat silang, apabila terpasang dengan spasi besar akan membahayakan daktilitas kolom, dan akan tidak dapat mempertahankan kuat lenturnya sewaktu terkena gaya gempa siklik. Selain tulangan longitudinal bisa menekuk, spasi besar ini dapat menimbulkan kegagalan geser yang membawa pada keruntuhan bangunan secara mendadak. Karena itu konfigurasi dan spasi sengkang/pengikat ditetapkan secara ketat dalam SNI 03-2847-2002 Pasal 23.4.4.2 dan 23.4.4.3.

3.2.8 Penjelasan Checklist #24: Spasi Sengkang Balok

Ketentuan mengenai spasi sengkang pada balok ini juga sesuai dengan SNI 03-2847-2002 Pasal 23.3.3.2 dan 23.3.3.4. Seperti dalam *Checklist #23*, spasi sengkang tertutup itu mempunyai tiga fungsi penting atas daya tahan balok, yaitu daktilitas beton, pencegah tekuk tulang tekan, dan pencegah kegagalan geser yang mendadak.

3.2.9 Penjelasan Checklist #25: Penulangan Hubungan Balok-Kolom (HBK)

Penulangan HBK ditentukan dalam SNI 03-2847-2002 Pasal 23.5.2.2. HBK tanpa tulangan geser tidak akan mampu mengembangkan kekuatan dari komponen-komponen struktur yang disatukan, yang dapat menjurus pada kegagalan *non-ductile* dari HBK. Khusus kolom tepi sangat mudah rusak karena balok pengekangnya tidak ada di keempat sisinya.

3.2.10 Penjelasan Checklist #26: Eksentrisitas Hubungan Balok-Kolom (HBK)

Eksentrisitas HBK dapat mengakibatkan kebutuhan puntir yang besar di daerah hubungan tersebut, yang akan mengakibatkan tegangan geser yang lebih tinggi.

3.2.11 Penjelasan Checklist #27: Sengkang dan Pengikat

Persyaratan mengenai sengkang dan pengikat di lokasi sendi plastis ditentukan dalam SNI 03-2847-2002 Pasal 23.3.3 dan 23.4.4. Sengkang dan pengikat yang dipasang di lokasi sendi plastis balok dan kolom harus berupa sengkang tertutup dengan kait gemp. Pengikat silang yang dipasang berurutan harus ditempatkan secara berselang-seling berdasarkan bentuk kait ujungnya.

3.2.12 Penjelasan Checklist #28: Kompatibilitas Simpangan

Komponen struktur, khususnya kolom, yang bukan merupakan bagian sistem penahan gaya lateral akan ikut menyimpang bersama sistem penahan gaya lateral yang mengalami simpangan oleh gaya gempa. Kolom-kolom ini yang cukup kaku untuk menahan beban gravitasi yang besar, akan terkena tambahan momen lentur yang signifikan akibat simpangan tersebut. SNI 03-2847-2002 Pasal 23.9.1 memberikan pedoman pengamanan pada kolom ini. Ciri-ciri kolom bukan bagian dari sistem penahan gaya lateral yang telah diamankan adalah terlihat kolom tersebut telah diberi pendetailan seperti kolom sistem penahan gaya lateral atau SRPMK.

3.2.13 Penjelasan Checklist #29: Mutu Tulangan Memanjang

Pembatasan nilai f_y aktual adalah untuk menghindarkan kegagalan oleh geser sebelum kuat lentur leleh terjadi. Sedangkan syarat (b) ingin menjamin kemampuan daktilitas komponen struktur.

3.2.14 Penjelasan Checklist #30: Beban Lateral di *Poer*

SNI 03-2847-2002 Pasal S23.8.4.4 menjelaskan bahwa sewaktu terjadi gempa, pancang dapat terkena lenturan yang tinggi di titik-titik diskontinu, terutama tepat di bawah *poer* dan dekat dasar timbunan tanah lunak atau lepas. Ketentuan tata cara ini mensyaratkan pemakaian tulangan pengekang di bagian atas pancang didasarkan pada kegagalan yang teramati di lokasi ini di gempa-gempa yang terjadi baru-baru ini. Tulangan pengekang itu akan menjamin kinerja hubungan *poer* dan pancang yang daktil.

4. Kesimpulan dan Saran

4.1. Kesimpulan

Dari pembahasan di atas, dapat ditarik beberapa kesimpulan penting sebagai berikut:

1. *Checklist* yang dikembangkan oleh FEMA 310 dan 356 yang dimodifikasi dapat digunakan sebagai usaha preventif untuk mengurangi kemungkinan pembangunan struktur beton bertulang (khususnya SRPM) yang kurang tahan terhadap gempa.
2. *Checklist* tersebut harus dievaluasi oleh perencana/pengawas/pelaksana konstruksi, untuk menjawab apakah struktur beton bertulang yang akan/sedang dibangun sudah sesuai tata cara SNI yang terbaru.
3. Apabila semua butir *Checklist* didapati OK, maka struktur SRPM tersebut memenuhi kriteria sebagai SRPMK atau SRPMM yang tahan terhadap gempa.
4. Apabila tanda NG didapati, maka tahap selanjutnya wajib dilakukan dan informasi tersebut harus diteruskan kepada perencana struktur untuk melakukan klarifikasi atau evaluasi ulang.
5. Kegiatan preventif tersebut sangat diharapkan untuk segera dilakukan agar dapat memasyarakatkan, sehingga cita-cita HAKI di atas bisa terwujud.
6. Diyakini *Checklist* ini mungkin tidak tertutup dari kekurangan-kekurangan, karena itu terbuka masukan untuk hasil yang lebih baik.

4.2. Saran

Penulis berpendapat bila cara *Checklist* serupa di atas diyakini efektif sebagai salah satu usaha untuk mencegah bahaya yang tidak diinginkan pada tiap terjadi gempa bumi, disarankan dikembangkan pula *Checklist* kriteria kinerja dari:

1. Sistem Struktur Beton yang lain.
2. Berbagai macam Komponen Nonstruktural (arsitektural, elektrik, dan mekanikal).
3. dan lain-lain.

5. Referensi

1. HAKI, "Newsletter," Vol. 12, Januari 2007, 4 hal.
2. FEMA 310, "Handbook for the Seismic Evaluation of Buildings—A Prestandard," disiapkan oleh *American Society of Civil Engineers* untuk *Federal Emergency Management Agency*, Washington, D. C., 1998.
3. FEMA 356, "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings," disiapkan oleh *American Society of Civil Engineers* untuk *Federal Emergency Management Agency*, Washington, D. C., 2000.
4. Panitia Teknik Konstruksi dan Bangunan, "Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung (SNI 03-1726-2002)," *Badan Standarisasi Nasional*, Puslitbang Pemukiman, Bandung, 2002, 85 hal.
5. Purwono, R.; Tavio; Imran, I.; dan Raka, I G. P., "Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung (SNI 03-2847-2002) Dilengkapi Penjelasan (S-2002)," *ITS Press*, Surabaya, 2007, 408 hal.
6. Purwono, R., "Perencanaan Struktur Beton Bertulang Tahan Gempa – Sesuai SNI-1726 dan SNI-2847 Terbaru," Edisi Kedua, *ITS Press*, Surabaya, 2006, 274 hal.