



STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEM ALAT BANTU MEMPERTAHANKAN USIA TEKNIS JEMBATAN

Poltak H.A. Nababan

I. Latar Belakang

Infrastruktur merupakan pembuluh darah bagi aktivitas sosial dan ekonomi yang merupakan elemen pokok dari kehidupan manusia. Oleh karenanya investasi pada sistem infrastruktur, seperti bangunan, jembatan, bendungan, reservoir, tunnel, pipa, airport dan stadion, biasanya menunjukkan tingkat kemajuan peradaban manusia dan kualitasnya mencerminkan kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Sayangnya, penurunan kemampuan dan proses kerusakan fisik dari infrastruktur tersebut tidak dapat dihindarkan disebabkan faktor lingkungan, seperti gempa, dsb. Pengoperasian yang tidak memadai, penuaan, alam, dan kerusakan yang disebabkan manusia mengancam keamanan dan fungsi dari infrastruktur tersebut.

Kerusakan sistem infrastruktur umumnya berlangsung pada kecepatan yang tidak dapat dikendalikan walaupun infrastruktur tersebut didesain agar dapat beroperasi untuk jangka waktu yang lama. Penurunan kemampuan tersebut mempengaruhi perekonomian nasional. Berkurangnya kemampuan infrastruktur dalam jangka panjang akan membutuhkan biaya perbaikannya yang sangat besar.

Untuk menghindari penurunan kemampuan fisik yang tidak terhindarkan tersebut, diperlukan penilaian terhadap kondisi kesehatan suatu infrastruktur. Penilaian itu perlu dilakukan secara terus menerus tanpa henti agar dapat diambil tindakan yang rasional. Hal inilah yang merupakan tantangan bagi komunitas ahli konstruksi.

Dengan semakin majunya teknologi dalam bidang instrumentasi didukung dengan kemajuan dibidang teknologi informasi dan komunikasi, maka monitoring kesehatan infrastruktur dapat difasilitasi lebih mudah.

II. Structural Health Monitoring Technology (SHMS)

SHMS merupakan bidang baru didalam mendeteksi kerusakan dengan metoda pengujian tak rusak dengan cara mengintegrasikannya dengan struktur untuk memonitor kesehatan dari, katakanlah jembatan secara keseluruhan maupun secara parsial. Teknologi ini dapat memperpanjang umur pelayanan jembatan karena penurunan kemampuan dan kerusakan dapat diidentifikasi lebih awal (peringatan dini) sebelum terjadinya kerusakan yang lebih parah yang membutuhkan biaya rehabilitasi yang sangat besar. SHMS ini didefinisikan sebagai "penggunaan secara in-situ", penginderaan tak rusak dan analisa karakter struktur, termasuk respon struktur untuk mendeteksi perubahan yang mengindikasikan adanya kerusakan atau penurunan kemampuan struktur.

construction and maintenance of main span Suramadu Bridge

10 december 2008 | Garden Palace Hotel Surabaya



organized by
Ministry of Public Work
Directorat General of Highway
Balai Besar Pelaksanaan Jalan Wilayah V
Technical Affair of National Suramadu Bridge

Secretariat : Jl. Tambak Wedi no 1, Surabaya, telp/fax; +62.31.3729233 email : seminar@suramadu.net



Penggunaan SHMS ini telah dilaksanakan dengan sukses pada banyak jembatan didunia untuk memonitor kemampuan jembatan dalam jangka pendek dan panjang. Dengan perencanaan yang seksama didalam penempatan instrumen/sensor maka SHMS ini dapat mengumpulkan data yang diperlukan menyangkut kondisi jembatan; stess, strain, defleksi, temperatur, dan time-dependent properties seperti creep dan shrinkage pada struktur.

Data tersebut juga dapat digunakan untuk mem-*verifikasi* asumsi asumsi yang dibuat dalam disain sehingga dapat dilakukan perbaikan pada disain jembatan berikutnya, menilai kondisi umum dari jembatan-jembatan, dan menyediakan data bagi *infrastructure management system* untuk pengambilan keputusan.

Dengan tersedianya teknologi untuk SHMS maka tantangan berikutnya adalah mendisain suatu SHMS yang seusi kebutuhan dengan jumlah dan spesifikasi sensor-sensor yang tepat sehingga kondisi jembatan/infrastruktur dapat dimonitor dari *remote* secara terus-menerus dan benar-benar *cost-effective*.

Untuk itu perlu terlebih dahulu ditetapkan tujuan diadakannya SHMS pada suatu infrastruktur.

Secara umum tujuan diadakannya Structural Health Monitoring System adalah:

1. Menyediakan data response dinamis dari struktur jembatan untuk verifikasi asumsi-asumsi disain yang digunakan untuk angin, gempa, dsb.
2. Membuat sistim monitoring kesehatan jembatan yang andal sehingga memiliki fungsi pengecekan sendiri untuk memonitor adanya anomali didalam sistim.
3. Menyediakan data untuk analisa dan evaluasi kesehatan struktur jembatan.
4. Menyediakan data untuk memperkirakan kerusakan struktur dan penurunan performa jembatan untuk menentukan jadwal inspeksi & pemeliharaan periodik.
5. Menyediakan data guna merubah tingkat keamanan lalu lintas yang disebabkan oleh gempa dan badai.
6. Menyediakan data untuk memperkirakan keandalan struktur dan arus lalu lintas paska gempa dan badai.

III. Level SHMS.

Sebagaimana dijelaskan diatas, dengan semakin majunya teknologi dalam bidang instrumentasi didukung kemajuan dibidang teknologi informasi dan komunikasi, maka monitoring kesehatan infrastruktur menjadi menjadi lebih mudah dilakukan. Sesuai dengan tujuan penggunaannya, maka ada beberapa pilihan level monitoring yang dapat diambil. Level tersebut tergantung pada parameter-parameter yang akan di monitor.

Level Structural Health Monitoring System di klasifikasikan kedalam 4 kelas:

Kelas 1 : Penting untuk semua jenis jembatan

Kelas 2 : Perlu untuk Optimal Structural Health Monitoring System

Kelas 3 : Perlu untuk Minimum Maintenance

Kelas 4 : Baik untuk diketahui

construction and maintenance of main span Suramadu Bridge

10 december 2008 | Garden Palace Hotel Surabaya



organized by
Ministry of Public Work
Directorat General of Highway
Balai Besar Pelaksanaan Jalan Wilayah V
Technical Affair of National Suramadu Bridge

Secretariat : Jl. Tambak Wedi no 1, Surabaya, telp/fax; +62.31.3729233 email : seminar@suramadu.net



Atas dasar klasifikasi tersebut diatas dibuat tingkatan/level dari Structural Health Monitoring System yang kemudian dibagi atas 3 tingkatan/level

BASIC LEVEL : Kelas 1 + Kelas 2

INTERMEDIATE : Kelas 1 + Kelas 2 + Kelas 3

ADVANCE : Kelas 1 + Kelas 2 + Kelas 3 + Kelas 4

Pada infrastruktur yang kompleks yang tentu saja memerlukan biaya investasi yang tinggi pemilihan level SHMS yang tinggi merupakan pilihan yang bijaksana.

			Class			
			1	2	3	4
ENVIRONMENTAL EFFECTS*						
Air Temperature			SL	SL	SL	SL
Air and surface humidity				L	SL	SL
Precipitation					SL	SL
Pavement water veil					SL	SL
Ice formation					SL	SL
Athmospheric Pressure						SL
Solar Radiation						SL
LOAD EFFECTS*						
Wind	Tower top & girder level		L	L	SL	SL
Traffic	Load and traffic count			SL	SL	SL
Structural temperature	Girder, tower and cables				L	SL
Seismic/tectonic activity	Seismic activity and tsunami				SL	SL
	Corelation at midspan					L
STRUCTURAL RESPONSE						
Corosion	Concrete reinforcement	Splash zone	SL	SL	SL	SL
Joint relative displacement			SL	SL	SL	SL
Special element response				L	SL	SL
Stress/strain	Fatigue	Orthotropic deck		L	L	SL
		Cable anchorage			L	L
Dynamic motion	Global bridge behaviour				L	L
	Cables				L	L
Concrete creep	in situ concrete				SL	SL
Stress/strain	Global bridge sectional forces					L
Global structural positioning						L
GEOTECHNICAL RESPONSE						
Ground settlement and inclination				SL	SL	SL
Ground pressure					L	L
Interstitial pressure					L	L
Special element response					SL	SL

construction and maintenance of main span Suramadu Bridge

10 december 2008 | Garden Palace Hotel Surabaya

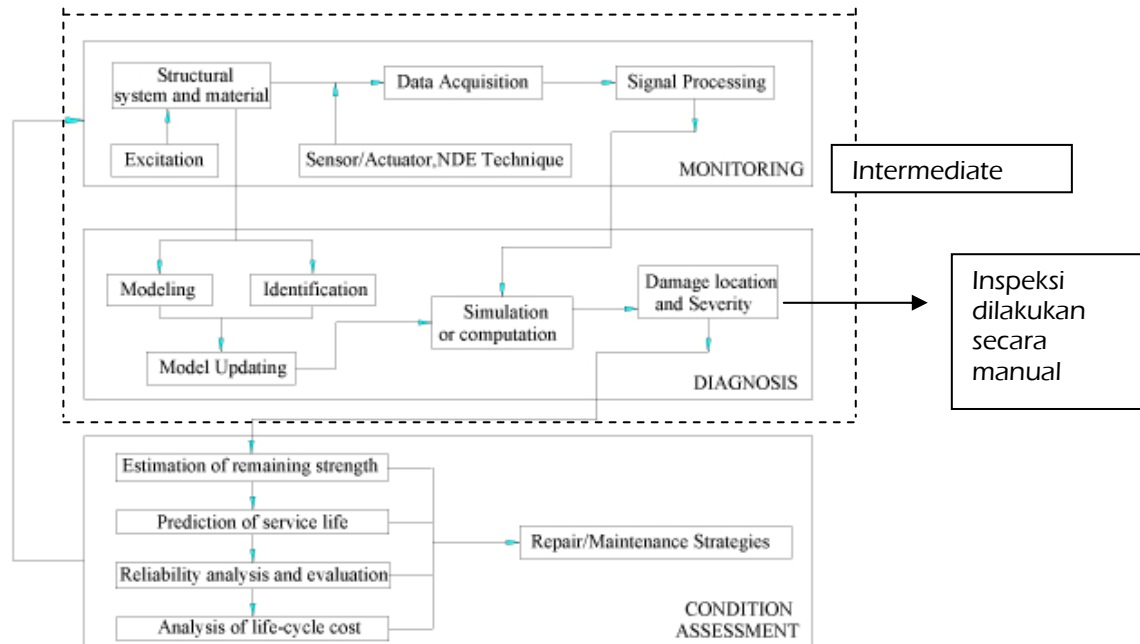


organized by
Ministry of Public Work
Directorat General of Highway
Balai Besar Pelaksanaan Jalan Wilayah V
Technical Affair of National Suramadu Bridge

Secretariat : Jl. Tambak Wedi no 1, Surabaya, telp/fax; +62.31.3729233 email : seminar@suramadu.net



Pada Jembatan Suramadu, level SHMS yang diaplikasikan adalah level intermediate, dimana monitoring dilakukan dengan bantuan sistim, namun inspeksi dilakukan secara manual



IV. Parameter yang diukur

Parameter yang diukur tergantung pada tingkat kritikal komponen infrastruktur yang perlu dimonitor. Pada umumnya parameter yang diukur antara lain strain, stress, deformasi dan vibrasi dengan menempatkan sensor-sensor dari jenis tertentu sesuai dengan parameter yang akan diukur pada tempat-tempat yang dianggap kritis (Principle Structural Element) yang membutuhkan pengamatan.

Pada jembatan Suramadu, parameter yang diukur adalah vibrasi untuk mengetahui pola getar dari badan jembatan, deformasi jembatan untuk mengetahui lendutan badan jembatan, strain untuk mengetahui regangan dari komponen-komponen utama jembatan, dan tegangan kabel.

Untuk mengukur getaran maka pada badan jembatan dipasang sensor accelerometer. Untuk mengukur regangan dipasang strain gauge pada girder baja dan beton. Untuk mengukur deformasi dan displacement digunakan GPS. Selain itu penggunaan GPS juga diperuntukkan untuk sinkronisasi waktu (time stamp). Untuk mengukur tegangan kable digunakan electromagnetic sensor.

construction and maintenance of main span Suramadu Bridge

10 december 2008 | Garden Palace Hotel Surabaya



organized by
Ministry of Public Work
Directorat General of Highway
Balai Besar Pelaksanaan Jalan Wilayah V
Technical Affair of National Suramadu Bridge

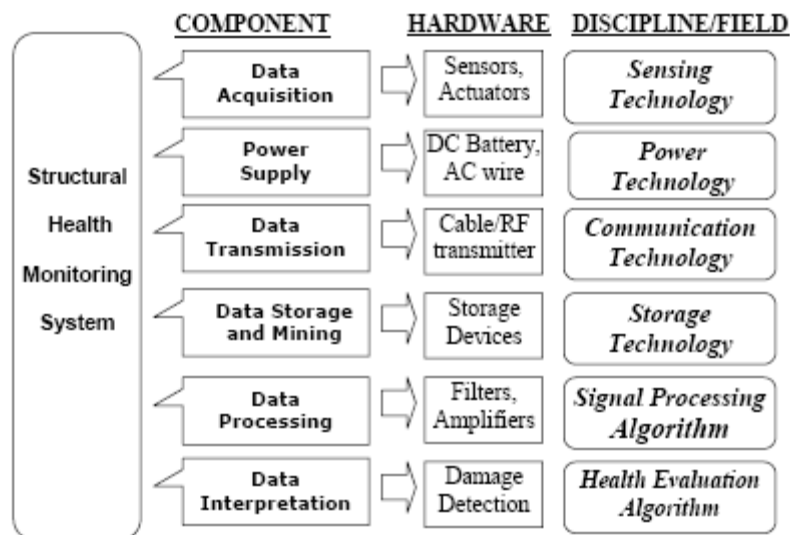
Secretariat : Jl. Tambak Wedi no 1, Surabaya, telp/fax; +62.31.3729233 email : seminar@suramadu.net

**V. Komponen SHMS**

SHMS merupakan suatu pendekatan yang terintegrasi dari sistim yang multidisplin, dengan melibatkan:

1. Teknologi Penginderaan (sensing technology)
2. Teknologi listrik (power technology)
3. Teknologi komunikasi (network technology)
4. Teknologi penyimpanan (storage technology)
5. perosesan sinyal (signal processing)
6. Algoritma evaluasi kesehatan infrastruktur (health evaluation algorithm)

Sebagaimana terlihat pada gambar berikut.

**Data Acquisition:**

Teknologi penginderaan pada dasarnya adalah metoda dan teknik yang dibuat untuk mendeteksi adanya gangguan, variasi, dan perubahan fisik. Karena penginderaan menunjukkan terjadinya perubahan kondisi dari kondisi sebelumnya, maka perubahan tersebut harus dapat dideteksi oleh sensor/transducer harus dapat menerima sinyal atas terjadinya perubahan tersebut. Perlu diperhatikan bahwa format dari sinyal yang diterima oleh end user tidak hanya mengandalkan pada bentuk fisik benda yang diuji, namun juga karakteristik yang dimiliki sensor tersebut. Definisi teknologi penginderaan melibatkan teknologi sensor dan teknologi instrumentasi

Sensors merupakan komponen utama didalam suatu rangkaian monitoring dan bertanggung jawab terhadap akurasi dan keandalan dari suatu pengukuran. Teknologi instrumentasi termasuk pencatatan data, representasi data, dan jaringan.

construction and maintenance of main span Suramadu Bridge

10 december 2008 | Garden Palace Hotel Surabaya



organized by
Ministry of Public Work
Directorat General of Highway
Balai Besar Pelaksanaan Jalan Wilayah V
Technical Affair of National Suramadu Bridge

Secretariat : Jl. Tambak Wedi no 1, Surabaya, telp/fax; +62.31.3729233 email : seminar@suramadu.net

**Klasifikasi sensor:**

Sensor diklasifikasin berdasarkan kemampuannya mengukur variable kondisi fisik dan/atau kimia. Beberapa contoh kuantitas yang dapat diukur:

- Kuantitas mekanis: Perpindahan (displacement), panjang (length), isi (volume), lokasi (location), tingkat (level); Kecepatan (velocity), percepatan (acceleration); tekanan (pressure), gaya (force/torque), puntir (twisting), berat (weight); regangan (strain); rotasi (rotation); simpangan distortion); aliran (flow).
- Kuantitas termal: suhu (temperature); panas (heat).
- Kuantitas electromagnetic/optical: tegangan (voltage), arus (current), frequency phase; visual/images, light; Magnetism.
- Kuantitas kimia: kandungan air (moisture), pH value.

Atribut dari sensors:

Disain dari sistim penginderaan tergantung kepada pemilihan sensor dengan atribut yang cocok dengan kebutuhannya.

Atribut sensor yang disimpulkan dibawah ini dapat digunakan sebagai kriteria didalam pemilihan sensor dan kinerjanya,

- Accessibility: Kemampuan penginderaan dari sensor yang berkaitan dengan tingkat presisi yang spesifik.
- Dimensi of Variables: dimensi dari fisik
- Ukuran: volume dari sensor.
- Jangkauan operasinya: Jangkauan operasi didisain untuk mendapatkan kinerja yang optimal
- Format data: karakteristik pengukuran dalam kaitan dengan waktu; continuous atau discrete/analog atau digital.
- Sensitivitas: Magnitude minimum atau perubahan lingkungan yang dapat dideteksi oleh sensor
- Intelligence: Kemampuan didalam memproses data dan pembuatan keputusan
- Active versus Passive: Kemampuan membuat sinyal vs hanya menerima sinyal saja
- Kontak fisik: Cara sensor melakukan pengamatan terkait dengan gangguan pada lingkungannya
- Prinsip operasional: Penggunaan embedded teknologi agar sensor berfungsi bila ada ultraviolet (pasif atau aktif) seperti pada sensor electro-optics, electromagnetic, piezoelectricity,dll

Power Supply:

Bagaimanapun sensors memerlukan daya listrik untuk dapat bekerja. Oleh karenanya kebutuhahn daya listrik (sumbernya), transmisinya harus juga mendapat perhatian. Secara umum, hal-hal yang harus mendapat perhatian didalam mendisain daya listrik, adalah:

- Power Generation: dari external (PLN) atau genset sendiri .

construction and maintenance of main span Suramadu Bridge

10 december 2008 | Garden Palace Hotel Surabaya



organized by
Ministry of Public Work
Directorat General of Highway
Balai Besar Pelaksanaan Jalan Wilayah V
Technical Affair of National Suramadu Bridge

Secretariat : Jl. Tambak Wedi no 1, Surabaya, telp/fax; +62.31.3729233 email : seminar@suramadu.net



- Power Transmission: Kapasitas kabel.
- Power Storage: Kapasitas batree.
- Power Consumption: Energy-consumption efficiency.

Pada umumnya sensor-sensor yang digunakan pada SHMS menggunakan listrik yang dialirkan dengan kabel. Namun saat ini sudah ada yang menggunakan batree untuk menjamin kestabilan tegangan listriknya.

Data Transmission - Communication Technology:

Tujuan transmisi data adalah untuk mengirimkan informasi melalui pemrosesan data dalam berbagai format; analog dan digital. Untuk sistim analog, data disimpan dalam bentuk kombinasi gelombang dalam frekuensi yang berbeda-beda. Sementara untuk sistim digital, data disimpan dalam bentuk digit binari atau bits, dan ditransmisikan sepanjang jalur komunikasi antara sensor dan komputer menggunakan sinyal listrik. Data dapat dikirimkan dengan kabel maupun radio. Pada pengiriman dengan kabel, sinyal dikirimkan dalam aliran listrik, sementara pada pengiriman dengan radio dengan gelombang elektromagnetic.

Data dapat ditransmisikan dengan, antara lain:

- kabel tembaga, dan kabel coaxial
- Microwave
- Serat Optik/Fiber Optic (FO)

Hal yang perlu dipertimbangkan didalam pemilihan media transmisinya adalah kecepatannya (rate dlm bps), transmission bandwidth (frequency bandwidth, Hz), dan transmission standard (interface standards: RS232, RS449).

Data Storage and Mining - Storage Technology:

Didalam monitoring dengan menggunakan sensor, jumlah pengukuran dapat bertambah dengan cepat karena beberapa alasan berikut:

1. Umumnya dimensi dari infrastruktur membutuhkan jumlah sensor yang sangat banyak untuk memenuhi tingkat kerapatan yang diperlukan (large amount of data from sensors in space)
2. Sifat jangka panjang dari infrastruktur membutuhkan monitoring yang terus menerus untuk memperoleh potret yang detail dari setiap kejadian/incident (large amount of data from measurements in time)

Alasan yang pertama berkaitan dengan penggelaran (deployment) dari sensor dan yang kedua berkaitan dengan frekuensi monitoring. Walaupun filosofi dari penggelaran sensor saat ini cenderung meminimalkan jumlah dari sensor untuk mendapatkan mode getaran yang diinginkan dan sifat lokal, pengukuran secara redundant tampaknya masih tetap diperlukan karena response dari struktur terhadap getaran seperti gempa tidak akan dapat diulangi. Oleh karena itu kemajuan dalam manajemen data (Database Management) sangat penting diintegrasikan kepada SHMS.

construction and maintenance of main span Suramadu Bridge

10 december 2008 | Garden Palace Hotel Surabaya



organized by
Ministry of Public Work
Directorat General of Highway
Balai Besar Pelaksanaan Jalan Wilayah V
Technical Affair of National Suramadu Bridge

Secretariat : Jl. Tambak Wedi no 1, Surabaya, telp/fax; +62.31.3729233 email : seminar@suramadu.net

**Data Processing - Signal Processing Algorithm:**

Misi dari data processing memiliki 2 tugas utama:

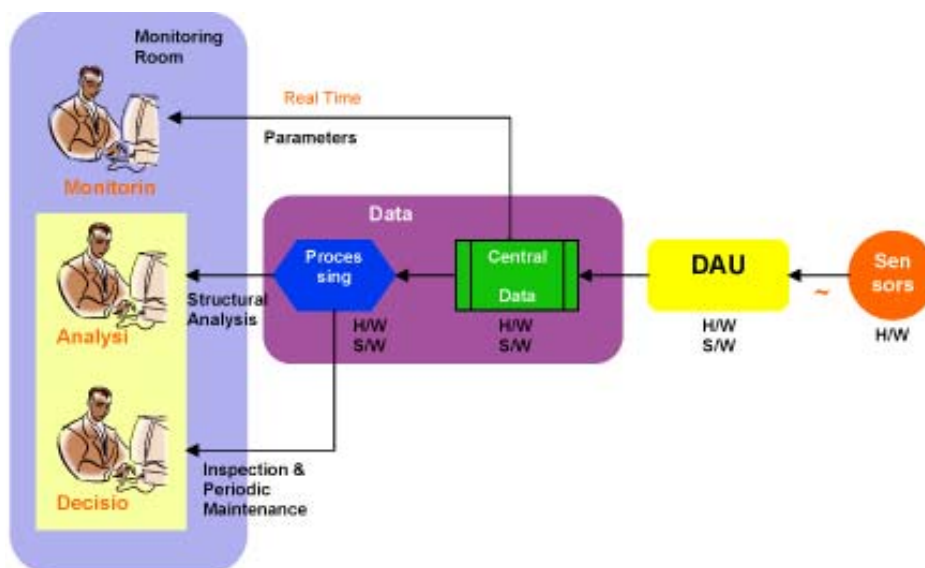
- Signal De-noising
- Signal Compression

Pada dunia nyata didalam pencatatan pengukuran yang dilakukan terlebih di alam terbuka tidaklah mungkin menghindarkan terukurnya juga sinyal-sinyal lain yang tidak kita inginkan, seperti halnya fluktuasi suhu yang merupakan atribut dari pengaruh lingkungan. Sinyal-sinyal ini memiliki pola dasar tertentu dan dapat disaring setelah dikenalnya pola perubahannya. Sinyal lain yang tidak dikenali biasanya dikenal sebagai white noise (zero mean and unity standard variation).

Signal de-noising memainkan peranan penting didalam mendeteksi kerusakan yang masih embrio berdasarkan gangguan/perubahan yang terjadi dalam pengukuran. Tugas de-noising ini tercapai apabila dicapainya suatu bentuk saringan. Oleh karenanya dibutuhkan data yang sangat banyak untuk mendapatkan bentuk saringan tersebut. Dengan semakin banyaknya jumlah sensor dan pembacaan yang terus menerus maka kecepatan pertumbuhan data semakin tinggi. Oleh karena diperlukan alat yang memiliki kemampuan memampatkan sinyal.

Data Interpretation - Damage Detection Algorithm:

Inti dari ilmu SHMS ini terletak pada interpretasi hasil pengukuran. Tujuan dari SHMS pada investigasi keutuhan struktur yang berkaitan dengan perubahan structural propertisnya (mass, stiffness, damping) melalui monitoring perubahan respons statis dan dinamis dari suatu struktur. Deteksi adanya kerusakan atau identifikasi suatu kerusakan merupakan teknik kernel dari SHMS didalam menyediakan interpretasi dan penjelasan terhadap kesehatan suatu infrastruktur.



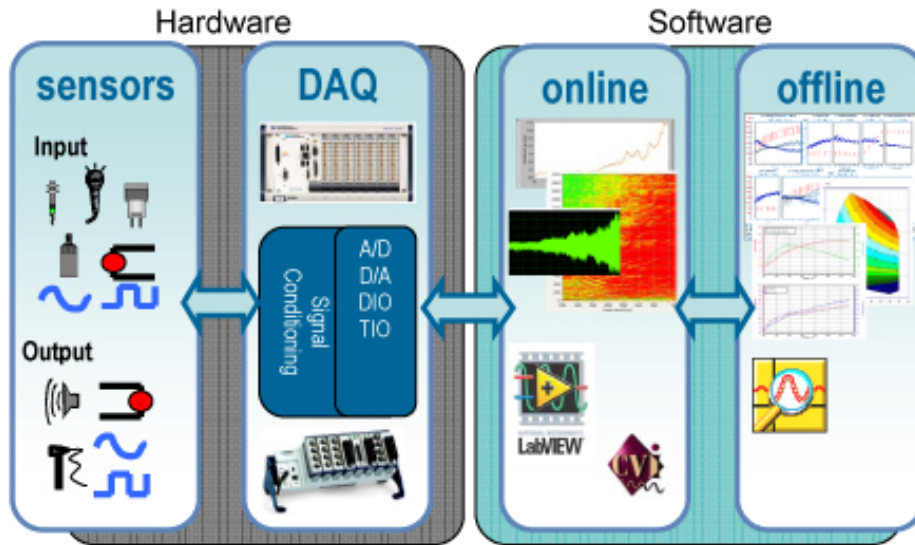
construction and maintenance of main span Suramadu Bridge

10 december 2008 | Garden Palace Hotel Surabaya



organized by
Ministry of Public Work
Directorat General of Highway
Balai Besar Pelaksanaan Jalan Wilayah V
Technical Affair of National Suramadu Bridge

Secretariat : Jl. Tambak Wedi no 1, Surabaya, telp/fax; +62.31.3729233 email : seminar@suramadu.net



VI. Cara kerja SHMS

Struktur jembatan akan merespons pembebanan dari lingkungan, yang merupakan kombinasi dari beban lalu lintas, suhu, angin, dsb (diklasifikasikan sebagai efek lingkungan) yang membebani. Apabila terjadi displacement, deflection, dsb. yang melebihi ambang batas yang normal maka akan terjadi peringatan. Apabila kondisi tersebut masih dibawah ambang maka akan terjadi perbandingan model awal (base line) dengan kondisi saat ini. Perbandingan kondisi ini merupakan ukuran tingkat kesehatan jembatan tersebut.

Apabila didalam perbandingan tersebut apabila terdapat kondisi yang melewati index tertentu maka hal ini mengindikasikan adanya suatu kerusakan. Apabila tingkat kerusakannya melewati suatu ambang yang ditetapkan maka akan terjadi peringatan. Untuk mengetahui seberapa berat tingkat kerusakannya maka dilakukan inspeksi secara manual. Sistem akan membantu menunjukkan lokasi kerusakan. Dari hasil evaluasi tersebut dapat diputuskan tindakan perbaikan yang harus dilakukan dan apabila tindakan pemeliharaan yang ada kurang memadai dapat dilakukan modifikasi.

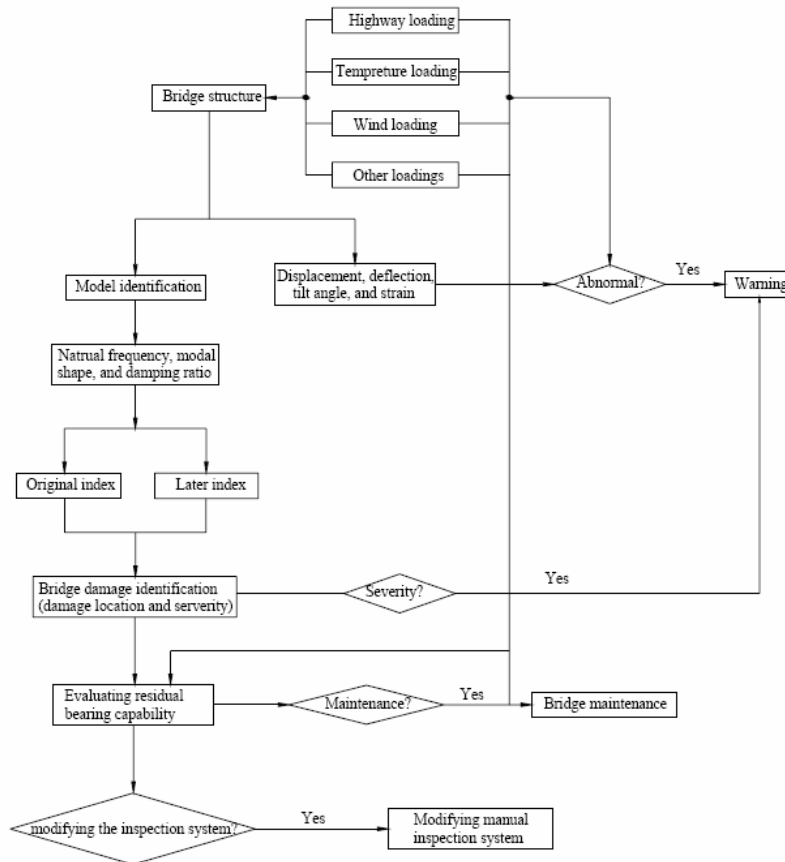
construction and maintenance of main span Suramadu Bridge

10 december 2008 | Garden Palace Hotel Surabaya



organized by
Ministry of Public Work
Directorat General of Highway
Balai Besar Pelaksanaan Jalan Wilayah V
Technical Affair of National Suramadu Bridge

Secretariat : Jl. Tambak Wedi no 1, Surabaya, telp/fax; +62.31.3729233 email : seminar@suramadu.net



VII. Tahapan Perencanaan SHMS

Perencanaan suatu SHMS dimulai dengan terlebih dahulu menentukan level SHMS yang akan diaplikasikan pada suatu jembatan/infrastruktur. Hal ini menyangkut tingkat kompleksitas dari jembatan tersebut. Setelah itu dari perhitungan struktur ditentukan bagian yang kritis (atau PSE/Principle Structure Element) yang perlu mendapatkan pengamatan yang terus menerus. Selanjutnya ditentukan jenis, spesifikasi, jumlah dan lokasi sensor.

Tahapan selanjutnya mendisain Data Acquisition Systemnya (DAS), dalam hal ini termasuk hardware, software, network, data center, dan displaynya. Selanjutnya dilakukan analisa terhadap biaya.

construction and maintenance of main span Suramadu Bridge

10 december 2008 | Garden Palace Hotel Surabaya



organized by
Ministry of Public Work
Directorat General of Highway
Balai Besar Pelaksanaan Jalan Wilayah V
Technical Affair of National Suramadu Bridge



Secretariat : Jl. Tambak Wedi no 1, Surabaya, telp/fax; +62.31.3729233 email : seminar@suramadu.net

