

Monitoring Kesehatan Struktur Rangka Gedung Tidak Beraturan Berdasarkan Hasil Sensor Akselerometer

Wan Fikri Darmawan¹⁾, Reni Suryanita²⁾, Zulfikar Djauhari³⁾

¹⁾Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau, Jl. Soebrantas KM 12,5 Pekanbaru 2893

Email: wan.fikri@student.unri.ac.id

²⁾Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau, Jl. Soebrantas KM 12,5 Pekanbaru 2893

Email:reni.suryanita@eng.unri.ac.id

³⁾Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau, Jl. Soebrantas KM 12,5 Pekanbaru 2893

Email: zulfikar.djauhari@lecturer.unri.ac.id

ABSTRACT

Indonesian especially those in urban areas, currently actively undertaking development in various fields especially building construction. If the building is not maintained during the designated life of the plan, then the resistance of the structure of the building will quickly decrease and cause the building will quickly be damaged. Therefore, one of the solutions for maintaining structural resistance required building inspection by using accelerometer sensor. Result of recordings accelerometer sensor will be used as a reference in determining structural damage, so it can determine healthy from structure. This research is obtained to give information response structure from accelerometer data. Structural damage can determine using the equations developed by Jer Fu Wang, Chi Chang, and Shih Min. The building model is irregular reinforced concrete with three levels and height between level is 3,5 m. Building model will receive a dynamic loads from the results of accelerometer sensor. The vibration data used is June 4 and December 11 of 2016 at 06.00, 12.00, 18.00 WIB. The vibration data will be input for building model in doing the linear time history analysis and static nonlinear pushover by using the software finite element. From the analysis, maximum structure behavior is 11 December 2016 at 12.00 WIB. The value of stiffness for pushover analysis in the first step is 5,454, the second step is 5,243, the third step is 5,477, and the fourth step is 5,560. The value of stiffness for linear time history is 5,599. The value of SDI (Story Damage Index) in the first step is 0,026, the second step is 0,064, the third step 0,022 and the fourth step is 0,007. From the results of this SDI, the irregular reinforced concrete building is still in healthy condition.

Keywords: accelerometer sensor, structural damage, structural health monitoring

A. PENDAHULUAN

Masyarakat Indonesia, khususnya yang berada di daerah perkotaan, saat ini sedang giat-giatnya melaksanakan pembangunan di berbagai bidang khususnya dibangunan gedung. Disadari atau tidak, pembangunan gedung tersebut berkaitan langsung dengan keselamatan dari penghuni gedung maupun penghuni di sekitar gedung tersebut. Untuk menghindari segala sesuatu yang terjadi agar struktur gedung tetap aman, maka

perencanaan gedung harus benar-benar diperhitungkan secara cermat.

Pembangunan gedung tanpa disadari telah menyimpan bahaya yang berisiko tinggi. Bangunan-bangunan tersebut apabila tidak dirawat selama umur rencana yang telah ditentukan maka ketahanan struktur dari bangunan tersebut akan cepat berkurang dan menyebabkan bangunan akan cepat rusak.

Meminimalisir atau mencegah terjadinya kerusakan pada bangunan sebaiknya

dilakukan pemeriksaan bangunan. Pemeriksaan bangunan dapat didasarkan pada pemeriksaan langsung oleh manusia. Kondisi ini tentu saja kurang praktis bila keadaan bangunan yang besar dan bersifat spasial. Pemeriksaan secara langsung sangat tergantung pada kondisi pemeriksa dan dalam kondisi tertentu dapat membahayakan pemeriksa itu sendiri. Selain itu, kerusakan struktur sering tersembunyi, sehingga tidak mudah teramati secara langsung. Berdasarkan keadaan ini, pemeriksaan kesehatan dan deteksi kerusakan secara otomatis diperlukan agar dapat dicapai hasil yang baik. Untuk dapat memantau kesehatan struktur bangunan, diperlukan pengamatan, perekaman, dan pengevaluasian parameter-parameter yang ada pada struktur bangunan untuk menilai kerusakan terhadap suatu bangunan secara berkelanjutan. penggunaan sensor bisa dijadikan sebagai alat untuk melakukan pemeriksaan secara otomatis karena memiliki tingkat persebaran tinggi, biaya murah, serta kemudahan dalam proses instalasi dan tidak menggunakan kabel sebagai media transmisinya, sehingga data hasil pengukuran yang didapat sangat akurat. Sensor yang sering digunakan untuk melakukan pengamatan struktur baik itu bangunan, jembatan, bendungan, dan struktur lainnya salah satunya adalah sensor akselerometer. Sensor ini akan menghasilkan data percepatan dari suatu bangunan.

Mendeteksi kesehatan struktur terlebih dahulu ditentukan kerusakan-kerusakan struktur yang terjadi. Ada banyak algoritma untuk mendeteksi kerusakan struktur salah satunya yang dikembangkan oleh Wang *et al.* (2007) Pada metode ini indeks kerusakan struktur dihitung pada setiap tingkat dengan mengetahui massa setiap lantai, frekuensi modal dari *mode shapes* tertentu, dan perpindahan setiap lantai.

Berdasarkan latar belakang tersebut, beberapa permasalahan berikut dapat dirumuskan:

1. Bagaimana respon struktur bangunan rangka gedung tidak beraturan akibat getaran melalui hasil sensor akselerometer.
2. Bagaimana kesehatan struktur bangunan rangka gedung tidak beraturan akibat getaran melalui hasil sensor akselerometer.

Adapun tujuan dari penulisan ini adalah untuk memberikan informasi perilaku struktur bangunan dengan melakukan analisis terhadap getaran dari hasil sensor akselerometer yang terjadi serta mengidentifikasi kerusakan struktur dari bangunan dan menilai kesehatan struktur bangunan.

B. TINJAUAN PUSTAKA

B.1 Sensor Akselerometer

Percepatan merupakan suatu keadaan berubahnya kecepatan terhadap waktu. Bertambahnya suatu kecepatan dalam suatu rentang waktu disebut juga percepatan (*acceleration*). Jika kecepatan semakin berkurang daripada kecepatan sebelumnya, disebut *deceleration*.

Akselerometer merupakan sebuah perangkat yang mampu mengukur sebuah kekuatan akselerasi. Kekuatan ini mungkin statis (diam) seperti halnya kekuatan konstan dari gravitasi bumi, atau bisa juga bersifat dinamis sesuai dengan gerakan atau getaran yang direkam oleh alat akselerometer seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Sensor Akselerometer

Akselerometer adalah sebuah transduser yang berfungsi untuk mengukur percepatan, mendeteksi dan mengukur getaran, ataupun

untuk mengukur percepatan gravitasi bumi. akselerometer juga dapat digunakan untuk mengukur getaran yang terjadi pada kendaraan, bangunan gedung bertingkat, dan getaran mesin.

B.2 Monitoring Kesehatan Struktur

Menurut Nababan (2008) *Structural Health Monitoring* (SHM) adalah suatu ilmu yang bertujuan untuk mendeteksi kerusakan dengan mengintegrasikannya ke dalam struktur untuk memonitor kesehatan dari suatu bangunan. Teknologi ini dapat memperpanjang umur pelayanan bangunan karena penurunan kemampuan dan kerusakan dapat diidentifikasi lebih awal (peringatan dini) sebelum terjadinya kerusakan yang lebih parah dan membutuhkan biaya rehabilitasi yang lebih besar. SHM ini didefinisikan sebagai penginderaan tak rusak dan analisa karakter struktur termasuk respon struktur untuk mendeteksi perubahan yang mengindikasikan adanya kerusakan atau penurunan kemampuan struktur.

Teknik dari SHM dapat dikategorikan ke dalam beberapa tingkat identifikasi sebagai berikut Sohn *et al.* (2003):

- Level 1: Menentukan apakah adanya kerusakan pada struktur
- Level 2: Menentukan adanya kerusakan serta lokasi kerusakan
- Level 3: Menentukan adaanya kerusakan, lokasinya serta menilai tingkat kerusakan
- Level 4: Menentukan adanya kerusakan, lokasinya, tingkat kerusakan serta memperkirakan usia pakai struktur.

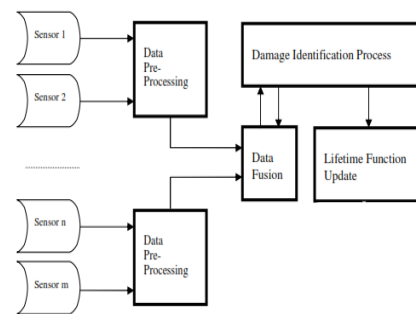
Secara umum tujuan diadakannya *Structural Health Monitoring* ini adalah:

- Menyediakan data respon dinamis dari suatu struktur untuk verifikasi asumsi-asumsi disain yang digunakan untuk angin, gempa, dsb.
- Membuat sistem monitoring kesehatan bangunan yang handal sehingga

memiliki fungsi pengecekan sendiri untuk memonitor adanya anomali didalam sistem.

- Menyediakan data untuk analisa dan evaluasi kesehatan struktur bangunan.
- Menyediakan data untuk memperkirakan kerusakan struktur dan penurunan peforma bangunan untuk menentukan jadwal inspeksi dan pemeliharaan periodik.

Sensor yang bekerja secara terus menerus pada suatu infrastruktur akan menghasilkan data yang sangat banyak dan perlu diatur, disaring, divalidasi, dan ditafsirkan untuk menghasilkan ukuran indeks kondisi yang diinginkan (Enrico, Grosso, & Grosso, 2015). Skema dari kinerja sensor dalam mendeteksi kesehatan struktur dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema Kinerja Sensor Dalam Mendeteksi Kesehatan

Setiap data dari suatu sensor yang ditempatkan di suatu bangunan terlebih dahulu diolah untuk mendapatkan percepatan terbesar, dan setelah itu identifikasi kesehatan struktur bisa dilakukan.

B.3 Respon History Analysis (RHA)

Berdasarkan SNI 03-1726-2012 Pasal 7.3, bahwa analisis respon riwayat waktu (*time history analysis*) terdiri dari analisis respons dinamik riwayat waktu linier dan analisis respons dinamik riwayat waktu non linier. Analisis respons dinamik riwayat waktu linier adalah cara analisis untuk

menentukan riwayat waktu respon dinamik suatu struktur gedung tiga dimensi yang berperilaku elastik penuh terhadap gerakan tanah akibat gempa rencana pada tahap pembebanan gempa nominal sebagai data masukan, dimana respon dinamik dalam setiap interval waktu dihitung dengan metode integrasi langsung atau dapat juga menggunakan metode analisis diagram. Sedangkan analisis respons dinamik riwayat waktu non linier, adalah suatu cara analisis untuk menentukan dinamika suatu struktur gedung tiga dimensi yang berperilaku elastik penuh (linier) maupun kondisi elastoplastis (non linier) terhadap gerakan tanah akibat gempa rencana pada tahap pembebanan gempa nominal sebagai data masukan, dimana respon dinamik dalam setiap interval waktu dihitung dengan metode integrasi langsung.

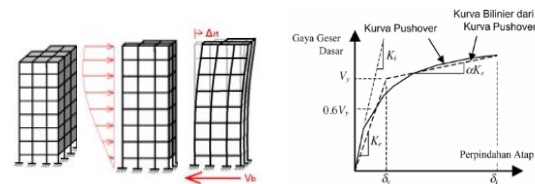
B.4 Analisis Statik Beban Dorong

Menurut SNI 1726- 2002, analisis statik beban dorong (*pushover*) adalah suatu analisis nonlinier statik, yang dalam analisisnya pengaruh gempa rencana terhadap struktur bangunan gedung dianggap sebagai beban statik pada pusat massa masing-masing lantai, yang nilainya ditingkatkan secara berangsur-angsur sampai melampaui kapasitas pembebanan struktur tersebut sehingga menyebabkan terjadinya pelepasan (sendi plastis) pertama di dalam struktur bangunan gedung, kemudian dengan peningkatan beban lebih lanjut mengalami perubahan bentuk pasca-elastik yang besar sampai mencapai target perpindahan yang diharapkan atau sampai mencapai kondisi plastik.

Tujuan analisis beban dorong adalah mengevaluasi perilaku seismik struktur terhadap beban gempa rencana, yaitu memperoleh nilai faktor daktilitas aktual dan faktor reduksi gempa aktual struktur, memperlihatkan kurva kapasitas (*capacity*

curve), dan memperlihatkan skema kelelahan (distribusi sendi plastis) yang terjadi.

Metode analisis statik beban dorong merupakan metode dengan pendekatan nonlinier statik, yang dapat digunakan pada struktur bangunan gedung beraturan, dengan karakteristik dinamik mode tinggi yang tidak dominan. Salah satu hasil analisis yang mempunyai manfaat penting yaitu kurva kapasitas seperti terlihat pada Gambar 3.



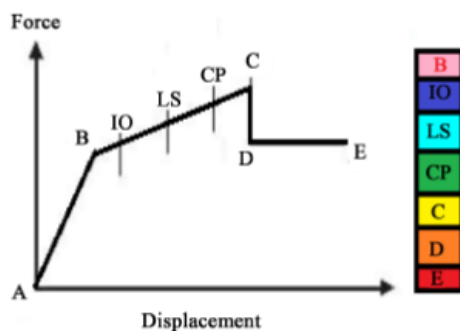
Gambar 3. Kurva Kapasitas

B.5 Level Kinerja

Performance levels berdasarkan FEMA 356 berturut-turut dari respon yang paling kecil, terdiri atas:

1. *Fuly Operational (FO)* adalah kondisi yang mana bangunan dapat beroperasi langsung setelah gempa terjadi Kerusakan pada tahap ini sangat kecil sehingga tidak menjadi masalah (*damage state*). Pada *software* elemen hingga, kondisi ini ditandai dengan warna merah muda.
2. *Immediate Occupancy (IO)* adalah suatu kondisi yang mana struktur secara umum masih aman. Kerusakan yang ditimbulkannya sifatnya minor. Pada *software* elemen hingga, kondisi ini ditandai dengan warna biru tua.
3. *Life Safety (LS)* adalah suatu kondisi yang mana struktur bangunan mengalami kerusakan sedang dan bangunan masih stabil. Pada *software* elemen hingga, kondisi ini ditandai dengan warna biru muda.
4. *Collapse Prevention (CP)* adalah suatu kondisi yang mana struktur bangunan mengalami kerusakan parah. Elemen non-struktur sudah runtuh. Pada *software*

elemen hingga, kondisi ini ditandai dengan warna hijau.



Gambar 4. Tahapan Keruntuhan Sendi Plastis

B.6 Indeks Kerusakan

Kerusakan struktur dapat dibedakan pada tiga skala yaitu:

- Skala local, dimana kerusakan terjadi pada tingkat *cross-section*. Sebagai contoh penjelasan adalah kerusakan bagian beton akibat tegangan yang melebihi f'_c dari beton bertulang, ataupun sebaliknya tegangan pada baja yang melebihi tegangan plastisnya pada beton bertulang.
- Skala menengah atau *intermediate*, dimana kerusakan struktur dilihat pada skala suatu elemen atau member penyusun suatu sistem struktur.
- Skala global, dimana kerusakan dilihat pada skala yang lebih besar, yaitu suatu sistem struktur secara utuh.

Setiap skala kerusakan baik itu lokal, *intermediate*, dan global diukur oleh suatu indeks kerusakan. Dimana indeks ini biasanya tidak memiliki dimensi dan memiliki nilai yang berkisar dari 0 hingga 1 untuk suatu bagian yang tidak rusak sama sekali dan 1 untuk bagian yang mengalami kerusakan total atau runtuh.

Indeks kerusakan bisa dilakukan dengan menggunakan persamaan sederhana yang dikembangkan oleh Wang *et al.* (2007). Persamaan ini dinyatakan dalam bentuk massa per tingkat, frekuensi modal, dan

mode shapes tertentu. *Story Damage Index* (SDI) atau indeks kerusakan tingkat adalah perbandingan antara tingkat kekakuan sebelum dan sesudah kerusakan yang dirumuskan kedalam Persamaan 1.

$$SDI = 1 - \frac{k_i^*}{k_i} = 1 - \frac{\omega_j^2 \sum_{i=1}^N \frac{m_i \phi_{ij}^*}{m_i \Delta \phi_{ij}^*}}{\omega_j^2 \sum_{i=1}^N \frac{m_i \phi_{ij}}{m_i \Delta \phi_{ij}}} \quad (1)$$

Dimana:

- ω = Frekuensi natural struktur
- m = Massa setiap tingkat
- ϕ^* = Perpindahan setelah terjadi kerusakan setiap tingkat
- ϕ = Perpindahan ketika belum terjadi kerusakan setiap tingkat
- $\Delta \phi^*$ = Selisih perpindahan setiap tingkat setelah terjadi kerusakan
- $\Delta \phi$ = Selisih perpindahan setiap tingkat sebelum terjadi kerusakan
- N = Jumlah tingkat

Cara mendapatkan variabel ketika terjadi kerusakan (k^*) adalah dengan melakukan analisis *pushover*. Cara mendapatkan variabel sebelum terjadi kerusakan (k) adalah dengan melakukan analisis *time history*. Parameter untuk menentukan kerusakan pada struktur telah dijelaskan oleh Thakur *et al.* (2012) dan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kisaran yang Diusulkan untuk Indeks Kerusakan dan Keadaan Kerusakan

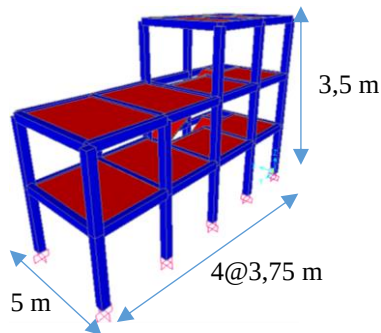
Degree of Damage	Physical Apperance	Range of Proposed Damage Index	Damage State
Minor	Minor cracks in beam and column	0-0.2	Minor damage
Moderate	Flexural and shear cracking in beam and column, some element may reach	0,2-0,4	Repairable damage

Degree of Damage	Physical Apperance	Range of Proposed Damage Index	Damage State
	yielding of steel		
Severe	Extensive crushing of concrete disclosure of bulked reinforcement	0,4-0,6	Irreparable damage
Complete Damage	Partial or total collapse of building	>0,6	Nearly collapse

C. METODE PENELITIAN

C.1 Data Struktur

Struktur gedung yang ditinjau memiliki bentuk tidak beraturan seperti terlihat pada Gambar 5.

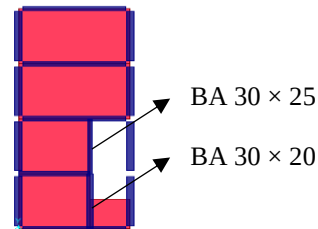


Gambar 5. Rangka Model Gedung

Model yang digunakan dalam analisis ini adalah perkantoran dengan 3 tingkat, ketinggian antar tingkat 3,5 m. Material dan dimensi komponen struktur yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Beton struktural dengan karakteristik:
 - Kuat tekan beton, $f'_c = 30$ MPa
 - Tegangan leleh tulangan, $f_y = 240$ MPa
 - Tegangan tarik, $f_u = 400$ MPa
2. Dimensi elemen struktur yang digunakan adalah sebagai berikut:
 - Balok induk 40×30 cm²
 - Balok anak pada bentang 4 tingkat 1, 2, dan 3 adalah 30×25 cm²

- Balok anak pada bentang 3 tingkat 1, 2, dan 3 adalah 30×20 cm² seperti terlihat pada gambar 6
- Kolom 40×40 cm²
- Tebal pelat lantai 11 cm



Gambar 6. Balok Anak pada Lantai 1, Lantai 2 dan Lantai 3

C.2 Data Beban

Data beban yang digunakan pada penelitian ini berupa beban mati struktural, beban mati tambahan, dan, beban hidup berdasarkan SNI 03-1727-1989 serta beban getaran yang didapat dari rekaman sensor akselerometer.

Beban mati struktural langsung dihitung secara otomatis dari program elemen hingga. Beban mati tambahan yang digunakan adalah dinding pasangan batako yang diambil sebesar 200 kg/m².

Beban hidup pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Beban hidup pada lantai ruang kerja = 2,5 kN/m²
- Beban hidup pada tangga = 3 kN/m²
- Beban hidup pada lantai atap = 1 kN/m²

C.3 Beban Getaran

Beban getaran adalah beban percepatan yang terekam oleh sensor akselerometer yang terpasang di kolom bangunan seperti terlihat pada Gambar 7. Masing-masing sensor yang terpasang pada kolom nantinya akan membaca perilaku struktur pada tiap lantainya dan langsung mengirimkannya ke *gateway*. Fungsi dari *gateway* ini adalah percepatan struktur yang dibaca oleh sensor akan ditampilkan dalam bentuk gambar, data, dan grafik.



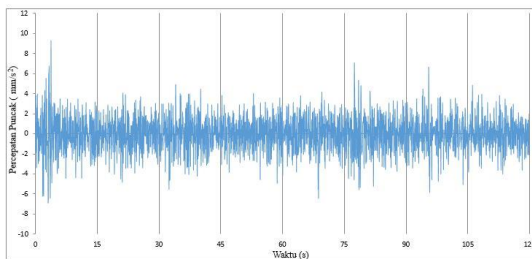
Gambar 7. Posisi Sensor Akselerometer pada Tingkat 2 dan 3

Data getaran yang digunakan dalam penelitian ini hanya data getaran yang ada pada lantai dua. Data getaran yang digunakan adalah berupa catatan respon riwayat waktu (*time history*).

Data hasil sensor akselerometer yang digunakan terdiri dari 6 data dan masing-masing mempunyai percepatan maksimum (Acc max). Data tersebut antara lain:

1. 4 Juni 2016 jam 06.00 WIB (Acc max = $1,067 \text{ mm/s}^2$)
2. 4 Juni 2016 jam 12.00 WIB (Acc max = $-10,208 \text{ mm/s}^2$)
3. 4 Juni 2016 jam 18.00 WIB (Acc max = $1,454 \text{ mm/s}^2$)
4. 11 Desember 2016 jam 06.00 WIB (Acc max = $4,369 \text{ mm/s}^2$)
5. 11 Desember 2016 jam 12.00 WIB (Acc max = $9,168 \text{ mm/s}^2$)
6. 11 Desember 2016 jam 18.00 WIB (Acc max = $-13,398 \text{ mm/s}^2$)

Contoh besaran dari beban getaran akselerometer dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8 Rekaman Sensor Akselerometer 4 Juni 2016 Jam 12.00 WIB

Setiap data riwayat waktu tersebut akan menjadi *input* dalam melakukan analisis respon struktur ke dalam *software* elemen

hingga menggunakan analisis *linier time history*. Data respon struktur terbesar akan menjadi acuan dalam melakukan analisis *static-nonlinier pushover*.

C.4 Tahapan Analisis Riwayat Waktu

Analisis *time history* dilakukan dengan cara memodelkan struktur gedung sesuai dengan data yang digunakan ke dalam *software* elemen hingga. Berikut penjelasan tahapan analisis dengan *software* elemen hingga:

1. Memodelkan struktur sesuai dengan data material dan dimensi yang telah ditetapkan. Pemodelan seluruh komponen struktur dimulai dari balok, kolom, pelat lantai, dan tangga dilakukan satu persatu dalam *software* elemen hingga.
2. Memasukkan beban hidup yang akan dan beban mati tambahan yang digunakan.
3. Melakukan analisis ragam akibat berat sendiri.
4. Memasukkan data riwayat waktu sebagai beban getaran sesuai dengan data akselerometer yang ditinjau.
5. Menganalisis perilaku struktur hasil dari analisis linier riwayat waktu berupa perpindahan, percepatan, dan kecepatan dari data akselerometer yang telah ditinjau.
6. Menentukan perilaku struktur maksimum dari data riwayat waktu yang ditinjau
7. Menentukan perpindahan setiap tingkat (Δ) dan selisih perpindahan pada setiap tingkat ($\Delta\Delta$) serta massa setiap tingkat (m).

C.5 Tahapan Analisis Statik Non-linier Pushover

Analisis *non-linier pushover* bertujuan untuk mendapatkan variabel-variabel yang dibutuhkan untuk identifikasi kerusakan struktur. Langkah-langkah dalam menganalisisnya adalah sebagai berikut:

1. Memodelkan struktur sesuai dengan data material dan dimensi yang telah ditetapkan. Pemodelan seluruh komponen struktur dimulai dari balok, kolom, pelat lantai, dan tangga dilakukan satu persatu.
2. Menentukan titik yang dijadikan sebagai beban dorong (*pushover*).
3. Mendefinisikan nilai sendi plastis (*hinges properties*). Penelitian ini menggunakan format *default* yang ada pada *software* elemen hingga dikarenakan *software* tersebut diadopsi berdasarkan FEMA-356.
4. Menentukan variabel-variabel yang dibutuhkan yaitu, perpindahan setiap tingkat (Δ^*) dan selisih perpindahan pada setiap tingkat ($\Delta\Delta^*$). Setiap tahap dalam analisis Statik *Non-linier Pushover* dicatat berapa besarnya Δ^* dan $\Delta\Delta^*$. Pada penelitian ini, *pushover* berfungsi sebagai *damage analysis* atau analisis merusak.

C.5 Tahapan Analisis Kesehatan Struktur

Analisis kesehatan struktur bertujuan untuk mengetahui tingkat kerusakan struktur. Metode yang digunakan untuk perhitungan ini adalah metode yang telah dikembangkan oleh Wang *et al.* (2007). Hasil pembagian antara analisis *pushover* dan analisis *time history* akan didapati nilai dari indeks kerusakan dan keadaan kerusakan akibat beban getaran yang terjadi.

D. HASIL DAN PEMBAHASAN

D.1 Analisis Rekaman Sensor

Sensor akselerometer yang berada pada kolom bangunan setiap waktu akan terus merekam percepatan pada kolom bangunan. Untuk mempermudah dalam pengambilan data, hasil rekaman sensor tersebut dibagi menjadi 10 menit. Artinya, setiap 10 menit rekaman sensor akselerometer akan mengeluarkan data percepatan. Kemudian untuk meningkatkan kapasitas memori yang direkam oleh sensor, setiap 3 bulan data sebelumnya akan otomatis terhapus.

Data sensor yang digunakan pada penelitian ini adalah data pada tanggal 4 Juni dan 11 Desember 2016 Jam 06.00, 12.00, dan 18.00 WIB. Adapun tujuan dari pemilihan tanggal tersebut adalah untuk melihat perilaku struktur ketika pagi, siang, dan sore hari selama dua hari. Hasil rekaman sensor tersebut akan menghasilkan data dalam bentuk percepatan. Percepatan puncak maksimum dari enam data diatas adalah pada tanggal 11 Desember 2016 jam 12.00 WIB, hal ini disebabkan banyaknya aktifitas yang terjadi baik didalam bangunan ataupun disekitar bangunan pada tanggal tersebut.

D.2 Analisis Ragam

Analisis ragam struktur menjabarkan hasil dari getaran bebas yang terjadi pada model bangunan yang ditinjau. Berdasarkan SNI 1726-2012 jumlah ragam yang diambil menghasilkan partisipasi massa ragam melebihi 90% massa aktual arah horizontal tegak lurus dari struktur. Pada penelitian ini jumlah ragam yang digunakan adalah 12 ragam. Tabel 2 memperlihatkan hasil partisipasi massa ragam.

Tabel 2 Partisipasi Massa Ragam

Partisipasi Massa Ragam (%)		Keterangan
Arah X	Arah Y	
98,239	92,352	Ya

Periode fundamental getaran (*fundamental period of vibration*) adalah periode pada ragam pertama dari hasil analisis ragam karena nilainya yang paling besar.

Tabel 3 Nilai Periode dan Frekuensi Alami Bangunan

Mode	Periode (detik)	Frekuensi (siklus/detik)
1	0,573	1,745
2	0,400	2,498
3	0,287	3,489

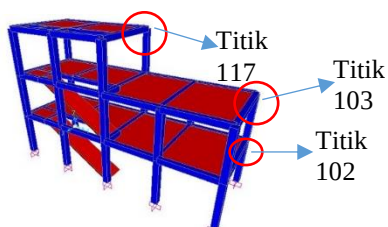
Mode	Periode (detik)	Frekuensi (siklus/detik)
4	0,184	5,384
5	0,158	6,326
6	0,141	7,111
7	0,129	7,748
8	0,116	8,649
9	0,105	9,571
10	0,102	9,819
11	0,095	10,485
12	0,095	10,583

Periode alami struktur bangunan mencerminkan tingkat *flexibility* struktur tersebut. Semakin besar nilai periode fundamental struktur maka semakin besar tingkat *flexibility* struktur tersebut.

Bentuk ragam getaran secara umum terdiri dari dua jenis bentuk, yaitu translasi dan torsi atau bisa disebut puntir. Translasi adalah perubahan bentuk struktur yang berupa pergerakan suatu titik (*joints*) secara horizontal ke arah X atau ke arah Y. Sedangkan torsi atau puntir adalah perubahan bentuk yang terpuntir terhadap sumbu vertikalnya. Bentuk ragam (*mode shapes*) akan bervariasi dari ragam ke-1 hingga ke-12.

D.3 Analisis Riwayat Waktu

Analisis riwayat waktu pada penelitian ini meliputi perpindahan, percepatan, dan kecepatan berdasarkan data getaran sensor akselerometer pada titik 102 (tingkat 1), titik 103 (tingkat 2), dan titik 117 (tingkat 3) seperti terlihat pada Gambar 9. Hasil dari sensor akselerometer dalam penelitian ini akan menjadi *output* dalam analisis *linier* riwayat waktu menggunakan *software* elemen hingga.



Gambar 9. Titik yang Dipilih untuk Dianalisis

Hasil dari analisis riwayat waktu ini menunjukkan bahwa nilai respon struktur yaitu perpindahan mengalami peningkatan seiring bertambahnya ketinggian bangunan. Respon struktur terbesar adalah pada tanggal 11 Desember 2016 jam 12.00 WIB. Respon struktur terbesar dari analisis ini akan dianalisis kembali menggunakan analisis *linier time history* dengan menggunakan *software* elemen hingga untuk mendapatkan perpindahan pada setiap tingkat. Untuk mengetahui perpindahan setiap tingkat terlebih dahulu diketahui titik pusat massanya. Gambar 10 akan menjelaskan perpindahan maksimum dari setiap tingkat.

Tabel 4 Nilai Perpindahan Tiap Tingkat pada Analisis Riwayat Waktu

Tingkat	ϕ (Perpindahan, mm)
1	0,088
2	0,209
3	0,316

D.4 Analisis *Static-nonlinier Pushover*

Hasil dari analisis *pushover* yang ditinjau adalah perpindahan pada setiap tingkat dalam setiap tahap *pushover*. Adapun titik yang dijadikan sebagai beban pada analisis *pushover* ini adalah pada titik 117 yaitu searah sumbu X seperti terlihat pada Gambar 9.

Hasil analisis *static non-linier pushover* pada penelitian ini terdapat empat *tahap* yang menjadi acuan dalam perhitungan kesehatan bangunan. Masing-masing *tahap* mengindikasikan adanya perubahan sendi plastis yang terjadi akibat pembebanan statik.

Analisis *non-linier static pushover* pada penelitian ini bertujuan untuk mencari besaran perpindahan pada setiap lantai dari tahap satu sampai empat. Besarnya nilai perpindahan dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Nilai Perpindahan Setiap Tingkat pada Analisis *Pushover*

Tahap	ϕ^* (Perpindahan, mm)		
	Tingkat 1	Tingkat 2	Tingkat 3
1	2.1112	4.9626	7.2896
2	21.7627	56.0223	88.8835
3	58.5028	128.4912	195.2519
4	98.6333	206.5063	308.802

D.5 Hasil Monitoring Kesehatan Struktur

Hasil analisis perpindahan riwayat waktu (*time history*) dan analisis *static non-linier pushover* serta parameter-parameter yang telah dijelaskan sebelumnya, dapat dihitung indeks kerusakan pada bangunan. Berdasarkan persamaan yang dikembangkan oleh Wang *et al.* (2007), langkah-langkah perhitungannya adalah sebagai berikut:

- 1) Menentukan berapa besarnya nilai kekakuan (k^*) yang didapatkan dari analisis ketika terjadi kerusakan, yaitu analisis *static non-linier pushover*.
- 2) Menentukan berapa besarnya kekakuan (k) yang didapatkan dari analisis ketika terjadi kerusakan, yaitu analisis *linier time history*.
- 3) Menentukan nilai SDI (*story damage index*) dan mengklasifikasikan bangunan kedalam derajat kerusakan seperti yang dijelaskan pada Tabel 1.

Hasil dari perhitungan pada analisis *static nonlinier pushover* dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6 Hasil Perhitungan Kekakuan pada Analisis *Pushover* (k^*)

Tahap	k^*
1	5,454
2	5,263
3	5,477
4	5,560

Hasil dari kekakuan (k^*) pada analisis *static nonlinier pushover* diatas dapat disimpulkan bahwa, nilai k^* bertambah seiring bertambahnya tahap pada analisis

pushover. Hasil perhitungan kekakuan pada analisis *linier time history* (k) adalah 5,599.

Hasil dari perhitungan diatas akan digunakan untuk menentukan SDI (*Story Damage Index*) dengan cara membandingkan hasil kekakuan pada analisis *pushover* (k^*) dengan hasil kekakuan pada analisis *time history*. Hasil perhitungan SDI dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7 Hasil Perhitungan SDI (*Story Damage Index*)

Tahap	SDI
1	0,026
2	0,064
3	0,022
4	0,007

Hasil perhitungan SDI di atas dapat disimpulkan bahwa struktur bangunan masih dikategorikan sehat. Hal ini bisa dilihat dari nilai SDI terbesar yaitu pada tahap 2 dengan nilai 0,064, nilai ini masih termasuk kedalam klasifikasi derajat kerusakan *minor damage*. Artinya, hanya ada kerusakan kecil pada balok dan kolom bangunan tinjauan.

E. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian tugas akhir ini dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Dari hasil respon struktur berupa perpindahan, kecepatan, dan percepatan untuk titik 102, 103, dan 117 pada tanggal 4 Juni 2016 dan 11 Desember 2016 jam 06.00, 12.00, 18.00 dengan melakukan analisis *linier time history* didapat nilai respon struktur terbesar pada tanggal 11 Desember 2016 jam 12.00 WIB.
2. Analisis *linier time history* pada tanggal 11 Desember 2016 jam 12.00 WIB didapat nilai perpindahan pada tingkat 1 sebesar 0,088 mm, tingkat 2 sebesar 0,209 mm, dan tingkat 3 sebesar 0,316 mm.
3. Analisis *static-nonlinier pushover* pada model bangunan didapat nilai perpindahan pada tingkat tiga untuk tahap satu adalah

7,2896 mm, tahap dua adalah 88,8835 mm, tahap tiga adalah 195,2519 mm, tahap empat adalah 308,802 mm.

4. Nilai kekakuan untuk analisis setelah rusak (k^*) pada tahap 1 adalah 5,454, tahap 2 adalah 5,243, pada tahap 3 adalah 5,477, dan pada tahap 4 adalah 5,560. Nilai kekakuan untuk analisis sebelum rusak (k) adalah 5,599.
5. Nilai indeks kerusakan yang didapat dengan menggunakan persamaan yang dikembangkan oleh Jer-Fu Wang, Chi-Chang, dan Shih-Min pada tahap 1 adalah 0,026, pada tahap 2 adalah 0,064 pada tahap 3 adalah 0,022, dan pada tahap 4 adalah 0,007.
6. Dari hasil perhitungan SDI (*Story Damage Index*), struktur gedung beton bertulang tidak beraturan ini berada dalam kondisi *minor damage* artinya hanya sedikit terjadi retak pada bagian balok dan kolom.

E. SARAN

Adapun beberapa saran apabila dilakukan penelitian lebih lanjut yaitu sebagai berikut:

1. Data struktur dan data beban sebaiknya semirip mungkin dengan gedung aslinya, untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat.
2. Sebagai bahan pertimbangan hasil analisis penelitian ini dapat dibandingkan dengan metode analisis Indeks Kerusakan (*Damage Index*) lainnya, seperti metode Roufaiel dan Meyer, Hwang dan Scribner, Cosenza, Bozórquez, dan metode indeks kerusakan lainnya.
3. Data getaran atau data gempa yang digunakan bisa divariasikan dengan menggunakan data getaran atau data gempa akselelogram di Indonesia seperti data gempa Aceh, Padang, Mentawai, dan data gempa lainnya untuk melihat kesehatan struktur bangunan beton bertulang pada penelitian ini.

G. DAFTAR PUSTAKA

- Enrico, A., Grosso, D., & Grosso, A. E. D. E. L. (2015). *Structural Health Monitoring Standards*, (September 2014).
- FEMA 356. (2000). *FEMA 356*.
- Nababan, P. H. a. (2008). *Structural Health Monitoring System Alat Bantu Mempertahankan Usia Teknis Jembatan. Construction and Maintenance of Main Span Suramadu Bridge*, 1–2.
- Sni-1726- 2002. (2002). Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung, 7798393(April).
- SNI 03-1726-2012. (2012). Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung. *Sni 03-1726-2012*, 103.
- SNI 03-1727-1989. (1989). Pedoman Perencanaan Pembebanan Untuk Rumah dan Gedung.
- Sohn, H., Farrar, C. R., Hemez, F. M., & Czarnecki, J. J. (2003). A Review of Structural Health Monitoring Literature : 1996-2001. *Structural Health Monitoring, LA-13976-M(LA-13976-MS)*, 1996–2001.
- Thakur, S. R., Patil, S. P., & Sanagle, K. K. (2012). Evaluation of Damage Index of High Rise Building Using Nonlinear Static Seismic Analysis, 2(10), 595–600.
- Wang, J., Lin, C., & Yen, S. (2007). A story damage index of seismically-excited buildings based on modal frequency and mode shape, 29, 2143–2157.