

JURNAL TEKNIK SIPIL

Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil

Evaluasi Integritas Sistem Struktur Jembatan Dr. Ir. Soekarno

Ady Wijayanto

Tenaga Ahli Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional XVIII Papua, Jl. Abe Pantai, Abepura, Jayapura
E-mail: ady.balai.x@gmail.com

Amrinsyah Nasution

Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10 Bandung, E-mail: amrinsyah@si.itb.ac.id

Iwan Zarkasi

Kasubdit Teknik Terowongan dan Jembatan Khusus, Bina Marga, Kementerian PU-PERA
Jl. Pattimura 20, Kebayoran Baru, Jakarta Selatan, E-mail: iwanzark17@yahoo.com

Abstrak

Jembatan Dr. Ir. Soekarno merupakan jembatan bentang panjang yang menjadi landmark bagi Kota Manado. Untuk mengetahui kelayakan Jembatan Dr. Ir. Soekarno, maka diperlukan evaluasi yang terintegrasi terhadap keandalan kondisi fisik jembatan. Analisis ini dilaksanakan untuk melakukan pekerjaan review dan evaluasi terhadap integritas struktur Jembatan Dr. Ir. Soekarno secara keseluruhan. Setiap bentuk struktur memiliki karakteristik frekuensi alami yang menggambarkan kekuatan, kekakuan dan integritas struktur. Data rekam getaran (time domain) dibutuhkan untuk mengetahui frekuensi alami. Sumber data rekam getaran adalah data uji beban dinamik dan data rekam sensor-sensor accelerometer. Persepsi dan tingkat kenyamanan pengguna jembatan dievaluasi melalui analisis data rekam getaran. Sensor accelerometer merekam getaran pada arah X, Y, dan Z. Analisis Fast Fourier Transform (FFT) digunakan untuk mengubah domain waktu ke domain frekuensi. Grafik domain frekuensi disaring dengan rumus ISO 2631-1. Persepsi dan tingkat kenyamanan para pengguna Jembatan Dr. Ir. Soekarno masih dalam kondisi nyaman, maka jembatan tersebut bisa dikatakan laik guna untuk dilalui kendaraan. Berdasarkan Distribusi Weibull, Jembatan Dr. Ir. Soekarno dapat digunakan hingga 100 tahun sesuai dengan masa layan rencana.

Kata-kata Kunci: *Evaluasi, frekuensi, getaran, integritas, Weibull.*

Abstract

Dr. Ir. Soekarno Bridge is the long span bridge which to be the Manado city landmark. To calculate the Dr. Ir. Soekarno Bridge's feasibility, integrated evaluation need to know the bridge physical condition reliability. The purpose of this analysis is for reviewing and evaluating the entire Dr. Ir. Soekarno Bridge integrity. Every structure has natural frequency characteristic, which describes the structure strength, stiffness and integrity. The vibration record data sources are dynamic loading test and accelerometer sensor records. Perception and comfortable level the bridge users evaluated by the vibration record data. The accelerometer sensors records on X, Y, and Z directions. The Fast Fourier Transform (FFT) analysis carries out to exchange time domain to frequency domain. The frequency domain graphics filtered by ISO 2631-1 formula. Perception and comfortable level the Dr. Ir. Soekarno Bridge users are still in the comfort condition, so this bridge is proper to pass through the vehicles. Based on the Weibull Distribution, Dr. Ir. Soekarno Bridge has service life until 100 years as long as the plan service life.

Keywords: *Evaluation, frequency, integrity, vibration, Weibull.*

1. Pendahuluan

Terjadinya keruntuhan Jembatan Kutai Kartanegara tanggal 26 Nopember 2011 merupakan indikasi produk pembangunan infra struktur jembatan belum sepenuhnya mencerminkan dan menjalankan praktek konstruksi yang professional, baik dalam perencanaan, pelaksanaan, pengawasan maupun pemeliharaan jembatan. Penyelidikan resmi Kementerian Pekerjaan Umum terhadap runtuhnya jembatan menyatakan bencana yang terjadi disebabkan oleh berbagai aspek kesalahan teknis. Terbatasnya pemahaman dan pengetahuan teknis

mengenai sistem struktur jembatan merupakan salah satu penyebab. Di dalam program peningkatan tugas satuan kerja, melalui pengetahuan manajemen jembatan sudah menjadi keharusan bagi Satker P2JN wilayah.

Kementerian Pekerjaan Umum telah memulai proses audit teknikal untuk tujuh (7) jembatan bentang panjang yang dikategorikan dalam kondisi kritis. Ketujuh jembatan adalah Jembatan Rumbai Jaya dan Siak Tiga di Riau, jembatan Batanghari, di Jambi, Jembatan Musi II di Sumatera Selatan, Jembatan Talumolo di Gorontalo, Jembatan Mahakam di Kalimantan Timur dan Jembatan Barito di Kalimantan Selatan.

Direktorat Jenderal Bina Marga dalam program pemeliharaan rutin jembatan memerlukan audit teknikal khusus untuk ke tujuh jembatan pada penanganan yang lebih sistematis. Sedikitnya 80 jembatan bentang panjang memerlukan inspeksi guna pendataan kondisi jembatan yaitu : kekuatan material, konstruksi jembatan, integritas sistem struktur, sebagai mana juga pemeriksaan hulu kebijakan rancangan Konsultan Perencana.

Pengetahuan sistem manajemen jembatan meliputi kegiatan survei monitoring / lapangan, yaitu :

- a. pengamatan visual;
- b. pengukuran;
- c. rekaman;
- d. *sampling* dan *probing*;
- e. percobaan lapangan dan laboratorium termasuk uji sifat-sifat bahan bangunan: komposisi kimia, uji kekuatan tarik, uji tekan, dan uji kelelahan bahan;
- f. analisis teknik;
- g. evaluasi realibilitas sistem bangunan.

Observasi dan investigasi lapangan dilakukan untuk *assessment* integritas sistem struktur. *Assessment* kondisi lapangan sistem struktur bangunan, yaitu :

- a. evaluasi kerusakan, cacat elemen struktur dan penyebabnya;
- b. verifikasi konstruksi sistem struktur yang dibangun, kesesuaian dengan rancangan;
- c. evaluasi tingkat kenyamanan dan keamanan sistem struktur;
- d. evaluasi durabilitas material dan kemunduran kualitas;
- e. evaluasi fisik dan mekanik material/elemen struktur;
- f. rekomendasi pekerjaan renovasi atau perbaikan menjadi bagian dari pemeliharaan jembatan.

2. Jembatan Dr. Ir. Soekarno

Jembatan Dr. Ir. Soekarno dibangun oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat secara bertahap dengan dana APBN tahun 2003 hingga 2012. Jembatan Dr. Ir. Soekarno adalah jembatan *cable stayed single pylon* yang melintasi pelabuhan laut Manado, Kota Manado, Provinsi Sulawesi Utara. Jembatan Dr. Ir. Soekarno merupakan jembatan bentang panjang yang menjadi *landmark* bagi Kota Manado.

Jembatan dibangun untuk mengatasi kemacetan di dalam kota, dan diharapkan bisa meningkatkan aktivitas sosial perekonomian dan pariwisata dengan tetap mempertahankan serta mengembangkan mata pencaharian masyarakat sekitar. Selain itu, Jembatan Dr. Ir. Soekarno menunjang fungsi jaringan jalan dan fungsi kawasan pariwisata Kota Manado.

Bagi program pemeliharaan jembatan, evaluasi yang terintegrasi terhadap keandalan kondisi fisik jembatan dan kelaikan guna jembatan merupakan landasan dasar menyusun program pemeliharaan jembatan. Makalah ini membahas *assessment* integritas sistem struktur dan tingkat pelayanan jembatan.



Gambar 1. Birdview Jembatan Dr. Ir. Soekarno (AshC Motion Pictures, 2015)

Struktur Atas:

1. Type jembatan = *cable stayed single pylon*
2. Type *pylon* = *pylon* bentuk H
3. Bentang tengah = 240 m
4. Tinggi *pylon* = 62.8 m
5. Bentang jembatan = 372 m (102+240+30) m
6. Lebar jembatan = 17 m
7. Lebar lantai kendaraan = 2 x 6 m
8. Lebar trotoar = 2 x 2.5 m
9. *Clearance* = 16 m

Struktur Bawah:

1. Pondasi = Caisson; terdiri dari *primary bored pile* (beton bertulang) dan *secondary bored pile* (tanpa tulangan)
2. Diameter pondasi = 2 x 11 m
3. Panjang pondasi = 42 m

3. Degradasi, Keselamatan dan Ketahanan Struktur

Faktor penyebab kegagalan konstruksi dapat bersumber dari akumulasi kegagalan berbagai faktor. Untuk setiap kondisi penilaian (*assessment*) terdapat dua kategori utama potensi kegagalan layanan struktur:

1. Cacat (*Defect*)

Komponen struktur tidak memenuhi persyaratan minimum kekuatan atau spesifikasi peraturan. Hal ini dapat terjadi mulai dari tahap perencanaan, manufaktur, fabrikasi, atau pekerjaan konstruksi sebelum struktur difungsikan atau masa penggunaan dan pemeliharaan yang menyimpang dari fungsi layanan.

2. Kemunduran kapasitas layanan (*Deterioration*)

Material bahan bangunan mengalami kemunduran kualitas sejalan dengan layanan bangunan. Proses penuaan dan pengaruh lingkungan secara alami juga berperan pada kemunduran kualitas bahan. Perawatan dan pemeliharaan secara berkala dengan melakukan perbaikan, renovasi dan penggantian material jembatan adalah usaha mempertahankan layanan jembatan yang optimal.

Cacat bangunan dapat mempengaruhi tingkat kemunduran mutu/kualitas atau menjadi awal kegagalan fungsi material; hal mana kedua parameter ini adalah faktor hubungan sebab dan efek kemunduran.

Cacat dan kemunduran kualitas bahan menjadi penting dalam penentuan keselamatan layanan dan keamanan sistem struktur.

Evaluasi sistem struktur diperlukan bagi kemungkinan kegagalan yang tidak diduga. Kegagalan unsur struktur menunjukkan masalah yang tidak terdeteksi. Keruntuhan elemen struktur akibat muatan dan terlampaunya kekuatan bahan oleh kekeliruan penanganan dan kemunduran kekuatan unsur elemen terjadi tanpa dapat diamati sebelum terjadinya keruntuhan.

4. Assessment Integritas Struktur Jembatan Dr. Ir. Soekarno

Assessment (penilaian) integritas sistem dan elemen struktur meliputi kegiatan penelitian lapangan, analisis dan evaluasi kondisi ada serta rekomendasi.

4.1 Survei lapangan

Pekerjaan renovasi jembatan berawal dari penelitian kondisi jembatan *existing*. Penelitian kondisi *existing* antara lain dilakukan melalui pengamatan visual; mengamati kondisi fisik seperti terjadi retakan, simpangan/perpindahan, *differential settlement*, lendutan komponen struktur serta kerusakan atau indikator degradasi material (karat, aus dan keropos). Unsur-unsur ini dilakukan terbatas pada kondisi luar bangunan.

Pengamatan secara visual (*visual check*) dilakukan baik dengan pengamatan maupun dengan bantuan kamera pada kerusakan, khususnya retak-retak, keropos, berlobang, mengelupas dan cacat struktur. Dilakukan terutama terhadap komponen yang berfungsi memikul beban. Hasil pengamatan berupa penggambaran pola-pola keretakan pada elemen balok struktur "*crack pattern*", dan galeri foto kerusakan, informasi visual kondisi jembatan yang mengalami kemunduran dan kerusakan.

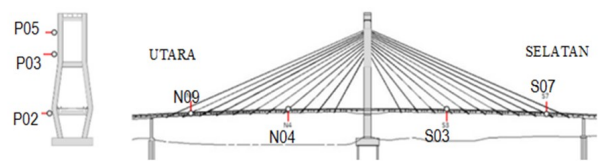
Klasifikasi tipe kerusakan:

- Pilar dan kolom = lentur, geser dan retrofit;
- Kerusakan joint / sambungan / titik kumpul;
- Elemen struktur atas = girder, balok, lantai / dek.

Posting status kelayakan ditempel pada elemen yang diamati.

Gambar 2. Template posting status elemen jembatan

Pengujian vibrasi unsur elemen struktur pada lokasi-lokasi kritis elemen jembatan dilakukan untuk mendapatkan data getaran saat kosong dan penuh bertujuan bagi evaluasi kondisi keamanan dan kenyamanan.



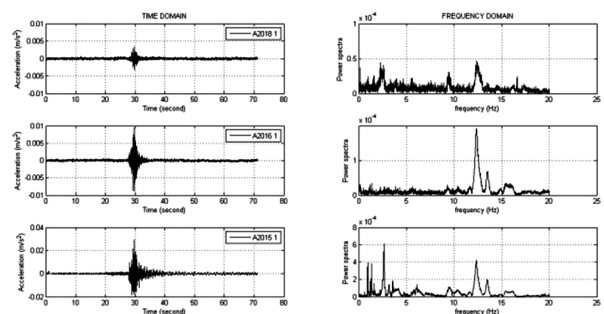
Gambar 3. Denah lokasi pemasangan sensor accelerometer

Alat uji dinamik menggunakan alat ukur getaran yang dibuat oleh Bridge Diagnostic, Inc. Alat ini disebut sebagai *triaxial accelerometer* yang dapat menghasilkan rekam data pengukuran arah X, Y dan Z sekaligus.

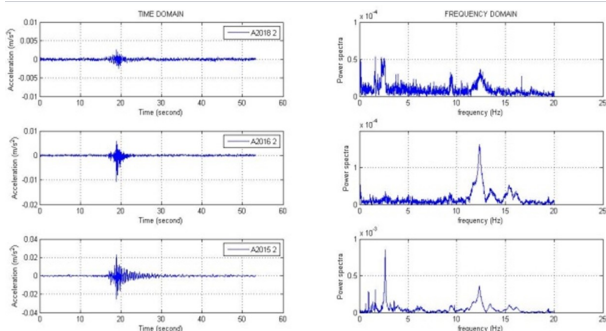
Pengambilan data getaran dilakukan sebanyak tiga kali untuk mendapatkan nilai yang mewakili. Hasil bacaan *accelerometer* tersebut dapat dilihat pada Gambar 4 (Subagyo, 2015). Setiap pengujian terdapat tiga kode, yaitu A2018 (arah Y), A2016 (arah X), A2015 (arah Z).



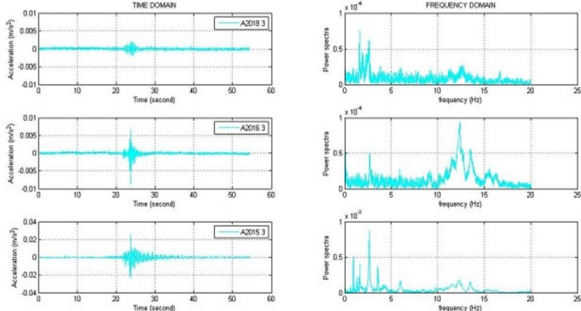
Gambar 4. Alat sensor vibrasi triaxial accelerometer



(a) Rekam grafik percepatan dan frekuensi hasil uji 1



(b) Rekam grafik percepatan dan frekuensi hasil uji 2

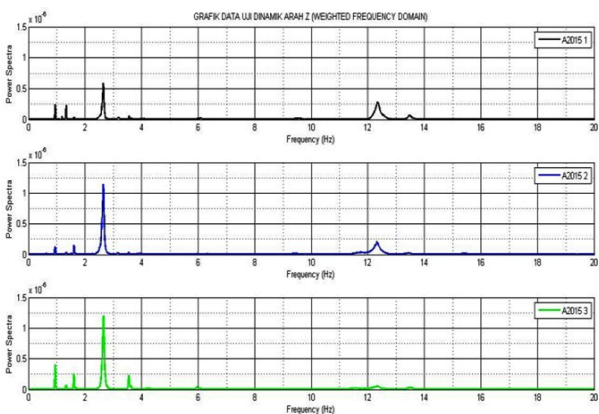


(c) Rekam grafik percepatan dan frekuensi hasil uji 3

Gambar 5. Kurva percepatan dan frekuensi data rekaman sensor

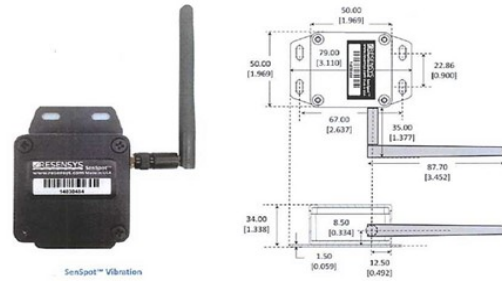
Frekuensi natural atau frekuensi alami adalah waktu yang diperlukan bagi suatu sistem tanpa peredam untuk melakukan satu siklus getaran bebas. Fenomena yang berkaitan erat dengan dengan frekuensi alami adalah peristiwa ikut bergetarnya sebuah benda karena getaran benda lain disekitarnya (resonansi).

Data rekaman umumnya berupa data dalam domain waktu (*time domain*) menggambarkan perubahan yang terjadi setiap waktu. Tanggapan struktur dalam domain waktu biasanya diubah ke dalam domain frekuensi (*frequency domain*). Teknik yang digunakan untuk mengubah data dalam domain waktu menjadi domain frekuensi dinamakan metoda Fast Fourier Transform (FFT) atau Hilbert Huang Transform (HHT) (Chopra A.K., 2001).



Gambar 6. Grafik filtering data frekuensi arah Z (ISO 2631-1)

Puncak - puncak grafik pada gambar 6 adalah nilai frekuensi alami.



Gambar 7. SensSpot™ vibration sensor triaxial accelerometer

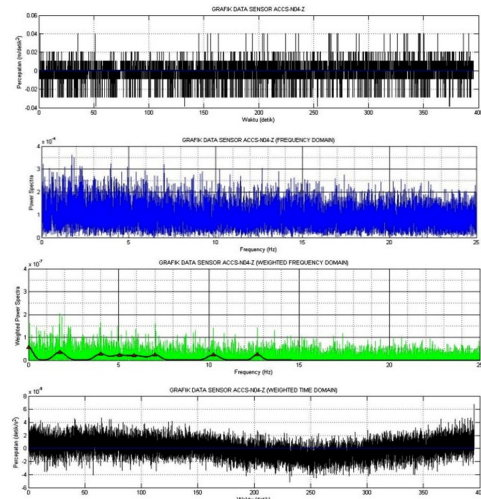
Alat sensor getaran SensSpot™ Vibration sebagai alternatif sensor rekam getaran mengirimkan data secara berkala kepada pusat penyimpanan data setiap 3 menit pengiriman ada 32 atau 64 data. Pengiriman data gagal bila kondisi sinyal yang tidak baik.

Rekam getaran pada setiap stasiun berupa kurva percepatan dan frekuensi (**Gambar 8** hingga **14**). Beberapa data grafik getaran terdapat *noise* yang mengakibatkan tidak terlihatnya grafik getaran yang asli. Untuk itu, analisis frekuensi natural perlu menggunakan regresi Gaussian berorde 8 (Rasmussen and Williams, 2006).

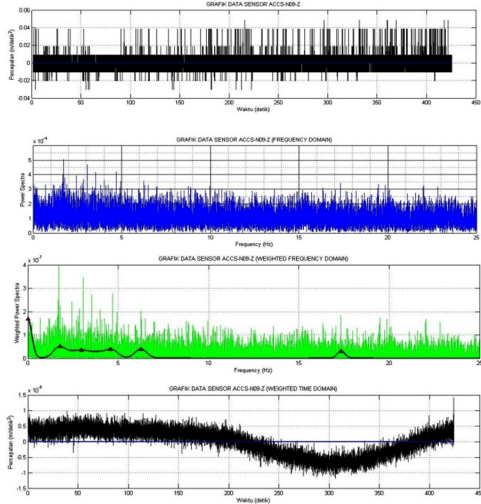
$$Y = a_1 e^{-\frac{(X-b_1)^2}{c_1}} + a_2 e^{-\frac{(X-b_2)^2}{c_2}} + \dots + a_8 e^{-\frac{(X-b_8)^2}{c_8}} \quad (1)$$

Data rekaman sensor accelerometer diambil pada 2 kondisi, yaitu :

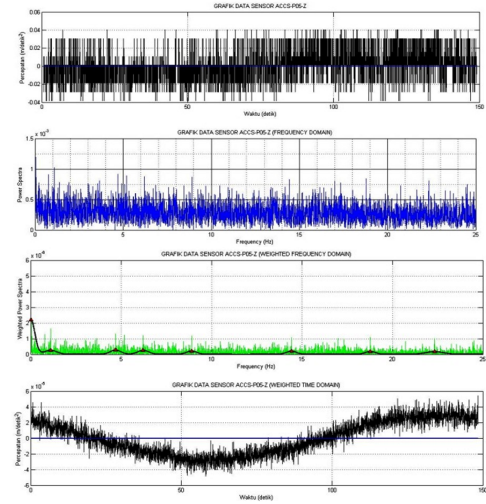
1. Data rekaman sensor accelerometer diambil pada tanggal 14 Mei 2016 pukul 16.00 hingga tanggal 15 Mei 2016 pukul 15.00. Pada waktu ini, kecepatan angin maksimum terekam sebesar 0,73 m/detik (2,68 km/jam). Sehingga getaran dipengaruhi oleh beban kendaraan yang lewat jembatan saja.
2. Data rekaman sensor accelerometer diambil pada tanggal 8 Mei 2016 pukul 16.00 hingga tanggal 10 Mei 2016 pukul 15.00. Pada waktu ini, kecepatan angin maksimum terekam sebesar 23,27 m/detik (83,77 km/jam). Sehingga getaran dipengaruhi oleh beban kendaraan yang lewat jembatan dan beban angin yang mengarah sudut 11,9°.



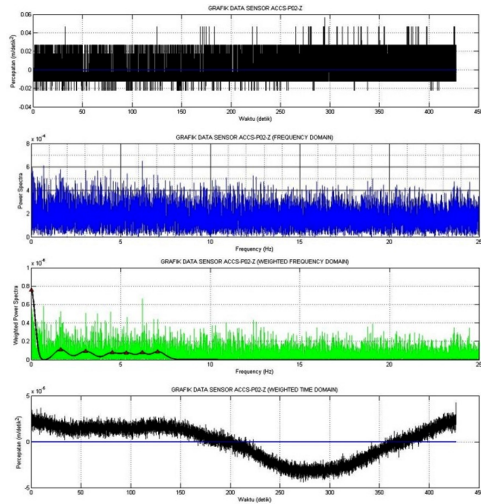
Gambar 8. Kurva percepatan, frekuensi dan frekuensi terfilter (ISO 2631-1) sensor ACCS N04 arah Z tanggal 14 – 15 Mei 2016



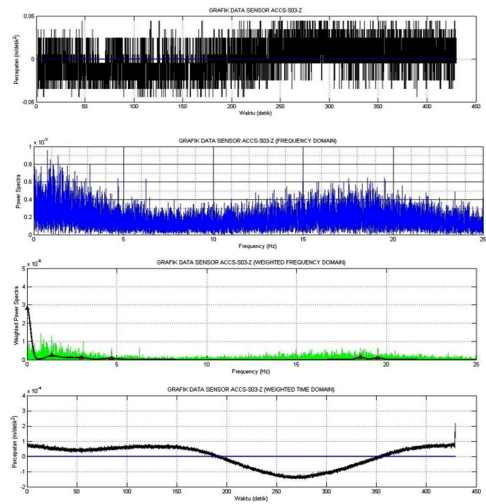
Gambar 9. Kurva percepatan, frekuensi dan frekuensi terfilter (ISO 2631-1) sensor ACCS N09 arah Z tanggal 14 – 15 Mei 2016



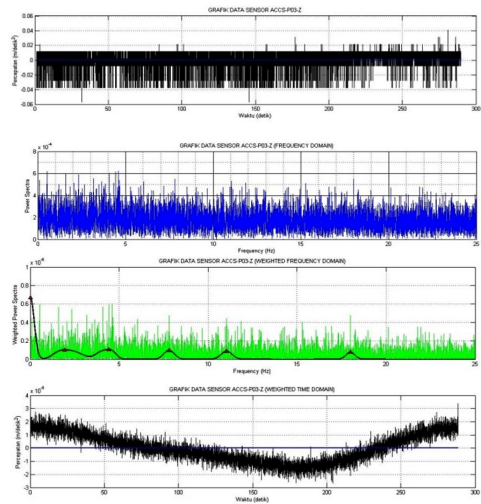
Gambar 12. Kurva percepatan, frekuensi dan frekuensi terfilter (ISO 2631-1) sensor ACCS P05 arah Z tanggal 14 – 15 Mei 2016



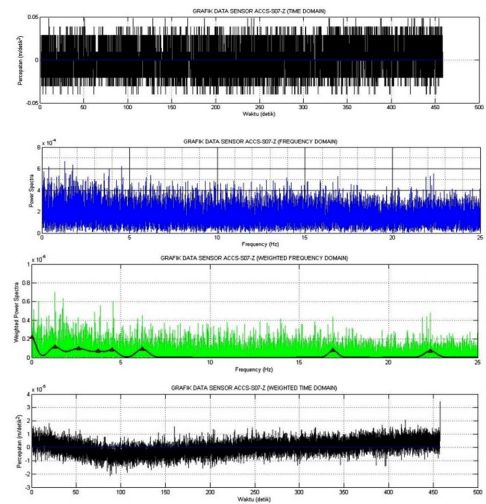
Gambar 10. Kurva percepatan, frekuensi dan frekuensi terfilter (ISO 2631-1) sensor ACCS P02 arah Z tanggal 14 – 15 Mei 2016



Gambar 13. Kurva percepatan, frekuensi dan frekuensi terfilter (ISO 2631-1) sensor ACCS S03 arah Z tanggal 14 – 15 Mei 2016



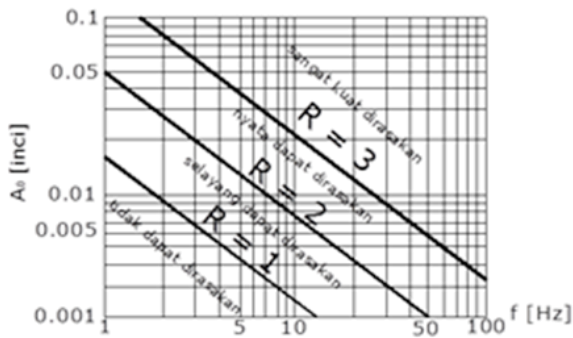
Gambar 11. Kurva percepatan, frekuensi dan frekuensi terfilter (ISO 2631-1) sensor ACCS P03 arah Z tanggal 14 – 15 Mei 2016



Gambar 14. Kurva percepatan, frekuensi dan frekuensi terfilter (ISO 2631-1) sensor ACCS S07 arah Z tanggal 14 – 15 Mei 2016

4.2 Persepsi dan kenyamanan berdasarkan skala modifikasi Reiher - Meister

Nilai frekuensi alami elemen yang diperoleh dari rekam getaran pada Tabel 1. Parameter frekuensi alami elemen dan sistem struktur adalah variabel utama bagi *assessment* integritas sistem struktur. Berdasarkan hasil Laporan Penelitian Bangunan Dan Utilitas Stadion Utama Dan Gedung Istora PPKGBK (2014), persepsi derajat kenyamanan dan keamanan struktur yang dikaji dari skala modifikasi Reiher-Meister dinyatakan dengan nilai R kenyamanan system struktur.



Gambar 15. Skala Reiher - Meister R

Tabel 1. Frekuensi alami elemen pada sta N04 – S07

No. Uji	f ₁	f ₂	f ₃
N04			
Arah X	1,27	3,18	5,25
Arah Y	0,96	2,89	4,80
Arah Z	1,74	4,01	5,05
N09			
Arah X	1,01	2,34	4,88
Arah Y	1,18	4,16	6,86
Arah Z	1,77	2,96	4,57
P02			
Arah X	1,37	2,15	4,04
Arah Y	1,34	2,89	4,68
Arah Z	1,65	3,04	4,52
P03			
Arah X	1,96	4,36	11,03
Arah Y	2,25	4,22	4,93
Arah Z	1,92	4,40	7,80
P05			
Arah X	2,79	4,36	5,72
Arah Y	3,19	4,77	6,27
Arah Z	1,09	4,68	6,21
S03			
Arah X	1,47	9,49	10,23
Arah Y	0,92	3,78	14,18
Arah Z	1,39	3,01	4,68
S07			
Arah X	1,54	2,45	4,10
Arah Y	0,98	3,73	6,61
Arah Z	1,31	2,62	3,73

Reiher dan Meister adalah pelopor dibidang persepsi getaran manusia. Di dalam investigasinya, getaran-getaran dalam keadaan tenang diterapkan pada sistem lantai selama periode empat menit. Tingkat kenyamanan akibat getaran dievaluasi oleh masing-masing individu di atas sistem lantai. Dengan informasi tersebut, sebuah skala toleransi kenyamanan manusia telah ditentukan berdasarkan pada def-leksi dan *imposed frequency*. Pada tahun 1996, Lenzen memodifikasi skala Reiher Meister yang dikalikan oleh faktor 10 (Brian, 2008).

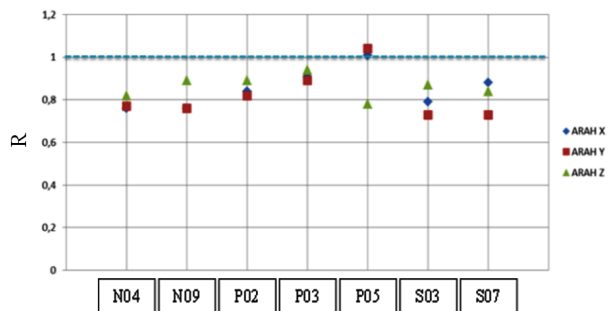
$$R = 5,08 * \left[\frac{f \cdot A_0}{D^{0,217}} \right]^{0,265} \tag{2}$$

dimana:

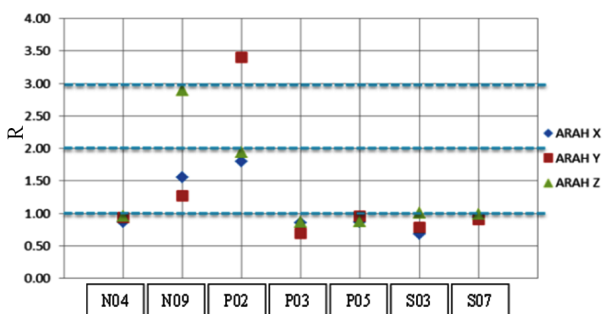
- f = frekuensi natural pertama
- A₀ = amplituda maksimum dari getaran (inch)
- D = redaman kritis (%)
- R = derajat rerata tanggap
 - = 1 - selayang dirasakan
 - = 2 - nyata terasa
 - = 3 - kuat dirasakan
 - = 4 - sangat kuat terasa
 - = 5 - guncangan hebat

Untuk perencanaan nilai R: R < 3, R = 2, nilai tengah.

Gambar 16 dan 17 menyatakan nilai R untuk arah X, Y, dan Z pada Tabel 1. Nilai amplituda maksimum A₀ didapat dari data accelerometer.



Gambar 16. R di N04, N09, P02, P03, P05, S03, S07 tanggal 14 – 15 Mei 2016



Gambar 17. R di N04, N09, P02, P03, P05, S03, S07 tanggal 8 – 10 Mei 2016

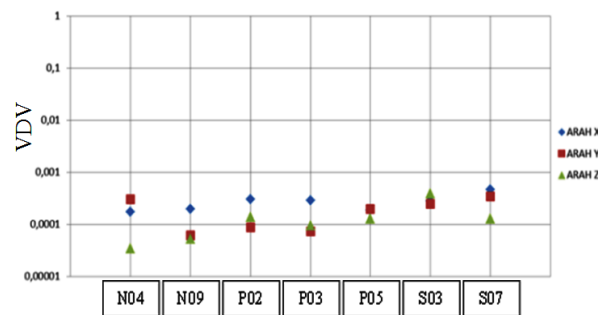
4.3 Persepsi dan kenyamanan berdasarkan *Vibration Dose Value* (VDV)

Metode *Vibration Dose Value* (VDV) lebih *sensitive* menuju puncak percepatan transient. Persamaan VDV.

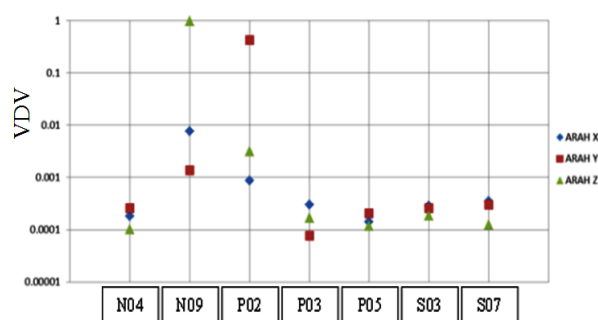
$$VDV = \left(\int_0^T [a_w(t)]^4 dt \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

Tabel 2. Nilai VDV dan tingkat kenyamanan (ISO 2631-1, 1997)

VDV [m/detik ^{1.75}]	Persepsi dan Tingkat Kenyamanan
< 0,660	Nyaman (<i>Not uncomfortable</i>)
0,660 – 2,380	Terganggu (<i>Disturbing</i>)
2,380 – 4,640	Tidak dapat diterima (<i>Unacceptable</i>)
> 4,640	Kemungkinan timbul kepanikan (<i>Probably causing panic</i>)



Gambar 18. VDV di N04, N09, P02, P03, P05, S03, S07 tanggal 14 – 15 Mei 2016



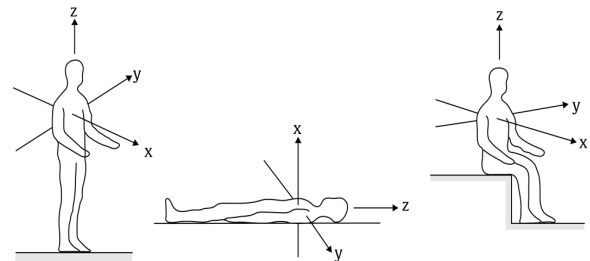
Gambar 19. VDV di N04, N09, P02, P03, P05, S03, S07 tanggal 8 – 10 Mei 2016

4.4 Persepsi dan kenyamanan berdasarkan metoda *Root - Mean Square* (r.m.s.)

ISO 2631 mendefinisikan metode pengukuran periode, acak dan transient pada getaran seluruh tubuh manusia. Hal ini berindikasi bahwa kombinasi untuk menentukan derajat getaran yang terjadi harus bisa diterima. ISO 2631 memberikan pedoman pada kemungkinan efek getaran pada kesehatan, kenyamanan dan persepsi, serta mabuk karena berkendara. Menurut

ISO 2631-2, toleransi frekuensi yang diizinkan untuk struktur adalah 0,5 Hz hingga 80 Hz untuk kesehatan, kenyamanan.

Pengukuran getaran harus diukur pada tiga arah orthogonal secara simultan. Untuk tujuan ini, arah-arah getaran dihubungkan pada struktur dari pada tubuh manusia. Orientasi struktur dihubungkan pada sumbu X, Y, dan Z.



Gambar 20. Sistem koordinat evaluasi getaran tubuh manusia (ISO 2631-1,1997)

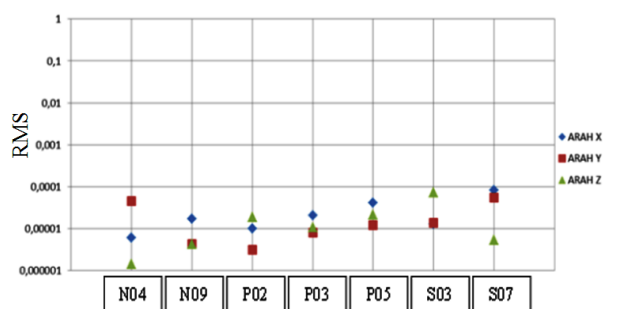
Evaluasi getaran berdasarkan ISO 2631-1 dengan cara pengukuran besaran percepatan *root-mean-square* (r.m.s.). Percepatan r.m.s. akibat beban dihitung dengan persamaan,

$$a_{r.m.s.} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T [a_w(t)]^2 dt \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

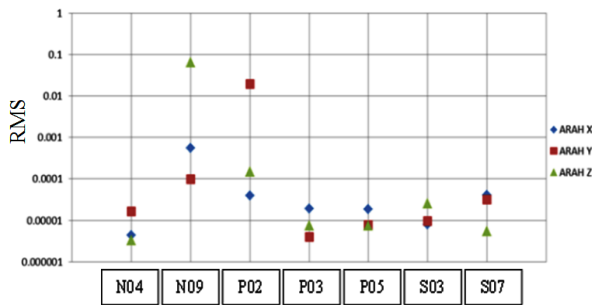
Pada suatu kondisi getaran tertentu, perlu diperhatikan ketidaknyamanan yang tidak bisa diterima. Derajat kondisi ketidaknyamanan dipengaruhi oleh nilai r.m.s.

Tabel 3. Nilai r.m.s. dan tingkat kenyamanan (ISO 2631-1, 1997)

r.m.s. (m/detik ²)	Persepsi dan Tingkat Kenyamanan
< 0,315	Nyaman
0,315 – 0,63	Sedikit tidak nyaman
0,5 – 1	Cukup tidak nyaman
0,8 – 1,6	Tidak nyaman
1,25 – 2,5	Sangat tidak nyaman
> 2	Ekstrim tidak nyaman



Gambar 21. r.m.s. di N04, N09, P02, P03, P05, S03, S07 tanggal 14 – 15 Mei 2016



Gambar 22. r.m.s. di N04, N09, P02, P03, P05, S03, S07 tanggal 8 - 10 Mei 2016

4.5 Persepsi dan tingkat kenyamanan uji beban dinamik

Indikator persepsi dan tingkat kenyamanan oleh dampak getaran uji dinamik terhadap pengguna jembatan berdasarkan metoda r.m.s., MRM, dan VDV dirangkum pada Tabel 4, 5 dan 6.

Tabel 4. Persepsi/ tingkat kenyamanan arah X

No. Uji	r.m.s	VDV	R
1	2,38E-07	1,57E-06	0,56
	nyaman	nyaman	tidak dapat dirasakan
2	1,28E-08	7,29E-07	0,60
	nyaman	nyaman	tidak dapat dirasakan
3	4,97E-08	3,14E-07	0,59
	nyaman	nyaman	tidak dapat dirasakan

Tabel 5. Persepsi/ tingkat kenyamanan arah Y

No. Uji	r.m.s	VDV	R
1	1,63E-08	1,24E-07	0,44
	nyaman	nyaman	tidak dapat dirasakan
2	1,67E-08	1,08E-07	0,41
	nyaman	nyaman	tidak dapat dirasakan
3	2,40E-08	1,18E-07	0,40
	nyaman	nyaman	tidak dapat dirasakan

Tabel 6. Persepsi/ tingkat kenyamanan arah Z

No. Uji	r.m.s	VDV	R
1	7,07E-07	4,09E-06	0,63
	nyaman	nyaman	tidak dapat dirasakan
2	9,52E-07	3,83E-06	0,64
	nyaman	nyaman	tidak dapat dirasakan
3	9,95E-07	4,88E-06	0,66
	nyaman	nyaman	tidak dapat dirasakan

4.6 Mode shapes

Pemodelan analisis elemen hingga sistem struktur jembatan Dr. Ir. Soekarno menggunakan program CSi Bridge 2016 v18.1.0. Elemen jembatan ini terdiri dari pylon, pelat lantai kendaraan dan kabel baja prategang.

Properti material

1. Beton

- a. Modulus elastisitas (E) = 30.278 MPa
- b. Poisson ratio (U) = 0.2
- c. Koef. ekspansi thermal (A) = 10×10^{-6} per °C
- d. Berat per volume = 24.300 N/m³
- e. f'c (benda uji silinder) = 41.500 MPa

2. Tulangan BJTD-40

- a. Modulus elastisitas (E1) = 200.000 MPa
- b. Koef. ekspansi thermal (A1) = 12×10^{-6} per °C
- c. Berat per volume = 77.000 N/m³
- d. F_y = 400 MPa
- e. F_u = 500 MPa

3. Baja tendon

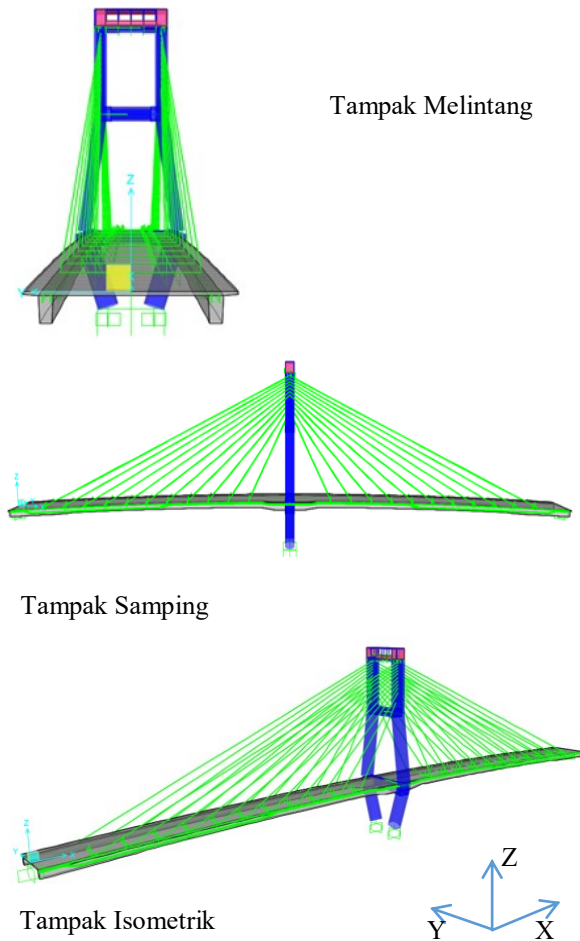
- a. Modulus elastisitas (E1) = 199.950 MPa
- b. Koef. ekspansi thermal (A1) = 12×10^{-6} per °C
- c. Berat per volume = 77.000 N/m³
- d. F_y = 1.670 MPa
- e. F_u = 1.860 MPa
- f. F_{pe} (effective serviceability limit stress) =
0,60 x F_u = 1.116 MPa

4. Baja cable stayed

- a. Modulus elastisitas (E1) = 199.950 MPa
- b. Koef. ekspansi thermal (A1) = 12×10^{-6} per °C
- c. Berat per volume = 77.000 N/m³
- d. F_y = 1.670 MPa
- e. F_u = 1.860 MPa
- f. F_{pe} (effective serviceability limit stress) =
0,45 x F_u = 837 MPa

Massa yang digunakan untuk menghitung frekuensi alami antara lain:

- a. massa sendiri struktur
- b. massa tambahan:
 - i. Massa tiang sandaran dan lampu penerangan jembatan
 - ii. Massa trotoar
 - iii. Massa railing guard
 - iv. Massa perkerasan aspal
- c. gaya prategang



Gambar 23. Model jembatan Dr. Ir. Soekarno

Tabel 7. Frekuensi alami dan mode shapes hasil eksekusi program CSi Bridge 2016 v18.1.0

No.	Frekuensi alami	Mode Shape
1	0,64	
2	0,97	
3	1,32	

Tabel 8. Rasio massa partisipasi modal hasil analisis CSi Bridge 2016 v18.1.0

StepNum	UX	UY	UZ
<i>Unitless</i>	<i>Unitless</i>	<i>Unitless</i>	<i>Unitless</i>
1	4,27E-03	1,02E-08	1,80E-03
2	5,48E-07	6,18E-08	0,41
3	2,91E-10	0,4	5,45E-09

StepNum	RX	RY	RZ
<i>Unitless</i>	<i>Unitless</i>	<i>Unitless</i>	<i>Unitless</i>
1	1,92E-08	0,49	3,73E-08
2	4,44E-10	1,18E-03	2,99E-07
3	0,56	1,06E-08	3,67E-05

5. Analisis Modal Assurance Criterion (MAC)

MAC (*Modal Assurance Criterion*) digunakan untuk mengidentifikasi dua mode value pada struktur model dan struktur terpasang (Youlin Xu dan Yong Xia, 2012). Pada analisis ini hanya digunakan mode value (*eigen vector*) ke-1 untuk kemudahan perhitungan. MAC pada tesis ini, membandingkan antara :

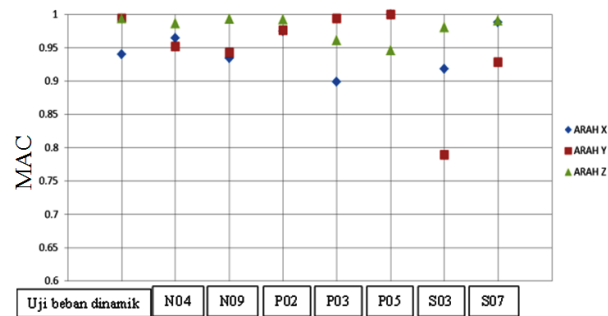
1. model desain dan uji dinamik
2. model desain dan alat-alat sensor

Tabel 9. Hasil analisis MAC

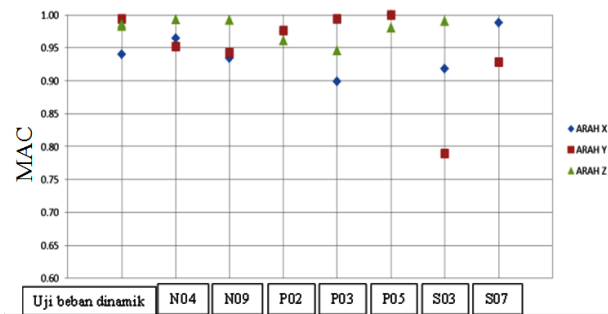
Nama Uji	ϕ_{11}	ϕ_{21}	ϕ_{31}	MAC
Model	1,00	1,52	2,06	1,00
Uji dinamik				
Arah X	1,00	4,35	4,60	0,94
Arah Y	1,00	1,53	2,43	0,99
Arah Z	1,00	1,61	2,81	0,98
Hasil analisis data tanggal 14 – 15 Mei 2016				
N04				
Arah X	1,00	2,50	4,13	0,96
Arah Y	1,00	3,01	5,00	0,95
Arah Z	1,00	2,30	2,90	0,98
N09				
Arah X	1,00	2,32	4,83	0,93
Arah Y	1,00	3,52	5,81	0,94
Arah Z	1,00	1,67	2,58	0,99

Tabel 9. (Lanjutan) Hasil analisis MAC

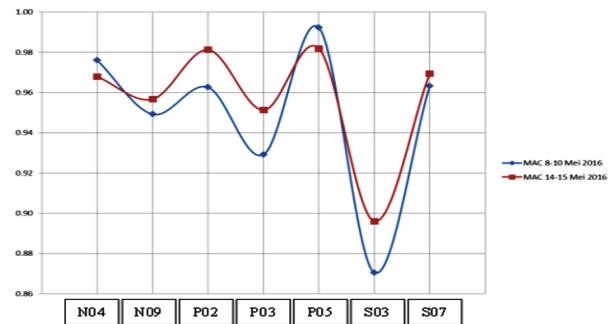
Hasil analisis data tanggal 14 – 15 Mei 2016				
P02				
Arah X	1,00	1,57	2,95	0,97
Arah Y	1,00	2,16	3,49	0,98
Arah Z	1,00	1,84	2,74	0,99
P03				
Arah X	1,00	2,22	5,63	0,90
Arah Y	1,00	1,87	2,19	0,99
Arah Z	1,00	2,29	4,06	0,96
P05				
Arah X	1,00	1,56	2,05	1,00
Arah Y	1,00	1,49	1,97	1,00
Arah Z	1,00	4,29	5,69	0,95
S03				
Arah X	1,00	6,45	6,96	0,92
Arah Y	1,00	4,10	15,41	0,79
Arah Z	1,00	2,16	3,37	0,98
S07				
Arah X	1,00	1,59	2,66	0,99
Arah Y	1,00	3,81	6,74	0,93
Arah Z	1,00	2,00	2,85	0,99
Hasil analisis data tanggal 8 – 10 Mei 2016				
N04				
Arah X	1,00	1,45	1,89	1,00
Arah Y	1,00	2,00	4,48	0,93
Arah Z	1,00	1,52	2,22	1,00
N09				
Arah X	1,00	1,79	3,64	0,96
Arah Y	1,00	3,80	6,45	0,93
Arah Z	1,00	1,32	2,91	0,96
P02				
Arah X	1,00	2,20	3,22	0,98
Arah Y	1,00	1,83	2,65	0,99
Arah Z	1,00	1,75	4,53	0,91
P03				
Arah X	1,00	4,29	5,23	0,95
Arah Y	1,00	2,36	6,93	0,86
Arah Z	1,00	1,94	3,32	0,98
P05				
Arah X	1,00	2,03	2,72	0,99
Arah Y	1,00	1,85	2,29	1,00
Arah Z	1,00	2,23	2,96	0,99
S03				
Arah X	1,00	10,50	13,41	0,90
Arah Y	1,00	1,81	13,19	0,71
Arah Z	1,00	1,88	2,45	1,00
S07				
Arah X	1,00	2,65	3,81	0,97
Arah Y	1,00	2,84	5,83	0,92
Arah Z	1,00	1,72	2,66	0,99



Gambar 24. Grafik hasil analisis MAC tanggal 14 – 15 Mei 2016



Gambar 25. Grafik hasil analisis MAC tanggal 8 – 10 Mei 2016



Gambar 26. Grafik rata - rata analisis MAC

6. Masa Layan Jembatan

Distribusi Weibull dan *Indeks Integritas Global* (GI) digunakan untuk perhitungan masa layan jembatan. Nilai GI merupakan penjumlahan dari perbandingan frekuensi alami nyata/*existing* dan desain (Salawu, 1994).

$$GI = 0.7 \left(\frac{f_{D1}}{f_{O1}} \right) \tag{5}$$

dimana:

f_{D1} = frekuensi alami pertama pada struktur eksisting

f_{O1} = frekuensi alami pertama pada struktur model desain

Frekuensi alami pertama merupakan hal yang mengakibatkan kerusakan awal yang tinggi. GI yang dihitung pada jembatan ini adalah rata-rata dari GI sumbu X, GI sumbu Y, GI sumbu Z. Nilai GI dikalikan 100 (tahun) untuk menghitung *Maximum Likelihood Estimate* (MLE).

$$X_i = GI * 100 \tag{6}$$

Maximum Likelihood Estimation (MLE) digunakan untuk menghitung nilai β dan η yang mana memaksimalkan kemungkinan (*Likelihood*) untuk memperoleh data pengamatan (Abernethy, 2010). Berikut ini adalah rumus untuk menghitung nilai $\hat{\beta}$,

$$\frac{\sum_{i=1}^n X_i^{\hat{\beta}} \ln X_i}{\sum_{i=1}^n X_i^{\hat{\beta}}} - \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \ln X_i - \frac{1}{\hat{\beta}} = 0 \tag{7}$$

Setelah memperoleh nilai $\hat{\beta}$, dapat dihitung $\hat{\eta}$ nilai dengan rumus,

$$\hat{\eta} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n X_i^{\hat{\beta}}}{r} \right)^{\frac{1}{\hat{\beta}}} \tag{8}$$

Kemungkinan tidak terjadi keruntuhan terhadap waktu (*Probability Density Function*) adalah

$$R_t = e^{-(t/\hat{\eta})^{\hat{\beta}}} \tag{9}$$

dimana:

$\hat{\beta}$ = parameter kelandaian atau bentuk grafik maksimum

$\hat{\eta}$ = parameter skala atau masa layan Karakteristik maksimum

r = unit yang gagal

t = masa layan rencana

Tabel 10. Perhitungan nilai GI

Nama Uji	GI			Rata - rata
	X	Y	Z	
Hasil analisis data tanggal 8 – 10 Mei 2016				
N04	2,02	2,15	1,76	1,97
N09	1,28	1,24	0,74	1,08
P02	2,09	1,24	1,23	1,51
P03	1,88	0,94	1,66	1,49
P05	1,62	3,69	1,66	2,32
S03	0,89	1,25	1,83	1,32
S07	2,25	2,11	1,28	1,88
Hasil analisis data tanggal 14 – 15 Mei 2016				
N04	1,39	1,05	1,90	1,45
N09	1,10	1,29	1,94	1,44
P02	1,50	1,47	1,80	1,59
P03	2,14	2,46	2,10	2,23
P05	3,05	3,49	1,19	2,58
S03	1,61	1,01	1,52	1,38
S07	1,68	1,07	1,43	1,40

Tabel 11. Perhitungan MLE data uji tanggal 8 – 10 Mei 2016

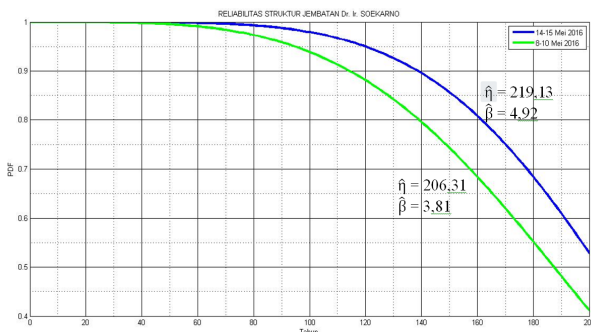
Nama Uji	GI*100	$\sum_{i=1}^n X_i^{\hat{\beta}} \ln X_i$	$\sum_{i=1}^n X_i^{\hat{\beta}}$	$\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \ln X_i$	$\sum_{i=1}^n X_i^{\hat{\beta}}$	$\hat{\eta} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n X_i^{\hat{\beta}}}{r} \right)^{\frac{1}{\hat{\beta}}}$
N04	197,97	2,97E+09	5,62E+08		5,62E+08	
N09	108,64	2,68E+08	5,72E+07	4,69	5,72E+07	
P02	151,67	1,02E+09	2,04E+08		2,04E+08	
P03	149,48	9,65E+08	1,93E+08	5,01	1,93E+08	
P05	232,24	5,63E+09	1,03E+09	5,45	1,03E+09	
S03	131,98	5,86E+08	1,20E+08	4,88	1,20E+08	
S07	188,12	2,43E+09	4,63E+08		4,63E+08	
Jumlah	1160,09	1,39E+10	2,63E+09	5,01	2,63E+09	206,31

t = 100 ; r = 4 ; $\hat{\beta}$ = 3,81 ; MLE = 0,0002

Tabel 12. Perhitungan MLE data uji tanggal 14 – 15 Mei 2016

Nama Uji	GI*100	$\sum_{i=1}^n X_i^{\hat{\beta}} \ln X_i$	$\sum_{i=1}^n X_i^{\hat{\beta}}$	$\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \ln X_i$	$\sum_{i=1}^n X_i^{\hat{\beta}}$	$\hat{\eta} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n X_i^{\hat{\beta}}}{r} \right)^{\frac{1}{\hat{\beta}}}$
N04	144,74	2,12E+11	4,27E+10		4,27E+10	
N09	144,37	2,10E+11	4,21E+10	4,97	4,21E+10	
P02	158,96	3,43E+11	6,77E+10		6,77E+10	
P03	223,49	1,96E+12	3,62E+11	5,41	3,62E+11	
P05	257,76	4,05E+12	7,30E+11	5,55	7,30E+11	
S03	137,81	1,65E+11	3,35E+10	4,93	3,35E+10	
S07	139,64	1,77E+11	3,58E+10		3,58E+10	
Jumlah	1206,77	7,11E+12	1,31E+12	5,21	1,31E+12	219,13

t = 100 ; r = 4 ; $\hat{\beta} = 4,92$; MLE = -0,0003



Gambar 27. Grafik perkiraan masa layan struktur jembatan

Dari distribusi Weibull, Jembatan Dr. Ir. Soekarno dapat digunakan hingga 100 tahun sesuai dengan masa layan rencana.

7. Kesimpulan dan Saran

1. Persepsi dan tingkat kenyamanan para pengguna Jembatan Dr. Ir. Soekarno masih dalam status nyaman. Jembatan dikategorikan laik guna untuk dilalui kendaraan.
2. Tingkat integritas sistem struktur Jembatan Dr. Ir. Soekarno masih berada di atas ambang batas 0,8.
3. Setiap tahun terjadi peningkatan LHR yang melalui Jembatan Dr. Ir. Soekarno, maka perlu dilakukan analisis kenyamanan pengguna jembatan secara rutin.
4. Monitoring kesehatan jembatan lanjut adalah menetapkan kekakuan jembatan menggunakan data rekaman getaran. Hubungan persamaan f (frekuensi alami), E (modulus elastisitas) dan I (inersia) dapat menghitung lendutan di sepanjang bentang jembatan.
5. Analisis modal pada model desain Jembatan Dr. Ir. Soekarno menunjukkan bahwa rasio partisipasi masa modal pertama adalah RY (rotasi pada sumbu Y). Jembatan tersebut perlu dilakukan retrofit

sehingga rasio partisipasi masa modal pertama adalah perpindahan (*first bending mode*).

Daftar Pustaka

Abernethy, Robert B., 2010, *The New Weibull Handbook*, North Palm Beach, USA.

Anonim, 2014, *Penelitian Bangunan Dan Utilitas Stadion Utama Dan Gedung Istora PPKGBK*, PT. LAPI ITB, Bandung, Indonesia.

AshC Motion Picture, 10 September 2015, *Jembatan Soekarno, Manado Sulawesi Utara*. www.youtube.com:Manado.

Chopra, A.K., 2001, *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., USA.

Davis, W. Brian., 2008, *Influence of Construction Details on Vibration Characteristics of old-Formed Steel Floor Systems*, University of Waterloo, Ontario, Canada, 7 – 8.

ISO 2631-1, 1997, *Mechanical Vibration and Shock-Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibration*, Interantional Standart of Organization, Geneva 20, Switzerland, 1 – 17.

ISO 2631-2, 2003, *Mechanical Vibration and Shock-Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibration, part 2: Vibration in Buildings*, Interantional Standart of Organization, Geneva 20, Switzerland.

Rasmussen, C., and C. Williams., 2006, *Gaussian Processes for Machine Learning*, MIT Press, USA.

Subagyo, 2015, *Laporan Pelaksanaan Uji Statik dan Dinamik Jembatan Dr. Ir. Soekarno*, Kementerian PU-PERA, Jakarta, Indonesia, 1 – 8.

Salawu, O.S., 1994, *Structural Integrity Assessment Using Vibration Data*, University of Plymouth, United kingdom, 111-112.

Wijayanto, dkk.

Xu, Youlin, Xia, Yong, 2012, *Structural Health Monitoring of Long-Span Suspension Bridges*, CRC Press, Florida, USA, 288 - 295.

