

**SURAT EDARAN MENTERI PEKERJAAN UMUM
DAN PERUMAHAN RAKYAT
NOMOR : 24/SE/M/2015
TANGGAL 23 APRIL 2015**

TENTANG

**PEDOMAN PERENCANAAN SISTEM MONITORING
KESEHATAN STRUKTUR JEMBATAN**



**KEMENTERIAN PEKERJAAN UMUM
DAN PERUMAHAN RAKYAT**



**MENTERI PEKERJAAN UMUM DAN PERUMAHAN RAKYAT
REPUBLIK INDONESIA**

Kepada Yth.:

Para Pejabat Eselon I di lingkungan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.

**SURAT EDARAN
NOMOR :24 /SE/M/2015**

TENTANG

**PEDOMAN PERENCANAAN SISTEM MONITORING KESEHATAN
STRUKTUR JEMBATAN**

A. Umum

Untuk menjamin keselamatan dan kehandalan struktur jembatan, diperlukan penilaian kondisi struktur dan tindakan pemeliharaan selama umur rencana struktur. Pembebanan aktual dan kondisi struktur perlu dipertimbangkan pada saat melakukan pemeliharaan. Hal yang paling penting untuk penilaian adalah ketersediaan informasi yang aktual. Sistem monitoring kesehatan struktur mencakup pemeriksaan lapangan, pengambilan data dengan menggunakan sistem sensor, dan pengembangan eksperimental untuk memberikan informasi yang luas.

B. Dasar Pembentukan

- 1) Peraturan Pemerintah Nomor 34 Tahun 2006 tentang Jalan (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2006 Nomor 86, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 4655);
- 2) Peraturan Pemerintah Nomor 38 Tahun 2007 tentang Pembagian Urusan Pemerintahan antara Pemerintah, Pemerintahan Provinsi, Pemerintahan Daerah Kabupaten/Kota (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2007 Nomor 82, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 4737);
- 3) Peraturan Presiden Nomor 7 Tahun 2015 tentang Organisasi Kementerian Negara;
- 4) Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 15 Tahun 2015 tentang Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2015 Nomor 16);

- 5) Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 121/P Tahun 2014 tentang Pembentukan Kementerian dan Pengangkatan Menteri Kabinet Kerja Periode Tahun 2014-2019;
- 6) Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 07/PRT/M/2012 tentang Penyelenggaraan Penelitian dan Pengembangan di Bidang Jalan.

C. Maksud dan Tujuan

Surat Edaran ini dimaksudkan sebagai acuan bagi Pejabat Eselon I di Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, perencana, pelaksana dan pengawas dalam melakukan kegiatan sistem monitoring kesehatan struktur yang umum untuk menjamin keselamatan dan kehandalan struktur jembatan. Kesehatan struktur jembatan yang dimaksud merupakan kinerja dan integritas dari struktur jembatan.

D. Ruang Lingkup

Pedoman ini menetapkan ketentuan dan prosedur perencanaan sistem monitoring kesehatan struktur (MKS) jembatan, yang meliputi komponen sistem MKS, teknis monitoring, tujuan monitoring, interpretasi dan analisis data lapangan, serta pelaporan proses monitoring kesehatan struktur.

E. Penutup

Ketentuan lebih rinci mengenai Pedoman Perencanaan Sistem Monitoring Kesehatan Struktur Jembatan ini tercantum dalam Lampiran yang merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari Surat Edaran Menteri ini.

Demikian atas perhatian Saudara disampaikan terima kasih.

Ditetapkan di Jakarta
pada tanggal 23 April 2015

**MENTERI PEKERJAAN UMUM
DAN PERUMAHAN RAKYAT,**



M. BASUKI HADIMULJONO

Tembusan disampaikan kepada Yth.:

Plt. Sekretaris Jenderal, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.

Daftar isi

Daftar isi	i
Prakata	ii
Pendahuluan	iii
1 Ruang lingkup	1
2 Acuan normatif	1
3 Istilah dan definisi	1
4 Ketentuan	4
4.1 Tujuan sistem monitoring kesehatan struktur	4
4.2 Komponen sistem monitoring kesehatan struktur	4
4.2.1 Sistem sensor dan akusisi data	5
4.2.2 Sistem komunikasi data	9
4.2.3 Sistem pengolahan dan pengaturan data	9
4.2.4 Penyimpanan data	9
4.2.5 Diagnostik	9
4.3 Level sistem monitoring kesehatan struktur	10
5 Perencanaan sistem monitoring	12
5.1 Identifikasi struktur	12
5.1.1 Langkah-langkah identifikasi struktur	12
5.1.2 Aplikasi teknik pengujian tidak merusak (<i>non-destructive testing</i> – NDT)	13
5.1.3 Pengujian lapangan	14
5.1.4 Klasifikasi kerusakan dan mekanisme kerusakan	15
5.1.5 Penentuan nilai ambang (<i>threshold</i>) untuk stabilitas, daya layan (<i>serviceability</i>), dan daya pikul beban (<i>load-bearing capacity</i>)	16
5.2 Menentukan tujuan monitoring kesehatan struktur dan parameter ukur	17
5.3 Analisis numerik	17
5.4 Desain komponen MKS	18
5.5 Pemasangan dan kalibrasi sistem	18
5.6 Interpretasi dan analisis data lapangan	18
5.6.1 Kalibrasi model struktur	18
5.6.2 Prosedur lokal	18
5.6.3 Prosedur global	19
5.7 Sistem pelaporan dan peringatan	19
Bibliografi	22
Gambar 1 - Komponen sistem monitoring kesehatan struktur	5
Gambar 2 - Konfigurasi sistem akusisi dan transmisi data	7
Gambar 3 – Konsep prosedur MKS untuk jembatan	11
Gambar 4 – Proses perencanaan sistem monitoring kesehatan struktur	12
Tabel 1 - Kriteria pemilihan sensor	6

Prakata

Pedoman perencanaan sistem monitoring kesehatan struktur jembatan merupakan hasil Penelitian dan Pengembangan Pusat Litbang Jalan dan Jembatan yang mengacu pada '*Guideline for Structural Health Monitoring*, SAMCO tahun 2006. Pedoman ini menjelaskan mengenai perencanaan sistem monitoring kesehatan struktur untuk jembatan, penentuan level monitoring, sistem sensor, sistem akuisisi dan transmisi data, sistem pengolahan dan pengaturan data, sampai sistem manajemen data. Kesehatan struktur jembatan yang dimaksud merupakan kinerja dan integritas dari struktur jembatan.

Pedoman ini dipersiapkan oleh Panitia Teknis 91-01 Bahan Konstruksi Bangunan dan Rekayasa Sipil pada Subpanitia Teknis 91-01-S2 Rekayasa Jalan dan Jembatan melalui Gugus Kerja Jembatan dan Bangunan Pelengkap Jalan, Pusat Litbang Jalan dan Jembatan

Tata cara penulisan disusun mengikuti Pedoman Standardisasi Nasional (PSN) 08:2007 dan dibahas dalam forum konsensus yang diselenggarakan pada tanggal 17 Juli 2014 di Bandung oleh Subpanitia Teknis, yang melibatkan para narasumber, pakar dan lembaga terkait.



Pendahuluan

Untuk menjamin keselamatan dan kehandalan struktur jembatan, diperlukan penilaian kondisi struktur dan tindakan pemeliharaan selama umur rencana struktur. Pembebanan aktual dan kondisi struktur perlu dipertimbangkan pada saat melakukan pemeliharaan. Hal yang paling penting untuk penilaian adalah ketersediaan informasi yang aktual.

Sistem monitoring kesehatan struktur mencakup pemeriksaan lapangan, pengambilan data dengan menggunakan sistem sensor, dan pengembangan eksperimental untuk memberikan informasi yang luas. Prosedur ini juga mendukung analisis komputasional dengan pengukuran spesifik mengenai beban aktual dan kepraktisan dalam banyak aplikasi. Kemajuan teknologi sensor dengan aplikasi teknologi informasi dan analisis data memberikan kontribusi terhadap perkembangan prosedur ini. Di Indonesia sistem monitoring kesehatan struktur sudah diaplikasikan pada Jembatan Suramadu.

Pedoman menjelaskan ketentuan teknis umum perencanaan sistem monitoring struktur untuk semua jenis jembatan. Khusus untuk jembatan bentang panjang, penetapan ketentuan teknis yang lebih detail dapat merujuk pada 'Pedoman *Structural Health Monitoring System (SHMS)* Sederhana pada Konstruksi Jembatan Bentang Panjang' yang disusun oleh Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum.

Perencanaan sistem monitoring kesehatan struktur jembatan

1 Ruang lingkup

Pedoman ini menetapkan ketentuan dan prosedur perencanaan sistem monitoring kesehatan struktur (MKS) jembatan, yang meliputi komponen sistem MKS, teknis monitoring, tujuan monitoring, interpretasi dan analisis data lapangan, serta pelaporan proses monitoring kesehatan struktur.

2 Acuan normatif

Dokumen referensi di bawah ini harus digunakan dan tidak dapat ditinggalkan untuk melaksanakan pedoman ini.

SNI ASTM C-597:2012, *Metode uji kecepatan rambat gelombang melalui beton*

SNI ASTM C-805:2012, *Metode uji angka pantul beton keras*

SNI ISO 3452-1:2014, *Uji tak rusak – Uji penetran – Bagian 1: Prinsip umum*

SNI ISO 16810:2014, *Uji tak rusak – Uji ultrasonik – Prinsip umum*

SNI ISO 16831:2014, *Uji tak rusak - Uji ultrasonik - Karakterisasi dan verifikasi peralatan ultrasonik pengukur ketebalan*

SNI ISO 9934-1:2012, *Uji tak rusak – Uji partikel magnetik – Bagian 1: Prinsip umum*

SNI ISO 10675-1:2010, *Uji tak rusak lasan - Tingkat keberterimaan untuk uji radiografi - Bagian 1 : baja, nikel, titanium dan paduannya*

3 Istilah dan definisi

Untuk tujuan penggunaan pedoman ini, istilah dan definisi berikut digunakan.

3.1

akuisisi data (*Data Acquisition-DAQ*)

sampling dan pengolahan sinyal, biasanya diproses oleh komputer untuk mendapatkan informasi yang diinginkan

3.2

beban lalu lintas

seluruh beban hidup, arah vertikal dan horizontal, akibat aksi kendaraan pada jembatan termasuk hubungannya dengan pengaruh dinamis, tetapi tidak termasuk akibat tumbukan

3.3

daktilitas

kemampuan material untuk mengalami deformasi plastis tanpa putus (*rupture*)

3.4

data mining

ekstraksi yang secara potensial bermanfaat, yang sebelumnya tidak dikenal, informasi dari database yang besar

3.5

daya layan (*serviceability*)

kemampuan struktur untuk melayani atau mampu melayani sesuai tujuan yang direncanakan

3.6

deteriorasi

proses yang menurunkan kinerja struktur, termasuk keandalannya dari waktu ke waktu

3.7

eksitasi dinamis

sumber luar yang menyebabkan respon dinamik pada struktur

3.8

frekuensi alami

frekuensi saat struktur paling mudah tereksitasi

3.9

frequency domain analysis (FDA)

analisis dinamis yang diproses dengan mengambil frekuensi terhadap waktu, sebagai variabel independen

3.10

getaran/vibrasi

gerak periodik berupa gelombang dari struktur atau komponen struktur

3.11

global positioning system (GPS)

sebuah sistem navigasi radio di seluruh dunia yang terbentuk dari konstelasi satelit dan stasiun bumi. Sistem ini menggunakan jaringan titik acuan untuk menghitung setiap posisi di lapangan secara akurat

3.12

inspeksi

pemeriksaan di tempat dan tidak merusak untuk menetapkan kondisi struktur saat ini

3.13

investigasi/penyelidikan

pengumpulan dan evaluasi informasi melalui pemeriksaan, penelitian dokumen, pengujian beban dan metode eksperimental lainnya

3.14

jembatan

bangunan pelengkap jalan yang berfungsi sebagai penghubung dua ujung jalan yang terputus oleh sungai, saluran, lembah dan selat, atau laut, jalan raya dan jalan kereta api

3.15

kegagalan struktur (*failure*)

keadaan atau kondisi suatu struktur atau komponen struktur menjadi tidak berfungsi untuk servis yang diharapkan

3.16

kelelahan (*fatigue*)

efek samping pada material logam akibat siklus berulang pada tegangan

3.17

kerusakan (*damage*)

perubahan yang kurang baik pada kondisi struktur yang dapat mempengaruhi kinerja struktur

3.18

kondisi batas

sekumpulan kriteria kinerja yang ditetapkan, seperti lendutan, tingkat getaran, dll, sebagai kondisi acuan yang harus dipenuhi oleh struktur akibat beban

3.19

manajemen jembatan (*bridge management*)

sebuah proses pengambilan keputusan kerangka kerja yang meliputi pemeliharaan dan pengoperasian jembatan, untuk menjaga keamanan dan daya layan struktur, dengan mempertimbangkan perubahan lingkungan, ekspektasi publik, dan perkembangan teknologi

3.20

monitoring

pengamatan yang dilakukan terus-menerus atau pengukuran kondisi struktur

3.21

monitoring kesehatan struktur (MKS)

pelacakan berbagai aspek kinerja dan integrasi struktur dalam kaitannya dengan sistem keamanan dan layanan

3.22

parameter modal

informasi yang paling mendasar tentang mode getar, yaitu frekuensi getaran, sesuai dengan ragam bentuk dan redaman

3.23

pemeliharaan

kegiatan rutin untuk mempertahankan kinerja struktur yang tepat

3.24

pengujian tidak merusak (*non destructive testing*)

pengujian yang bertujuan untuk menilai kualitas dan integritas dari berbagai komponen dengan karakterisasi (misalnya deteksi cacat) tanpa dampak apapun terhadap fungsi komponen dalam penerapannya

3.25

penilaian (*assessment*)

suatu kegiatan yang dilakukan untuk memverifikasi kehandalan struktur yang ada untuk penggunaan selanjutnya

3.26

sensor

sebuah perangkat yang dirancang untuk memperoleh informasi dari objek dan mengubahnya menjadi sinyal elektrik

3.27

sistem pakar/cerdas

sebuah sistem cerdas buatan berbasis perangkat lunak yang menganalisis informasi dan meningkatkan kualitas dan kuantitaas basis data untuk tujuan tertentu

3.28

sistem pendukung keputusan (*Decision Support System-DSS*)

sebuah sistem informasi berbasis komputer interaktif yang membantu pengambilan keputusan dengan menyusun informasi yang berguna dari data mentah, dokumen, dan pengetahuan lainnya

3.29

transformasi *fourier*

sebuah transformasi integral digunakan untuk yang berhubungan dengan variabel *time domain* dan *frequency domain* untuk analisis getaran acak

3.30

transformasi *wavelet*

sebuah alat untuk dekomposisi sinyal ke dalam komponen yang tergantung waktu dan skala, dalam hal ini disebut koefisien *wavelet* sesuai untuk analisis data non-stasioner

3.31

uji beban (*load testing*)

uji struktur atau komponennya dengan cara dibebani untuk mengevaluasi perilaku atau sifat, atau untuk memprediksi kapasitas struktur menahan beban

4 Ketentuan

4.1 Tujuan sistem monitoring kesehatan struktur

Tujuan utama sistem monitoring kesehatan struktur jembatan adalah:

- Memantau kondisi struktur;
- Menilai kinerja struktur;
- Mendeteksi kerusakan atau deteriorasi pada struktur;
- Memverifikasi atau memperbarui kode/aturan/standar yang digunakan dalam tahap perancangan;
- Menyediakan data pendukung untuk pemeriksaan dan preservasi jembatan (lihat Pedoman pemeriksaan jembatan dan Pedoman preservasi jembatan).

4.2 Komponen sistem monitoring kesehatan struktur

Rincian spesifikasi dari sistem monitoring kesehatan struktur dapat bervariasi secara substansi. Pada sistem monitoring kesehatan struktur modern biasanya terdiri dari enam komponen umum, yaitu:

- Sistem sensor dan akuisisi data;
- Sistem komunikasi;
- Sistem pengolahan dan analisis data;
- Penyimpanan data;
- Diagnostik (misal: deteksi kerusakan dan model algoritma);
- Pengambilan informasi yang diperlukan.

Diagram alir antara keenam komponen sistem MKS ini ditunjukkan pada Gambar 1.

3.28

sistem pendukung keputusan (*Decision Support System-DSS*)

sebuah sistem informasi berbasis komputer interaktif yang membantu pengambilan keputusan dengan menyusun informasi yang berguna dari data mentah, dokumen, dan pengetahuan lainnya

3.29

transformasi *fourier*

sebuah transformasi integral digunakan untuk yang berhubungan dengan variabel *time domain* dan *frequency domain* untuk analisis getaran acak

3.30

transformasi *wavelet*

sebuah alat untuk dekomposisi sinyal ke dalam komponen yang tergantung waktu dan skala, dalam hal ini disebut koefisien *wavelet* sesuai untuk analisis data non-stasioner

3.31

uji beban (*load testing*)

uji struktur atau komponennya dengan cara dibebani untuk mengevaluasi perilaku atau sifat, atau untuk memprediksi kapasitas struktur menahan beban

4 Ketentuan

4.1 Tujuan sistem monitoring kesehatan struktur

Tujuan utama sistem monitoring kesehatan struktur jembatan adalah:

- Memantau kondisi struktur;
- Menilai kinerja struktur;
- Mendeteksi kerusakan atau deteriorasi pada struktur;
- Memverifikasi atau memperbarui kode/aturan/standar yang digunakan dalam tahap perancangan;
- Menyediakan data pendukung untuk pemeriksaan dan preservasi jembatan (lihat Pedoman pemeriksaan jembatan dan Pedoman preservasi jembatan).

4.2 Komponen sistem monitoring kesehatan struktur

Rincian spesifikasi dari sistem monitoring kesehatan struktur dapat bervariasi secara substansi. Pada sistem monitoring kesehatan struktur modern biasanya terdiri dari enam komponen umum, yaitu:

- Sistem sensor dan akuisisi data;
- Sistem komunikasi;
- Sistem pengolahan dan analisis data;
- Penyimpanan data;
- Diagnostik (misal: deteksi kerusakan dan model algoritma);
- Pengambilan informasi yang diperlukan.

Diagram alir antara keenam komponen sistem MKS ini ditunjukkan pada Gambar 1.

Tabel 1 - Kriteria pemilihan sensor

Karakteristik kinerja sensor	Batasan lingkungan	Pertimbangan ekonomi
Kepekaan (<i>sensitivity</i>) Resolusi (<i>resolution</i>) Rentang (<i>range</i>) Linearitas (<i>linearity</i>) Histeresis (<i>hysteresis</i>) Akurasi (<i>accuracy</i>) Pengulangan (<i>repeatability</i>) Stabilitas (<i>stability</i>) Waktu respon (<i>response time</i>) Respon frekuensi (<i>frequency response</i>)	Kisaran temperatur (<i>temperature range</i>) Kisaran kelembaban (<i>humidity range</i>) Ukuran (<i>size</i>) Pengemasan (<i>packaging</i>) Isolasi (<i>isolation</i>) Efek termal (<i>thermal effects</i>)	Biaya (<i>cost</i>) Ketersediaan (<i>availability</i>) Keandalan (<i>reliability</i>) Kemudahan instalasi (<i>ease of installation</i>) Kebutuhan akuisisi data (<i>data acquisition needs</i>)

Tujuan mengevaluasi kriteria ini adalah untuk memilih sensor yang paling sesuai dengan identifikasi parameter yang mencirikan besaran ukur dan lingkungan monitoring. Hal ini akan memastikan bahwa pemilihan sensor memaksimalkan kehandalan dan efisiensi pengukuran serta meminimalkan ketidakpastian yang terkait.

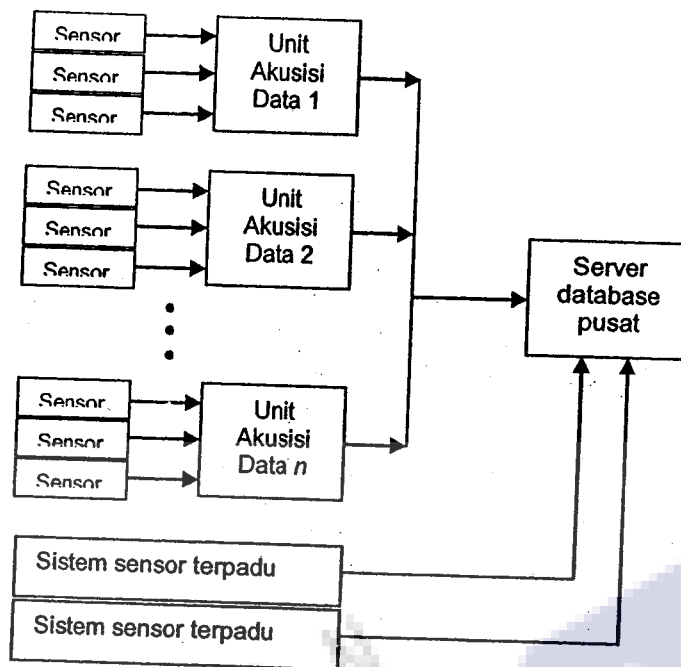
b. Pemasangan dan penempatan sensor

Pada saat mendesain sistem monitoring kesehatan struktur harus dipastikan sensor dapat dengan mudah dipasang pada struktur tanpa mengubah perilaku struktur. Adanya kabel sensor, saluran kabel (*conduit*), kotak tempat hubungan kabel sensor (*junction box*), dan aksesoris lainnya yang perlu dilindungi, harus dipertimbangkan dan diperhitungkan selama proses desain. Kondisi daya tahan sensor yang buruk, pemasangan jaringan kabel yang buruk, desain peralatan akuisisi data yang buruk dapat mengurangi fungsi sistem monitoring kesehatan struktur.

c. Transfer data ke sistem akuisisi data

Sensor menghasilkan sinyal analog atau digital yang mewakili parameter fisik yang dimonitor. Akuisisi data adalah perangkat perantara antara sensor dan komputer, mengumpulkan sinyal yang dihasilkan oleh sensor, mengkonversinya, dan mengirimkan sinyal ke komputer untuk diproses.

Konfigurasi sistem akuisisi dan transmisi data (*data acquisition and transmission system-DATS*) untuk sistem monitoring jembatan jangka panjang pada umumnya jauh lebih rumit, yang terdiri dari jaringan kabel lokal unit akuisisi data (*data acquisition unit-DAU*) yang berdiri sendiri atau substasiun, dan jaringan kabel global, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Jaringan kabel lokal mengacu pada kabel yang menghubungkan sensor didistribusikan ke DAU individu, dan jaringan kabel global yang mengacu pada kabel yang menghubungkan ke server database pusat. Sistem ini bersatu menangkap informasi yang sesuai, mengubah informasi menjadi data digital, dan langsung terhubung ke server pusat data untuk pengolahan.



Gambar 2 - Konfigurasi sistem akusisi dan transmisi data

Sebuah DAU umumnya terdiri dari sejumlah komponen elektronik termasuk *signal conditioner*, unit memori dan penyimpanan data, *microcontroller*, perangkat komunikasi, catu daya tanpa hambatan/tidak terganggu, kipas/pendingin ruangan (AC), penangkal petir, dan *GPS time synchronizer*. Untuk pemantauan jangka panjang semua komponen ini harus terintegrasi dalam suatu kabinet atau ruangan yang tahan air dan temperatur ruangan yang dikondisikan.

Setelah perangkat lunak selesai dipasang, DATS harus diuji atau diverifikasi melalui uji lapangan, misalnya uji beban. Verifikasi lapangan dapat membantu mengidentifikasi masalah pada perangkat keras, pemasangan, pengkabelan, dan perangkat lunak, sehingga masalah dapat diatasi sebelum operasi normal. Setelah beroperasi dalam jangka waktu tertentu, DAU pasti mengalami *error* atau kerusakan. Oleh karena itu, harus melakukan kalibrasi secara berkala.

d. Tipe data

Beberapa tipe data yang bisa dimonitor oleh sistem monitoring kesehatan struktur, antara lain:

a. Beban

Sistem MKS dapat mengumpulkan informasi tentang besarnya dan konfigurasi beban yang diterapkan pada struktur. Dengan menggunakan data ini, dapat ditentukan apakah beban pada struktur sesuai seperti yang diharapkan, atau mengalami kelebihan beban (yang dapat berbahaya dan merusak struktur). MKS juga dapat digunakan untuk mempelajari distribusi beban pada struktur. Beban dapat diukur secara langsung menggunakan *load cell* yang terpasang pada struktur, atau dapat disimpulkan melalui regangan atau parameter lainnya yang diukur pada komponen struktur tertentu.

b. Deformasi

Semua struktur mengalami deformasi atau defleksi beberapa derajat. Perkiraan deformasi ini didesain berdasarkan asumsi penyederhanaan, tapi MKS dapat memonitor deformasi yang sebenarnya yang disebabkan oleh semua beban fisik dan lingkungan. Deformasi yang berlebihan atau deformasi di tempat-tempat yang tak terduga, kemungkinan merupakan sinyal deteriorasi atau perubahan kondisi struktur yang dapat digunakan untuk menilai struktur dan menyediakan data akan kebutuhan rehabilitasi atau

peningkatan kapasitas struktur. Deformasi dan defleksi dapat diukur dengan berbagai jenis *displacement transducers* dan *tiltmeter*. Ukuran langsung dari *displacement* membutuhkan titik acuan atau titik landasan *transducer* yang tepat.

c. Regangan

Regangan merupakan ukuran intensitas deformasi dari komponen struktur. Regangan dapat digunakan untuk mendapatkan banyak informasi tentang perilaku dan kinerja struktur, hal ini merupakan yang paling umum digunakan dalam sistem MKS. Besarnya regangan yang diukur dan variasi besaran yang tercatat selama umur struktur, dapat diperiksa untuk mengevaluasi keamanan dan integritas struktur. Regangan dalam komponen struktur dapat langsung diukur pada lokasi yang diinginkan dengan menggunakan *electrical resistance strain gauges*, *vibrating wire strain gauges*, atau *fiber optic sensors* (FOS).

d. Temperatur

Perubahan temperatur dapat menyebabkan penyusutan atau pengembangan pada material dikarenakan adanya efek ekspansi termal. Dengan menggabungkan pengukuran temperatur, sistem MKS dapat memberikan informasi tentang bagaimana perubahan temperatur mempengaruhi struktur, dan apakah beban dan regangan yang terinduksi secara termal sesuai seperti yang diharapkan. Temperatur juga dapat mempengaruhi pembacaan sensor tertentu atau peralatan penginderaan yang digunakan dalam MKS. Dengan demikian, ketika mengumpulkan data dari pengukur temperatur yang sensitif, efek temperatur harus diukur dan dipertanggungjawabkan. Temperatur dapat diukur dengan menggunakan *termokopel*, *circuits*, *thermistors*, atau beberapa jenis FOS.

e. Akselerasi/percepatan

Beban pada struktur menyebabkan percepatan komponen struktur ($F = Ma$). Sebaliknya, percepatan tanah yang disebabkan oleh beban gempa mengakibatkan pembebanan dinamis pada komponen struktur. Kombinasi dari respon frekuensi atau amplitudo terhadap eksitasi dinamis disebut respon modal. Meskipun struktur didesain untuk menahan percepatan ini, MKS dapat digunakan untuk menentukan dengan tepat bagaimana struktur merespon percepatan tersebut dan beban yang dihasilkan melalui penentuan parameter respon modal. Karena perubahan kondisi tumpuan atau sifat material, memungkinkan adanya pergeseran parameter modal. Maka, dalam kondisi tertentu, sistem MKS mampu digunakan untuk mengidentifikasi kerusakan dan deteriorasi, dengan mengamati perubahan respon modal yang diukur. Percepatan biasanya diukur dengan menggunakan *accelerometer*.

f. Kecepatan dan tekanan angin

Kecepatan angin biasanya tidak menjadi pertimbangan utama pada sebagian besar struktur jembatan. Namun, untuk jembatan bentang panjang, angin dapat menentukan kriteria desain dan harus direkam/dicatat di berbagai lokasi pada sistem MKS. Kecepatan angin dapat diukur dengan menggunakan *anemometer*.

g. Monitoring dengan video pengawas

Video pengawas dan sistem *webcam* dapat digunakan untuk memonitor kondisi sekitar jembatan. Contoh penggunaan video pengawas di MKS adalah meninjau jembatan jalan raya yang dilewati kendaraan truk dengan beban berlebih. Sensor dalam jembatan (*load cell*, *strain gauges*, *displacement transducers*) mendeteksi kendaraan tersebut dan mengirim sinyal ke DAS untuk menyimpan rekaman video ketika kendaraan melewati jembatan. Perlu diketahui bahwa adanya beban berlebih secara periodik dapat menyebabkan jembatan mengalami kerusakan.

4.2.2 Sistem komunikasi data

Dalam DATS, jaringan komunikasi harus seragam untuk menjamin data dapat dikirim melalui seluruh sistem. Berbagai teknologi jaringan komunikasi seperti ethernet, RS-232, RS-485, IEEE-1394 dapat digunakan untuk jaringan yang umum.

Dalam sistem monitoring kesehatan untuk jembatan bentang panjang, jarak DAU ke kantor pusat kontrol dapat mencapai beberapa kilometer, dapat menggunakan kabel fiber optik, atau jika memungkinkan dapat menggunakan jaringan komunikasi yang tersedia seperti jaringan telepon, internet, seluler, frekuensi radio, atau satelit.

Komunikasi dan jaringan nirkabel telah berkembang pesat dan digunakan untuk transmisi data, sedangkan kecepatan transmisi dan akurasi masih tidak sebanding dengan jaringan berbasis kabel saat ini. Namun demikian, jaringan nirkabel memiliki keuntungan dalam beberapa situasi, misalnya untuk monitoring pada saat pelaksanaan konstruksi dimana jaringan kabel belum siap.

4.2.3 Sistem pengolahan dan pengaturan data

Data yang diperoleh dari bebrbagai sensor dapat mengandung informasi asing dan *noise* yang tidak diinginkan. Maka diperlukan pengolahan data secara 'cerdas' sebelum data disimpan untuk diinterpretasikan dan dianalisis. Tujuan pengolahan data secara 'cerdas' adalah untuk menghapus informasi yang tidak diinginkan dan membuat interpretasi data lebih mudah, lebih cepat, dan lebih akurat. Selain itu, untuk menangani data yang dihasilkan dalam jumlah besar dengan menghilangkan data yang tidak perlu tanpa mengorbankan integritas sistem secara keseluruhan.

Fungsi sistem pengolahan dan pengaturan data meliputi:

- Mengatur dan menampilkan pengoperasian sistem akusisi data
- Pra-pengolahan sinyal (*raw signal*) yang diterima dari sistem akusisi data
- Pengarsipan data ke dalam database atau media penyimpanan
- Paska-pengolahan data
- Menampilkan data paska pengolahan
- Sistem keamanan data

4.2.4 Penyimpanan data

Data yang dikumpulkan dan data yang diolah atau data hasil dari sistem monitoring kesehatan harus disimpan dan dikelola dengan baik untuk ditampilkan dan dianalisis lebih lanjut. Selain itu, informasi yang relevan pada sistem monitoring, model komputasi dan dokumen perencanaan perlu didokumentasikan juga.

Media penyimpanan data harus baik sehingga data dapat tersimpan untuk jangka waktu yang lama tanpa kerentanan terhadap kerusakan data/*corruption*. Jumlah memori yang diperlukan untuk penyimpanan data harus disesuaikan dengan aplikasi MKS (jumlah dan jenis sensor, kecepatan data sampling, dan lain-lain) dan perawatan harus dilakukan untuk memastikan adanya ketersediaan memori.

4.2.5 Diagnostik

Diagnostik berkaitan dengan menganalisis sinyal data yang abstrak untuk menghasilkan informasi yang berguna mengenai respon dan perilaku struktur. Kegiatan ini membutuhkan ahli struktur serta pemahaman mengenai perilaku struktur yang mungkin akan terpengaruh akibat adanya kerusakan, deteriorasi, atau perubahan kondisi.

Tingkat kompleksitas analisis akan berubah berdasarkan kebutuhan program monitoring dan komponen sistem MKS. Dalam aplikasi sederhana cukup dengan mengubah pembacaan

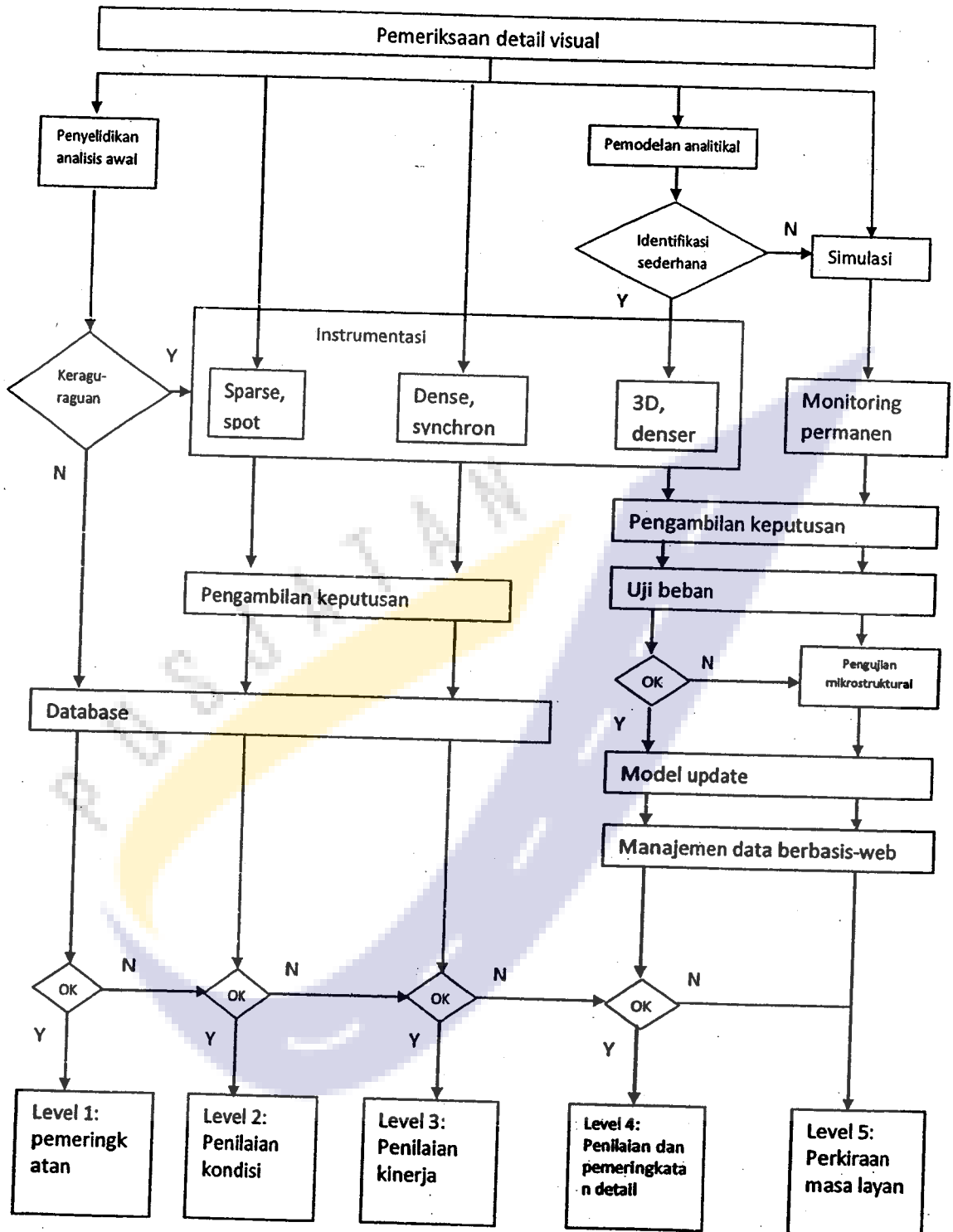
regangan menjadi tegangan untuk penilaian terhadap batas kritis (batas leleh). Sedangkan, untuk tingkat kecanggihan yang lebih tinggi adalah membuat model numerik atau model struktur yang tepat dari struktur yang terkalibrasi terhadap pengukuran awal yang akan harus diperbarui secara periodik sesuai dengan data respon hasil analisis monitoring.

4.3 Level sistem monitoring kesehatan struktur

Tingkatan monitoring ini tergantung dari hasil yang akan dicapai. Saat ini ada lima level yang digunakan untuk menentukan kedalam investigasi (sebagaimana yang didefinisikan oleh Wenzel, tahun 2009). Gambar 3 menunjukkan konsep prosedur pengembangan dari pemeriksaan rutin sederhana ke monitoring yang canggih. Lima level tersebut yaitu:

- a. Level 1: pemeringkatan (*rating*). Hal ini menggambarkan penilaian struktur secara konvensional dengan pemeriksaan visual, yang memberikan kesan subjektif dari kondisi struktur. Investigasi awal yang dilakukan untuk menetapkan nilai sebagai dasar pengambilan tindakan selanjutnya. Pengelola jembatan menggunakan *database* untuk menyimpan hasilnya.
- b. Level 2: penilaian kondisi (*condition assessment*). Informasi yang dihasilkan dari pemeriksaan visual masih lemah (ketelitiannya rendah). Oleh karena itu perlu diputuskan apakah informasi tersebut sudah cukup atau perlu ditingkatkan atau bahkan diperlukan pendekatan dengan penambahan instrumentasi yang canggih. Hal ini menentukan tipe dan kuantitas dari instrumentasi. Untuk penilaian kondisi hanya diperlukan instrumentasi sederhana dan sistem pengambilan keputusan yang sederhana pula yang menyediakan informasi penting tambahan. Penyimpanan dan penafsiran data sudah dilakukan pada *database* eksisting. Monitoring dapat dilakukan hanya pada satu tempat saja.
- c. Level 3: penilaian kinerja (*performance assessment*). Hal ini merupakan level menengah dimana prosedur yang digambarkan pada level 2 dapat digunakan. Tingkat elaborasi penilaian dan kinerja pada proses pendukung keputusan (*decision support*) sangat tinggi untuk menyediakan data tambahan seperti ragam getar yang diukur dan dielaborasi. Hal ini menyediakan indikator tambahan untuk penilaian dan mendemonstrasikan kinerja struktur. Hal ini jelas membutuhkan instrumentasi yang banyak dan monitoring yang sesuai.
- d. Level 4: penilaian dan pemeringkatan detail (*detail assessment and rating*). Level selanjutnya akan membuat analisis model yang mewakili struktur eksisting. Model ini akan dibandingkan dengan hasil monitoring. Jika identifikasinya sederhana, maka kembali ke level 3. Jika hasil rekaman tidak bisa menjelaskan peristiwa yang terjadi, maka perlu diambil langkah selanjutnya. Hal yang dapat dilakukan adalah memasang perekam permanen selama beberapa waktu untuk mengambil peristiwa penting dan berlaku juga untuk kasus khusus. Uji beban (*load testing*) terbukti berhasil menetapkan parameter kinerja. Dari hasil ini model sederhana yang diperbarui dapat dilakukan penilaian dan dikelaskan (*rating*). Hal ini membutuhkan monitoring yang luas. Waktu perekaman dilakukan setidaknya 24 jam, tetapi sebaiknya lebih lama untuk memperoleh kondisi lingkungan dan lalu lintas.
- e. Level 5: prediksi masa layan. Untuk memprediksi masa layan dibutuhkan perekaman yang cukup lama setidaknya tiga siklus yang relevan untuk struktur. Biasanya dilakukan tiga tahun berturut-turut. Simulasi dilakukan dari analisis model untuk mendapatkan kinerja teoritis sebagai perbandingan. Untuk menangani kuantitas data yang besar, dibutuhkan peranti lunak (*software*) khusus untuk pendukung keputusan (*decision support*). Uji beban akan dilakukan dan diperluas. Kemungkinan pengujian mikrostruktural akan berguna untuk melihat kinerja dari elemen tunggal stuktur. Pembaruan proses akan diperluas dan mempertimbangkan beberapa kondisi struktur. Hal ini meliputi khususnya kasus terbebani dan tidak terbebani dan semua yang meliputi non-linear. Untuk kasus yang meragukan,

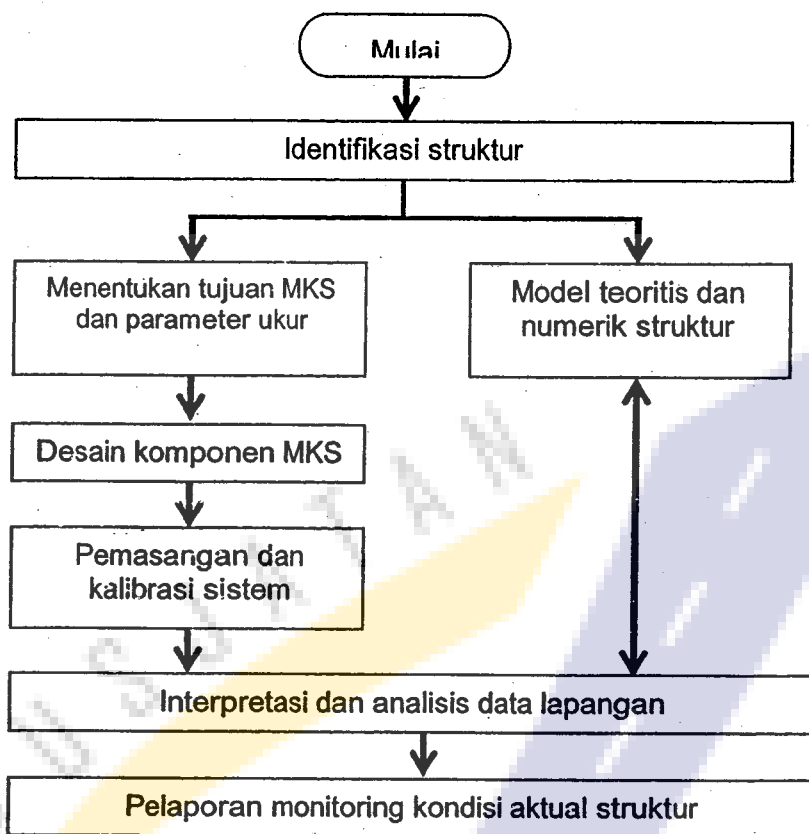
sistem monitoring ini dioperasikan dalam keadaan online dan *web-based* dengan perhitungan peringatan oleh pendukung keputusan (*decision support*).



Gambar 3 – Konsep prosedur MKS untuk Jembatan

5 Perencanaan sistem monitoring

Dijelaskan secara singkat rekomendasi perencanaan sistem monitoring kesehatan struktur, yang langkah-langkah utamanya ditunjukkan pada Gambar 4. Pada saat proses desain, pemasangan, dan pengoperasian harus berkonsultasi dengan spesialis monitoring kesehatan struktur untuk memastikan keberhasilan penerapan teknologi ini.



Gambar 4 – Proses perencanaan sistem monitoring kesehatan struktur

5.1 Identifikasi struktur

5.1.1 Langkah-langkah identifikasi struktur

Prinsip identifikasi struktur memberikan petunjuk untuk menentukan sistem pengukuran yang optimal. Hal ini dapat mengkarakterisasikan struktur secara lengkap dan akurat untuk menetapkan kesehatan struktur dalam batas layan dan ultimitnya. Langkah-langkah dari identifikasi struktur adalah:

a. Mengumpulkan informasi dan pemodelan awal

Semua dokumen desain harus dikonsultasikan untuk diperiksa nilai-nilai geometris dan karakteristik bahan bangunannya. Dokumen atau rincian yang tidak ada atau tidak lengkap harus diselesaikan dengan melakukan pengukuran dan pengujian tidak merusak pada struktur dan sampel material. Model struktur yang mewakili data inisial struktur biasanya belum lengkap dan masih kasar, maka harus disempurnakan.

b. Identifikasi sumber daya manusia

Banyak sumber daya manusia yang diperlukan disesuaikan dengan tingkat kompleksitas sistem MKS. Diperlukan ahli struktur, ahli informatika, ahli material, dan ahli instrumentasi untuk mengawasi penerapan sistem MKS ini.

c. Evaluasi kondisi aktual

Diperlukan data mengenai dokumentasi struktur eksisting, detail struktur khusus, data kerusakan yang diketahui, hasil pemeriksaan visual, dan hasil pengujian merusak dan/atau tidak merusak. Data tersebut harus dipertimbangkan untuk menilai kondisi aktual struktur.

d. Penilaian daya dukung struktur eksisting

Daya dukung struktur harus dibuktikan berdasarkan semua informasi yang ada dan asumsi konsep keamanan untuk beban dan tahanan/resistensi struktural, baik untuk penggunaan saat ini atau perubahan penggunaan pada struktur.

e. Persiapan analisis eksperimental

Dalam persiapan pengujian skala penuh, dilakukan analisis sensitivitas (analisis ketidakpastian) pada model yang ada sebelumnya, untuk menentukan eksitasi dan respon optimal untuk pengujian dinamis dan memilih rentang yang dapat diterima pengukuran. Berdasarkan studi analitis dan eksperimen awal, konfigurasi beban untuk pengujian statis serta jenis, jumlah dan lokasi sensor harus dioptimalkan

f. Pengujian skala penuh

Pengujian beban statis harus dilakukan karena kurangnya pengetahuan mengenai model struktural, interaksi komponen, dampak dari kerusakan, dan efektifitas dari tindakan perbaikan. Pengujian dinamis dapat dilakukan untuk memverifikasi perilaku sistem global dan mekanisme penting yang mempengaruhi mode getar global. Untuk pengujian fatik, perilaku dinamis struktur harus diketahui.

g. Pengolahan data eksperimental

Pengolahan dan pengkondisian data pengukuran dari pengujian skala penuh merupakan langkah untuk mencapai tingkat keyakinan yang lebih tinggi dari informasi tentang struktur.

h. Kalibrasi model

Sifat mekanis, kondisi batas dan kondisi kontinuitas dari model harus disesuaikan dengan pengamatan fisik selama eksperimen/pengujian dan diperoleh dari hasil proses data eksperimen/pengujian.

i. Pemanfaatan model terkalibrasi

Model analisis lapangan terkalibrasi berfungsi sebagai acuan baru kondisi aktual struktur. Hal ini dapat digunakan untuk penilaian daya pikul beban, penilaian beban, dan mengevaluasi kekuatan internal, tegangan dan deformasi pada kondisi beroperasi.

5.1.2 Aplikasi teknik pengujian tidak merusak (*non-destructive testing* – NDT)

Pengujian tidak merusak dapat digunakan untuk menentukan kondisi aktual jembatan dan dapat digunakan sebagai data pendukung monitoring kesehatan jembatan.

a. Pengujian kondisi bahan baja

- 1) Uji penetrasi cairan (mengacu pada SNI ISO 3452-1:2014, *Uji tak rusak – Uji penetran – Bagian 1: Prinsip umum*)
- 2) Uji partikel magnetik (mengacu pada SNI ISO 9934-1:2012, *Uji tak rusak – Uji partikel magnetik – Bagian 1: Prinsip umum*)
- 3) Uji ultrasonik (mengacu pada SNI ISO 16810:2014, *Uji tak rusak – Uji ultrasonik – Prinsip umum; dan SNI ISO 16831:2014, Uji tak rusak - Uji ultrasonik - Karakterisasi dan verifikasi peralatan ultrasonik pengukur ketebalan*)
- 4) Uji radiografi (mengacu pada SNI ISO 10675-1:2010, *Uji tak rusak lasan - Tingkat keberterimaan untuk uji radiografi - Bagian 1 : baja, nikel, titanium dan paduannya*)

- 5) Uji elektromagnetik *Eddy current*
 - 6) Uji visual
 - 7) Pengukuran ketebalan
 - 8) Pengukuran perbedaan potensial listrik
- b. Pengujian kondisi baja beton
- 1) Metode potensial setengah sel
Metode ini digunakan untuk mendeteksi potensial korosi pada batang tulangan di beton.
 - 2) Uji angka pantul beton keras (mengacu pada SNI ASTM C-805:2012)
Pengujian ini digunakan untuk mengevaluasi kekerasan permukaan pada beton.
 - 3) Uji kedalaman karbonasi
Pengujian ini digunakan untuk mengetahui apakah kelembaban (udara yang mengandung CO₂) telah mencapai kedalaman tulangan sehingga memungkinkan terjadinya korosi.
 - 4) Uji permeabilitas permukaan
Pengujian ini digunakan untuk mengukur aliran air melalui beton.
 - 5) Uji tahanan penetrasi atau uji *Windsor Probe*
Pengujian ini merupakan pengujian merusak sebagian. Digunakan untuk mengukur kekerasan permukaan sehingga kekuatan lapisan permukaan atau yang dekat permukaan beton dapat diestimasi.
 - 6) Uji *covermeter*
Pengujian ini digunakan untuk mengukur kedalaman selimut beton dan diameter batang tulangan serta konfigurasi.
 - 7) Uji radiografik
Pengujian ini digunakan untuk mendeteksi adanya rongga pada beton dan posisi dari selubung prategang.
 - 8) Uji kecepatan rambat (mengacu pada SNI ASTM C-597:2012)
Pengujian ini digunakan untuk mengukur kecepatan rambat beton sehingga kekuatan tekan beton dapat diestimasi.
 - 9) Uji *impact echo*
Pengujian ini digunakan untuk mendeteksi rongga, delaminasi dan anomali lainnya dari beton.
 - 10) *Ground Penetrating Radar (GPR)* atau *impulse radar testing*
Pengujian ini digunakan untuk mendeteksi posisi batang tuangan dan *stressing duct*.
 - 11) *Infrared thermography*
Pengujian ini digunakan untuk mendeteksi rongga, delaminasi, dan anomali lainnya pada beton dan juga mendeteksi titik masuk air pada struktur.

5.1.3 Pengujian lapangan

a. Uji beban statis

Penurunan jembatan seiring dengan berjalannya waktu dan beban lalu lintas yang semakin meningkat menimbulkan kekhawatiran tentang kehandalan dari umur jembatan. Salah satu cara untuk memeriksa keandalan umur jembatan adalah pengujian pembuktian beban.

Sebuah tes diagnosa dapat digunakan untuk menguji atau memprediksi analisis model struktural atau sementara pengujian pembuktian beban digunakan untuk menilai beban yang sebenarnya mengusung kapasitas jembatan.

Diagnosa pengujian beban dengan mengendarai truk (berat terukur) yang melintasi jembatan dengan kecepatan rendah (uji statik semu) dan dengan kecepatan penuh (uji dinamis). Berat dari truk dipilih untuk tidak melebihi nilai rating jembatan saat ini. Sebelum

pengujian dimulai, banyaknya sensor regangan, dan dalam beberapa kasus instrumen lain seperti alat ukur defleksi semuanya disiapkan pada lokasi yang telah ditentukan pada jembatan. Pengukuran direkam sebagai pengujian kendaraan yang melintasi jembatan. Dari data yang dikumpulkan selama diagnosa pengujian, sejumlah sifat yang mempengaruhi kapasitas beban yang dapat dipikul jembatan dapat ditentukan. Sifat ini, yang biasanya diperkirakan untuk melakukan penilaian beban secara tradisional, termasuk :

- 1) Distribusi beban
- 2) Redaman
- 3) Tahanan lentur dari elemen bangunan atas (sifat penampang termasuk keadaan aksi penampang komposit), dan
- 4) Dampak dari *impact*

b. Pengujian beban dinamis

1) Pengujian getaran ambien

Metode pengujian dinamis tanpa kontrol pada input diklasifikasikan sebagai pengujian getaran ambien. Popularitas metode ini adalah karena kenyamanan mengukur respon getaran ketika struktur tersebut akibat beban layan. Beban ini dapat dilakukan baik oleh lalu lintas, angin, ombak, kendaraan atau pejalan kaki atau beban layan lainnya. Dengan demikian, sumber ambien mewakili eksitasi yang benar untuk struktur yang terkena selama umur pakai.

2) Pengujian getaran paksa

Pengujian getaran paksa menggabungkan metode-metode dimana getaran yang diinduksi secara buatan. Amplitudo dan frekuensi eksitasi *input* yang diterapkan berada di bawah pengendalian dengan menggunakan sistem eksitasi yang dirancang dengan baik. Tes getaran paksa memiliki keuntungan dari menekan efek gangguan luar dalam respon struktur yang diukur.

5.1.4 Klasifikasi kerusakan dan mekanisme kerusakan

Kerusakan/cacat dapat didefinisikan sebagai sebagian atau seluruh material struktur dan menyebabkan lemahnya daya tahan komponen struktur atau seluruh struktur. Kerusakan dapat disebabkan oleh beberapa hal, umumnya merupakan efek dari proses deteriorasi, khususnya korosi dan fatik. Selain itu, kerusakan disebabkan oleh kekuatan material melebihi batas akibat beban berlebih yang tidak direncanakan.

Jenis-jenis kerusakan dan kemungkinan kerusakan yang akan terjadi pada struktur perlu diketahui, untuk dipertimbangkan dalam menentukan tujuan dan parameter ukur monitoring kesehatan struktur.

a. Hal-hal umum penyebab kerusakan

1) Tegangan berlebih (pembebanan) dengan tegangan sesaat. Kasus yang memungkinkan:

- a) Beban tabrakan dan seismik (tumbukan, gempa, ledakan)
- b) Beban variabel yang sangat tinggi (beban hidup berlebihan, angin ekstrem, dan gelombang)

2) Pembebanan reguler dengan ketahanan berkurang. Penurunan daya tahan pada komponen struktur, seperti yang sudah dipertimbangkan dalam desain, umumnya merupakan proses yang tergantung waktu, seperti:

- a) Deteriorasi akibat beban kimia
 - Korosi permukaan baja
 - Korosi *pitting* baja
 - Reaksi alkali-silika pada beton

- b) Deteriorasi akibat beban mekanik
 - Pembentukan retak submikroskopis dan perkembangan retak sampai melebihi batas bawah penampang dengan beban berulang dari baja struktural dan tulangan beton (fatik)
 - Retak korosi tegangan dari tendon prategang
 - Korosi dalam dari komponen baja
 - Pembentukan retak mikroskopis dalam beton yang menyebabkan pengurangan kuat tarik melintang dan mengurangi kuat tekan (fatik) beton
- c) Deteriorasi akibat beban fisik
 - Kerusakan polimer oleh radiasi UV
 - Kerusakan material akibat panas/api
- d) Rangkak, susut, relaksasi
 - Berkurangnya kekuatan geser sampai kehilangan gaya prategang akibat rangkai

3) Kombinasi keduanya

b. Hal-hal khusus penyebab kerusakan

1) Korosi pada baja

- a) Kerusakan pada lapisan anti korosi
- b) Retak-retak pada beton dan kerusakan mekanika lainnya pada beton struktural disebabkan oleh:
 - Beban tabrakan
 - Kurangnya tulangan
 - Pengekangan mengalami perubahan pada kondisi batas (penurunan fondasi dan rotasi, berkurangnya derajat kebebasan)
 - Kehilangan gaya prategang

c) Karbonasi pada beton

d) Ion klorida (dari air laut)

- 2) Pembentukan retak dan perkembangan retak pada baja struktural dan *microscopic crack formation* pada beton yang disebabkan oleh beban bolak-balik yang melebihi kekuatan fatik, seperti:

- a) Beban siklik (tinggi)
- b) Beban siklik ditambah pengurangan penampang (retak)

c. Konsep identifikasi kerusakan

Identifikasi kerusakan umumnya digambarkan dengan proses:

- 1) Deteksi. Menentukan kerusakan yang ada pada struktur
- 2) Penentuan lokasi. Menentukan lokasi geometrik kerusakan
- 3) Kuantifikasi. Menentukan tingkat kerusakannya
- 4) Prognosis. Prediksi sisa umur layan dari struktur (kapasitas sisa)

5.1.5 Penentuan nilai ambang (*threshold*) untuk stabilitas, daya layan (*serviceability*), dan daya pikul beban (*load-bearing capacity*)

Nilai ambang batas suatu parameter menggambarkan kondisi struktur yang dapat diambil dari suatu kode dan pedoman yang dirujuk atau ditentukan dengan mengambil kondisi lokal/setempat sebagai pertimbangan.

a. Stabilitas

Stabilitas harus dipastikan dalam kondisi batas ultimit. Untuk struktur jenis tertentu seperti jembatan kereta api, nilai ambang batas ditetapkan oleh kode atau pedoman yang berlaku.

Nilai ambang batas untuk stabilitas dalam kondisi batas ultimit dapat ditentukan dengan pemodelan struktur.

b. Daya layan (*serviceability*)

Nilai batas deformasi dan perilaku dinamis pada kondisi layan ditetapkan dalam kode dan pedoman yang berlaku. Jika tidak, nilai ambang batas deformasi dan perilaku dinamis dapat didefinisikan sesuai dengan kebijakan atau pertimbangan yang ada, misalnya mengacu kepada hasil pengujian lapangan yang pernah dilakukan.

c. Daya pikul beban (*load-bearing capacity*)

Nilai kondisi, yang secara tidak langsung menunjukkan kondisi batas, dapat dikembangkan dengan menggunakan pemodelan struktur. Kecuali tegangan fatik yang kondisi batasnya dapat diperoleh melalui beban layan, dimana besarnya tegangan siklik tergantung dari jumlah siklusnya.

5.2 Menentukan tujuan monitoring kesehatan struktur dan parameter ukur

Menentukan tujuan monitoring kesehatan struktur yang disesuaikan dengan level sistem monitoring kesehatan struktur yang telah disebutkan pada Sub Pasal 4.3. Parameter ukur yang dipilih disesuaikan dengan tujuan MKS dan data yang diperlukan untuk keberlangsungan umur jembatan. Selain itu, perlu dipertimbangkan juga jenis-jenis kerusakan yang mungkin akan terjadi dan dampaknya, untuk menentukan parameter ukur monitoring dan sistem pemeliharaan jembatan.

5.3 Analisis numerik

Analisis struktur numerik membutuhkan model yang memadai, yang mencakup kekakuan struktur, distribusi massa, dan kondisi lingkungan yang tepat. Untuk evaluasi struktur teknik yang umum digunakan adalah pendekatan elemen hingga. Model elemen hingga menyediakan kelengkapan dan validitas terbaik sebagai dasar untuk prediksi analitis dan simulasi.

Tugas utama analisis numerik adalah identifikasi karakteristik struktur dan simulasi perilaku struktur, sebagai berikut:

- a. Menentukan parameter modal
- b. Verifikasi hasil pengukuran
- c. Simulasi perilaku struktur
- d. Realisasi studi parameter
- e. Pemodelan kerusakan

Sumber ketidakakuratan model adalah asumsi tentang struktur model (dimensi, jenis elemen, kondisi batas, perilaku nonlinear atau linear) serta parameter model (parameter material, kekakuan, massa, dan momen inersia). Spesifikasi yang tepat dari beban dan aksi lainnya merupakan asumsi yang mendekati keadaan sebenarnya dari simulasi perilaku struktur.

Proses yang dianjurkan untuk memeriksa ketepatan hasil simulasi adalah:

- a. Meninjau ulang kode program / masukan makro
- b. Meninjau ulang hasil analisis, seperti:
 - 1) Pemodelan dengan kondisi batas yang tepat
 - 2) Analisis nilai ekstrim, estimasi dampak
 - 3) Analisis statistik dari nilai variabel parameter
 - 4) Perbandingan dengan sistem alternatif
 - 5) Estimasi kuantitatif dari hasil

5.4 Desain Komponen MKS

Mendesain sistem monitoring, termasuk pemilihan sensor, sistem akusisi data, sistem pengolahan data, sistem komunikasi data, dan sistem interpretasi data. Hal ini juga mencakup penentuan jenis monitoring yang harus dilakukan seperti statis atau dinamis, secara terus-menerus atau berkala, pengaturan beban atau beban ambient.

5.5 Pemasangan dan kalibrasi sistem

Pemasangan sistem dan mengkalibrasinya dengan pembacaan awal (data inisial). Pengecekan dilakukan untuk semua komponen MKS, apakah berfungsi dengan baik.

5.6 Interpretasi dan analisis data lapangan

5.6.1 Kalibrasi model struktur

Kalibrasi dilakukan dengan menyesuaikan nilai numerik dari kelompok parameter yang menentukan kondisi-kondisi material, geometri, batas, dan kontinuitas hingga perbedaan antara data yang diukur dengan perilaku simulasi model analitik diminimalkan. Model terkalibrasi harus diperiksa dengan data terukur yang tidak diterapkan untuk kalibrasi.

Sifat mekanik, kondisi batas, dan kondisi kontinuitas pada model harus disesuaikan. Konfigurasi model disesuaikan dengan kondisi fisik yang diperoleh selama eksperimen/monitoring dan dari data eksperimen/monitoring yang telah diproses. Model struktur linear yang terkalibrasi berfungsi sebagai titik awal untuk simulasi analisis elemen hingga nonlinear untuk memprediksi kemungkinan ragam/mode kegagalan.

5.6.2 Prosedur lokal

Penerapan prosedur lokal untuk analisis daerah kritis (titik lemah) yang ditinjau, sebagai berikut:

- Dengan mengetahui jenis dan lokasi kerusakan yang ada, dimensi kerusakan dapat ditentukan dan perkembangannya harus dimonitor (Level 3). Kondisi lokal dan dampak secara globalnya harus dinilai. Hal ini berlaku untuk kondisi saat ini dan prediksi untuk kondisi yang akan datang (Level 4).
- Prosedur ini berlaku untuk kondisi di mana berdasarkan kondisi awal yang diketahui, kerusakan pada lokasi tertentu dari struktur yang ditinjau, misalnya karena beban berlebih atau fatik (Level 1). Tugas ini dapat dipenuhi dengan menggunakan monitoring beban.
- Tugas tambahan untuk monitoring lokal pada kerusakan adalah menemukan penyebab kerusakannya. Selain parameter kerusakannya, nilai yang terkena dampak kerusakannya harus dimonitor. Informasi tentang karakter dan penyebab kerusakan dapat diperoleh melalui korelasi konteks temporal dan juga antara besaran hasil pengukuran. Contoh: pengamatan lebar retak yang dapat dipengaruhi oleh temperatur, getaran, penurunan atau penyebab lainnya.
- Jika kerusakan lokal memiliki dampak global (misalnya: penurunan pilar jembatan), maka harus dilakukan pengamatan di tempat-tempat lain selain daerah yang rusak dari struktur.

Dengan prosedur lokal ini, nilai-nilai pengukuran yang digunakan harus sesuai untuk jenis atau dampak kerusakan dengan indikatornya.

5.6.3 Prosedur global

Jika keberadaan dan lokasi kerusakan tidak diketahui, parameter sensitif dari global sistem harus dikendalikan dan ditentukan. Hal ini dapat dilakukan dengan monitoring secara terus-menerus dan periodik atau dengan uji lapangan.

a. Prosedur dinamis

Karakteristik getaran adalah sifat global struktur, yang meskipun dipengaruhi oleh kerusakan lokal tidak mungkin sangat sensitif terhadap kerusakan tersebut. Akibatnya perubahan sifat global mungkin sulit untuk diidentifikasi kecuali kerusakannya sangat parah atau pengukurannya sangat akurat.

Informasi tentang kondisi struktur diperoleh dari perubahan yang diukur pada sifat getarannya. Teknik yang lebih umum digunakan antara lain:

- 1) Metode frekuensi alami;
- 2) Metode ragam bentuk dan lendutan operasional bentuk;
- 3) Metode energi regangan modal;
- 4) Metode vektor gaya residual/sisa;
- 5) Metode memperbaiki model;
- 6) Fungsi respon frekuensi
- 7) Metode statistik

b. Prosedur statis

Tidak semua jenis kerusakan dapat dideteksi dengan metode dinamis. Ada kasus di mana sensitivitas dari indikator kerusakan dinamis rendah, sehingga identifikasi kerusakan sangat sulit.

Pengukuran statis membutuhkan kondisi beban yang identifikasi kerusakannya dapat diukur dengan menggunakan parameter ukur global. Pengukuran deformasi umumnya mengacu pada titik acuan/referensi. Metode ini terbukti untuk mengidentifikasi kerusakan struktur sejenis balok dengan menggunakan perbedaan kemiringan yang diukur (identifikasi level 1 dan 2). Sensor kemiringan tidak memerlukan titik acuan. Beban berupa sebuah truk yang perlahan melintasi struktur. Indikator kerusakan ditentukan dari perbedaan garis pengaruh dari kemiringan dalam kondisi rusak terhadap kondisi awal. Pada analisis data, *noise* dari sinyal yang diukur harus dihilangkan. Metode ini sesuai untuk menentukan lokasi dari beberapa kerusakan.

5.7 Sistem pelaporan dan peringatan

a. Laporan status

Data pengukuran harus diperiksa pada interval waktu yang teratur mengenai fungsi dan perilaku optimal dari perangkat keras. Selain itu, hasil monitoring harus diperiksa kebenaran dan kompatibilitasnya terkait realitas fisiknya. Beberapa contoh ketetapan periode dan lingkup pengukuran masing-masing respon struktur yang ditinjau dapat dilihat pada Bagian 12 Penyajian Hasil Pengukuran Sensor dan Pelaporan pada 'Pedoman *Structural Health Monitoring System (SHMS)* Sederhana pada Konstruksi Jembatan Bentang Panjang' yang telah disusun oleh Ditjen Bina Marga yang akan disajikan dalam lampiran Informatif.

Selama monitoring, nilai-nilai dinamis, spektrum frekuensi dibandingkan untuk menentukan frekuensi alami, dan perubahan frekuensi ditunjukkan dan diperiksa keakuratannya. Hasil penentuan beban disajikan selama periode monitoring dan didistribusikan dalam kelas beban. Selain itu, distribusi beban dalam periode yang signifikan dihitung dan dibandingkan.

Sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3, kegiatan pemeriksaan visual harus dilakukan. Ketetapan teknis menyangkut kegiatan pemeriksaan visual atau dikenal dengan pemeriksaan detail dapat diperoleh pada Pedoman Pemeriksaan Jembatan yang disusun oleh Badan Litbang Kementerian Pekerjaan Umum atau instansi teknis terkait.

Fokus laporan untuk masing-masing level sebagaimana yang dijelaskan dalam Bab 4.3 yaitu :

1) Untuk Level 1;

- Data masukan: i) dokumen perencanaan, ii) gambar terencana;
- Fokus metode: penilaian beban (*load rating*) dengan menggunakan pemodelan dan analisis struktur teoritis yang diperbandingkan dengan hasil pemeriksaan visual;
- Hasil luaran : nilai faktor keamanan.

2) Untuk Level 2 sampai dengan Level 4;

- Data masukan: i) dokumen perencanaan, ii) gambar terencana, iii) hasil pengukuran atau identifikasi dengan peralatan tidak merusak;
- Fokus metode : pengujian tidak merusak dengan ruang lingkup dan lokasi pengujian yang semakin banyak dan padat untuk Level 3 dan Level 4;
- Hasil luaran : evaluasi kondisi elemen dan struktur jembatan dengan kesimpulan sesuai ruang lingkup pengujian.

3) Untuk Level 4;

- Data Masukan: i) dokumen perencanaan, ii) gambar terencana, iii) hasil pengukuran atau identifikasi dengan peralatan tidak merusak;
- Fokus metode: pengujian tidak merusak dan uji beban yang tidak merusak struktur;
- Hasil Luaran : evaluasi kondisi elemen dan struktur jembatan dengan kesimpulan sesuai ruang lingkup pengujian yang diperbandingkan dengan analisa teoritis.

4) Untuk Level 5;

- Data masukan : i) dokumen perencanaan, ii) gambar terencana, iii) hasil pengukuran atau identifikasi dengan peralatan tidak merusak;
- Fokus metode : monitoring dengan sensor permanen, dan pengujian mikrostruktur contoh uji elemen struktur di lapangan berbasis ketahanan jangka panjang struktur;
- Hasil luaran: evaluasi kondisi elemen dan struktur jembatan dengan kesimpulan sesuai ruang lingkup pengujian yang diperbandingkan dengan analisa teoritis untuk memperkirakan umur layan sisa jembatan.

b. Sistem peringatan (*alerting*)

Selain transfer data berkala dari komputer, dapat juga mengakusisi data *on-site* ke komputer pusat. Hal ini terjadi ketika kondisi khusus, seperti nilai-nilai ambang batas terlampaui, perubahan signifikan dalam sistem struktural dan kerusakan bagian dari sistem pemantauan, dimana informasi harus segera dikirim ke komputer pusat atau mesin faks.

Sistem peringatan dapat dibuat untuk mengantisipasi kecelakaan yang mungkin terjadi selama umur layan jembatan. Beberapa hal yang umum dijadikan tolak ukur sistem peringatan dan pembatasan penggunaan jembatan adalah :

- Kecepatan angin untuk angin dengan arah tegak lurus sistem lantai jembatan yang akan menerpa kendaraan yang lewat di atas jembatan dan akhirnya mengakibatkan tergulingnya kendaraan;
- Pergerakan struktur jembatan yang berlebihan akibat pembebanan kendaraan atau aksi lingkungan lainnya.

Lampiran A (informatif)

Penyajian hasil pengukuran sensor dan pelaporan pada Pedoman *Structural Health Monitoring System (SHMS)* Sederhana pada konstruksi jembatan bentang panjang yang disusun oleh Ditjen Bina Marga

A.1 Sensor angin

Penyajian dari hasil sensor angin/anemometer paling tidak harus terdiri dari:

- Kecepatan angin rata-rata 10 menit-an
- Kecepatan angin vs sudut serang vs azimuth
- Informasi kecepatan angin di dek jembatan bagi keamanan pengendara
- Perbandingan terhadap kecepatan angin aman bagi pengguna, kecepatan angin rencana dan kecepatan angin *flutter*

A.2 Suhu efektif di elemen jembatan

Penyajian dari hasil sensor suhu paling tidak harus terdiri dari:

- Variasi jaman, harian, bulanan, dan tahunan dari suhu efektif
- Perbedaan temperatur pada potongan penampang jembatan

A.3 Temperatur udara dan kelembapan relatif

Penyajian dari Hasil Sensor AT&RH paling tidak harus terdiri dari:

- Temperatur udara dan kelembapan relatif ditampilkan dalam amplitudo domain
- Data nilai maksimum, minimum dan rata-rata dari temperatur udara di luar
- Grafik variasi jaman, harian, bulanan, dan tahunan dari temperatur udara di luar
- Data nilai maksimum, minimum dan rata-rata dari kelembapan relatif di luar
- Grafik variasi jaman, harian, bulanan, dan tahunan dari kelembapan relatif di luar
- Data nilai maksimum, minimum dan rata-rata dari temperatur udara di dalam
- Grafik variasi jaman, harian, bulanan, dan tahunan dari temperatur udara di dalam
- Data nilai maksimum, minimum dan rata-rata dari kelembapan relatif di dalam
- Grafik jaman, harian, bulanan, dan tahunan dari kelembapan relatif di dalam

A.4 Lalu-lintas

Penyajian dari hasil *Sensor Weight in Motion/WIM* paling tidak harus terdiri dari:

- Arus lalu lintas per 10 menit di tiap arah
- Distribusi beban gandar per 10 menit di tiap arah
- Jumlah kendaraan total per 10 menit di tiap arah
- Jumlah kendaraan dengan muatan berlebih (*overload*) per 10 menit di tiap arah

A.5 Kegempaan

Penyajian dari hasil sensor *seismograf* paling tidak harus terdiri dari:

- Kurva riwayat waktu percepatan di dasar pilon dengan indikasi nilai percepatan maksimum dalam 3 arah
- Kurva riwayat waktu dari perpindahan di dasar pilon yang diturunkan dari data percepatan

A.6 Percepatan dari *accelerometer*

Penyajian dari hasil sensor *accelerometer* paling tidak harus terdiri dari:

- Kurva riwayat waktu percepatan di dasar pilon dengan indikasi nilai percepatan maksimum
- Kurva riwayat waktu dari perpindahan di dasar pilon yang diturunkan dari data percepatan
- Nilai frekuensi alamiah yang diturunkan dari kurva riwayat waktu percepatan

- d. Perbandingan nilai frekuensi alamiah yang didapat dari catatan percepatan dengan frekuensi alamiah awal jembatan / data perencanaan / data pada saat jembatan belum beroperasi.
- e. Data percepatan yang didapat dari sejumlah *accelerometer* dapat dikembangkan untuk mendapatkan pola ragam getar

A.7 Regangan

Penyajian dari hasil sensor *strain gauge* paling tidak harus terdiri dari:

- a. Grafik variasi jaman, harian, bulanan, dan tahunan dari regangan yang terjadi
- b. Data nilai maksimum, minimum dan rata-rata dari regangan yang terjadi selama 10 menit

A.8 Kemiringan terhadap bidang vertikal

Penyajian dari hasil sensor *tiltmeter* paling tidak harus terdiri dari:

- a. Grafik variasi jaman, harian, bulanan, dan tahunan dari kemiringan yang terjadi
- b. Data nilai maksimum, minimum dan rata-rata dari kemiringan yang terjadi selama 10 menit

A.9 Perpindahan perletakan

Penyajian dari hasil sensor *displacement transducer* paling tidak harus terdiri dari:

- a. Grafik variasi jaman, harian, bulanan, dan tahunan dari perpindahan relatif yang terjadi
- b. Data nilai maksimum, minimum dan rata-rata dari perpindahan relatif yang terjadi selama 10 menit

A.10 Gaya kabel

Penyajian dari hasil sensor *electro magnetic* paling tidak harus terdiri dari:

- a. Grafik variasi jaman, harian, bulanan, dan tahunan dari gaya pada kabel yang terjadi
- b. Data nilai maksimum, minimum dan rata-rata dari gaya pada kabel yang terjadi selama 10 menit
- c. Kurva distribusi gaya pada kabel
- d. Perbandingan antara gaya yang terjadi dengan gaya pada kabel awal jembatan / data perencanaan / data pada saat jembatan belum beroperasi

A.11 Perpindahan global

Penyajian dari hasil sensor GPS paling tidak harus terdiri dari

- a. Grafik variasi jaman, harian, bulanan, dan tahunan dari perpindahan dalam arah U,V, dan W
- b. Data nilai maksimum, minimum dan rata-rata dari perpindahan dalam arah U,V,dan W yang terjadi selama 10 menit
- c. Perbandingan antara perpindahan yang dicatat dengan perpindahan yang diijinkan dalam perencanaan

Bibliografi

- Rücker, W., F. Hille, dan R. Rohrmann. 2006. *F08b: Guideline for Structural Health Monitoring*. Berlin: SAMCO. http://www.samco.org/network/download_area/mon_guide.pdf (diakses tahun 2011).
- Wenzel, Helmut. 2009. *Health Monitoring of Bridges*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons.
- Ditjen Bina Marga. 2013. Pedoman Structural Health Monitoring System (SHMS) Sederhana pada Konstruksi Jembatan Bentang Panjang.
- Pedoman Pemeriksaan Jembatan. 2011. Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pekerjaan Umum.
- SNI ISO/TS 11774:2013, Uji tak rusak – Kualifikasi berbasis kinerja
- SNI ISO 9934-3:2012, Uji tak rusak – Uji partikel magnetik – Bagian 3: Peralatan
- SNI ISO 9934-2:2012, Uji tak rusak – Uji partikel magnetik – Bagian 2: Media deteksi
- SNI ISO/TR 25107:2011, Uji Tak Rusak – Pedoman untuk silabus pelatihan uji tak rusak
- SNI ISO/TR 25108:2010, Uji tak rusak – Pedoman untuk lembaga pelatihan personel uji tak rusak
- SNI ISO/TS 18173:2010, Uji tak rusak – Istilah umum dan definisi
- SNI ISO 20807:2008, Uji tak rusak-Kualifikasi personel uji tak rusak untuk aplikasi terbatas uji tak rusak
- SNI ISO 9712:2008, Uji tak rusak - Kualifikasi dan sertifikasi personel
- SNI 19-6869-2002, Metode pengambilan contoh uji, bentuk, ukuran dan klasifikasi
- SNI 19-6364-2000, Uji tak rusak - Kualifikasi dan sertifikasi personel
- SNI 19-1862-1990, Cara uji ultrasonik menggunakan probe normal dengan metode kontak langsung
- SNI 19-1863-1990, Cara uji ultrasonik menggunakan prob sudut dengan metode kontak langsung
- SNI 19-1058-1989, Tata nama pengujian ultrasonik

Daftar nama dan lembaga

1. Pemrakarsa

Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan, Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.

2. Penyusun

Nama	Lembaga
Septinurriandiani, ST	Pusat Litbang Jalan dan Jembatan
Redrik Irawan, ST., MT	Pusat Litbang Jalan dan Jembatan

Ditetapkan di Jakarta
pada tanggal 23 April 2015

MENTERI PEKERJAAN UMUM
DAN PERUMAHAN RAKYAT,



M. BASUKI HADIMULJONO