



● Septinurriandiani

SISTEM MONITORING KESEHATAN STRUKTUR

PENGELOLAAN DAN PEMANFAATAN DATA SISTEM MONITORING

SISTEM MONITORING KESEHATAN STRUKTUR

PENGELOLAAN DAN PEMANFAATAN DATA
SISTEM MONITORING

Penyusun
Septinurriandiani



PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN JALAN DAN JEMBATAN
Badan Penelitian dan Pengembangan
Kementerian Pekerjaan Umum
www.pusjatan.pu.go.id

SISTEM MONITORING KESEHATAN STRUKTUR- PENGELOLAAN DAN PEMANFAATAN DATA SISTEM MONITORING

Septinurriandiani
Desember 2012

Cetakan Ke-1 2012, 46 halaman
© Pemegang Hak Cipta Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan

Cover Luar : SHMS Jembatan Nasional Suramadu

No. ISBN : 978-602-8256-88-9
Kode Kegiatan : 14-PPK2-001-107-D-12
Kode Publikasi : TR-61/ST/2012

Kata kunci : Monitoring kesehatan struktur, pengelolaan data, pemanfaatan data

Ketua Program Penelitian:

Redrik Irawan, Puslitbang Jalan dan Jembatan

Ketua Sub Tim Teknis:

Prof.(R).Ir. Lanneke Tristanto

Naskah ini disusun dengan sumber dana APBN Tahun 2012, pada paket pekerjaan Penyusunan Naskah Ilmiah Litbang Teknologi Jembatan Bentang Panjang (2 Naskah Ilmiah Kajian Sistem Interpretasi SHMS Jembatan Bentang Panjang dan Metode Pemeriksaan Khusus Jembatan Bentang Panjang).

Pandangan yang disampaikan di dalam publikasi ini tidak menggambarkan pandangan dan kebijakan Kementerian Pekerjaan Umum, unsur pimpinan, maupun institusi pemerintah lainnya.

Kementerian Pekerjaan Umum tidak menjamin akurasi data yang disampaikan dalam publikasi ini, dan tanggung jawab atas data dan informasi sepenuhnya dipegang oleh penulis.

Kementerian Pekerjaan Umum mendorong percetakan dan memperbanyak informasi secara eksklusif untuk perorangan dan pemanfaatan nonkomersil dengan pemberitahuan yang memadai kepada Kementerian Pekerjaan. Pengguna dibatasi dalam menjual kembali, mendistribusikan atau pekerjaan kreatif turunan untuk tujuan komersil tanpa izin tertulis dari Kementerian Pekerjaan Umum.

Diterbitkan oleh:

Kementerian Pekerjaan Umum
Badan Penelitian dan Pengembangan
Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan
Jl. A.H. Nasution No. 264 Ujungberung – Bandung 40293

Pemesanan melalui:

Perpustakaan Puslitbang Jalan dan Jembatan
info@pusjatan.pu.go.id



Puslitbang Jalan dan Jembatan

Pusat Litbang Jalan dan Jembatan (Pusjatan) adalah institusi riset yang dikelola oleh Badan Litbang Kementerian Pekerjaan Umum Republik Indonesia. Lembaga ini mendukung Kementerian PU dalam menyelenggarakan jalan di Indonesia dengan memastikan keberlanjutan keahlian, pengembangan inovasi, dan nilai-nilai baru dalam pengembangan infrastruktur.

Pusjatan memfokuskan dukungan kepada penyelenggara jalan di Indonesia, melalui penyelenggaraan litbang terapan untuk menghasilkan inovasi teknologi bidang jalan dan jembatan yang bermuara pada standar, pedoman, dan manual. Selain itu, Pusjatan mengemban misi untuk melakukan advis teknik, pendampingan teknologi, dan alih teknologi yang memungkinkan infrastruktur Indonesia menggunakan teknologi yang tepat guna.

KEANGGOTAAN TIM TEKNIS & SUB TIM TEKNIS

Tim Teknis

Prof.(R).DR. Ir. M.Sjahdanulirwan, M.Sc.
Ir. Agus Bari Sailendra, MT
Ir. I Gede Wayan Samsi Gunarta, M.Appl.Sc
DR. Ir. Dadang Mohammad, M.Sc
DR. Ir. Poernornosidhi, M.Sc
DR. Drs. Max Antameng, MA
DR. Ir. Hedy Rahadian, M.Sc
Ir. Iwan Zarkasi, M.Eng.Sc
Prof.(R).Ir. Lanneke Tristanto
Prof.(R).DR. Ir. Furqon Affandi, M. Sc
Ir. GJW Fernandez
Ir. Joko Purnomo, MT
Ir. Soedarmanto Darmonegoro
Ir. Lanny Hidayat, M.Si
Ir. Moch. Tranggono, M.Sc
DR. Ir. Djoko Widayat, M.Sc
Redrik Irawan, ST., MT.
DR. Ir. Didik Rudjito, M.Sc
DR. Ir. Triono Jumono, M.Sc
Ir. Palgunadi, M.Eng, Sc
DR. Ir. Doni J. Widiyanto, M.Eng.Sc
Ir. Teuku Anshar
Ir. Gandhi Harahap, M.Eng.Sc

Ir. Yayan Suryana, M.Sc
DR. Ir. Rudy Hermawan, M.Sc
Ir. Saktyanu, M.Sc
Ir. Herman Darmansyah
Ir. Rachmat Agus
DR. Ir. Hasroel, APU
DR. Ir. Chaidir Amin, M.Sc
Prof. Ir. Masyhur Irsyam, MSE. Ph.D
Kemas Ahmad Zamhari
Dr. Ir. Mochammad Amron, M.Sc
Djoko Mujanto

Sub Tim Teknis

Prof.(R).Ir. Lanneke Tristanto
Ir. Rahadi Sukirman
Herbudiman, ST., MT.
Abinhot Sihotang, ST., MT.
Ir. Samun Haris, MT.
DR. Made Suangga
DR. Aswandy
Ir. Ahmad Yunaldi

Kata Pengantar

Jembatan merupakan struktur yang rentan, baik terhadap bencana alam maupun perbuatan manusia. Oleh karena itu perlu dilakukan perlindungan untuk mengurangi dampak dari bahaya tersebut. Perlindungan yang dilakukan dapat berupa perkuatan, retrofit, rehabilitasi atau system pemeliharaan yang baik. Untuk mendukung hal tersebut maka diperlukan suatu sistem yang dapat menyediakan data dan informasi yang cukup kepada pengelola untuk menentukan tindakan yang akan dilakukan.

Sistem ini adalah monitoring kesehatan struktur dimana dibagi menjadi lima level yaitu peng-kelas-an, penilaian kondisi, penilaian kinerja, penilaian detail dan peng-kelas-an, dan perkiraan umur layan. Penentuan kelima level ini berdasarkan pada hasil yang diinginkan oleh pengelola jembatan. Kelima level monitoring kesehatan ini didukung dengan adanya database. Database ini berfungsi mengetahui riwayat jembatan selama beroperasi dan saat konstruksi. Data yang disimpan pada database ini berguna sebagai input data untuk analisis yang lebih kompleks. Maka oleh karena itu manajemen data diperlukan agar data monitoring dapat dimanfaatkan dengan baik. Data monitoring yang dikelola dan dimanfaatkan dengan baik dapat menjadi dasar untuk pengambilan keputusan.

Bandung, Desember 2012

Septinurriandiani

Penyusun

Daftar Isi

Kata Pengantar	v
Daftar Isi	vi
Daftar Gambar	vii
Daftar Tabel	vii
<i>Bab 1</i> Pendahuluan	9
<i>Bab 2</i> Konsep Prosedur Monitoring Kesehatan Struktur Jembatan	19
Sistem Manajemen Jembatan (<i>Bridge Management System</i> –BMS)	22
Perlindungan Jembatan terhadap Perbuatan Manusia dan Bencana Alam.....	22
<i>Bab 3</i> Pengelolaan Data Sistem Monitoring	25
Pengaturan Akusisi Data	26
Pengumpulan Data, Sinkronisasi, dan Penyimpanan	26
Peninjauan <i>Real-Time</i> dan <i>Reality Checks</i>	27
Data Paska Pengolahan dan Jaminan Kualitas Penyimpanan Data	28
Pemrosesan Sinyal	28
Pengarsipan Data.....	29
Penggalian Data (<i>Data Mining</i>).....	30
<i>Bab 4</i> <i>Decision Support Systems</i> (Sistem Pendukung Keputusan)	33
Sistem Pendukung Keputusan untuk Sistem Monitoring Kesehatan Struktur.....	33
Mode Operasi.....	34
Sistem Monitoring dan Database	35
<i>Bab 5</i> Penutup	45
Daftar Pustaka	46

Daftar Gambar

<i>Gambar 1</i> Penampang Memanjang Jembatan Suramadu	15
<i>Gambar 2</i> Konsep prosedur sistem monitoring kesehatan struktur jembatan (Wenzel, 2009).....	21
<i>Gambar 3</i> Salah satu konsep database dan penilaian (assessment)	35
<i>Gambar 4</i> Pengukuran temperatur dan first vertical bending frequency selama setahun (Agustus 1998-1999) pada Jembatan OGB, Korea.....	38
<i>Gambar 5</i> Nilai eigenfrequency untuk perbedaan temperatur.....	39

Daftar Tabel

<i>Tabel 1</i> State-of-the-art penerapan SHMS pada jembatan.....	10
---	----

Bab 1

Pendahuluan

SHMS (*Structural Health Monitoring System*) merupakan implementasi dari strategi pengidentifikasian kerusakan infrastuktur di bidang teknik sipil. Kerusakan tersebut didefinisikan sebagai bentuk perubahan dari sifat material dan/atau geometri dari sistem struktur, termasuk perubahan kondisi batas dan sistem sambungannya (Wenzel, 2009). Proses identifikasi kerusakan umumnya terdiri dari tingkatan yaitu deteksi kerusakan, lokasi kerusakan, tipe kerusakan dan taraf kerusakan. *Tabel 1* menunjukkan *state-of-the-art* dari penerapan SHMS pada jembatan di dunia (Xu dan Xia, 2012).

Tabel 1 *State-of-the-art* penerapan SHMS pada jembatan

No	Nama Jembatan	Tipe Struktur	Lokasi	Bentang utama (m)	Sensor yang dipasang
1	Akashi Kaikyo Bridge	Susp	Jepang	1991	(1) (2) (4) (5) (6) (7) (16)
2	Great Belt East Bridge	Susp	Denmark	1624	(1) (2) (3) (4) (5) (9) (12) (13) (20) (21)
3	Runyang South Bridge	Susp	China	1490	(1) (2) (3) (4) (7)
4	Humber Bridge	Susp	UK	1410	(1) (2) (3) (4) (6) (9)
5	Jiangyin Bridge	Susp	China	1385	(1) (2) (3) (4) (5) (7) (10) (11) (14)
6	Tsing Ma Bridge	Susp	China	1377	(1) (2) (3) (4) (5) (7) (8) (13)
7	Golden Gate Bridge	Susp	USA	1280	(1) (4) (16)
8	Minami Bisan-Seto Bridge	Susp	Jepang	1100	(4) (7) (9) (16)
9	Forth Road Bridge	Susp	UK	1006	(2) (3) (7) (9) (18)
10	Humen Bridge	Susp	China	888	(3) (7) (12) (13)
11	Ohnaruto Bridge	Susp	Jepang	876	(1) (2) (3) (4) (5) (7) (16)
12	Hakucho Bridge	Susp	Jepang	720	(1) (4) (16)
13	Gwangan Bridge	Susp	Korea	500	(1) (2) (3) (4) (12) (18) (19) (20)
14	Namhae Bridge	Susp	Korea	404	(1) (2) (3) (4) (12) (19)
15	Tamar Bridge	Susp	UK	335	(1) (2) (3) (13) (19) (20)
16	Youngjong Bridge	Susp	Korea	300	(1) (2) (3) (4) (12) (18) (19) (20)
17	Sutong Bridge	Cable	China	1088	(1) (2) (3) (4) (5) (7) (8) (9) (10) (11) (12) (21) (22)

Tabel 1 (lanjutan)

No	Nama Jembatan	Tipe Struktur	Lokasi	Bentang utama (m)	Sensor yang dipasang
18	Stonecutters Bridge	Cable	Hongkong (China)	1018	(1) (2) (3) (4) (5) (7) (8) (9) (10) (11) (12) (21) (22)
19	Tatara Bridge	Cable	Jepang	890	(4) (16)
20	Normandie Bridge	Cable	Prancis	856	(1) (2) (3) (4) (7)
21	3 rd Nanjing Yangtze River Bridge	Cable	China	648	(1) (2) (3) (4) (5) (8) (11) (12) (15) (18)
22	2 nd Nanjing Yangtze River bridge	Cable	China	628	(1) (2) (3) (4) (8) (10) (16)
23	Xupu Bridge	Cable	China	590	(2) (3) (4) (8) (13)
24	Rio-Antirio Bridge	Cable	Yunani	560	(2) (3) (4) (5) (16) (22) (25)
25	Skarnsundet Bridge	Cable	Norwegia	530	(1) (2) (3) (4) (5) (12) (20)
26	Oresund Bridge	Cable	Swedia	490	(1) (2) (3) (4) (21)
27	Zhangjiang Nay Bridge	Cable	China	480	(1) (2) (3) (5) (7) (10) (12) (16) (21)
28	Ting Kau Bridge	Cable	China	475	(1) (2) (3) (4) (5) (7) (8) (13) (22)
29	Seohae Bridge	Cable	Korea	470	(1) (2) (3) (4) (12) (18) (19) (20)
30	Dafosi Bridge	Cable	China	450	(2) (3) (4) (5) (11) (13)
31	Rama IX Bridge	Cable	Thailand	450	(1) (2) (3) (4) (5) (7) (11) (12)
32	Suramadu Bridge	Cable	Indonesia	434	(1) (2) (4) (5) (7) (8) (9) (11) (12) (16) (18)
33	Kap Shui Mun Bridge	Cable	China	430	(1) (2) (3) (4) (5) (7) (8) (13) (22)
34	Tongling Yangtze River Bridge	Cable	China	432	(1) (2) (3) (4) (5) (11) (13)

Tabel 1 (lanjutan)

No	Nama Jembatan	Tipe Struktur	Lokasi	Bentang utama (m)	Sensor yang dipasang
35	Donghai Bridge	Cable	China	420	(1) (2) (3) (4) (5) (7) (9) (17) (18) (19) (21)
36	Hitsuishijima Bridge	Cable	Jepang	420	(4) (16)
37	Runyang North Bridge	Cable	China	406	(1) (2) (3) (4) (5)
38	Fred Hartman Bridge	Cable	USA	381	(1) (2) (3) (4) (5)
39	Sunshine Skyway Bridge	Cable	USA	366	(2) (3) (5) (7) (9)
40	Songhua River Bridge	Cable	China	365	(1) (2) (3) (4) (11)
41	Jindo Bridge	Cable	Korea	344	(1) (2) (3) (4) (11) (12) (16) (18) (19) (20)
42	Wuhu Bridge	Cable	China	312	(2) (3) (4) (5) (11) (13)
43	Binzhou Yellow River Bridge	Cable	China	300	(1) (2) (3) (7) (11)
44	Bayview Bridge	Cable	USA	274	(9) (18)
45	Samcheonpo	Cable	Korea	230	(1) (2) (3) (4) (12) (19) (20)
46	Pereria-Dos Quebradas Bridge	Cable	Kolombia	211	(1) (2) (3) (4) (5) (9) (12) (19) (21)
47	Shenzen Western Corridor	Cable	China	210	(1) (2) (3) (4) (5) (7) (8) (9) (21) (22)
48	Flintshire Bridge	Cable	UK	194	(1) (2) (3) (4) (5) (7) (9)
49	New HaengJu Bridge	Cable	Korea	160	(1) (2) (3) (4) (12) (14) (19)
50	4 th Qianjiang Bridge	Arch	China	580	(1) (2) (3) (4) (5) (8) (10) (15)
51	Lupu Bridge	Arch	China	550	(2) (3) (4) (13)

Tabel 1 (lanjutan)

No	Nama Jembatan	Tipe Struktur	Lokasi	Bentang utama (m)	Sensor yang dipasang
52	Banghwa Bridge	Arch	Korea	540	(1) (2) (3) (4) (5) (12)
53	Maocao Street Bridge	Arch	China	368	(1) (2) (3) (4)
54	Yonghae Bridge	Arch	China	338	(1) (2) (3) (4) (5) (7) (22)
55	Commodore Barry Bridge	Truss	USA	548	(1) (2) (3) (4) (5) (8) (12) (19) (21) (22)
56	Ironton-Russell Bridge	Truss	USA	241	(2) (3)
57	1 st Nanjing Yangtze River Bridge	Truss	China	160	(1) (2) (3) (4) (5) (8) (16)
58	Confederation Bridge	Box	Kanada	250	(1) (2) (3) (4) (5) (8) (9) (11) (12) (13) (22)
59	Foyle Bridge	Box	UK	234	(1) (2) (3) (4) (5) (23)
60	New Benicia Martinez Bridge	Box	USA	201	(2) (3) (4) (9) (12) (14)
61	Saint Anthony Falls I-35W Bridge	Box	USA	154	(2) (3) (4) (9) (11) (24)
62	North Halawa Valley	Box	USA	110	(2) (3) (5) (12)
63	Dongying Yellow River	Rigid	China	220	(2) (3) (4) (11)
64	Guangyang Island Bridge	Rigid	China	210	(2) (3) (11)

Ket^[1] : Susp – Jembatan Gantung (Suspension Bridge); Cable – Jembatan beruji kabel (Cable-Stayed Bridge); Arch – Jembatan pelengkung (Arch Bridge); Truss – Jembatan Rangka Baja (Steel Truss Bridge); Box – Jembatan Gelagar Boks (Box Girder Bridge); Rigid – Jembatan menerus (Continuous Rigid-frame Bridge)

Ket^[2] : (1) – anemometer; (2) – temperature sensor; (3) – strain gauge; (4) – accelerometer; (5) – displacement transducer; (6) – velocimeter; (7) – Global Positioning system; (8) – weigh-in-motion sensor; (9) – corrosion sensor; (10) – elasto-magnetik sensor; (11) – optic fibre sensor; (12) – tiltmeter; (13) – level sensing station; (14) – dynamometer; (15) – total station; (16) – seismometer; (17) – fatigue meter; (18) – cable tension force; (19) – joint meter; (20) – laser displacement sensor; (21) – meteorological station; (22) – video camera; (23) – jacking pressure sensor; (24) – potentiometer; (25) – water-level sensor

Menurut pedoman FHWA mengenai *Development of Model Health Monitoring Guide for Major Bridges*, penerapan monitoring kesehatan jembatan dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kategori, yaitu:

1. Pelaksanaan pada jembatan besar/utama (jembatan baru atau eksisting)
2. Pelaksanaan pada sejumlah jembatan standar (bentang pendek atau menengah) yang memiliki kesamaan material, konsep desain, konstruksi dan parameter pemeliharaan.
3. Monitoring operasional terpadu, kesehatan struktur dan keamanan
4. Pelaksanaan pada jembatan baru yang baru dibangun dari material baru atau menggunakan sistem atau metode yang belum sepenuhnya dikodifikasi, termasuk implementasi penelitian.

Manfaat penerapan monitoring kesehatan pada jembatan besar/utama baru yaitu:

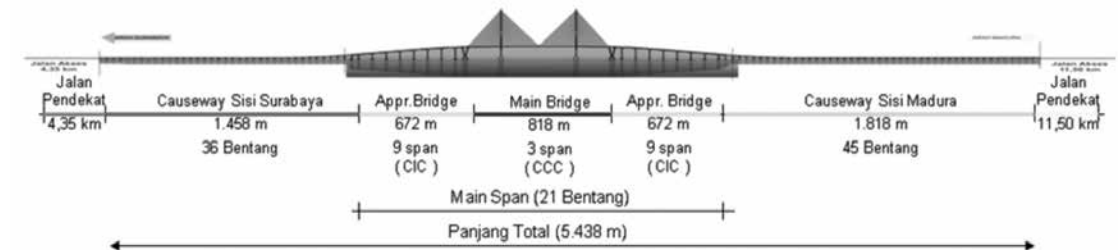
- Pengontrolan geometri, sifat material dan proses konstruksi khususnya pada konstruksi segmental dengan pemasangan yang kompleks dan/atau pada proses *post-tensioning*, dapat ditingkatkan dengan perencanaan monitoring yang baik.
- Monitoring dapat membantu untuk mengelola pengamanan resiko selama konstruksi, dimana konstruksi yang

tidak lengkap (belum selesai) sangat rentan terhadap kecelakaan dan bahaya.

- Validitas dari asumsi yang dibuat selama perhitungan perencanaan mengenai gaya (*forces*), reaksi (*reactions*), perpindahan (*displacements*), dan penyimpangan (*drifts*) yang diperkirakan bahwa struktur akan mengalami selama konstruksi dapat diperiksa dan dikonfirmasi.
- Dokumentasi dari sifat material, elemen, dan sistem yang terbangun berujung dengan karakteristik struktur yang terkalibrasi dalam bentuk model jembatan lengkap 3D analisis elemen hingga.

Manfaat yang terkait dengan implementasi monitoring kesehatan untuk konstruksi baru akan tetap berlaku untuk implementasi jembatan utama eksisting. Namun, mengingat kondisi saat penelitian rekayasa jembatan, pengembangan teknologi dan implementasi terkait, argumen yang paling menarik untuk aplikasi monitoring kesehatan dapat dilakukan dalam kasus jembatan utama eksisting yang menunjukkan penuaan dini, kelebihan tegangan dan permasalahan kinerja.

Penerapan monitoring kesehatan struktur jembatan di Indonesia sudah dilakukan pada Jembatan Nasional Suramadu. Jembatan ini menghubungkan Pulau Jawa bagian timur dan Pulau Madura. Jembatan Suramadu ini terdiri dari tiga



Gambar 1 Penampang Memanjang Jembatan Suramadu

bagian yaitu, bagian *Causeway* (PCI girder), *Approach Bridge* (gelagar boks beton prategang–*cast in situ*) dan *Main Bridge* (Cable-Stayed). SHMS hanya diterapkan pada bagian *Main Bridge* dan sebagian *Approach Bridge*. **Gambar 1** menunjukkan bagian-bagian dari Jembatan Suramadu.

Mengingat biaya investasi Jembatan Suramadu yang tinggi dan sistem struktur yang kompleks, maka dengan menerapkan SHMS diharapkan Jembatan ini dapat beroperasi sampai dengan umur yang direncanakan yaitu 100 tahun. Penerapan SHMS juga dapat menekan biaya yang sangat mahal dan tingkat kesalahan yang cukup tinggi dari monitoring yang dilakukan secara manual. Fungsi dari SHMS pada Jembatan Suramadu adalah menyajikan variasi kondisi struktur dan pembebanan jembatan; menyajikan tegangan/regangan dan deformasi dari komponen utama pada jembatan; dan mencatat kondisi khusus seperti gempa, angin kencang, kendaraan yang melebihi batas berat; dan lain-lain.

Pada workshop monitoring kesehatan struktur di Stanford tahun 2005 Farrar et al, telah menetapkan aksioma untuk monitoring kesehatan struktur, sebagai upaya untuk perumusan aturan dan pemahaman untuk mendukung “kebenaran dasar (*fundamental truth*)” yang telah dikemukakan oleh masyarakat. Aksioma-aksioma ini tidak merepresentasikan operator untuk monitoring kesehatan struktur. Untuk menghasilkan metodologi maka akan diperlukan penambahan kelompok algoritma yang membawa pelaksana monitoring kesehatan struktur dari data ke sebuah keputusan. Disiplin ilmu pengenalan pola statistik diusulkan untuk pendekatan ini. Aksioma-aksioma tersebut adalah:

1. Penilaian kerusakan memerlukan perbandingan antara dua sistem tertentu.
2. Mengidentifikasi keberadaan dan lokasi kerusakan dapat dilakukan dalam mode pembelajaran tanpa pengawasan, tetapi mengidentifikasi jenis kerusakan ini dan

tingkat keparahan kerusakan hanya dapat dilakukan dalam modus belajar dengan pengawasan.

3. Tanpa fitur ekstraksi yang cerdas, semakin sensitif pengukuran terhadap kerusakan, semakin sensitif itu terhadap perubahan kondisi operasional dan lingkungan.

4. Ada perubahan antara kepekaan terhadap kerusakan algoritma dan kemampuan penolakan kebisingan.

5. Ukuran kerusakan yang dapat dideteksi dari perubahan dinamika sistem berbanding terbalik dengan rentang frekuensi eksitasi. ■

Bab 2

Konsep Prosedur Monitoring Kesehatan Struktur Jembatan

Informasi mengenai kondisi struktur jembatan termasuk setiap elemennya sangat dibutuhkan untuk menentukan tindakan yang akan diambil. Monitoring kesehatan struktur dapat menyediakan data ini sebagai dasar untuk pengambilan keputusan. Dalam civil engineering, prosedur dan peralatan untuk jembatan terus berkembang. *Gambar 2* menunjukkan bagaimana prosedur ini telah berkembang dari pemeriksaan rutin sederhana sampai sistem monitoring yang canggih.

Tingkatan monitoring ini tergantung dari hasil yang akan dicapai. Saat ini ada lima level yang digunakan untuk menentukan kedalam investigasi (wenzel, 2009). Lima level tersebut adalah:

Level 1: Rating (peng-kelas-an). Hal ini menggambarkan penilaian struktur secara konvensional dengan pemeriksaan visual, yang memberikan kesan subjektif dari kondisi struktur. Beberapa investigasi awal yang dilakukan menetapkan *rating* sebagai dasar untuk pengambilan tindakan selanjutnya. Hal ini dapat berupa aplikasi khusus dari sistem manajemen jembatan. Banyak pengelola jembatan menggunakan *databases* untuk menyimpan hasilnya.

Level 2: Condition assessment (penilaian kondisi). Informasi yang dihasilkan dari pemeriksaan visual masih lemah (ketelitiannya rendah). Oleh karena itu perlu diputuskan apakah informasi dari pendekatan

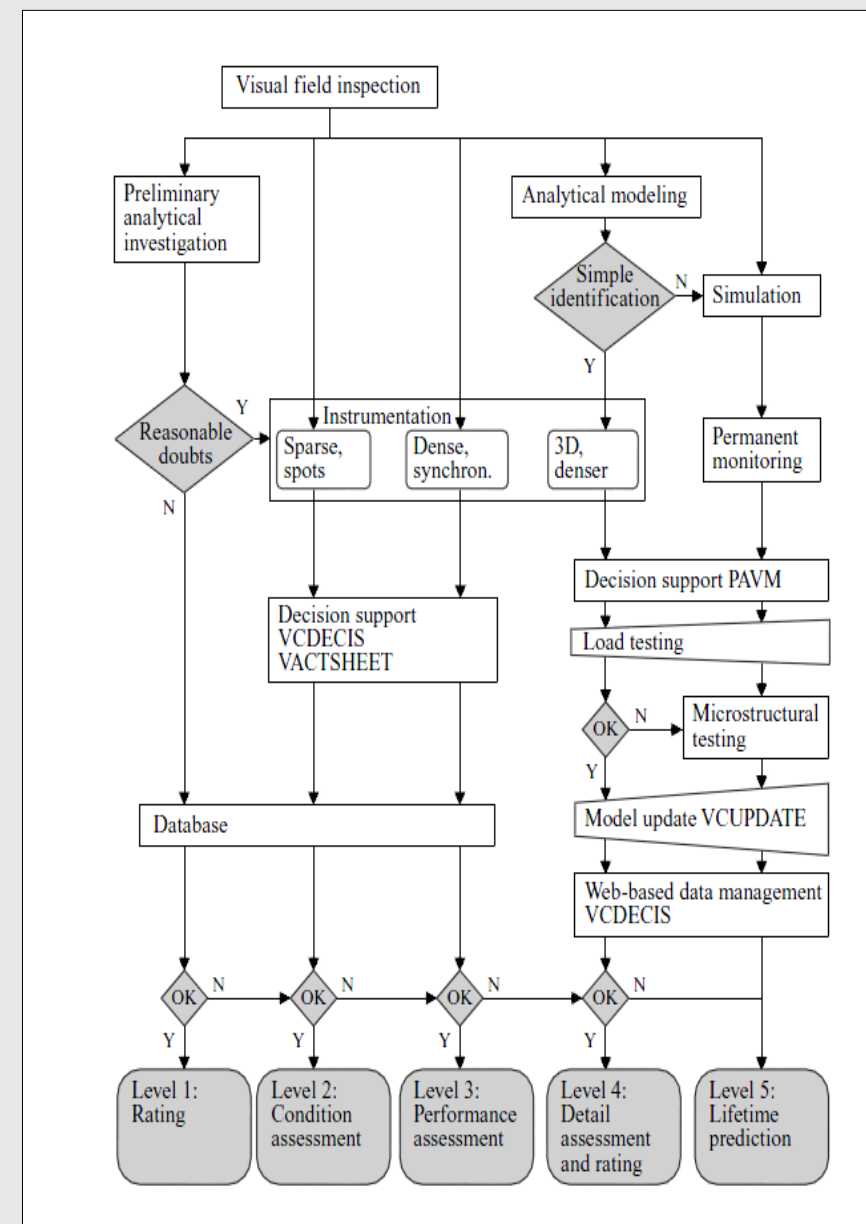
konvensional sudah cukup atau perlu ditingkatkan atau bahkan diperlukan pendekatan dengan penambahan instrumentasi yang canggih. Hal ini menentukan tipe dan kuantitas dari instrumentasi. Untuk penilaian kondisi hanya diperlukan instrumentasi sederhana dan sistem pengambilan keputusan yang sederhana pula yang menyediakan informasi penting tambahan. Penyimpanan dan penafsiran data sudah dilakukan pada *databases* eksisting. Monitoring dapat dilakukan hanya pada satu tempat saja.

Level 3: Performance assessment (penilaian kinerja). 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.

Level 4: Detail assessment and rating (penilaian detail dan peng-kelas-an). 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 di-kelas-kan (*rating*). Hal ini membutuhkan monitoring yang luas. Waktu perekaman dilakukan setidaknya 24 jam, tetapi sebaiknya lebih lama untuk memperoleh kondisi lingkungan dan lalu lintas.

Level 5: Lifetime prediction (perkiraan masa layan/operasi). 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 struktur. Pembaruan proses akan diperluas dan mempertimbangkan beberapa kondisi struktur. hal ini meliputi khususnya kasus terbebani dan tidak terbebani dan semua



Gambar 2 Konsep prosedur sistem monitoring kesehatan struktur jembatan (Wenzel, 2009)

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*).

Sistem Manajemen Jembatan (*Bridge Management System–BMS*)

Sistem manajemen jembatan (BMS) merupakan suatu alat pendukung keputusan (*decision support*) yang terdiri dari inventarisasi (data mengenai karakteristik dan kondisi jembatan), inspeksi (pemeriksaan jembatan), dan rekomendasi (mengenai pemeliharaan dan perbaikan jembatan). BMS ini penting untuk setiap tahapan umur jembatan dan terdiri penyimpanan data, biaya dan model deteriorasi, optimasi dan analisis model, dan fungsi pembaruan.

Menurut AASHTO terdapat empat modul dasar dari BMS, yaitu:

- ▶ *Database* yang memuat data diperlukan untuk menjalankan fungsi manajemen dan dapat digunakan sebagai data input model.
- ▶ Modul deteriorasi untuk memprediksi kondisi dan tingkat penurunan dari komponen jembatan untuk masa mendatang.
- ▶ Modul biaya untuk mengidentifikasi dana yang dibutuhkan untuk usulan

pemeliharaan, prosedur rehabilitasi dan penggantian, dan biaya tak terduga pada saat jembatan dalam kondisi buruk.

- ▶ Optimasi algoritma untuk menganalisis alternatif dana dan pemilihan rehabilitasi dan penggantian yang efektif.

Perlindungan Jembatan terhadap Perbuatan Manusia dan Bencana Alam

Sejak peristiwa 11 September 2011, perlindungan terhadap sistem transportasi semakin diperlukan. Jembatan merupakan elemen yang rentan, maka diperlukan perhatian yang tinggi. Monitoring dapat membantu menyoroti kegiatan penting, tetapi sebagian besarnya untuk mengidentifikasi elemen terlemah yang dapat dilindungi dengan perkuatan dan retrofit.

Dalam banyak kasus yang sama respon struktur baik untuk seismik maupun kasus beban ledakan telah diamati, (misalnya F. Seible, University of California, San Diego). Keduanya dapat mengakibatkan keruntuhan struktural setahap demi setahap, dan langkah-langkah mitigasi (seperti desain untuk redundansi dan daktilitas, maupun langkah-langkah retrofit untuk meningkatkan sengkangan beton) berlaku untuk seismik dan kondisi ledakan. Kerentanan struktur ini di bawah berbagai potensi ancaman harus diukur. Teknologi baru

harus dikembangkan dan diuji. Model fisik komputasional seismik dan ledakan harus ditingkatkan dan divalidasi untuk memprediksi kerusakan dan penentuan strategi mitigasi yang efektif. Disaran-

kan bahwa tim teknik yang sama dapat digunakan untuk menangani pertanyaan seismik dalam penilaian efek ledakan dan hal-hal terkait. ■

Bab 3

Pengelolaan Data Sistem Monitoring

Kerusakan sistem infrastruktur, dalam hal ini jembatan, umumnya tidak dapat dikendalikan walaupun jembatan tersebut didesain agar dapat beroperasi untuk jangka waktu yang lama. Berkurangnya kemampuan jembatan dalam jangka panjang akan membutuhkan biaya perbaikan yang sangat besar.

Untuk memperhitungkan penurunan kemampuan fisik tersebut, diperlukan penilaian terhadap kondisi kesehatan suatu jembatan. Penilaian itu perlu dilakukan secara terus menerus agar dapat diambil tindakan yang rasional. Hal inilah yang merupakan tantangan bagi komunitas ahli konstruksi, khususnya jembatan.

Semakin majunya teknologi dalam bidang instrumentasi didukung dengan kemajuan di bidang teknologi informasi dan komunikasi, maka monitoring kesehatan struktur jembatan dapat difasilitasi lebih mudah. Sistem monitoring kesehatan struktur merupakan bidang baru dalam mendeteksi kerusakan dengan metode pengujian tidak merusak. Teknologi ini dapat memperpanjang umur layan 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. Sistem monitoring kesehatan struktur ini bertujuan antara lain untuk:

1. Menjamin keamanan struktur
2. Memperoleh perencanaan pemeliharaan struktur yang rasional dan ekonomis
3. Mencapai operasi yang aman dan ekonomis
4. Mengidentifikasi penyebab respon yang tidak dapat diterima

Untuk mencapai tujuan tersebut diperlukan pengelolaan dan pemanfaatan data yang baik. Oleh karena itu diperlukan pengaturan akusisi data; pengumpulan, sinkronisasi dan penyimpanan data; pengecekan secara *real-time*; data paska pengolahan dan jaminan kualitas penyimpanan data; pemrosesan sinyal; arsip data; dan penggalian data. Untuk penjelasan setiap bagiannya adalah sebagai berikut.

Pengaturan Akusisi Data

Pengaturan dan pengendalian akusisi data berdasarkan karakteristik yang diperlukan dari peristiwa yang akan diambil dan keterbatasan dari sistem perencanaan pengukuran. Secara umum sistem monitoring akan digunakan untuk menangkap

efek dari *Low-frequency/long-term, high-frequency/short-term*, dampak dan gejala lingkungan atau gambar dari suatu kejadian. Komponen pengendalian akusisi data harus fleksibel dalam menangani pemantauan yang berkelanjutan dari peristiwa jangka panjang pada kapasitas yang diinginkan sementara peristiwa jangka pendek dapat dimonitor sesuai dengan jadwal program pengamatan. Monitoring yang dilakukan berdasarkan suatu kejadian tertentu juga harus dikelola dengan cara pengendalian akusisi data. Hal ini merupakan pilihan untuk pengumpulan dan pengendalian data yang menentukan kuantitas dan kualitas data, yang mempengaruhi pemilihan metode analisis, penyimpanan, akses dan penaksiran. Desain yang menggabungkan pengendalian terpusat dari komponen sistem akusisi data dianjurkan untuk pemantauan jangka panjang dari struktur utama.

Pengumpulan Data, Sinkronisasi, dan Penyimpanan

Pengumpulan dan penyimpanan data merupakan peran penting dari sistem akusisi data. Ada tiga langkah utama yang terlibat dalam proses pengumpulan data: (1) *buffering* data, (2) pengolahan data, dan (3) penyimpanan data. Karakteristik pengumpulan data dari sistem akusisi data

seringkali akan memperkenalkan karakteristik tertentu ke dalam data. Karakteristik lebih lanjut dapat mempengaruhi ketersediaan data yang dikumpulkan untuk analisis dengan metode tertentu. Karakteristik temporal dan spasial dari data, urutan pengumpulan data, keterlambatan akibat karakteristik sistem, penandaan metodologi dan penggunaan pendekatan sinkronisasi harus dipahami dengan jelas dan dipetakan. Metode reduksi data juga tergantung pada fenomena yang diukur dan informasi/fitur yang akan diambil dari kumpulan data. Pengolahan data dapat memiliki berbagai tujuan. Hal ini dapat dilakukan untuk menghilangkan komponen suara atau misalnya mengekstrak informasi seperti tegangan utama, orientasi, sudut, dan tegangan ekuivalen untuk data yang dikumpulkan dari strain gages. Penyimpanan permanen data yang dikumpulkan merupakan pertimbangan penting. Metode yang paling tepat akan tergantung pada tujuan dari data, teknik yang akan digunakan untuk analisis data, frekuensi di mana data yang disimpan akan diakses, dan durasi waktu bahwa data yang diharapkan untuk melayani beberapa tujuan. Jika data harus sering diakses untuk analisis, metode terbaik mungkin untuk menempatkan data dalam database komputer atau media elektronik lainnya. Apapun metode penyimpanan dipilih, prosedur arsip dan cadangan yang tepat harus dilaksanakan dan diikuti.

Peninjauan *Real-Time* dan *Reality Checks*

Kemampuan peninjauan secara *real-time* dan *online* untuk baik data pengukuran dan status sistem pemantauan merupakan karakteristik yang diinginkan untuk memfasilitasi suatu keputusan. Kemampuan ini memungkinkan pemilik, pelaksana pemeliharaan dan staf teknik untuk mengamati dan menghubungkan berbagai masukan dan keluaran yang terjadi pada struktur, dan untuk mengevaluasi kondisi sistem pemantauan. Kesuksesan Implementasi pemantauan secara *real-time* mensyaratkan bahwa pemeriksaan verifikasi tertentu dilakukan untuk menjamin validitas data sebelum ditampilkan. Berbagai alat dan metode pengendalian proses statistik/*Statistical Process Control* (SPC) juga dapat diterapkan pada proses aliran data untuk memastikan validitas dan reliabilitas jangka panjangnya secara otomatis. SPC menyediakan grafik yang berbeda berdasarkan sifat pemetaan data, namun kebebasan dari nilai-nilai yang lalu dan asumsi data yang terdistribusi normal merupakan dasar untuk semua. Jika perangkat SPC, pengujian dan pengukuran dibangun untuk visualisasi *real-time* dan komponen penyajian sistem pemantauan, mereka akan menyediakan pengguna dengan informasi yang diperlukan untuk mendeteksi anomali dan mengidentifikasi kemungkinan penyebab.

Data Paska Pengolahan dan Jaminan Kualitas Penyimpanan Data

Data yang dihasilkan sering diperoleh melalui pengaturan pemantauan, antara lain: uji lapangan, pengukuran berkelanjutan atau dipicu. Data yang dikumpulkan akan disimpan secara lokal dan ditransfer ke penyimpanan dan komponen arsip setelah pengemasan dan penandaan yang tepat. Reduksi data dan pengolahan teknik yang sering digunakan untuk mengekstrak informasi yang diinginkan dari data yang dikumpulkan. Teknik pengolahan data juga sering digunakan untuk mengidentifikasi berbagai pola atau mengekstrak informasi tertanam tertentu dari data. Alat pengolahan harus hati-hati dipilih berdasarkan tujuan dan informasi yang harus diekstrak dari data. Waktu domain atau analisis domain frekuensi dan alat-alat pemodelan yang banyak tersedia untuk analisis data

Pemrosesan Sinyal

a. Filter/penyaringan data

Filter/penyaringan memungkinkan pengguna untuk mengekstrak komponen tertentu dari sinyal yang diukur. Sinyal mengandung fenomena lain yang menarik dan *filter* yang digunakan secara umum untuk mengekstrak jenis informasi. Salah

satu penggunaan umum filter adalah dalam penghapusan suara dari sinyal. Pada kenyataannya, sinyal pengukuran memiliki konten di seluruh spektrum frekuensi. Dengan mendefinisikan di mana sinyal yang diinginkan jatuh dan / atau di mana suara jatuh, seseorang dapat membangun sebuah filter yang sesuai untuk mengekstrak hanya sinyal tertentu. Misalnya, peralatan elektronik sering mengalami kebisingan yang disebabkan oleh daya (60 Hz kebisingan). Memasang sebuah ban yang menyaring pada 60 Hz dengan mudah dapat menghilangkan kebisingan ini.

b. Transformasi Frekuensi Domain

Transformasi frekuensi domain memungkinkan pengguna untuk melihat sinyal dalam frekuensi domain. Sebuah representasi frekuensi domain menggambarkan frekuensi yang berbeda yang terdiri dari sinyal dan kontribusi dari masing-masing frekuensi pada sinyal.

c. Analisis Statistik

Sebuah sistem pemantauan skala besar yang dioperasikan untuk waktu yang sangat panjang akan menghasilkan data dalam volume besar. Oleh karena itu, teknik-teknik akan diperlukan untuk mewakili secara akurat sinyal yang berbeda dengan informasi sesedikit mungkin. Analisis statistik adalah salah satu cara mendefinisikan parameter

untuk mewakili sampel sinyal yang lebih besar. Perangkat analisis statistik juga dapat membantu dalam menentukan kesamaan antara dua set data dalam hal faktor yang berkorelasi. Faktor-faktor korelasi yang paling umum digunakan adalah kovarian, produk Pearson, dan Chi-Square.

d. Korelasi Analisis

Korelasi studi analisis dilakukan dengan bantuan identifikasi hubungan yang mungkin antara pasangan yang berbeda dari variabel. Analisis korelasi adalah teknik statistik, dan dapat menentukan apakah pasangan variabel yang terkait. Dalam lingkungan aplikasi nyata, analisis korelasi dapat dibagi ke dalam beberapa tingkatan.

Pengarsipan Data

Sejumlah besar data akan diakumulasi terus menerus dari pemantauan jangka panjang sebuah jembatan. Penyimpanan dan manajemen data tanpa perencanaan yang tepat dan desain dapat menjadi masalah besar. Proses aliran data dimulai dengan pengumpulan data dan diakhiri dengan penyimpanan dan integrasi data. Pengambilan data berikut proses penyimpanan dan integrasi hanya sebagai sarana untuk membantu upaya penggalian dan analisis data. Penyimpanan yang tepat dan pengembangan aplikasi analisis membu-

tuhkan pilihan yang jelas dari sistem manajemen database untuk pertimbangan desain. Pemilihan sistem manajemen database dapat dibuat berdasarkan sebuah file berbasis database bersama (*shared file databases*) atau client / server database. File database bersama sering disimpan dan diakses di komputer lokal sehingga akses oleh pengguna jarak jauh menjadi sulit. Sistem manajemen Client / server database berbagi informasi dengan memiliki kemampuan server-side pengolahan terpusat. Sebuah "sistem database" biasanya mengacu pada kumpulan perangkat lunak, yang didistribusikan dan dilaksanakan di lingkungan yang didistribusikan. Sebuah sistem database dapat dibagi menjadi beberapa segmen berdasarkan fungsi mereka. Misalnya, implementasi database dapat mencakup tiga segmen yang berbeda: (1) server data, (2) server bisnis dan (3) komponen pengguna. Server data menyediakan arsip, manajemen, keamanan dan manipulasi data. Server bisnis menyediakan prosedur, aturan dan objek pemrograman bisnis yang spesifik. Komponen pengguna menyediakan tampilan grafis intuitif yang memungkinkan pengguna untuk menghubungkan ke database, untuk mengeluarkan pertanyaan dan untuk mengambil informasi yang diinginkan. Tiga komponen dasar dari komponen pengguna adalah: (1) interface query, (2) tampilan visualisasi, dan (3) tampilan statistik.

Penggalian Data (*Data Mining*)

Penggalian data adalah konsep mentransfer data menjadi informasi yang berguna. Hal ini berguna dalam penggalian informasi dari olahan skala besar database. Ada dua konsep dasar yang terlibat: pergudangan data, dan penggalian data. Pergudangan data adalah database skala besar penggalian: melakukan proses pencarian, pencocokan pola, menganalisis dan strate-

gis pengambilan keputusan. Sebuah sistem penggalian data dari multidimensi database awalnya harus mencakup layanan OLAP (*On-Line Analytical Processing*). OLAP menyediakan arsitektur untuk mengatur dan menganalisis data. Multidimensi database dengan layanan OLAP akan menyediakan sarana untuk pra-analisis data dan memberikan fondasi dan struktur untuk efisiensi proses penggalian data. ■

Bab 4

Decision Support Systems (Sistem Pendukung Keputusan)

Suatu sistem monitoring kesehatan terdiri dari sejumlah sensor yang menghasilkan data secara permanen, dan hanya sebagian kecil yang sebenarnya digunakan dalam proses pengambilan keputusan. Hal ini terutama karena sumber daya yang hilang dan sebagiannya disebabkan oleh kurangnya pengetahuan. Sistem pendukung keputusan dapat menyaring data dan mengubahnya menjadi suatu informasi. Terpasangnya instrumen secara permanen pada sistem monitoring kesehatan struktur bisa menghasilkan sampai terabyte data setiap harinya. Penerapan sistem pendukung keputusan pada sistem monitoring ini merupakan kasus yang ideal, tetapi alasan jarang diterapkannya adalah solusi standar yang sulit diterapkan pada bidang teknik sipil (*civil engineering*).

Sistem Pendukung Keputusan untuk Sistem Monitoring Kesehatan Struktur

Sistem pendukung keputusan (*decision support system*) merupakan sistem informasi dengan basis komputer yang dapat mendukung pengambilan keputusan dari suatu kegiatan (*wikipedia*). Penilaian monitoring (*monitoring assessment*) dan pendukung keputusan dari suatu struktur

telah menjadi isu penting dalam masyarakat modern kita. Praktek yang sedang berkembang saat ini adalah pendekatan kasus oleh para ahli untuk masalah tertentu. Sebuah prosedur yang terorganisasi dengan baik berdasarkan standar belum sampai ke tingkat yang sempurna. Kebanyakan sistem ini didasarkan pada pengalaman *engineers* dengan monitoring dan penilaian (*assessment*) jembatan. Ini terdiri dari beberapa modul dan menyediakan semua alat yang diperlukan untuk pengambilan keputusan saat tersedianya data monitoring.

Mode Operasi

Ide dasarnya adalah memperbolehkan operator dapat ikut serta dalam prosesnya. Penilaian individualnya (*individual assessment*) sama pentingnya dengan tugas-tugas yang dilakukannya. Pemilihan mode mempengaruhi penentuan tingkat resiko, sehingga operator dapat secara langsung mengubah atau memodifikasi prosedur. Beberapa mode operasi yang dapat digunakan:

- Pengoperasian normal melakukan prosedur standar yang telah ditetapkan (standar).
- Pengoperasian pada batas bawah mengaktifkan pemeriksaan data tambahan dan kesangsian memberikan penilaian (*assessment*) pada tingkat risiko yang lebih tinggi.

- Pengoperasian sistem peringatan (*warning*) dilakukan pada tahap ketika masalah telah diidentifikasi. Waktu yang diperlukan untuk penilaian ulang (*reassessment*) singkat dan tingkat risiko meningkat.
- Pengoperasian darurat berarti penilaian (*assessment*) dan peringatan (*warning*) dilakukan secara online permanen. Kehadiran operator diharapkan.
- Analisis forensik berarti analisis kejadian agar dapat dipelajari darinya. Secara sistematis data akan diteliti sebagai indikator kegagalan.
- Aplikasi-aplikasi lain dimungkinkan untuk menggabungkan metodologi yang ada atau menambahkan item baru. Hal ini merupakan pengembangan platform.
- Penggunaan ilmiah memungkinkan penggunaan data untuk tujuan ilmiah. Tidak ada penilaian risiko dilakukan dan tidak ada peringatan diberikan.
- Modul prognosis (*prognosis module*) memungkinkan prognosis/prediksi dari data jika *time series* yang cukup tersedia. Modul ini terutama akan diaktifkan dalam sistem kerja selama jangka waktu tertentu.

Telah diakui bahwa aplikasi yang sangat ketat aturan ini tidak layak untuk struktur kita, masing-masing dari mereka hanya menjadi prototipe. Pengetahuan dan intuisi dari para operator akan diperhitungkan untuk menghasilkan hasil yang lebih

berguna. Masalah utamanya adalah untuk menghindari alarm palsu, yang mahal dan memberikan masalah bagi reputasi dan penerimaan sistem. Selama pemeliharaan tahunan, penyesuaian dilakukan untuk menumbuhkan pengalaman dan meningkatkan kuantitas data. Pembelajaran secara rutin juga menumbuhkan efektivitas dalam waktu dan input dari monitoring.

Sistem Monitoring dan Database

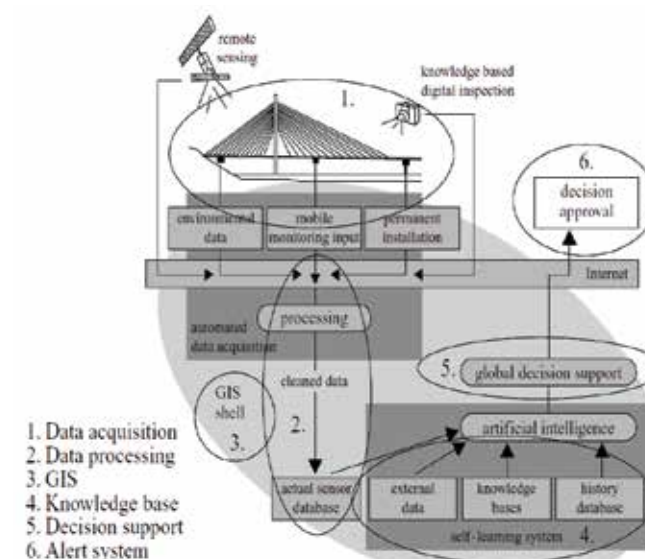
Akuisisi Data

Sistem akuisisi data harus dirancang secara teliti sesuai dengan persyaratan struktur. Semua jenis input yang diinginkan, seperti (*Gambar 3*):

- Penginderaan data jarak jauh, mungkin membentuk dasar untuk penilaian (*assessment*) yang sangat kasar dari

struktur, eksposur dan pengaturan geografis. Hal ini dimaksudkan untuk menghasilkan informasi mengenai kondisi lingkungan dari data tersebut.

- Instalasi permanen adalah sistem online yang dipasang di struktur sesuai yang direncanakan. Hal ini berguna untuk merancang versi runtime dari perangkat lunak untuk setiap instalasi permanen. Hal ini memungkinkan elaborasi hasil yang lebih cepat, karena inputnya dikenal dalam struktur dan kontennya. Sistem tersebut juga akan mampu menghasilkan laporan secara otomatis. Prosedur standar untuk korelasi data dan peringatan akhir (yaitu kecepatan angin) dirancang secara tersendiri.
- Sebuah unit monitoring yang berpindah-pindah akan menyediakan data tambahan yang diperlukan untuk mendapatkan informasi lebih lanjut



Gambar 3 Salah satu konsep database dan penilaian (*assessment*)

tentang struktur atau melihat elemen tertentu. Aplikasi ini hanya sementara. Misalnya eigenmodes dicatat dari sensor di banyak lokasi yang bervariasi.

- Data Lingkungan akan dikumpulkan dari sumber apapun yang tersedia. *Cross-correlations* antara stasiun di tempat-tempat yang jauh dan kondisi aktual untuk struktur ini akan didesain. Target akhir adalah dengan menggunakan data yang disimpan dalam database sudah siap untuk penilaian kasar pertama dari setiap proyek baru. Koneksi ke sumber data akhir akan dibentuk untuk setiap kasus secara terpisah.

Pengolahan Data

Modul pengolahan data mengambil alih data yang masuk dari internet. Pengecekan yang dapat diterima/dipercaya dilakukan untuk mengidentifikasi pembacaan palsu atau kegagalan sensor. Data yang jelas salah akan dihilangkan. Semua data lainnya akan diambil alih dan disimpan dalam bentuk mentah untuk pekerjaan di masa depan. Data mentah asli akan disimpan secara permanen. Semua informasi yang diperlukan harus disediakan oleh engineer yang bertanggung jawab. Pencampuran data dapat terjadi pada tingkat ini.

Sistem Informasi Geografis

Sistem Informasi Geografis menyediakan pilihan untuk mengatur data dalam jumlah besar dengan cara yang jelas dan terstruktur. Hal ini digunakan di sini untuk membawa semua informasi bersama-sama, yang diperlukan untuk melakukan keseriusan dalam penilaian monitoring (*monitoring assessment*) dan pengambilan keputusan. Daftar informasi terdiri dari informasi geografis serta semua dokumen lain yang diperlukan, yaitu:

- peta dalam berbagai detail;
- gambar struktur;
- foto, video dan komunikasi lainnya;
- Laporan-laporan dan dokumentasi;
- Hasil penilaian dan ringkasan akhirnya;
- Gambar CAD atau dokumen terkait lainnya;
- Peta bahaya untuk longsor seismik atau bahaya badai;
- citra satelit dari berbagai jenis;
- Informasi infrastruktur;
- informasi topografi;
- referensi dan literatur pada database;
- informasi yang berguna lainnya.

Desain ini dibuat untuk memungkinkan penanganan intuitif informasi. Pengguna tidak harus memerlukan sebuah buku pegangan untuk menemukan segala sesuatu yang tersedia.

Pengetahuan Database

Bagian pengetahuan tentang sistem ini dapat dibagi menjadi tiga database, yaitu pengetahuan, database eksternal dan sejarah. Informasi yang diterima melalui internet mungkin tidak valid untuk waktu yang singkat. Informasi dasar yang dimulai secara fisik disimpan dalam database untuk memungkinkan pengguna untuk mendapatkan informasi cepat mengenai fakta-fakta dasar dan angka. Database untuk data eksternal memberikan kesempatan untuk menggabungkan data eksternal yang diterima dari stasiun meteorologi, database lainnya atau sumber eksternal dengan proses penilaian yang sebenarnya. Targetnya adalah untuk mengisi kesenjangan dalam rantai monitoring, terutama pada kondisi lingkungan.

Target akhir akan memiliki jaringan berdiri masukan data meteorologi yang menyediakan informasi yang cukup untuk menutupi kemungkinan struktur baru yang akan dinilai. Database sejarah mencakup semua kasus yang dilakukan selama ini dengan hasil dan komentar. Semua hasilnya disimpan dalam bentuk sehingga mereka dapat digunakan oleh setiap prosedur penilaian baru. Kombinasi hasil sebelumnya dengan rekor baru yang mungkin dan statistik dari prosedur penilaian yang tersedia dapat diproduksi. Ini juga memungkinkan prediksi hasil dari struktur yang

masuk, ketika proyek-proyek serupa telah dilakukan.

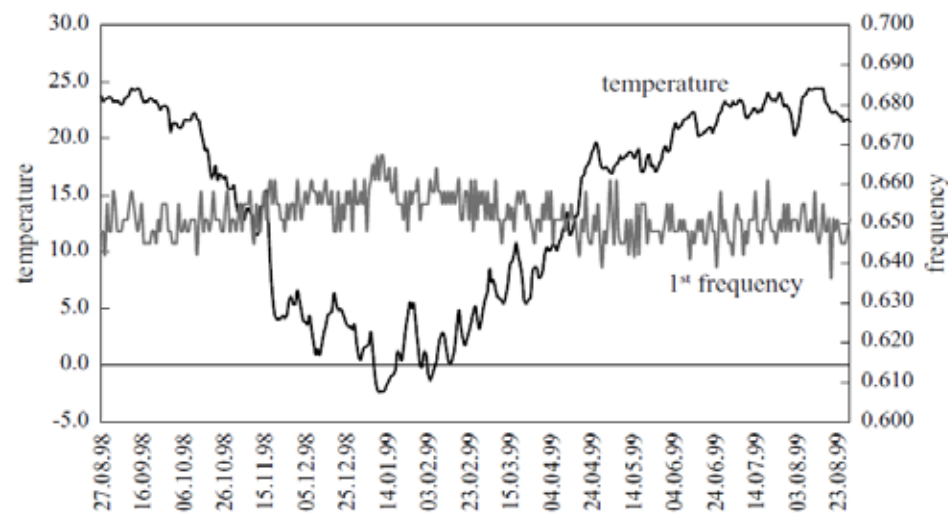
Sistem Pendukung Keputusan

Berbagai aplikasi yang tersedia untuk menilai data pemantauan. Masih ada beragam pertanyaan terbuka dimana metodologi baru akan diproduksi yang dapat diperkenalkan ke dalam proses. Sistem ini ditentukan oleh aturan, yang memungkinkan penilaian pada mencari fakta dan indikator dalam data yang tersedia. Beberapa metodologi saling melengkapi dan memang ditujukan untuk melakukan pengolahan paralel dan perbandingan hasil.

a. Penetapan ketentuan

Aturan adalah inti dari sistem penilaian. Mereka terdiri dari metodologi yang dikembangkan untuk mendapatkan informasi maksimum dari data. Ada beberapa pendekatan untuk mencapai hasil yang sama, yang dapat diterapkan secara paralel, rata-rata atau dibandingkan. Nilai dari berbagai jumlah dihitung dari hasil monitoring yang digabungkan seluruhnya.

Peringkat lebih dari satu set aturan. Setiap penilaian rutin diidentifikasi didokumentasikan dan diperkenalkan ke sistem sebagai sebuah aturan. Sebuah contoh sederhana berikut, yang menunjukkan prinsip kompensasi suhu.



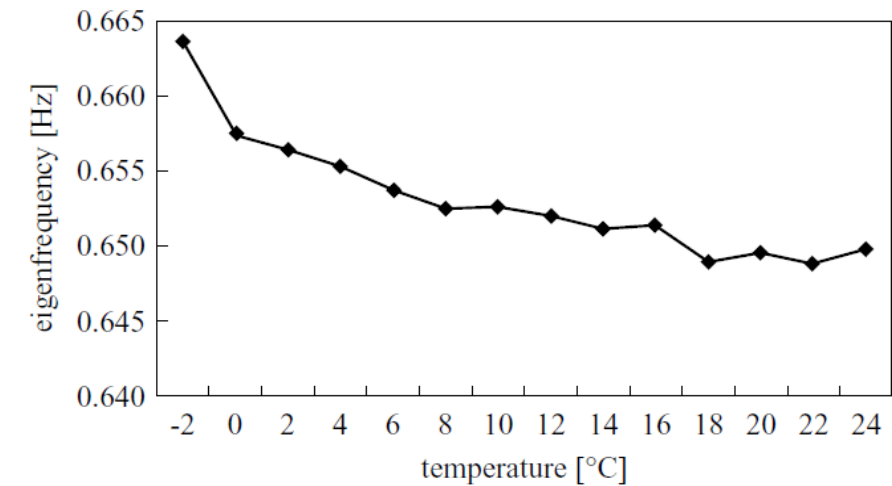
Gambar 4 Pengukuran temperatur dan first vertical bending frequency selama setahun (Agustus 1998-1999) pada Jembatan OGB, Korea

Deskripsi singkat

Hal ini dikenal dalam komunitas pemantauan kesehatan bahwa mengubah kondisi batas (suhu) kadang-kadang memiliki efek yang besar terhadap parameter modal yang diukur, khususnya frekuensi natural. Dengan menggunakan konsep monitoring yang mengevaluasi integritas struktural sebagai fungsi dari frekuensi yang diukur, ketergantungan ini bisa menjadi titik penting dalam penilaian. Tugas utama adalah untuk memisahkan perubahan normal (lingkungan) dalam respon dinamis dari perubahan abnormal yang disebabkan oleh kerusakan progresif beberapa dukung beban bagian.

Basis Ilmiah

Dari Agustus 1998 hingga Agustus 1999 sebuah sistem operasi kontinyu pemantauan dipasang di Grand Olimpiade Cable-Stayed Bridge (OGB) di Korea. Sistem monitoring ini memperoleh respon dinamik dari struktur dek dan beberapa kabel yang dipilih, serta data suhu, dari waktu ke waktu. Tujuan dari pemantauan system ini untuk menyediakan lingkungan dan data getaran. Dari pengukuran ini baris data telah diturunkan, yang disajikan pada **Gambar 4**. Dari **Gambar 4** dapat diidentifikasi secara jelas bahwa suhu bervariasi antara -3°C minimum dan $+25^{\circ}\text{C}$ suhu maksimum selama periode pemantauan satu tahun.



Gambar 5 Nilai eigenfrequency untuk perbedaan temperatur

Frekuensi lentur vertikal pertama menunjukkan selama periode ini tren karakteristik frekuensi meningkat pada suhu yang lebih rendah. Pertimbangan fakta ini penting untuk menghindari interpretasi yang salah dari respon dinamis diperoleh.

Aturan/ketentuan

Jadi, untuk penilaian struktural menggunakan pemantauan getaran ambien itu adalah suatu keharusan untuk mempertimbangkan efek temperatur. Data yang dikumpulkan sejauh ini (**Gambar 5**) menyebabkan aturan berikut:

1. Peningkatan suhu menyebabkan penurunan frekuensi alami.
2. Suhu Struktural menjatuhkan ke bawah

0°C sangat penting, yang menghasilkan ekspresi berikut untuk suhu acuan 20°C :

$$f_{\text{normal}}(t_i) [\text{mHz}] \sim f(T; t_i) + 0,32 (T - 20^{\circ}\text{C})$$

Aplikasi

Penggunaan praktis aturan yang ditetapkan memerlukan pengukuran suhu udara dan structural selama prosedur monitoring. Tujuannya adalah untuk memantau struktur tertentu pada kondisi lingkungan yang hampir sama seperti selama penilaian terakhir. Oleh karena itu bulan yang sama pada tahun berikutnya harus dipilih, yang merupakan metode yang mudah tapi efisien. Jika ini dianggap, dan perbedaan suhu masih tidak dapat diabaikan, frekuensi alami

diidentifikasi harus diperbarui, dengan menggunakan persamaan di atas, dengan suhu referensi.

Informasi Latar Belakang

Pengaruh variasi temperatur terhadap parameter modal telah disajikan dalam makalah penelitian beberapa. Semua penyelidikan telah menunjukkan rata-rata, meningkat 4-5% pada frekuensi alami dari semua mode untuk penurunan suhu. Dalam konteks ini harus disebutkan bahwa pengaruh perubahan suhu bisa menjadi lebih kuat jika struktur berada di bawah kendala (abutment, dermaga, bersama ekspansi, dll). Penurunan suhu terutama mempengaruhi modulus elastisitas seluruh struktur. Dalam konteks ini juga penting untuk mengerti perjalanan suhu lapisan aspal jika ada satu diterapkan. Bawah 0°C, lapisan aspal tampaknya bertanggung jawab untuk variasi frekuensi.

Berdasarkan analisis data harus diuraikan bahwa tidak mungkin untuk merumuskan aturan, dapat diandalkan transferable untuk kompensasi dari perbedaan suhu. Setiap struktur berperilaku berbeda dalam kondisi batas yang berbeda-beda, oleh karena itu pengetahuan dasar tentang respon struktur bawah suhu berubah harus tersedia sebelum suhu model kompensasi dapat diterapkan.

b. Analisis Modul

Himpunan peraturan secara permanen diperbarui dan diperbesar dan untuk perlindungan pengetahuan rincian tidak dapat disediakan di sini. Gambaran umum diberikan sebagai berikut:

- ▶ Sejumlah metode analisis frekuensi telah dikembangkan karena ada banyak informasi dalam sinyal yang harus diambil, mulai dari perbandingan sederhana tanggapan terhadap dekomposisi frekuensi selama periode rekaman tertentu.
- ▶ Metodologi dalam domain waktu menjadi semakin penting. Dengan catatan lagi, pola dapat dikenali dan dibandingkan.
- ▶ Bentuk mode merupakan alat yang menarik untuk penilaian ketika sejumlah titik yang telah dicatat. Terutama terwakili perubahan dalam kondisi batas.
- ▶ Model update dapat mengambil berbagai bentuk. Untuk kabel, update model otomatis tersedia yang memungkinkan perbandingan langsung dari hasil dengan model teoritis yang menghasilkan itu sendiri. Prosedur memperbarui lainnya memerlukan ekspor hasil untuk kode model FE. Model kriteria jaminan dihitung untuk menemukan modus pencocokan.

- ▶ Damping dianalisis dengan berbagai cara, untuk mengekstrak material pada redaman sistem. Sebagai perbandingan perlu memiliki parameter rekaman yang sama untuk mengatasi masalah numerik.
- ▶ Pemindahan dihitung dengan integrasi ganda dari sinyal percepatan. Dalam banyak kasus verifikasi melalui laser digunakan, yang memungkinkan perhitungan perpindahan akurat. Ini memberikan wawasan yang mendalam perilaku struktur.

Untuk penentuan spektrum respon, tiga metodologi yang diterapkan: tradisional puncak-picking, metode subruang stokastik dan model ARMA.

c. Aplikasi Lainnya

Data yang cocok untuk beberapa aplikasi lain. Derivatif sering dikembangkan dan diimplementasikan dan berikut ini adalah layak disebut:

- ▶ Kompensasi untuk pengaruh lingkungan, seperti yang diterapkan pada data saat masuk ke modul pendukung keputusan, juga dapat memberikan informasi pada perilaku struktur.
- ▶ Faktor Dinamis sering merupakan produk samping dicari analisis.
- ▶ Penentuan beban sangat sering diinginkan

kan oleh klien untuk mengetahui overload pada struktur.

- ▶ Penilaian seumur hidup Kelelahan dan yang tersisa adalah masalah besar untuk struktur baja saat ini. Mereka terutama diterapkan dalam sistem pemantauan permanen.
- ▶ Penilaian elemen struktur ini dimungkinkan dengan mengisolasi bagian dari respon frekuensi. Metode Stochastic memungkinkan penilaian terhadap unsur-unsur.
- ▶ komponen non-struktural yang sangat sering menunjukkan tanda tangan getaran mereka di respon. Jika dapat diisolasi, akan ada penilaian pada item ini juga.
- ▶ Dengan sekuensing dinamis catatan, derivatif dapat ditentukan menunjukkan perkembangan struktur dari waktu ke waktu. Aplikasi ini khususnya berguna ketika sumber eksitasi yang diinginkan.
- ▶ Wavelet aplikasi memungkinkan analisis sistem untuk menemukan kerusakan dalam struktur.
- ▶ Kerusakan deteksi, lokasi dan analisis adalah bidang saat ini di seluruh dunia pembangunan. Berbagai rutinitas yang tersedia, tetapi masih banyak yang harus dilakukan berkaitan dengan otomatisasi dan kehandalan.

Daftar ini diperbarui akibatnya dengan setiap perkembangan baru dan deteksi pengetahuan baru. Sistem ini dimulai me-lalui file konfigurasi, dimana pengguna diminta metodologi yang harus diterapkan dan kombinasi yang diinginkan. Sebuah menu standar tersedia yang mengarahkan pengguna untuk evaluasi standar. Setiap langkah memberikan hasil penilaian yang kemudian disimpan dalam database pengetahuan untuk penggunaan statistik. Ada pilihan untuk pergi dengan proses melalui jaringan saraf yang telah dilatih oleh aplikasi sebelumnya. Namun demikian langkah ini belum jatuh tempo karena kurangnya kemungkinan pelatihan untuk jaringan dan pengembangan yang sedang berlangsung. Hal ini diantisipasi bahwa dalam dukungan di masa depan dapat disediakan untuk pengguna dengan sistem ini.

Sistem Peringatan

Informasi tentang tingkat risiko disediakan kepada pengguna. Sistem ini telah dipilih sehubungan dengan sistem peringatan digunakan untuk bahaya alam. Longsor atau longsor sistem peringatan memiliki lima tingkat risiko yang berbeda dan sistem kode warna berikut praktek internasional. Ketika tingkat risiko 5 (ekstrim) tercapai, tindakan otomatis oleh sistem dapat dipicu. Hal ini pada akhirnya bisa menjadi lampu lalu

lintas merah di pendekatan untuk jembatan sedang dipantau. Tingkat risiko lain menyediakan informasi bagi operator dan juga meminta masukan nya. Sebagaimana dijelaskan dalam mode operasi, operator memiliki kesempatan untuk mengganggu dengan sistem di sini dan untuk menambah kesan subjektif untuk proses. Tindakan yang harus dilakukan pada setiap tingkat harus didefinisikan dari kasus ke kasus. Itu harus dikoordinasikan dengan prosedur standar dari pemilik jembatan.

Salah satu hal yang diperlukan adalah laporan periodik yang khas untuk suatu struktur yang secara monitoring permanen. Laporan ini satu halaman dikirim melalui email kepada pemilik pada jadwal yang disepakati: mingguan, bulanan, kuartalan atau sekali setahun. Fungsi utamanya adalah untuk menginformasikan pemilik mengenai kinerja struktur selama periode tertentu (terutama jika salah satunya telah melebihi ambang batas) dan untuk memberikan rating struktur yang diperbarui. Elemen-elemen dari laporan ini adalah jendela utama yang berisi semua variabel dipantau dengan batas masing dengan cara yang normal. Hal ini segera terlihat apakah catatan yang melebihi batasan. Selain itu, informasi khusus yang diminta oleh pemilik, seperti catatan angin, harus disediakan. Informasi utama pada laporan ini adalah sistem rating dan umur layan yang diharapkan. ■

Bab 5

Penutup

Perlindungan terhadap jembatan diperlukan untuk mengurangi dampak dari bahaya yang terjadi. Perlindungan pada jembatan dapat berupa perkuatan, retrofit, rehabilitasi atau sistem pemeliharaan yang baik. Untuk mendukung hal tersebut diperlukan data dan informasi yang cukup untuk menentukan tindakan yang tepat. Sistem monitoring kesehatan struktur dapat menyediakan data dan informasi sesuai dengan apa yang diperlukan oleh pengelola. Berdasarkan pentingnya monitoring kesehatan struktur dibagi menjadi lima level yaitu peng-kelas-an, penilaian kondisi, penilaian kinerja, penilaian detail dan peng-kelas-an, dan perkiraan umum layan. Kelima level monitoring kesehatan ini didukung dengan adanya database. Database ini berfungsi mengetahui riwayat jembatan selama beroperasi dan saat konstruksi. Data yang disimpan pada database ini berguna sebagai input data untuk analisis yang lebih kompleks. Maka oleh karena itu manajemen data diperlukan agar data monitoring dapat dimanfaatkan dengan baik. Data monitoring yang dikelola dan dimanfaatkan dengan baik dapat menjadi dasar untuk pengambilan keputusan. ■

Daftar Pustaka

- Adams, Douglas E. 2007. *Health Monitoring of Structural Materials and Components-Methods with Applications*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons.
- Aktan, A.Emin, F. Necati Catbas, Kirk A. Grimmelmsan, Mesut Pervizpour. 2003. *Development of a Model Health Monitoring Guide for Major Bridges* : Drexel Intelligent Infrastructure and Transportation Safety Institute <http://www.di3.drexel.edu/DI3/Events/PaperPresentation/FHWAGuideFull-web.pdf> (diakses tahun 2011).
- Andersen, Jacob E., and Mario Fustinoni. 2006. *Structural Health Monitoring System*. Kongens Lyngby, Denmark: COWI A/S dan Futurtec OY.
- Bergmeister, Konrad. 2002. *Monitoring and Safety Evaluation of Existing Concrete Structures*. State-of-the-Art Report, Stuttgart: The International Federation for Structural Concrete (fib - fédération internationale du béton) http://www.jct-monitor.com/Upfiles/Video/201207_1503209135.pdf (diakses tahun 2012).
- Rücker, W., F. Hille, dan R. Rohrmann. 2006. *F08a: Guideline for Assessment of Existing Structures*. Berlin: SAMCO. http://www.samco.org/network/download_area/ass_guide.pdf (diakses tahun 2011).
- 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.
- You-Lin Xu dan Yong Xia. 2012. *Structural Health Monitoring of Long-Span Suspension Bridges*. Abingdon, Oxon: Spon Press



PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN JALAN DAN JEMBATAN
Badan Penelitian dan Pengembangan
Kementerian Pekerjaan Umum
www.pusjatan.pu.go.id