



SISTEM MONITORING KESEHATAN STRUKTUR- PENILAIAN KONDISI DAN KRITERIA PERALATAN MONITORING

SISTEM MONITORING KESEHATAN STRUKTUR- PENILAIAN KONDISI DAN KRITERIA PERALATAN 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- PENILAIAN KONDISI DAN KRITERIA PERALATAN MONITORING

Septinurriandiani
Desember 2011

Cetakan Ke-1 2011, 76 halaman
© Pemegang Hak Cipta Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan

Cover Luar : Foto dibuat oleh Sakurai Midori diunduh pada situs
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e9/Suramadu_Bridge_1.JPG

No. ISBN : 978-602-8256-36-0
Kode Kegiatan : 11-PPK2-01-105-11
Kode Publikasi : IRE-TR-006/ST/2011

Kata kunci : kriteria sensor, kriteria akusisi data, penilaian kondisi, sistem monitoring kesehatan struktur, jembatan bentang panjang.

Ketua Program Penelitian:

Redrik Irawan, Puslitbang Jalan dan Jembatan

Ketua Sub Tim Teknis:

Redrik Irawan, Puslitbang Jalan dan Jembatan

Naskah ini disusun dengan sumber dana APBN Tahun 2011, pada Paket Kerja Penyusunan Naskah Ilmiah Litbang Teknologi Jembatan Bentang Panjang (Penilaian Kondisi 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 TEKNIK & SUB TIM TEKNIK

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. Poernomosidhi, 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. Widianono, M.Eng.Sc
Ir. Teuku Anshar
Ir. Hendro Mulyono
Ir. Gandhi Harahap, M.Eng.Sc
DR. Ir. Theo. A. Najaoan

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

Sub Tim Teknis

Redrik Irawan, ST., MT.
Prof. (R). Ir. Lanneke Tristanto
DR. Mardiana Oesman
DR. Soemargo
DR. Johannes Adhiyoso
DR. Paulus Kartawijaya
Herbudiman, ST., MT.
DR. Aswandy
DR. Bambang Hari Prabowo
Agus Sulistijawan, S.Si
DR. Transmissia Semiawan
Ir. Koesno Agus
Ir. Wahyudiana
Ir. Rahadi Sukirman
Ir. Roeseno Wirapradja, M.Sc.

Kata Pengantar

Penilaian kondisi diperlukan untuk mengetahui sejauh mana penurunan kondisi struktur akibat adanya perubahan struktur berupa kerusakan struktural yang prosesnya tergantung pada waktu (mis: korosi dan kelelahan (*fatigue*)), akibat pembebanan (mis: peningkatan beban lalu lintas), akibat adanya kecelakaan, dan/atau penambahan umur layan jembatan. Hal tersebut berlaku pada jembatan khususnya jembatan bentang panjang dengan struktur yang kompleks. Selain itu, penilaian kondisi ini dilakukan juga untuk menganalisis keandalan struktur saat ini, misalnya akibat adanya bencana alam seperti gempa dan angin topan. Dua tujuan utama dilakukannya penilaian kondisi struktur eksisting adalah kepastian akan keamanan dan daya layan struktur serta minimalisasi biaya pemeliharaan. Penilaian kondisi ini dapat dipermudah dengan menggunakan sistem monitoring kesehatan struktur (*strucutral health monitoring system*-SHMS).

Dengan menggunakan sistem monitoring kesehatan struktur perlu diperhatikan pemilihan sensor dan akusisi datanya. Komponen sensor dan akusisi data dipilih dari yang tersedia secara komersial dan terbukti, serta pengkondisian sinyal dan sistem akusisi data berdasarkan karakteristik fisik, kelistrikan, dan termodinamikanya. Rincian spesifikasi instalasi harus disiapkan untuk setiap jenis komponen sensor dan akusisi data yang digunakan. Spesifikasi ini harus merinci metode dan teknik yang digunakan untuk memasang dan mengkonfigurasi komponen sensor dan akusisi data, serta metodologi untuk memverifikasi bahwa komponen tersebut bekerja dengan benar.

Hal-hal ini mendorong dilakukannya pengkajian mengenai penilaian kondisi jembatan bentang panjang dan kriteria dari sensor dan akusisi data untuk aplikasi pengujian dan monitoring jembatan. Pengkajian dilakukan dengan membandingkan referensi yang berhubungan dengan hal tersebut dan menghasilkan kesimpulan bahwa : 1) penilaian kondisi sangat bergantung pada metodologi yang dipakai, dimana harus mempertimbangkan metode akusisi data, analisis struktur dan memverifikasi keandalan struktur; 2)

Kriteria pemilihan sensor harus mempertimbangkan karakteristik kinerja sensor (misalnya sensitifitas, resolusi, rentang,dll), batasan lingkungan untuk penempatan sensor (misalnya rentang temperatur dan kelembaban, ukuran, efek termal, dll), serta pertimbangan ekonomi;

3) Kriteria pemilihan akusisi data sangat tergantung pada parameter akusisi data (misalnya jumlah dan tipe sensor), *architecture, signal conditioning, analog-to-digital converter*, kecepatan, resolusi, akurasi dan karakteristik input.

Bandung, Desember 2011

Septinurriandiani
Penyusun

Daftar Isi

Puslitbang Jalan dan Jembatan	iii
Kata Pengantar	v
Daftar Isi	vii
Daftar Gambar	vii
Daftar Tabel	viii
Bab 1 Pendahuluan	11
Sistem Monitoring Kesehatan Struktur	11
Persyaratan Monitoring Jembatan (<i>Bridge Monitoring Requirements</i>)	12
<i>State-of-The-Art</i> Aplikasi SHMS pada Jembatan	16
Sistem Monitoring Kesehatan Struktur Jembatan Suramadu	18
Bab 2 Penilaian Kondisi Jembatan	27
Umum	27
Metodologi	29
Metode Akuisisi Data	32
Metode Analisis Struktur	36
Metode Verifikasi Keandalan	37
Bab 3 Kriteria Peralatan Monitoring SHMS	41
Prosedur Umum Perencanaan untuk Pengaplikasian Sistem Monitoring Kesehatan (<i>Health Monitoring</i>)	41
Sensor	46
Sistem Data Akusisi	56
Bab 4 Penutup	73
Daftar Pustaka	75

Daftar Gambar

<i>Gambar 1</i> Jembatan Suramadu	18
<i>Gambar 2</i> Penampang Memanjang Jembatan Suramadu	18

<i>Gambar 3</i>	Sistem Monitoring Tipikal Jembatan Suramadu (Poltak H.A. Nababan, 2008)	19
<i>Gambar 4</i>	Sensor Anemometer di Jembatan Suramadu	21
<i>Gambar 5</i>	Sensor GPS di Jembatan Suramadu	21
<i>Gambar 6</i>	Sensor elektromagnetik pada kabel Jembatan Suramadu	22
<i>Gambar 7</i>	Sensor accelerometer di Jembatan Suramadu	22
<i>Gambar 8</i>	Sensor displacement di Jembatan Suramadu	23
<i>Gambar 9</i>	Sensor tiltmeter di pylon Jembatan Suramadu	23
<i>Gambar 10</i>	Sensor ATRH di Jembatan Suramadu.....	24
<i>Gambar 11</i>	Sensor fiber optic di Jembatan Suramadu	24
<i>Gambar 12</i>	Sensor WIM di jalan akses masuk Jembatan Suramadu.....	24
<i>Gambar 13</i>	CCTV pada Jembatan Suramadu.....	25
<i>Gambar 14</i>	Bagan tingkat penilaian struktur (SAMCO, 2006).....	31
<i>Gambar 15</i>	Prosedur Umum Perencanaan Sistem Monitoring Kesehatan (FHWA, 2002).....	41
<i>Gambar 16</i>	Penyederhanaan model sensor.....	47
<i>Gambar 17</i>	Gambaran umum alur informasi dalam aplikasi pengukuran (FHWA, 2002)	56
<i>Gambar 18</i>	Aliasing sinyal pada waktu domain (FHWA, 2002).....	64

Daftar Tabel

<i>Tabel 1</i>	State-of-the-art aplikasi SHMS pada jembatan.....	16
<i>Tabel 2</i>	Parameter dan sensor yang digunakan di Jembatan Suramadu.....	20
<i>Tabel 3</i>	Kriteria pemilihan sensor	50



Bab 1

Pendahuluan

Sistem Monitoring Kesehatan Struktur (Andersen 2006)

Kerusakan sistem infrastruktur, dalam hal ini jembatan, umumnya berlangsung pada kecepatan yang 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 tanpa henti agar dapat diambil tindakan yang rasional. Hal inilah yang merupakan tantangan bagi komunitas ahli konstruksi, khususnya jembatan.

Dengan semakin majunya teknologi dalam bidang instrumentasi didukung dengan kemajuan di bidang teknologi informasi dan komunikasi, maka monitoring kesehatan struktur jembatan dapat difasilitasi lebih mudah. SHMS (*Structural Health Monitoring System*) merupakan bidang baru di 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 untuk:

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

Persyaratan Monitoring Jembatan (*Bridge Monitoring Requirements*)

Verifikasi dan Sertifikasi (*Verification and Certification*)

Sistem monitoring struktur memperoleh data respon struktur sepanjang periode pengukuran untuk memverifikasi parameter beban stokastik dan respon struktur yang akan dibandingkan dengan respon yang dihitung (analisis struktur). Beberapa data digunakan untuk melihat kebenaran dari struktur atau untuk memverifikasi kekurangan yang ada. Monitoring dalam jangka waktu yang pendek meliputi pembebanan pada struktur atau memonitor beban yang tidak diharapkan (seperti angin yang

menyebabkan vibrasi), contoh-contoh monitoring:

1. Respon Stokastik

Karakteristik gempa, angin dan beban lalu lintas dan respon struktur dapat diukur di lapangan untuk memverifikasi prediksi yang dibuat pada model numerik pada tahap desain.

2. Beban Internal

Selain pengukuran permanen, pengukuran intensif dapat diulangi berkali-kali menggunakan *mobile sensor* untuk memetakan perubahan dalam distribusi gaya pada *cable-stayed*, tiang fondasi, dll. Distribusi regangan dapat dimonitor pada periode yang panjang untuk mengukur perubahan distribusi tegangan.

3. Respon *Fatigue*/ Kelelahan

Beban *fatigue* pada sambungan las, dek dan balok diukur dengan *strain gauge* atau sistem *accelerometer*.

4. Respon Deterministik

Perpindahan pada buffer hidrolik, *dampers*, siar muai (*expansion joint*) yang tergantung dari temperatur dan distribusi beban pada dek ortotropik dapat dimonitor oleh sensor temperatur dan sensor displacement, tiltmeters dan sistem GPS.

5. *Global Static Response*

Respon statik pada fondasi, rangkai (*creep*) dan penyusutan (*shrinkage*), distribusi regangan pada kabel utama dapat dimonitor oleh sensor khusus. Pengukuran dapat dilakukan untuk mengkalkulasikan seperti temperatur/regangan rata-rata dan perbedaan temperatur/regangan pada jarak yang jauh.

Perencanaan Pemeliharaan (*Maintenance Planning*)

Monitoring struktur juga dilakukan untuk menghitung tingkat degradasi dan pemakaian yang penting untuk mengupdate secara regular informasi pada struktur dan kalkulasi waktu residual. Hal ini dapat digunakan dalam perencanaan inspeksi, pemeliharaan dan kalibrasi model umur jembatan.

1. Degradasi Material

Pengambilan contoh beton dapat memberikan informasi penetrasi klorida pada struktur beton yang mengindikasikan korosi. Model usia layan dapat digunakan untuk memprediksi kapan tingkat klorida mengalami kritis dan waktu yang terbaik untuk melakukan proteksi/pencegahan yang dapat ditentukan bahkan sebelum kerusakan secara visual dapat terjadi.

2. Pemakaian

Akumulasi gerakan dari instalasi mekanik seperti landasan (*bearing*), buffer hidrolik/*damper*, siar muai (*expansion joint*), dan lainnya, dapat diukur dengan sensor seperti *strain gauge*, sensor tekanan, sensor perpindahan atau *accelerometer*.

Syarat Keamanan (*Safety Provision*)

Integritas struktur dari elemen yang kritis merupakan hal yang penting dalam keamanan sistem struktur. Pengawasan yang berkelanjutan dari setiap elemen dapat memberikan informasi atau alarm peringatan untuk mencegah konsekuensi yang akan muncul.

1. Pengoperasian Jalan

Ruas jalan dapat dimonitor dengan metrological sensor (anemometer, *wind wanes* dan alat pengukur hujan (*rain gauge*), dll) untuk penaksiran kebutuhan dan desain hambatan angin samping jembatan, dan untuk memberi peringatan kendaraan yang tinggi dan ringan untuk suatu kondisi angin.

Sistem monitoring lalu lintas yang memadai penting untuk keamanan pengoperasian dan dapat memberikan beberapa input pada analisis struktur. Itu sedikitnya meliputi pemahaman pelaporan video,

identifikasi dan klasifikasi kendaraan. Monitoring lalu lintas seharusnya menjadi bagian dari SHMS.

2. Bencana

Monitoring gempa dan aktivitas tektonik dapat juga dilakukan untuk memberikan informasi untuk penaksiran respon struktur. Situasi bencana potensial lainnya untuk monitoring adalah kecelakaan rel atau jalan yang disebabkan manusia, tabrakan pesawat maupun aksi terorisme. Sistem monitoring harus bertahan dalam kondisi bencana dan keruntuhan parsial sistem seharusnya tidak mencegah SHMS untuk tetap memberi informasi kepada operator.

Pemecahan Masalah (*Trouble Shooting*)

Respon periodik dan terbatas untuk dimengerti dari struktur dan parameter beban seperti angin dapat didokumentasikan melalui pengukuran otomatis.

1. Identifikasi Sumber Getaran

Sumber vibrasi yang menyebabkan masalah atau kerusakan struktur dapat dimonitor. Pengukuran dilakukan untuk mengevaluasi jika kriteria penerimaan terpenuhi dan mengidentifikasi pengukuran untuk mencegah atau meredam vibrasi.

2. Angin Penyebab Vibrasi

Besarnya vibrasi yang disebabkan angin sulit diprediksi selama desain dan kadang-kadang pengukuran mitigasi dibutuhkan karena osilasi/goyangan yang tidak dapat diterima. Sebelum implementasi, perlu untuk membuat dokumen cakupan masalah dan struktur harus dimonitor untuk periode waktu yang cukup panjang dengan *accelerometer* frekuensi rendah yang khusus atau *strain gauge* dan metrological sensor yang dikombinasikan dengan solusi *Digital Video Camera* (DVC) untuk menyediakan data untuk analisis. Pengukuran dapat dilakukan dengan kombinasi dengan *software* simulasi angin, *software* pemodelan jembatan dan hasil uji terowongan angin untuk menentukan fisika lingkungan di balik fenomena angin.

Penggunaan Sistem Monitoring

Sistem monitoring kesehatan struktur modern memberikan dukungan operasional pada operasi dan kontrol jembatan serta manajemen dan pemeliharaan jembatan. Kedua tipe sistem operasi ini pada umumnya akan membutuhkan staff yang berbeda dan akan dioperasikan pada metode dan level yang berbeda. Ketika kontrol operasi jembatan pada infrastruktur dilakukan pada waktu 24 jam sehari dan mengharuskan pengawasan yang terus-

menerus, manajemen dan pemeliharaan yang diberikan oleh SHMS akan menjadi alat manajemen jembatan untuk perencanaan inspeksi, biaya pemeliharaan, dan prediksi kerusakan struktur.

Operasi dan Kontrol (*Operation and Control*)

Untuk keamanan, operasi dan kontrol setiap saat akan dimonitor oleh sistem dan besarnya melalui properti SHMS. Sumber kejadian dan lokasinya pada struktur akan dilaporkan kepada operator, dicatat pada database kejadian SHMS, dikonfirmasi oleh operator. Operator akan mengambil tindakan dengan melalui koordinasi dengan manajemen jalan/*highway/railway*. Semua informasi dikumpulkan dalam suatu event seperti lokasi, magnitude / besarnya, tanggal dan waktu dan evolusi mereka akan direkam.

Pemeliharaan dan Manajemen (*Maintenance & Management*)

Sistem kelas jembatan direncanakan untuk inspeksi dan konsep pemeliharaan dalam proposal manual pemeliharaan untuk struktur. Sistem ini akan menjadi inti dari *Structural Health Evaluation System* (SHES).

Sistem kelas jembatan akan memberikan basis rasional untuk prioritas, perencanaan dan evaluasi biaya untuk inspeksi

dan pemeliharaan pada komponen struktur primer dan sekunder. Kategori komponen struktur primer dan sekunder ini berhubungan dengan model analisis kapasitas beban. Konsep utama mengharuskan bahwa komponen sekunder mungkin tidak berfungsi atau keruntuhan keseluruhan struktur.

Sistem kelas akan didesain untuk menjamin bahwa tindakan yang dibutuhkan diambil untuk menjaga keamanan struktur dan pada kondisi yang baik. Beberapa tindakan meliputi perbaikan struktur dan kekuatan dan pencegahan.

Kesalahan Desain yang Umum (*Common Design Mistakes*)

Ada kemungkinan kesalahan saat melakukan SHMS, seperti:

- Menyalin ruang lingkup monitoring dan strategi pelaksanaan dari jembatan yang sama tanpa melihat perbedaan dan faktor khusus
- Mensubstitusi pengetahuan dan pengalaman dengan uang
- Membuat pilihan yang tidak berkelanjutan bagi teknologi dan sumber daya yang diharuskan
- Mengabaikan kepentingan jasa profesional dalam konfigurasi, penugasan, pengoperasian dan pemeliharaan SHMS

State-of-The-Art Aplikasi SHMS pada Jembatan

Tabel 1 State-of-the-art aplikasi SHMS pada jembatan

No	Nama Jembatan	Negara	Tipe Struktur	Tahun dibuat	Tahun dimulai SHMS	Tujuan SHMS	Jumlah Sensor	Keterangan Lainnya
1	Humber Bridge	Inggris	Suspension (bentang utama 1410 m, panjang total 2220 m), pylon beton bertulang, gelagar boks baja	dibuka 1981	1985-1992	penelitian terhadap performa jembatan suspensi bentang panjang terhadap beban dinamik, disimulasikan respon akibat beban angin.	58 sensor	memprediksi respon messina bridge untuk iklim local, desain struktur jembatan dan parameter aerodinamik
2	Farø bridge	Denmark	Cable stayed (bentang utama 290 m, panjang total 3322 m), pylon beton bertulang, gelagar boks baja	1985	1985	data penunjang program pemeliharaan jembatan, verifikasi perhitungan desain untuk <i>fatigue</i> .	32 Sensor, terdiri dr anemometer, wind vanes, sesor temperatur, sel korosi dan <i>strain gauge</i>	
3	Sunshine skyway bridge	USA	Cable stayed (bentang utama 380 m, panjang total 7000 m), pylon beton bertulang, gelagar beton	1986	1987, diupgrade 2003	verifikasi asumsi desain.	534 Sensor, terdiri dari 228 <i>strain gauge</i> dan 306 sensor temperatur. Tahun 2003 dipasang GPS	
4	Skarnsundet bridge	Norwegia	Cable stayed (bentang utama 580 m, panjang total 1010 m), pylon beton bertulang, gelagar beton	1990	1991-1993	Studi verifikasi desain	± 50 Sensor	program monitoring berlangsung selama 2 tahun dan instrumentasi berfungsi dengan baik. Alat dibongkar dan dipindahkan ke proyek lain pada taraf awal monitoring.
5	Confederation bridge	Kanada	Long span girder (43 bentang panjang @ 250 m, 2 bentang panjang @ 165 m, panjang total 12,9 km), segmental beton precast disassembling menggunakan post-tensioned tendon.	1995, dibuka 1997	1997, Juni	memperoleh informasi mengenai kondisi jembatan terhadap beban dinamik, es, deformasi jangka pendek dan panjang, efek termal dan korosi	113 Sensor, terdiri dari thermocouple, <i>strain gauge</i> , tiltmeter, <i>accelerometer</i> , sistem monitoring korosi	structural health assessment dilakukan berdasarkan frekuensi natural dari vibrasi jembatan.

No	Nama Jembatan	Negara	Tipe Struktur	Tahun dibuat	Tahun dimulai SHMS	Tujuan SHMS	Jumlah Sensor	Keterangan Lainnya
6	Tsing-Ma Bridge	Hongkong	Suspension (bentang utama 1377 m, panjang total 2032 m), pylon beton bertulang, gelagar boks baja tertutup	1997	1997, Juni	Sistem peringatan dini bagi jembatan, mengevaluasi parameter desain dan asumsi, validasi dan update model struktur (identifikasi terhadap kerusakan), pemeliharaan dan rencana rehabilitasi.	350 Sensor, terdiri dari accelerometer , strain gauge , displacement transducers, anemometer, sensor temperatur, sensor dinamik dan GPS	
7	Soe Hae Bridge	Korea	Cable stayed (bentang utama 480 m, panjang total 7400 m), pylon beton bertulang, gelagar komposit baja beton	2000	2000	memonitor respon struktur dan mengevaluasi performa jembatan, memberikan informasi untuk operasi BMS	120 Sensor	
8	Neva Bridge	Rusia	Cable stayed (bentang utama 382 m, panjang total 730 m), pylon baja, deck baja	2004	2003	studi perkiraan resiko dari setiap tahapan konstruksi hingga umur layan dari fasilitas, sistem pemeliharaan, verifikasi desain.	56 Sensor	SHMS merupakan bagian proyek dari awal konstruksi hingga fase pengoperasian, sistem dibuat sesederhana mungkin
9	Naini Bridge	India	Cable stayed (bentang utama 260 m, panjang total 1510 m), pylon beton bertulang, gelagar beton.	2005	2005	verifikasi desain, keamanan penggunaan, perencanaan pemeliharaan dan pemecahan masalah (trouble shooting)	534 Sensor	Shms telah digunakan pada fase konstruksi untuk monitoring geometri dan pengukuran kekuatan kabel.
10	Stonecutters Bridge	Hongkong	Cable stayed bridge (bentang utama 1018 m), pylon komposit, gelagar boks baja	2008	2009	perencanaan pemeliharaan, memperkirakan performa jembatan di masa depan, mengestimasi beban jembatan di masa yang akan datang.	1420 Sensor, terdiri dari anemometer, accelerometer & seismometer, sensor temperatur, GPS rover station, displacement transducer, barometer, strain gauge , hygrometer, sensor korosi, digital video camera, WIM	
11	Suramadu	Indonesia	Cable stayed bridge (bentang utama 434 m) panjang total 5438 m	2004	2009	Verifikasi desain, pemeliharaan struktur (penurunan kondisi struktur dapat dimonitor), dan pengelolaan lalu lintas	452 sensor	

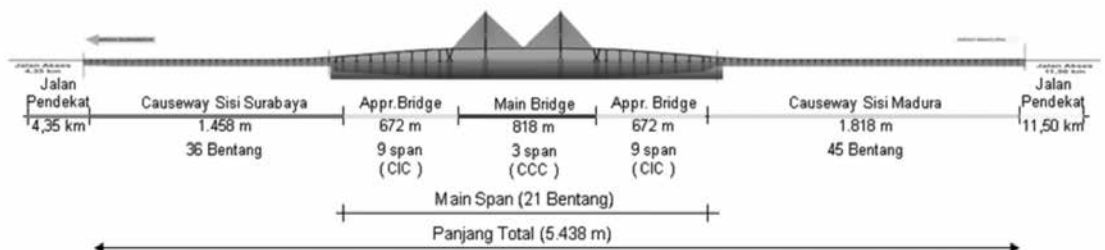


Gambar 1 Jembatan Suramadu

Sistem Monitoring Kesehatan Struktur Jembatan Suramadu

Jembatan Suramadu (*Gambar 1*) merupakan jembatan yang menghubungkan Pulau Jawa bagian timur dan Pulau Madura. Jembatan ini mulai dibangun pada tahun 2004 dan diresmikan pada tahun 2009. Jembatan Suramadu terdiri atas *Causeway* (sisi Surabaya dan Madura), *Approach Bridge* (sisi Surabaya dan Madura) dan *Main Bridge* (*cable stayed*), penampang memanjang Jembatan Suramadu dapat dilihat pada *Gambar 2*.

Dari *Gambar 2* dapat dilihat panjang total Jembatan Suramadu adalah 5438 m dengan lebar jembatan sebesar 30 m. Tipe bangunan atas *Causeway bridge* berupa gelagar beton *prestress* tipe I dan tipe bangunan bawah berupa tiang pancang baja. Sedangkan bangunan atas *Approach bridge* menggunakan tipe gelagar boks beton dan bangunan bawah menggunakan tipe tiang bor. Untuk *Main bridge* menggunakan sistem *cable stayed* dengan bangunan atas berupa gelagar boks baja dan bangunan bawah berupa tiang bor. Pylon atau menara terbuat dari beton dengan tinggi 146 m.



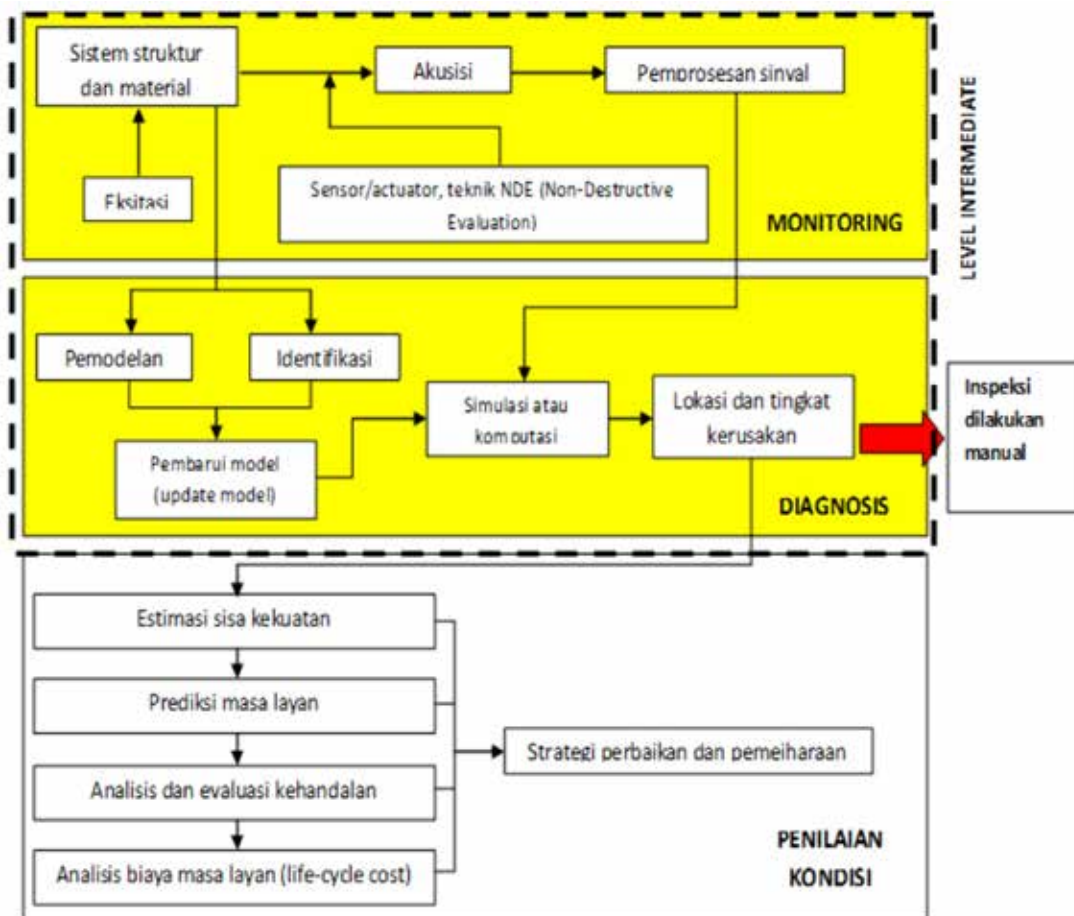
Gambar 2 Penampang Memanjang Jembatan Suramadu

Sistem monitoring kesehatan struktur ini diterapkan di *main bridge* dan sebagian *approach bridge*. Hal ini dikarenakan sistem struktur pada *main bridge* lebih kompleks dan lebih terpengaruh terhadap beban dinamik dan beban lingkungan. Sedangkan *causeway bridge* dan sebagian *approach bridge* pemeriksaan struktur dilakukan dengan inspeksi manual secara berkala.

Monitoring dilakukan dengan bantuan sistem, namun inspeksi dilaku-

kan secara manual. *Gambar 3* menunjukkan sistem monitoring tipikal Jembatan Suramadu. Dari *Gambar 3* dapat dilihat pada diagnosis dilakukan pemodelan struktur yang selalu diupdate dengan data dari sistem maupun inspeksi. Hal ini dilakukan sebagai dasar penilaian kondisi yang bertujuan untuk sistem pemeliharaan jembatan.

Komponen dari sistem monitoring kesehatan struktur ini adalah sensor, akuisisi data dan sistem transmisi, processing data dan sistem kontrol, serta sistem evaluasi.



Gambar 3 Sistem Monitoring Tipikal Jembatan Suramadu (Poltak H.A. Nababan, 2008)

Tabel 2 Parameter dan sensor yang digunakan di Jembatan Suramadu

Parameter			Tipe Sensor
Pengaruh Beban	Beban angin		Anemometer
	Temperatur struktur	Temperature komponen baja	Sensor temperature baja
		Temperature komponen beton	Sensor temperature beton
		Air Temperature and Relative humidity	Air Temperature and Relative Humidity Sensor
	Beban kendaraan (lalu lintas)		Weight-in-Motion System
			Digital Video Camera
Karakteristik Sistem dan Respon Struktur Jembatan	Global displacement		Global Position System
	Kemiringan pylon		Tiltmeter
	Displacement		Displacement Transducer
	Vibration (Getaran)		Accelerometer
	Seismic		Seismic Accelerometer
	Strain	Strain of Steel Component	Steel Strain Gauge
		Strain of Concrete Component	Steel Strain Gauge
		Multi-Axes Strain	Strain Rossetes Gauges
	Cable Force		Electro-Magnetic Sensor

Tabel 2 menunjukkan parameter ukur dan sensor yang digunakan di Jembatan Suramadu.

Data akusisi dan sistem transmisi berfungsi untuk mengakusisi, mengkondisikan, menampilkan dan mentransmisikan sinyal yang diterima dari sensor yang dipasang. Prosesing data dan sistem kontrol, terdiri atas server komputer yang berfungsi untuk melakukan ekstraksi data, mengirimkan hasil prosesing, menyimpan,

memback-up, dan menampilkan. Kapasitas penyimpanan data yang ada di Suramadu adalah 300TB dan dapat ditingkatkan sesuai kebutuhan.

Pada sistem evaluasi perilaku struktur jembatan dievaluasi serta diidentifikasi keberadaan serta potensi kerusakan secara *real-time* dan *on line*. Analisis dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan hasil pengukuran di lapangan.

Sensor, alat yang mengubah energi dari bentuk yang satu ke bentuk yang lainnya. Energi yang menjadi input kepada sensor mewakili fenomena fisik dari material yang diamati. Berikut adalah sensor yang digunakan di Jembatan Suramadu.

1. Anemometer, Satu unit bi-axial anemometer dipasang di pylon dan dua unit tri-axial anemometer dipasang di dek tengah bentang jembatan.



Gambar 4

Sensor Anemometer di Jembatan Suramadu

(a) Anemometer pada dek tengah bentang jembatan

(b) Anemometer pada pylon

2. GPS (*Global Positioning System*), GPS *Rover* dipasang di jembatan sebanyak 10 buah, GPS *Reference* dipasang di luar jembatan sebanyak 2 buah (di halaman kantor proyek di sisi Surabaya dan kantor monitoring room di sisi Madura).



(a)



(b)

Gambar 5

Sensor GPS di Jembatan Suramadu

(a) GPS Rover

(b) GPS Reference (base station)

3. *Electro Magnetic Sensor (EM)*, sebanyak 24 buah (12 buah untuk setiap sisi jembatan).
4. *Accelerometer*, *single axial accelerometer* (4 buah dipasang di deck jembatan), *bi-axial accelerometer* (12 buah dipasang di dek jembatan dan pylon), *tri-axial accelerometer* (1 buah dipasang di dek jembatan), dan *seismic accelerometer* (1 buah dipasang didasar tower/pylon).



Gambar 6

Sensor elektromagnetik pada kabel Jembatan Suramadu



Gambar 7

Sensor accelerometer di Jembatan Suramadu

5. *Displacement transducer*, 4 buah dipasang di girder pada pertemuan mainspan dan approach span, 4 buah dipasang pada pertemuan pylon dan gelagar.
6. Tiltmeter, 12 buah bi-axial tiltmeter dipasang di pylon.



Gambar 8

Sensor displacement di Jembatan Suramadu



Gambar 9

Sensor tiltmeter di pylon Jembatan Suramadu

7. ATRH (*Air Temperature and Relative Humidity*)/sensor suhu dan kelembaban), 2 buah dipasang di pylon dan 2 buah dipasang di gelagar.



Gambar 10 Sensor ATRH di Jembatan Suramadu



Gambar 11 Sensor fiber optic di Jembatan Suramadu

8. Fiber optic sensor.
 - a. Sensor temperatur, diukur bagian beton (*structure concrete temperature (CT) sensor*) dan steel box girder (*structural steel temperature (ST) sensor*).
 - b. Sensor *strain gauge*, *strain gauge* (dipasang di gelagar boks baja), *strain rosette gauge* (dipasang di

dek jembatan), dan *compensated strain gauge* (dipasang di pylon dan *approach bridge*)



Gambar 12 Sensor WIM di jalan akses masuk Jembatan Suramadu

9. *Weight in motion (WIM)*, dipasang di jalan akses masuk dari arah Madura dan Surabaya.

10. CCTV (*Closed-circuit television*), 4 buah dipasang di pylon, 4 buah dipasang di deck jembatan, dan 2 buah dipasang di dekat WIM sensor. ■



Gambar 13 CCTV pada Jembatan Suramadu

Bab 2

Penilaian Kondisi Jembatan

(Wenzel 2009, Rücker 2006)

Umum

Structural Health Monitoring (SHM) merupakan implementasi dari pengidentifikasian kerusakan struktur. Dimana kerusakan didefinisikan sebagai perubahan material dan/atau geometri dari sistem struktur, termasuk perubahan kondisi perletakan dan sistem sambungan. Kerusakan ini berpengaruh pada kinerja sistem baik saat ini atau masa yang akan datang.

Seiring dengan pertambahan usia suatu struktur, terjadi penurunan kinerja struktur tersebut. Akibatnya diperlukan penilaian kondisi untuk mengetahui sejauh mana penurunan itu terjadi. Hal tersebut berlaku pada jembatan khususnya jembatan bentang panjang dengan struktur yang kompleks. Penilaian kondisi ini dimulai ketika adanya perubahan struktur. Perubahan ini dapat berupa kerusakan struktural yang prosesnya tergantung pada waktu (mis: korosi dan kelelahan (*fatigue*)), akibat pembebanan (mis: peningkatan beban lalu lintas), akibat adanya kecelakaan, dan/atau penambahan umur layan jembatan. Selain itu,

penilaian kondisi ini dilakukan juga untuk menganalisis keandalan struktur saat ini, misalnya akibat adanya bencana alam seperti gempa dan angin topan.

Secara umum penilaian kondisi struktur ini merupakan proses untuk menentukan keandalan struktur dalam menahan beban baik untuk saat ini maupun masa yang akan datang. Hal yang perlu diperhatikan adalah mengidentifikasi keadaan batas struktur dimana hal ini terkait dengan variabel struktur yang diselidiki dan prosedur penilaian yang diterapkan. Dua tujuan utama dilakukannya penilaian kondisi struktur eksisting adalah kepastian akan keamanan dan daya layan struktur serta minimalisasi biaya pemeliharaan.

Keamanan dan Daya layan Struktur

Tujuan utama dari penilaian struktur ini adalah memastikan bahwa struktur tidak mengalami kegagalan pada saat diberi beban. Penilaian ini dilakukan terhadap keadaan batas ultimit dan layannya. Dimana penilaian dalam keadaan batas ultimit (*Ultimate Limit State*-ULS) menyatakan hilangnya keseimbangan struktur, pencapaian daya tahan maksimum (*resistance capacity*) struktur, transformasi struktur, ketidakstabilan struktur, dan adanya perubahan sistem struktur yang diasumsikan ke sistem baru. Penilaian

terhadap keadaan batas layan (*Serviceability Limit State*-SLS) mencakup kerusakan lokal yang dapat mengurangi masa kerja struktur, deformasi yang tidak dapat diterima yang mempengaruhi kinerja struktur, dan getaran yang berlebihan yang menyebabkan ketidaknyamanan terhadap pengguna.

Beberapa alasan diperlukannya evaluasi keamanan dan daya layan struktur adalah adanya peningkatan beban, pengaruh kerusakan terhadap struktur, kerusakan akibat beban ekstrim, serta berhubungan dengan adanya kesalahan baik desain maupun konstruksi dan kualitas bahan maupun pengerjaannya. Setiap struktur mengalami beberapa tingkat kerusakan. Kerusakan tersebut dapat berpengaruh terhadap struktur maupun lokasi tertentu. Hal yang berhubungan dengan kekuatan struktural, korosi dan kelelahan (*fatigue*) merupakan proses kerusakan yang utama. Sedangkan kondisi *spalling*, retak, dan permukaan terdegradasi merupakan indikasi kerusakan yang khas (tipikal). Adanya bencana alam seperti gempa bumi dan angin badai, mengakibatkan kerusakan struktural dan perlu dianalisis kapasitas sisa dari struktur tersebut.

Minimalisasi Biaya

Dalam dekade terakhir, pengembangan sistem pengelolaan struktur tunggal seperti jembatan adalah meminimalkan

biaya keseluruhan dengan mengoptimalkan inspeksi, pemeliharaan, dan perbaikan struktur. Hal utama dalam proses pengambilan keputusan adalah melakukan penilaian kondisi struktur untuk menentukan kondisi eksisting dan untuk mengasumsikan kinerja struktur di masa depan.

Dalam manajemen struktur, penilaian ini bertujuan menginformasikan tentang keadaan struktur untuk optimasi waktu dan jangkauan inspeksi, pemeliharaan dan pekerjaan perbaikan (pengaruh pekerjaan maksimum dengan biaya minimum) dan untuk memutamakan pemeliharaan dan perbaikan struktur. selanjutnya perlu diminimalkan kerugian ekonomi akibat adanya ketidaksesuaian pengerjaan struktur tersebut.

Hasil penilaian harus tersedia dalam bentuk formulir dan dapat digunakan dalam manajemen struktur. maksudnya bahwa nilai input, metode perhitungan dan hasilnya harus diarsipkan sebagai referensi dan peninjauan ulang di masa depan. Selain itu penilaian rutin yang diterapkan harus terpadu untuk mendapatkan hasil yang dapat dibandingkan dan untuk menentukan inspeksi, pemeliharaan, dan perbaikan struktur yang sesuai.

Metodologi

Penilaian struktur eksisting dapat

dilakukan dengan metode yang bervariasi kecanggihannya dan usahanya. Tujuan utama, seperti dijelaskan di atas, adalah untuk menganalisis kapasitas struktur saat ini dan memprediksi kinerja struktur di masa depan dengan keakurasian yang maksimum dan usaha yang minimum. Perlu dihindari metode yang terlalu konservatif atau batasan yang terlalu longgar. Kebanyakan kasus diawali dengan metode yang konservatif dan sederhana lalu metode yang lebih rumit digunakan ketika mengevaluasi kapasitas struktur yang bermasalah.

Jika pada hasil penilaian diperoleh bahwa kapasitas struktur tidak dapat diterima, maka *engineer* dapat membuat rekomendasi teknis, tetapi pihak pengelola lah yang akhirnya bertanggung jawab atas keselamatan publik dan harus menentukan keputusan akhir.

Klasifikasi

Secara umum prosedur penilaian dapat diklasifikasikan menjadi tiga kelompok: pengukuran berdasarkan penilaian, pemodelan berdasarkan penilaian dan penilaian non-formal.

Pengukuran berdasarkan penilaian kelayakan (*measurement based serviceability assessment*):

Pada kategori ini merupakan penilaian rutin (*assessment routines*) di mana

pengaruh akibat beban tidak ditentukan dari analisis struktur tetapi langsung dari pengukuran. Karena pengukuran layan (*serviceability measures*) yang dapat ditentukan secara langsung, metode ini hanya mampu memverifikasi struktur dalam keadaan batas layan (SLS). Terdapat dua komponen prosedur dalam hal ini yaitu:

1. Pengukuran akibat beban
2. Verifikasi layan (*serviceability verification*)

Pengukuran yang berdasarkan pada penilaian rutin umumnya tidak rumit. Contoh penerapannya adalah evaluasi dari pengukuran layan seperti pengukuran *displacement* atau perilaku dinamika struktur.

Model berdasarkan penilaian keamanan dan kelayakan (*model based safety and serviceability assessment*):

Pada kategori ini merupakan penilaian rutin di mana pengaruh akibat beban ditentukan dengan model analisis struktur. Pemodelan dan penilaian menggunakan metode dalam keadaan batas ultimit (ULS) dan keadaan batas layan (SLS). Terdapat tiga komponen prosedur dalam hal ini yaitu:

1. Akuisisi data pembebanan (*loading*) dan resistensi
2. Perhitungan akibat beban pada model struktur
3. Verifikasi keamanan dan kelayakan

Kebanyakan penerapan penilaian ini diproses berdasarkan model struktur, kecuali pengukuran yang berdasarkan penilaian layan.

Penilaian non-formal (*non-formal assessment*):

Kategori ini dimaksudkan pada penilaian rutin yang berdasarkan pengalaman dan pertimbangan/anggapan dari *engineer*-nya. Kebanyakan penilaian non-formal terjadi di dalam manajemen struktur, di mana kondisi struktural dievaluasi atas dasar inspeksi visual.

Tingkat Penilaian

Seperti disebutkan sebelumnya, prosedur penilaian bervariasi kecanggihannya. Direkomendasikan untuk memulai penilaian dengan metode tingkat rendah yang sederhana tetapi konservatif dan jika penilaian gagal, lanjutkan dengan metode tingkat atas yang lebih kompleks. Ada beberapa kasus yang menyarankan menggabungkan antara metode yang kompleksitasnya rendah dan tinggi. Misalnya ketika langkah pertama penilaian tingkat rendah gagal dan pada langkah selanjutnya parameter resistensi dan beban pada struktur tertentu diperoleh lebih baik dengan metode penyelidikan seperti pengujian tidak merusak (*Non-Destructive Testing*-NDT), analisis struktur dan verifikasi dapat dilakukan

dengan metode sederhana yang sama seperti pada langkah pertama dan hasil penilaian bisa mencukupi.

Pengusulan tingkat penilaian dibentuk untuk penataan proses penilaian dengan batasan yang fleksibel. Tingkat penilaian yang diusulkan ditunjukkan oleh **Gambar 14**. Terdapat 6 (enam) tingkat penilaian, seperti dijelaskan berikut.

Tingkat 0: Penilaian kualitatif non-formal (non-formal qualitative assessment):

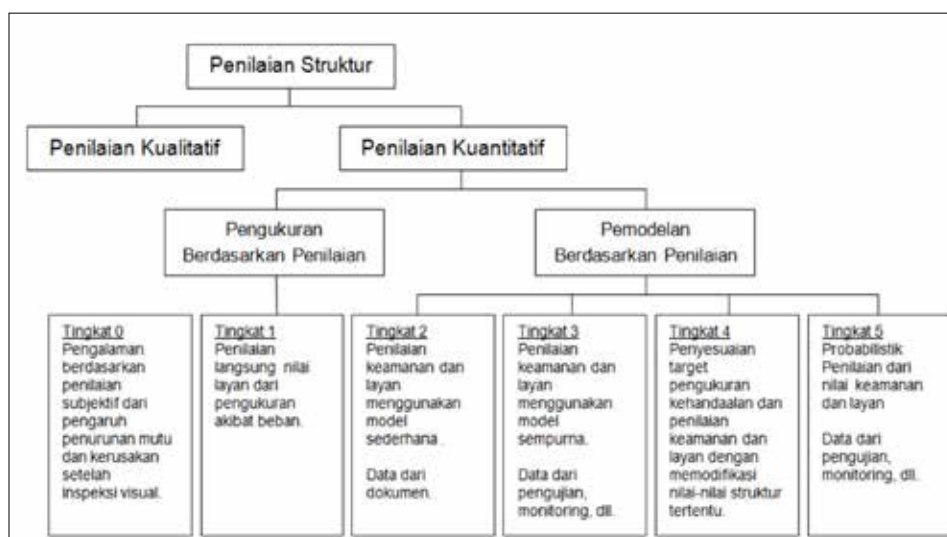
Pada tingkat ini penilaian berdasarkan pengalaman *engineer* yang sebagian besar digunakan untuk pra-evaluasi struktur. Salah satunya adalah mengevaluasi dampak kerusakan visual seperti korosi baja atau tanda-tanda kerusakan visual (retak, *spalling*, dll).

Tingkat 1: Pengukuran berdasarkan penentuan pengaruh beban (measurement based determination of load effect):

Di tingkat ini penilaian daya layan dengan pengukuran nilai kinerja dan perbandingan dengan nilai-nilai ambang batas. Analisis struktur tidak dilakukan. Ambang batas nilai dapat ditentukan dalam kode atau tertentu.

Tingkat 2: metode faktor parsial, berdasarkan peninjauan dokumen (partial factor method, based on document review):

Penilaian kapasitas struktur dan layan menggunakan data perencanaan, konstruksi dan inspeksi. Analisis struktur umumnya dilakukan dengan menggunakan metode sederhana. Verifikasi keamanan dan kelayakan berdasarkan faktor parsial.



Gambar 14 Bagan tingkat penilaian struktur (SAMCO, 2006)

Tingkat 3: metode faktor parsial, berdasarkan penyelidikan tambahan (*partial factor method, based on supplementary investigation*):

Penilaian kapasitas struktur dan daya layan menggunakan data dari detail penyelidikan tidak merusak (*non-destructive inspection*) pada lokasi tertentu. Analisis struktur dilakukan dengan metode yang sempurna dan model yang detail. Verifikasi keamanan dan kalayan berdasarkan faktor parsial.

Tingkat 4: Keandalan modifikasi target, modifikasi faktor parsial (*modified target reliability, modificaionof partial factors*):

Verifikasi kapasitas struktur dengan modifikasi faktor keamanan parsial pada lokasi tertentu. Sifat struktural serta kondisi eksternal dapat mempengaruhi keamanan pengukuran. Sebenarnya memodifikasi faktor parsial dilakukan untuk kelompok struktur dengan perilaku struktur atau pengaruh beban yang sama.

Tingkat 5: Penilaian probabilistik lengkap (*full probabilistic assessment*):

Pada tingkat ini penilaian memper-timbangkan semua variabel dasar dengan sifat statistiknya. Analisis keandalan struktur digunakan secara langsung dan bukan faktor parsial. Ketidakpastian dimodelkan secara probalistik.

Metode Akuisisi Data

Untuk menentukan efek dari beban, kebanyakan kasus penilaian diperlukan pengumpulan informasi mengenai sifat material dan struktural serta dimensi dan juga data pembebanan struktur baik sebelumnya, saat ini dan/atau masa depan. Kondisi lingkungan baik sifat fisik, kimiawi atau biologis dapat memiliki efek pada sifat material. Perbedaan utama antara desain dan penilaian adalah, bahwa ketidakpastian dapat dikurangi secara signifikan dengan data lokasi tertentu pada struktur eksisting.

Ada berbagai metode dengan berbagai biaya dan akurasi. Pilihan metode akuisisi data sangat tergantung pada tujuan penilaian dan pada prosedur penilaian. Biasanya metode sederhana seperti studi tentang dokumen-dokumen dilakukan di awal. Untuk mengurangi ketidakpastian dalam penilaian pada tingkat yang lebih tinggi perlu diterapkan metode uji yang lebih canggih. Metode tidak merusak (*non-destructive*) adalah lebih baik daripada metode yang merusak (*destructive*).

Selain ketersediaan data yang menggambarkan keadaan struktur saat ini, perlu diperoleh juga informasi yang tergantung pada waktu proses seperti penurunan mutu struktur (*deterioration*). Hal ini dapat berlangsung dengan pengukuran periodik atau permanen (yaitu, monitoring kesehatan struktur – SHM). Hasil akuisisi data

seharusnya dalam bentuk yang sama, untuk dapat membandingkan data dari metode yang berbeda dan untuk dapat menggunakan data dalam penilaian di masa depan.

Studi dokumen

Peninjauan dokumen dari proses perencanaan/desain dan konstruksi serta laporan inspeksi dan pemeliharaan secara umum merupakan cara termudah pengumpulan data struktur untuk dinilai. Harus diyakinkan bahwa dokumen yang ditinjau tersebut tepat. Beban biasanya ditentukan dari standar pembebanan saat ini dan kondisi lingkungan dapat diperoleh dari laporan inspeksi.

Sifat resistensi seperti sifat material dan struktural serta dimensi dapat diperoleh dari kode, gambar dan spesifikasi desain lainnya (misalnya: perhitungan statis, laporan kondisi lapisan tanah), dari dokumen-dokumen konstruksi/pelaksanaan (misalnya: dokumentasi pengiriman material) dan dari laporan inspeksi dan pemeliharaan awal.

Inspeksi dan pengujian bahan

Untuk mengurangi ketidakpastian tentang beban dan resistensi struktur, data pada lokasi tertentu harus digunakan dalam proses penilaian. Metode yang sangat efektif adalah inspeksi dan pengujian material pada lokasi tersebut. Pada inspeksi tersebut teknisi

harus memahami parameter beban dan resistensi dari penyelidikan di tempat. Ada berbagai macam metode, dimulai dengan inspeksi visual sederhana dan berakhir dengan beberapa teknik tidak merusak yang canggih (*high-end non-destructif techniques*).

Inspeksi diutamakan untuk mendeteksi dan menginvestigasi proses penurunan mutu struktur seperti korosi dan kelelahan dan untuk mendeteksi perubahan dalam sistem struktural. Oleh karena itu perlu untuk melakukan inspeksi berulang-ulang. Uji materi yang dilakukan adalah untuk menentukan parameter kekuatan material yang digunakan. Pengujiannya dapat merusak (*destructive*) dan tidak merusak (*non-destructive*). Serta dapat dilakukan di lapangan atau di laboratorium. Parameter yang perlu diselidiki dan metode penyelidikan yang sesuai adalah:

- ❖ Perubahan/kerusakan penampang dan geometri longitudinal/memanjang akibat kelebihan beban (misalnya retak, pecah) dan dari proses penurunan mutu struktur (misalnya korosi, *spalling*, retak lelah). Metode penyelidikannya dapat menggunakan laser, peralatan ultrasonik, *slide gauges*, *electronic gauges*, dll;
- ❖ Keutuhan struktural (misalnya untuk kerusakan tersembunyi atau ketidakhomogenan) dapat menggunakan pengujian *impact echo*;

- ❖ Kekuatan material menggunakan pengujian tekan dan tarik pada sampel, metode *sclerometer*, pengujian *pull-out*, pengujian *pull-off*, dll;
- ❖ Parameter, yang mempengaruhi beban mati dan beban mati tambahan (misalnya kepadatan material, peralatan permanen)
- ❖ Keawetan yang mempengaruhi parameter struktur (misalnya kondisi lingkungan, karbonasi dan kandungan klorida pada beton) dengan menggunakan *pH-test*, pengujian *phenolphthalein*, analisis kuantitatif klorida pada sampel, dll;
- ❖ Masalah kelayanan (misalnya lebar retak, permukaan kondisi jalan)

Kinerja pengujian dan monitoring

Dalam beberapa kasus jika perilaku struktur tidak dapat cukup dipahami atau akusisi data tidak membawa hasil yang diharapkan, maka kinerja struktur harus diuji. Itu berarti, bahwa perilaku statis dan/atau dinamis struktur diukur baik secara berkala maupun permanen untuk mendapatkan data mengenai sifat struktural yang diperlukan.

Hal ini penting untuk diketahui, bahwa data pengukuran tidak selalu menampilkan realitas. Jadi ada perlu ketelitian dan kehati-hatian dalam menginstal sensor pada saat pengukuran dan selama interpretasi data. Bila mungkin, data pengukuran harus berlebihan.

Monitoring kesehatan struktur

Monitoring jangka panjang dari struktur atau elemen struktur merupakan sarana umum saat ini untuk pengamatan permanen dari keutuhan struktur. Dalam monitoring kesehatan struktur harus dipahami mengenai variasi waktu pengukuran dari pengukuran permanen atau berkala seperti *displacement*, *strain* dan *stress*, evaluasi kerusakan (misalnya lebar retak) serta karakteristik getaran yang bertujuan untuk mendeteksi perubahan sifat struktural dan untuk memberi peringatan ketika mencapai atau melampaui keadaan batas.

Monitoring kesehatan struktur juga dapat diterapkan untuk struktur baru (yaitu *life time* monitoring kesehatan struktur). Keuntungannya adalah sifat struktural pada keadaan utuh dapat diketahui dan data masa depan akan menunjukkan perubahan sifat secara langsung yang dapat memprediksi kinerja struktur yang memungkinkan di masa depan.

Sistem identifikasi oleh pengukuran statis dan dinamis

Jika dimensi dan sifat material dari struktur eksisting tidak dapat diperoleh dari pengukuran dan pengujian (misalnya tidak dapat diakses, kerusakan yang tersembunyi) sifat struktur seperti kekakuan komponen struktural dan joint, fleksibilitas sendi atau kondisi perletakan ini diperoleh dengan identifikasi sistem. Hal ini merupakan alat

yang efisien untuk mendeteksi kerusakan dan monitoring evaluasi kerusakan.

Dengan prosedur ini karakteristik statis seperti *displacement* (misalnya, defleksi, inklinasi) dengan beban yang ditetapkan sama seperti karakteristik dinamis seperti frekuensi alami dan ragam getar yang diukur pada struktur eksisting. Dengan cara ini model sistem struktur kemudian disempurnakan, sehingga model mencerminkan karakteristik perilaku yang sama seperti struktur eksistingnya.

Ketika sistem identifikasi diterapkan secara berkala atau bahkan permanen, perbedaan waktu dari sifat struktur akibat proses penurunan kondisi struktur atau kerusakan lain yang menyebabkan suatu kejadian dapat diidentifikasi dan dipantau. Model struktur akan diperbarui sesuai dengan pengukuran baru yang diperoleh.

Perlu disebutkan, bahwa kondisi lingkungan, terutama suhu, memiliki pengaruh besar pada pengukuran statis dan dinamis. Hal ini harus dipertimbangkan pada saat mengevaluasi karakteristik struktur.

Uji pembuktian pembebanan

Penerapan beban terukur pada struktur untuk memverifikasi kapasitas struktur terhadap beban adalah sarana yang baik untuk menilai struktur eksisting.

Ada berbagai jenis uji pembuktian beban ini tergantung pada keadaan batas

yang diselidiki. Efek dari keadaan batas layan dapat diukur setelah penerapan pembuktian pembebanan dan tindakan lainnya akan ada verifikasi jika nilainya melebihi keadaan batas atau tidak. Pada keadaan batas ultimit fakta bahwa struktur atau elemen struktur tidak mengalami kegagalan selama pengujian memverifikasi tidak ada yang melebihi dari keadaan batas.

Hal ini juga umum untuk meningkatkan bukti pembebanan sampai tanda-tanda plastifikasi terjadi, untuk misalnya dengan sensor emisi kebisingan (*noise emission*) pada struktur beton bertulang. Tentu saja perlu dipastikan bahwa perilaku kegagalan adalah tidak getas (*ductile*).

Perbedaan uji pembuktian beban untuk metode identifikasi sistem dengan beban terukur adalah bahwa yang terlebih dahulu hasilnya akan digunakan untuk memverifikasi kapasitas struktur atau daya layan langsung sedangkan di kemudian hasilnya digunakan untuk menyesuaikan model struktur seperti kondisi eksistingnya.

Monitoring beban hidup dan kondisi lingkungan

Pembenanan yang dimaksudkan adalah menurut penggunaannya (beban lalu lintas di jembatan) serta beban lingkungan (misalnya angin, gelombang, suhu, gempa bumi) kebanyakan pada lokasi tertentu. Dengan data dari monitoring pada lokasi tertentu model beban hidup dapat dikem-

bangkan dan digunakan untuk penilaian struktur bukan model pembebanan dari kode.

Efek pembebanan pada struktur yang disebabkan oleh peristiwa beban ekstrim seperti lalu lintas khusus, angin ekstrim dan gempa dapat ditentukan dan dievaluasi. Kondisi lingkungan merupakan sifat fisik, kimia atau biologi. Karena monitoring kondisi lingkungan maka penurunan kondisi struktur di masa depan dapat diprediksi.

Metode Analisis Struktur

Kinerja struktural dapat dianalisis dengan menggunakan model yang dipercaya mewakili pembebanan pada struktur, perilaku struktur dan resistensi dari komponennya. Model analisis harus mencerminkan kondisi aktual dari struktur eksisting.

Metode analisis sederhana

Untuk tingkat penilaian yang lebih rendah seringkali keefektifan untuk menghitung efek beban berdasarkan metode konservatif dengan model struktur yang sederhana, asalkan ketidakpastian yang cukup besar dianggap dengan nilai keamanan yang memenuhi syarat. Ciri khas metode analisis sederhana antara lain

analisis *frame* dan *grillage* dikombinasikan dengan distribusi beban yang sederhana dan perilaku material linear elastis, yang menghasilkan solusi ikatan kesetimbangan yang lebih rendah.

Metode analisis kompleks

Ketika penilaian tingkat rendah gagal, metode penyempurnaan perhitungan efek beban perlu dicapai. Metode yang disempurnakan ini termasuk yang utamanya analisis elemen hingga (*finite element*) dan metode non-linear seperti hasil analisis kelelahan, di mana ini dapat menyebabkan kapasitas yang lebih tinggi. Khususnya pemodelan tertentu untuk perilaku material seperti perilaku akibat variasi waktu (misalnya susut dan rangkak pada struktur beton bertulang) dan pertimbangan interaksi antara komponen material (misalnya ikatan, kekakuan tegangan pada beton bertulang) akan menemukan kapasitas simpanan yang tersembunyi dan mengurangi kekonservatifan.

Penerapan verifikasi probabilitas kemananan penuh, dapat menggunakan *stochastic finite elements* pada model struktur. Perbedaan dengan konvensional model elemen hingga adalah *stochastic elements* menggunakan korelasi spasial dari variabel acak ke perhitungannya.

Penyesuaian model

Untuk menyediakan informasi baru tentang perilaku struktur dalam penilaian, contohnya dari monitoring jangka panjang, model perlu diperbarui sesuai dengan informasi terbaru. Penyesuaian model dapat memperbarui variabel struktural (misalnya parameter kekakuan struktur) secara otomatis dengan menggunakan data pengukuran seperti perubahan *displacement*, *strain* atau kuantitas kerusakan (misalnya lebar retak).

Metode Verifikasi Keandalan

Sementara akuisisi data dan analisis struktur berjalan untuk mendapatkan informasi tentang keadaan struktur, komponen ketiga dari proses penilaian membahas evaluasi aktual dari batas keamanan dan kelayakan yang digambarkan sebagai jarak antara keadaan aktual dari struktur dan keadaan batas. Verifikasi dari struktur eksisting biasanya harus dilakukan untuk memastikan target tingkat keandalan yang mewakili tingkat yang diperlukan kinerja struktur.

Verifikasi deterministik dengan faktor keamanan global

Pendekatan deterministik adalah cara biasa mendefinisikan keamanan. Hal ini sepenuhnya didasarkan pada pengala-

man dan tindakan keamanan yang merupakan sifat empiris masing-masing. Verifikasi deterministik ditandai dengan penyederhanaan dan terkait dengan nilai keamanan yang konservatif.

Ukuran deterministik keamanan yang paling umum adalah 'faktor keamanan' global yaitu rasio antara resistensi dan efek beban dan diterapkan terutama pada segi resistensi. Variabel dasar yang diwakili oleh deterministik merupakan nilai-nilai normatif. Konsep tegangan diijinkan adalah metode deterministik verifikasi tipikal, di mana kegagalan struktur diasumsikan terjadi, ketika setiap bagiannya mencapai tegangan yang diijinkan. Akurasi tergantung pada, seberapa baik nilai normatif dari tegangan yang diijinkan mewakili tegangan runtuh dari material sebenarnya dan seberapa baik perhitungan tegangan mewakili tegangan aktual pada struktur yang sebenarnya.

Konsep lain adalah metode faktor beban, di mana ukuran keamanan dinyatakan oleh 'faktor beban', yang merupakan rasio dari kekuatan ultimit dari elemen struktur terhadap beban kerja. Metode verifikasi deterministik dengan satu faktor keamanan global yang mencerminkan yang pada kenyataannya tidak mencukupi dan mengandung sejumlah besar ketidakpastian dan untuk alasan tersebut harus digunakan hanya pengecualian dalam penilaian struktur eksisting. Misalnya penyebaran untuk

beban variabel jauh lebih tinggi daripada beban permanen. Penerapan keseluruhan faktor keamanan menghasilkan tingkat keamanan yang cukup berbeda untuk struktur berat seperti struktur beton dibandingkan dengan struktur ringan seperti struktur baja.

Faktor keamanan parsial

Pendekatan semi-probabilistik berdasarkan prinsip keadaan batas. Hal penting yang perlu diperhatikan adalah memastikan kegagalan tidak terjadi pada komponen struktur atau struktur itu sendiri, yang digambarkan sebagai keadaan batas ultimit (ULS). Untuk penilaian struktural penting juga untuk menganalisis kinerja daya layan di mana efek struktur akibat pembebanan dapat menyebabkan keruntuhan layan (*serviceability failure*), digambarkan sebagai keadaan batas layan (SLS).

Ketika ukuran keamanan yang ditetapkan adalah faktor keamanan parsial maka telah dikembangkan dengan analisis keandalan untuk keandalan target yang spesifik dan diterapkan pada parameter desain yang sesuai. Faktor keamanan parsial menahan variasi ekstrim dari desain parameter yang mungkin dapat terjadi selama penggunaan di kedua nya baik resistensi maupun beban.

Dalam klasifikasi berdasarkan metode probabilistik untuk desain struktural dan penilaian metode semi-probabilistik

adalah peringkat sebagai metode tingkat 1, di mana variabel dasar ditentukan dengan satu nilai karakteristik.

Metode verifikasi semi-probabilistik dapat jauh lebih baik mencerminkan kenyataan karena ketidakpastian dapat diperhitungkan pada parameter-parameter desain yang terjadi. Sejak faktor parsial berdasarkan metode verifikasi telah dikembangkan untuk alasan desain, kebanyakan kode desain menggunakannya. Untuk menyederhanakan verifikasi rutin, faktor keamanan parsial menyediakan cakupan luas dari struktur dan ragam keruntuhan. Begitu juga dalam desain di mana jawaban akan keamanan struktur lebih penting daripada kenyataannya dan desain ekonomis yang menunjukkan kemudahan konstruksi bukan efisiensi struktural. Untuk alasan tersebut metode semi-probabilistik cenderung konservatif untuk sebagian besar struktur. Tingkat kekonservatifannya bervariasi dari struktur yang satu ke struktur yang lain.

Verifikasi probabilistik

Prosedur verifikasi probabilistik juga berdasarkan prinsip keadaan batas seperti yang dijelaskan di atas. Dalam penilaian itu diharapkan untuk mengidentifikasi nilai real dari parameter desain dengan inspeksi, pengujian, monitoring atau metode lain dan seketika itu juga untuk meminimalkan ketidakpastian. Dalam

proses verifikasi, data adalah dasar untuk model semua ketidakpastian dalam variabel pokok dan untuk menghitung probabilitas keruntuhan aktual.

Probabilitas keruntuhan dan keandalan struktur terkait secara langsung. Ukuran apakah struktur cukup aman atau tidak, adalah probabilitas keruntuhan dan kesetaraan indeks keandalan (*reliability index*). Verifikasi probabilistik rutin yang sekarang berkembang dengan baik dan menjadi lebih dan lebih digunakan dalam desain dan penilaian bangunan, jembatan dan struktur industri. Namun demikian, prosedur ini sangat sensitif terhadap distribusi probabilitas yang dipilih yang mewakili variabel acak dasar dan juga untuk metode analisis dan model untuk menghitung efek beban (misalnya analisis *grillage*, analisis elemen hingga). Oleh karena itu saat menggunakannya terutama untuk penilaian struktural yang efektif maka perlu menaruh perhatian besar dan memiliki pandangan ahli yang memadai pada variabel, peka terhadap hasil.

Sasaran keandalan

Target tingkat keandalan, digunakan untuk verifikasi struktur eksisting dapat ditentukan berdasarkan pada kalibrasi untuk praktek yang ada (yaitu pada kode yang ada), dengan asumsi bahwa praktek yang ada adalah optimal. Persyaratan kinerja

juga harus mencerminkan jenis dan pentingnya struktur, konsekuensi kegagalan yang memungkinkan dan kriteria sosial ekonomi, yang perlu dipertimbangkan ketika menentukan sasaran dari tingkat keandalan.

Ada perbedaan mendasar antara penilaian struktur yang ada dan desain struktur baru, yang mempengaruhi persyaratan pada kinerja struktur dan dengan demikian dapat mempengaruhi sasaran keandalan yang digunakan dalam kasus-kasus individu. perbedaannya adalah sebagai berikut (ISO 13822):

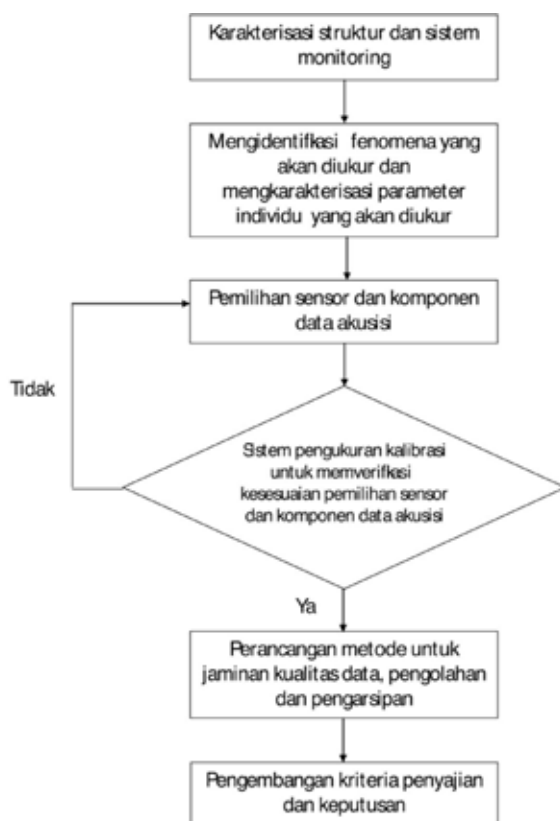
- ❖ Pertimbangan ekonomi: kebutuhan biaya antara penerimaan dan peningkatan struktur eksisting dapat sangat besar, sedangkan biaya peningkatan keamanan desain struktur umumnya sangat kecil, akibatnya kriteria konservatif umum yang digunakan dalam desain tidak seharusnya digunakan dalam penilaian,
- ❖ Pertimbangan sosial: meliputi gangguan (atau bahkan *displacement*) pada pengguna dan kegiatannya, juga nilai-nilai peninggalan, pertimbangan yang tidak mempengaruhi desain struktur, tetapi penilaian,
- ❖ Pertimbangan keberlanjutan: pengurangan limbah dan daur ulang, pertimbangan kurang penting dalam desain struktur baru, tapi dalam penilaian. ■

Kriteria Peralatan Monitoring SHMS

(Aktan 2003)

Prosedur Umum Perencanaan untuk Pengaplikasian Sistem Monitoring Kesehatan (*Health Monitoring*)

Berikut ini adalah prosedur desain umum yang dapat digunakan untuk merancang sebuah sistem monitoring kesehatan untuk Jembatan. Prosedur ini dimaksudkan sebagai referensi, dimana langkah-langkah utama dalam proses desain dirangkum dalam bagan arus pada *Gambar 15* dan dijelaskan secara rinci pada bagian berikut.



Gambar 15
Prosedur Umum Perencanaan Sistem Monitoring Kesehatan (FHWA, 2002)

Karakterisasi Struktur dan Sistem Monitoring

Langkah pertama dalam merancang penerapan monitoring kesehatan adalah karakterisasi, yang pada dasarnya terdapat dua bagian yang membutuhkan karakterisasi yaitu struktur dan penerapan monitoring. Karakterisasi mengarah pada konseptualisasi secara menyeluruh dan pemahaman tentang struktur dan tujuan dari penerapan monitoring itu sendiri. Ada beberapa hal yang perlu dilakukan untuk mengkarakterisasi struktur, yaitu :

- ❖ Meninjau secara menyeluruh dari setiap informasi desain yang terkait baik gambar struktur terbaru atau dokumentasi yang terkait dengan struktur eksisting terhadap konsep diusulkan atau sistem struktur eksisting dan beban lingkungan. Informasi terakhir untuk struktur eksisting dapat berupa hasil inspeksi terakhir, rincian kegiatan pemeliharaan atau modifikasi struktur, dan temuan dari studi apapun atau investigasi yang mungkin telah dilakukan.
- ❖ Merekonstruksi komponen penting atau detail struktur dengan model grafis (*CAD models*). Kunjungan lapangan mungkin diperlukan untuk mengumpulkan informasi tambahan

dan untuk mengidentifikasi penghalang fisik yang memungkinkan atau keterbatasan lainnya. Pengujian awal dan model skala kecil juga dapat dilakukan pada struktur eksisting atau menggunakan model fisik struktur yang diusulkan atau komponen-komponen penting untuk mendapatkan pengetahuan praktis tambahan.

- ❖ Mengembangkan model elemen hingga untuk analisis atau simulasi efek atau respon pembebanan. Model tersebut dapat disempurnakan atau dikalibrasi menggunakan hasil monitoring. Selain itu, dilakukan pengujian untuk mencerminkan kondisi aktual dan mekanisme yang dapat berfungsi sebagai dasar untuk mengevaluasi perkiraan perubahan kondisi, kinerja dan kesehatan struktur di masa yang akan datang.
- ❖ Mengadakan diskusi dengan para pemangku kepentingan untuk menetapkan perspektif masing-masing kelompok, serta ketidakpastian dan harapan dari proyek tersebut. Pemangku kepentingan ini biasanya mencakup pemilik, perencana, pengelola, dan kontraktor, tetapi dapat juga mencakup badan-badan pemerintahan, komunitas perencana/kontraktor/pengelola infrastruktur sipil dan pengguna infrastruktur. Kebenaran dan hasil yang diharapkan dari program monitoring ini harus jelas

identifikasi dan analisisnya. Persiapan jawaban atas pertanyaan atau penanganan ketidakpastian yang terkait dengan proses konstruksi, perilaku struktur atau kinerja, temuan dari inspeksi visual, evaluasi efektifitas deteksi kerusakan atau penurunan untuk rencana pemeliharaan yang optimal, evaluasi dampak dari peristiwa berbahaya atau kecelakaan, penyediaan statistik atau penanganan masalah keamanan.

Karakterisasi aplikasi sistem monitoring meliputi penetapan jenis tingkat dan durasi monitoring yang diperlukan untuk memenuhi tujuan pengidentifikasian. Karakterisasi ini akan tergantung pada skenario aplikasi tertentu dan pada gilirannya akan mempunyai pengaruh besar pada jenis peratan yang digunakan dan diperlukan strategi untuk mengelola informasi yang dihasilkan. Level monitoring membutuhkan uji kontrol sederhana dan jangka pendek, atau monitoring jangka panjang dengan banyak sensor, atau monitoring jangka panjang dengan banyak sensor dan uji kontrol yang dilakukan secara berkala selama waktu proyek. Penting juga menentukan apakah pengujian atau monitoring hanya meliputi daerah lokal struktur atau didistribusikan spasial melalui seluruh struktur. ini merupakan pertimbangan untuk jembatan utama dengan jarak yang besar, yang biasanya memerlukan

persyaratan tambahan dari komponen sistem monitoring. Monitoring konstruksi ini memperhatikan sekali hubungan antara koordinasi kerja instrumentasi terkait, kegiatan pengujian dan perlindungan komponen sistem monitoring.

Identifikasi Fenomena yang Diukur

Langkah ini biasanya meliputi tugas-tugas berikut :

- ❖ Mengidentifikasi efek dan respon beban internal maupun eksternal, kriteria servis/layan, kegiatan fabrikasi/konstruksi, parameter lingkungan, karakteristik operasional, dan parameter keamanan yang perlu dimonitor untuk memenuhi tujuan proyek.
- ❖ Mengidentifikasi dan mengkarakterisasi parameter mekanik, kimia, elektrik dan optik yang akan mencirikan fenomena menarik. Parameter-parameter ini meliputi gaya (*forces*), tegangan (*stresses*), perpindahan (*displacements*), rotasi (*rotations*), getaran (*vibrations*), distorsi (*distortions*) dan regangan (*strains*), parameter lingkungan seperti suhu (*temperature*), kelembapan (*humidity*), curah hujan (*precipitation*), kecepatan dan arah angin (*wind speed and direction*), volume lalu lintas, gambar, dll. Beberapa parameter-parameter tersebut statis dan yang lainnya dinamis.

- ❖ Menentukan rentang estimasi dan akurasi yang diperlukan untuk setiap parameter pengukuran. Model analitis yang dibuat dapat digunakan untuk memperoleh perkiraan rentang parameter pengukuran. Lainnya berasal dari penelitian atau aplikasi yang dilakukan pada struktur yang sama. Apabila perkiraan rentang tersebut tidak dapat diperoleh dari studi analisis atau penelitian, dapat dilakukan uji skala kecil untuk mendapatkannya. Selain itu, perlu dipertimbangkan interaksi yang mungkin antara berbagai parameter pengukuran dan lingkungan sekitar ketika menetapkan perkiraan rentang. Tingkat akurasi yang diperlukan mungkin berbeda untuk berbagai parameter pengukuran dan akan tergantung pada kegunaan data tersebut.
- ❖ Memperkirakan lokasi dimana parameter tersebut diukur. Lokasi yang tepat harus diukur dan dicatat oleh berbagai sensor yang dipasang.

Pemilihan Sensor dan Data Akusisi

Komponen sensor dan data akusisi dipilih dari yang tersedia secara komersial dan terbukti, serta pengkondisian sinyal dan sistem data akusisi berdasarkan karakteristik fisik, listrik, dan termodinamika. Rincian spesifikasi instalasi harus disiapkan untuk setiap jenis komponen sensor dan data

akusisi yang digunakan. Spesifikasi ini harus merinci metode dan teknik yang digunakan untuk memasang dan mengkonfigurasi komponen sensor dan data akusisi, serta metodologi untuk memverifikasi bahwa komponen tersebut bekerja dengan benar.

Sistem pengukuran Kalibrasi

Sistem pengukuran kalibrasi ini penting karena komponen sensor dan data akusisi yang digunakan untuk pengujian jembatan dan aplikasi monitoring biasanya membutuhkan beberapa penyesuaian. Selain itu, karakteristik kinerja yang dikutip oleh produsen sensor dan data akusisi kadang-kadang menyulitkan atau tidak akurat. Oleh karena itu, sistem kalibrasi menyediakan sarana untuk memverifikasi kinerja komponen sistem pengukuran secara individual. Serta sebagai sistem terpadu yang terkendali sebelum sensor dan data akusisi ditempatkan pada struktur. Sistem kalibrasi pengukuran dapat memberitahukan bahwa karakteristik sensor atau data akusisi tertentu tidak sesuai untuk aplikasi yang diperlukan dan dievaluasi alternatif yang memungkinkan.

Jaminan Kualitas Data, Pengolahan dan Pengarsipan

Pengembangan metode yang tepat untuk jaminan kualitas data, pengolahan dan pengarsipan merupakan teknologi

informasi utama yang berkaitan dengan tantangan jangka panjang aplikasi monitoring kesehatan struktur. Ada banyak sumber kesalahan dan ketidakpastian di lapangan yang dapat memengaruhi keandalan pengukuran, bahkan ketika upaya yang signifikan untuk mengidentifikasi dan memilih komponen sensor dan data akuisisi yang paling dapat diandalkan.

Metode jaminan kualitas data dapat diterapkan pada tingkat perangkat keras sensor dan data akuisisi yang termasuk dalam kalibrasi awal secara menyeluruh dari perangkat keras sensor dan data akuisisi diikuti rekalisasi secara periodik komponen ini, memverifikasi dan memastikan kualitas instalasi awal, serta perencanaan sistem dan komponen yang berlebihan. Pemeriksaan data sederhana dapat diprogram dalam perangkat lunak data akuisisi yang secara otomatis memvalidasi rentang waktu dan pengukuran, serta mendeteksi dan menandai pembacaan berulang atau palsu, dan untuk mengevaluasi kelancaran dan kelangsungan sinyal.

Kriteria Penyajian dan Keputusan

Langkah terakhir dalam perencanaan sistem monitoring kesehatan adalah mengembangkan kriteria penyajian data monitoring dan membuat keputusan berikutnya. Sistem monitoring umumnya menampilkan data yang telah disintesis

ke bentuk yang bermakna dan mudah dipahami. Di samping menampilkan hasil pengukuran, sistem monitoring kesehatan harus dapat memberikan beberapa indikasi kondisi struktur tersebut. Status lampu atau sinyal suara dapat digunakan untuk memungkinkan pengguna bertindak cepat menilai status dari sistem operasional. Kriteria yang digunakan untuk menentukan data yang ditampilkan harus dikembangkan berdasarkan masukan dari pengguna, dan mungkin memerlukan beberapa iterasi sebelum skema penyajian yang optimal diselesaikan.

Kriteria keputusan juga harus dapat dikembangkan sehingga data pengukuran akan melayani tujuan yang dimaksud. Dalam aplikasi monitoring kesehatan jangka panjang, sistem harus mampu menginterpretasikan data pengukuran, membandingkan hasil untuk beberapa set kriteria yang telah ditentukan, dan melaksanakan keputusan secara otomatis. Contoh sederhana adalah program monitoring kesehatan memberikan sistem peringatan ketika data pengukuran menunjukkan bahwa beberapa perilaku telah melampaui nilai tertentu. Peringatan ini dapat dikirimkan kepada pengguna melalui alarm suara, email, fax, atau lainnya. Kriteria keputusan harus diuji secara menyeluruh sebelum dilaksanakan dan harus cukup ketat untuk mencegah terjadinya alarm palsu.

Sensor

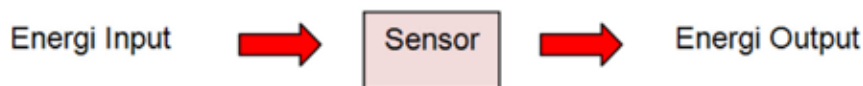
Ada berbagai jenis sensor yang tersedia untuk mengukur hampir semua parameter yang digunakan. Selain itu, penelitian terus mengembangkan teknologi baru dan teknik yang memungkinkan lebih andal, akurat dan biaya pengukuran yang efektif. Dalam rangka untuk memilih dan mengevaluasi sensor dari beragam kelompok ketersediaan teknologi sensor secara komersial untuk monitoring jembatan tertentu atau aplikasi pengujian, pengetahuan mengenai istilah-istilah dasar biasanya digunakan untuk menjelaskan sensor yang diperlukan. Sebuah pemahaman dasar dari kriteria yang penting perlu dipertimbangkan ketika memilih dan mengevaluasi sensor juga diperlukan. Akhirnya, harus dimiliki pengetahuan umum dari jenis sensor yang biasa digunakan untuk aplikasi pengujian dan monitoring jembatan. Oleh karena itu, fokus dari bagian akan memperkenalkan istilah-istilah yang berkaitan dengan sensor dan kriteria yang harus digunakan ketika memilih dan mengevaluasi kinerja sensor untuk aplikasi pengujian dan monitoring jembatan.

Banyak informasi tambahan tentang sensor untuk berbagai aplikasi pengukuran yang tersedia dalam buku-buku, manual, dan literatur lainnya. Banyak produsen sensor dan *dealer* menerbitkan

catatan teknis dan aplikasi, yang sebagian besar tersedia secara gratis di Internet, yang memberikan gambaran dengan sangat baik dan informasi aplikasi spesifik untuk berbagai jenis sensor. Perlu dicatat bahwa banyak sensor dan teknologi penginderaan awalnya dikembangkan untuk aplikasi pengukuran laboratorium atau industri. Akibatnya, banyak sensor yang tersedia secara komersial tidak selalu cocok untuk lingkungan pengukuran yang biasanya dihadapi di jembatan. Dalam memilih dan mengevaluasi sensor bagi mayoritas monitoring jembatan dan aplikasi pengujian, kekasaran, keandalan, dan rekaman dari bukti kinerja di lapangan membuktikan lebih pentingnya pertimbangan dari kemampuan pengukuran teknis yang biasanya ditekankan oleh produsen sensor.

Gambaran Umum Sensor

Dalam arti umum, sensor adalah sebuah perangkat yang mengubah energi dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Perlu dicatat bahwa sebagian besar literatur tentang sensor, istilah “sensor” dan “transduser” digunakan secara sinonim satu sama lain. Namun, mereka umumnya merujuk pada jenis perangkat yang sama. Proses di mana terjadi konversi energi ini akan bervariasi tergantung pada teknologi yang mendasari pemanfaatan sensor. Sebuah



Gambar 16 Penyederhanaan model sensor

model sederhana dari sensor ditampilkan pada *Gambar 16*.

Energi input ke sensor merupakan fenomena fisik yang diukur. Inputan ini disebut sebagai besaran ukur. Energi output dari sensor disebut sebagai pengukuran dan harus dirujuk ke beberapa standar satuan untuk pengukuran agar memiliki makna yang jelas dan konsisten. (Webster, 1999)

Bentuk umum dari energi input termasuk energi mekanik, energi panas, energi listrik, energi magnetik, energi radiasi, dan energi kimia. Pada kebanyakan aplikasi pengujian dan monitoring jembatan, variabel fisik yang penting berhubungan dengan energi mekanik. Variabel-variabel termasuk akselerasi linear/sudut, kekuatan, panjang, kecepatan linear/sudut, dan tekanan. Suhu merupakan variabel umum yang penting yang terkait dengan energi termal.

Energi output dari sensor biasanya berupa energi listrik (tegangan, arus, dll) atau energi mekanik. Bentuk energi output dapat berupa sinyal analog atau digital. Sinyal analog adalah kesinambungan dalam ukuran dan konten temporal (waktu) atau spasial (ruang). Sinyal digital memberikan

representasi diskrit dari besaran ukur. Output sensor analog lebih umum, tetapi harus dikonversi ke bentuk digital dengan sistem akuisisi data sehingga komputer dapat membaca, menganalisis, dan menyimpan pengukurannya.

Kebanyakan sensor dapat diklasifikasikan sebagai optik, mekanik, pneumatik hidrolik, atau perangkat listrik. Sensor optik merupakan yang paling sederhana dalam prinsip kerjanya, karakteristik kinerja, persyaratan kerja dan keandalan keseluruhan, sementara sensor elektrik yang paling kompleks. Meskipun sensor elektrik yang paling kompleks, kemampuan untuk memantau sensor jarak jauh membuatnya diperlukan untuk sebagian besar aplikasi monitoring jembatan. Kemampuan untuk monitoring jarak jauh merupakan persyaratan untuk sebagian besar monitoring jembatan yang terkait dengan pengukuran karena akses rutin ke lokasi yang dituju tidak cukup mudah atau praktis.

Perlu dicatat bahwa selalu ada beberapa tingkat ketidakpastian dalam pengukuran, terlepas dari kelas sensor yang digunakan. Penggunaan sensor elektrik yang lebih kompleks tidak memerlukan

tambahan pengawasan dari kemungkinan kesalahan, namun, sebagian besar kesalahan ini dapat diminimalkan atau direkam oleh pengguna yang memiliki pengetahuan dan pengalaman. Sensor elektrik juga mengharuskan bahwa beberapa bentuk elektrikal *interface* akan dikembangkan dan digunakan dalam rangkaian sensor. *Interfacing* ini dicapai dengan menggunakan sistem akuisisi data dan komunikasi. Sistem ini, yang akan dibahas kemudian, keuntungannya adalah memungkinkan pengukuran harus direkam dan dalam banyak kasus disaring, diproses dan diarsipkan dengan proses otomatis yang sangat efisien dan hemat biaya.

Sebuah sensor dapat digambarkan baik sebagai *self-generating* (aktif) atau *modulating* (pasif). Sensor *self-generating* menghasilkan energi outputnya sendiri melalui proses aktual untuk mengerti suatu variabel sementara sensor *modulating* memerlukan beberapa eksitasi eksternal untuk menghasilkan energi output. Eksitasi eksternal untuk sensor *modulating* biasanya disediakan oleh sebuah sumber arus atau tegangan yang berdedikasi dan dalam kebanyakan kasus dipasok oleh sistem akuisisi data. Kebanyakan sensor elektik adalah sensor *modulating*. Sebuah contoh umum dari sensor elektrikal *self-generating* adalah sensor *thermocouple*.

Setiap sensor akan terdiri dari setidaknya dua komponen diskrit, elemen

sensing dan kemasan sensor. Elemen *sensing* merupakan mekanisme transduksi mendasar yang mengubah energi dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Sebuah sensor sederhana hanya berisi elemen *sensing* tunggal sementara senyawa sensor akan menggabungkan lebih dari satu elemen *sensing*. Kemasan sensor terdiri dari bahan fisik yang mengandung elemen *sensing* dan termasuk semua koneksi eksternal ke sensor. Elemen *sensing* yang dimanfaatkan oleh sebuah sensor merupakan karakteristik penting seperti mendikte kedua jenis pengukuran yang dapat dibuat dan kekuatan terkait, kondisi sinyal serta kebutuhan akuisisi data. Kemasan sensor adalah suatu pertimbangan penting dalam hal kesesuaian sensor untuk lingkungan di mana pengukuran akan dilakukan.

Jelas ada banyak jenis sensor yang dapat digunakan untuk mengukur variabel fisik. Mengingat keragaman ini, memilih sensor yang paling tepat digunakan untuk pengukuran tertentu dapat agak mencemaskan. Kebanyakan sensor dapat dikarakteristikan oleh sejumlah kriteria yang membantu dalam proses seleksi. Pada bagian berikut, beberapa kriteria yang penting untuk dipertimbangkan ketika memilih sensor untuk aplikasi monitoring dan pengujian jembatan.

Kriteria Pemilihan Sensor

Langkah pertama dalam memilih sensor untuk aplikasi tertentu adalah mengkarakterisasi besaran ukur dan lingkungan lokasi pengukuran (*Talyor dan Kyatt, 1994; National Council Commitee on New Sensor Technologies: Material and Applications, 1995*). Persyaratan khusus karakterisasi ini meliputi:

- ❖ Identifikasi variabel-variabel yang akan diukur, seperti suhu, *displacement*, akselerasi dan kemiringan
- ❖ Nilai nominal dan kisaran yang diharapkan dari besaran ukur.
- ❖ Properti spasial dan temporal dari besaran ukur dan pengukuran. Apakah besaran ukur bervariasi secara signifikan dari lokasi ke lokasi pada struktur? Apakah besaran ukur berupa statis, kuasi-statis, atau dinamis? Akan pengukuran dilakukan secara berselang atau terus-menerus?
- ❖ Akurasi yang diperlukan untuk setiap pengukuran.
- ❖ Kondisi lingkungan di mana pengukuran akan dilakukan. Pada sebagian besar aplikasi monitoring dan pengujian jembatan, lingkungan tipikal termasuk temperatur tinggi dan kelembaban ekstrim, pasang surut air, gangguan elektromagnetik dan frekuensi radio (EMI/RFI), getaran, korosifitas, dan kontami-

nasi lainnya seperti minyak, debu, dll. Potensi kerusakan konstruksi terkait dan vandalisme juga harus dievaluasi.

- ❖ Durasi pengujian atau monitoring. Apakah durasi akan selama seminggu, sebulan, setahun, atau 10 tahun?

Setelah besaran ukur dan lingkungan monitoring telah dikarakterisasikan, pengelompokan sensor dapat diidentifikasi. Agar pemilihan sensor individu dari kelompok sensor yang teridentifikasi, ada beberapa kriteria penting yang harus dipertimbangkan. Kriteria pemilihan sensor ini dapat ditentukan untuk tiga kategori utama, yaitu karakteristik kinerja sensor, batasan lingkungan, dan pertimbangan ekonomi. Setiap kategori dari kriteria pemilihan sensor berisi beberapa penjelasan yang menandakan atribut paling penting dari sebuah sensor. Penjelasan ini ditunjukkan pada *Tabel 3* di halaman berikut dan dijelaskan dalam bagian berikut.

Tabel 3 Kriteria pemilihan sensor

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

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 keandalan dan efisiensi pengukuran dan meminimalkan ketidakpastian yang terkait.

Karakteristik Kinerja Sensor

Karakteristik kinerja sensor menggambarkan cara sensor berperilaku pada kondisi penggunaan yang khas. Karakteristik kinerja mencakup karakteristik statis dan dinamis. Karakteristik statis menjelaskan kinerja sensor yang mengenai variasi besaran ukur secara berangsur-angsur. Karakteristik dinamis menjelaskan bagaimana sensor merespon variasi besaran ukur terhadap waktu.

a. Kepekaan (*Sensitivity*)

Merupakan jumlah perubahan output dari sensor dalam menanggapi perubahan input sensor. Sensitivitas adalah karakteristik kinerja statis dan secara umum didefinisikan sebagai rentang seluruh sensor. Sensitivitas memberikan indikasi kemampuan sensor untuk mendeteksi perubahan dalam besaran ukur.

b. Resolusi (*Resolution*)

Perubahan terkecil yang terukur dalam input yang akan menghasilkan perubahan kecil namun nyata dalam output sensor. Resolusi adalah karakteristik kinerja statis dan sering memiliki nilai yang berbeda dalam porsi yang berbeda dari sensor dengan jangkauan penuh.

c. Rentang (*Range*)

Perbedaan antara nilai maksimum

dan minimum dari output sensor dalam rentang operasi yang dimaksudkan. Hal ini merupakan karakteristik kinerja statis dan merupakan batas alami dari sensor. Kinerja dinamis yang serupa karakteristiknya adalah respon frekuensi.

d. Linearitas (*Linearity*)

Output dari sensor yang linear adalah berbanding lurus dengan besaran ukur. Linearitas merupakan tingkatan sejauh mana kurva kalibrasi sensor sesuai dengan garis lurus. Sejumlah penyimpangan dari kurva linear mengacu pada kesalahan non-linear. Linearitas adalah karakteristik kinerja sensor statis dan biasanya dinyatakan sebagai persentase positif atau negatif maksimum dari output sensor skala penuh.

e. Histeresis (*Hysteresis*)

Perbedaan maksimum antara output untuk pembacaan titik ukur yang sama, satu titik memperoleh peningkatan dari nol dan yang lain menurun dari skala penuh. Poin diambil pada siklus terus menerus yang sama. Deviasi dinyatakan sebagai persen dari skala penuh. Histeresis adalah karakteristik kinerja sensor statis.

f. Akurasi (*Accuracy*)

Ini adalah kedekatan dari sebuah pengukuran untuk nilai yang didefinisikan sebagai nilai sebenarnya dari besaran

ukur. Nilai sebenarnya mengacu pada standar yang diterima dan dapat dilacak dan biasanya dibandingkan dengan pengukuran sensor selama kalibrasi. Akurasi adalah sebuah konsep kualitatif dan merupakan kesalahan gabungan dari nonlinear, pengulangan, dan histeresis. Akurasi biasanya dinyatakan sebagai persen positif atau negatif maksimum output skala penuh. Misalnya, jika sensor ditentukan memiliki akurasi (+/-) 5% dari output skala penuhnya dan jangkauan sensor adalah 0 sampai 1.000 lbs, pengukuran dapat diharapkan tidak lebih dari +/- 50 lbs dari pembacaan yang benar.

g. Pengulangan (*Repeatability*)

Kedekatan dari perjanjian tersebut antara hasil pengukuran yang berurutan dari besaran ukur yang sama dilakukan dalam kondisi identik pengukuran. Pengulangan adalah karakteristik kinerja sensor statis, dan merupakan konsep kualitatif yang sering digunakan secara sinonim dengan istilah presisi. Hal ini biasanya dinyatakan dalam istilah persentase positif atau negatif maksimum dari output skala penuh.

h. Stabilitas (*Stability*)

Hal ini mengacu pada kemampuan sensor untuk mempertahankan nilai kalibrasi yang selama periode waktu yang diperpanjang. Ini adalah ukuran kemam-

puan sensor untuk memberikan output yang sama ketika mengukur input konstan. Stabilitas adalah karakteristik kinerja statis dan umumnya ditentukan oleh efek lingkungan seperti suhu, kelembaban, RFI/EMI, dan korosi. Istilah “penyimpangan” sering digunakan untuk menggambarkan perubahan yang terjadi terus ke atas atau terus-menerus ke bawah. Contoh-contoh spesifik dari penyimpangan termasuk penyimpangan sensitivitas termal dan penyimpangan nilai nol termal. Penyimpangan sensitivitas termal menggambarkan perubahan kemiringan dalam kurva sensitivitas karena efek termal sementara penyimpangan nilai nol menggambarkan perubahan paralel karena efek termal ketika parameter yang diukur adalah nol.

i. Waktu respon (*Response Time*)

Ini adalah jumlah waktu yang dibutuhkan untuk output sensor mencapai nilai yang stabil dan merupakan karakteristik kinerja dinamis. Ini menggambarkan seberapa cepat sensor akan menanggapi perubahan dalam besaran ukur. Waktu respon biasanya ditentukan oleh jumlah waktu yang dibutuhkan untuk output sensor mencapai persentase tertentu dari nilai akhir.

j. Respon frekuensi (*Frequency Response*)

Karakteristik ini sangat penting

untuk pengukuran dinamis. Ini merupakan dua hubungan antara set input dan output. Yang pertama berkaitan frekuensi untuk rasio amplitudo input / output. Dengan kata lain, itu menggambarkan perubahan dari rasio input / output sensor amplitudo dalam rentang frekuensi dari berbagai input sinusoidal diterapkan ke sensor. Hal ini biasanya ditentukan dalam hal +/- desibel (dB) dalam rentang frekuensi tertentu yang diberikan dalam Hz. Keduanya berkaitan dengan frekuensi untuk perbedaan fase antara output dan input.

Batasan Lingkungan

a. Temperature Range

Ini adalah kisaran suhu dimana sensor dapat berfungsi. Sebagian besar sensor yang tersedia secara komersial yang biasanya digunakan untuk aplikasi pengujian dan monitoring jembatan semua memiliki rentang suhu yang diijinkan.

b. Humidity Range

Banyak sensor hanya dirancang untuk handal beroperasi dalam rentang kelembaban tertentu. Paparan kelembaban dapat mengubah elemen sensitif di banyak sensor elektrik yang mengarah pada kehilangan stabilitas, penyimpangan dan korosi yang tidak dapat diubah. Tingkat kelembaban rata-rata dapat bervariasi

secara signifikan tergantung pada lokasi geografis, karena itu, beberapa upaya harus dilakukan untuk menentukan kondisi lokal yang diharapkan untuk memastikan bahwa kandidat sensor akan sesuai dengan kondisi tersebut dan untuk melindungi sensor dari paparan kelembaban jika diperlukan.

c. Ukuran

Ukuran sensor adalah suatu pertimbangan penting dalam banyak hal. Pentingnya lokasi pengukuran dapat membatasi ukuran dari sensor yang digunakan. Ukuran sensor juga dapat mempengaruhi kemudahan penggunaan dan karakteristik kekasaran. Sebagai contoh, sensor yang lebih besar biasanya lebih mudah untuk menginstal dan dalam kebanyakan kasus kurang rentan terhadap kerusakan dari penanganan yang kasar. Ukuran sensor juga dapat mempengaruhi karakteristik kinerja dari sensor. Secara umum, sensor yang lebih kecil cenderung untuk merespon lebih cepat terhadap rangsangan eksternal dari pada sensor besar. Akhirnya, ukuran sensor dapat mempengaruhi akurasi pengukuran. Sebuah contoh umum berkaitan dengan pengukuran *strain* pada permukaan elemen beton.

d. Pengemasan (*Packaging*)

Cara di mana sensor dikemas memiliki pengaruh besar pada kinerja,

ketidakrataan dan umur panjang. Paparan kelembaban dan kontaminan lainnya seperti garam-garam korosif dapat menyebabkan kerusakan fisik dari elemen *sensing* mengurangi umur layannya. Kerusakan elemen *sensing* akan menyebabkan juga kerugian yang sesuai pada keandalan dari pengukuran sensor. Idealnya, sensor yang digunakan untuk aplikasi monitoring jembatan harus dibuat dari bahan tahan lama dan harus tertutup rapat untuk melindunginya terhadap kelembaban, garam, minyak, debu, dan kontaminan potensial lainnya. Jika kemasan sensor tidak mampu memberikan perlindungan atau terbatas, sensor harus disegel atau ditutupi dengan bahan pelindung untuk memaksimalkan daya tahan dan umur panjang.

Kemasan sebuah sensor juga dapat mempengaruhi parameter yang diukur. Misalnya, jika *strain* atau *displacement gage* sangat kaku, dapat memperkuat komponen yang diukur dan mendistorsi nilai sebenarnya dari besaran ukur. Hal ini disebut sebagai kesesuaian yang lemah. Kesesuaian dari kebanyakan tipe *off-the-shelf strain* dan *displacement* sensor umumnya baik untuk elemen baja dan beton, tetapi harus dievaluasi untuk sensor yang dibuat menurut pesanan dari sensor lain atau ketika sensor yang digunakan dengan bahan khusus seperti kaca atau serat karbon.

e. Isolation

Ini adalah ukuran berapa banyak sensor harus diisolasi dari gangguan dan efek yang akan membahayakan integritas data atau keandalan sensor. Contoh gangguan seperti yang biasa ditemui atau dekat jembatan adalah elektromagnetik dan gangguan frekuensi radio (EMI / RFI), listrik statis, petir, dan getaran. Jika fitur sensor elektromagnetik atau elektrostatik terisolasi, misalnya, akurasi keseluruhan sinyal akan ditingkatkan.

f. Thermal Effects

Kebanyakan sensor akan menanggapi suhu di samping parameter yang mereka maksudkan untuk mengukur. Pada gilirannya akan mempengaruhi pengukuran, perubahan dari nilai sebenarnya. Sebuah sensor yang sensitif terhadap efek termal adalah fungsi baik dari elemen *sensing* dan pengemasan, dan karena itu akan bervariasi untuk berbagai jenis sensor. Banyak kasus, kompensasi kompensasi untuk meminimalkan efek termal yang tidak diinginkan. Hal ini dapat dicapai dengan cara sensor dibuat atau dengan cara yang digunakan. Sebagai contoh, *bonded foil strain gauges* tersedia dalam versi suhu terkompensasi yang mencoba untuk meminimalkan efek termal pada respon alat ukur. Efek termal dapat juga dihilangkan melalui penggunaan *strain gauge dummy* atau tambahan aktif *strain gauge* dalam rangkaian

Wheatstone bridge yang digunakan untuk membaca ukurannya. Dalam banyak kasus, jika suhu dari sensor juga diukur, efek termal dapat dipertanggungjawabkan oleh koreksi yang diterapkan pada pengukuran.

Pertimbangan Ekonomi

a. Keandalan (*Reliability*)

Ini adalah ukuran dari masa operasi sensor. Ini merupakan panjang minimum dari waktu atau jumlah minimum dari jangkauan penuh di mana sensor akan beroperasi tanpa degradasi dalam kinerjanya. Sensor yang handal mungkin kurang dikenakan perawatan yang signifikan atau biaya penggantian selama layanan. Keandalan dari sensor sangat dipengaruhi oleh kekerasan dan daya tahan kemasan sensor dan elemen *sensing*. Mengevaluasi keandalan sensor untuk aplikasi monitoring jembatan dapat menjadi agak subjektif. Minimumnya, keandalan harus diperiksa dalam konteks rekaman masa lalu dari kinerja sensor untuk aplikasi pengukuran serupa.

b. Ketersediaan (*Availability*)

Ketersediaan sensor tertentu sering merupakan pertimbangan ekonomi yang penting. Kebanyakan produsen sensor menjaga stok yang memadai dari sensor mereka yang paling populer. Jika perseediaan sensor khusus atau sensor modifi-

kasi diperlukan, waktu pengiriman dapat meningkat secara substansial. Hal ini dapat menyebabkan penundaan proyek dan meningkatkan keseluruhan biaya pengukuran. Ketersediaan dari sensor yang diberikan harus ditetapkan sedini mungkin untuk menghindari keterlambatan pengiriman dan biaya yang berkaitan dengannya. Dalam banyak kasus, ketersediaan sensor adalah fungsi dari respon produsen tertentu. Sensor harus diperoleh, bila mungkin, dari produsen yang memiliki bukti catatan kinerja yang baik.

c. Kemudahan Instalasi (*Ease of Instalation*)

Ini adalah ukuran dari tingkat keterampilan yang diperlukan untuk menginstal sensor dan berapa banyak waktu yang diperlukan untuk mempersiapkan sensor dan menjalankannya. Sebuah sensor yang memerlukan penanganan yang sangat khusus dan keterampilan instalasi pada akhirnya akan lebih mahal dari yang lainnya. Biaya tenaga kerja dan penundaan proyek yang terkait dengan menginstal sensor dapat menjadi komponen penting dari biaya keseluruhan aplikasi pengukuran dan akan bervariasi dengan jenis sensor digunakan.

d. Kebutuhan akusisi data (*Data Acquisition Needs*)

Kebanyakan sensor memiliki persyaratan khusus yang berkaitan

dengan akuisisi data. Persyaratan ini dapat mencakup pengkondisian sinyal khusus, eksitasi, kabel, dll. Biaya aplikasi pengukuran akan meningkat dalam proporsinya bersama-sama dengan kecanggihan dari akuisisi data yang diperlukan untuk sensor.

e. Biaya (*Cost*)

Meski biaya sensor tidak harus menjadi pertimbangan utama dalam memilih sebuah sensor tertentu, itu tetap merupakan pertimbangan yang penting. Total biaya yang terkait dengan sensor yang diberikan merupakan penjumlahan dari biaya awal untuk pengadaan sensor, biaya untuk menempatkannya pada struktur, dan biaya untuk memeliharanya. Biaya pengadaan yang biasanya fungsi dari kecanggihan dari teknologi *sensing* yang dimanfaatkan oleh sensor, seberapa luas jangkauannya dari sensor yang digunakan, dan jumlah modifikasi khusus yang diperlukan untuk sensor. Biaya penempatan adalah fungsi dari kemudahannya sensor untuk dipasang, kekuatan dan persyaratan pengkondisian sinyal untuk sensor, persyaratan kabel, dan tingkat perlindungan eksternal yang harus disediakan untuk sensor. Biaya pemeliharaan terkait dengan karakteristik kekerasan dan daya tahan sensor.

Sistem Data Akuisisi

Komponen Utama Sistem Akuisisi Data

Akuisisi data adalah proses melalui mana informasi yang dihasilkan oleh beberapa fenomena fisik yang dikumpulkan, diproses dan dikirim untuk analisis dan interpretasi selanjutnya. Sebuah representasi generik dari arus informasi dalam aplikasi pengukuran ditunjukkan pada **Gambar 17**. Sensor menghasilkan sinyal analog atau digital yang mewakili variabel fisik yang diukur atau dipantau. Sinyal ini akhirnya harus dikirimkan ke komputer sehingga dapat dianalisis dan diinterpretasikan, tetapi komputer adalah sebuah perangkat digital dan hanya dapat menerima dan memahami informasi yang ditransmisikan ke dalam bentuk digital. Sebuah sistem akuisisi data merupakan perangkat perantara yang memfasilitasi aliran informasi dari sensor ke komputer.

Sistem akuisisi data mengumpulkan sinyal yang dihasilkan oleh sensor, mengkondisionkannya dan mengkonversikannya menjadi bentuk yang sesuai, dan mengirimkan sinyal ke komputer. Sebagian besar data sistem akuisisi juga menyediakan kemampuan untuk mengatur perangkat elektronik luar meskipun output sinyal analog dan digital.

Sistem akuisisi data secara komersial tersedia dalam berbagai konfigurasi dengan beragam kemampuan kinerjanya. Konfigurasi yang tersedia dapat berkisar dari perangkat portabel untuk pembacaan sederhana sampai kompleks dan sistem terdistribusi yang jaringannya ke server pusat. Terlepas dari konfigurasi kompleksitas, kebanyakan sistem akuisisi data dibagi menjadi tiga komponen utama sebagai berikut: (1) akuisisi data perangkat keras, (2) perangkat lainnya dari akuisisi data, dan (3) perangkat lunak akuisisi data. Komponen ini dijelaskan di bagian berikut.



Gambar 17 Gambaran umum alur informasi dalam aplikasi pengukuran (FHWA, 2002)

a. Perangkat Keras Data Akuisisi

Perangkat keras akuisisi data umumnya terdiri dari sejumlah komponen elektronik yang mengumpulkan, mengkondisikan, mengkonversi dan mengirimkan sinyal sensor ke komputer. Dalam kebanyakan kasus, komponen ini meliputi:

- ❖ Pengkondisian sinyal (*signal conditioner*)
- ❖ Pengkonversi analog-ke-digital (*analog-to-digital converter* - ADC)
- ❖ Pengontrolan sirkuit (*controlling circuitry*)
- ❖ Memori (*memory*)
- ❖ *interface* atau perangkat komunikasi (*communications interface or device*)
- ❖ Catu daya (*power supply*)

Jenis dan konfigurasi dari masing-masing komponen ini akan berbeda tergantung pada akuisisi data perangkat keras yang digunakan. Namun, fungsi umum dari masing-masing komponen yang tercantum di atas adalah sebagai berikut. Pengkondisian sinyal beroperasi pada sinyal sensor untuk membuatnya sesuai dengan ADC. ADC mengambil analog sinyal setelah kondisi sinyal tersebut telah disesuaikan dan mengkonversi ke bentuk digital. Banyak sistem juga memiliki pengkonversi dari digital ke analog yang dapat mengambil perintah digital dari komputer dan mengkonversikannya ke tegangan analog. Ini adalah kemampuan yang diperlukan pada kebanyakan aplikasi kontrol. Komponen

pengkondisian sinyal dan ADC dari sistem akuisisi data dijelaskan secara lebih rinci dalam bagian pemilihan kriteria.

Pengendalian sirkuit terdiri dari sirkuit elektronik internal yang digunakan untuk mengontrol komponen perangkat keras lainnya dan bertanggung jawab untuk menjalankan setiap program operasi oleh pengguna. Sebagian besar sistem akuisisi data memuat beberapa memori internal yang akan berfungsi sebagai penyimpanan sementara atau penyimpanan jangka panjang untuk menyimpan data pengukuran. Dalam kebanyakan kasus, memori internal dalam bentuk microchip dan akan terintegrasi dengan pengendali elektronik, tetapi di lainnya mungkin terdiri dari hard disk atau jenis *plug-in* kartu memori. Data pengukuran umumnya diambil dari memori internal dan dikirim ke komputer untuk pengolahan, analisis, dan pengarsipan lebih lanjut.

Sebuah *interface* atau perangkat komunikasi memungkinkan sistem akuisisi data untuk berkomunikasi dengan komputer. Diizinkan pada pengguna untuk mengkonfigurasi dan mengirim perintah ke sistem akuisisi data dan untuk mengambil setiap data pengukuran yang tersimpan dalam memori. Ada berbagai macam *interface* dan perangkat komunikasi yang digunakan untuk sistem akuisisi data, termasuk koneksi langsung ke *bus*

komunikasi komputer *host*, koneksi tipe paralel, koneksi tipe serial, dan baru-baru ini, koneksi Ethernet.

Catu daya yang dibutuhkan untuk memberikan daya untuk komponen internal sistem akuisisi data elektronik dan dalam beberapa kasus untuk memberikan eksitasi pada sensor. Sebuah catu daya eksternal yang didedikasikan untuk sensor tertentu diperlukan jika pasokan internal sistem akuisisi data tidak dapat memberikan eksitasi yang memadai. Beberapa sensor juga dapat memperoleh eksitasinya dari pengkondisian sinyal. Catu daya yang digunakan untuk sistem akuisisi data harus bersih, stabil dan dapat diandalkan. Pasokan listrik akuisisi data harus mendapatkan dayanya dari sumber eksternal. Sumber eksternal dapat dari sumber AC seperti daya listrik atau generator portabel, atau sumber DC seperti baterai atau panel surya. Daya utama adalah pilihan yang disukai untuk aplikasi monitoring jangka panjang, tetapi ini mungkin perlu pengkondisian tambahan dan baterai cadangan untuk layanan yang optimal. Generator portabel yang berguna untuk aplikasi uji sementara, namun, ini dapat menjadi sumber gangguan yang signifikan dan harus ditempatkan agak jauh dari sensor dan perangkat keras akuisisi data. Tenaga baterai dan surya yang berguna untuk beberapa aplikasi jangka pendek di

lokasi terpencil atau ketika kebutuhan daya yang minimal.

b. Perangkat Lainnya Data Akuisisi

Perangkat lainnya dari akuisisi data meliputi kabel, blok terminal dan konektor, lampiran (*enclosure*), dan *junction boxes* yang diperlukan untuk secara fisik menghubungkan sensor ke perangkat keras akuisisi data dan untuk melindungi komponen perangkat keras dari eksposur ke elemen. Jenis-jenis perangkat lainnya dari akuisisi data yang digunakan dalam aplikasi tertentu akan memiliki pengaruh besar baik umur yang panjang dan keandalan sistem monitoring serta keakuratan pengukuran. Mengingat pentingnya perangkat ini untuk kinerja keseluruhan sistem monitoring, ada beberapa hal penting yang perlu dipertimbangkan ketika merancang dan memilih perangkat lainnya dari akuisisi data untuk aplikasi pengujian dan monitoring jembatan. Hal tersebut dibahas di bawah ini.

(i) Pengkabelan (*Cabling*)

Kabel diperlukan untuk rangkaian distribusi listrik dan mengirimkan sinyal sensor untuk sistem akuisisi data dan komputer. Ada beberapa hal bermasalah yang terkait dengan penggunaan kabel pada kebanyakan aplikasi pengujian dan monitoring, yaitu:

- ❖ Kesulitan dan biaya yang besar untuk pemasangannya.
- ❖ Sering mudah rusak.
- ❖ Banyak jenis kabel, seperti kabel serat optik, membutuhkan penanganan khusus dan pertimbangan instalasi.
- ❖ Dapat menginduksi bunyi yang tidak diinginkan dan kesalahan yang secara signifikan dapat mempengaruhi akurasi tingkat rendah sinyal analog.

Idealnya, penggunaan teknologi nirkabel akan mengurangi banyak kesalahan dan masalah tenaga kerja yang terkait dengan kabel. Kenyataannya adalah bahwa sebagian dari teknologi nirkabel yang tersedia tidak cukup memadai atau cukup handal untuk benar-benar menghindari kebutuhan untuk kabel fisik. Karena penggunaan kabel tidak dapat sepenuhnya dihindari dalam banyak kasus, ada beberapa strategi yang dapat diikuti untuk meminimalkan masalah yang terkait. Strategi ini termasuk:

1. Minimalkan jumlah dan panjangnya dari setiap kabel yang digunakan. Hal ini dapat dicapai dengan menggabungkan teknologi nirkabel jika mereka terbukti cukup dapat diandalkan untuk aplikasi, dengan mendistribusikan perangkat keras akuisisi data sehingga terletak di dekat lokasi sensor, dan memanfaatkan kabel dengan beberapa konduktor bukan banyak kabel dengan konduktor yang lebih sedikit antara lokasi dengan beberapa sensor dan perangkat keras akuisisi data. Berbagai jenis kabel yang digunakan juga harus disimpan untuk menyederhanakan instalasi secara keseluruhan dan persyaratan konektor.
2. Pastikan bahwa kabel tersimpan dan terlindung dengan benar.
3. Bila memungkinkan, kabel sensor tidak boleh dijalankan berdekatan dengan garis listrik AC, dekat generator, atau sumber gangguan listrik atau elektromagnetik lainnya. Kebanyakan sensor dan produsen perangkat keras akuisisi data dapat memberikan rekomendasi teknis tambahan pada variabel kabel untuk mempertimbangkan produk khususnya.
4. Kabel harus dilindungi untuk meminimalkan potensi kerusakan. Hal ini dapat dicapai dengan menggunakan saluran atau kabel lapis baja. Jika kabel lapis baja yang digunakan, kabel tersebut harus diinstal, dijamin dan didukung dengan cara yang akan mencegahnya dari tekuk atau hancur untuk mencegah kerusakan. Bahan pelapis yang dipilih untuk kabel harus tahan terhadap kerusakan akibat bahan kimia dan sinar ultraviolet, terutama jika mereka tidak ditempatkan di saluran.
5. Sambungan lapangan kabel harus dihindari.

(ii) Blok terminal dan konektor (*terminal blocks and connectors*)

Perangkat ini menyediakan koneksi fisik dan penghentian untuk kabel sensor dan komunikasi. Terminal blok dan konektor harus selalu tetap bersih dan kering dan mungkin memerlukan perlindungan untuk melindunginya dari gangguan elektromagnetik dan frekuensi radio. Selanjutnya, terminal blok dan konektor harus menyediakan keamanan koneksi yang tahan terhadap pelepasan getaran. Hal ini juga dianjurkan untuk menyediakan beberapa jenis *strain relief* antara kabel dan setiap blok terminal atau konektor.

(iii) Enclosures and Cabinets

Setiap peralatan elektronik yang sensitif yang akan dilokasikan di sebuah jembatan harus ditempatkan di tempat yang aman dan tahan air atau lemari. Ini mungkin dibangun menggunakan komponen stainless steel atau fiberglass. Pada lingkungan yang terdapat gangguan elektrik, perlindungan akan EMI/RFI mungkin diperlukan untuk mengurangi potensi efek gangguan. Sebagian besar perangkat listrik memiliki batas suhu operasional yang mungkin memerlukan setiap lemari atau tempat yang digunakan diisolasi dan kondisi yang dikendalikan. Dalam kasus tersebut, tingkat kelembaban dari tempatnya harus hati-hati dikendalikan. Produsen yang menyediakan

tempat/lemari dapat memberikan dukungan teknis dalam memilih pemanasan dan pendinginan perangkat untuk aplikasi tertentu.

c. Perangkat Lunak Data Akuisisi

Perangkat lunak adalah komponen penting dari setiap sistem akuisisi data yang terhubung ke komputer karena memungkinkan pengguna untuk berkomunikasi dan memanipulasi sistem. Umumnya terdapat dua bentuk perangkat lunak yang digunakan dalam hubungannya dengan sistem akuisisi data, perangkat lunak driver dan perangkat lunak aplikasi. Perangkat lunak driver memfasilitasi komunikasi antara perangkat keras akuisisi data, perangkat lunak sistem operasi komputer, dan perangkat lunak aplikasi. Aplikasi perangkat lunak menyediakan link antara pengguna dan sistem akuisisi data. Hal ini memungkinkan pengguna untuk mengkonfigurasi dan mengontrol perangkat keras akuisisi data, dan untuk membaca, menampilkan, menyimpan dan menganalisis pengukuran.

Sebagian besar vendor akuisisi data menyediakan perangkat lunak driver yang diperlukan untuk perangkat keras khusus mereka. Ada beberapa pilihan yang tersedia dalam hal perangkat lunak aplikasi. Dalam kebanyakan kasus, sebuah paket aplikasi perangkat lunak dapat dibeli langsung dari vendor perangkat keras akui-

sisi data. Sementara banyak dari paket-paket yang baik untuk aplikasi monitoring atau pengujian elementer, biasanya yang paling fleksibel untuk aplikasi pengujian atau pemantauan yang kompleks dengan struktur skala besar. Hal ini terutama berlaku jika aplikasi monitoring memerlukan integrasi sistem akuisisi data dari produsen yang berbeda. Pilihan lain adalah aplikasi perangkat lunak untuk mengembangkan program aplikasi kustom dari awal. Pilihan ini adalah yang paling mahal dan biasanya membutuhkan waktu pengembangan yang signifikan dan keahlian, namun akan menawarkan paling fleksibilitas dan kustomisasi. Sebuah pilihan terakhir adalah dengan menggunakan aplikasi pihak ketiga paket perangkat lunak, seperti LabVIEW dari National Instrument atau VEE dari Agilent Technologies. Paket-paket tertentu pemrograman grafis lingkungan yang relatif sederhana untuk belajar dan menerapkannya.

Parameter Data Akusisi untuk Monitoring Jembatan dan Aplikasi Pengujian

Ada beberapa parameter penting yang perlu dipertimbangkan sebelum memilih komponen akuisisi data untuk aplikasi pengujian dan monitoring jembatan. Secara historis, sebagian besar ketersediaan akuisisi data dari tempat penyimpanan perangkat keras dan sistem

yang dikembangkan dan dioptimalkan terutama untuk durasi pendek dan aplikasi pengujian laboratorium. Banyak dari sistem ini diperlukan modifikasi yang signifikan dan kustomisasi untuk memenuhi persyaratan yang lebih ketat terkait dengan pengujian dan monitoring di lapangan, terutama yang dilakukan selama durasi waktu yang signifikan dan melibatkan sensor yang didistribusikan pada jarak besar. Perbaikan terus-menerus dalam teknologi komputer dan pertumbuhan berkelanjutan dalam industri otomatisasi dan aplikasi monitoring telah menyebabkan pengembangan lebih fleksibel, keras dan handal yang secara signifikan lebih cocok untuk pengujian dan pemantauan jembatan. Berikut ini menjelaskan beberapa parameter penting yang biasanya menjadi ciri akuisisi data yang diperlukan untuk kebanyakan pengujian dan monitoring jembatan.

a. Jumlah sensor

Dalam setiap aplikasi pengujian atau pemantauan, jumlah sensor akan tergantung pada ukuran dan kompleksitas dari struktur dan pada kompleksitas perilaku yang sedang dievaluasi. Hal ini tidak biasa untuk aplikasi pengujian dan monitoring skala besar dan bahkan beberapa jembatan ukuran sedang yang memanfaatkan 100 atau lebih sensor. Karakteristik kinerja perangkat keras akuisisi data sering kali tergantung

pada jumlah saluran sensor sedang dipindai. Sebuah contoh umum berkaitan dengan *sampling rate* maksimum untuk sistem akuisisi data. Dikarenakan pertimbangan desain internal, laju sampling maksimum untuk kebanyakan sistem akuisisi data adalah nilai keseluruhan yang menurun dengan peningkatan jumlah saluran sensor. Oleh karena itu, dalam kasus di mana sejumlah besar sensor yang diperlukan, penting untuk mengidentifikasi adanya penurunan dalam kinerja sistem yang dapat menghasilkan dan mempertimbangkan bagaimana degradasi ini yang pada gilirannya akan mempengaruhi keandalan pengukuran. Modularitas adalah hal lain yang terkait dengan jumlah sensor yang digunakan. Sangat diharapkan bahwa perangkat keras akuisisi data dapat mengakomodasi tambahan sensor dengan mudah dan pembiayaan secara efektif setelah program monitoring telah dimulai, seperti ini sering diperlukan.

b. Tipe/Jenis Sensor

Jenis-jenis sensor yang akan digunakan akan menentukan banyak karakteristik yang dibutuhkan dari perangkat keras akuisisi data. Sebagai contoh, sebuah pengukur regangan resistansi memiliki karakteristik persyaratan output spesifik dan pengkondisian sinyal. Akuisisi data biasanya akan bervariasi untuk setiap jenis sensor yang digunakan. Selanjutnya,

dalam sebagian besar aplikasi, lebih dari satu jenis sensor akan dibutuhkan. Hal ini penting untuk memastikan bahwa karakteristik perangkat keras akuisisi data yang sesuai persyaratan untuk setiap jenis sensor sehingga pengukuran yang paling akurat dan diandalkan dapat diperoleh. Hal ini sering membutuhkan perangkat keras akuisisi data yang cukup fleksibel untuk mengakomodasi berbagai bentuk pengkondisian sinyal. Dalam beberapa kasus, penggunaan lebih dari satu jenis sistem akuisisi data dapat menawarkan solusi yang paling fleksibel dan pembiayaan yang efektif.

c. Mode Data Akuisisi

Ada dua tipe dasar mode akuisisi data, *polled* dan *event-based*. Pada mode *polled*, sistem akuisisi data umumnya dioperasikan secara kontinu dan sinyal sensor yang sesuai dikumpulkan dan dicatat secara waktu berkala. Sensor yang mengukur variabel fisik yang statis atau yang perlahan-lahan bervariasi dengan waktu yang sesuai untuk mode *polled* akuisisi data. Sebagai contoh, sinyal dari sensor suhu ambien dapat dikumpulkan dan dicatat pada setiap jam setiap hari dalam cara akuisisi data.

Pada akuisisi data *event-based*, sinyal sensor dikumpulkan hanya selama terjadinya beberapa peristiwa penting yang ditetapkan pengguna. Peristiwa penting ini dapat acak atau deterministik dan beberapa

contoh umum dari peristiwa tersebut meliputi kegiatan konstruksi, kontrol tes, sebuah truk berat melintasi jembatan atau suatu periode dengan volume lalu lintas berat, kecelakaan, dan kondisi lingkungan normal atau bencana alam seperti banjir, gempa bumi atau badai. Variabel fisik yang diukur oleh sensor selama terjadinya peristiwa seperti itu dapat berubah lambat atau cepat seiring waktu, tergantung pada kecepatan peristiwa.

Beberapa aplikasi pemantauan mungkin memerlukan sistem akuisisi data atau sistem yang dapat dioperasikan di kedua mode secara bersamaan, misalnya untuk mencegah hilangnya data *polled* selama peristiwa atau sebaliknya. Dalam peristiwa tersebut sistem akuisisi data yang dipilih tidak memiliki kemampuan ini, solusi alternatif dapat memanfaatkan sistem terpisah yang didedikasikan untuk akuisisi data *polled* dan *event-based*.

Mode akuisisi data yang digunakan akan mempengaruhi waktu dan karakteristik yang diperlukan untuk memicu sistem akuisisi data. Untuk akuisisi data *polled*, komponen waktu sistem harus akurat, dapat diandalkan dan stabil. Ini mungkin membutuhkan setiap jam internal yang digunakan oleh komputer atau perangkat keras akuisisi data yang secara teratur diperiksa dan disesuaikan untuk mempertahankan waktu yang akurat. Hal ini dapat

dilakukan secara manual atau dapat otomatis jika acuan waktu eksternal yang stabil dan akurat digunakan. Beberapa produsen GPS, seperti Trimble Navigasi, pasar perangkat yang dapat digunakan sebagai referensi waktu eksternal.

d. Kecepatan

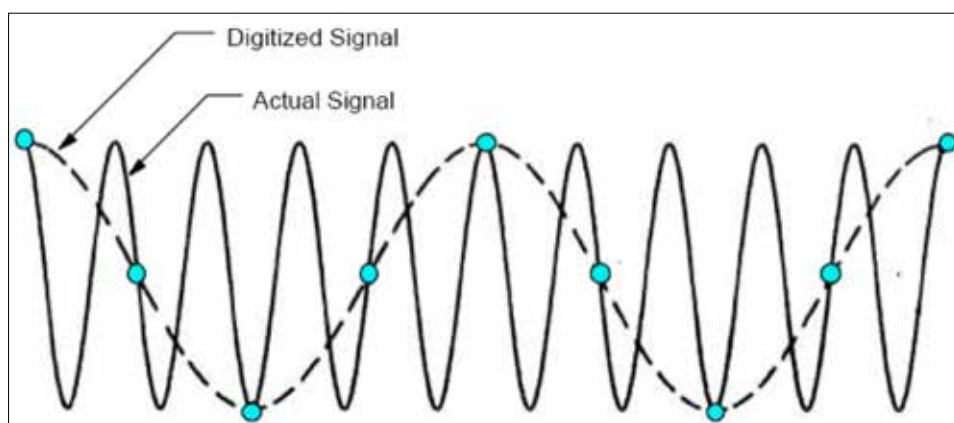
Ini merupakan parameter penting yang paling sering berhubungan dengan laju di mana sinyal sensor diambil oleh sistem akuisisi data. Hal ini dapat dianggap sebagai kecepatan pengukuran perangkat keras akuisisi data. kecepatan juga bisa menjadi atribut penting jika aplikasi memerlukan persyaratan *real-time* dari pengukuran untuk dukungan keputusan, yang mungkin menjadi kasus untuk beberapa proses atau aplikasi monitoring keamanan. Dalam hal ini, kecepatan adalah atribut yang mencerminkan tingkat di mana sinyal sepenuhnya melintasi jalur data dari sensor ke layar tampilan dan karena itu dipengaruhi oleh adanya kemacetan di jalur seluruh data. Pengukuran kecepatan yang dibutuhkan untuk perangkat keras akuisisi data adalah fungsi dari seberapa cepat variabel yang diukur akan bervariasi terhadap waktu. Seperti yang dibahas di bab sebelumnya variabel, yang konstan atau perubahan sangat lambat terhadap waktu dapat dianggap sebagai besaran ukur statis sedangkan variabel yang berbeda-beda

dengan cepat terhadap waktu dapat dianggap sebagai besaran ukur dinamis. Banyak aplikasi pengujian dan monitoring jembatan mungkin memerlukan kombinasi besaran ukur statis dan dinamis yang akan diperoleh pada waktu tertentu.

Kecepatan pengukuran untuk sistem akuisisi data biasanya dinyatakan dengan *sampling rate* nya. Hal ini penting untuk memperoleh perkiraan kecepatan atau kisaran kecepatan di mana besaran ukur akan berubah seiring waktu untuk memperoleh pengukuran yang akurat. Jika sensor tidak diambil sampel cukup cepat, yang dikenal sebagai *undersampling*, sinyal digital yang dihasilkan tidak akan akurat mewakili sinyal yang sebenarnya.

Selanjutnya, jika sinyal sensor tidak diambil sampel pada tingkat yang lebih besar dari dua kali frekuensi di mana sinyal yang sebenarnya berubah, fenomena yang disebut *aliasing* akan terjadi. *Aliasing* mendistorsi sinyal digital yang dihasilkan baik dalam frekuensi waktu domain dan hasil pada gambarannya sama sekali salah dari sinyal yang sebenarnya.

Efek *aliasing* sinyal dalam waktu domain yang digambarkan secara grafis dalam *Gambar 18*. Pada prakteknya, sinyal sering diambil sampel pada beberapa kali lebih besar dari frekuensi maksimum untuk mendapatkan representasi yang lebih akurat dari sinyal.



Gambar 18 Aliasing sinyal pada waktu domain (FHWA, 2002)

Kriteria Pemilihan Sistem Data Akuisisi

Ada sejumlah kriteria yang perlu dipertimbangkan ketika memilih sistem akuisisi data untuk aplikasi monitoring dan pengujian. Ini biasanya mencakup kriteria subyektif dan obyektif. Kriteria subyektif mencakup pertimbangan seperti ukuran dan keandalan ketersediaan, produsen dukungan teknis, kemudahan penggunaan, dan catatan yang terbukti sukses dalam menggunakan aplikasi yang serupa.

a. Architecture

Ada tiga jenis dasar dari arsitektur akuisisi data untuk dipertimbangkan ketika memilih perangkat keras akuisisi data. Ini termasuk: (1) perangkat pembacaan portabel (*portable readout devices*), (2) sistem *PC-based*, dan (3) sistem yang berdiri sendiri (*stand-alone system*). Karakteristik umum serta keuntungan dan keterbatasan dari setiap jenis dibahas berikut ini.

(i) Portable Readout Devices

Alat ini mudah dipindahkan dan sistem akuisisi data yang memungkinkan pengguna untuk terhubung ke sensor dan mendapatkan pembacaan dengan sedikit usaha dan dalam waktu yang sangat singkat. Alat biasanya sangat mudah dioperasikan

dan kebanyakan fitur dengan tampilan analog atau digital yang terintegrasi yang secara langsung akan menampilkan pembacaan sensor saat ini dalam unit teknik. Alat ini didukung oleh baterai internal yang, dapat diisi ulang. Beberapa perangkat memiliki memori internal yang akan memungkinkan sejumlah pembacaan sensor untuk disimpan dan kemudian diupload ke komputer untuk analisa lebih lanjut atau pengarsipan. Karena perangkat ini portabel, biasanya dapat dihubungkan ke sensor di lokasi instalasi sehingga menghindari kemungkinan kesalahan yang terkait dengan panjangnya kabel.

Meskipun perangkat ini umumnya kecil dan sangat portabel, biasanya hanya dapat dihubungkan ke satu sensor pada waktu tertentu. Selain itu, perangkat ini biasanya dioptimalkan untuk beroperasi dengan sensor kelas tertentu, seperti sensor *vibrating wire* atau sensor *electrical resistance*. Karena keterbatasan ini, perangkat pembacaan portabel tidak cocok melayani akuisisi data primer untuk sebagian besar aplikasi. Portabilitas dan kemudahan penggunaan karakteristik perangkat ini tidak membuatnya berguna dan dalam banyak kasus suatu keharusan untuk menginstal sensor dan untuk melakukan validasi dan cek kalibrasi berikutnya.

(ii) PC-Based Systems

Sistem *PC-based* adalah salah satu jenis yang paling banyak tersedia dari arsitektur akuisisi data. *PC-based* sistem akuisisi mengambil keuntungan dari perangkat keras internal komputer dan harus terus-menerus tersambung ke komputer dalam rangka untuk beroperasi. Perangkat ini umumnya tersedia dalam dua konfigurasi: perangkat internal dan eksternal.

Perangkat internal adalah *PC plug-in boards* yang langsung terhubung ke bus data komputer melalui slot ekspansi terbuka. *Plug-in boards* cenderung menawarkan kecepatan akuisisi data yang tinggi karena data bus langsung terkoneksi. Bagian dalam komputer adalah lingkungan elektrik terganggu yang dapat mempengaruhi sinyal sensor tingkat rendah. Kecilnya ukuran dari kebanyakan *plug-in boards* mensyaratkan bahwa terminal blok eksternal terhubung ke *board* yang akan digunakan untuk menghubungkan sensor utama. Selain itu, ukuran dari *broad* akan membatasi jumlah saluran dan jenis sensor yang dapat digunakan dengan *broad* tunggal. Sebagian besar komputer portabel tidak memiliki ukuran penuh slot ekspansi sehingga penggunaan perangkat internal dengan komputer notebook biasanya tidak mungkin.

Perangkat eksternal biasanya terdiri dari sebuah kotak atau casing yang berisi akuisisi data dan kartu pengkondisi-

sian sinyal. Perangkat ini secara signifikan lebih fleksibel dan menawarkan kemampuan monitoring jarak jauh yang lebih baik dari perangkat internal. Perangkat eksternal biasanya dipasang pada port komunikasi komputer. Dalam banyak kasus, perangkat eksternal dapat ditempatkan pada jarak yang signifikan jauh dari komputer *host*.

Ada banyak kemungkinan pilihan yang tersedia untuk perangkat eksternal dalam hal komunikasi dengan komputer *host*. Beberapa pilihan yang lebih umum termasuk koneksi port paralel, koneksi IEEE-488 (GPIB), koneksi port serial, Kartu PC (PCMCIA), koneksi port universal serial bus (USB), dan IEEE-1394 (Firewire). Paralel umumnya menawarkan kecepatan koneksi lebih cepat akuisisi data dari koneksi serial. Koneksi serial menawarkan kemampuan jarak jauh dan pilihan isolasi tidak tersedia dengan konfigurasi lainnya. Sebagian besar pilihan komunikasi yang kompatibel dengan komputer notebook memungkinkan perangkat eksternal agak portabel.

Kemampuan untuk menghubungkan perangkat eksternal akuisisi data melalui jaringan merupakan karakteristik yang sangat menguntungkan untuk aplikasi monitoring jembatan jangka panjang karena memungkinkan akuisisi data yang akan didistribusikan dan disebarkan melalui jarak

yang sangat besar. Pendistribusian akuisisi data cenderung untuk meminimalkan panjang kabel sehingga mengurangi tenaga kerja yang diperlukan untuk menginstal sensor dan sinyal yang merugikan dan efek gangguan yang berhubungan dengan panjang kabel. Hal ini juga jauh lebih mudah untuk mengintegrasikan beberapa sistem akuisisi data jika berbagi dengan platform jaringan yang umum dibandingkan jika setiap sistem memiliki platform komunikasi terpisah sendiri. Jaringan sistem akuisisi data juga menawarkan keuntungan tambahan dan pilihan sehubungan dengan pengendalian jarak jauh dan operasi, informasi layar, dan manajemen data terpusat.

(iii) Stand-Alone Systems

Sistem akuisisi data yang berdiri sendiri berbeda dari sistem *PC-based* yaitu tidak perlu terus-menerus terhubung ke sebuah komputer *host* untuk memperoleh data. Alat ini juga disebut sebagai dataloggers dan ideanya sering untuk aplikasi monitoring jarak jauh karena mereka dapat beroperasi secara independen. Kebanyakan sistem akuisisi data yang berdiri sendiri mengkonsumsi daya yang sangat kecil, dan dapat didukung oleh baterai yang diisi ulang menggunakan panel surya kecil. Sistem akuisisi data yang berdiri sendiri biasanya perlu sementara terhubung ke komputer sehingga mereka dapat dikonfigurasi dan

untuk mengambil data yang disimpan pada sistem memori internal. Koneksi dapat dibuat dari jarak jauh menggunakan berbagai macam pilihan komunikasi termasuk modem, radio nirkabel dan perangkat satelit, dan Internet. Jumlah memori onboard dan jumlah dan frekuensi rekaman pengukuran akan menentukan seberapa sering pengukuran harus diambil untuk mencegah penimpaan.

b. Signal Conditioning

Sinyal yang dihasilkan oleh kebanyakan sensor biasanya membutuhkan beberapa bentuk pengkondisian elektrik sehingga mereka sesuai dengan ADC. Pengkondisian sinyal dilakukan sebelum sinyal sensor adalah digital. Hasil output sinyal dari pengkondisi sinyal juga merupakan sinyal analog yang mempertahankan definisi karakteristik dari sinyal sensor. Berbagai jenis sensor memerlukan berbagai jenis pengkondisian sinyal. Oleh karena itu, penting untuk menetapkan persyaratan untuk setiap jenis sensor yang akan digunakan dan untuk memverifikasi bahwa pengkondisian sinyal yang disediakan oleh sistem akuisisi data memenuhi persyaratan ini. Tidak ada perangkat universal yang dapat memberikan pengkondisian sinyal yang diperlukan untuk setiap jenis sensor, dan beberapa komponen pengkondisian sinyal beberapa mungkin diperlukan. Pengkondisi

sinyal dapat menjadi komponen integral dari sistem akuisisi data, kartu *plug-in* yang ditambahkan ke casis sistem akuisisi data, atau perangkat sepenuhnya eksternal.

Hal ini penting untuk menentukan persyaratan pengkondisian sinyal untuk setiap jenis sensor yang akan digunakan sebelum memilih sistem data akuisisi. Persyaratan pengkondisian sinyal biasanya dapat mencakup sebagai berikut:

- ❖ Amplifikasi atau peredaman sinyal sensor
- ❖ Penyaringan komponen sinyal yang tidak diinginkan
- ❖ Isolasi sinyal sensor
- ❖ Fungsi *interfacing* sensor

Sebuah pengkondisian sinyal akan memperkuat sinyal sensor tingkat rendah atau melemahkan sinyal tegangan tinggi untuk meningkatkan resolusi pengukuran yang dihasilkan. Resolusi meningkat karena hasil sinyal yang diperkuat (atau dilemahkan) dapat memanfaatkan jangkauan sinyal penuh dari ADC. Selain itu, jika pengkondisian sinyal terletak sangat dekat dengan sensor, rasio ketergangguan sinyal meningkat karena sinyal pengukuran mendorong sebelum dapat dipengaruhi oleh sumber-sumber gangguan.

Penyaringan dari sinyal output sensor dapat meningkatkan akurasi pengukuran. Kebanyakan sinyal elektrik mengandung beberapa jumlah gangguan

yang tidak diinginkan. Gangguan tersebut biasanya merupakan hasil dari sumber frekuensi tinggi seperti saluran listrik AC (biasanya 60 Hz), generator, radio, atau mesin lainnya. Gangguan dapat memaksa pengukuran sinyal yang benar dengan memanfaatkan sebagian kecil dari rentang masukan ADC dan penurunan resolusi. Banyak pengkondisian sinyal termasuk saringan *lowpass* yang dirancang untuk menolak sinyal yang terjadi pada frekuensi yang lebih besar dari nilai potongan minimal. Saringan *lowpass* juga dapat mengurangi *aliasing* dengan menolak sinyal pada frekuensi yang lebih besar dari satu-setengah sampling frekuensi sebelum dikirim ke ADC.

Beberapa pengkondisian sinyal akan mengisolasi sinyal sensor dengan mentransfer sinyal dari sumber ke perangkat pengukuran tanpa menggunakan koneksi fisik atau galvanik. Ini melindungi elektronik sensitif dari efek *grounding* yang tidak tepat dan transien tegangan tinggi. Isolasi umumnya dicapai dengan menggunakan optik teknik, teknik kopling kapasitif, atau trafo.

Banyak sensor memiliki kebutuhan *interface* khusus yang diatasi oleh perangkat pengkondisian sinyal. Ini mungkin termasuk penyelesaian jembatan untuk sensor resistif seperti *strain gauges*, *cold-junction compensation* untuk termokopel,

demodulasi dari input AC seperti yang dari LVDT, konversi pengisian tegangan piezoelektrik, dan arus atau tegangan eksitasi eksternal untuk berbagai sensor. Perlu dicatat bahwa beberapa sensor, seperti DCDTs, mempunyai pengkondisian sinyal internal yang sangat menyederhanakan persyaratan *interface* untuk sistem akuisisi data.

c. Analog-to-Digital Converter

Sebuah konverter analog-ke-digital (ADC) merubah tegangan analog ke angka digital. Yang dihasilkan angka digital mewakili tegangan input dalam langkah-langkah diskrit dengan resolusi yang terbatas. Jenis ADC yang digunakan dalam sistem akuisisi data akan mempengaruhi baik kecepatan dan akurasi pengukuran. Untuk menentukan apakah ADC digunakan oleh sistem akuisisi data dapat diterima, penting untuk menetapkan persyaratan kecepatan dan resolusi untuk aplikasi yang diberikan.

Ada empat jenis ADC biasanya digunakan dalam kebanyakan sistem akuisisi data, yaitu konverter paralel (flash), konverter pendekatan berurutan, konverter tegangan ke frekuensi, dan konverter integrasi. ADC paralel biasanya yang tercepat, namun memiliki resolusi minimal. Integrasi ADC menawarkan resolusi tertinggi, tetapi jauh lebih lambat daripada pendekatan konverter paralel dan berturut-turut.

Konverter pendekatan berurutan yang relatif murah dan menawarkan keseimbangan yang baik dari kecepatan (10 kHz sampai 1 MHz) dan resolusi (8 sampai 16 bit) dan merupakan jenis ADC yang paling umum digunakan.

d. Kecepatan

Kecepatan adalah ukuran dari seberapa cepat akuisisi data diperoleh dan harus kompatibel dengan kecepatan di mana pengukuran berubah dalam waktu untuk memastikan pengukuran yang akurat. Karakteristik ini biasanya ditentukan sebagai *sampling rate* maksimum, dan dinyatakan dalam hal frekuensi (Hz). *Sampling rate* maksimum untuk sistem akuisisi data biasanya tergantung pada jenis ADC yang digunakan dan konfigurasi dari input.

Sebuah sistem akuisisi data umumnya akan memanfaatkan multiplexing baik pengambilan sampel atau sampling simultan. Multiplexing sampling, perangkat mekanis atau perangkat *solid-state* memperbolehkan ADC tunggal untuk mengukur banyak saluran input. *Sampling rate* maksimum dari sistem dalam hal ini biasanya dinyatakan sebagai suatu nilai keseluruhan. Nilai keseluruhan harus dibagi dengan jumlah total saluran input yang akan digunakan untuk memverifikasi akan kecukupan aplikasi tertentu. Dalam sistem akuisisi data dengan pengambilan sampel simultan, ADC

terpisah yang didedikasikan untuk setiap saluran input. Sistem ini sangat cepat tetapi juga sangat mahal.

e. Resolusi

Resolusi adalah properti ditentukan oleh sistem akuisisi data ADC. Ini mendefinisikan pengukuran perubahan terkecil dari sinyal input dan merupakan salah satu faktor yang menentukan akurasi pengukuran. Resolusi pada ADC adalah nilai yang mewakili jumlah langkah dimana jangkauan dari sinyal input dapat dibagi. Hal ini biasanya dinyatakan sebagai jumlah bit (n), dan memberikan langkah-langkah $2^n - 1$ atau nilai-nilai 2^n . Sebagai contoh, sebuah ADC dengan resolusi 8-bit akan membagi rentang input ke 28 atau 256 nilai. Sebuah ADC dengan resolusi yang lebih tinggi menawarkan lebih besar akurasi tetapi mungkin mengorbankan kecepatan. Resolusi merupakan ciri penting karena sebagian besar sinyal sensor analog terdefinisi, dan sebuah sinyal analog menyiratkan resolusi terbatas.

f. Akurasi

Akurasi keseluruhan dari sistem akuisisi data dipengaruhi oleh banyak faktor. Resolusi merupakan faktor penting, tetapi yang lain yang perlu dipertimbangkan termasuk kesalahan perolehan, kesalahan offset, kesalahan linearitas, penyimpangan

dan gangguan. Sebuah kesalahan perolehan terjadi ketika perubahan dalam hasil sinyal sensor dalam perubahan yang berbeda dalam nilai pengukuran, dan yang paling sering disebabkan oleh perubahan suhu lingkungan dan umur semikonduktor. Sebuah kesalahan offset adalah kesalahan dalam membaca ketika ada *zero input*, dan sama di semua tingkatan untuk berbagai masukan yang diberikan. Kesalahan linearitas terjadi ketika mendapatkan kesalahan bervariasi untuk tingkat input yang berbeda. penyimpangan adalah ketika kesalahan perolehan, offset, dan linearitas berubah dengan suhu perangkat akuisisi data dan dari waktu ke waktu. Gangguan adalah kesalahan acak karena sumber listrik dan perangkat elektronik. Gangguan cenderung meningkat dengan tingkat sampling yang lebih cepat dan sering jauh lebih besar dari resolusi ADC.

Sistem akuisisi data yang dipilih harus memiliki eksposur minimum untuk kesalahan ini. Dalam beberapa kasus, tidak mungkin untuk mencegah beberapa atau semua kesalahan ini. Hal ini menunjukkan bahwa sistem akuisisi data harus memiliki beberapa kemampuan kalibrasi internal untuk mengoreksi kesalahan ini. Kalibrasi manual dari sistem akuisisi data dapat juga diperlukan secara periodik jika pengalaman kesalahan sistem tidak dapat diatasi oleh proses kalibrasi internal.

g. Karakteristik Input

Ada sejumlah karakteristik input yang perlu dipertimbangkan ketika memilih sistem data akuisisi. Salah satu karakteristik yang harus diperhatikan adalah konfigurasi input. Dua konfigurasi input yang paling umum adalah *single-ended* dan diferensial. Sebagian besar sistem akuisisi data akan menawarkan masukan dalam penambahan 16 saluran *single-ended* atau 8 saluran diferensial. *Single-ended* input berbagi sinyal umum yang memanjang dari data ujung depan sistem akuisisi sampai ke sensor. Konfigurasi ini sangat rentan terhadap kesalahan *ground-loop* dan gangguan, dan digunakan hanya jika sensor elektrik terisolasi dari satu sama lain dan memiliki output tingkat tinggi. Diferensial input disusun sebagai pasangan sinyal dengan input terpisah dan garis kembali disediakan untuk setiap saluran. Diferensial input mewakili kompleksitas dan biaya per saluran yang lebih tinggi dibandingkan *single-ended* input, tapi menawarkan kekebalan gangguan yang lebih besar untuk pembacaan lebih akurat. Diferensial input harus digunakan untuk mengukur sinyal dengan mode umum tegangan yang besar, ketika sensor tidak berbagi daerah yang umum, dan ketika sensor secara fisik jauh dari sistem akuisisi data.

Karakteristik lain yang perlu dipertimbangkan adalah rentangan input. Sistem

akuisisi data harus dapat mengakomodasi berbagai rentang masukan, karena sinyal sensor memerlukan berbagai macam, seperti 0 sampai 10V sementara yang lain mungkin hanya memerlukan rentang kecil, di urutan milivolt. Selanjutnya, rentang input harus diprogram, baik dengan menggunakan perintah perangkat lunak atau dengan menetapkan jumper pada perangkat keras. Hal ini karena rentang skala penuh harus di set ke nilai terkecil yang akan mencakup aplikasi. Hal ini akan meningkatkan akurasi pengukuran sejak resolusi ADC adalah tetap. Rentang input dapat unipolar atau bipolar. Rentang unipolar menerima sinyal yang hanya positif atau hanya negatif. Rentang bipolar akan menerima sinyal yang berkisar dari nilai-nilai negatif ke positif.

Karakteristik akhir untuk dipertimbangkan adalah impedansi input. Impedansi input beban tambahan pada sinyal input. Hal ini dapat mengakibatkan sejumlah besar redaman, terutama jika impedansi gabungan dari sensor dan kabel yang sangat tinggi. ■

Bab 4

Penutup

Pembangunan jembatan bentang panjang beserta teknologinya harus diikuti dengan perkembangan dalam bidang teknologi perencanaan, operasi dan pemeliharaan. Jembatan bentang panjang membutuhkan teknik pemeriksaan dan penanganan yang lebih rumit akibat perilaku struktur yang khusus. Oleh karena itu diperlukan suatu sistem monitoring kinerja dari jembatan bentang panjang yang dapat berfungsi sebagai sistem peringatan dini apabila perilaku struktur telah menunjukkan tanda-tanda yang membahayakan baik dari sisi pelayanannya maupun dari sisi strukturalnya.

Seiring dengan penambahan usia suatu struktur, terjadi penurunan kinerja struktur tersebut. Akibatnya diperlukan penilaian kondisi untuk mengetahui sejauh mana penurunan itu terjadi. Hal tersebut berlaku pada jembatan khususnya jembatan bentang panjang dengan struktur yang kompleks. Penilaian kondisi ini dimulai ketika adanya perubahan struktur. Perubahan ini dapat berupa kerusakan struktural yang prosesnya tergantung pada waktu (mis: korosi dan kele-

lahan (*fatigue*), akibat pembebanan (mis: peningkatan beban lalu lintas), akibat adanya kecelakaan, dan/atau penambahan umur layan jembatan. Selain itu, penilaian kondisi ini dilakukan juga untuk menganalisis keandalan struktur saat ini, misalnya akibat adanya bencana alam seperti gempa dan angin topan. Penilaian kondisi ini dapat dimenggunakan SHMS, dimana penilaian dilakukan dengan bantuan sistem untuk mempermudah penilaiannya.

Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam SHMS ini adalah pemilihan sensor. Dimana komponen sensor dan data akusisi dipilih dari yang tersedia secara komersial dan terbukti, serta pengkondisian sinyal dan sistem data akusisi berdasarkan karakteristik fisik, listrik, dan termodinamika.

Pengkajian ini mengenai penilaian kondisi jembatan bentang panjang dan kriteria dari sensor dan akusisi data

untuk aplikasi pengujian dan monitoring jembatan. Pengkajian dilakukan dengan membandingkan referensi yang berhubungan dengan hal tersebut dan menghasilkan kesimpulan bahwa : 1) penilaian kondisi sangat bergantung pada metodologi yang dipakai, dimana harus mempertimbangkan metode akusisi data, analisis struktur dan memverifikasi keandalan struktur; 2) Kriteria pemilihan sensor harus mempertimbangkan karakteristik kinerja sensor (misalnya sensitifitas, resolusi, rentang,dll), batasan lingkungan untuk penempatan sensor (misalnya rentang temperatur dan kelembaban, ukuran, efek termal, dll), serta pertimbangan ekonomi; 3) Kriteria pemilihan akusisi data sangat tergantung pada parameter akusisi data (misalnya jumlah dan tipe sensor), *architecture*, *signal conditioning*, *analog-to-digital converter*, kecepatan, resolusi, akurasi dan karakteristik input. ■

Daftar Pustaka

- Andersen, Jacob E., and Mario Fustinoni. 2006. *Structural Health Monitoring System*. Kongens Lyngby, Denmark: COWI A/S dan Futurtec OY.
- Aktan, A.Emin, F. Necati Catbas, Kirk A. Grimmelsman, 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).
- Nababan, Poltak H.A. 2008. “*Structural Health Monitoring System Alat Bantu Mempertahankan Usia Teknis Jembatan*.” Seminar Construction and Maintenance of Main Span Suramadu Bridge.
- Rücker, W., F. Hille, dan R. Rohrman. 2006. *F08a: Guideline for Assessment of Existing Structures*. Berlin: SAMCO. http://www.samco.org/network/download_area/ass_guide.pdf (diakses tahun 2011).
- Wenzel, Helmut. 2009. *Health Monitoring of Bridges*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons.



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