

## **AMBANG PERCEPATAN GETARAN DAN KETEGAKAN GEDUNG UNTUK PENILAIAN KERUSAKAN AKIBAT GEMPABUMI**

### **UPRIGHTNESS OF BUILDINGS AND VIBRATION ACCELERATION THRESHOLDS FOR DAMAGE ASSESSMENT DUE TO EARTHQUAKE**

*Mulyo Harris Pradono<sup>1</sup>*

**ABSTRAK:** Untuk pemantauan perilaku getaran gedung saat terjadi gempa, maka diperlukan pemasangan sensor percepatan dan sensor ketegakan pada gedung-gedung bertingkat. Gedung yang dipasang sensor-sensor dan dihubungkan pada pusat pemantauan memerlukan sistem pendukung keputusan untuk menilai apakah gedung masih dalam keadaan aman atau tidak segera setelah terjadi gempabumi. Makalah ini mengkaji mengenai batas-batas percepatan getaran dan batas ketegakan yang aman bagi kekuatan gedung Pembahasan didasarkan pada spektrum desain gempabumi untuk bangunan di Jakarta. Hasilnya menunjukkan bahwa untuk gedung yang dibangun setelah tahun 2012, ambang percepatan di permukaan tanah mengikuti standar dari Kementerian Pekerjaan Umum tahun 2011. Selanjutnya, sebagai alternatif dapat digunakan kriteria kemiringan permanen gedung untuk menilai tingkatan kerusakan yang terjadi pada gedung pasca gempabumi seperti yang distandarkan oleh FEMA pada tahun 2000..

**Kata kunci:** percepatan getaran, ketegakan gedung, ambang batas, gempabumi .

**ABSTRACT:** In order to monitor the vibration behavior of buildings during earthquakes, it is necessary to install the acceleration sensor and uprightness sensor in high-rise buildings. The building fitted with sensors and connected to a monitoring center requires a decision support system to decide whether the building is in a safe state immediately after an earthquake. This paper discuss the boundaries and limits of vibration acceleration and uprightness for building strength that is based on the design spectrum of earthquake for buildings in Jakarta. The result suggests that if the building is built after 2012, the threshold acceleration at ground level shall follow the standards by Ministry of Public Works in 2011. Furthermore, as an alternative, permanent slope criteria standardized by FEMA in 2000 can be used to assess the level of post-earthquake damage of the building.

**Keywords:** vibration acceleration, building uprightness, thresholds, earthquakes.

---

<sup>1</sup> PTRRB, BPPT, Geotech, Gedung 820,  
Puspiptek, Serpong.  
email:mulyoharris@bppt.go.id

## 1. PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Jakarta sebagai ibu kota Indonesia dengan banyak gedung pencakar langit sering mengalami gempa bumi. Misalnya, gempa pada tahun 2007 dan 2009 yang dihasilkan dari zona subduksi dalam di utara Jawa Barat dan di selatan Jawa Barat menyebabkan retakan-retakan pada gedung-gedung bertingkat di Jakarta (Pradono dan Triwinanto, 2010). Pada saat itu, untuk mengetahui kondisi gedung-gedung pasca gempa bumi diperlukan survei pada tiap-tiap gedung. Untuk itu diperlukan waktu yang cukup lama untuk satu gedung. Sehingga terpikirkan perlunya sistem pemantauan kesehatan struktur gedung di DKI Jakarta. Sistem ini dapat menyampaikan data-data yang diperlukan dalam menilai kondisi gedung-gedung pasca gempa bumi ke pusat pemantauan di misalnya kantor BPBD DKI Jakarta. Data-data diukur menggunakan sensor-sensor yang dipasang pada gedung-gedung tersebut. Salah satu sensor yang diperlukan adalah sensor percepatan dan sensor ketegakan gedung.

Jepang termasuk negara yang sudah menerapkan sensor percepatan pada gedung-gedung tinggi untuk mengetahui percepatan yang terjadi di dasar gedung (untuk mengetahui intensitasnya) dan di lantai-lantai tengah dan teratas untuk mengetahui perilaku gedung selama terjadi gempa (Saito et al., 2012). Sebenarnya untuk aplikasi pemantauan kesehatan gedung, lebih banyak sensor yang diperlukan untuk menilai perilaku gedung (Septinurriandiani, 2011). Sensor yang dipakai ada yang untuk mengukur regangan (*strain*) dari beton dan baja tulangan. Kemudian sensor perpindahan (*displacement*) relatif antar lantai. Yang penting diperlukan juga adalah perpindahan setiap lantai relatif terhadap permukaan tanah. Data ini sangat diperlukan, namun sensor perpindahan memerlukan titik dasar pengukuran. Kalau titik dasar pengukuran ini adalah dasar gedung dan titik yang akan diukur adalah lantai teratas gedung pada gedung 30 lantai, maka sulit memasang sensor

yang menghubungkan lantai teratas ini dengan lantai terbawah. Ada yang menggunakan data percepatan untuk memperoleh perpindahan. Akan tetapi, jika data percepatan tidak teliti, maka hasil analisis perpindahannya menjadi tidak akurat, karena terjadi akumulasi kesalahan (Wikipedia, 2016).

Usaha yang dilakukan untuk membangun secara mandiri sensor yang memadai dalam sebuah sistem pemantauan kesehatan gedung sedang dilakukan (Pradono et al., 2015). Pada hasil pengukuran, didapat beberapa masalah yang memerlukan kajian lebih lanjut, di antaranya adalah sampling rate yang tidak stabil dan tidak cukup kecil sehingga data percepatan kurang memadai untuk dianalisis menjadi kecepatan dan perpindahan. Demikian pula analisis mengenai frekuensi dominan getaran tidak menghasilkan data yang tepat karena ketidakstabilan dan besarnya *sampling rate*.

Untuk menjembatani masalah ini, sambil melakukan kajian lebih dalam terhadap sensor agar lebih stabil dalam mengambil data, maka dilakukan pengkajian metoda-metoda yang memanfaatkan data percepatan dan ketegakan gedung secara langsung dari hasil pengukuran menggunakan sensor percepatan untuk menentukan kondisi kesehatan gedung segera setelah gempa bumi.

## 2. METODE PENELITIAN

Pengkajian mengenai ambang batas percepatan gedung untuk penilaian kekuatannya didasarkan pada spektrum desain bangunan terhadap gempa bumi di zona kegempaan DKI Jakarta:

- a. Merangkum data spektral percepatan gempa di permukaan bumi (Kementerian Pekerjaan Umum, 2011).
- b. Menentukan faktor reduksi percepatan gempa berdasarkan tipe struktur bangunan menurut standar (Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah, 2002).
- c. Membuat tabel ambang batas untuk percepatan gedung akibat gempa bumi.

- d. Hasil dari ambang ini adalah percepatan untuk desain bangunan mulai tahun 2012.

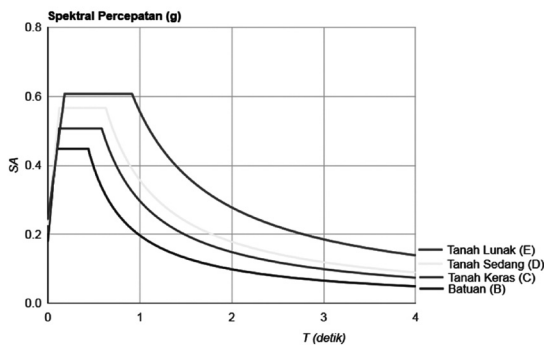
Ambang batas percepatan untuk pengaruhnya pada penghuni dan perabotannya, serta ketegakan gedung didasarkan pada penelitian dari pihak lain.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Data Spektral Percepatan Gempa

Gambar 1 menunjukkan spektral percepatan gempabumi (Kementerian PU, 2011). Konsep daripada spektral percepatan adalah respon dari sebuah sistem berderajat kebebasan tunggal dengan periode getar alami yang berbeda-beda, dimulai dari periode getar pendek (bangunan kaku, berlantai sedikit) sampai panjang (bangunan lentur, berlantai banyak). Resonansi yang terjadi pada sistem akibat getaran gempa mengakibatkan respon percepatan lebih tinggi daripada percepatan getaran gempanya.

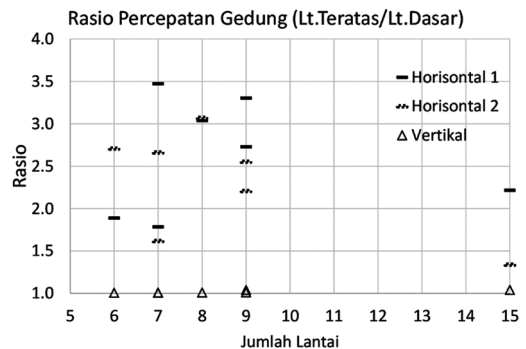
Pada saat gempabumi Tohoku, Jepang, pada tahun 2011, Saito melakukan pengukuran percepatan getaran gedung akibat gempabumi



Gambar 1. Spektral Percepatan di Permukaan dari Gempa *Risk-Targeted Maximum Considered Earthquake* dengan Probabilitas Keruntuhan Bangunan 1% dalam 50 Tahun untuk Daerah DKI Jakarta (Kementerian PU, 2011).

(Saito et al., 2012). Penulis kemudian merangkum data tersebut untuk mempelajari perbandingan antara percepatan getaran di puncak gedung terhadap percepatan getaran di dasar gedung. Hasilnya ditunjukkan pada Gambar 2.

Gambar 2. menunjukkan bahwa percepatan gempabumi bisa mencapai 3.5 kali percepatan di lantai dasar akibat gempabumi. Hal ini menunjukkan adanya resonansi getaran gempa terhadap getaran gedung. Apabila fenomena ini terjadi, maka gedung masih dalam keadaan elastis (tidak rusak). Jika gedung memasuki kondisi plastis (rusak) karena percepatan yang besar (melebihi percepatan desain), maka resonansi tidak akan terjadi. Karena saat kondisi plastis, frekuensi alami gedung mengalami penurunan, atau gedung menjadi lebih fleksibel. Akibatnya bisa jadi frekuensi dominan getaran gempa tidak menyamai frekuensi alami gedung, sehingga tidak terjadi resonansi pada gedung.

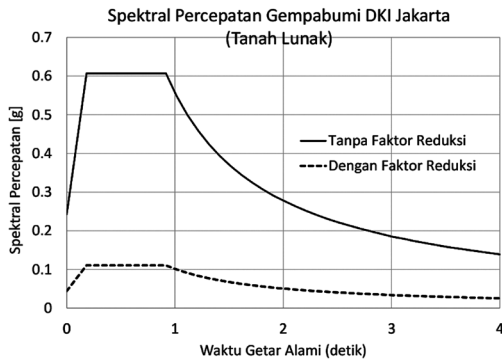


Gambar 2. Rasio Percepatan Getaran Gedung (Lantai Teratas/Lantai Dasar) Akibat Gempabumi Jepang 2011 (Saito et al., 2012).

#### 3.2. Faktor Reduksi Percepatan Gempa

Faktor reduksi gempa maksimum untuk beberapa jenis sistem dan subsistem struktur gedung disebutkan dalam Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung SNI – 1726 – 2002 (Departemen Kimpraswil, 2002). Untuk bangunan gedung pada umumnya di DKI

Jakarta, sistem yang dapat dianggap sesuai dengan kriteria pada standar tersebut adalah “sistem rangka gedung, yaitu sistem struktur yang pada dasarnya memiliki rangka ruang pemikul beban gravitasi secara lengkap; beban lateral dipikul dinding geser atau rangka bresing”. Dengan kriteria ini, maka besarnya faktor reduksi gempa (maksimum) adalah 5.5.



Gambar 3. Spektral Percepatan Tanpa Faktor Reduksi dan Dengan Faktor Reduksi untuk Bangunan dengan Sistem Rangka Gedung yang Memiliki Rangka Ruang Pemikul Beban Gravitasi Secara Lengkap dan Beban Lateral Dipikul Dinding Geser.

Untuk spektral percepatan gempabumi seperti Gambar 1, maka dibuat kurva untuk spektral percepatan gempabumi DKI Jakarta untuk tanah lunak yang tanpa faktor reduksi dan dengan faktor reduksi (Gambar 3). Nilai kurva juga dibuat dalam bentuk tabel di bawah (Tabel 1).

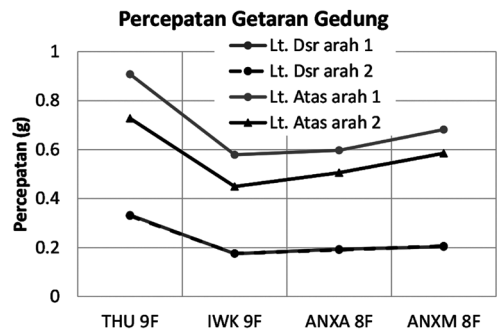
Tabel 1. Spektral Percepatan Tanpa Faktor Reduksi dan Dengan Faktor Reduksi Akibat Gempabumi untuk DKI Jakarta.

Jumlah Lantai Gedung	Asumsi Waktu Getar Alami [detik]	Spektral Percepatan	
		Tanpa Faktor Reduksi [g]	Dengan Faktor Reduksi [g]
2	0.183	0.607	0.110
9	0.916	0.607	0.110
10	1.016	0.548	0.100

11	1.116	0.499	0.091
12	1.216	0.458	0.083
13	1.316	0.423	0.077
14	1.416	0.393	0.071
15	1.516	0.367	0.067
16	1.616	0.344	0.063
17	1.716	0.324	0.059
18	1.816	0.306	0.056
19	1.916	0.29	0.053
20	2.016	0.276	0.050
25	2.516	0.221	0.040
30	3.016	0.184	0.033

Dari tabel di atas, dengan mempertimbangkan adanya faktor reduksi beban gempa saat mendesain gedung tersebut, maka nilai percepatan getaran pada gedung yang perlu diwaspadai adalah 0.110g untuk gedung berlantai 2 sampai dengan 9. Apabila percepatan getaran ini terlampaui, kemungkinan gedung memasuki kondisi plastis (rusak). Untuk itu, maka data dari sensor ketegakan gedung perlu dicermati, seperti dibahas di bawah ini.

Hasil rekaman percepatan getaran untuk gedung yang mengalami kerusakan saat gempabumi 2011 di Jepang (Kashima et al., 2012) akan dibahas di sini. Gedung yang mengalami kerusakan ini adalah struktur beton bertulang ber-rangka baja. Struktur ini termasuk khusus di Jepang, karena saat mengalami kerusakan maka tidak terlalu banyak terjadi perubahan pada frekuensi alami gedung. Akan tetapi data getarannya bisa dipelajari sebagai acuan.



Gambar 4. Percepatan Getaran Gedung yang Mengalami Kerusakan Akibat Gempabumi Jepang 2011.

Berdasarkan Gambar 4, untuk jenis bangunan ini (beton bertulang ber-rangka baja), percepatan yang besar (mendekati nilai 1g) dapat terjadi di lantai atas, walaupun gedung mengalami kerusakan yang cukup signifikan (kolom bawah terluar mengalami kehancuran tekan) (Kashima et al., 2012).

Jika gedung ini murni terbuat dari struktur beton bertulang, maka hal ini dihindari dengan membuat gedung rusak namun tetap kuat (daktail) saat gempa terjadi. Akibatnya percepatan dibatasi pada level tertentu supaya tidak terjadi percepatan yang besar (lebih dari 0.3g), karena percepatan yang besar dapat menimbulkan kekacauan bagi penghuni maupun perabotan (berjatuhan) (Saito et al., 2012).

Untuk gedung dengan tipe struktur lain yang mempunyai faktor reduksi gempa yang berbeda juga, paling tidak akan menggunakan percepatan gempa di permukaan tanah sebesar 0.243g (khusus untuk kegempaan DKI Jakarta). Apabila percepatan getaran pada gedung lebih besar dari percepatan ini, maka kondisi gedung perlu dikonfirmasi dengan data ketegakan gedung untuk menentukan kondisi kerusakannya pasca gempabumi. Ketegakan gedung dibahas pada sub bab berikut.

### 3.3. Ambang Batas Ketegakan Gedung

Untuk mengetahui adanya kerusakan pada gedung pasca gempabumi, maka diperlukan data kemiringan permanen setelah getaran berhenti. Kemiringan permanen adalah perbedaan antara ketegakan gedung sebelum dan sesudah gempabumi. Kemiringan permanen menunjukkan gedung sudah memasuki fase non elastis (rusak) saat terjadi gempa. Sehingga gedung tidak mampu untuk kembali menjadi tegak.

Tabel 2 menunjukkan nilai simpangan permanen antar lantai atau kemiringan permanen antar lantai. Untuk mendapat data ini, sensor kemiringan dipasang di tiap lantai. Akan tetapi sensor ini masih terlalu mahal untuk dipasang di tiap lantai. Sehingga sensor kemiringan hanya dipasang di lantai teratas.

Data yang didapat adalah kemiringan lantai teratas. Tidak selalu kemiringan ini sama dengan kemiringan antar lantai terparah. Tetapi paling tidak, jika nilai-nilai pada tabel di atas tercapai, kondisi kerusakan di tabel tersebut juga tercapai.

Tabel 2. Tingkatan Kinerja dan Kerusakan Gedung Struktur Beton Bertulang (FEMA, 2000).

Jenis	Tingkatan Kinerja		
	Collapse Prevention*	Life Safety**	Immediate Occupancy***
Kerusakan tampak mata	Selimit beton terkelupas pada kolom dan balok. Tulangan bengkok.	Retak-retak besar. Terbentuk sendi plastis pada rangka beton daktail.	Retak-retak akibat lentur pada balok dan kolom
Simpangan permanen antar lantai	4% atau 2.3°	1% atau 1.1°	< 1% atau < 1.1°

Catatan:

\* Struktur tercegah dari keruntuhan

\*\* Struktur mengalami kerusakan tapi penghuni tetap aman

\*\*\* Struktur tidak rusak dan dapat digunakan kembali

### 3.4. Ambang Batas Percepatan untuk Penghuni Gedung dan Perabotan

Sebuah penelitian untuk mengetahui kondisi penghuni dan perabotan dalam gedung telah dilakukan oleh Saito et al. (2012). Penelitian bertujuan untuk mengetahui batas-batas percepatan yang mempengaruhi perilaku manusia dan perabotan di dalam gedung. Hasilnya ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 3. Kondisi Penghuni dan Perabotan di Dalam Gedung (Kashima, et al., 2012).

Kondisi Penghuni atau Perabotan	Ambang Batas Percepatan [g]
Penghuni masih dapat bergerak normal	< 0.1
Penghuni mulai mengalami kesulitan bergerak normal	0.1 – 0.3

Penghuni mengalami kesulitan melakukan kegiatan apapun	0.3 <
Perabotan masih berada di posisinya	< 0.1
Perabotan mulai bergerak	0.1 – 0.3
Perabotan mulai berguling	0.3 <

Berdasarkan tabel tersebut, maka percepatan ambang yang menyebabkan orang sulit melakukan apa-apa adalah 0.3g. Pada kondisi ini, manusia tidak bisa berbuat apapun untuk menyelamatkan diri. Bergerak untuk berpindah tempat seperti misalnya berlindung ke bawah meja untuk menghindari kejatuhan benda-benda juga tidak bisa dilakukan. Pada ambang percepatan ini pun, perabotan berhamburan sehingga membahayakan penghuninya. Jika ambang percepatan ini terlampaui, maka pihak-pihak terkait harus segera mengalokasikan sumberdayanya ke gedung ini agar dapat segera dilakukan tindakan-tindakan penyelamatan.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan kajian di atas, maka disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

1. Nilai batas percepatan getaran gempa di permukaan tanah maupun di gedung yang berpotensi merusak gedung tergantung kepada desain masing-masing gedung.
2. Untuk gedung yang dibangun setelah tahun 2012, maka ambang percepatan di permukaan tanahnya mengikuti standar (Kementerian Pekerjaan Umum, 2011)
3. Sebagai alternatif, dapat digunakan kriteria kemiringan permanen gedung.
4. Tingkatan kerusakan yang terjadi pada gedung pasca gempabumi ditentukan oleh kemiringan permanen yang diukur di lantai tertingggi.
5. Nilai batas kemiringan permanen ditunjukkan pada Tabel 2.
6. Nilai batas percepatan yang aman bagi penghuni dan perabotan mengacu pada Tabel 3.

7. Hasil di atas dapat digunakan oleh pemegang kepentingan untuk mengambil keputusan cepat dalam mengerahkan sumberdayanya menuju gedung-gedung yang rusak segera setelah gempabumi.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah, 2002, Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung, SNI - 1726 – 2002, April.
- FEMA, 2000, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings FEMA 356, pp. 1-14, November.
- Kashima, T., Koyama, S., Okawa, I., dan Iiba, M., 2012, Strong Motion Records in Buildings from the 2011 Great East Japan Earthquake, Proceedings 15 WCEE, Lisboa.
- Kementerian Pekerjaan Umum, 2010, Peta Hazard Gempa Indonesia 2010, Jakarta, Juli.
- Kementerian Pekerjaan Umum, 2011, Desain Spektra Indonesia, [http://puskim.pu.go.id/Aplikasi/desain\\_spektra\\_indonesia\\_2011/](http://puskim.pu.go.id/Aplikasi/desain_spektra_indonesia_2011/), created by PPMB-ITB, Pusat Penelitian dan Pengembangan Permukiman - Kementerian Pekerjaan Umum.
- Pradono, M. H. dan Triwinanto, P., 2010, Evaluasi Kekuatan Struktur Gedung BPPT Pasca Gempa Tasikmalaya 2 September 2009, Jurnal Sains dan Teknologi Mitigasi Bencana, Volume 5, Nomor 1, Halaman 16-30, Juni, ISSN: 0126-4907.
- Pradono, M.H., Udrek, S., Sudiana, N., Umbara, R.P., Andikasari, L.Y., Fitriani, R., 2015, Analisis Data Akselerometer pada Pengujian Simulasi Gempa Model Gedung, Jurnal ALAMI, BPPT, Vol. 20, No. 2, 2015, ISSN: 0853-8514.
- Saito, T., Morita, M., Kashima, T., and Hasegawa, T., 2012, Performance of High-rise Buildings during the 2011 Great East Japan Earthquake, Proc. 15WCEE, Lisboa.

Septinurriandiani, 2011, Sistem Monitoring Kesehatan Struktur-Penilaian Kondisi dan Kriteria Peralatan Monitoring, Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan, Badan Penelitian dan Pengembangan, Kementerian Pekerjaan Umum, Desember.

Wikipedia, 2016, Numerical integration, Wikipedia the Free Encyclopedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Numerical\\_integration](https://en.wikipedia.org/wiki/Numerical_integration), akses pada 20 Juni 2016.