

Sistem Penilaian Kondisi Jembatan Menggunakan Respons Dinamik dengan *Wireless Sensor Network*

Seno Adi Putra¹, Gede Agus Andika Sani², Adi Trisna Nurwijaya³, Abikarami Anandadiga⁴, Pratama Budi Wijayanto⁵, Bambang Riyanto Trilaksono⁶, Muhammad Riyansyah⁷

Abstract—Wireless Sensor Network (WSN) is small embedded devices deployed in large scale network and has capability to sense, compute, and communicate with others. It combines modern sensor, microelectronic, computer, communication, and distributed processing technology. It takes into account in several aspects of live especially in structural health monitoring system of bridge. Due to environmental circumstance, a bridge should be monitored to make sure that it can perform its service safely. Therefore, it is necessary to develop WSN application to monitor bridge condition and send warning message to control room if the bridge is under abnormal condition. This paper proposes the development of automatic WSN system for measuring the level of bridge structural health based on its dynamic responses. The main contribution of this work is developing WSN system for vibration-based bridge condition assessment in which identifies the bridge's fundamental frequency and mode shape. Experimental result shows that the fundamental frequency measured by our proposed system is close to the value analyzed using finite element analysis (FEA) and according to Modal Assurance Criterion (MAC), our proposed measurement system has correlation with FEA.

Intisari—Jaringan sensor nirkabel (*Wireless Sensor Network/WSN*) adalah perangkat tertanam kecil yang dipasang di jaringan skala besar dengan kemampuan melakukan penginderaan, komputasi, dan komunikasi. WSN menggabungkan sensor modern, mikroelektronika, komputasi, komunikasi, dan teknologi pemrosesan terdistribusi. WSN memberikan kontribusi penting pada semua aspek kehidupan, khususnya pada sistem pengawasan kesehatan struktur jembatan. Karena infrastruktur jembatan selalu dihadapkan dengan kondisi lingkungannya, diperlukan implementasi aplikasi WSN untuk mengawasi kondisi jembatan dan mengirimkan pesan waspada ke ruang kendali ketika terjadi kondisi yang tidak normal. Makalah ini mengusulkan pengembangan sistem pengukuran tingkat kesehatan struktur jembatan secara otomatis menggunakan respons-respons dinamis jembatan. Kontribusi utama makalah ini adalah pengembangan sistem penilaian kondisi jembatan berbasis getaran yang mengidentifikasi frekuensi alamiah dan bentuk getar jembatan. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa sistem dapat mengukur frekuensi alamiah dengan nilai yang mendekati hasil *finite element analysis* (FEA), dan berdasarkan perhitungan *Modal*

Assurance Criterion (MAC), hasil pengukuran sistem yang dibangun memiliki korelasi tinggi dengan FEA.

Kata Kunci—Jaringan sensor nirkabel, sistem pengawasan kesehatan struktur, penilaian kondisi jembatan berbasis getaran, penilaian kondisi jembatan berbasis getaran, nilai jembatan.

I. PENDAHULUAN

Struktur jembatan yang sudah menua, kondisi lingkungan tak menentu, dan ditambah beban kendaraan yang melaluinya adalah subjek yang harus diawasi pada pemeliharaan jembatan. Untuk itu diperlukan pengawasan jembatan dan pendeteksian deformasi struktur yang disebabkan oleh operasi-operasi normal atau dampak-dampak lingkungan seperti temperatur, kelembapan, dan beban kendaraan berat. Selain itu, pengawasan struktur secara keseluruhan perlu dilakukan setelah kondisi ekstrim terjadi, seperti gempa bumi. Jadi, dalam rangka menguantifikasi pengukuran kinerja struktur, perlu dilakukan pengawasan rutin dan evaluasi integritas konstruksi sipil melalui pemanfaatan teknologi jaringan sensor, baik menggunakan kabel ataupun nirkabel. Inilah yang menjadikan sistem pengawasan kesehatan struktur sebagai cara yang saat ini digunakan dan sebagai topik penelitian menarik.

Sistem pengawasan kesehatan struktur adalah utilisasi penginderaan dan analisis *in-site destructive* dan *non-destructive* tentang karakteristik-karakteristik struktur, mencakup di dalamnya respons-respons struktur, untuk mendeteksi perubahan yang mungkin berdampak pada kerusakan atau deformasi struktur. Meskipun para peneliti telah menghabiskan usahanya untuk mengintegrasikan metode *non-destructive* dengan pengawasan kesehatan struktur, saat ini fokus penelitian masih pada cara untuk mengumpulkan data, belum sampai mengembangkan sistem pemantauan yang otomatis dan beroperasi dalam jangka waktu selama mungkin. Kebutuhan utama yang diperlukan saat ini adalah metode efektif dan efisien untuk mengumpulkan data dari sebuah struktur dan memproses data untuk kepentingan pengukuran kinerja seperti tingkat kesehatan jembatan yang berkorelasi dengan frekuensi alamiahnya. Oleh sebab itu, diperlukan sistem sensor vibrasi otomatis tanpa perlu dimonitor terus-menerus oleh operator manusia.

Penelitian sistem kesehatan struktur jembatan dengan menerapkan pemrosesan data dalam jaringan dengan analisis *Fast Fourier Transform* (FFT), pengambilan puncak amplitude frekuensi, dan *mode shape assembling* dilakukan di setiap simpul sensor nirkabel dan aplikasinya dengan menggunakan jaringan sensor nirkabel [1], [2]. Untuk mengatasi masalah pengukuran *in-site* yang efektif, dilakukan pengembangan *bridge weighted-in-motion* [3]. Untuk kasus sistem cerdas

^{1,2,3,4,6} Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung, Jalan Ganesha No. 8 Kota Bandung, 40132, INDONESIA (telp: (022) 2502260; fax: (022) 2534222; e-mail: info@stei.itb.ac.id)

^{5,7} Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Jalan Ganesha No. 8 Kota Bandung, 40132, INDONESIA (telp: (022) 2504952; fax: (022) 2516586; e-mail: kantor@ftsl.itb.ac.id)

yang diterapkan pada sistem pengawasan kesehatan struktur jembatan, telah dikembangkan *wireless intelligent sensor and actuator network* [4] dan *statistical classifier* seperti *support vector machine* (SVM), *Gaussian mixture model* (GMM), dan *hidden Markov model* (HMM) [5]. Penelitian terkait dengan area komputasi di jaringan sensor nirkabel juga telah dikembangkan untuk kasus pengawasan kesehatan struktur jembatan, khususnya untuk kualitas pemrosesan data [6], [7]. Mekanisme pemrosesan data di jaringan sensor nirkabel beserta pengembangan peranti keras yang mendukung sistem pengawasan kesehatan struktur jembatan juga menjadi perhatian di penelitian ini [8]-[12]. Kerangka kerja IoT untuk pengawasan kesehatan struktur, tetapi tidak spesifik ke jembatan, juga menjadi bahan pertimbangan [13]. Berbeda dengan penelitian sebelumnya tersebut, penelitian ini mencoba memanfaatkan sensor akselerometer yang tertanam pada sebuah perangkat nirkabel tertanam yang di dalamnya memiliki kapabilitas komputasi dan komunikasi.

Kontribusi utama makalah ini adalah mendeskripsikan sebuah arsitektur sistem penilaian kondisi kesehatan jembatan berdasarkan respons dinamik ketika dilalui kendaraan berat menggunakan jaringan sensor nirkabel. Di sini, dikembangkan metode penilaian kondisi jembatan menggunakan respons dinamik menuju sistem yang otomatis [14]. Tujuan utama penelitian ini adalah terciptanya sebuah sistem otomatis pengukuran tingkat kesehatan menggunakan teknologi jaringan sensor nirkabel yang di dalamnya mencakup pengukuran tingkat kesehatan jembatan sebagai fungsi perubahan frekuensi alamiahnya selama berjalannya waktu. Melalui data frekuensi alamiah ini, dapat dihitung kekakuan lentur jembatan. Tujuan khusus penelitian ini adalah mendeskripsikan sistem yang dapat menghubungkan antara frekuensi alamiah jembatan dengan level kesehatannya dan menggambarkan pola getaran jembatan di setiap frekuensinya.

Makalah ini dibagi menjadi beberapa bagian sebagai berikut. Bagian kedua mendeskripsikan penilaian kondisi jembatan, bagian ketiga adalah sistem yang diusulkan, bagian keempat adalah hasil pengujian melalui eksperimen, bagian kelima adalah diskusi, dan terakhir, bagian keenam adalah kesimpulan.

II. PENILAIAN KONDISI KESEHATAN JEMBATAN

Fokus makalah ini adalah merancang sistem penilaian kondisi jembatan yang diidealisasi menjadi *single degree of freedom* (SDOF). Kesehatan jembatan memiliki korelasi dengan frekuensi alamiahnya. Prosedur investigasi penilaian respons dinamik kondisi jembatan terdiri atas empat langkah. Langkah pertama adalah membangun *Finite Element Analysis* (FEA) tiga dimensi skala penuh dari konstruksi jembatan yang merepresentasikan kondisi ideal jembatan. Langkah ini bersifat opsional dan dapat menggunakan analisis numerik. Selama FEA, dijalankan simulasi model jembatan seolah-olah dilalui beban truk untuk memperoleh frekuensi alamiah dan amplitude puncaknya. Langkah kedua adalah melakukan FFT dari data akselerasi di domain waktu dan mengidentifikasi amplitude puncak dari frekuensi-frekuensi dominan yang dihasilkan, lalu diambil frekuensi dengan puncak amplitude

terbesar. Langkah ketiga adalah perancangan jaringan WSN untuk mengumpulkan respons akselerasi waktu nyata jembatan ketika dibebani truk yang bergerak. Dan langkah keempat adalah mengidentifikasi perbedaan antara respons dinamik FEA dengan data yang diperoleh dari lapangan dan mengaitkan keduanya untuk mendapatkan perbedaan frekuensi yang dihasilkan. Dari perbedaan frekuensi antara FEA dengan yang diperoleh dari data sensor dapat ditentukan nilai jembatan melalui (1) berikut [14].

$$\text{Nilai Jembatan} = (\text{int})9 - \frac{f_{FEA} - f_{Sensor}}{f_{FEA}} * \frac{1000}{123} \quad (1)$$

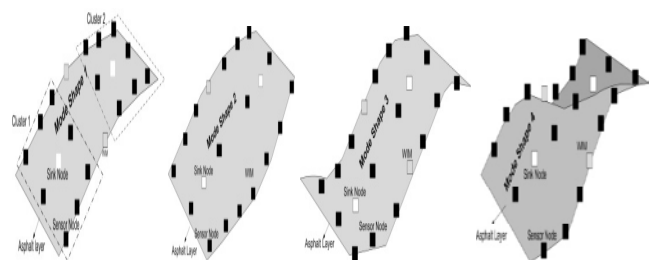
dengan f_{FEA} adalah frekuensi alamiah jembatan yang diperoleh dari FEA dan f_{Sensor} adalah frekuensi alamiah jembatan yang dihitung dari data yang diperoleh dari sensor.

Rentang nilai jembatan adalah 0-9. Secara berturut-turut, nilai mulai dari terendah mengindikasikan kondisi gagal, menuju kondisi gagal, kondisi kritis, kondisi serius, kondisi buruk, kondisi cukup baik, kondisi memuaskan, kondisi bagus, kondisi sangat bagus, dan kondisi luar biasa bagus. Nilai 0-4 memerlukan rehabilitasi atau penggantian jembatan, nilai 5-6 memerlukan pemeliharaan preventif dan perbaikan, dan nilai 7-9 memerlukan pemeliharaan preventif.

Objektif lain yang diperoleh dari penilaian kondisi kesehatan jembatan adalah diidentifikasinya *mode shape* jembatan untuk frekuensi getar tertentu. Rumusan *mode shape* ditunjukkan pada (2).

$$\begin{aligned} y(x, t) &= \varphi(x) \sin \omega t \\ \frac{\delta y(x, t)}{\delta t} &= \varphi(x) \omega \cos \omega t \\ \frac{\delta^2 y(x, t)}{\delta t^2} &= -\varphi(x) \omega^2 \sin \omega t \\ y(x, t) &= \frac{a(x, t)}{\omega^2} \end{aligned} \quad (2)$$

Untuk mendapat *mode shape* yang akurat dari hasil pengukuran di lapangan, diperlukan jumlah sensor yang cukup banyak. Di sinilah peran sensor nirkabel menjadi penting. *Mode shape* jembatan sendiri didefinisikan sebagai bentuk dari getar jembatan per frekuensi getar. Dalam satu waktu dapat teridentifikasi beberapa *mode shape* dari jembatan. *Mode shape* ini diilustrasikan pada Gbr. 1

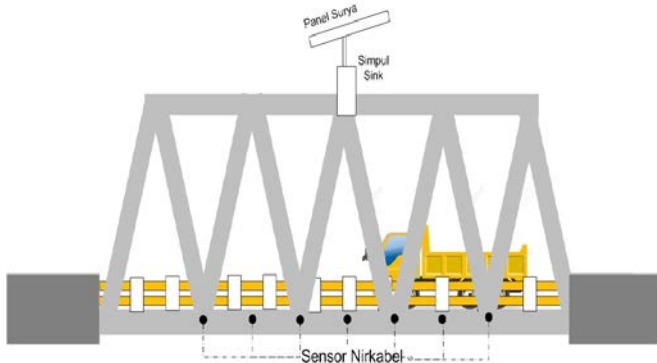


Gbr. 1 *Mode shape* yang kemungkinan besar muncul pada jembatan SDOF.

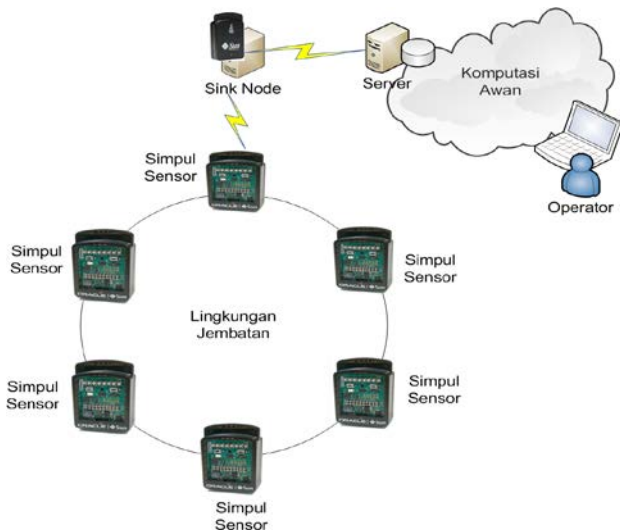
III. USULAN SISTEM PENILAIAN KESEHATAN JEMBATAN

Tujuan utama dari pemantauan kesehatan jembatan menggunakan respons dinamik adalah mengidentifikasi gejala

kerusakan di kondisi terkini berdasarkan tanda-tanda vibrasi ketika dilalui oleh beban kendaraan melalui identifikasi pergeseran frekuensi alamiahnya yang dihasilkan dari waktu ke waktu. Keluaran akhir dari pemantauan ini adalah tingkat kesehatan jembatan dan pengukuran beban jembatan yang didefinisikan sebagai nilai jembatan yang masih dapat melakukan layanannya secara aman ketika menerima beban kendaraan yang melintasinya. Gambaran umum pemasangan sensor di jembatan ditunjukkan pada Gbr 2. Gambaran umum sistem pengawasan kesehatan jembatan menggunakan jaringan sensor nirkabel sampai datanya diperlihatkan ke pengguna ditunjukkan pada Gbr. 3.



Gbr. 2 Pemasangan sensor nirkabel akselerometer di jembatan.



Gbr. 3 Arsitektur jaringan sensor nirkabel.

A. Simpul Sensor Akselerometer

Simpul-simpul sensor nirkabel akselerometer bertanggung jawab dalam pengumpulan data, pengondisian sinyal, penyimpanan data, dan transmisi data. Dalam satu simpul sensor dapat terdiri atas beberapa sensor yang sudah tertanam atau jalur masukan yang dapat dihubungkan dengan jenis-jenis sensor lain. Pada simpul sensor selanjutnya dipasang peranti lunak dan konfigurasi parameter tertentu agar mampu mengumpulkan, melakukan praproses, dan menyimpan data sementara. Simpul sensor ini bertanggung jawab dalam pengumpulan data, pengondisian sinyal, penyimpanan data, praproses, dan transmisi data. Peranti lunak yang ditanam di

simpul sensor ini melakukan pemrosesan di dalam jaringan seperti pengumpulan data-data getaran jembatan, dan selanjutnya melakukan FFT untuk menentukan amplitude puncaknya beserta frekuensi getar jembatan. Piranti lunak di dalam simpul sensor ini juga melakukan identifikasi *mode shape* dari frekuensi alamiah jembatan. Frekuensi alamiah yang dominan dan nilai puncak amplitudanya menjadi data masukan untuk menilai kesehatan jembatan.

Simpul sensor nirkabel akselerometer terdiri atas empat bagian pengolah data. Modul-modul tersebut adalah modul sensor, modul penyaringan, modul FFT dan *peak picking*, dan *transceiver*. Modul sensor adalah modul yang berperan dalam mengakses langsung komponen sensor akselerometer. Pada modul ini dikerjakan algoritme koneksi ke perangkat sensor termasuk di dalamnya penyetelan *sampling rate* dan algoritme deteksi puncak sinyal secara *real time* untuk memulai mencuplik data vibrasi. Algoritme deteksi puncak sinyal ini ditujukan agar simpul sensor mencuplik data yang benar-benar merepresentasikan terjadinya vibrasi yang signifikan sehingga menghemat alokasi memori di simpul sensor. Data mentah dari modul sensor selanjutnya dikirim ke modul penyaringan. Proses penyaringan menggunakan algoritme *moving average filter*. Selanjutnya, data keluaran penyaringan ini ditransformasi ke domain frekuensi melalui modul FFT untuk memperoleh frekuensi alamiah jembatan sekaligus dilakukan *peak picking* untuk mendapatkan *mode shape* dari frekuensi alamiah yang paling dominan. Data-data frekuensi alamiah jembatan beserta *mode shape*-nya selanjutnya melalui *transceiver* dikirim ke simpul *sink*.

B. Simpul Sink

Simpul *sink* merupakan komputer mini dengan kapabilitas melakukan pascaproses, menyimpan data dari simpul sensor, dan mengirimkan data ke *server*. Ada setidaknya dua kebutuhan fungsional pada simpul *sink* yang harus dipertimbangkan. Pertama, *sink* mengoordinasi simpul-simpul sensor dan menerima koleksi data dari semua simpul sensor. Kedua, data digital yang telah mengalami praproses di *sink* dikirim ke *server* menggunakan protokol internet.

C. Algoritme

Untuk mengeksplorasi kapabilitas simpul sensor nirkabel yang dapat melakukan komputasi dan komunikasi, pemrosesan data seperti FFT dan pengambilan nilai puncak amplitude dari frekuensi tertentu dilakukan di setiap simpul sensor. Pemrosesan data ini ditunjukkan pada algoritme 1 berikut.

Algorithm 1: Pemrosesan data di setiap simpul sensor

```

1  Masukan: data-data akselerasi jembatan;
2  Luaran: nilai jembatan;
3  for setiap simpul sensor  $S_i$  do
4    cuplik data getaran jembatan  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ ;
5    lakukan moving average filter;
6    lakukan analisis FFT pada data  $A$ ;
7    lakukan peak picking untuk mengidentifikasi
      frekuensi natural jembatan  $F_1$ ;
8    hitung mode shape  $\Phi_1$ ;
9    kirim  $F_1$  dan  $\Phi_1$  ke simpul sink;
10 end for

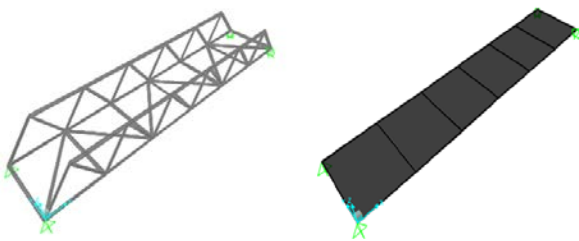
```

IV. HASIL-HASIL EKSPERIMEN

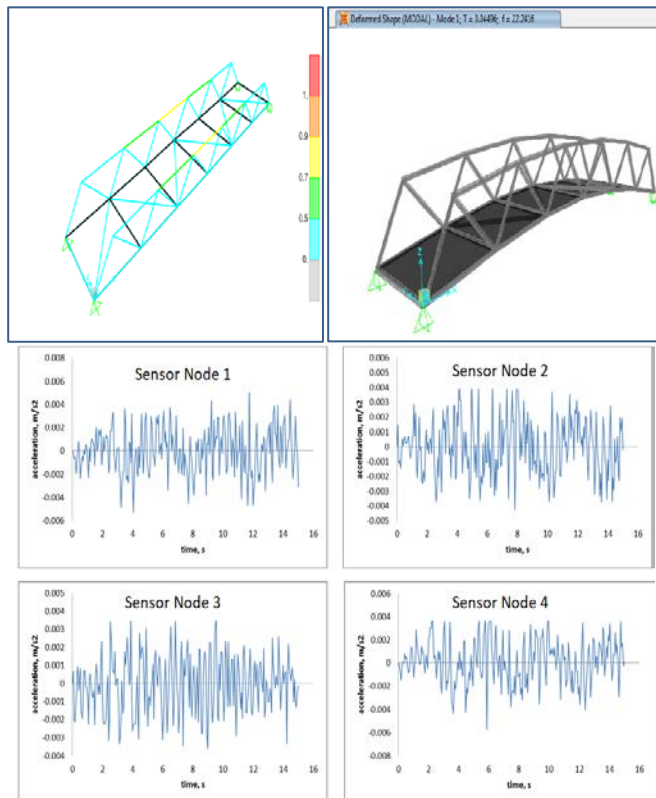
Eksperimen dilakukan pada lingkungan jembatan miniatur *test-bed* yang dirancang sesuai dengan kaidah-kaidah dalam teknik sipil. Pada jembatan *test-bed* ini selanjutnya dipasang simpul-simpul sensor nirkabel akselerometer SunSPOT buatan Oracle. SunSPOT merupakan perangkat tertanam dengan spesifikasi memiliki *core processor* ARM920T, *flash memory* 4 MB, RAM 512 KB, dan *radio transceiver* 2,4 GHz 802.15.4. Pada SunSPOT sudah tertanam tiga sensor seperti akselerometer 3-sumbu, sensor temperatur, dan sensor cahaya. Penambahan jenis sensor lain dapat dilakukan melalui PIN I/O yang sudah disediakan. SunSPOT menggunakan *Squawk Virtual Machine* berbasis teknologi Java.

A. Perancangan Jembatan Test-bed dengan FEA

Makalah ini merancang jembatan *test-bed* menggunakan rangka baja dan pelat baja sebagai alasnya. Rancangan ini disimulasikan terlebih dahulu dengan menggunakan perangkat lunak CSi Bridge Application 2015. Rancangan jembatan tersebut diilustrasikan pada Gbr. 4.



Gbr. 4 Jembatan *test-bed* dengan rangka dan pelat baja.



Gbr. 5 Analisis statik dan dinamik jembatan *test-bed*.

Berdasarkan Gbr. 4, jembatan *test-bed* yang dibangun merupakan jembatan bentang tunggal yang disusun dari rangka baja dari profil siku ukuran 3 cm dengan tebal 1,5 mm dan pelat baja sebagai lantai jembatan dengan tebal pelat baja 2,5 mm. Pelat sambung menggunakan pelat dengan ketebalan 4 mm dan baut penyambung dengan diameter 8 mm.

Dari hasil analisis statik, jembatan *test-bed* yang dirancang mampu menahan berat sendiri dan beban hidup (berupa beban titik) sebesar 300 kg di tengah bentang jembatan dengan *stress ratio* terbesar yang terjadi pada rangka baja adalah 0,848, sehingga jembatan mampu menahan beban statik sebesar 300 kg. Untuk analisis dinamik, dilakukan analisis respons jembatan akibat beban kendaraan bergerak. Dari data akselerasi jembatan *test-bed* diperoleh frekuensi alamiah jembatan sekitar 22,2416 Hz. Analisis statik dan dinamik ditunjukkan pada Gbr. 5.

B. Pengujian Jembatan Test-bed

Langkah selanjutnya adalah melakukan konstruksi jembatan *test-bed* dan pemasangan simpul-simpul sensor nirkabel seperti ditunjukkan pada Gbr. 6. Jembatan *test-bed* ini juga diuji dengan kendaraan bergerak untuk mengetahui respons dinamisnya. Di sini digunakan truk Scania 1:14 RC dengan berat 10 kg. Tabel I menunjukkan frekuensi alamiah beserta *mode shape* yang dideteksi oleh sensor-sensor nirkabel.



Gbr. 6 Konstruksi jembatan *test-bed*, pemasangan simpul sensor nirkabel (lingkaran merah), dan pengujian menggunakan truk Scania 1:14 RC.

TABEL I
HASIL PERHITUNGAN SIMPUL SENSOR

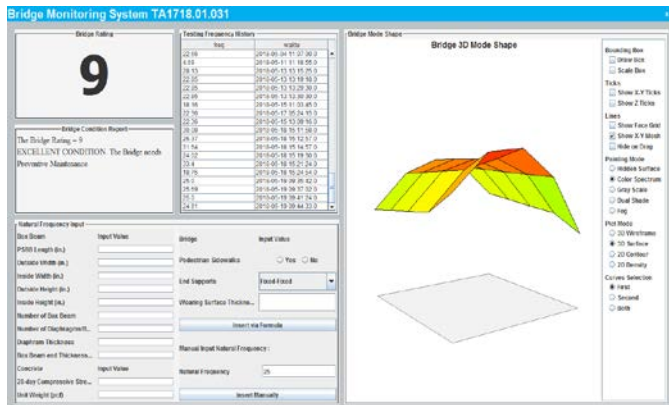
ID Sensor	Frekuensi (Hz)	Mode Shape
1B1A	21,09	2,39868 x 10 ⁻⁶
3777	22,65	2,39107 x 10 ⁻⁶
2EB4	24,40	2,86776 x 10 ⁻⁶
2F91	22,07	1,79774 x 10 ⁻⁶
3DDC	23,63	2,07159 x 10 ⁻⁶
213F	20,12	2,00059 x 10 ⁻⁶

C. Pengujian Fungsionalitas dan Validasi Sistem

Untuk pengujian aplikasi, dipasang enam buah simpul sensor nirkabel SunSPOT masing-masing tiga buah di sisi jembatan, sehingga membentuk *mode shape*. Simpul sensor nirkabel sendiri diatur agar dapat melakukan pencuplikan data dalam 100 Hz dan dibiarkan melakukan penginderaan secara terus menerus. Ketika ada truk Scania 1:14 RC melewati simpul sensor nirkabel, simpul sensor nirkabel mendeteksi

adanya kejadian signifikan, sehingga data-data akselerasi mulai dicuplik sebagai bahan untuk dilakukan proses FFT. Pendekatan yang dilakukan pada sistem ini adalah menggunakan pendekatan *client-server*. Untuk penyimpanan data di *server*, digunakan sistem basis data MySQL. Antarmuka grafis untuk pengguna ditunjukkan pada Gbr. 7.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gbr. 7, sistem memiliki empat fitur utama, yaitu (1) fitur menampilkan nilai jembatan yang di bawahnya menampilkan keterangan tentang nilai sembilan beserta rekomendasi aksi yang harus dilakukan operator; (2) disamping papan nilai terdapat tabel riwayat data-data frekuensi alamiah yang pernah dihitung, (3) di bawahnya adalah informasi properti jembatan, dan (4) di ujung kanan adalah penggambaran *mode shape*.



Gbr. 7 Antarmuka pengguna grafis sistem pengawasan kesehatan jembatan.

Untuk memvalidasi keberhasilan sistem, digunakan dua cara, yaitu menggunakan FEA sebagai acuan standar untuk menentukan perilaku struktur dan analisis *Modal Assurance Criterion* (MAC). FEA dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak CSi Bridge 2015 untuk mengukur frekuensi alamiah jembatan *test-bed* yang dibangun. Menurut FEA, diperoleh frekuensi alamiah jembatan *test-bed* sebesar 22,2416 Hz, seperti diperlihatkan pada Gbr. 6, sedangkan sistem yang dikembangkan mengukur rata-rata frekuensi alamiah jembatan adalah sebesar 20,26 Hz, seperti pada Tabel I. Dapat disimpulkan bahwa nilai yang diperoleh FEA mendekati nilai yang diperoleh dari sistem pengukuran yang telah dibangun. Cara kedua adalah dengan menggunakan MAC yaitu dihitung tingkat korelasi antara *mode shape* yang diperoleh dari FEA dengan yang diperoleh oleh sistem yang dikembangkan. Jika nilai MAC mendekati satu berarti kedua perhitungan memiliki korelasi yang kuat, sehingga data yang diperoleh dari sistem pengukuran dari sensor nirkabel yang digunakan adalah valid [14]. Diperoleh MAC untuk FEA dan pengukuran oleh sistem sensor nirkabel sebesar 0,8, sehingga disimpulkan kedua parameter pengukuran memiliki korelasi yang kuat.

D. Evaluasi Kinerja Sistem

Untuk mengukur kinerja sistem, dilakukan pengukuran waktu proses, waktu melakukan pencuplikan data mentah untuk proses FFT, waktu proses filter, waktu FFT, waktu proses *peak picking*, dan waktu proses data di simpul *sink*.

Waktu pemrosesan rata-rata dari penginderaan sampai data dikirim ke *sink node* adalah sekitar 6,121 detik. Penambahan waktu lagi diperlukan untuk menampilkan data ke antarmuka dengan grafis, termasuk di dalamnya menampilkan gambaran *mode shape*. Tabel II menunjukkan waktu yang diperlukan untuk setiap proses.

TABEL II
KINERJA PEMROSESAN DATA

No.	Cuplik Data (ms)	Filter Data (ms)	FFT (ms)	Peak Picking (ms)	Proses Total (ms)
1	5.227	12	440	305	6.123
2	5.223	12	438	284	6.252
3	5.231	11	440	316	6.132
4	5.218	12	441	300	6.022
5	5.232	12	443	307	6.301
6	5.215	12	478	308	6.002
7	5.226	12	423	297	6.120
8	5.235	12	439	296	6.111
9	5.232	11	431	317	6.212
10	5.221	12	425	284	6.221
11	5.230	12	432	321	6.001
12	5.229	11	431	300	6.020
Rata-rata	5.226,4	11,87	435,9	303,2	6.121,46

Tabel II menunjukkan waktu proses untuk masing-masing modul sistem yang diuji sebanyak 12 kali pengulangan. Durasi cuplik data adalah waktu yang diperlukan simpul sensor untuk mencuplik data akselerasi vibrasi jembatan untuk frekuensi sampel sebesar 100 Hz. Durasi filter data adalah waktu yang dibutuhkan sistem untuk melakukan *moving average filter* dan *low pass filter*. Durasi FFT adalah waktu melakukan proses transformasi data akselerasi di domain waktu ke domain frekuensi. Durasi *peak picking* adalah proses untuk mengurutkan nilai amplitude puncak frekuensi alamiah yang terdeteksi dari yang paing besar sampai ke paling rendah dan pengambilan nilai amplitude puncak yang paling besar. Proses total adalah proses keseluruhan, mulai dari pencuplikan data akselerasi sampai data ditampilkan ke aplikasi pengguna.

V. DISKUSI

Makalah ini mengembangkan teknik penilaian kondisi jembatan menggunakan respons dinamik menuju sistem yang otomatis [14]. Sensor yang digunakan dalam makalah ini dan di penelitian sebelumnya adalah sama, yaitu menggunakan Oracle SunSPOT. Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, kelebihan sistem yang berhasil dikembangkan dalam makalah ini adalah sebagai berikut.

1. Pada penelitian sebelumnya, simpul sensor hanya melakukan pencuplikan data dan langsung mengirimkan hasilnya ke simpul *sink*, sedangkan dalam makalah ini dilakukan perbaikan cara yaitu simpul sensor yang memiliki kapabilitas komputasi diberdayakan tidak hanya untuk melakukan pencuplikan dan transmisi data saja, tetapi juga melakukan penyaringan data, FFT, *peak picking*, dan perhitungan *mode shape* secara otomatis.
2. Pada penelitian sebelumnya, analisis FFT dilakukan secara manual dan *offline* menggunakan aplikasi

spreadsheet, sedangkan di sini dikembangkan sistem otomatis yaitu FFT dilakukan secara *online*.

3. Di penelitian sebelumnya, *mode shape* tidak diidentifikasi, sedangkan pada makalah ini berhasil dilakukan penggambaran *mode shape* secara waktu nyata.
4. Di penelitian sebelumnya, sistem menunjukkan aplikasi waktu nyata yang tidak disinkronkan pengiriman datanya, sehingga banyak data yang tidak tertangani oleh simpul *sink*, sedangkan sistem yang dibangun di penelitian ini berusaha untuk menekankan pada pemrosesan di dalam jaringan sensor nirkabel untuk mengatasi masalah terbatasnya lebar pita dan penerimaan data yang tidak dapat dilakukan serempak oleh simpul *sink*.

VI. KESIMPULAN

Makalah ilmiah ini mendeskripsikan suatu sistem baru dalam penentuan tingkat kesehatan jembatan dengan menggunakan teknologi jaringan sensor nirkabel. Pemanfaatan kapabilitas komputasi dan komunikasi sensor nirkabel dilakukan dengan menerapkan proses pengukuran nilai kesehatan jembatan di dalam simpul sensor. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat langsung menghitung nilai kesehatan jembatan dan menampilkan *mode shape* untuk frekuensi alamiah yang dominan muncul. Waktu proses pun cukup cepat, di bawah 7 detik, untuk menentukan nilai jembatan. Pengukuran dilakukan hanya ketika dilalui truk berat saja. Hasil yang diperoleh dari FEA mendekati hasil yang diperoleh dari pengukuran sensor nirkabel, yaitu FEA menunjukkan frekuensi alamiahnya sebesar 22,2416 Hz, sedangkan pengukuran yang dilakukan sensor nirkabel menunjukkan frekuensi rata-rata 20,26 Hz. Berdasarkan MAC, diperoleh nilai 0,8 yang menunjukkan adanya korelasi tinggi antara nilai yang dihitung dari FEA dengan yang diukur oleh sensor nirkabel.

Penelitian berikutnya perlu dilakukan seperti pengaturan waktu hidup dan tidur dari setiap simpul sensor untuk meminimalkan konsumsi energi. Perlu penerapan sistem cerdas agar sistem lebih efisien dan efektif dalam melakukan pengukuran, tidak hanya otomatis, tetapi juga otonom, terkait dengan pengelolaan sumber daya jaringan dan baterai serta mampu mengklasifikasi jenis truk. Pada penelitian selanjutnya juga perlu dilakukan pengukuran kapasitas statik jembatan yang diperoleh dari data-data respons dinamik jembatan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) Indonesia, *Royal Engineering Academy* (REA) Inggris melalui program *Newton Fund*, pengurus Laboratorium Sistem Kendali dan Komputer, Sekolah Teknik Elektro dan Informatika ITB, serta pengurus

Laboratorium Rekayasa Struktur Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan ITB.

REFERENSI

- [1] Z. Alam, G. Wang, J. Cao, dan J. Wu, "Deploying Wireless Sensor Network with Fault-Tolerance for Structural Health Monitoring," *IEEE Transaction on Computer*, Vol. 64, No. 2, hal. 382-395, 2015.
- [2] A. B. Noe, A. Abdaoui, T. Elfouly, M. H. Ahmed, dan A. Badawy, "Structural Health Monitoring Using Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Survey," *IEEE Communicatuon Surveys and Tutorials*, Vol. 19, No. 3, hal. 1403-1423, 2017.
- [3] M. Lydon, S. E. Taylor, D. Robinson, P. Callender, dan C. Doherty, "Development of a Bridge Weighted-in-Motion Sensor: Performance Comparison Using Fiber Optic and Electric Resistance Strain Sensor System," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 14, No. 12, hal. 4284-4296, 2014.
- [4] E. Sazonov, H. Li, D. Curry, dan P. Pillay, "Self-Powered Sensor for Monitoring of Highway Bridges," *IEEE Sensor Journal*, Vol. 9, No. 11, hal. 1422-1429, 2009.
- [5] C. Tschope dan M. Wolff, "Statistical Classifiers for Structural Health Monitoring," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 9, No. 11, hal. 1567-1576, 2009.
- [6] Z. Zou, Y. Bao, F. Deng, dan H. Li, "An Approach of Reliable Data Transmission with Random Redundancy for Wireless Sensors in Structural Health Monitoring," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 15, No. 2, hal. 809-818, Feb. 2015.
- [7] S. Kim, J. Lee, M.-S. park, dan B.-W. Jo, "Vehicle Signal Analysis Using Artificial Neural Networks for a Bridge Weigh-in-Motion System," *Sensors*, Vol. 9, No. 10, hal. 7943-7956, Oct. 2009.
- [8] P. Guo, J. Cao, dan X. Liu, "Lossless In-Network Processing in WSNs for Domain-Specific Monitoring Applications," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 13, No. 5, hal. 2130-2139, Oct. 2017.
- [9] W. Flores Fuentes, M. Rivas Lopez, O. Sergiyenko, J. C. Rodriguez-Quinonez, dan D. Hernandez Balbuena, "Energy Center Detection in Light Scanning Sensors for Structural Health Monitoring Accuracy Enhancement," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 14, No. 7, hal. 2355-2361, Jul. 2014.
- [10] A. Araujo, J. García-Palacios, J. Blesa, F. Tirado, dan E. Romero, "Wireless Measurement System for Structural Health Monitoring With High Time-Synchronization Accuracy," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 61, No. 2, hal. 801-810, Mar. 2012.
- [11] D. Mascareñas, E. Flynn, C. Farrar, G. Park, dan M. Todd, "A Mobile Host Approach for Wireless Powering and Interrogation of Structural Health Monitoring Sensor Networks," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 9, No. 12, hal. 1719-1726, Dec. 2009.
- [12] R. Bajwa, "Wireless Weigh-In_Motion: Using Road Vibratiob to Estimate Truck Weights," PhD Thesis, Electrical Engineering and Computer Sciences University of California, Berkeley, USA, 2013.
- [13] C. J. A. Tokognon, B. Gao, G. Y. Tian, dan Y. Yan, "Structural Health Monitoring Framework Based on Internet of Things: A Survey," *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 4, No. 4, hal. 619-635, Jun. 2017.
- [14] A. A. Islam, F. Li, H. Hamid, dan A. Jaroo, "Bridge Condition Assessment and Load Rating Using Dynamic Response," Youngstown State University, Ohio, Final Report 134695, 2014.