



## Evaluasi Kesehatan Struktur Bangunan berdasarkan Respon Dinamik Berbasis Data Akselerometer

Wan Fikri Darmawan, Reni Suryanita, \*Zulfikar Djauhari

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

<sup>\*)</sup>[zulfikar.djauhari@lecturer.unri.ac.id](mailto:zulfikar.djauhari@lecturer.unri.ac.id)

Received: 28 September 2017 Revised: 16 November 2017 Accepted: 30 November 2017

### Abstract

*The aim of the research is to analysis the health of a simple frame structure based on accelerometer data. The research is a preliminary study which used the accelerometer data in the time history analysis of the structure. The parameters has been used in the study are the Story Damage Index (SDI), the Approximate Story Damage Index (ASDI), the Flexibility Damage Index (MFDI), and the Park Ang Damage Index. The finite element analysis is used to identify the damage of building structures through the pushover analysis. The study has conducted the minor damage index, physical appearance to check the cracked beam and concrete column. The damage index average is in the range 0-0,08. It can be concluded the building is still able to withstand the earthquake load. However, the building is stated in a minor damage condition after the earthquake occurred.*

**Keywords:** *Story damage index, approximate story damage index, modal flexibility damage index, park ang damage index*

### Abstrak

*Penelitian ini merupakan penelitian awal untuk mengkaji kesehatan struktur bangunan rangka sederhana berbasis data akselerometer. Untuk mencapai tujuan tersebut, data akselerometer dijadikan data riwayat waktu (time history) dalam analisis dinamik struktur tersebut. Parameter untuk mengetahui kesehatan struktur adalah Story Damage Index (SDI), Approximate Story Damage Index (ASDI), Modal Flexibility Damage Index (MFDI), serta Park Ang Damage Index. Analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi kerusakan struktur bangunan adalah analisis beban dorong (pushover analysis). Hasil analisis menunjukkan bahwa derajat kerusakan minor, penampakan fisik adalah retak pada beton dan kolom, indeks kerusakan (damage index) rata-rata berada pada rentang 0-0,08. Sehingga dapat disimpulkan bahwa jika gedung tersebut mengalami gaya gempa yang identik dengan data akselerometer, maka struktur gedung masih mampu menahan gaya gempa dan hanya mengalami kerusakan kecil.*

**Kata-kata kunci:** *Story damage index, approximate story damage index, modal flexibility damage index, park ang damage index*

### Pendahuluan

Bangunan tanpa disadari telah menyimpan bahaya yang berisiko tinggi akibat pembebanan yang diterimanya. 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. Berkurangnya ketahanan struktur disebabkan oleh beberapa

faktor diantaranya yaitu salah dalam melakukan perencanaan bangunan, kurangnya kontrol kualitas, suhu yang sering berubah-ubah, dan karena beban yang sering berulang. Apabila faktor-faktor tersebut tidak diperhatikan maka akan menyebabkan kerugian yang sangat besar dalam hal biaya untuk pemeliharaannya kembali, bahkan kerugian yang paling besar adalah kehilangan nyawa. Sehingga tentu saja dibutuhkan *monitoring* kesehatan struktur bangunan (*Structures Health*

*Monitoring*). Salah satu cara sederhana untuk mengetahui kesehatan struktur adalah dengan cara mengetahui frekuensi alamiah gedung dengan bantuan perangkat alat akselerometer (*accelerometer unit*). Selanjutnya hasil dari data akselerometer tersebut dijadikan bahan analisis kesehatan struktur.

*Structural Health Monitoring* (SHM) adalah suatu ilmu yang bertujuan untuk mendeteksi kerusakan dengan mengintegrasikannya kedalam 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 (Nababan, 2008).

Teknik dari SHM dapat dikategorikan ke dalam beberapa tingkat identifikasi sebagai berikut (Sohn, Farrar, Hemez, & Czarnecki, 2003). Level 1: Menentukan apakah adanya kerusakan pada struktur. Level 2: Menentukan adanya kerusakan serta lokasi kerusakan. Level 3: Menentukan adanya kerusakan, lokasinya serta menilai tingkat kerusakan. Level 4: Menentukan adanya kerusakan, lokasinya, tingkat kerusakan serta memperkirakan usia pakai struktur.

Untuk memperkirakan proses pengurangan kekuatan struktur perlu dicari suatu metode deteksi kerusakan agar pengaruh pengurangan kekuatan struktur dapat diketahui sedini mungkin. Diketuinya kerusakan yang terjadi pada suatu infrastruktur, dapat mengurangi biaya perbaikan dan mencegah keruntuhan struktur yang dapat menyebabkan korban jiwa. Proses *monitoring* yang berkelanjutan merupakan syarat agar suatu infrastruktur bekerja dengan baik dan kesehatan struktur dapat diketahui secara terukur.

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 di dalam sistem, menyediakan data untuk analisis dan evaluasi kesehatan struktur bangunan. Menyediakan data untuk memperkirakan kerusakan struktur dan penurunan performa

bangunan untuk menentukan jadwal inspeksi dan pemeliharaan periodik, 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, maka 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 karena gerakan atau getaran dari sebuah alat akselerometer seperti terlihat pada Gambar 1.



**Gambar 1. Sensor akselerometer tipe FBG Optik**

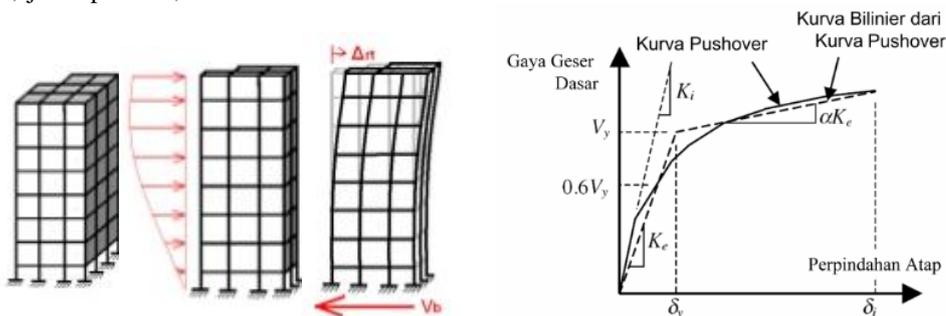
Akselerometer memiliki sebuah transduser yang berfungsi untuk mengukur percepatan, mendeteksi dan mengukur getaran, ataupun untuk mengukur percepatan gravitasi bumi. akselerometer juga dapat digunakan untuk mengukur getaran yang terjadi pada kendaraan, bangunan gedung bertingkat, dan getaran mesin. Prinsip kerja dari transduser ini berdasarkan hukum fisika bahwa apabila suatu konduktor digerakkan melalui suatu medan magnet, atau jika suatu medan magnet digerakkan melalui suatu konduktor, maka akan timbul suatu tegangan induksi pada konduktor tersebut. Akselerometer yang diletakkan di permukaan bumi dapat mendeteksi percepatan  $1g$  (ukuran gravitasi bumi) pada titik vertikalnya, untuk percepatan yang dikarenakan oleh pergerakan horizontal, akselerometer akan mengukur percepatannya secara langsung ketika bergerak secara horizontal. Hal ini sesuai dengan tipe dan jenis sensor akselerometer yang digunakan karena setiap jenis sensor berbeda-beda sesuai dengan spesifikasi yang dikeluarkan oleh perusahaan pembuatnya. Saat ini hampir semua sensor/transduser akselerometer sudah dalam bentuk digital (bukan dengan sistem mekanik) sehingga cara kerjanya hanya berdasarkan temperatur yang diolah secara digital dalam satu chip.

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.

Menurut SNI-1726-2002 Pasal 11.1 apabila prosedur respons riwayat waktu linier dilakukan maka persyaratan yang harus dipenuhi yang pertama analisis respons riwayat waktu linier harus terdiri dari analisis model matematis linier suatu struktur untuk menentukan responsnya melalui metoda integrasi numerik terhadap kumpulan riwayat waktu percepatan gerak tanah yang kompatibel dengan spektrum respons desain untuk situs yang bersangkutan. Kemudian model matematis harus sesuai dengan persyaratan pada Pasal 7.7 tentang kriteria pemodelan. Berikutnya paling sedikit tiga gerak tanah yang sesuai harus digunakan dalam analisis. Gerak tanah yang digunakan harus memenuhi persyaratan-persyaratan diantaranya apabila analisis dua dimensi dilakukan maka setiap gerak tanah harus terdiri dari riwayat waktu percepatan tanah horizontal yang diseleksi dari rekaman gempa aktual. Percepatan tanah yang sesuai harus diambil dari rekaman peristiwa gempa yang memiliki magnitudo, jarak patahan, dan mekanisme sumber

gempa yang konsisten dengan hal-hal yang mengontrol ketentuan gempa maksimum yang dipertimbangkan. Apabila jumlah rekaman gerak tanah yang sesuai tidak mencukupi maka harus digunakan rekaman gerak tanah buatan yang menggenapi jumlah total yang dibutuhkan. Gerak-gerak tanah tersebut harus diskalakan sedemikian rupa sehingga nilai rata-rata spektrum respons dengan redaman 5% dari semua gerak tanah yang sesuai disitus tersebut tidak boleh kurang dari spektrum respons desain setempat untuk rentang perioda dari  $0,2T$  hingga  $1,5T$ , dengan  $T$  adalah perioda getar alami struktur dalam ragam getar fundamental untuk arah respons yang dianalisis. Lalu apabila analisis tiga dimensi dilakukan maka gerak tanah harus terdiri dari sepasang komponen percepatan tanah horizontal yang sesuai, yang harus diseleksi dan di skalakan dari rekaman peristiwa gempa individual. Gerak tanah yang harus sesuai harus diseleksi dari peristiwa-peristiwa gempa yang memiliki magnitudo, jarak patahan, dan mekanisme sumber gempa yang konsisten dengan hal-hal yang mengontrol ketentuan gempa maksimum yang dipertimbangkan. Apabila jumlah pasangan rekaman gerak tanah yang sesuai tidak mencukupi maka harus digunakan pasangan gerak tanah buatan untuk menggenapi jumlah total yang dibutuhkan. Untuk setiap pasang komponen gerak tanah yang telah diskalakan (yaitu faktor skala yang sama harus digunakan untuk setiap komponen dari suatu pasangan gerak tanah). Setiap pasang gerak-gerak tanah tersebut harus diskalakan sedemikian rupa sehingga pada rentang perioda dari  $0,2T$  hingga  $1,5T$ , nilai rata-rata spektrum SRSS dari semua pasang komponen horizontal tidak boleh kurang dari nilai ordinat terkait pada spektrum respons yang digunakan dalam desain, yang ditentukan sesuai dengan Pasal 6.4 atau 6.9.

Kurva kapasitas hasil dari analisis statik beban dorong menunjukkan hubungan antara gaya geser dasar (*base shear*) dan perpindahan atap akibat beban lateral yang diberikan pada struktur dengan pola pembebanan tertentu sampai pada kondisi *ultimit* atau target peralihan yang diharapkan seperti yang terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Kurva kapasitas

Kurva kapasitas menggambarkan kapasitas struktur secara keseluruhan, bergantung kepada kekuatan dan kemampuan deformasi elemen-elemen penyusunnya, seperti kolom dan balok. Secara umum kurva kapasitas dibuat dengan membebani struktur dengan gaya lateral hingga tercapai sendi plastis. Struktur yang telah mengalami sendi plastis (leleh) tadi kemudian direvisi hingga kekakuannya berkurang dan kembali dibebani hingga leleh. Langkah ini dilanjutkan hingga struktur runtuh atau hingga *displacement* yang diinginkan terpenuhi.

Respon fisik struktur digunakan sebagai indikator tingkat kerusakan, yang disebut dengan parameter kerusakan. Respon struktur digunakan sebagai parameter kerusakan dapat dibagi menjadi empat yaitu deformasi plastis struktur, disipasi energi, *cyclic fatigue* struktur, parameter dinamik struktur.

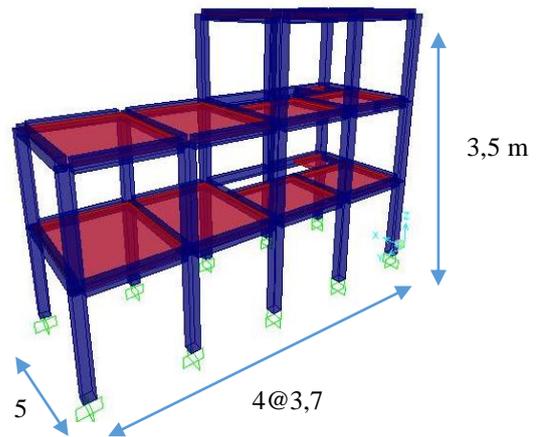
Kerusakan struktur dapat dibedakan pada tiga skala (1) Skala lokal, dimana kerusakan terjadi pada tingkat *cross-section*. Sebagai contoh penjelasan adalah kerusakan bagian beton akibat tegangan yang melebihi  $f_c'$  dari beton bertulang, ataupun sebaliknya tegangan pada baja yang melebihi tegangan plastisnya pada beton bertulang. (2) Skala menengah atau *intermediate*, dimana kerusakan struktur dilihat pada skala suatu elemen atau member penyusun suatu sistem struktur. (3) 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 nol hingga satu untuk suatu bagian yang tidak rusak sama sekali dan satu untuk bagian yang mengalami kerusakan total atau runtuh.

Rumusan indeks kerusakan yang digunakan dalam kajian ini adalah *Story Damage Index* oleh Wang *et al.*, (2007), *Approximate Story Damage Index* oleh Wang *et al.* (2007), *Modal Flexibility Damage Index* oleh Pandey & Biswas (1994), serta *Simplified Park dan Ang Damage Index* oleh (Park, *et al.*, 1987)

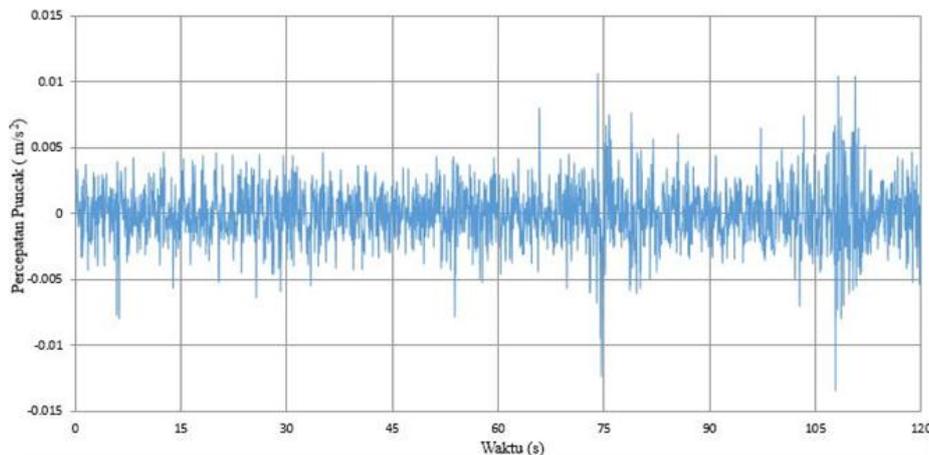
## Metode

Prediksi kondisi struktur bangunan dibagi menjadi dua, yaitu data struktur dan data beban. Data struktur meliputi dimensi dan ukuran struktur yang digunakan sebagai model. Selain itu data struktur juga mencakup kekuatan material yang digunakan. Data beban mencakup beban-beban yang digunakan dalam kajian ini. Struktur gedung yang ditinjau memiliki bentuk tidak beraturan seperti terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Denah model gedung

Selanjutnya dari struktur gedung tersebut dilakukan analisis struktur dan analisis modal. Analisis dinamik menggunakan hasil dari akselerometer dengan data terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Rekaman sensor akselerometer 11 Desember 2016 pukul 18.00 WIB

## Hasil Pembahasan

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. Hasil rekaman sensor tersebut akan menghasilkan data dalam bentuk percepatan. Percepatan puncak maksimum dari 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.

Penentuan indeks kerusakan struktur dengan memanfaatkan metode yang diusulkan oleh Wang et al. (2007). Metode ini mensyaratkan terlebih dahulu diketahui frekuensi natural struktur, nilai perpindahan sebelum terjadi kerusakan dan perpindahan setelah terjadi kerusakan. Nilai-nilai tersebut dapat diketahui dengan menggunakan analisis *linier* riwayat waktu dan analisis statik *non-linier pushover*.

### Periode fundamental

Periode getar struktur  $T$  berhubungan dengan frekuensi alami  $f$ , dan frekuensi sudut  $\omega$  (yang dikenal dengan *eigenvalue*). Jadi, perioda getar fundamental struktur  $T$  merupakan variabel yang sangat penting terhadap model analisis Spektrum Respon untuk mendapatkan nilai gaya geser dasar. Pada penelitian ini, untuk mendapatkan nilai periode getar fundamental dan frekuensi sudut digunakan software elemen hingga. Nilai-nilainya dapat dilihat pada Tabel 3. Untuk mendapat partisipasi massa ragam yang melebihi 90% sesuai SNI 1726-2002 digunakan sebanyak 12 massa ragam.

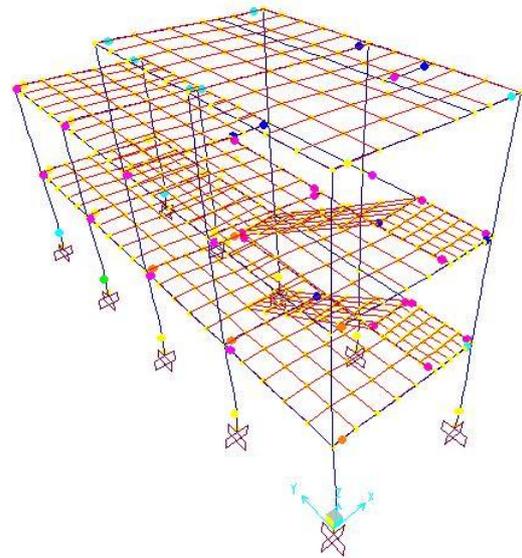
Periode alami struktur bangunan mencerminkan tingkat *flexibility* struktur tersebut. Semakin besar nilai periode fundamental struktur maka semakin besar tingkat *flexibility* struktur tersebut.

### Analisis riwayat waktu

Data sensor pada tanggal 4 Juni dan 11 Desember jam 06.00, 12.00, 18.00 WIB akan menjadi *input* dalam melakukan analisis riwayat waktu. Analisis riwayat waktu pada penelitian ini meliputi respon struktur yang berupa perpindahan, percepatan, dan kecepatan berdasarkan data getaran sensor akselerometer pada titik tertentu. Hasil dari sensor akselerometer dalam penelitian ini akan menjadi output dalam analisis linier riwayat waktu dengan menggunakan bantuan *software* elemen hingga.

### Analisis statik *non-linier pushover*

Hasil analisis statik *non-linier pushover* pada penelitian ini, terdapat empat *step* yang menjadi acuan dalam perhitungan kesehatan bangunan. Masing-masing *step* mengindikasikan adanya perubahan sendi plastis yang terjadi akibat pembebanan statik. Perubahan setiap *step* analisis *static non-linear pushover* menunjukkan bahwa degradasi kekakuan terjadi karena kenaikan pada *base shear*. Pada tahap keempat, bangunan sudah mencapai tingkat maksimum dalam menahan gaya geser yang terjadi. Pada *step* ini sendi plastis yang disimbolkan dengan titik yang berwarna biru muda sudah semakin banyak, artinya struktur sudah mengalami kerusakan sedang. Secara lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Analisis *pushover* step 4

Analisis *non-linier static pushover* pada penelitian ini bertujuan untuk mencari besaran perpindahan pada setiap lantai dari *step* satu sampai empat. Besarnya nilai perpindahan dapat dilihat pada Tabel 1. Pada hasil analisis ini, dapat dijelaskan bahwa semakin besar beban yang dihasilkan untuk melakukan *pushover*, maka perpindahan suatu struktur akan semakin besar.

Tabel 1. Nilai perpindahan setiap tingkat pada analisis *pushover*

Step	$\phi^*$ (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	308,8020

Tabel 2. Hasil respon struktur pada titik kumpul tertentu

Data getaran		Respon struktur									
Tanggal	Jam (WIB)	Joint	Perpindahan (mm)			Percepatan (mm/s <sup>2</sup> )			Kecepatan (mm/s)		
			U1	U2	U3	U1	U2	U3	U1	U2	U3
4 Juni 2016	06:00	102	0,007675	-0,003512	0,000021000	1,75	1,33	0,005037	0,11000	0,05698	-0,0002853
		103	0,017544	-0,007804	0,000031000	-4,00	2,49	0,007560	0,25000	0,12000	-0,0004037
		117	0,020639	0,010974	0,000071000	-2,66	-3,57	-0,019300	0,19000	-0,19000	0,0008186
	12:00	102	0,032113	0,016433	0,000104000	-12,65	7,83	-0,037040	0,54000	0,29000	0,0017020
		103	0,076253	0,037746	0,000152000	18,06	-16,79	-0,053620	1,12000	0,61000	0,0024040
		117	0,092341	0,059740	-0,000283000	24,29	28,66	0,170000	1,10000	-1,43000	-0,0060180
	18:00	102	-0,008600	0,004240	0,000028000	2,92	2,04	0,007282	-0,14000	0,06919	-0,0004272
		103	-0,020646	0,009117	0,000041000	-4,75	2,97	0,010710	-0,32000	0,14000	-0,0005964
		117	0,023574	0,013298	0,000101000	-4,53	-4,66	-0,041190	-0,27000	0,21000	-0,0013530
11 Desember 2016	06:00	102	0,002970	-0,001257	0,000008856	0,67	0,48	0,002125	0,04083	-0,02276	-0,0001196
		103	0,007019	-0,002857	0,000013000	1,45	0,85	0,003093	0,09475	-0,04522	-0,0001693
		117	0,007524	-0,004182	-0,000024000	1,12	-1,42	0,007454	0,09240	-0,06437	-0,0003404
	12:00	102	0,071694	0,044598	-0,000255000	-17,71	-10,37	0,057420	1,07000	-0,69000	0,0035630
		103	0,170141	0,099590	-0,000365000	-37,51	-24,16	0,079350	2,53000	-1,51000	0,0051050
		117	0,185053	0,151866	-0,000900000	32,28	-40,18	0,230000	-2,24000	-2,29000	0,0117300
	18:00	102	-0,061950	-0,035797	-0,000218000	19,84	14,20	-0,051270	0,97000	-0,58000	-0,0025850
		103	-0,147338	-0,077030	-0,000314000	34,37	25,01	-0,073350	-2,12500	-1,07000	-0,0037490
		117	0,177674	0,119198	-0,000715000	-28,97	-32,60	0,260000	-2,12000	2,10000	-0,0108400

Tabel 3. Sebelum dilakukan pushover

Tingkat	w	w <sup>2</sup>	m (kg)	f (mm)	mf	Df	mDf	K
1	1,745	3,044	47.955,00	0,0080	383,640000	0,0080	383,640000	5,599
2	1,745	3,044	51.240,68	0,0209	1.070,930212	0,0129	661,004772	
3	1,745	3,044	28.089,00	0,0260	730,314000	0,0051	143,253900	
				Σ	<b>2184.884</b>	Σ	<b>1187,899000</b>	

Tabel 4. Setelah dilakukan pushover

Step 1									
Tingkat	w	w <sup>2</sup>	m (kg)	f* (mm)	mf*	Df*	mDf*	K*	SDI
1	1,745	3,044	47.955,000	2,111	101.242,596	2,111	101.242,596	5,454	0,026
2	1,745	3,044	51.240,680	4,963	254.286,999	2,851	146.107,675		
3	1,745	3,044	28.089,000	7,290	204.757,574	2,327	65.363,103		
				Σ	<b>560.287,169</b>	Σ	<b>312.713,374</b>		
Step 2									
Tingkat	w	w <sup>2</sup>	m (kg)	f* (mm)	mf*	Df*	mDf*	K*	SDI
1	1,745	3,044	47.955,00	21,763	1.043.630,279	21,763	1.043.630,2790	5,243	0,064
2	1,745	3,044	51.240,68	56,022	2.870.620,747	34,260	1.755.485,2010		
3	1,745	3,044	28.089,00	88,884	2.496.648,632	32,861	923.038,2468		
				Σ	<b>6.410.899,657</b>	Σ	<b>3.722.153,726</b>		
Step 3									
Tingkat	w	w <sup>2</sup>	m (kg)	f* (mm)	mf*	Df*	mDf*	K*	SDI
1	1,745	3,044	47.955,00	58,5028	2.805.501,774	58,503	2.805.501,774	5,477	0,022
2	1,745	3,044	51.240,68	128,4910	6.583.976,462	69,988	3.586.253,208		
3	1,745	3,044	28.089,00	195,2520	5.484.430,619	66,761	1.875.241.302		
				Σ	<b>14.873.908,855</b>	Σ	<b>8.266.996,284</b>		
Step 4									
Tingkat	w	w <sup>2</sup>	m (kg)	f* (mm)	mf*	Df*	mDf*	K*	SDI
1	1,745	3,044	47.955,00	98,6333	4.729.959,902	98,633	4.729.959,902	5,560	0,007
2	1,745	3,044	51.240,68	206,5060	10.581.523,240	107,870	5.527.485,874		
3	1,745	3,044	28.089,00	308,8020	8.673.939,378	102,300	2.873.383,917		
				Σ	<b>23.985.422,516</b>	Σ	<b>13.130.829,692</b>		

### Monitoring kesehatan struktur

Hasil analisis perpindahan riwayat waktu (*time history*) dan analisis statik 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 yang pertama tentukan nilai kekakuan ( $k^*$ ) yang didapatkan dari analisis ketika terjadi kerusakan, yaitu analisis statik non-linear *pushover*. kemudian tentukan nilai kekakuan ( $k$ ) yang didapatkan dari analisis sebelum terjadi kerusakan, yaitu analisis kekakuan yang berasal dari *linear time history*. Terakhir menentukan nilai *SDI (story damage index)* dan klasifikasikan bangunan ke dalam derajat kerusakan.

Selanjutnya hasil analisis respon struktur disajikan pada Tabel 2, 3, dan 4.

Hasil dari kekakuan ( $k^*$ ) pada analisis statik *non-linier pushover* di atas dapat disimpulkan bahwa, nilai  $k^*$  meningkat seiring dengan meningkatnya tahap pada analisis *pushover*.

### Kesimpulan

Kesimpulan yang dihasilkan dari kajian struktur ini adalah indeks kerusakan (*damage index*) rata-rata berada pada rentang 0-0,08, hasil analisis menunjukkan bahwa derajat kerusakan *minor*, penampakan fisik adalah retak pada beton dan kolom, jika gedung tersebut mengalami gaya gempa yang identik dengan data akselometer, maka struktur gedung masih mampu menahan gaya gempa dan hanya mengalami kerusakan kecil (*minor damage*).

### Daftar Pustaka

Bojórquez, E., Ruiz, S. E., Reyes-Salazar, A., & Bojórquez, J. (2014). Ductility and strength

reduction factors for degrading structures considering cumulative damage. *The Scientific World Journal*, 2014.

Fajfar, P., A. (1992). *Simplified Non Linier Method For Seismic Damage Assesment, Non Linier Seismic Analysis and Design Reinforced Concrete Building*, Elsevier Applied Science

Nababan, P., H., A. (2008). *Structural Health Monitoring System Alat Bantu Mempertahankan Usia Teknis Jembatan*, Construction and Maintenance of Main Span Suramadu Bridge

Pandey, A. K., & Biswas, M. (1994). Damage detection in structures using changes in flexibility. *Journal of sound and vibration*, 169(1), 3-17.

Park, Y. J., Ang, A. H., & Wen, Y. K. (1987). Damage-limiting aseismic design of buildings. *Earthquake spectra*, 3(1), 1-26.

SNI 03-1726-2012. (2012). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*.

Sohn, H. et al., (2003). A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001. *Structural Health Monitoring*, LA-13976-M(LA-13976-MS), pp.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. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(10).

Wang, J. F., Lin, C. C., & Yen, S. M. (2007). A story damage index of seismically-excited buildings based on modal frequency and mode shape. *Engineering Structures*, 29(9), 2143-2157.