

ISBN : 978-602-9042-25-2

PROSIDING

Seminar Nasional Transportasi yang Berkelanjutan

Lt. 3 Gedung Pasca Sajana
Kampus Universitas Udayana
Jl. Jend. Sudirman Denpasar - Bali
6 Mei 2011



Forum Studi
Transportasi antar
Perguruan Tinggi

Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik
Universitas Udayana

**“Perencanaan Pembangunan Transportasi
yang Berkelanjutan dan Terpadu
Berbasis Kearifan Lokal dan Kebijakan
Pembangunan Transportasi Nasional”**

didukung oleh :

MMC

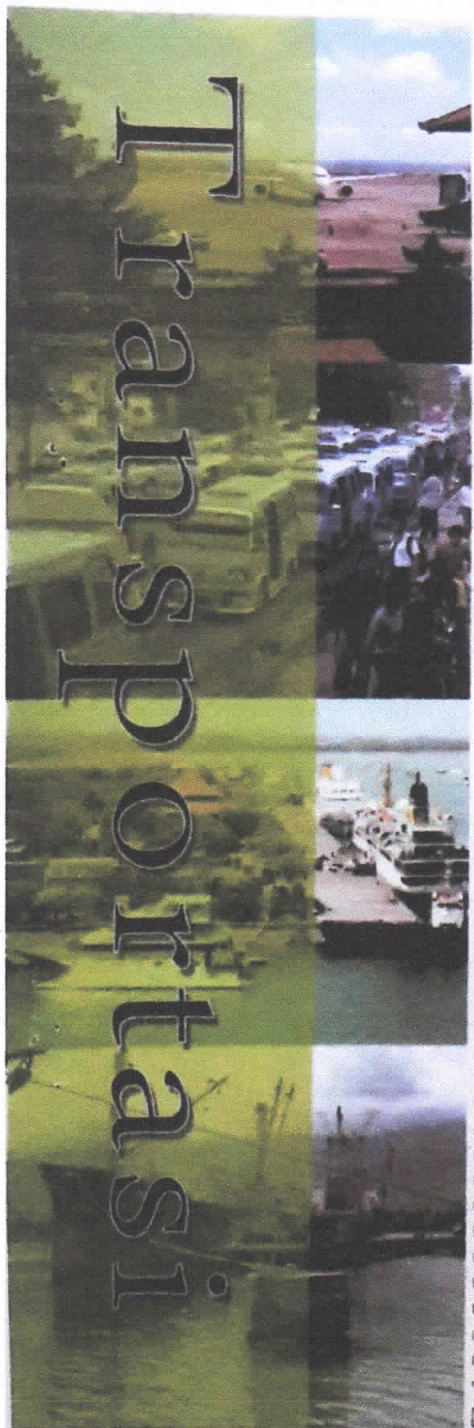
The Mike McKenna Consultancy



PT. Putra Inti Lumayan

SB
readymix

PT. Sinarbali Binakarya



Daftar Isi

	Hal.
Kata Pengantar Ketua Panitia	i
Daftar Isi	ii
<hr/>	
Pengembangan Sistem Jaringan Transportasi Yang Memperhatikan Konsep Transportasi Berkelanjutan Dan Kearifan Lokal Di Pulau Bali Ofyar Z Tamin. , Dimas B.E. Dharmowijoyo	P-1
Pengembangan Infrastruktur Transportasi Berbasis Budaya Bali I Gusti Made Putra	P-18
Kebutuhan Pengembangan Transportasi Yang Berkelanjutan Di Provinsi Bali Putu Alit Suthanaya	P-27
<hr/>	
Studi Laboratorium dan Aplikasi Lapangan Campuran Aspal Emulsi Dingin dengan Mempergunakan Agregat Bekas Thanaya, I.N.A., Widiarta, I.B.P	T-1
Kajian Prioritas Peningkatan Pelayanan Transportasi Kota Padang Pasca Gempa 30 September 2009 Miro, F	T-13
Penataan Kawasan Pusaka Budaya (<i>Heritage</i>) Jalan Gajah Mada Denpasar Suparsa, I.G.P	T-20
Peranan Infrastruktur Transportasi dalam Pertumbuhan dan Pemerataan Ekonomi Sugupta, D.P.G	T-31
Studi Kawasan Kebisingan Bandar Udara Mopah Merauke Tjaronge, M.W., Harianto, T., Dinaulik, E	T-42
Evaluasi Awal Pemasangan Structural Health Monitoring System pada Jembatan SURAMADU Sutandi, A.C., Pratama,	T-63
Pembangunan Transportasi Berkelanjutan dengan Keseimbangan Sarana dan Prasarana dalam Pelayanan Angkutan Kota Wahyuningtyas, C., Dewantara A, B.G	T-73
Analisis Ekonomi Pembangunan Pelabuhan Amed di Kabupaten Karangasem Bali Sudarsana, D.K., Adnyana, I.B.P	T-89
Kinerja Simpang Jalan Sudirman-Jalan Untung Suropati di Kota Kupang Wikrama, A.A.N.A.J., Ariawan, I.M.A	T-107
Analisa Perhitungan Biaya Ekonomi Masyarakat Pemakai Jasa Angkutan Umum (MPU) di Kabupaten Bojonegoro Widyastuti, H., Herjanto, W., Wicaksono, A., Indrawati, M.U.K	T-121
Simulasi Pemodelan Pemilihan Moda antara Angkutan Umum dengan Sepeda Motor dengan Menggunakan Algoritma Genetika Riyanto, B., Basuki, K.H	T-130
Pemodelan Kebutuhan Parkir Perkantoran Kota Padang	T-139

Komite Ilmiah

1. Prof. Dr. Ir. Agus Taufik Mulyono, MT.
2. Prof. Dr.-Ing. Ir. Ahmad Munawar, MSc.
3. Prof. Ir. Wimpy Santosa, M.Sc, Ph.D.
4. Ir. Leksmono Suryo Putranto, MT, Ph.D.
5. Ir. Nyoman Arya Thanaya, ME, Ph.D
6. Putu Alit Suthanaya, ST, MEng.Sc, Ph.D
7. Dr. Ir. Nyoman Budiarta, M.Sc
8. Ir. I Wayan Suweda, MSP, M.Phil, MIHT.
9. Dewa Made Priyantha Wedagama, ST, MT, M.Sc, Ph.D.

EVALUASI AWAL PEMASANGAN *STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEM* PADA JEMBATAN SURAMADU

A. Caroline SUTANDI

Jurusan Teknik Sipil

Fakultas Teknik

Universitas Katolik Parahyangan

Ciumbuleuit 94 Bandung 40141

Indonesia.

Fax: +62 22 233692

Email: caroline@home.unpar.ac.id

Bram PRATAMA

Jurusan Teknik Sipil

Fakultas Teknik

Universitas Katolik Parahyangan

Ciumbuleuit 94 Bandung 40141

Indonesia.

Fax: +62 22 233692

Abstrak

Infrastuktur jalan adalah bagian penting dari pengembangan aktivitas-aktivitas sosial dan ekonomi masyarakat. Lebih jauh jembatan sebagai bagian dari infrastuktur jalan juga merupakan bagian penting dalam mendukung pengembangan aktivitas-aktivitas tersebut. Sampai saat ini Jembatan Suramadu dengan umur rencana 100 tahun adalah jembatan terpanjang di Indonesia. Jembatan ini menghubungkan Kota Surabaya di Pulau Jawa dan Kabupaten Bangkalan di Pulau Madura. Jembatan ini dibangun untuk mendukung pengembangan infrastuktur, sosial dan ekonomi di Pulau Madura yang masih tertinggal dibandingkan dengan wilayah lain di Propinsi Jawa Timur. Untuk mendukung sistem pemeliharaan struktur jembatan, pada jembatan ini dipasang *Structural Health Monitoring System (SHMS)*. SHMS adalah sistem monitoring untuk deteksi awal dalam mengetahui adanya indikasi kerusakan pada struktur jembatan sehingga perbaikan dapat segera dilakukan sebelum kerusakan parah terjadi. Walaupun demikian, belum diketahui apakah sistem ini bekerja dengan baik dalam memonitor kesehatan struktur jembatan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan evaluasi awal dari pemasangan SHMS di Jembatan Suramadu, sehingga jembatan dapat berfungsi sebagaimana mestinya. Agar SHMS dapat bekerja secara efektif, maka sejumlah sensor sebagai instrumen detektor dipasang dengan jumlah tertentu di lokasi penempatan yang benar. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa sejumlah sensor yang dipasang tidak sesuai dengan jumlah dan penempatan lokasi sesuai rencana semula sehingga dapat menimbulkan akibat yang merugikan kondisi jembatan.

Kata kunci: Evaluasi Dini, Pemasangan *Structural Health Monitoring System*, Jembatan Suramadu.

PENDAHULUAN

Jembatan Suramadu adalah jembatan yang menghubungkan Kota Surabaya di Pulau Jawa dan Kabupaten Bangkalan di Pulau Madura. Jembatan ini adalah jembatan terpanjang di Indonesia (5438 m) (Ismail, 2009) dengan menerapkan teknologi tinggi. Pembangunan Jembatan Suramadu bertujuan untuk mengembangkan dan meningkatkan berbagai sektor kehidupan, meliputi bidang infrastuktur dan ekonomi Pulau Madura, yang relatif tertinggal dibandingkan kawasan lain di Jawa Timur. Secara geografis Pulau Madura bisa menjadi daerah penyangga pengembangan wilayah Gerbangkertosusila (Gresik, Bangkalan, Mojokerto, Surabaya, Sidoarjo, Lamongan) yang dirasakan sudah cukup padat (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2007, 2010; Suangga, dkk, 2007).

Saat ini satu-satunya akses dari Surabaya ke Pulau Madura dan sebaliknya hanya melalui penyeberangan kapal ferry Perak – Kamal dimana kondisinya sudah cukup padat.

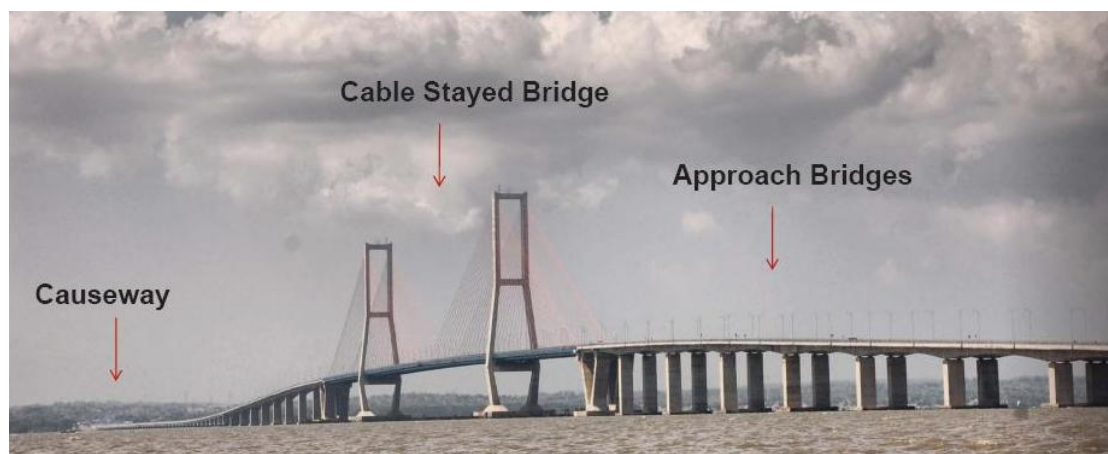
Selain menjadi salah satu faktor pendukung yang akan memberikan keunggulan komparatif untuk meningkatkan status sosial dan kesejahteraan (Suangga, dkk, 2007) di Pulau Madura, pembangunan jembatan ini diharapkan menjadi era baru bagi dunia transportasi di Indonesia, dan menjadi *landmark* kebanggaan Bangsa Indonesia (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2007).

Sebagai jembatan yang memiliki panjang bentang besar (5438 m) dan umur rencana 100 tahun, Jembatan Suramadu harus dilengkapi dengan fasilitas penunjang jembatan yang berteknologi tinggi untuk mempertahankan usia rencananya, yaitu dengan pemasangan *Structural Health Monitoring System (SHMS)* (Ismail, 2009). *SHMS* adalah suatu sistem yang bertujuan untuk menyediakan informasi atau memonitor semua hal yang berkaitan dengan operasional dan pemantauan kondisi kesehatan dari suatu struktur, serta membantu melakukan tindakan koreksi melalui perintah secara manual maupun secara otomatis oleh beberapa peralatan yang ada (Suhendro, 2010). *SHMS* memonitor kondisi Jembatan Suramadu di bagian *main bridge*, yang berstruktur kabel. Pemanfaatan *SHMS* ini diharapkan tidak hanya mempertahankan mutu dari Jembatan Suramadu, tetapi juga dapat mengurangi biaya perbaikan dan pemeliharaan dari Jembatan Suramadu.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan evaluasi awal dari pemasangan *SHMS* di Jembatan Suramadu, sehingga jembatan dapat berfungsi sebagaimana mestinya. Agar dapat bekerja efektif dalam memonitor kondisi Jembatan Suramadu, jumlah dan lokasi sensor-sensor *SHMS* harus sesuai dengan tujuan dipasangnya sensor-sensor tersebut. Penempatan lokasi dan jumlah sensor yang tidak tepat dapat membuat kinerja *SHMS* menjadi tidak efektif.

STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEM PADA JEMBATAN SURAMADU

Jembatan Suramadu adalah jembatan terpanjang di Indonesia saat ini. Jembatan ini terdiri dari tiga bagian yaitu jalan layang (*causeway*), jembatan penghubung (*approach bridge*), dan jembatan utama (*main bridge*). Pada jembatan utama (*main bridge*), struktur yang digunakan adalah struktur kabel (*cable stayed bridge*). Jembatan Suramadu terdiri dari 4 (empat) lajur cepat dan 2 (dua) lajur darurat untuk kendaraan roda empat serta 2 (dua) lajur sepeda motor (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2007). Gambar 1 menunjukkan bagian-bagian dari Jembatan Suramadu.



Gambar 1 Bagian-bagian Jembatan Suramadu (Suhendro, 2010)

Pembangunan jembatan ini dilakukan dari tiga sisi, dari sisi Bangkalan, dari sisi Surabaya, dan secara bersamaan juga dilakukan pembangunan bentang tengah yang terdiri dari *main bridge* dan *approach bridge*. Data teknis Jembatan Suramadu dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Data Teknis Jembatan Suramadu (Suhendro, 2010)

No.	Uraian	Disain
1	Panjang Total Jembatan	5438 m
2	Lebar Jembatan	2 x 15.0 m
3	Lajur Kendaraan	2 x 2 x 3.50 m
4	Lajur Lambat/Darurat	2 x 2.25 m
5	Lajur Sepeda Motor	2 x 2.75 m
6	Kelandaian Maksimum	3 %
7	Jalan Pendekat Sisi Surabaya	4.35 km
8	Jalan Pendekat Sisi Madura	11.50 km
9	Cause Way	1822.25 m + 1457.75 m
10	Approach Bridge	670 m + 670 m
11	Main Bridge	818 m

Structural Health Monitoring System (SHMS)

SHMS mendeteksi kerusakan dengan metoda pengujian tak rusak dengan cara mengintegrasikannya dengan struktur untuk memonitor kesehatan dari jembatan secara keseluruhan maupun secara parsial (Nababan, 2008, 2009, 2010). Teknologi ini dapat memperpanjang umur pelayanan jembatan karena penurunan kemampuan dan kerusakan dapat diidentifikasi lebih awal sebelum terjadinya kerusakan yang lebih parah yang membutuhkan biaya rehabilitasi yang sangat besar. *SHMS* ini didefinisikan sebagai “penggunaan secara *in-situ*”, penginderaan tak rusak dan analisis karakter struktur, termasuk respon struktur untuk mendeteksi perubahan yang mengindikasikan adanya kerusakan atau penurunan kemampuan struktur.

Dengan perencanaan yang seksama di dalam penempatan instrumen atau sensor maka *SHMS* ini dapat mengumpulkan data yang diperlukan tentang kondisi jembatan seperti *stress*, *strain*, defleksi, temperatur, dan *time-dependent properties* seperti *creep* dan *shrinkage* pada struktur. Data tersebut juga dapat digunakan untuk mem-*verifikasi* asumsi-asumsi yang dibuat dalam disain sehingga dapat dilakukan perbaikan pada disain jembatan berikutnya, menilai kondisi umum dari jembatan-jembatan, dan menyediakan data bagi *infrastructure management system* untuk pengambilan keputusan (Suhendro 2010). Dengan tersedianya teknologi untuk *SHMS* maka disain *SHMS* sesuai kebutuhan, jumlah, dan spesifikasi sensor-sensor yang tepat akan mendukung kondisi jembatan/infrastruktur.

Tujuan pemasangan *SHMS* adalah:

- Menginformasikan kondisi struktur jembatan;
- Mewujudkan perencanaan pemeliharaan yang rasional dan ekonomis;
- Mendapatkan pelayanan struktur yang aman dan ekonomis;
- Mengidentifikasi penyebab kondisi struktur yang tidak layak;
- Memberikan peringatan dini apabila terjadi hal yang mengancam keselamatan dan berkurangnya kenyamanan pada pemakai jembatan;

Sesuai dengan tujuan pemasangannya, maka ada beberapa pilihan level monitoring yang dapat diambil (Farhey, 2005 dan 2006). Level tersebut tergantung pada parameter-parameter yang akan dimonitor. Level *Structural Health Monitoring System (SHMS)* diklasifikasikan kedalam 4 kelas, yaitu:

- Kelas 1 dengan kebutuhan penting untuk semua jenis jembatan;
- Kelas 2 dengan kebutuhan perlu untuk *Optimal Structural Health Monitoring System*;
- Kelas 3 dengan kebutuhan perlu untuk *minimal maintenance*;
- Kelas 4 dengan kebutuhan baik untuk diketahui.

Berdasarkan klasifikasi tersebut, dibuat tingkatan atau *level* dari *SHMS* yang kemudian dibagi atas 3 tingkatan atau *level*. *Basic level* merupakan gabungan dari kelas 1 dan kelas 2, *Intermediate level* merupakan gabungan dari kelas 1, kelas 2, dan kelas 3, sedangkan *Advance level* merupakan keseluruhan dari kelas 1 sampai dengan kelas 4.

SHMS merupakan suatu pendekatan yang terintegrasi dari sistem yang multidisiplin, dengan melibatkan teknologi penginderaan (*sensing technology*), teknologi listrik (*power technology*), teknologi komunikasi (*network technology*), teknologi penyimpanan (*storage technology*), pemrosesan sinyal (*signal processing*), dan algoritma evaluasi kesehatan infrastruktur (*health evaluation algorithm*) (Nababan, 2008, 2009, 2010).

Secara umum, sensor dan peralatan dalam *SHMS* dapat dikategorikan menjadi 3 bagian. Yang pertama adalah sensor terkait dengan beban hidup atau mati, seperti *Anemometer*, *Temperature Sensor*, *Weight-in-Motion*, *Seismic Sensor*. Kedua adalah sensor yang terkait dengan respon struktur jembatan, seperti *Accelerometer*, *Strain Gauge*, *Global Positioning System (GPS)*, *Displacement Transducer*, *Inclinometer*. Dan ketiga adalah *Corrosion Cells*, *Digital Video Camera*.

Pemasangan *SHMS* pada Jembatan Suramadu

Pada Jembatan Suramadu, *level SHMS* yang diaplikasikan adalah *level intermediate*, di mana monitoring dilakukan dengan bantuan sistem, tetapi inspeksi dilakukan secara manual. Sedangkan parameter yang diukur adalah vibrasi untuk mengetahui pola getar dari badan jembatan, deformasi jembatan untuk mengetahui lendutan badan jembatan, *strain* untuk mengetahui regangan dari komponen-komponen utama jembatan, dan tegangan kabel.

Sensor-sensor di Jembatan Suramadu adalah *Anemometer*, *Air Temperature and Relative Humidity*, *Global Positioning System*, *Weight in Motion*, Sensor Elektromagnetik, *Accelerometer*, Sensor Rotasi, *Displacement Transducer*, dan *Digital Video Camera*. Sensor-sensor tersebut memiliki fungsi berbeda-beda, yang akan disusun menjadi sebuah rangkaian sistem pemeliharaan jembatan.

Anemometer bertujuan untuk mendapatkan kecepatan dan arah angin pada suatu titik acuan. Data yang dihasilkan dapat digunakan untuk menghitung kecepatan rata-rata angin, kekuatan angin dan turbulensinya. Hasil yang didapat akan menentukan batas keamanan, baik untuk kendaraan roda 4 atau roda 2 yang masuk ke jembatan sekaligus sebagai sistem peringatan dini akan terhubung dengan *toll gate*. Jika batas angin melebihi kecepatan ambang batas maka pintu akan tertutup secara otomatis.

Air Temperature and Relative Humidity (ATRH) bertujuan untuk memonitor suhu dan kelembaban udara sekitar. *ATRH* dipasang pada bagian elemen struktur jembatan untuk mengetahui perbedaan temperatur dari masing-masing bagian atau posisi. Temperatur yang diukur adalah pada bagian beton dan *steel box girder*.

Weight in Motion System (WIM) berfungsi untuk mengumpulkan data besarnya volume lalu lintas, beban, dan kecepatan kendaraan untuk keperluan statistik. Perletakan *WIM* adalah sebelum *causeway* untuk 3 jalur termasuk jalur darurat pada kedua sisi, sisi Surabaya dan sisi Madura. Hal ini karena pengulangan pembebanan yang melebihi ketentuan pada waktu yang pendek akan mengakibatkan regangan kumulatif yang akan mengakibatkan menurunkan elastisitas beton, di samping itu akan mengakibatkan tidak berfungsinya sensor karena melebihi kapasitasnya.

Global Positioning System bertujuan untuk mendapatkan data pergeseran posisi dari beberapa titik yang menjadi acuan dari elemen-elemen jembatan secara 3 dimensi dalam kondisi lama dan *real time*, parameter dinamis, dan pengaruh kondisi sekitar. Sedangkan Sensor Rotasi bertujuan untuk mengetahui dan mengukur rotasi dari sebuah elemen jembatan berkenaan dengan suatu angka datum yang diwakili oleh vektor gaya gravitasi.

Displacement Transducer bertujuan untuk mendapatkan pergerakan dari konstruksi pylon jembatan. *Accelerometer* digunakan untuk mengukur/mengetahui getaran yang terjadi pada jembatan khususnya pada elemen pylon, kabel, dan dek jembatan. Juga untuk mengukur respon jembatan khususnya pada saat terjadi gempa. Sedangkan *Electromagnetic Sensor* bertujuan untuk mendapat parameter kekuatan kabel yang selanjutnya akan ditransmisikan ke unit pengumpul data ke data *processing unit* untuk dapat divisualisasikan ke *monitoring room*.

Digital Video Camera bertujuan untuk mengetahui kondisi jembatan secara visual dan pengamatan lalu lintas kendaraan yang melewati jembatan secara *real time*. Juga dimaksudkan untuk memonitor keamanan dan keselamatan jembatan serta terhadap jalur navigasi/pelayaran yang melewati Jembatan Suramadu. Penempatan kamera akan diatur agar bisa mencakup keseluruhan jembatan.

PENGUMPULAN DATA

Data terdiri data jumlah dan data lokasi penempatan sensor *SHMS* di Jembatan Suramadu yang terdiri dari data sensor *Anemometer*, *AT&RH*, *GPS*, *WIM*, Sensor Elektromagnetik, *Accelerometer*, Sensor Rotasi, *Displacement Transducer*, dan *Digital Video Camera*. Sebagian besar sensor sudah dipasang dengan jumlah yang sesuai dengan disain tetapi karena keterbatasan dana maka ada sensor-sensor yang belum dipasang sesuai disain. Data sensor-sensor tersebut disajikan dalam Tabel 2.

METODE DAN EVALUASI AWAL

Evaluasi awal dalam penelitian ini menggunakan metode perbandingan. Jumlah dan lokasi eksisting sensor-sensor *SHMS* akan dibandingkan dengan desain awal dan tujuan pemasangan sensor-sensor tersebut. Setelah itu, akan dianalisis kemungkinan-kemungkinan yang akan terjadi. Lebih jauh, detail evaluasi awal adalah sebagai berikut:

Tabel 2 Data Sensor SHMS di Jembatan Suramadu (Energikon, 2010)

Sensor	Type	Jumlah Desain	Jumlah Eksisting
<i>Anemometer</i>	<i>Bi-Axial Ultrasonic</i>	2	1
	<i>Tri-Axial Ultrasonic</i>	2	2
ATRH	<i>Pylon</i>	4	2
	<i>Girder</i>	2	2
GPS	<i>Rover Station</i>	10	6
	<i>Rover Station</i>	4	4
	<i>Reference Station</i>	2	2
WIM System	-	2	2
EM Sensor	-	32	24
Accelerometer	Single-Axial Servo (girder)	9	2
	Single-Axial Servo (pilon)	2	2
	Bi-Axial Servo (girder)	8	10
	Bi-Axial Servo (pilon)	2	2
	Tri-Axial Servo (girder)	1	1
	Sensor Rotasi (pilon)	16	12
<i>Displacement Transducer</i>	(girder)	4	4
	(pilon dan girder)	4	4
<i>Digital Video Camera</i>	Kondisi seluruh jembatan	4	4
	Kondisi lalintas di jembatan	14	2
	Kendaraan yang overload	2	2
	Kondisi lalulintas di laut	2	2

a. Anemometer

Tri-Axial Ultrasonic Anemometer dipasang sesuai dengan desain awal, yaitu berjumlah dua buah dan diletakkan di kedua sisi di tengah *main bridge* karena kecepatan angin di lokasi ini diperkirakan merupakan yang terbesar di jembatan. Selain berfungsi untuk memonitor kondisi jembatan akibat beban angin, *Anemometer* ini juga berfungsi untuk keselamatan pengendara. Jika *Anemometer* sudah mengukur kecepatan angin tertentu yang membahayakan pengemudi, terutama pengemudi sepeda motor, maka akan dilakukan penutupan sementara gerbang tol.

Bi-Axial Ultrasonic Anemometer yang terpasang di Jembatan Suramadu berjumlah satu buah. *Anemometer* tersebut dipasang di atas salah satu pylon, yaitu pylon yang lebih dekat ke arah Surabaya sehingga kondisi beban angin di pilon sisi Madura tidak diketahui. Sedangkan pada desain awal tercantum seharusnya dua buah *Bi-Axial Ultrasonic Anemometer* yang terpasang di kedua pylon. Data arah dan kecepatan angin di pylon sangat diperlukan untuk mengantisipasi *atmospheric swirl*.

b. Air Temperature and Relative Humidity (AT&RH)

AT&RH di girder Jembatan Suramadu sudah dipasang dua buah, sesuai rencana, yaitu di tengah bentang tengah. AT&RH di pylon Jembatan Suramadu baru dipasang dua buah dari 4 buah sesuai disain (2 di atas setiap tumpuan deck pylon dan 2 di setengah tinggi pylon), yaitu masing-masing di atas tumpuan deck di dalam pylon. Kelembaban di dalam pylon penting karena di dalam pylon terdapat angkur kabel jembatan yang jika nilai kelembaban tinggi maka dapat menyebabkan angkur kabel berkarat dan membahayakan struktur kabel jembatan.

Sampai dengan saat ini, pemasangan Sensor AT&RH dirasakan cukup untuk memonitor kondisi kelembaban di seluruh bagian pylon. Pada kondisi normal nilai kelembaban di girder berada di kisaran 30%, sedangkan di pylon berada di kisaran 60%. Nilai kelembaban ini masih berada di bawah nilai kelembaban ekstrim yang dapat menyebabkan besi berkarat, yaitu 80%. Dengan jumlah dan lokasi AT&RH saat ini, *monitoring* nilai kelembaban di girder dan pylon masih dapat dilakukan dengan baik.

c. Global Positioning System (GPS)

4 buah GPS (di atas masing-masing pylon) untuk mengetahui pergeseran horisontal pylon dan 2 buah GPS (di sisi Surabaya dan di sisi Madura) untuk mengetahui pergeseran absolut jembatan sudah dipasang sesuai dengan desain awal. Sedangkan GPS yang dipasang di jembatan utama untuk mengetahui pergeseran horisontal pada deck jembatan adalah enam buah, masing-masing dua buah di seperempat bentang dan dua buah di tengah bentang, dari 10 buah GPS sesuai disain. Dengan kondisi eksisting, data pergeseran horisontal pada deck Jembatan Suramadu tetap dapat diketahui walaupun jarak antar GPS menjadi lebih panjang.

d. Weight In Motion (WIM)

Jumlah dan lokasi WIM di Jembatan Suramadu sudah sesuai dengan desain awal, yaitu satu buah di sebelum gerbang tol sisi Surabaya dan satu buah di sebelum gerbang tol sisi Madura. Pemilihan lokasi WIM ini adalah agar Jembatan Suramadu terhindar dari kendaraan yang *overload*, yang dapat menimbulkan efek-efek yang mengganggu kondisi jembatan. Kendaraan-kendaraan yang oleh WIM dinilai *overload* dapat diminta untuk berputar dan tidak memasuki Jembatan Suramadu.

e. Sensor Elektromagnetik (EM Sensor)

EM Sensor dibutuhkan untuk memonitor kondisi kabel Jembatan Suramadu. Jika kabel terlalu tegang maka kabel tersebut dapat putus. Sensor Elektromagnetik yang dipasang di Jembatan Suramadu adalah 24 buah dari 32 buah dalam desain. Kondisi eksisting menunjukkan bahwa rata-rata tegangan kabel jembatan sebesar 4155,1254 KN, dengan nilai tegangan terkecil 4102,3208 KN dan nilai tegangan terbesar 4170,9848 KN. Hal ini mengindikasikan bahwa nilai tegangan seluruh kabel jembatan yang tersebar di *main bridge* Jembatan Suramadu bernilai hampir sama. Idealnya, setiap kabel di Jembatan Suramadu memiliki Sensor Elektromagnetik, sehingga diperoleh nilai tegangan setiap kabel, akan tetapi, hal tersebut sangat sulit direalisasikan mengingat kabel Jembatan Suramadu berjumlah 146 buah sehingga akan membutuhkan biaya sangat besar. Dalam kondisi eksisting dimana EM Sensor yang dipasang berjumlah 24 buah dan tersebar di sepanjang kabel Jembatan Suramadu, maka apabila terdapat kabel yang mengalami masalah, maka kabel terdekat yang dipasangi EM Sensor akan memberikan indikasi dengan nilai tegangan kabel yang tiba-tiba membesar secara drastis. Kemudian, kabel yang bermasalah tersebut akan dicari langsung di Jembatan Suramadu dengan menggunakan EM Sensor yang *portable* untuk dilakukan perbaikan terhadap kabel tersebut.

f. Accelerometer

2 buah *accelerometer* pada pylon untuk mengetahui pola getar pylon pada arah memanjang jembatan, 2 buah *accelerometer* lain pada pylon untuk mengetahui pola getar pylon pada arah longitudinal dan lateral, dan 1 buah *accelerometer* pada girder untuk mengetahui pola getar pada arah vertikal telah dipasang sesuai disain. Setelah kondisi desain awal dikaji, maka diketahui bahwa sembilan buah *Single Axial Accelerometer* dan delapan buah *Bi-Axial Accelerometer* dipasang di girder, tidak dapat mendapatkan data frekuensi natural jembatan. Frekuensi natural jembatan dapat diketahui apabila data pola getar arah longitudinal diperoleh. Dengan sepuluh buah *Bi-Axial Accelerometer* dipasang pada girder, diperoleh pola getar yang lebih baik sehingga frekuensi natural jembatan juga dapat diketahui. Akan tetapi, penambahan dua buah *Bi-Axial Accelerometer* ini mengakibatkan berkurangnya *Single Axial Accelerometer* dari sembilan buah menjadi dua buah dengan alasan efisiensi biaya. Tetapi dengan dua buah *Single Axial Accelerometer* dipasang di girder Jembatan Suramadu, data pola getar pada arah memanjang tidak dapat diperoleh.

g. Sensor Rotasi

Untuk mengetahui rotasi pylon terhadap kaki pylon, pada Jembatan Suramadu dipasang 12 buah Sensor Rotasi (*Tilt Meter*) dari 16 buah dalam disain. Ke 12 Sensor Rotasi tersebut dipasang menyebar di setiap pylon, yaitu di puncak pylon, tengah pylon, tumpuan deck, dan kaki pylon. Dalam kondisi normal, rotasi yang terjadi di pylon sangat kecil. Dari skala -10 sampai 10, rotasi yang terjadi di pylon hanya berkisar antara -0,06 sampai 0,07, bahkan terdapat beberapa nilai 0,00 yang berarti daerah pylon yang dipasang Sensor Rotasi tersebut tidak berotasi. Sedangkan rotasi di kaki pylon jauh lebih kecil daripada rotasi di bagian pylon lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah eksisting Sensor Rotasi yang dipasang tersebar masih memadai.

h. Displacement Transducer

Pemasangan 4 buah *Displacement Transducer* pada girder untuk mengetahui penurunan pada tumpuan V Pier dan pemasangan 4 buah *Displacement Transducer* antara pylon dan girder untuk mengetahui penurunan pada tumpuan, di Jembatan Suramadu sudah sesuai disain.

i. Digital Video Camera

4 buah *digital video camera* untuk mengetahui kondisi keseluruhan jembatan dari posisi tertinggi, 2 buah *digital video camera* untuk mengidentifikasi kendaraan yang *overload*, dan 2 buah *digital video camera* untuk mengetahui kondisi lalu lintas di laut sudah dipasang sesuai disain. Sedangkan dari 14 buah *digital video camera* dalam disain, untuk mengetahui kondisi lalu lintas di tengah bentang, baru dipasang 2 buah. Oleh karena itu *monitoring* kendaraan yang lewat di bentang tengah tidak dapat dipantau dari mulai masuk sampai dengan keluar Jembatan Suramadu, sehingga perilaku struktur jembatan terhadap kendaraan yang lewat di bentang tengah tidak dapat diketahui.

Rekomendasi

Disain awal pemasangan sensor-sensor *SHMS* di Jembatan Suramadu dengan jumlah dan lokasi tertentu tentu sudah dipertimbangkan dengan baik. Oleh karena itu, untuk dapat mencapai tujuan pemasangan *SHMS*, yaitu memperoleh data yang cukup untuk deteksi dini kesehatan jembatan, dan untuk menjaga keselamatan lalu lintas, maka perlu dipertimbangkan

dana yang cukup untuk pemasangan sistem canggih ini. Lebih lanjut, evaluasi berkala dan pemeliharaan sensor-sensor *SHMS* ini juga perlu dilakukan secara berkelanjutan.

KESIMPULAN

Penelitian ini melakukan evaluasi awal terhadap pemasangan *Structural Health Monitoring System (SHMS)* di Jembatan Suramadu. Untuk bekerja secara efektif dan efisien *SHMS* perlu dilengkapi dengan jenis, jumlah dan penempatan sensor yang benar. Walaupun disain jenis, jumlah, dan penempatan sensor sudah dilakukan, tetapi pada kondisi eksisting terdapat sejumlah sensor yang belum sesuai disain karena keterbatasan dana. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa sejumlah sensor yang dipasang tidak sesuai dengan jumlah dan penempatan lokasi pada rencana semula sehingga dapat menimbulkan akibat yang merugikan kondisi jembatan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih diucapkan kepada Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional V, Sidoarjo, Jawa Timur dan kantor *monitoring system* di sisi Madura. Beberapa data dan detail data tidak dapat disajikan karena masih merupakan data awal yang belum final.

DAFTAR PUSTAKA

- Direktorat Jenderal Bina Marga, Departemen Pekerjaan Umum, 2007, "**Pembangunan Jalan Suramadu**".
- Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum, 2010, "**Preservasi Jembatan Suramadu Yang Berkelanjutan Dengan Teknologi SHMS,**" (*Online*), <http://www.suramadu.com/berita/40-berita/208-setahun-peresmian-jembatan-suramadu-preservasi-jembatan-suramadu-yang-berkelanjutan-dengan-teknologi-shms.html>, (diakses 29 Oktober 2010).
- Energikon, 2010, Data Sensor *SHMS* di Jembatan Suramadu.
- Farhey, D.N., 2005, "Bridge Instrumentation and Monitoring for Structural Diagnostics", *An International Journal*, 4(4), 301-308.
- Farhey, D.N., 2006, "Integrated Virtual Instrumentation and Wireless Monitoring for Infrastructure Diagnostics", *Structural Health Monitoring Journal*, 5(29), 129-143.
- Ismail, A.G., 2009, "Pengelolaan Jembatan Suramadu: Aspek Financing, Operation Maintenance, Monitoring System, Keselamatan Konstruksi, dan Pengelolaan Dampak Sosial", *Prosiding dari Seminar Nasional Trans Nasional dalam Konteks Trans Asia dan Asean Highway: Peluang dan Tatanan Menghadapi Tatanan Global*, Jakarta.

- Nababan, P.H.A., 2008, “Structural Health Monitoring System Alat Bantu Mempertahankan Usia Teknis Jembatan”, *Proceeding of One Day Seminar Construction and Maintenance of Main Span Suramadu Bridge*, Surabaya.
- Nababan, P.H.A., 2009, “Structural Health Monitoring System in Indonesia Suramadu Bridge”, *Proceeding of Graphical System Design Summit 2009 (LabVIEW with Embedded&PAC Platforms Conference)*, Jakarta.
- Nababan, P.H.A., 2010, “Implementasi SHMS pada Jembatan Suramadu”, *Prosiding dari Diskusi Sistem Monitoring Kesehatan Struktur Untuk Menunjang Pemeliharaan Jembatan Suramadu dan Pengembangan Teknologi Jembatan yang Berkelanjutan di Indonesia*, Surabaya.
- Pratama, Bram, 2010, **Evaluasi Pemasangan Sensor Structural Health Monitoring System di Jembatan Suramadu dari Segi Jumlah dan Lokasi**, skripsi, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung, Indonesia.
- Suangga, Made, Hutauruk, Revelino, Prasetyo, Eko, 2007, “Bored Pile Foundation of Main Span Suramadu Bridge”, *Proceeding in International Seminar of Construction of Main Span Suramadu Bridge*, 11-12 Desember 2007.
- Suhendro, B., 2010, “SHMS Jembatan Suramadu Sebagai Penunjang Preservasi Dan Pengembangan Teknologi Jembatan”, *Prosiding dari Diskusi Sistem Monitoring Kesehatan Struktur Untuk Menunjang Pemeliharaan Jembatan Suramadu dan Pengembangan Teknologi Jembatan yang Berkelanjutan di Indonesia*, Surabaya.