

Pengembangan Purwarupa Sistem Pengawasan Kondisi Kesehatan Jembatan *Single Degree Of Freedom* Menggunakan Respon Dinamik

Prototype Development Of A Single Degree Of Freedom Bridge Health Condition Monitoring System Using Dynamic Responses

Muhammad Satria Wibawa¹, Dr. Seno Adi Putra, S.i., M.T.², Alvi Syahrina, S.T., M.Sc.³

^{1,2,3}Prodi S1 Sistem Informasi, Fakultas Rekayasa Industri, Universitas Telkom

¹satriawibawa@student.telkomuniversity.ac.id, ² adiputra@telkomuniversity.ac.id,

³syahrina@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Jembatan merupakan struktur konstruksi yang menghubungkan dua bagian jalan yang terputus karena keadaan geografis untuk melewati rintangan dan medan alam yang ada. Jembatan dari waktu ke waktu akan mengalami kerusakan dan diperlukan perawatan sehingga pengecekan jembatan perlu dilakukan untuk mengecek sejauh mana jembatan menurun kualitas dan kemampuannya dikarenakan oleh berbagai faktor yang ada. Permasalahan yang timbul dikarenakan proses pengecekan yang dilakukan masih manual dan data yang di dapat terkadang tidak akurat dari satu pengawas dan pengawas lainnya. Maka dilakukannya pengembangan sistem sebagai pemecah masalah yang menerapkan *Structural Health Monitoring* (SHM) sebagai penerapan deteksi kerusakan menggunakan metode *vibration-based damage detection* dan karakterisasi strategi untuk *engineering structures* yang dapat berguna untuk melakukan pengawasan struktur konstruksi terutama struktur konstruksi jembatan yang di gabungkan dengan *Wireless Sensor Network* (WSN) untuk menjadi alat pendeteksi atau alat pengambilan data sehingga dapat tercipta suatu sistem pengawasan jembatan yang dapat menghitung nilai *rating*, kapasitas dan juga bentuk *Mode shape* kondisi jembatan.

Kata kunci: Sistem pengawasan kesehatan struktur, Jaringan sensor nirkabel, penilaian kondisi jembatan berdasarkan getaran, nilai jembatan, kapasitas jembatan.

Abstract

The bridge is a construction structure that connects two parts of a road that were cut off due to geographical conditions to pass obstacles and existing natural terrain. The bridge will be damaged from time to time and maintenance is needed so checking the bridge needs to be done to check the extent to which the bridge is declining in quality and ability due to various factors. Problems that arise due to the checking process carried out are still manual and the data that can sometimes be inaccurate from one supervisor and another supervisor. So doing the development of the system as a problem solver that applies Structural Health Monitoring (SHM) as the application of damage detection and characterization strategies for engineering structures that can be useful to supervise construction structures, especially bridge construction structures combined with Wireless Sensor Network (WSN) to become a tool a detector or data retrieval tool so that a bridge monitoring system can be created that can calculate the rating value, capacity and also Mode shape of the bridge's Condition Mode.

Keywords: Structural health surveillance system, Wireless sensor network, bridge condition assessment based on vibration, bridge value, bridge capacity.

1. Pendahuluan

Infrastruktur merupakan elemen struktural ekonomi berupa struktur dasar, fasilitas, peralatan yang dibangun untuk memfasilitasi arus barang dan jasa antara pembeli dan penjual atau untuk memfasilitasi kegiatan perekonomian masyarakat. Bentuk dari infrastruktur bisa berupa jalan atau jembatan yang berfungsi sebagai media transportasi darat. Jembatan adalah struktur konstruksi yang menghubungkan dua bagian jalan yang terputus karena keadaan geografis untuk melewati rintangan dan medan alam yang ada seperti sungai, selat, laut, saluran, dan lembah [1]. Jembatan merupakan roda ekonomi bagi masyarakat, dengan adanya jembatan maka satu tempat dengan tempat lain dapat terhubung satu sama lain sehingga mempermudah dan memungkinkan melakukan proses jual/beli atau kegiatan ekonomi. Pada tahun 2016 Indonesia tercatat memiliki 18.014 unit jembatan dengan panjang 481.926 [1].

Proses pengecekan jembatan yang ada saat ini dilakukan dengan cara melakukan inspeksi dan evaluasi rutin untuk kondisi jembatan dilakukan secara manual dan menggunakan sistem BMS - MIS (*Bridge Management System - Management Information System*) yang di hubungkan oleh *Interurban Road Management System* (IRMS) dengan *Local Area Network* (LAN) di dalam Direktorat Jenderal Bina Marga [2]. Metode penilaiannya masih dilakukan dengan manual serta hasil data juga dapat berbeda - beda dari satu tim petugas dengan tim petugas yang lain yang dapat menimbulkan keraguan atas keakuratan data dari kondisi jembatan tersebut dan juga pengawasan dilakukan tidak secara langsung dan otomatis masuk ke dalam sistem. Maka diperlukan suatu sistem yang dapat melakukan pengawasan pada jembatan dengan waktu yang cepat, biaya yang rendah, ketepatan data akurat, otomatis, dan dapat menampilkan langsung hasil dari pemeriksaan berupa nilai kondisi jembatan.

Penerapan sistem pemantauan jembatan sangat diperlukan sebagai alat atau cara untuk mengawasi kondisi

jembatan maka diterapkannya *Structural Health Monitoring* (SHM) yang merupakan proses penerapan deteksi kerusakan dan karakterisasi strategi untuk *engineering structures* yang dapat berguna untuk melakukan pengawasan struktur konstruksi terutama struktur konstruksi jembatan. SHM dapat melakukan pemantauan dengan secara *real-time*, evaluasi kinerja struktural, dan identifikasi kondisi struktural. SHM memiliki beberapa metode atau teknik yaitu *Non-Destructive Testing* (NDT) yaitu metode menghitung kerusakan dengan cara melakukan *testing* seperti *leak testing*, *liquid penetrant testing*, *infrared and thermal testing*, *radiographic testing*, *electromagnetic testing*, *acoustic emission testing*, *ultrasonic testing*, *magnetic testing*, dan *visual testing*, kemudian ada *Vibration based damage detection* yang merupakan metode identifikasi kerusakan berdasarkan perubahan getaran – getaran yang terjadi pada infrastruktur yang ada, dan yang terakhir adalah *Consideration of the Uncertainties* yang merupakan metode perhitungan kerusakan berdasarkan ketidakpastian yang ada [3]. Majunya perkembangan jaman menciptakan perkembangan teknologi yang dapat memunculkan solusi untuk masalah yang ada, salah satu sektor perkembangan teknologi yaitu penerapan *Internet of Things* (IoT). IoT merupakan konsep dimana suatu objek memiliki kemampuan untuk transfer data melalui sebuah jaringan tanpa adanya interaksi dari manusia. Penerapan dari IoT bisa berbentuk bermacam-macam, salah satunya dapat diterapkan pada SHM dengan melakukan integrasi dengan *Wireless Sensor Network* (WSN) yang merupakan perangkat nirkabel yang dipasang di jaringan berskala besar yang memiliki kemampuan melakukan pendeteksian, komputasi, dan komunikasi dengan mengkombinasikan teknologi sensor, komputasi, komunikasi dan pemrosesan.

Berdasarkan masalah tersebut yang telah dijelaskan, maka perlu dibuat suatu sistem untuk menyelesaikan permasalahan yang ada saat ini. Dengan membuat sebuah sistem yang dapat melakukan pengecekan secara otomatis dan terus-menerus yang menghasilkan data yang akurat beserta nilai kondisi jembatan tersebut, diharapkan menjadi suatu solusi untuk menyelesaikan masalah di atas. Oleh karena itu, mengacu pada permasalahan diatas topik yang akan dibuat yaitu “Pengembangan Purwarupa Sistem Pengawasan Kondisi Kesehatan Jembatan *Single Degree Of Freedom* Menggunakan Respon Dinamik”.

2. Dasar Teori dan Sistematika Penelitian

2.1 *Structural Health Monitoring* (SHM)

SHM adalah proses penerapan deteksi kerusakan dan karakterisasi strategi untuk *engineering structures*. Tujuan aplikasi SHM untuk struktur baru adalah untuk mengumpulkan secara nyata atau dalam interval waktu yang teratur, data yang terkait dengan komponen struktural yang terlibat dalam fabrikasi, manufaktur, dan proses konstruksi untuk menguji risiko keamanan struktur baru [4]. Keberhasilan pelaksanaan dan pengoperasian sistem SHM di jembatan dengan skala besar sekitar 40 jembatan bentang panjang (dengan rentang 100 m atau lebih) di seluruh dunia telah integrasi kan dengan sistem pemantauan kesehatan struktural [5]. SHM dapat berfungsi sebagai sistem peringatan darurat dan dapat memberikan penilaian keamanan untuk pemeliharaan dan identifikasi keputusan kerusakan struktural, di antara tujuan lain [6]. Semua sistem SHM bergantung pada integrasi tiga subsistem utama yang diimplementasikan untuk memenuhi persyaratan SHM dan mengatur kegiatan monitoring [4] yaitu:

1. *Sensing and Data Acquisition Subsystem*, merupakan komponen akuisisi data yang termasuk sensor untuk mengamati dan mengukur data yang sesuai dalam berbagai kondisi lingkungan dan juga merupakan sistem komunikasi data untuk transmisi data yang diukur ke server secara *real-time*.
2. *Data Management Subsystem*, merupakan subsistem manajemen data yang terdiri dari teknik pengumpulan data, penyimpanan data serta pengolahan data untuk memberikan evaluasi kondisi struktur.
3. *Data Access and Retrieval Subsystem*, merupakan subsistem yang didasarkan pada kontrol dan akses data online atau offline, dalam analisis dan interpretasi sistem data ini dilakukan untuk memberikan informasi yang berguna untuk *decision making* (pengambilan keputusan).

Pada SHM terdapat beberapa metode dalam hal mendeteksi kerusakan struktural (*Struktur damage detection*). Metode-metode yang pada umumnya digunakan yaitu *Non-destructive Testing Methods* (NDT), *Vibration-based Damage Detection Methods*, dan *Consideration of Uncertainties* [3]. Metode yang di pakai untuk penelitian ini merupakan metode *Vibration-based Damage Detection Methods* merupakan metode yang mengidentifikasi kerusakan dari perubahan pada getaran. Metode ini telah dikembangkan pada premis yang umumnya mengukur kuantitas getaran, seperti *response time-histories* and *global vibration characteristics*, yang merupakan fungsi dari sifat fisik dari struktur (massa, redaman, batas kondisi dan kekakuan). Berkaitan dengan algoritma yang digunakan, metode ini dapat diklasifikasikan ke dalam metode korelasi langsung (*non-model based*) dan model memperbarui metode (*model-based*). Menurut parameter dinamis yang diadopsi, metode deteksi kerusakan dapat dikategorikan ke dalam *time-domain*, *frequency domain*, dan *time-frequency domain methods*

2.2 *Internet of Things* (IOT)

IoT adalah suatu jaringan yang menghubungkan berbagai objek yang memiliki identitas pengenal, sehingga dapat saling berkomunikasi dan bertukar informasi mengenai dirinya maupun lingkungan dengan me menghasilkan layanan-layanan dan saling bekerjasama untuk mencapai suatu tujuan bersama [7]. Konsep IoT bertujuan untuk membuat Internet lebih *immersive* dan *pervasive* dengan memungkinkan akses dan interaksi yang mudah dengan berbagai perangkat seperti, peralatan rumah tangga, kamera pengintai, sensor pemantauan, *actuator*, *display*, kendaraan, dan sebagainya, IoT akan mendorong pengembangan sejumlah aplikasi yang memanfaatkan jumlah dan variasi data yang sangat besar yang dihasilkan oleh objek-objek tersebut untuk menyediakan layanan baru bagi warga, perusahaan, dan administrasi publik [8].

IoT dapat membuat objek fisik/elektronik untuk berkomunikasi antara satu sama lain dengan memberikan informasi dan koordinasi dengan membuat objek-objek ini dari tradisional menjadi pintar dengan melakukan pengaturan komputasi pada alat, teknologi komunikasi, jaringan sensor dan aplikasi [9]. Memahami *building block* dan teknologi IoT berdasarkan makna dan fungsi sebenarnya dapat dilakukan dengan memahami enam elemen yang ada pada IoT sebagai berikut [9]:

1. *Identification*, identifikasi sangat penting bagi IoT untuk mencocokkan layanan dengan permintaan yang ada. Banyak metode identifikasi tersedia untuk IoT seperti Electronic Product Codes (EPC) dan ubiquitous codes (uCode).
2. *Sensing*, sensing IoT berarti mengumpulkan data dari objek terkait dalam jaringan dan mengirimnya kembali ke gudang data, basis data, atau cloud. Data yang terkumpul dianalisis untuk mengambil tindakan spesifik berdasarkan layanan yang dibutuhkan. Sensor IoT dapat berupa sensor pintar, actuators, atau perangkat penginderaan yang dapat dikenakan.
3. *Communication*, teknologi komunikasi IoT menghubungkan benda-benda heterogen bersama untuk memberikan layanan cerdas tertentu. Biasanya, node IoT harus beroperasi menggunakan daya rendah di hadapan sambungan komunikasi yang rawan dan berisik. Contoh protokol komunikasi yang digunakan untuk IoT adalah Wi-Fi, Bluetooth, IEEE 802.15.4, Z-wave, dan LTE-Advanced.
4. *Computation*, unit pemrosesan dan aplikasi perangkat lunak mewakili "otak" dan kemampuan komputasi IoT. Berbagai platform perangkat keras dikembangkan untuk menjalankan aplikasi IoT seperti Arduino, UDOO, Friendly ARM, Intel Galileo, Raspberry PI, Gadgeteer, Beagle Bone, Cubie board, Z1, WI Sense, Mulle, dan T-Mote Sky.
5. *Services*, layanan IoT dapat dikategorikan dalam empat kelas: Layanan terkait identitas, Layanan Agregasi Informasi, Layanan Collaborative-Aware, dan Layanan di mana-mana. Layanan terkait identitas adalah layanan paling mendasar dan penting yang digunakan dalam jenis layanan-lain. Layanan Agregasi Informasi mengumpulkan dan meringkas pengukuran sensorics mentah yang perlu diproses dan dilaporkan ke aplikasi IoT. Collaborative-Aware Services bertindak di atas Layanan Agregasi Informasi dan menggunakan data yang diperoleh untuk membuat keputusan dan bereaksi sesuai.
6. *Semantics*, dalam IoT mengacu pada kemampuan untuk mengekstrak pengetahuan dengan cerdas oleh berbagai mesin untuk menyediakan layanan yang dibutuhkan.

2.3 Wireless Sensor Network (WSN)

Wireless Sensor Network (WSN) adalah layanan yang paling standar yang digunakan dalam aplikasi komersial dan industri, karena perkembangan teknisnya dalam prosesor, komunikasi, dan penggunaan daya rendah perangkat embedded computing. WSN terdiri atas sekumpulan sensor (alat pendeteksi) yang tersebar dan memiliki kemampuan untuk melingkupi area atau wilayah geografis tertentu yang disebut sebagai area sensor, dimana pada area sensor itu terdapat banyak sekali parameter – parameter yang dapat dideteksi [10]. WSN dibangun dengan node yang digunakan untuk mengamati lingkungan seperti suhu, kelembaban, tekanan, posisi, getaran, suara dan sejenisnya. Node ini dapat digunakan dalam berbagai aplikasi real-time untuk melakukan berbagai tugas seperti *smart detection*, pemrosesan data dan penyimpanan, pengumpulan data, pelacakan target, memantau dan mengendalikan, sinkronisasi, *node*, dan *routing* efektif antara *base station* dan *node*. Berdasarkan fungsinya, *node* dalam WSN dibagi menjadi tiga jenis, yaitu sebagai berikut [11]:

1. Sensor Node merupakan sebuah node – node yang merepresentasikan sensor dalam suatu jaringan sensor nirkabel yang berfungsi untuk melakukan pembacaan data dari lingkungan nyata
2. *Sink node* adalah sebuah node yang berguna sebagai penyimpan data yang ada dalam setiap sensor node pada sebuah jaringan sensor nirkabel dan juga dapat mengirim data ke perangkat-lain.
3. Base Station berguna sebagai tempat penampung sementara pada saat mengumpulkan atau pengiriman data dari sensor node.

Penggunaan komunikasi *wireless* sebagai pengganti kabel dalam sistem pemantauan struktural pada awalnya diusulkan oleh Straser sebagai sarana mengurangi biaya instalasi dalam struktur sipil skala besar [12]. Tidak seperti jaringan tradisional, WSN memiliki kendala desain dan sumber daya sendiri. Kendala sumber daya termasuk jumlah energi yang terbatas, jangkauan komunikasi pendek, *bandwidth* rendah, dan pemrosesan dan penyimpanan yang terbatas di setiap node [13]. Pada penggunaan WSN pada SHM hal yang paling penting di perhatikan yaitu *Sensor and Parameter* dan *Damage Detection and Localization* [14].

Sensor Parameters adalah parameter-parameter yang umumnya terdeteksi, direkam, dan dipantau dalam sistem SHM dapat diklasifikasikan secara luas yaitu *Load* yang merupakan beban, *Global Load Respon* adalah respons terhadap beban tertentu yang dapat diukur di seluruh struktur, *Local Load Respon* adalah respons struktur terhadap beban tertentu yang hanya dapat diukur dalam bagian tertentu dari struktur, dan *Environmental Factor* merupakan faktor lingkungan yang berada di luar struktur itu sendiri dan berhubungan dengan lingkungan struktur. Parameter yang diukur meliputi suhu, salinitas, kelembaban, dan keasaman atmosfer [15].

Damage Detection Methods tujuan utama dalam SHM adalah deteksi kerusakan struktural. Pada proses deteksi kerusakan membutuhkan pengumpulan data sensor yang dapat digunakan untuk mengekstrak parameter-parameter yang terkait dengan kesehatan keseluruhan struktur. Parameter yang paling umum digunakan dalam deteksi kerusakan adalah parameter modal seperti frekuensi alami dan bentuk mode.

Hal menjadi fokus dari penelitian ini adalah pada bagian *Frequency Domain Based* atau analisis domain frekuensi, data *time series* yang dikumpulkan lalu diubah dari domain waktu ke domain frekuensi melalui transformasi seperti *Fast Fourier Transform (FFT)*. FFT merupakan suatu algoritma yang digunakan untuk merepresentasikan sinyal dalam

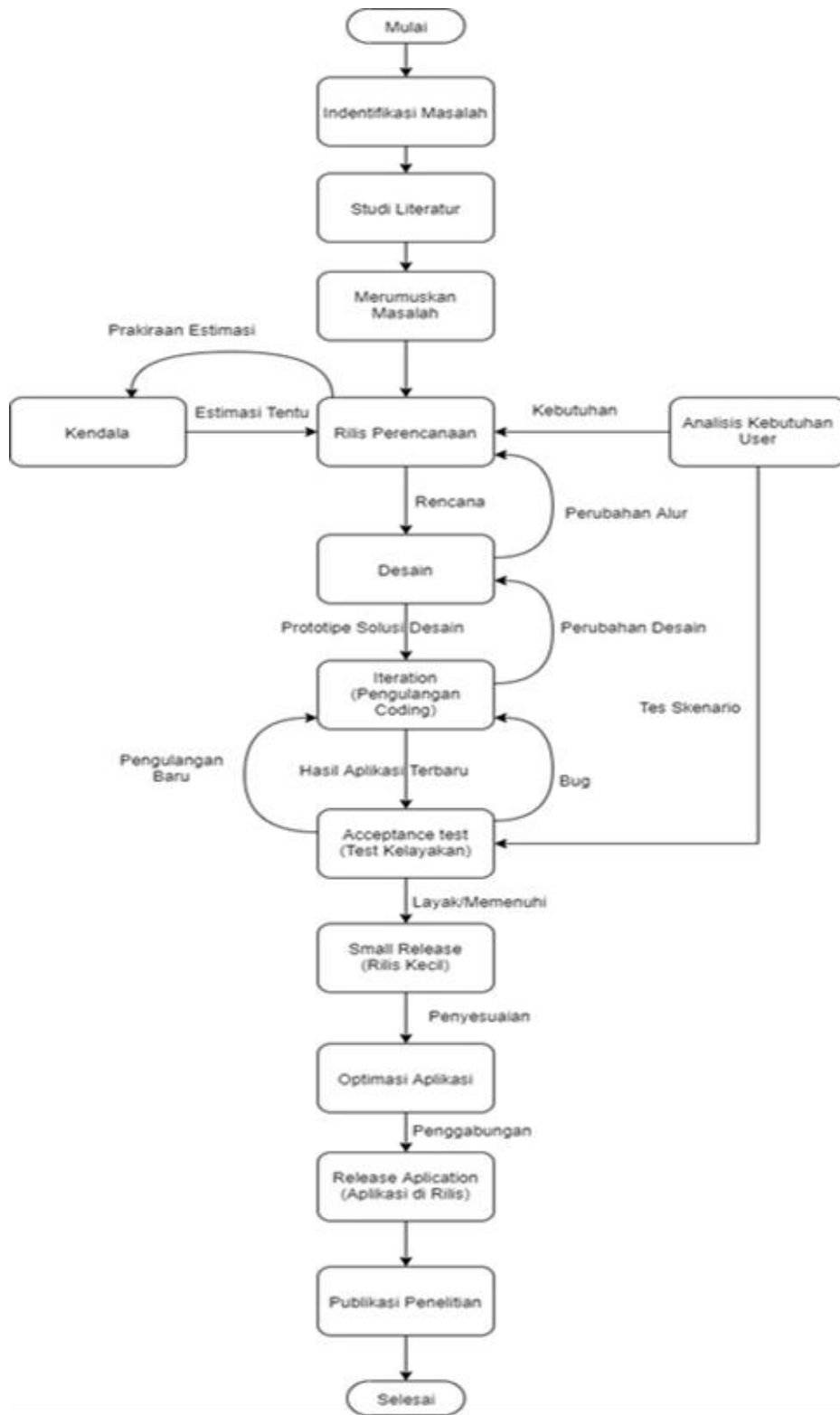
domain waktu diskrit dan domain frekuensi. Teknik umum yang digunakan adalah *Peak Picking*, menggunakan FFT yang diterapkan untuk mengumpulkan data sensor dan *Eigenfrequencies* (salah satu frekuensi natural) diidentifikasi di puncak plot respon frekuensi. *Eigenfrequencies* digunakan dalam ekstraksi frekuensi alami, rasio redaman dan bentuk mode. Metode akan mudah diterapkan jika puncak respons frekuensi ditentukan dengan baik dan rasio redaman rendah. Untuk data akselerasi dalam domain frekuensi, metode *peak-picking* digunakan untuk memilih amplitudo puncak dan frekuensi fundamental yang sesuai. *Peak Picking* merupakan metode cepat untuk identifikasi karakteristik modal dari sebuah jembatan karena merupakan metode *nonparametric*, yang sebagian besar digunakan untuk data percepatan dalam domain frekuensi. Konsep metode ini didasarkan pada fakta bahwa respons frekuensi suatu struktur melewati nilai-nilai puncak di sekitar frekuensi alami.

Dalam arsitektur jaringan sensor yang berbeda untuk aplikasi industri pemeliharaan preventif dibandingkan menyimpulkan bahwa biaya investasi rendah dibandingkan dengan hasil yang diperoleh [16]. Pada WSN terdapat fitur *Accelerometer* dan *weight in motion*. *Accelerometers* digunakan untuk berbagai macam aplikasi seperti memantau struktur besar walaupun pada umumnya dianggap cukup untuk memiliki kisaran dinamis 1-2 g, sensitivitas dalam kisaran μg dan karakteristik noise rendah dan di rubah ke resolusi sampling setidaknya 16 bit per sampel [6].

2.4 Sistematika Penelitian

Sistematika penelitian merupakan bagian yang mendeskripsikan atau menjelaskan langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian. Pada penelitian ini perancangan sistem penilaian pengawasan kondisi infrastruktur dan kapasitas jembatan berbasis *Wireless Sensor Network* (WSN) menggunakan metode pengembangan perangkat lunak *Extreme Programming* (XP). Metode *Extreme Programming* (XP) merupakan model pengembangan perangkat lunak yang menyederhanakan berbagai tahapan dalam proses pengembangan sistem tersebut agar adaptif juga fleksibel. *Extreme programming* berfokus pada seluruh area pengembangan sistem ini tidak hanya pada bagian coding saja.

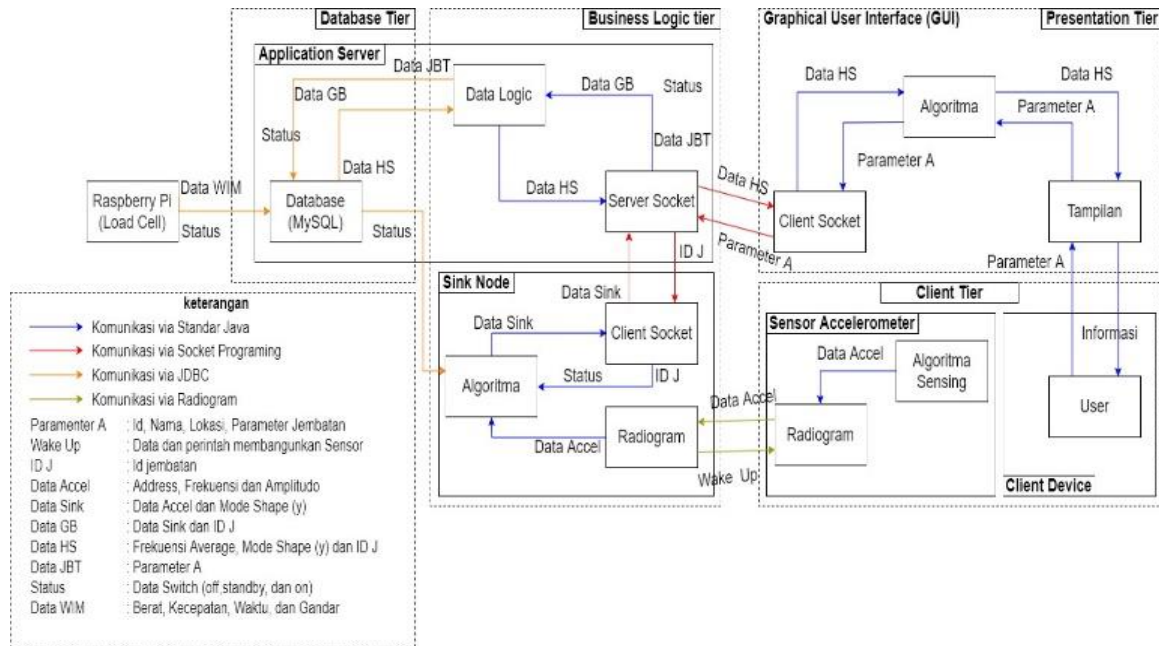
Dapat dilihat dari Gambar 1, sistematika penelitian ini dimulai dengan melakukan identifikasi masalah yang ada di dalam penelitian ini dengan dukungan tinjauan pustaka untuk memudahkan menyimpulkan masalah yang ada. Kemudian dilanjutkan kepada metode *Extreme Programming* (XP) yang dimulai dengan melakukan Rilis Perencanaan berdasarkan analisis kebutuhan yang dilakukan juga dengan memperhitungkan kendala yang akan muncul. Kemudian setelah merilis perencanaan maka akan melakukan desain sketsa dengan hasil prototipe solusi desain dari aplikasi yang dibangun berdasarkan perencanaan yang telah dirilis. Kemudian akan dilakukannya iterasi atau pengerjaan *coding* yang dilakukan secara berulang untuk menyelesaikan dan menyesuaikan dengan desain yang ada. Kemudian dilakukannya *Acceptance Test* (tes kelayakan) dengan cara menguji hasil aplikasi yang telah dikembangkan dengan merujuk kepada skenario yang telah disimpulkan pada saat analisis kebutuhan, jika layak maka akan dilakukan *small release* aplikasi tetapi jika dinyatakan tidak layak maka akan melakukan perulangan coding untuk memenuhi tes skenario, jika masih saja tetap tidak bias atau menemukan ide lain yang harus merubah beberapa hal maka pertama-tama akan melakukan perubahan desain yang telah dibuat dan jika dirasa kesalahan yang ada muncul pada bagian perencanaan maka akan dilakukan perubahan alur dengan mengambil lagi kebutuhan yang telah di definisikan pada analisis kebutuhan beserta pertimbangan akan kendala yang ada. Jika aplikasi baru berhasil memenuhi proses *Acceptance Test* maka akan dilakukan *small release* kembali dan melakukan optimisasi aplikasi, setelah di optimisasi akan melakukan penggabungan dari *small release* yang telah di optimalkan menjadi rilis aplikasi secara komplit, dan terakhir akan dilakukannya publikasi penelitian.



Gambar 1 Sistematika Pemecahan Masalah

3. Desain dan Implementasi

Arsitektur yang digunakan adalah arsitektur 3 tier. Arsitektur ini terdiri dari *Presentation tier*, *Business Logic Tier*, dan *Data tier*. *Presentation tier* merupakan layer yang berhubungan dengan user, sebagai *User Interface*. *Business Logic Tier* merupakan layer untuk manajemen data, yang meliputi pengolahan, penggabungan, pengurutan, dll. Sedangkan, *data tier* merupakan layer yang berisikan database untuk menyimpan data. *Presentation tier* merupakan GUI (client) yang didesain berada pada sebuah ruang pengawas jembatan. *Data tier* dan *Business Logic Tier* terletak pada server. Untuk meningkatkan keamanan, client akan mengakses server melalui *Data tier* dan tidak secara langsung mengakses database. Berikut merupakan representasi Diagram Blok dari sub-sistem ini, berdasarkan arsitektur yang dijelaskan.



Gambar 2 Diagram Blok Sistem

3.1. Rating

Rating Jembatan merupakan parameter kesehatan jembatan berdasarkan perbandingan frekuensi desain (frekuensi natural) dengan frekuensi fundamental (frekuensi *real time* jembatan). Nilai rating jembatan berada pada rentang 0 sampai 9 dengan keterangan sebagai berikut. Penjelasan di atas menjadi referensi laporan kondisi jembatan yang digunakan. Rumus penentuan rating jembatan adalah sebagai berikut [17].

$$\begin{aligned}
 \text{Rating} &= \text{integer} (9 - G) \\
 G &= \Delta f * \frac{1000}{123} \\
 \Delta f &= \frac{f_{\text{new}} - f}{f_{\text{new}}}
 \end{aligned}$$

f_{new} merupakan nilai frekuensi natural jembatan yang berasal dari proses input user sedangkan f merupakan nilai frekuensi fundamental yang berasal dari data di server. f_{new} dapat ditentukan dengan menginputkan beberapa parameter jembatan, jika material jembatan merupakan beton, atau langsung menginputkan nilai frekuensi natural.

$$f_{\text{new}} = 3.5608 \sqrt{\frac{EI}{m_t L^3}} * 0.826$$

Sebelum user memberikan input frekuensi natural, rating jembatan akan dituliskan sebagai “-”.

3.2. Mode shape

Mode shape merupakan bentuk jembatan berdasarkan amplituda sensor yang disebabkan oleh kendaraan yang melintas. *Mode shape* memiliki bentuk 3D, jadi bentuknya akan semakin baik jika semakin banyak sensor yang diletakkan di jembatan. Jumlah sensor yang sedikit menyebabkan *mode shape* kurang representatif. Maka dari itu, pemetaan menambahkan algoritma interpolasi “Newton Divided Difference” agar *mode shape* lebih halus. Berikut merupakan formula interpolasi yang digunakan.

$$f(x_0, x_1, \dots, x_n) = \frac{f(x_1, \dots, x_n) + (x_1, \dots, x_n - 1)}{x_n - x_n}$$

Hasil penerapan rumus di atas dimasukkan ke dalam polinom dengan rumus sebagai berikut.

$$P_0(x) = f(x_0) + (x-x_0)f[x_0, x_1] + (x-x_0)(x-x_1)f[x_0, x_1, x_2] + \dots + (x-x_0) \dots (x-x_{n-1})f[x_0, x_1, \dots, x_n]$$

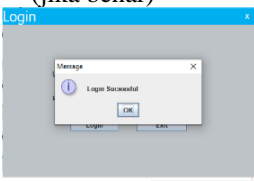
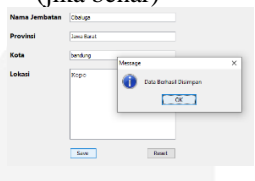
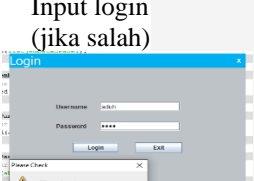
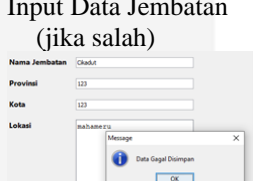


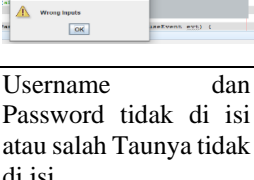
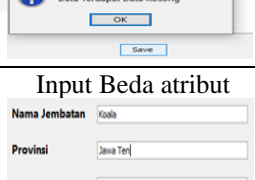
Titik dari amplituda perpindahan dan hasil interpolasi akan dipetakan dalam GUI. Pemetaan ini menggunakan library eksternal java yaitu surfaceplotter 2.0. Library ini memungkinkan aplikasi menampilkan bentuk 3D berdasarkan titik-titik tertentu. Bentuk 3D yang ditampilkan dapat digerakkan, digeser, dan diperbesar/perkecil.

4. Hasil Pengujian

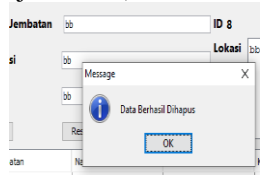
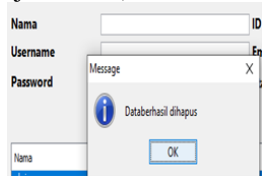
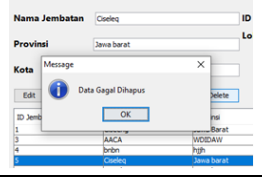
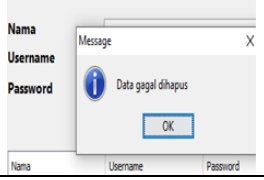

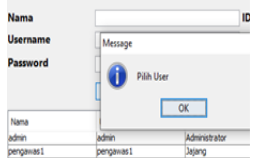
4.1. Pengujian Black box

Pengujian Black box juga dikenal sebagai pengujian fungsional, karena pengujian Black box memang focus kepada pengujian fungsional sistem. Pengujian Black box memiliki tujuan untuk menemukan kesalahan fungsi pada program. Metode pengujian ini dilakukan dengan cara memberikan sejumlah input pada program. Input tersebut kemudian diproses sesuai dengan kebutuhan fungsionalnya untuk melihat apakah program aplikasi dapat menghasilkan output yang sesuai dengan yang diinginkan dan sesuai pula dengan fungsi dasar dari program tersebut. Apabila dari input yang diberikan proses dapat menghasilkan output yang sesuai dengan kebutuhan fungsionalnya, maka program yang dibuat sudah benar, tetapi apabila output yang dihasilkan tidak sesuai dengan kebutuhan fungsionalnya, maka masih terdapat kesalahan pada program tersebut, dan selanjutnya dilakukan penelusuran perbaikan untuk memperbaiki kesalahan yang terjadi.

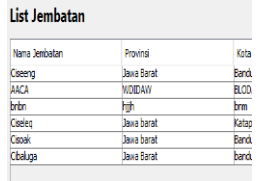
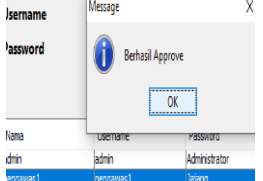
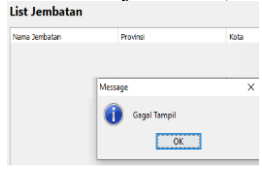
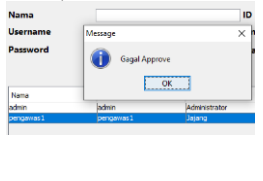
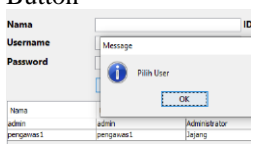
Tabel 1 Pengujian Black box Login dan Tambah Data

Requremen t	Skenario Pengujian	Hasil yang diharapka n	Hasil Pengu -jian	Requi- ment	Skenario Pengujian	Hasil yang diharapkan	Hasil Peng- ujian
Login	Input login (jika benar) 	Tampilkan Login Successful	Sesuai	Tambah Data	Input Data Jembatan (jika benar) 	Data berhasil disimpan dan Tampilkan bahwa data berhasil dikirim	Sesuai
	Input login (jika salah) 	Tampilkan Wrong Input	Sesuai		Input Data Jembatan (jika salah) 	Data gagal disimpan dan Tampilkan bahwa terjadi kesalahan	Sesuai
	Username dan Password salah 	Tampilkan bahwa username dan password salah (wrong input)	Sesuai		Tidak mengisi salah satu data 	Tampilkan bahwa Terdapat Data Kosong	Sesuai
	Username dan Password tidak di isi atau salah Taunya tidak di isi 	Tampilkan	Sesuai		Input Beda atribut 	Tidak bisa melanjutkan input dan muncul suara beep	Sesuai

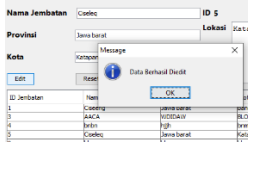
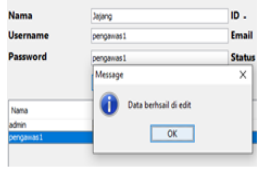
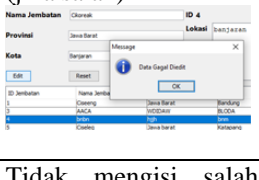
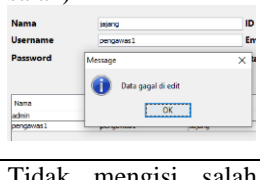

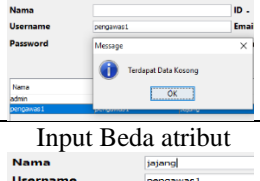
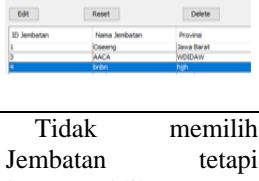
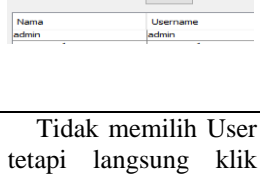
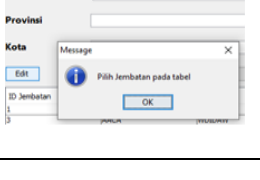
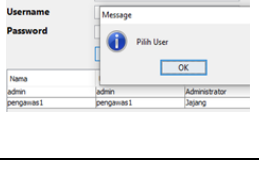
Tabel 2 Pengujian Black box Hapus Data dan Hapus Data User

Requirement	Skenario Pengujian	Hasil yang diharapkan	Hasil pengujian	Requirement	Skenario Pengujian	Hasil yang diharapkan	Hasil pengujian
Hapus Data	Hapus Data Jembatan (jika benar) 	Data berhasil dihapus dan Tampilkan bahwa data berhasil diupdate	Sesuai	Hapus Data User	Hapus Data User (jika benar) 	Tampilkan bahwa data berhasil diupdate	Sesuai
	Hapus Data Jembatan (jika salah) 	Data gagal dihapus dan Tampilkan bahwa terjadi kesalahan	Sesuai		Hapus Data User (jika salah) 	Data gagal disimpan dan Tampilkan bahwa terjadi kesalahan	Sesuai
	Tidak memilih Jembatan tetapi langsung klik Button 	Tampilkan Pilih Jembatan	Sesuai		Tidak memilih User tetapi langsung klik Button 	Tampilkan Pilih User	Sesuai

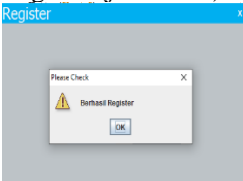

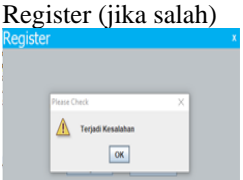

Tabel 3 Pengujian Black box Cek List Jembatan dan Approve

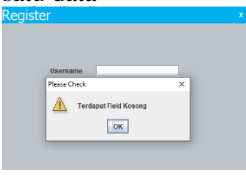
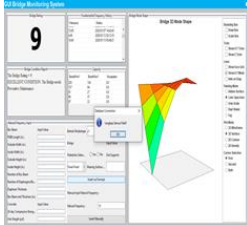
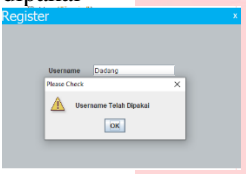
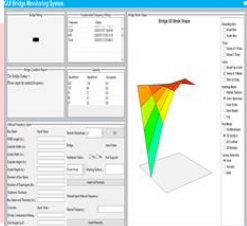
Requirement	Skenario Pengujian	Hasil yang diharapkan	Hasil pengujian	Requirement	Skenario Pengujian	Hasil yang diharapkan	Hasil pengujian
Cek List Jembatan	Cek List Data Jembatan (jika benar) 	Data Jembatan ditampilkan	Sesuai	Approve	Approve (jika benar) 	Data berhasil di approve dan Tampilkan bahwa data berhasil diupdate	Sesuai
	Cek List Data Jembatan (jika salah) 	Data Jembatan tidak ditampilkan dan Tampilkan Gagal Tampil	Sesuai		Approve (jika salah) 	Data gagal di approve Tampilkan bahwa gagal approve	Sesuai
					Tidak memilih User tetapi langsung klik Button 	Tampilkan Pilih User	Sesuai

Tabel 4 Pengujian Black box Edit Data dan Edit Data User



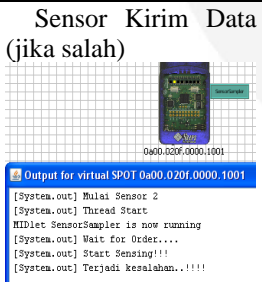
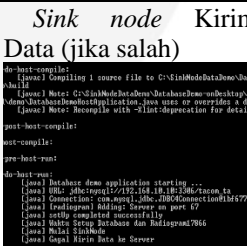
Requirement	Skenario Pengujian	Hasil yang diharapkan	Hasil pengujian	Requirement	Skenario Pengujian	Hasil yang diharapkan	Hasil pengujian
Edit Data	<p>Edit Data Jembatan (jika benar)</p> 	Data berhasil disimpan dan Tampilkan bahwa data berhasil diupdate	Sesuai	Edit Data User	<p>Edit Data User (jika benar)</p> 	Tampilkan bahwa data berhasil diupdate	Sesuai
	<p>Edit Data Jembatan (jika salah)</p> 	Data gagal disimpan dan Tampilkan bahwa terjadi kesalahan	Sesuai		<p>Edit Data User (jika salah)</p> 	Data gagal disimpan dan Tampilkan bahwa terjadi kesalahan	Sesuai
	<p>Tidak mengisi salah satu data</p> 	Tampilkan bahwa Terdapat Data Kosong	Sesuai		<p>Tidak mengisi salah satu data</p> 	Tampilkan bahwa Terdapat Data Kosong	Sesuai
	<p>Input Beda atribut</p> 	Tidak bisa input atribut berbeda dan muncul suara beep	Sesuai		<p>Input Beda atribut</p> 	Tidak bisa input atribut berbeda dan muncul suara beep	Sesuai
	<p>Tidak memilih Jembatan tetapi langsung klik Button</p> 	Tampilkan Pilih Jembatan	Sesuai		<p>Tidak memilih User tetapi langsung klik Button</p> 	Tampilkan Pilih User	Sesuai

Tabel 5 Pengujian Black box Register dan Monitoring

Requirement	Skenario Pengujian	Hasil yang diharapkan	Hasil pengujian	Requirement	Skenario Pengujian	Hasil yang diharapkan	Hasil pengujian
Register	<p>Register (jika benar)</p> 	Tampilkan Berhasil Register	Sesuai	Monitoring	<p>Monitoring Jembatan (jika benar)</p> 	Data Rating Didapatkan	Sesuai
	<p>Register (jika salah)</p> 	Tampilkan Terjadi Kesalahan	Sesuai		<p>Monitoring Jembatan (jika salah)</p> 	Data Rating tidak didapatkan	Sesuai

Requirement	Skenario Pengujian	Hasil yang diharapkan	Hasil pengujian	Requirement	Skenario Pengujian	Hasil yang diharapkan	Hasil pengujian
Register	Tidak mengisi salah satu data 	Tampilkan bahwa terdapat field kosong	Sesuai	Monitoring	Tidak mengisi salah satu data jika akan kalkulasi berdasarkan Civil 	Tampilkan bahwa Lengkapi Data	Sesuai
	Username telah dipakai 	Tampilkan bahwa username telah dipakai	Sesuai		Input Beda atribut 	Tidak bisa input atribut berbeda dan muncul suara beep	Sesuai

Tabel 6 Pengujian Black box Sensor Kirim Data dan Sink node Kirim Data

Requirement	Skenario Pengujian	Hasil yang diharapkan	Hasil pengujian	Requirement	Skenario Pengujian	Hasil yang diharapkan	Hasil pengujian
Sensor Kirim Data	Sensor Kirim Data (jika benar) 	Tampilkan bahwa data berhasil dikirim	Sesuai	Sink node Kirim Data	Sink node Kirim Data (jika benar) 	Tampilkan bahwa data berhasil dikirim	Sesuai
	Sensor Kirim Data (jika salah) 	Tampilkan bahwa terjadi kesalahan	Sesuai		Sink node Kirim Data (jika salah) 	Tampilkan bahwa terjadi kesalahan	Sesuai

4.2 Pengujian Kinerja

Pengujian Kinerja ini dilakukan untuk mengetes kinerja dari sistem Sensor *Accelerometer* dan *Sink node*. Kedua sistem ini bertugas untuk menangkap data dan juga mengirimkan data ke bagian server. Dalam pengujian yang dilakukan akan dicoba dihitung kecepatan proses atau lama waktu sistem melakukan proses data dan juga pengiriman data yang dilakukan oleh Sensor *Accelerometer* dan *Sink node* ini. Pada bagian *Sink node* akan mencoba untuk mengecek kecepatan SetUp (Koneksi Database dan Radiogram) dalam hitungan waktu millisecond yang hasilnya di dapatkan memakan waktu 651 millisecond. Kemudian untuk bagian mengirim data yang telah diproses oleh *Sink node* ke server memakan waktu 10 millisecond.

```
[java] Database demo application starting ...
[java] URL: jdbc:mysql://192.168.10.10:3306/tacom_ta
[java] Connection: com.mysql.jdbc.JDBC4Connection@55571e
[java] [radiogram] Adding: Server on port 67
[java] setUp completed successfully
[java] Waktu Setup Database dan Radiogram651
[java] Mulai SinkNode
[java] Menyalakan Sensor SunSpot Accelerometer
[java] [radiogram] Adding: Broadcast on port 78
[java] [radiogram]Removing: Broadcast on port 78
[java] S1
[java] Berhasil Kirim Ke Server
[java] Waktu kirim data ke server10
[java] Selesai Sensor 1
[java] Mulai SinkNode
```

Gambar 3 Hasil Printout Sink node

Bila Pada *Sensor Accelerometer* melakukan perhitungan waktu dalam hal proses FFT dilakukan juga proses kirim data ke *Sink node*. Waktu yang di habiskan untuk melakukan FFT hanya sebesar 30 *millisecond* dan untuk pengiriman data ke server hanya 80 *millisecond*.

```
[System.out] Mulai Sensor 1
[System.out] Thread Start
MIDlet SensorSampler is now running
[System.out] Wait for Order....
[System.out] Start Sensing!!!
[System.out] 0.892473118 0.897849462 0.930107527 0.9354
[System.out] Peak=0.956989247
[System.out] Waktu proses FFT:30
[System.out] 0a00.020f.0000.1002*4.69:1.13573E-5@5.47:4
[System.out] Waktu proses Kirim Data Radiogram:80
[System.out] Berhasil Kirim Ke SinkNode
[System.out] Wait for Order....
```

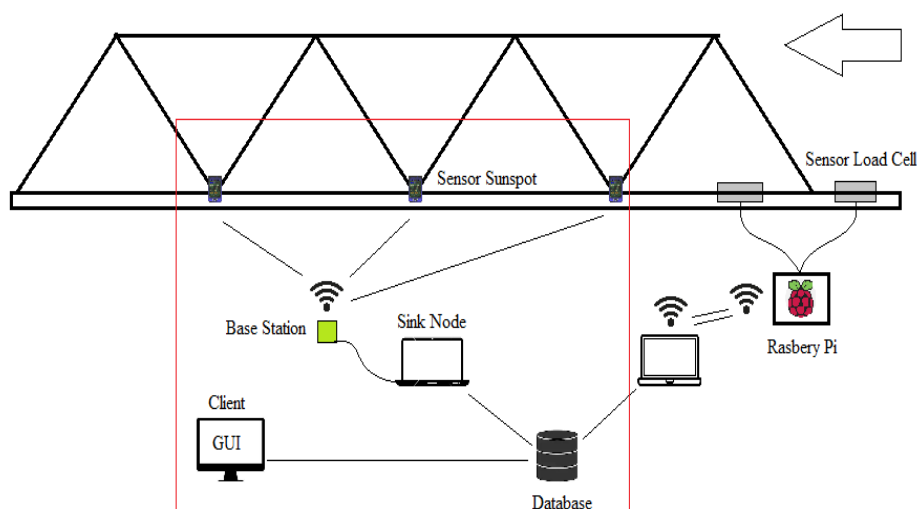
Gambar 4 Hasil Printout Sensor

4.3 Pengujian Sistem GUI di Miniatur Jembatan

Pengujian ini dilakukan agar GUI mampu menampilkan data average frekuensi, kapasitas, empat buah *Mode shape* dan rating jembatan. Prosedur yang akan dilakukan pada proses pengujian ini sebagai berikut:

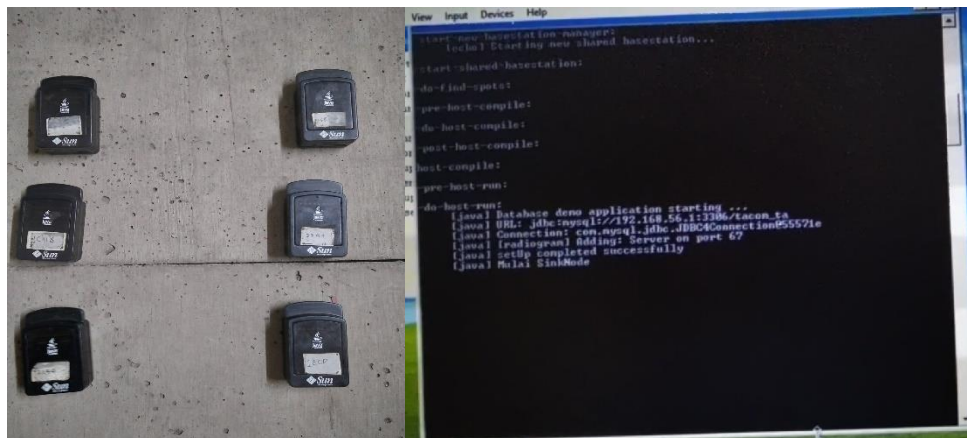
- Menyalakan *Sensor Accelerometer* untuk melakukan sensing dan *Sink node* untuk pengambilan dengan 6 sensor aktif
- Memulai GUI
- Mengamati Kemampuan GUI dan mengisi frekuensi natural jembatan
- Menampilkan data rating yang di peroleh dan juga mode shape

Arsitektur dari proses pengujian miniatur jembatan ini di gambarkan pada Gambar 5. Pada gambar tersebut di jelaskan hubungan antara device yang digunakan, singkatnya dijelaskan bahwa ketika mobil melewati sensor load cell maka data berat akan terekam dan data tersebut akan ditangkap oleh rasberypi dan diteruskan ke laptop yang diteruskan kembali ke database. Ketika database mengalami perubahan data makan sink node akan membangunkan sensor Sunspot untuk melakukan sensing, ketika selesai sensing dan perhitungan yang dilakukan di sunspot data hasil dikirimkan kembali ke sink node dan diteruskan ke database, kemudian data tersebut akan ditampilkan di GUI.



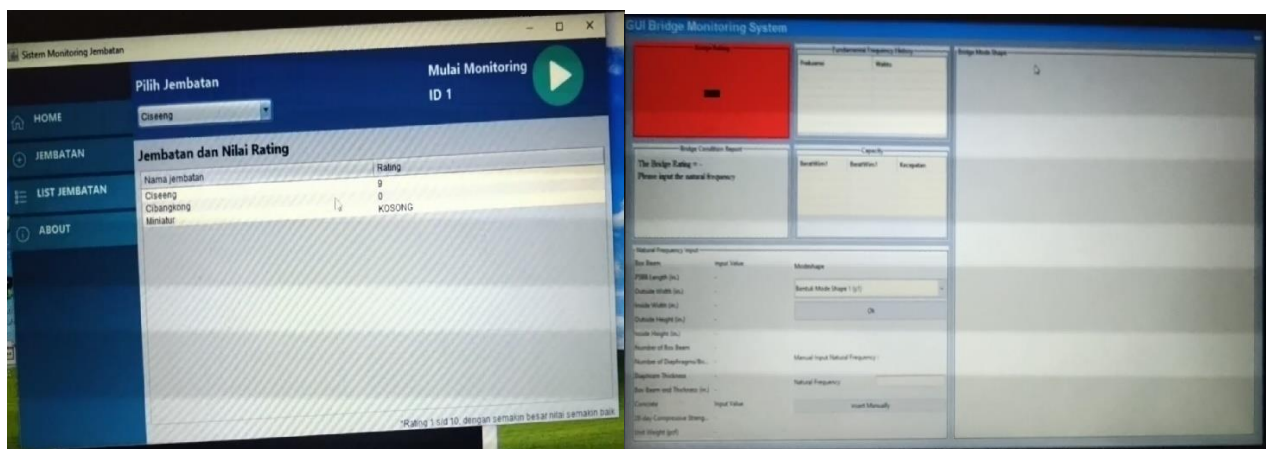
Gambar 5 Arsitektur Pengujian

Tahap Pertama menyiapkan sensor dan lakukan deploy ke setiap sensor yang akan digunakan dan jalankan Sink node dengan membuka cmd kemudian pergi ke direktori sink node lalu masukan perintah *ant host-run* seperti pada Gambar 6.



Gambar 6 Menyalakan Sensor dan Sink node

Kemudian menjalankan GUI untuk menerima data dan menampilkan data seperti pada Gambar 7, dan dilanjutkan memilih jembatan miniatur sebagai jembatan yang dilakukan testing.



Gambar 7 Halaman Home dan Halaman Monitoring

Kemudian melakukan testing dengan cara mobil melewati jembatan miniatur dan data getaran akselerasi mobil terhadap jembatan akan diambil oleh sensor dan akan dikirimkan ke Sink Node dan oleh Sink Node dikirimkan ke dalam Database seperti pada Gambar 8.



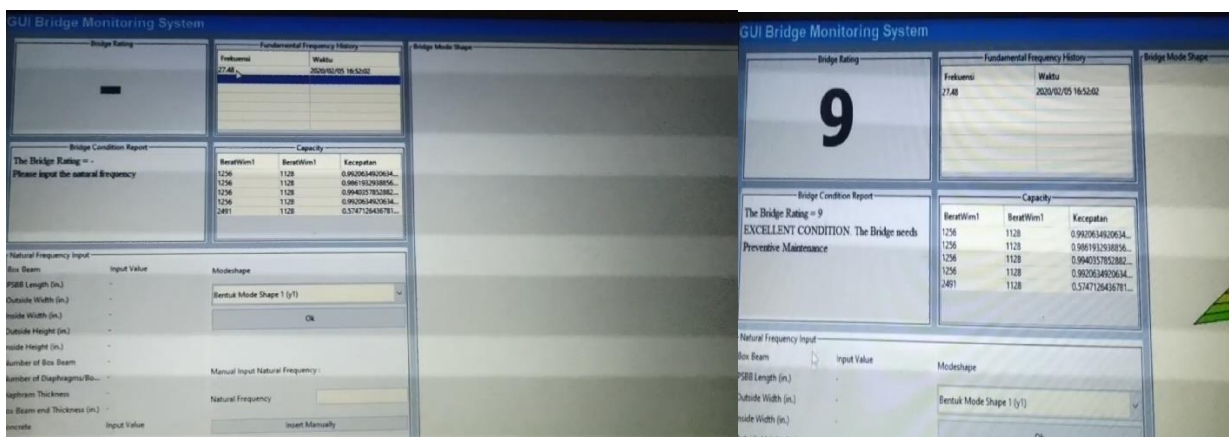
Gambar 8 Proses menjalankan mobil dan Sink node menerima data

Kemudian database akan terisi dengan hasil seperti pada Gambar 9.

id_sensor	date	f1	f2	f3	f4	a1	a2	a3	a4
S1	2020/02/05 11:38:37	29.69	16.41	14.06	13.28	0.0000002121	0.0000006016	0.0000007589	0.0000008107
S2	2020/02/05 08:57:34	28.91	21.09	29.69	17.19	0.0000002886	0.0000004829	0.0000002317	0.0000005984
S3	2020/02/05 08:57:57	28.13	28.91	17.19	26.56	0.0000007197	0.0000006147	0.000000152	0.0000004372
S4	2020/02/05 08:56:49	29.69	16.41	25	24.22	0.000000446	0.0000002316	0.0000005049	0.0000004879
S5	2020/02/05 08:57:37	25	38.28	22.66	12.5	0.0000003801	0.000001162	0.000000046	0.0000014985
S6	2020/02/05 09:07:50	23.44	22.66	29.69	25.78	0.0000006707	0.0000007129	0.0000004057	0.0000005193

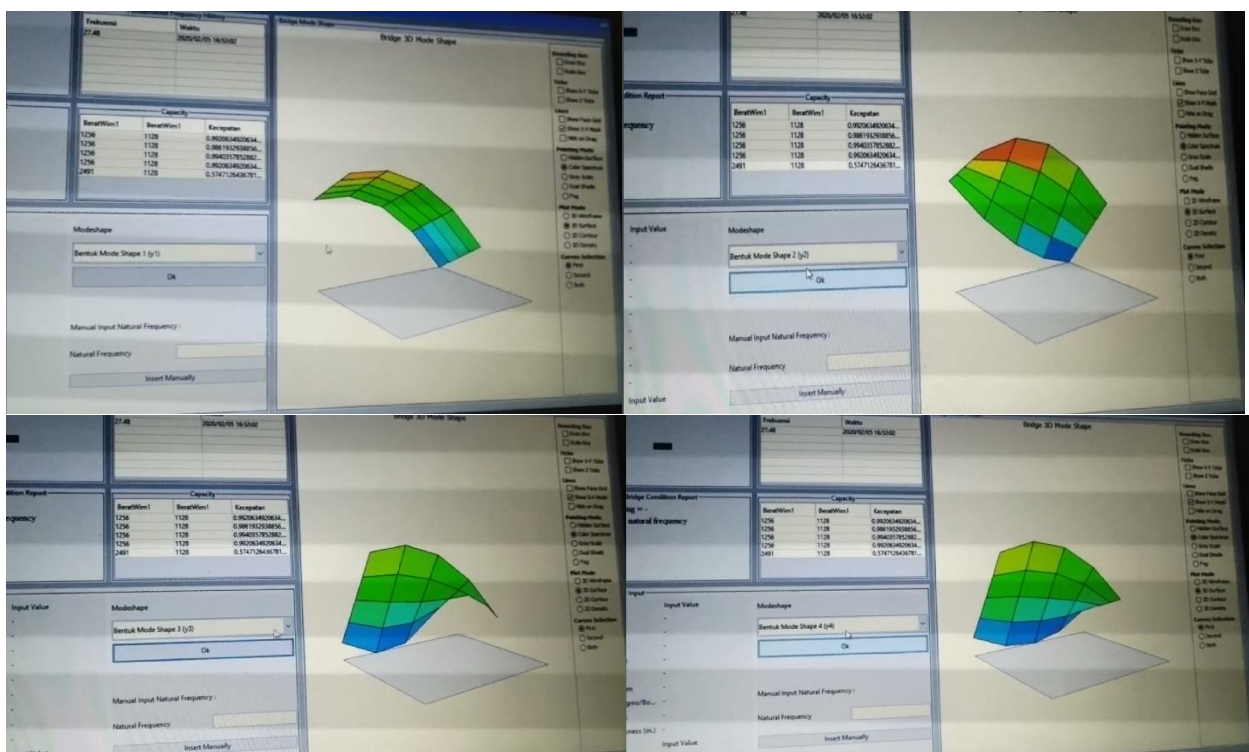
Gambar 9 Hasil data Sensing

Kemudian data akan muncul pada tampilan *Monitoring* GUI untuk bagian Frekuensi Average, beban, dan *Mode Shape*. Kemudian melakukan input frekuensi natural pada kolom input yang telah disediakan untuk menampilkan data rating seperti pada Gambar 10.



Gambar 10 Data ditampilkan ke GUI dan data rating ditampilkan

Kemudian untuk *Mode Shape* terdapat 4 buah yang dimana di tentukan berdasarkan amplitudo yang didapat dan untuk penampilan *Mode Shape* 1 sampai 4 dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11 Mode Shape 4 perubahan Mode Shape

5. Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan dari hasil pengujian dari penelitian ini dapat ditarik kesimpulan bahwa permasalahan yang muncul pada pengawasan jembatan dapat di atasi dengan penerapan sistem yang telah dibangun. Karena sistem yang telah dibangun ini telah berjalan secara otomatis untuk proses pengawasannya dengan memanfaatkan jaringan sensor nirkabel untuk pengambilan datanya dan GUI untuk menampilkan hasil rating, Mode Shape, dan berat.

Purwarupa sistem pengawasan kondisi kesehatan jembatan dapat berjalan sesuai dengan rancangan yang telah dibuat. Hal ini dapat dilihat dimana sistem mampu menampilkan data frekuensi beserta, kapasitas, dan Mode Shape. Kemudian Purwarupa sistem pengawasan kondisi kesehatan jembatan mampu memproses dan menampilkan nilai rating jembatan dan juga mampu menampilkan empat Mode Shape jembatan.

Pada pengembangan berikutnya akan dirasa perlu untuk melakukan pengembangan di sisi proses aplikasi yang dimana proses pengawasan dapat dilakukan dengan otomatis secara keseluruhan dan otonom. Kemudian perlunya sebuah solusi untuk penentuan perhitungan deteksi frekuensi natural sehingga solusi ini nantinya dapat di implementasi kan agar sistem dapat secara langsung melakukan perhitungan dan penentuan *rating* jembatan.



Daftar Pustaka:

- [1] PUSDATIN. 2017. Buku Informasi Statistik 2017. 1st ed. ed. PUSDATIN. Jakarta: PUSDATIN.
- [2] Ditjen Bina Marga. 1993a. Panduan Pemeriksaan Jembatan. 1st ed. ed. Ditjen Bina Marga. Jakarta: Ditjen Bina Marga.
- [3] Xu, You-lin, and Yong Xia. 2011. STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF LONG-SPAN SUSPENSION. 1st ed. ed. Spon Press. New York: Spon Press.
- [4] Tokognon, C. Jr. Arcadius, Bin Gao, Gui Yun Tian, and Yan Yan. 2017. "Structural Health Monitoring Framework Based on Internet of Things: A Survey." IEEE Internet of Things Journal 7(4): 4–7.
- [5] Ko, J. M., and Y. Q. Ni. 2005. "Technology Developments in Structural Health Monitoring of Large-Scale Bridges." Engineering Structures 27(12 SPEC. ISS.): 1715–25.
- [6] Hu, Xiaoya, Bingwen Wang, and Han Ji. 2013. "A Wireless Sensor Network-Based Structural Health Monitoring System for Highway Bridges." Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 28(3): 193–209.
- [7] Meutia, Ernita Dewi. 2015. "Internet of Things – Keamanan Dan Privasi." Seminar Nasional dan Expo Teknik Elektro 2015 1(1): 85–89.
- [8] Zanella, A et al. 2014. "Internet of Things for Smart Cities." IEEE Internet of Things Journal 1(1): 22–32.
- [9] Al-fuqaha, Ala et al. 2015. "Internet of Things : A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications." IEEE Internet of Things Journal 17(4): 2347–76.
- [10] Imanningtyas, Era, Sabriansyah Rizqika Akbar, and Dahnia Syauqy. 2017. "Implementasi Wireless Sensor Network Pada Pemantauan Kondisi Struktur Bangunan Menggunakan Sensor *Accelerometer* MMA7361." Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer 1(7): 545–54.
- [11] Karl, Holger and Andreas Willig. 2005. Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd.
- [12] Chae, M. J., H. S. Yoo, J. Y. Kim, and M. Y. Cho. 2012. "Development of a Wireless Sensor Network System for Suspension Bridge Health Monitoring." Automation in Construction 21(1): 237–52.
- [13] Yick, Jennifer, Biswanath Mukherjee, and Dipak Ghosal. 2008. "Wireless Sensor Network Survey." Computer Networks 52(12): 2292–2330.
- [14] Noel, Adam B. et al. 2017. "Structural Health Monitoring Using Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Survey." IEEE Communications Surveys and Tutorials 19(3): 1403–23.
- [15] Ou, Jinping, and Hui Li. 2010. "Structural Health Monitoring." SAGE 9(219): 219–31.
- [16] Gonz, Alfonso et al. 2010. "A Wireless Sensor Network Implementation for an Industrial Environment." In A Wireless Sensor Network Implementation for an Industrial Environment Alfonso, Argentina, 1–5.
- [17] AKM Anwarul Islam, PhD, PE, PhD Frank Li, MS Hiwa Hamid, and MS Amer Jaroo. 2014. Bridge Condition Assessment and Load Rating Using Dynamic Response. Ohio.