

MENENTUKAN LEVEL KINERJA STRUKTUR BETON BERTULANG PASCA GEMPA

Wibowo¹⁾, Edy Purwanto²⁾, Dwi Yanto³⁾

¹⁾ Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret, Jl. Ir. Sutamai 36A, Surakarta 57126;
Telp. 0271-634524 . Email: wib_nadine@yahoo.com

²⁾ Jurusan Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret, Jl. Ir. Sutami 36A, Surakarta 57126;
Telp.0271-634524 Email:civiluns@uns.ac.id

³⁾ Alumni Fakultas Teknik, Jurusan Sipil, Universitas Sebelas Maret, Jl. Ir. Sutami 36A, Surakarta 57126;
Email:civiluns@uns.ac.id

Abstrak

Tujuan dari kajian ini adalah untuk menjawab secara ilmiah permasalahan tentang tingkat keamanan struktur gedung beton bertulang pasca serangan gempa (kasus gempa Jogja pada tahun 2006). Metode yang digunakan adalah dengan observasi langsung dilapangan, mengumpulkan data perencanaan, data *asbuilt drawing*, membuat model struktur dan melakukan analisis *pushover*. Sampel yang digunakan adalah sebuah gedung perkantoran di wilayah kota Surakarta. Hasil kajian menunjukkan bahwa secara struktural, gedung yang menjadi sampel kajian, masuk kategori *Immediate Occupancy* (IO) yang berarti belum terjadi kerusakan struktur yang berarti akibat gempa terjadi, namun harus dilakukan perbaikan terhadap beberapa kerusakan agar tidak menjadi kerusakan lebih besar akibat gaya gravitasi dan beban layan gedung.

Kata kunci: analisa *pushover*, beton, gempa, struktur.

Abstract

The purpose of this study is to answer problems concerning the performance point level reinforced concrete building structures on post-earthquake attack (Jogjakarta earthquake in 2006). The method used is direct observation in the field, collecting data of structural design, collecting data of as built drawing, making models of structure and perform pushover analysis. The sample used was an office building in the city of Surakarta. The study shows that structurally, the building that was studied, was in the Immediate Occupancy (IO) criteria, which means no significant structural damage caused by the earthquake, but repairing must be done to some damages in order to resist the possible larger damage caused by the gravitational force and the building service load.

Keywords: concrete, earthquake, pushover analysis, structure.

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara yang mempunyai potensi gempa sangat aktif, hal ini terjadi karena sebagian besar wilayahnya merupakan letak pertemuan lempeng tektonik yang saling bertumbukan dan melepaskan energi yang merupakan sumber terjadinya gempa. Beberapa kejadian gempa terjadi, telah menimbulkan banyak kerusakan pada bangunan gedung hingga memakan korban jiwa diantaranya adalah gempa Aceh (2004), gempa Jogja (2006), gempa Padang (2009)

Bangunan setelah mengalami guncangan akibat gempa beragam kondisinya, bangunan yang runtuh sudah pasti harus dibangun kembali. Permasalahan justru terjadi pada bangunan yang masih berdiri akan tetapi terlihat nyata adanya kerusakan-kerusakan yang pasti menimbulkan pertanyaan: apakah bangunan masih layak digunakan? Hanya melalui kajian dengan meto-

dologi ilmiah pertanyaan ini dapat dijelaskan, sehingga para pengguna bangunan tersebut dapat diyakinkan kondisi riil kinerja bangunan.

Setiap bangunan di Indonesia ini seharusnya direncanakan mampu bertahan terhadap gempa, sehingga diperlukan suatu perencanaan yang benar sesuai perencanaan gedung tahan gempa di Indonesia yang tertuang dalam tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk bangunan gedung [1].

Perencanaan tahan gempa berbasis kekuatan (*force based*) telah terbukti berhasil mengurangi korban jiwa, tetapi tidak berfungsinya gedung dan fasilitas umum karena kerusakan yang terjadi menyebabkan kerugian ekonomi yang cukup besar. Pada perencanaan berbasis kekuatan, kinerja struktur hanya terjamin pada dua level yaitu pada gempa gempa kecil bangunan berada dalam keadaan siap pakai (*serviceability limit state*) sedangkan pada gempa rencana bangunan berada dalam

keadaan tidak hancur (*safety limit state*). Tidak diketahui dengan jelas kinerja (*performance*) bangunan dalam keadaan gempa sedang.

Saat ini arah metode perencanaan tahan gempa beralih dari pendekatan kekuatan (*force based*) menuju pendekatan kinerja (*performance based*) dimana struktur direncanakan terhadap beberapa tingkat kinerja. Untuk mengetahui kinerja struktur saat menerima beban gempa, maka dibutuhkan analisis nonlinier yang sederhana tetapi cukup akurat. Salah satu cara analisis nonlinier yang dapat digunakan adalah *Capacity Spectrum Method* yang memanfaatkan analisis beban dorong statis nonlinier (*nonlinear static pushover analysis*) yang menggunakan kinerja struktur sebagai sasaran perencanaan. Perencanaan berbasis kinerja mensyaratkan taraf kinerja (*level of performance*) yang diinginkan untuk suatu taraf beban gempa dengan periode ulang tertentu dengan menetapkan tiga tingkatan kinerja, yaitu kinerja batas layanan (*serviceability limit state*), kinerja kontrol kerusakan struktur (*damage control limit state*) dan kinerja keselamatan (*safety limit state*).

Nonlinear Static Pushover Analysis juga cukup handal untuk memprediksi pola keruntuhan suatu gedung akibat adanya gempa. Akibat terjadinya gempa Jogja, kondisi gedung balai kota Surakarta telah mengalami kerusakan pada beberapa titik akibat guncangan gempa beberapa tahun lalu.

Sangat menarik untuk dilakukan evaluasi terhadap bangunan suatu gedung beton bertulang, untuk menentukan kinerja struktur dan memprediksikan perilaku kerusakan bangunan akibat gempa berdasarkan data dan kerusakan yang terjadi.

2. DASAR TEORI

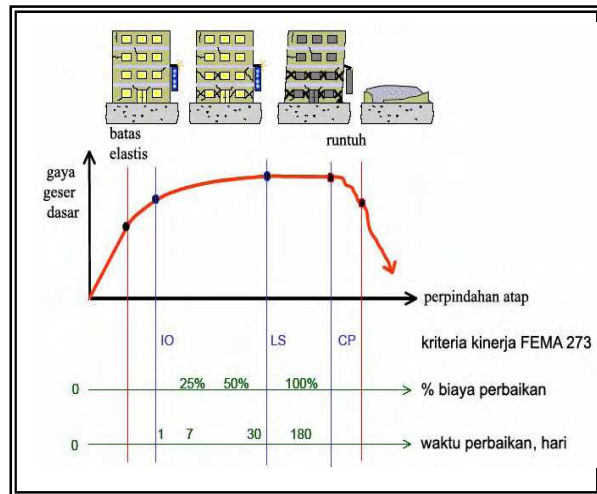
2.1. Konsep Kinerja Struktur Tahan Gempa

Saat ini, sebagian besar bangunan tahan gempa direncanakan dengan prosedur yang ditulis dalam peraturan perencanaan bangunan (*building codes*). Peraturan dibuat untuk menjamin keselamatan penghuni terhadap gempa besar yang mungkin terjadi, dan untuk menghindari atau mengurangi kerusakan atau kerugian harta benda terhadap gempa sedang yang sering terjadi. Perencanaan tahan gempa berbasis kinerja (*performance-based seismic design*) merupakan proses yang dapat digunakan untuk perencanaan bangunan baru maupun perkuatan (*upgrade*) bangunan yang sudah ada, dengan pemahaman yang realistis terhadap resiko keselamatan (*life*), kesiapan pakai (*occupancy*) dan kerugian harta benda (*economic loss*) yang mungkin terjadi akibat gempa yang akan datang. Proses perencanaan tahan gempa berbasis kinerja dimulai dengan membuat model rencana bangunan kemudian melakukan simulasi kinerjanya terhadap berbagai kejadian gempa. Setiap simulasi memberikan informasi tingkat kerusakan (*level of damage*), ketahanan struktur, sehingga dapat memperkirakan berapa besar

keselamatan (*life*), kesiapan pakai (*occupancy*) dan kerugian harta benda (*economic loss*) yang akan terjadi.

Mengacu pada NEHRP & FEMA 273 [2] (Gambar 1.) yang menjadi acuan klasik bagi perencanaan berbasis kinerja, maka kategori level kinerja struktur adalah:

- Operasional = Tidak ada kerusakan berarti pada struktur dan non-struktur (bangunan tetap berfungsi).
- Segera dapat dipakai (*IO = Immediate Occupancy*), yaitu tidak ada kerusakan yang berarti pada struktur, dimana kekuatan dan kekakuannya kira-kira hampir sama dengan kondisi sebelum gempa.
- Keselamatan penghuni terjamin (*LS = Life-Safety*), yaitu terjadi kerusakan komponen struktur, kekakuan berkurang, tetapi masih mempunyai ambang yang cukup terhadap keruntuhan. Komponen non-struktur masih ada tetapi tidak berfungsi. Dapat dipakai lagi jika sudah dilakukan perbaikan.
- Terhindar dari keruntuhan total (*CP = Collapse Prevention*) yaitu kerusakan yang berarti pada komponen struktur dan non-struktur. Kekuatan struktur dan kekakuannya berkurang banyak, hampir runtuh. Kecelakaan akibat kejatuhan material bangunan yang rusak sangat mungkin terjadi.



Sumber : FEMA 273 (1997)

Gambar 1. Ilustrasi level kinerja struktur berbasis kinerja

Hal penting dari perencanaan berbasis kinerja adalah sasaran kinerja bangunan terhadap gempa dinyatakan secara jelas. Sasaran kinerja terdiri dari kejadian gempa rencana yang ditentukan (*earthquake hazard*), dan taraf kerusakan yang diijinkan atau level kinerja (*performance level*) dari bangunan terhadap kejadian gempa tersebut.

ATC-40 [3] memberi batasan rasio *drift* atap untuk berbagai macam tingkat kinerja struktur adalah sebagai berikut adalah sebagai berikut :

Tabel 1. Batasan rasio *drift* atap menurut ATC-40

Parameter	Performance Level			
	IO	Damage Control	LS	Structural Stability
Maksimum Total Drift	0.01	0.01 s.d 0.02	0.02	0.33(V _i /P _i)
Maksimum In-elastik Drift	0.005	0.005 s.d 0.015	no limit	no limit

dimana V_i adalah gaya geser pada lantai ke- i , dan P_i adalah jumlah total beban gravitasi yang bekerja pada lantai ke- i (total beban mati dan beban hidup).

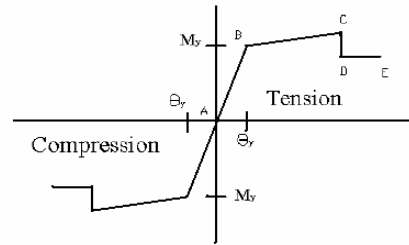
Adalah suatu analisis statik nonlinier di mana pengaruh gempa rencana terhadap struktur bangunan gedung dianggap sebagai beban-beban statik yang menangkap pada pusat massa masing-masing lantai, yang nilainya ditingkatkan secara berangsur-angsur sampai melampaui pembebanan yang menyebabkan terjadinya pelelehan (sendi plastis) pertama di dalam struktur bangunan gedung, kemudian dengan peningkatan beban lebih lanjut mengalami perubahan bentuk pasca elastik yang besar sampai mencapai kondisi plastis. NSP dianggap lebih unggul daripada analisis linier, seperti analisis klasik dengan beban lateral statik ekuivalen dan analisis superposisi modal, karena NSP secara jelas mempertimbangkan faktor inelastik setelah batas leleh (*yield*) komponen struktur pada waktu menahan intensitas gempa sedang dan besar. NSP juga lebih menarik daripada analisa dinamik nonlinier yang merupakan analisa paling kompleks di antara semua analisa gempa yang ada, karena NSP menghasilkan perkiraan nilai tunggal besaran akibat guncangan gempa (seperti deformasi lateral, *interstory drift*, gaya dalam dan momen, dan rotasi sendi plastis) untuk desain atau evaluasi.

Dari analisis ini didapat kurva kapasitas yang menunjukkan hubungan gaya geser dasar terhadap peralihan, yang memperlihatkan perubahan perilaku struktur dari linier menjadi nonlinier, berupa penurunan kekakuan yang diindikasikan dengan penurunan kemiringan kurva akibat terbentuknya sendi plastis pada kolom dan balok.

2.2. Sendi Plastis

Sendi plastis merupakan bentuk ketidakmampuan struktur khususnya balok menahan gaya dalam. Pemodelan sendi digunakan untuk mendefinisikan perilaku *nonlinear force-displacement* atau momen-rotasi yang dapat ditempatkan pada beberapa tempat berbeda di sepanjang bentang balok atau kolom. Pemodelan sendi adalah rigid dan tidak memiliki efek pada perilaku linier pada *member*. Dalam studi ini, elemen kolom menggunakan tipe sendi *default-PMM*, dengan pertimbangan bahwa elemen kolom terdapat hubungan gaya aksial dengan momen (diagram interaksi P-M). Sedangkan untuk elemen balok menggunakan *default-V2* dan *default-M3*, dengan dengan pertimbangan bahwa

balok efektif menahan gaya geser pada sumbu 2 dan momen dalam arah sumbu kuat (sumbu-3), sehingga diharapkan sendi plastis terjadi pada balok. Sendi diasumsikan terletak pada masing-masing ujung pada elemen balok dan elemen kolom.

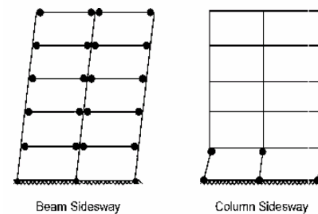


Sumber : FEMA 273 (1997)

Gambar 2. Properti sendi *default-PMM* dan *default-M3*

2.3. Mekanisme Keruntuhan Gedung

Untuk menghindari keruntuhan total maka harus direncanakan suatu mekanisme keruntuhan struktur bangunan yang aman, yaitu jika terjadi gempa tidak mengakibatkan keruntuhan total (*collapse*) pada bangunan. Ada dua tipe mekanisme keruntuhan yang biasa terjadi pada analisis statik sebagai batas analisis, yaitu *beam sidesway mechanism* dan *column sidesway mechanism*. *beam sidesway mechanism* yaitu pembentukan sendi plastis pada ujung-ujung balok. Mekanisme ini hanya dapat dicapai bila kekuatan kolom lebih besar dari kekuatan balok. Sedangkan *column sidesway mechanism* yaitu pembentukan sendi plastis pada ujung atas dan bawah dari elemen struktur vertikal. Dalam perencanaannya mekanisme keruntuhan yang diharapkan adalah *beam sway mechanism*,



Sumber : ATC-40

Gambar 3. Mekanisme keruntuhan gedung

3. METODE

Point level kinerja struktur ditentukan dengan cara membuat pemodelan dari struktur yang ditinjau, kemudian dilakukan pembebanan secara incremental menggunakan software program komputer sampai dengan mendekati gaya gempa yang terjadi, kemudian diteliti sampai seberapa besar kerusakan yang terjadi.

Pada tahap awal dilakukan pengumpulan data struktur yang menjadi obyek penelitian. Data-data tersebut adalah dimensi elemen struktur, kualitas bahan, jumlah perkuatan (besi tulangan), dan konfigurasi struktur secara keseluruhan. Setelah data diperoleh

lengkap dilakukan pemodelan struktur dan perhitungan pembebanan.

Capacity spectrum merupakan salah satu metode untuk mendeskripsikan titik kelemahan struktur. *Capacity spectrum* adalah metode yang digunakan program *ETABS* dan dari output-nya dapat diperoleh parameter titik kinerja struktur. Konsep desain kinerja struktur metode *capacity spectrum* pada dasarnya merupakan prosedur yang dilakukan untuk mendapatkan peralihan aktual struktur gedung. Peralihan aktual yang didapatkan dari hasil ini menunjukkan besar simpangan atap struktur. Perbandingan antara simpangan atap struktur terhadap tinggi total struktur menunjukkan kinerja struktur. Tahapan desain kinerja struktur dengan metode *capacity spectrum* sesuai ATC-40.

3.1. Data-data Teknis Struktur

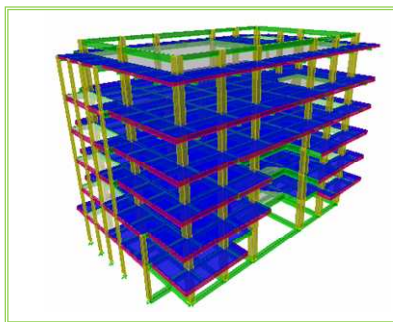
Struktur beton bertulang merupakan model SRPM (Sistem Rangka Pemikul Momen) yang terdiri dari elemen balok dan kolom dengan bervariasi dimensinya Tabel 2..

Tabel 2. Jenis dan dimensi balok kolom

Balok In-duk	Balok Anak	Balok Kantilever	Balok Tepi	Kolom
B 300/500	B 150/250	B 300/600	B 150/250	K 600/600
B 300/750	B 300/400	B 350/700	B 150/500	K 600/700
B 400/750	B 350/500	B 300/400		K 600/800
B 400/800	B 400/400	B 400/700		K 700/700
B 500/900	B 400/500	B 400/600		K 800/800
B 400/1050		B 250/500		
B 250/600		B 200/600		

3.2. Pemodelan Struktur

Berdasar gambar struktur yang ada dan hasil observasi di lapangan, maka dapat dibuat model struktur yang akan digunakan sebagai dasar analisis performance strukturnya.



Gambar 4 . Model Struktur

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Denah struktur gedung ini arah panjang 36.00 m dengan lebar 31.00 m. Bangunan 6 (enam) lantai dengan lay-out struktur tapak bangunan mempunyai luas 1100 m². Tinggi struktur portal ruang gedung ini 27.60 m. Finishing gedung ini sistem dinding pasangan bata dengan kosen pintu dan jendela aluminium.

Struktur atap ini terdiri atas kuda-kuda baja siku dengan penutup atap genteng. Untuk struktur balok dan kolom dibuat struktur portal terbuka (*open frame*) beton bertulang. Sistem struktur pada penjepit lateral dilaksanakan dengan sistem *sloof (tie beam)* dan *poor (pile cap)*. Struktur portal ini dikonstruksi dengan bahan beton bertulang mutu K225 dan Baja U32

4.1. Jenis Kerusakan

Kerusakan yang terjadi pada bangunan diklasifikasikan menjadi dua type yaitu kerusakan struktural dan kerusakan non structural Tabel 3. Data-data kerusakan yang terjadi dikumpulkan melalui observasi langsung di lapangan. Kerusakan struktur misalnya berupa: retak-retak pada balok atau kolom yang menggambarkan pola keruntuhan: keruntuan lentur, keruntuhan geser atau kegagalan joint. Sedangkan kerusakan non struktur berupa kerusakan ringan berupa retak yang tidak mengikuti pola kegagalan struktur, misalnya retak yang terjadi pada tembok, retak pada plesteran tembok dll .

Tabel 3 Tingkat kerusakan struktur akibat terbentuknya sendi plastis

Keterangan	Simbol	Penjelasan
B		Menunjukkan batas linier yang kemudian diikuti terjadinya pelepasan pertama pada struktur
ID		Terjadi kerusakan yang kecil atau tidak berarti pada struktur, kekakuan struktur hampir sama pada saat belum terjadi gempa
LS		Terjadi kerusakan mulai dari kecil sampai tingkat sedang. Kekakuan struktur berkurang, tetapi masih mempunyai ambang yang cukup besar terhadap keruntuhan
CP		Terjadi kerusakan yang parah pada struktur sehingga kekuatan dan kekakuannya berkurang banyak. Kecelakaan akibat kejatuhan material mungkin terjadi
C		Batas maksimum gaya geser yang masih mampu ditahan gedung
D		Terjadinya degradasi kekuatan struktur yang besar, sehingga kondisi struktur tidak stabil dan hampir <i>collapse</i>
E		Struktur sudah tidak mampu menahan gaya geser dan hancur

4.2. Analisis Kerusakan dan Level Kinerja Seismik Struktur Gedung

Analisis kerusakan dilakukan dengan cara mengkomparasi antara: hasil pushover analysis dengan hasil observasi lapangan.

Hasil analisis *pushover* menghasilkan data seperti tercantum pada Tabel 4 :

Tabel 4. Evaluasi kinerja gedung sesuai ATC-40

Hasil	Vt (ton)	Dt (m)	Teff (s)	Beff (%)
Push arah x	596.758	0.193	2.290	15.8
Push arah y	636.447	0.192	2.392	20.6

4.3. Push arah x (portal arah memanjang)

Gaya geser dari evaluasi *pushover* adalah 596.758 ton. Gaya geser tersebut lebih besar dari gaya geser rencana 202.744 ton, sehingga struktur aman terhadap gempa rencana.

Displacement maksimum = $0.02.H = 0.02 \times 25 = 0.5$ m. *Displacement* dari analisis *pushover* gedung adalah 0,193 m. *Displacement pushover* < *displacement* maksimum, maka struktur aman ditinjau dari *displacement*.

Batasan rasio *drift* atap yang dievaluasi pada *performance point* (PP) pada gedung, dengan parameter maksimum total *drift* dan maksimum inelastik *drift*, maka :

Maksimum total *drift* =

$$\frac{D_t}{H_t} = \frac{0.193}{25} = 0.0077 \text{ m} \quad (1)$$

Maksimum inelastik *drift* =

$$\frac{(D_t - D_1)}{H_t} = \frac{(0.193 - 0.0182)}{25} = 0.0069 \quad (2)$$

Berdasarkan batasan rasio *drift* atap menurut ATC 40, hasil perhitungan maksimum total *drift* menunjukkan bahwa gedung termasuk dalam level kinerja *Immediate Occupancy (IO)*, dan maksimum inelastik *drift* gedung termasuk dalam level kinerja *Damage Control*.

4.4. Push arah y (portal arah pendek)

Gaya geser dari evaluasi *pushover* adalah 636.447 ton. Gaya geser tersebut lebih besar dari gaya geser rencana 202.744 ton, sehingga struktur aman terhadap gempa rencana.

Displacement maksimum = $0.02.H = 0.02 \times 25 = 0.5$ m. *Displacement* dari analisis *pushover* gedung adalah 0.192 m. *Displacement pushover* < *displacement* maksimum, maka struktur aman ditinjau dari *displacement*.

Batasan rasio *drift* atap yang dievaluasi pada *performance point* (PP) pada gedung, dengan parameter maksimum total *drift* dan maksimum inelastik *drift*, maka :

Maksimum total *drift* =

$$\frac{D_t}{H_t} = \frac{0.192}{25} = 0.0076 \text{ m} \quad (3)$$

Maksimum inelastik *drift* =

$$\frac{(D_t - D_1)}{H_t} = \frac{(0.192 - 0.0185)}{25} = 0.0069 \quad (4)$$

Berdasarkan batasan rasio *drift* atap menurut ATC 40, hasil perhitungan maksimum total *drift* menunjukkan bahwa gedung termasuk dalam level kinerja *Immediate Occupancy (IO)*, dan maksimum inelastik *drift* gedung termasuk dalam level kinerja *Damage Control*.

4.5. Mekanisme Terbentuknya Sendi Plastis

Setiap langkah pemberian beban diberikan skema perubahan kondisi struktur. Analisis *pushover* menunjukkan terjadinya sendi plastis pada setiap tahapan peningkatan beban. Pada saat awal sendi plastis belum terbentuk, itu merupakan kondisi awal sebelum struktur dibebani gaya gempa. Kemudian setelah pemberian gaya gempa statik ekuivalen dinaikkan pada proses *pushover*, maka akan mulai terbentuk sendi plastis. Terbentuknya sendi plastis juga menunjukkan simulasi mekanisme keruntuhan yang akan terjadi pada struktur yang akan dikaji. Hasil analisis *pushover*, menunjukkan bahwa sendi plastis terbentuk mulai dari titik ujung balok, sebelum akhirnya terbentuk sendi plastis di beberapa kolom. Hal ini berarti mekanisme keruntuhan yang diharapkan telah dapat dipenuhi, sehingga struktur beton bertulang yang ditinjau ini direncanakan cukup baik dari aspek mekanisme keruntuhan struktur akibat gaya gempa.

5. SIMPULAN

Simpulkan yang dapat dirumuskan dari kajian ini adalah bahwa struktur rangka beton bertulang yang ditinjau dalam penelitian ini, dalam kondisi level kinerja *Immediate Occupancy (IO)* menurut kriteria ATC 40, artinya terdapat kerusakan struktur tapi tidak signifikan, belum terjadi penurunan kekakuan struktur dan bangunan masih laik fungsi meskipun harus dilakukan perbaikan/ perkuatan pada bagian-bagian yang mengalami kerusakan.

6. REKOMENDASI

Hasil pengkajian ini hanya meliputi struktur atas, masih diperlukan evaluasi untuk struktur bawah (pondasi), karena posisi bangunan berada dekat

dengan alur sungai sehingga kerusakan pondasi mungkin terjadi atau lebih parah kondisinya bila terjadi pengurangan daya dukung tanah akibat liquifaksi pada saat terjadi gempa.

7. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Standar Nasional Indonesia. 2002. "Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung. SNI 03-1726-2002". Jakarta : SNI
- [2] ATC-33 Project, 1997 "FEMA 273 - NEHRP Guidelines For The Seismic Rehabilitation Of Buildings" , Building Seismic Safety Council, Washington, D.C.,
- [3] ATC-40. 1996. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Volume I. California.