

**Pemanfaatan WSN(Wireless Sensor Network)  
Untuk Menganalisa Lokasi Kerusakan Jembatan  
Menggunakan Metode Berbasis SVM**

**Tugas Akhir**

**diajukan untuk memenuhi salah satu syarat**

**memperoleh gelar sarjana**

**dari Program Studi S1 Informatika**

**Fakultas Informatika**

**Universitas Telkom**

**1301188575**

**NOVIAN NURALDI**



**S1 Teknik Informatika**

**Fakultas Informatika**

**Universitas Telkom**

**Bandung**

**2020**

## LEMBAR PENGESAHAN

**Pemanfaatan WSN(Wireless Sensor Network) Untuk Menganalisa  
Lokasi Kerusakan Jembatan  
Menggunakan Metode Berbasis SVM**

*Utilization of WSN (Wireless Sensor Network) to Analyze Damage Location Of Bridge  
Using SVM Based Methode*

**1301188575**

**Novian Nurealdi**

Tugas akhir ini telah diterima dan disahkan untuk memenuhi sebagian syarat memperoleh gelar pada Program Studi Sarjana Teknik Informatika

Fakultas Informatika

Universitas Telkom

Bandung, 26 Januari 2021

Menyetujui

Pembimbing I,



Dr. Setyorini, ST., MT

NIP : 01760040

Pembimbing II,



Dr. Seno Adi Putra, S.Si, M.T.

NIP : 10780051

Ketua Program Studi  
Sarjana S1 Informatika



Niken Dwi Cahyani. S.T., M.Kom. PhD

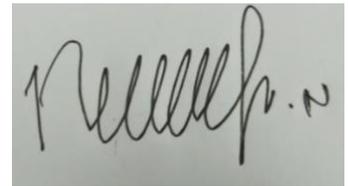
NIP: 00750052

## LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya, Novian Nuraldi ,menyatakan sesungguhnya bahwa Tugas Akhir saya dengan judul Melokalisasi Kerusakan Jembatan Menggunakan Metode SVM(Support Vektro Mesin) beserta dengan seluruh isinya adalah merupakan hasil karya sendiri, dan saya tidak melakukan penjiplakan yang tidak sesuai dengan etika keilmuan yang belaku dalam masyarakat keilmuan. Saya siap menanggung resiko/sanksi yang diberikan jika di kemudian hari ditemukan pelanggaran terhadap etika keilmuan dalam buku TA atau jika ada klaim dari pihak lain terhadap keaslian karya,

Bandung, November 2020

Yang Menyatakan

A rectangular box containing a handwritten signature in black ink. The signature is cursive and appears to read 'Novian Nuraldi'.

Novian Nuraldi

## Pemanfaatan WSN(Wireless Sensor Network) Untuk Menganalisa Lokasi Kerusakan Menggunakan Metode Berbasis SVM

Novian Nuraldi<sup>1</sup>, Dr. Setyorini, ST., M.T<sup>2</sup>·Dr. Seno Adi Putra, S.Si.,M.T<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Fakultas Informatika, Universitas Telkom, Bandung

<sup>3</sup>Fakultas Rekayasa Industri, Universitas Telkom, Bandung

<sup>4</sup>Ruang Eksperimen Civionics Engineering

<sup>1</sup>novianvian@students.telkomuniversity.ac.id, <sup>2</sup>setyorini@telkomuniversity.ac.id,

<sup>3</sup>adiputra@telkomuniversity.ac.id

---

### Abstrak

Jembatan adalah suatu konstruksi yang berfungsi untuk meneruskan jalan melalui suatu rintangan yang berada lebih rendah. Masalah yang umum ditemui dalam konstruksi jembatan adalah terjadinya kegagalan struktur. Secara umum kinerja jembatan dapat terganggu karena berbagai alasan termasuk korosi pada tulangan, pengurangan kekuatan beton, kelelahan retakan pada baja, retakan pada beton, dsb..

Setelah kerusakan struktural terdeteksi, maka perlu untuk menentukan lokasi kerusakan(Damage Location). SVM(Support Vektor Mesin). Hasil pengujian menunjukkan bahwa dengan menggunakan SVM dapat menunjukkan hasil akurasi kerusakan dari data jembatan normal dan jembatan rusak yang telah diklasifikasi menggunakan SVM dan didapatkan bahwa di sensor 1 dan 2 adalah lokasi kerusakan terbesar pada jembatan tersebut sesuai dengan scenario yang telah dibuat. Berdasarkan hasil pengujian dari metode SVM(Support Vektor Machine) menyatakan dapat disimpulkan bahwa analisa lokasi kerusakan pada struktur jembatan *Single Degree Of Freedom* yang diusulkan mampu mendeteksi kerusakan dan analisa lokasi kerusakan menggunakan klasifikasi SVM dari 10 kali percobaan dilakukan perbandingan antara akurasi dari data normal dan data rusak setiap sensor untuk menentukan lokasi kerusakan. Kemudian didapatkan hasil prediksi lokasi kerusakan terbesar terdapat di sensor 1 dan 2 pada segmen 1 dengan pengurangan pegas 75% dengan akurasi data normal sebesar 80%,65% dan Data Rusak Sebesar 95% dan 95% dan berpengaruh terhadap sensor 3 dan 4. mencari lokasi kerusakan menggunakan perbandingan antara data rusak dan normal dari akurasi tiap data yang didapatkan dengan menggunakan SVM yang sudah dihasilkan sesuai skenario kerusakan pada struktur jembatan.

**Kata kunci : SVM,Jembatan,Damage Location,klasifikasi**

---

### Abstract

A bridge is a construction that functions to continue the road through an obstacle that is lower. A common problem encountered in bridge construction is the occurrence of structural failure. In general, the performance of bridges can be impaired for various reasons including corrosion of reinforcement, reduced strength of concrete, fatigue cracks in steel, cracks in concrete, etc.

Once structural damage has been detected, it is necessary to determine the Damage Location. SVM (Support Vector Machine). The test results show that using SVM can show the results of the accuracy of damage from normal bridge data and damaged bridges that have been classified using SVM and it is found that sensors 1 and 2 are the biggest damage locations on the bridge according to the scenario that has been made. Based on the test results of the SVM (Support Vector Machine) method, it can be concluded that the analysis of the location of the damage on the proposed Single Degree Of Freedom bridge structure is capable of detecting damage and analyzing the location of the damage using the SVM classification from 10 attempts to compare the accuracy of normal data and data. damaged each sensor to determine the location of the damage. Then the results of the prediction of the location of the biggest damage are found in sensors 1 and 2 in segment 1 with a 75% reduction in spring with normal data accuracy of 80%, 65% and Broken Data by 95% and 95% and affect sensors 3 and 4. looking for locations damage using a comparison between damaged and normal data from the accuracy of each data obtained using the SVM that has been generated according to the damage scenario on the bridge structure.

**Keywords: SVM,Bridge,Damage Location,Classification,Detected,Accuracy**

---

## 1. Pendahuluan

### Latar Belakang

Jembatan adalah suatu konstruksi yang berfungsi untuk meneruskan jalan melalui suatu rintangan yang berada lebih rendah. Rintangan ini dapat berupa jalan lain (jalan air atau jalan lalu lintas biasa). Perkembangan transportasi yang semakin erat kaitannya dengan pembangunan, baik berupa pembangunan jalan maupun jembatan yang berfungsi untuk memperlancar arus kendaraan sehingga tercipta efisiensi waktu dalam beraktifitas. Untuk mencegah terjadinya musibah jembatan runtuh, perlu dilakukan pemantauan terhadap kesehatan jembatan atau biasa dikenal dengan Structural Health Monitoring System (SHMS)

Masalah yang umum ditemui dalam konstruksi jembatan adalah terjadinya kegagalan struktur. Secara umum kinerja jembatan dapat terganggu karena berbagai alasan termasuk korosi pada tulangan, pengurangan kekuatan beton, kelelahan retakan pada baja, retakan pada beton, dsb. Akibatnya, kesehatan dan daya dukung beban jembatan berkurang seiring waktu[1]. Sehingga timbul banyak kerusakan structural jembatan yang mengakibatkan runtuhnya sebuah jembatan secara tiba-tiba. Maka diperlukan sebuah alat sensor untuk mendeteksi kerusakan struktural pada jembatan tersebut.

*Structural Health Monitoring (SHM)* adalah suatu ilmu yang bertujuan untuk mendeteksi kerusakan dengan mengintegrasikannya ke dalam struktur untuk memonitor kesehatan dari suatu bangunan. Teknologi ini dapat memperpanjang umur pelayanan bangunan karena penurunan kemampuan dan kerusakan dapat diidentifikasi lebih awal (peringatan dini) sebelum terjadinya kerusakan yang lebih parah dan membutuhkan biaya rehabilitasi yang lebih besar. SHM ini didefinisikan sebagai penginderaan tak rusak dan analisa karakter struktur termasuk respon struktur untuk mendeteksi perubahan yang mengindikasikan adanya kerusakan atau penurunan kemampuan struktur [2].

*Fast Fourier Transform (FFT)* adalah suatu algoritma yang digunakan untuk merepresentasikan sinyal dalam domain waktu diskrit dan domain frekuensi. Domain waktu diskrit (Periode) didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan sebuah isyarat atau gelombang untuk mencapai suatu gelombang penuh dan dapat menentukan nilai periodesitasnya. Perlu dicermati bahwa pengertian ini berlaku untuk isyarat monokromatis, isyarat yang dimaksud adalah gelombangnya bersifat tunggal, pasti memiliki sebuah priode. Dengan demikian isyarat itu dikenal dengan istilah priodis, pengamatan dapat dilakukan dengan memantau gelombang kita dapat mengetahui nilai nilai yang terkandung dalam isyarat serta periodenya. Domain frekuensi yang diartikan sebagai jumlah gelombang yang terjadi dalam 1 detik. Frekuensi didefinisikan secara sederhana sebagai kebalikan dari waktu. Sehingga waktu yang satuannya adalah detik (second) akan menjadi Hertz (1-per second) hanya akan memiliki tepat satu nilai spektrum[3]

SVM(Support Vektor Mesin) adalah alat yang ampuh untuk pengenalan pola dan tampaknya berguna untuk mendeteksi lokasi kerusakan[4]. Hal ini membutuhkan data dari struktur kerusakan sehingga berhasil melatih dan mengklasifikasikan struktur ke dalam kelas rusak dan normal. SVM memiliki kinerja generalization yang lebih baik daripada metode lain dari masalah deteksi kerusakan dan lokasi sebuah jembatan. Sehingga keakuratan dalam menentukan lokasi kerusakan jembatan ini lebih akurat dan lebih pasti dengan menggunakan 3 natural frekuensi. Dibantu dengan sensor SunSpot berguna untuk mengumpulkan data. Data yang dikumpulkan diproses sedemikian rupa sehingga keputusan tentang kesehatan keseluruhan struktur dapat dibuat. Bagian ini memberikan gambaran yang nyata dari komponen dan proses yang terlibat dalam SHMS menggunakan. Maka dari itu untuk mengatasi hal tersebut SVM adalah pilihan yang tepat untuk menentukan lokasi sebuah kerusakan dan yang diusulkan untuk makalah ini[5]

### Topik dan Batasannya

Ada beberapa permasalahan yang bisa dirumuskan dari latar belakang diatas, permasalahan yang pertama adalah bagaimana SVM mampu mengidentifikasi kerusakan serta mendeteksi lokasi kerusakan pada sebuah jembatan, karena dalam sistem ini keakurasian data dan sensor yang bekerja sangat berpengaruh untuk menentukan titik lokasi sebuah kerusakan pada sebuah jembatan. Permasalahan kedua adalah bagaimana data time series diproses untuk ditransform menjadi data Frekuensi FFT. Permasalahan ketiga bagaimana data FFT diproses kemudian dari data FFT untuk dapat diklassifikasi menggunakan SVM. Permasalahan keempat bagaimana membangun klassifikasi antara data jembatan rusak dan jembatan normal untuk menghasilkan sebuah akurasi disetiap sensor. untuk Data yang digunakan pada sistem ini yaitu data yang telah diff dari sebuah data mentah dan diambil 3 frekuensi natural pertama Serta mampu mengklasifikasi sebuah data kerusakan sehingga dapat menghasilkan perbedaan antara data rusak dan normal pada sebuah jembatan secara optimal.

Dari perumusan masalah tersebut, diberikan batasan-batasan dari masalah ini untuk mempermudah, membatasi dan memperjelas masalah yang terjadi .Batasan yang harus diperhatikan dimulai dari objek yang akan di gunakan dalam penelitian ini yaitu jembatan yang dimana merupakan jembatan miniature *Test-bed* 1 bentang berskala 1:20 yang menerapkan model Single Degree of Freedom (SDOF), kemudian pada bagian SHM yang digunakan merupakan *Sensor Sun Small Programmable Object Technology (SunSPOT)* yang dimana sensor tersebut sudah tidak di produksi lagi di dunia, kemudian pada keterbatasan waktu yang ada terlalu singkat, dengan adanya *pandemic* tahun ini pembuatan jembatan miniatur *Test-bed* terhalang sehingga waktu pengambilan data terlalu singkat, kemudian menggunakan metode *SVM Method* dalam pengukuran SHM karena identifikasi kerusakan disesuaikan dengan data yang diambil yaitu frekuensi dasar dan amplitudo frekuensi, dan data yang di hitung adalah data fundamental frequency (frekuensi dasar), amplitudo frekuensi, dan kapasitas untuk dapat menentukan deteksi kerusakan serta dapat menentukan titik lokasi kerusakan pada jembatan.

## Tujuan

Tujuan dari penelitian yang dicapai adalah pertama, melakukan pengambilan data menggunakan sensor, data yang dihasilkan berupa data deret waktu yang akan di transformasi menggunakan *FFT* (*Fast Fourier Transform*) untuk mendapatkan data frequency natural, kedua mengambil 3 frekuensi natural tertinggi dari hasil transformasi *FFT* (*Fast Fourier Transform*), ketiga membangun sebuah algoritma SVM untuk menentukan lokasi kerusakan menggunakan klasifikasi SVM, keempat mengevaluasi algoritma yang dibangun untuk menghasilkan akurasi, sensitivitas, dan spesitivitas pada setiap percobaan. dari data normal dan data rusak disetiap sensor

## Organisasi Tulisan

Susunan penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut: pada bagian 1 merupakan uraian latar belakang serta permasalahan penelitian. Bagian 2 menunjukkan studi literatur yang terkait dengan penelitian ini. Bagian 3 menjelaskan sistem serta alur yang akan dialami metode mulai dari sensor menerima data hingga pemrosesan data. Bagian 4 menjelaskan Analisa mengenai penelitian yang dilakukan. Bagian 5 menyimpulkan hasil Analisa.

## 2. Studi Terkait

Studi sebelumnya dilakukan di MitaLaboratory of Keio University, menunjukkan bahwa metode deteksi kerusakan menggunakan SVM bekerja dengan baik dalam banyak kasus. Ruang lingkup pekerjaan ini adalah mengembangkan metode yang lebih baik untuk mengidentifikasi lokasi kerusakan dengan menggunakan sejumlah sensor. Kita tahu bahwa perubahan frekuensi alami yang terkait dengan mode tertentu tidak memberikan informasi spasial tentang kerusakan struktural, tetapi beberapa perubahan frekuensi alami dapat memberikan informasi tersebut. Namun, dalam situasi praktis, frekuensi natural yang diperoleh biasanya lebih kecil dari *Single Degree Of Freedom*. Metode yang diusulkan hanya membutuhkan tiga frekuensi natural pertama. Tiga frekuensi natural pertama digunakan untuk mendapatkan indikator lokasi kerusakan yang baru. Indikator ini adalah vektor fitur untuk pengenalan pola.

*Damage Detection and Localization* untuk SHM, node sensor mengumpulkan data parameter seperti akselerasi, regangan, kecepatan, dan perpindahan. Data mentah ini harus diproses sedemikian sehingga fitur seperti parameter modal struktur dapat diekstrak. Fitur-fitur ini digunakan oleh WSN berbasis SHM di deteksi kerusakan dan lokalisasi. Sisa dari bagian ini membahas teknik deteksi kerusakan dan lokalisasi yang umum digunakan. Salah satu tujuan utama dalam SHM adalah deteksi kerusakan struktural. Biasanya, deteksi kerusakan memerlukan pengumpulan data sensor yang dapat digunakan untuk mengekstrak parameter yang terkait dengan kesehatan keseluruhan struktur. Parameter yang paling umum digunakan dalam deteksi kerusakan adalah parameter modal seperti frekuensi alami dan bentuk mode. Estimasi parameter modal dapat dilakukan dalam domain waktu dan frekuensi. Setelah parameter modal diekstrak, algoritma deteksi kerusakan digunakan untuk menentukan apakah kerusakan telah terjadi (B, et al., 2017).

*Damage Localization Method* Setelah kerusakan struktural terdeteksi, maka perlu untuk menentukan lokasi kerusakan. Proses ini disebut lokalisasi kerusakan, yang memerlukan pemasangan sensor yang cukup sehingga cakupan sensor yang memadai disediakan untuk menemukan kerusakan di mana saja dalam struktur. Cakupan sensor yang tidak memadai dapat mengakibatkan deteksi kerusakan tanpa pelokalisasi. untuk menentukan lokasi kerusakan menggunakan indikator sensitivitas lokasi kerusakan dengan cara :

- a. Menentukan Frekuensi pertama dari struktur tidak rusak

$$\Rightarrow \frac{\omega_0^{(r)}}{2\omega_0^{(l)}} = \sin \left[ \frac{\pi}{2} \times \frac{2r-1}{2N+1} \right]$$

- b. Mencari konstanta perambatan gelombang  $\gamma_0^{(r)}$  of  $r^{\text{th}}$

$$\gamma_i^{(r)} = \gamma_0^{(r)} - \Delta \gamma_i^{(r)}$$

- c. Perubahan pada rumus diatas kerusakan pada sebuah element struktur diperoleh persamaan

$$\begin{aligned} & \cos \left[ \frac{\pi}{2} \times \frac{2r-1}{2N+1} \right] \sin \left[ (N+0.5) \Delta \gamma_i^{(r)} \right] \\ & + \Delta \xi_i \sin \left[ \frac{\pi}{2} \times \frac{2r-1}{2N+1} \right] \cos \left[ (N+0.5) \Delta \gamma_i^{(r)} \right] \\ & + \Delta \xi_i \sin \left[ \frac{\pi}{2} \times \frac{2r-1}{2N+1} \right] \cos \left[ (2i-1) \frac{2r-1}{2N+1} \right] \\ & \quad \times \cos \left[ (N+1.5-2i) \Delta \gamma_i^{(r)} \right] \\ & + \Delta \xi_i \sin \left[ \frac{\pi}{2} \times \frac{2r-1}{2N+1} \right] \cos \left[ (2i-1) \frac{2r-1}{2N+1} \right] \\ & \quad \times \sin \left[ (N+1.5-2i) \Delta \gamma_i^{(r)} \right] = 0 \end{aligned}$$

- d. Perubahan dalam frekuensi natural dapat menggabungkan persamaan

$$\Delta \omega_i^{(r)} = 2\omega_0^{(l)} \sin \left( \frac{\Delta \gamma_i^{(r)}}{2} \right)$$

- e. Perubahan frekuensi natural dapat dihitung dari persamaan

$$\delta\omega_l^{(r)} = \frac{\Delta\omega_l^{(r)}}{\omega_0^{(r)}} = \sin\left(\frac{\Delta\gamma_l^{(r)}}{2}\right) / \sin\left[\frac{\pi}{2} \times \frac{2r-1}{2N+1}\right]$$

- f. Hubungan diatas menunjukkan bahwa kerusakan terkait dengan frekuensi natural. Frekuensi natural dapat digunakan sebagai pola tergantung pada lokasi kerusakan

$$\delta\omega_l^{(r)} = \frac{\Delta\omega_l^{(r)}}{\omega_0^{(r)}} = \sin\left(\frac{\Delta\gamma_l^{(r)}}{2}\right) / \sin\left[\frac{\pi}{2} \times \frac{2r-1}{2N+1}\right]$$

- g. Persamaan dibawah menunjukkan sensitivitas perubahan pada frekuensi natural ke lokasi kerusakan ini digunakan untuk indeks lokasi kerusakan

$$I_l^{(r)} = \frac{\delta\omega_l^{(r)}}{\delta\omega_l^{(s)}} = \left( \sin\left[\frac{\pi}{2} \times \frac{2s-1}{2N+1}\right] / \sin\left[\frac{\pi}{2} \times \frac{2r-1}{2N+1}\right] \right) \times \left( \sin\left(\frac{\Delta\gamma_l^{(r)}}{2}\right) \sin\left(\frac{\Delta\gamma_l^{(s)}}{2}\right) \right)$$

### Fast Fourier Transform (FFT)

*Fast Fourier Transform (FFT)* adalah suatu algoritma yang digunakan untuk merepresentasikan sinyal dalam domain waktu diskrit dan domain frekuensi. Domain waktu diskrit (Periode) didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan sebuah isyarat atau gelombang untuk mencapai suatu gelombang penuh dan dapat menentukan nilai periodesitasnya. Data getaran yang diambil dari sensor accelerometer berupa data deret waktu yang kemudian akan dilakukan proses transformasi dari data getaran deret waktu menjadi data frekuensi menggunakan *FFT* (Fast Fourier Transform) untuk mendapatkan frekuensi natural.

Analisis sensitivitas idealnya melibatkan semua frekuensi natural. Namun, dalam beberapa kasus, tidak semua frekuensi natural tersedia. Oleh karena itu, kesalahan karena parameter mode yang tidak lengkap harus diperhitungkan. Untuk mengatasi masalah ini, kami menetapkan indikator lokasi kerusakan baru yang memiliki kemampuan pengenalan pola yang baik hanya dengan tiga frekuensi natural pertama. Dengan menggunakan rasio dalam Persamaan, kami mendefinisikan dua indikator lokasi kerusakan:

$$I_l^{(21)} = \frac{\delta\omega_l^{(2)}}{\delta\omega_l^{(1)}} = \left( \sin\left[\frac{\pi}{2} \times \frac{3}{19}\right] / \sin\left[\frac{\pi}{2} \times \frac{1}{19}\right] \right) \times \left( \sin\left(\frac{\Delta\gamma_l^{(2)}}{2}\right) \sin\left(\frac{\Delta\gamma_l^{(1)}}{2}\right) \right)$$

$$I_l^{(23)} = \frac{\delta\omega_l^{(2)}}{\delta\omega_l^{(3)}} = \left( \sin\left[\frac{\pi}{2} \times \frac{3}{19}\right] / \sin\left[\frac{\pi}{2} \times \frac{5}{19}\right] \right) \times \left( \sin\left(\frac{\Delta\gamma_l^{(2)}}{2}\right) \sin\left(\frac{\Delta\gamma_l^{(3)}}{2}\right) \right)$$

Perubahan dalam  $I_l^{(21)}$  dan  $I_l^{(23)}$  dapat digunakan sebagai vektor fitur. Mereka mungkin dapat digunakan untuk mengidentifikasi lokasi kerusakan dengan menggunakan beberapa frekuensi modal yang lebih rendah.

### SVM (Support Vektor Mesin)

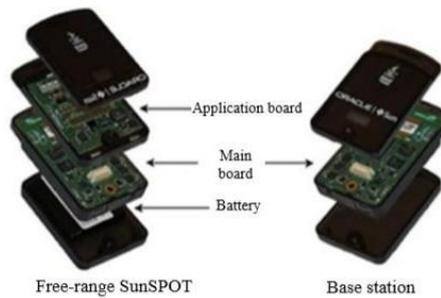
*Support Vektor Mesin (SVM) Method* adalah sistem pembelajaran mekanis yang menggunakan ruang hipotesis fungsi linear dalam ruang fitur dimensi tinggi. Ini telah digunakan untuk deteksi kerusakan struktural karena kemampuannya untuk membentuk batas yang akurat dari sejumlah kecil data pelatihan. SVMs digunakan untuk mengelompokkan pola kerusakan struktural untuk sistem SHM dengan jumlah minimal sensor. SVM adalah fenomena yang relatif baru di SHM. Di SVM digunakan untuk mengklasifikasikan pola kerusakan struktural untuk sistem SHM dengan jumlah sensor minimal. Melalui penggunaan satu sensor di atap gedung dan satu sensor di lantai bawah, kerusakan terbukti dapat dilokalisasi ke lantai tertentu di gedung. Lokalisasi kerusakan ditunjukkan dalam simulasi untuk skala bangunan hingga ketinggian 21 lantai. Hasil ini menunjukkan janji untuk menerapkan SVM pada lokalisasi kerusakan karena meminimalkan jumlah sensor yang dipasang sambil memiliki akurasi lokalisasi kerusakan yang sebanding.

### Sensor Sun Small Programmable Object Technology (SunSPOT)

*Sensor Sun Small Programmable Object Technology (SunSPOT)* adalah perangkat tertanam yang dapat diprogram Java, yang digunakan untuk pengumpulan respons struktural dinamis real-time dari dua jembatan yang dipilih untuk penelitian ini. Sensor dasar SunSPOT berisi sensor accelerometer, sensor suhu dan cahaya, pemancar radio, delapan LED beraneka warna, 2 sakelar kontrol tombol, 5 pin I/O digital, 6 input analog, 4 output digital, dan baterai isi ulang



Gambar 1 SunSPOT hardware kit yang ditunjukkan pada Gambar meliputi dua sensor SunSPOT, dan stasiun pangkalan untuk berkomunikasi secara nirkabel dengan sensor.



Gambar tersebut menunjukkan bagian-bagian internal stasiun pangkalan dan sensor SunSPOT jarak-bebas. Setiap sensor dan stasiun induk SunSPOT memiliki alamat MAC 16-digit yang unik, dimana 8-digit pertama sama untuk semua dan 8-digit sisanya berbeda untuk masing-masing. Oleh karena itu, alamat MAC 8 digit terakhir digunakan untuk mengidentifikasi setiap sensor. Sensor SunSPOT menangkap akselerasi dengan waktu di ketiga sumbu secara bersamaan dan mentransmisikan paket data secara nirkabel ke stasiun pangkalan, yang terhubung ke laptop melalui kabel universal serial bus (USB) dan mentransfer paket data ke laptop secara real-time. Dalam penelitian ini, hanya akselerasi sumbu Z (sumbu vertikal) jembatan yang dikumpulkan pada frekuensi 100 Hz dan skala 2g.

### 3. Sistem yang Dibangun

#### Metodologi Penelitian

##### Riset Framework



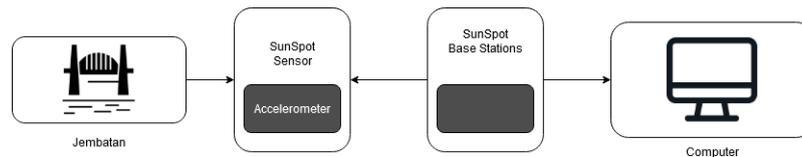
Gambar 2 Diagram Alur Riset Framework

Pada tahap studi literatur dilakukan review terhadap penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, dan merangkum fakta serta teori yang dibutuhkan dalam penelitian. Dilakukan dengan membaca jurnal dan artikel

yang berkaitan. Pada tahap ini juga dilakukan analisis masalah dan membuat alasan mengapa masalah tersebut perlu diselesaikan. Selanjutnya perancangan Sistem, pada tahap ini dilakukan perancangan berdasarkan literatur yang telah dipelajari antara lain, mekanisme pengiriman dan penerimaan data, bagaimana data diproses, dan bagaimana informasi dari data tersebut diberikan. Lalu pada tahap pengambilan data diambil data yang telah tervalidasi kebenarannya untuk dijadikan bahan uji algoritma yang diusulkan. Selanjutnya. Implementasi Algoritma dilakukan menggunakan Algoritma terbaik sehingga dapat memperoleh Hasil yang maksimal. Terakhir menyusun laporan terkait penelitian yang dilakukan mengikuti metode perancangan tata tulis ilmiah. Hasil dari tahapan ini adalah jurnal

#### Skenario Pengujian

- a. Berikut adalah skema prototype yang akan dibangun untuk mencapai objektif kedua:



**Gambar 3. Proses Pengambilan data dari jembatan SDOF**

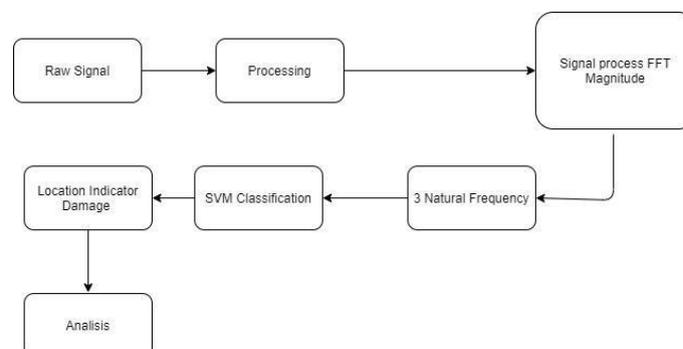
Jembatan SDOF (*Single Degree of Freedom System*) merupakan target pengujian data dari sinyal getaran atau Accelerometer didapatkan, Untuk mendapatkan data getaran otomatis dibutuhkan sensor pendukung berupa *Sensor Node* dan *Sensor Basestation* sebagai alat utamanya, Selanjutnya *Sensor Node* bertugas untuk mengirim data getaran, kemudian sensor Basestation menerima data dari *Sensor Node* untuk dikirimkan data getaran tersebut ke komputer. Jembatan mempunyai skala 1:20 dengan 3 segmen untuk mengatur kekakuan jembatan.

#### Dataset Pengujian Jembatan SDOF

Data diambil menggunakan truk Scania 1:14 RC dengan berat truk 7,5kg, kemudian data diambil dengan kondisi dan variasi yang berbeda, dimana kondisi di dalamnya terdapat beberapa kondisi yang terdiri dari beban muatan kosong dan beban muatan penuh (8kg), skenario pengambilan data terdapat dua macam skenario yaitu skenario jembatan normal dan skenario jembatan rusak, dimana jumlah percobaan dikumpulkan sebanyak 10 kali percobaan.

- Desain penempatan *Sensor Node* pada eksperimen ini berjumlah delapan *Sensor Node* dengan peletakan dibagian kiri jembatan sebanyak empat *Sensor Node* dan dibagian kanan jembatan sebanyak empat *Sensor Node*.
- Dari kedelapan sensor node kemudian diaktifkan dan dihubungkan pada *Sensor Basestation*, selanjutnya data yang sudah diterima pada *Sensor Basestation* disimpan didalam sistem.
- Skenario kerusakan diatur dengan melakukan pengurangan kekakuan pegas (Segmen 1)
- Skenario beban truk dilakukan dengan kondisi beban truk kosong (7,5kg), setiap kondisi dilakukan sebanyak 10 kali dari setiap skenario jembatan normal dan skenario jembatan rusak.
- *Sensor Node* akan mengirim data rekaman aktivitas getaran jembatan dengan rentang waktu tiap 0.01s.

#### Rancangan Algoritma



**Gambar 4. Proses Alur SVM Classification**

Berikut adalah penjelasan pada tahapan metodologi:

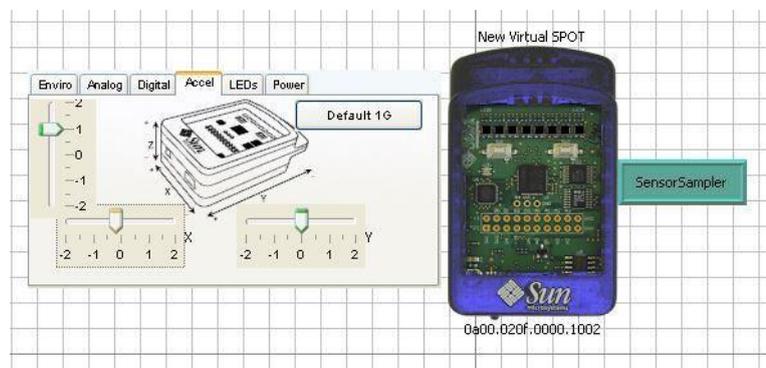
- a. Raw Data didapatkan dari *Sensor SunSPOT*, prosedural pengambilan data berasal dari *Sensor Node* yang terhubung dengan Sensor Basestation melalui jaringan local. Data dari pengambilan langsung delapan sensor yang digunakan pada struktur jembatan, ada dua macam scenario dan kondisi pengambilan data. Setiap scenario dan kondisi data diambil sebanyak 10 kali percobaan. Nilai sensor berupa satuan getaran Accelerometer.
- b. Signal Proses, proses dimana data yang dikumpulkan lalu diubah dari domain waktu ke domain frekuensi melalui transformasi yaitu *Fast Fourier Transform (FFT)* lalu frekuensi yang telah didapat kemudian diambil 3 frekuensi natural untuk mendapatkan indicator lokasi kerusakan
- c. Kemudian dari hasil frekuensi digunakan hanya 3 natural frekuensi tertinggi dan kemudian diberi pelabelan class normal untuk data jembatan normal dan class Rusak untuk data Jembatan rusak untuk setiap sensor dan sebanyak 10 kali percobaan
- d. Kemudian data di split dengan jumlah data training 75% dan data tes 25% untuk dapat mengklasifikasi menggunakan SVM
- e. Model SVM yang digunakan menggunakan kernel RBF(Radial Basic Functional)
- f. Kemudian dengan menggunakan SVM dapat dengan mudah mengklasifikasi sebuah data
- g. Klasifikasi data antara data rusak dan data Normal menggunakan SVM untuk mencari akurasi,sensitivitas dan spesitifitas dalam setiap percobaan disetiap sensor
- h. Dari data akurasi,sensitivitas dan spesitifitas kemudian dibandingkan antara data rusak dan data normal untuk menentukan lokasi sebuah kerusakan pada setiap sensor

#### 4. Evaluasi

##### 4.1 Hasil Pengujian Sunspot

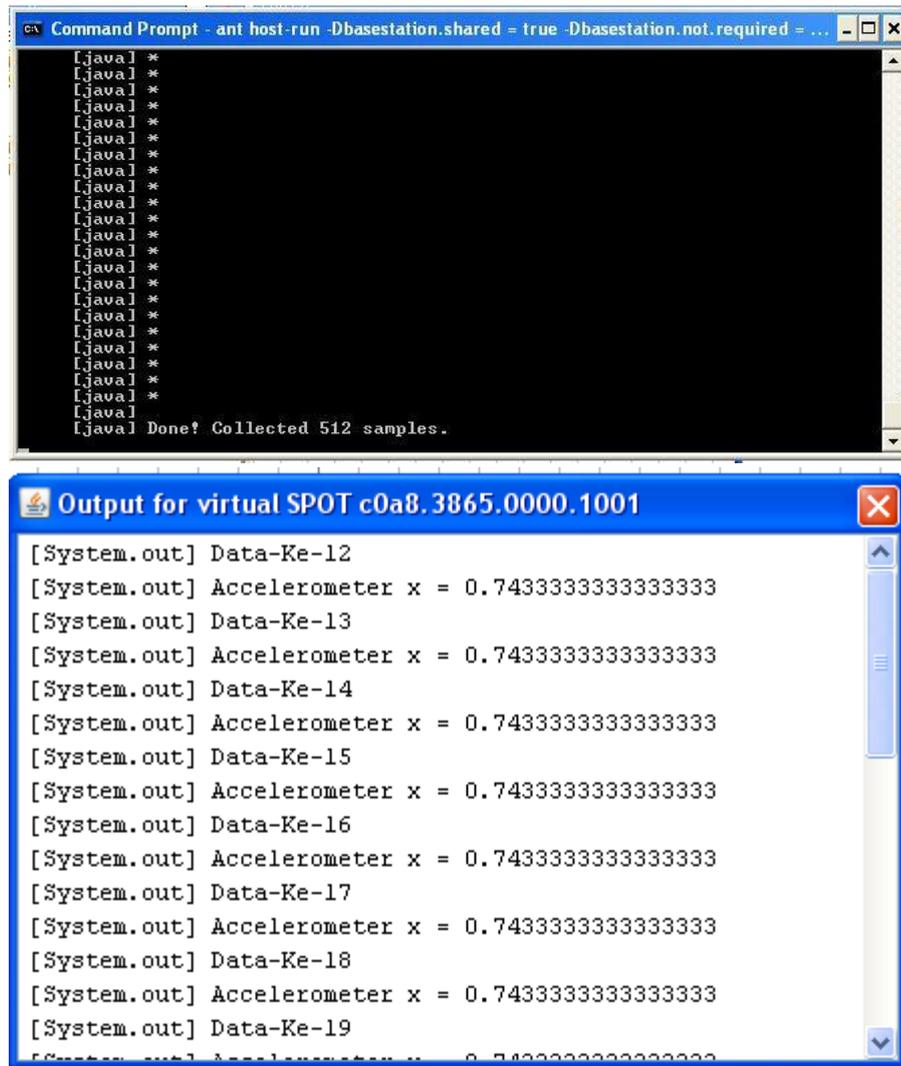
Pengujian Sensor Sunspot Solarium dilakukan untuk menguji kinerja dari sistem *Sensor Node (Accelerometer)* dan *Sink Node(Base Station)*. Kedua sistem ini bertugas untuk menangkap aktivitas data dan juga mengirimkan data ke sebuah server. Solarium menampilkan Sensor SunSPOT virtual dengan Sensor Panel yang dapat mengatur nilai getaran potensial pada *Accelerometer* pada sumbu x.

- a. Pengujian tahap pertama dilakukan dengan melakukan simulasi Sensor Accelerometer Sunspot dan mengaktifkan Sink Node. Sebelum menghidupkan sink node lakukan deploy Midlet terhadap sensor node.



Gambar 5. Simulasi Sensor Sunspot Solarium Virtual

- b. Pada gambar 6. diatas menunjukkan bawa sensor SunSpot siap untuk diambil datanya sebanyak 512 sample, dimana Sink Node akan menerima data yang dikirim dari sensor dan akan melakukan pengiriman data ke database server. Kemudian mengaktifkan Sink Node dengan cara membuka cmd kemudian masuk kedalam direktori Sink Node kemudian masukan perintah (`ant host-run-Dbasestation.shared=true-Dbasestation.not.required=true`) cara yang dilakukan seperti pada gambar. Pada gambar dibawah menunjukan bahwa sensor Node dan Sink Node siap merekam data sebanyak 512 sampel kemudian dikirim Sink Node kedalam database.



Gambar 6. hasil keluaran dari cmd dan Sunspot Solarium nilai accelerometer pada sumbu x yang nantinya akan dikirmkan ke sinknode dan diambil 512 sample data accelerometer.

- c. Setelah proses pengambilan data sudah selesai selanjutnya data otomatis disimpan kedalam server database, setiap output sensor node memiliki sampel data sebanyak 512 sampel. Yang nantinya diproses diproses selanjutnya kedalam komputasi sistem

Tabel	Tindakan	Baris	Jenis	Penyortiran	Ukuran	Beban
<input type="checkbox"/> sensor	Jelajahi  Struktur  Cari  Tambahkan  Kosongkan  Hapus	512	InnoDB	latin1_swedish_ci	64 KB	-
<input type="checkbox"/> sensor1	Jelajahi  Struktur  Cari  Tambahkan  Kosongkan  Hapus	151	InnoDB	latin1_swedish_ci	1.6 KB	-
<input type="checkbox"/> sensor2	Jelajahi  Struktur  Cari  Tambahkan  Kosongkan  Hapus	60	InnoDB	latin1_swedish_ci	1.6 KB	-
<input type="checkbox"/> sensor3	Jelajahi  Struktur  Cari  Tambahkan  Kosongkan  Hapus	43	InnoDB	latin1_swedish_ci	1.6 KB	-
<input type="checkbox"/> sensor4	Jelajahi  Struktur  Cari  Tambahkan  Kosongkan  Hapus	35	InnoDB	latin1_swedish_ci	1.6 KB	-
<input type="checkbox"/> sensor5	Jelajahi  Struktur  Cari  Tambahkan  Kosongkan  Hapus	34	InnoDB	latin1_swedish_ci	1.6 KB	-
<input type="checkbox"/> sensor6	Jelajahi  Struktur  Cari  Tambahkan  Kosongkan  Hapus	67	InnoDB	latin1_swedish_ci	1.6 KB	-
<input type="checkbox"/> sensor7	Jelajahi  Struktur  Cari  Tambahkan  Kosongkan  Hapus	81	InnoDB	latin1_swedish_ci	1.6 KB	-
<input type="checkbox"/> sensor8	Jelajahi  Struktur  Cari  Tambahkan  Kosongkan  Hapus	45	InnoDB	latin1_swedish_ci	1.6 KB	-
<b>9 tabel</b>	<b>Jumlah</b>	<b>1,028</b>	<b>InnoDB</b>	<b>latin1_swedish_ci</b>	<b>192 KB</b>	<b>0 B</b>

- d.

Gambar 7. Data yang telah dikirim ke database server

e. Pada gambar 8 berisikan hasil dari pengambilan data yang berupa data accelerometer yang disimpan kedalam database server

time	accelerometer
1	0.0
2	0.0
3	0.7433333333333333
4	0.7433333333333333
5	0.7433333333333333
6	0.7433333333333333
7	0.7433333333333333
8	0.7433333333333333
9	0.7433333333333333
10	0.7433333333333333
11	0.7433333333333333
12	0.7433333333333333
13	0.7433333333333333
14	0.7433333333333333
15	0.7433333333333333
16	0.7433333333333333
17	0.7433333333333333
18	0.7433333333333333
19	0.7433333333333333
20	0.7433333333333333
21	0.7433333333333333
22	0.7433333333333333
23	0.7433333333333333
24	0.7433333333333333
25	0.7433333333333333

Gambar 8 berisikan hasil dari pengambilan data yang berupa data accelerometer yang disimpan kedalam database server

## 4.2 Hasil Pengujian system

### 4.2.1 Sistem Mengakses dataset yang sudah diambil dari database server.

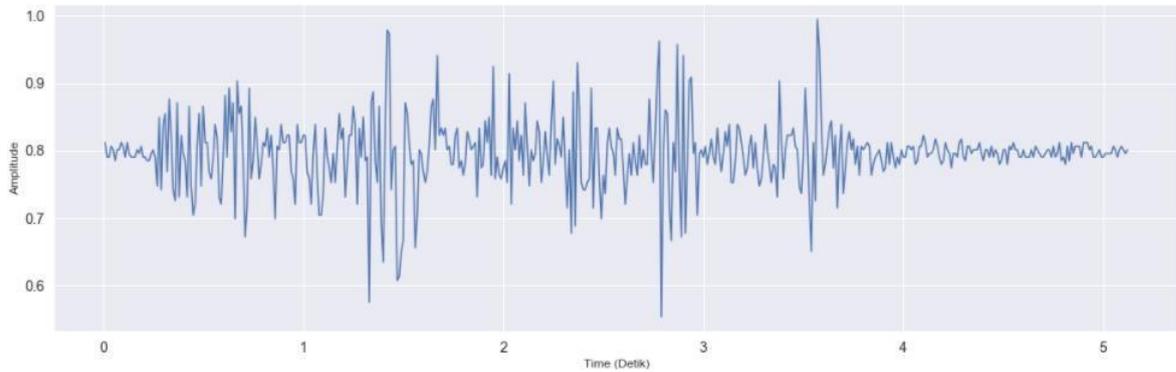
Pada proses ini sistem mengakses dataset dari server kemudian dilanjutkan perhitungannya kemudian dilanjutkan perhitungannya menggunakan metode SVM untuk mendeteksi kerusakan dan mengidentifikasi lokasi kerusakan sesuai skenario pengambilan data yang sudah ditentukan, dimana skenario pengambilan data diambil sebanyak 10 kali dari masing-masing skenario, adapun skenario yang digunakan merupakan skenario struktur jembatan normal dan struktur jembatan yang mengalami kerusakan.

Table	Action	Rows	Type	Collation	Size	Overhead
p1_d_e_s1	Browse Structure Search Insert Empty Drop	512	InnoDB	utf8mb4_general_ci	42.0 KiB	-
p1_d_e_s2	Browse Structure Search Insert Empty Drop	512	InnoDB	utf8mb4_general_ci	48.0 KiB	-
p1_d_e_s3	Browse Structure Search Insert Empty Drop	512	InnoDB	utf8mb4_general_ci	45.0 KiB	-
p1_d_e_s4	Browse Structure Search Insert Empty Drop	512	InnoDB	utf8mb4_general_ci	48.0 KiB	-
p1_d_e_s5	Browse Structure Search Insert Empty Drop	512	InnoDB	utf8mb4_general_ci	48.0 KiB	-
p1_d_e_s6	Browse Structure Search Insert Empty Drop	512	InnoDB	utf8mb4_general_ci	45.0 KiB	-
p1_d_e_s7	Browse Structure Search Insert Empty Drop	512	InnoDB	utf8mb4_general_ci	48.0 KiB	-
p1_d_e_s8	Browse Structure Search Insert Empty Drop	512	InnoDB	utf8mb4_general_ci	48.0 KiB	-
p1_n_e_s1	Browse Structure Search Insert Empty Drop	512	InnoDB	utf8mb4_general_ci	48.0 KiB	-
p1_n_e_s2	Browse Structure Search Insert Empty Drop	512	InnoDB	utf8mb4_general_ci	45.0 KiB	-
p1_n_e_s3	Browse Structure Search Insert Empty Drop	512	InnoDB	utf8mb4_general_ci	45.0 KiB	-
p1_n_e_s4	Browse Structure Search Insert Empty Drop	512	InnoDB	utf8mb4_general_ci	48.0 KiB	-
p1_n_e_s5	Browse Structure Search Insert Empty Drop	512	InnoDB	utf8mb4_general_ci	48.0 KiB	-
p1_n_e_s6	Browse Structure Search Insert Empty Drop	512	InnoDB	utf8mb4_general_ci	48.0 KiB	-

Gambar 9. Dataset Jembatan Pada Database Server

### 4.2.2 Hasil Time Series data berdasarkan deret waktu

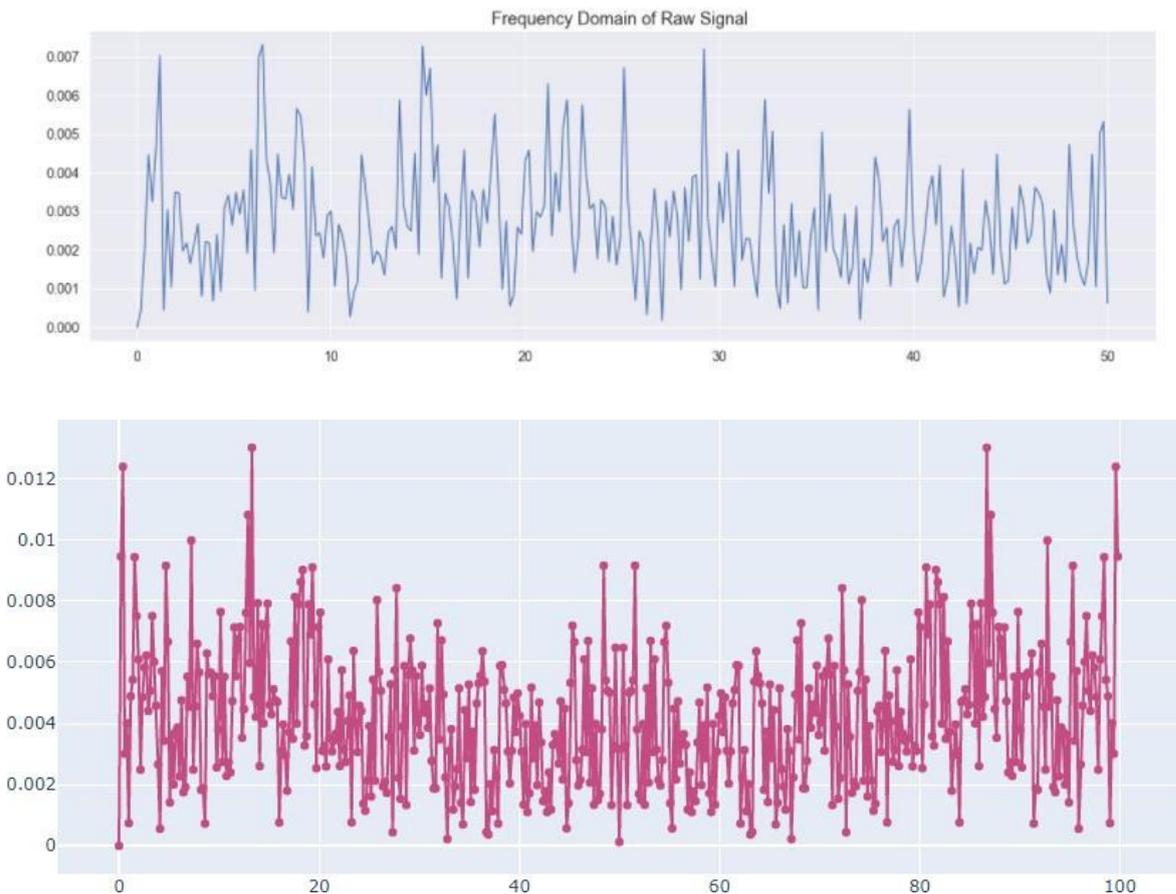
Berikut hasil data accelerometer dari sensor 1 berupa data time series yang berdasarkan deret waktu



Gambar 10. Hasil Time Series data Accelerometer

#### 4.2.3 Hasil Fast Fourier Transform

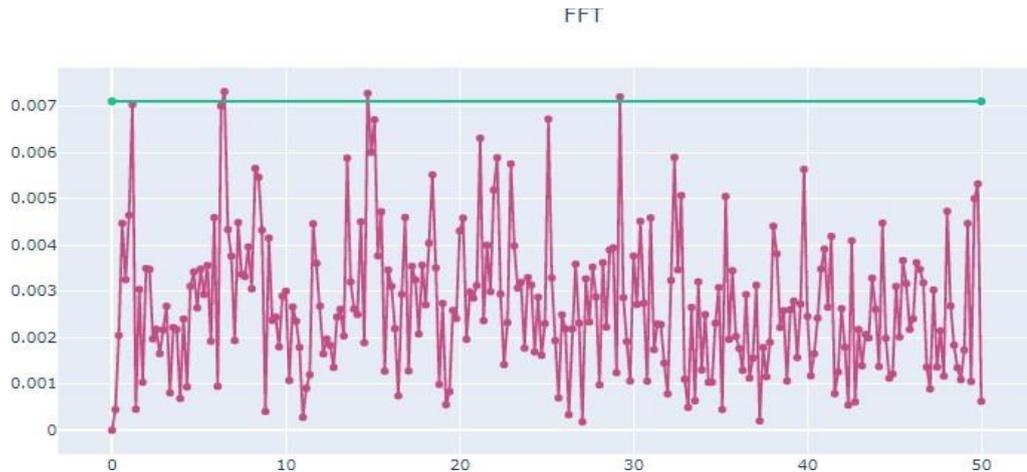
Pada proses Fast Fourier Transform, dalam Frequency DomainBasedatau analisis domain frekuensi, data domain waktu yang dikumpulkan, lalu diubah dari domain waktu ke domain frekuensi melalui transformasi Fast Fourier Transform



Gambar 11. Hasil Fast Fourier Transform

#### 4.2.4 Proses Pengambilan 3 Natural Frekuensi

Proses ini menggunakan tracehold untuk melakukan pengambilan 3 frekuensi natural tertinggi tiap sensor. Tracehold adalah titik ambang batas tertinggi yang digunakan untuk mengambil 3 titik natural frekuensi tertinggi.



Gambar 12. Hasil FFT Mengambil 3 Natural Frekuensi Menggunakan Tracehold

4.2.5 Proses Pengambilan 3 natural frekuensi Nilai L2:1 dan l2:3 pada data Normal dan Data Rusak dari setiap sensor 1-8 Data Normal dan Data Rusak untuk selanjutnya diproses menggunakan metode SVM untuk diklassifikasi dan mendapatkan nilai akurasi

Data Normal Percobaan 1

Sensor	Frekuensi 1	Frekuensi 2	Frekuensi 3
1	6.470588235294118	14.705882352941176	29.215686274509803
2	13.529411764705882	49.21568627450981	9.411764705882353
3	40.78431372549019	43.92156862745098	44.11764705882353
4	20.19607843137255	47.64705882352941	49.01960784313725
5	23.137254901960784	22.745098039215687	15.882352941176471
6	21.372549019607842	45.88235294117647	48.8235294117647
7	6.2745098039215685	6.470588235294118	21.56862745098039
8	0.19607843137254902	12.745098039215685	12.549019607843137

Gambar 13. Hasil Pengambilan 3 Natural Frekuensi Data Normal

Data Rusak Percobaan 1

Sensor	Frekuensi 1	Frekuensi 2	Frekuensi 3
1	13.333333333333334	0.39215686274509803	12.941176470588236
2	25.098039215686274	24.313725490196077	18.627450980392158
3	24.901960784313726	49.80392156862745	18.235294117647058
4	25.88235294117647	22.549019607843135	26.07843137254902
5	22.15686274509804	16.274509803921568	21.96078431372549
6	40.78431372549019	19.80392156862745	18.03921568627451
7	30	29.80392156862745	40.98039215686274
8	27.647058823529413	29.019607843137255	27.254901960784313

Gambar 14. Hasil Pengambilan 3 Natural Frekuensi Data Normal

4.2.6 Proses Pengambilan Data L2:1 dan L2:3 Frekuensi dan Magnitude untuk setiap sensor sebanyak 10 kali percobaan

Contoh dari Sensor 1 dengan 10 kali percobaan didata jembatan normal dan jembatan rusak untuk mengidentifikasi lokasi kerusakan

Data Normal

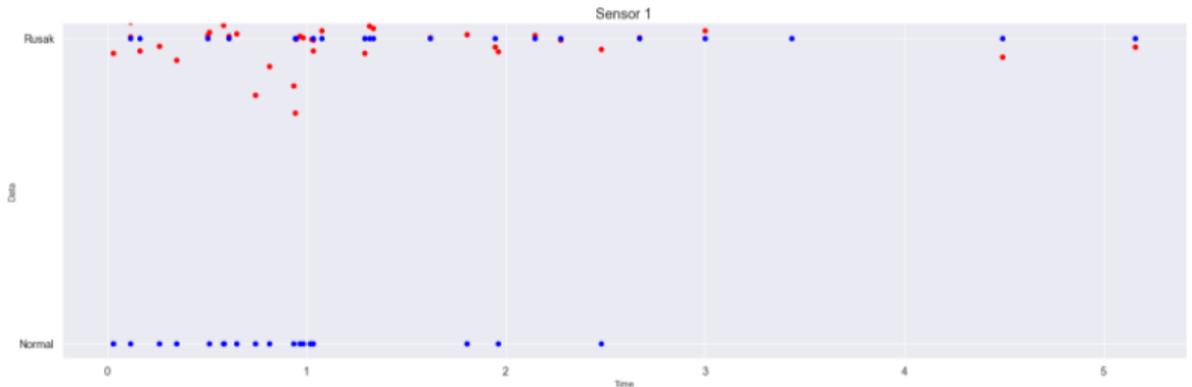
Sensor	Frekuensi 1	Frekuensi 2	Frekuensi 3	L21	Label L21	L23	Label L23
1	6.470588235294118	14.705882352941176	29.215686274509803	2.2727272727272725	1	0.5033557046979865	0
2	13.529411764705882	49.21568627450981	9.411764705882353	3.63768115942029	1	5.229166666666667	1
3	40.78431372549019	43.92156862745098	44.11764705882353	1.076923076923077	1	0.9955555555555555	0
4	20.19607843137255	47.64705882352941	49.01960784313725	2.359223300970874	1	0.9720000000000001	0
5	23.137254901960784	22.745098039215687	15.882352941176471	0.9830508474576272	0	1.4320987654320987	1
6	21.372549019607842	45.88235294117647	48.8235294117647	2.146788990825688	1	0.9397590361445783	0
7	6.2745098039215685	6.470588235294118	21.56862745098039	1.03125	1	0.30000000000000004	0
8	0.19607843137254902	12.745098039215685	12.549019607843137	65	1	1.015625	1

Data Rusak

Sensor	Frekuensi 1	Frekuensi 2	Frekuensi 3	L21	Label L21	L23	Label L23
1	13.333333333333334	0.39215686274509803	12.941176470588236	0.029411764705882353	0	0.0303030303030303	0
2	25.098039215686274	24.313725490196077	18.627450980392158	0.96875	0	1.3052631578947367	1
3	24.901960784313726	49.80392156862745	18.235294117647058	2	1	2.731182795698925	1
4	25.88235294117647	22.549019607843135	26.07843137254902	0.8712121212121211	0	0.8646616541353382	0
5	22.15686274509804	16.274509803921568	21.96078431372549	0.7345132743362831	0	0.7410714285714285	0
6	40.78431372549019	19.80392156862745	18.03921568627451	0.48557692307692313	0	1.0978260869565217	1
7	30	29.80392156862745	40.98039215686274	0.9934640522875817	0	0.7272727272727274	0
8	27.647058823529413	29.019607843137255	27.254901960784313	1.049645390070922	1	1.064748201438849	1

Gambar 15. Hasil Pengambilan 3 Natural Frekuensi Data Normal L2:1 dan L2:3

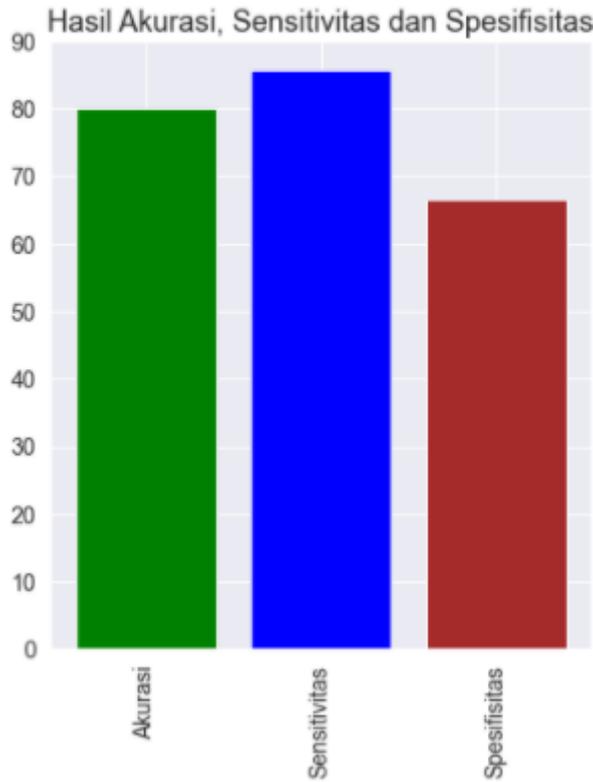
4.2.7 Plot Data Normal dan Data Rusak pada sensor 1 dalam 10 kali percobaan



Gambar 16. Hasil Plot Data Normal dan Rusak

- 4.2.8 Melakukan Pembagian data sebesar 80% data Training dan 20% Data Tes untuk dapat melakukan klassifikasi data.
- 4.2.9 Kemudian dari hasil split data tersebut dapat dihasilkan klassifikasi antara data rusak dan data normal menggunakan SVM menggunakan kernel RBF(Radial Basic Functional) untuk mencari garis hyperplane terbaiknya
- 4.2.10 Menggunakan confusion matrix untuk menggunakan rumus untuk mencari akurasi,sensitifitas dan spesitifitas dari setiap sensor
- 4.2.11 Dapat dihasilkan Sebuah Akurasi Sensifity Menggunakan SVM dari setiap data sensor data normal dan data rusak di 10 percobaan

```
[[12 2]  
 [ 2 4]]  
Akurasi Akhir model SVM : 80.0 %  
Sensitivitas Akhir model SVM : 85.7 %  
Spesitifitas Akhir model SVM : 66.7 %
```

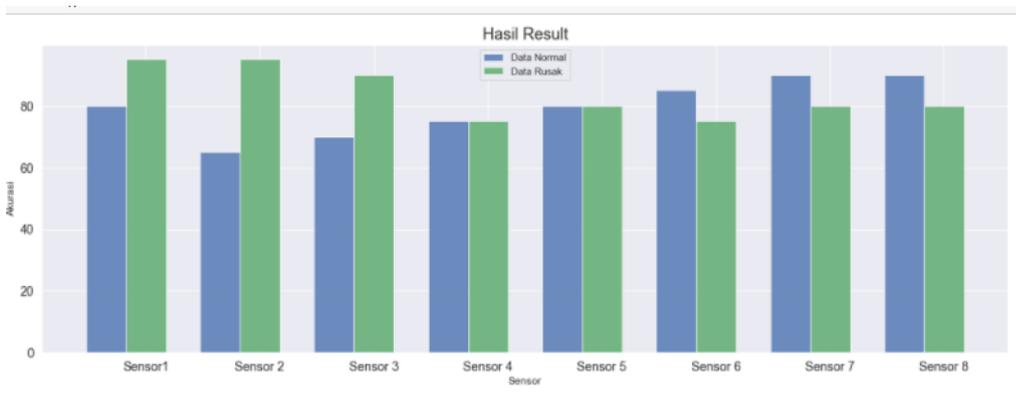


Gambar 17. Hasil Akurasi Sensitivitas dan Spesifisitas

### 4.3 Hasil Dan Pembahasan

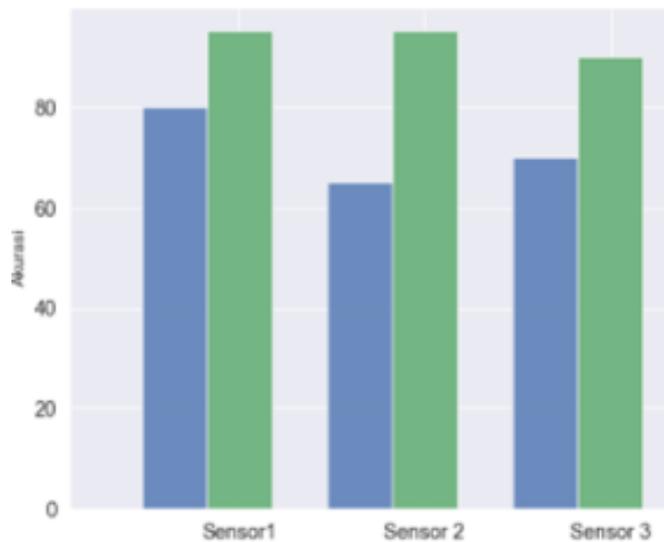
4.3.1 Proses Pencarian akurasi data antara data normal dan data rusak menggunakan klasifikasi SVM dimana skenario jembatan normal dan skenario jembatan rusak dengan mengurangi pegas di segmen 1 yang terdapat pada jembatan testbad 1:20, dimana data hasil pengujian akan dibandingkan dengan dua skenario yang berbeda dimana data kondisi jembatan normal dengan data kondisi jembatan rusak untuk menentukan lokasi kerusakan terbesar

- a. Berikut ini adalah hasil perbandingan akurasi antara data normal dan data rusak tiap sensor sebanyak 10 kali percobaan dari sensor 1-8



Gambar 18. Hasil Perbandingan Dari Data Normal dan Rusak di Semua Sensor sebanyak 10 kali percobaan

- b. Dari Hasil perbandingan akurasi antara data normal dan data rusak didapatkan lokasi kerusakan terbesar dari akurasi data rusak terdapat di sensor 1 dan 2



Gambar 19. Hasil Lokasi Kerusakan Terbesar Terdapat Pada Sensor 1 dan 2 Data Rusak

## 5 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan dalam penelitian ini terdapat beberapa kesimpulan yaitu hasil dari yang dijalankan emulator dengan mengirimkan data virtual di Sunspot ke Sink Node dan dari Sink Node dikirim ke server atau database berhasil menjalankan fungsinya dengan menghasilkan nilai accelerometer sebanyak 512 sampel data dan waktu sampling adalah 512 detik, dan sensing terhadap jembatan dapat dijalankan fungsinya dalam membuat scenario jembatan normal dan jembatan rusak. Berdasarkan hasil pengujian dari metode SVM(Support Vektor Machine) menyatakan dapat disimpulkan bahwa analisa lokasi kerusakan pada struktur jembatan *Single Degree Of Freedom* yang diusulkan mampu mendeteksi kerusakan dan analisa lokasi kerusakan menggunakan klasifikasi SVM dari 10 kali percobaan dilakukan perbandingan antara akurasi dari data normal dan data rusak setiap sensor untuk menentukan lokasi kerusakan. Kemudian didapatkan hasil prediksi lokasi kerusakan terbesar terdapat di sensor 1 dan 2 pada segmen 1 dengan pengurangan pegas 75% dengan akurasi data normal sebesar 80%,65% dan Data Rusak Sebesar 95% dan 95% dan berpengaruh terhadap sensor 3 dan 4. mencari lokasi kerusakan menggunakan perbandingan antara data rusak dan normal dari akurasi tiap data yang didapatkan dengan menggunakan SVM yang sudah dihasilkan sesuai skenario kerusakan pada struktur jembatan. Dimana analisa lokasi kerusakan terbesar terdapat di sensor 1 dan 2 pada segmen 1 sesuai dengan scenario kerusakan yang dibuat. Scenario kerusakan berimbas pada sensor 1 sampai dengan 4

**Daftar Pustaka**

- [1] H. HoThu and A. Mita, "Damage detection method using support vector machine and first three natural frequencies for shear structures," *Open J. Civil Eng.*, vol. 3, no. 2, p. 104, 2013.
- [2] T. Harms, S. Sedigh, and F. Bastianini, "Structural health monitoring of bridges using wireless sensor networks," *IEEE Instrum. Meas. Mag.*, vol. 13, no. 6, pp. 14–18, Dec. 2010.
- [3] S. asciati, "Stiffness identification and damage localization via differential evolution algorithms," *Struct. Control Health Monitor.*, vol. 15, no. 3, pp. 436–449, 2008.
- [4] B. Samanta, K. B. Al-Balushi and S. A. Al-Araimi, "Artificial Neural Networks and Support Vector Machines with Genetic Algorithm for Bearing Fault Detection," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 16, No. 7-8, 2003, pp. 657-665. doi:10.1016/j.engappai.2003.09.006
- [5] D. Meyer, F. Leisch and K. Hornik, "The Support Vector Machine under Test," *Neurocomputing*, Vol. 55, No. 1-2, 2003, pp. 169-186. doi:10.1016/S0925-2312(03)00431-4
- [6] Adam B. Noel, Student Member, IEEE, Abderrazak Abdaoui, Senior Member, IEEE, Tarek Elfouly, Senior Member, IEEE, Mohamed Hossam Ahmed, Senior Member, IEEE, Ahmed Badawy, and Mohamed S. Shehata, Senior Member, IEEE "Structural Health Monitoring Using Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Survey" *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, VOL. 19, NO. 3, THIRD QUARTER 2017
- [7] L.-X. Liu, Y.-Q. Zhuang and X.-Y. Liu, Tax forecasting theory and model based on SVM optimized by PSO, *Expert. Syst. Appl.* 38 (2011) 116–120.
- [8] Y.Q. Ni, X.T. Zhou, J.M. Ko, B.S. Wang, Vibration-based damage localization in Ting Kau bridge using probabilistic neural network, *Advances in structural dynamics*. 2 (2000) 1069-1076.
- [9] M. Mehrjoo, N. Khaji, H. Moharrami and A. Bahreininejad, Damage detection of truss bridge joints using artificial neural networks, *Expert Syst. Appl.* 35 (2008) 1122–1131.
- [10] Xie Jun, Han Dajian, Numerical simulation of damage detection for simply-supported reinforced concrete T-beam bridge, *China Journal*

Lampiran

Data Lengkap Sensor 1-Sensor 8 dari data normal dan rusak dari 3 natural frekuensi Menggunakan L2:1 dan L2:3

Sensor 1			Sensor 2			Sensor 3			Sensor 4		
Freq	Magnitu	Label									
0.0294	0.952	Normal	3.6377	0.9504	Normal	1.0763	0.9518	Normal	2.3592	0.9391	Normal
0.0303	1.1453	Normal	5.2292	1.0729	Normal	0.9356	1.056	Normal	0.972	1.0686	Normal
2.2727	0.935	Rusak	0.9688	0.8721	Rusak	2	0.7511	Rusak	0.8712	0.8772	Rusak
0.5034	1.0102	Rusak	1.3053	1.1121	Rusak	2.7312	1.1641	Rusak	0.8647	1.0459	Rusak
0.7442	0.815	Normal	3.6377	0.9152	Normal	1.1217	0.9071	Normal	0.931	3.3683	Normal
0.6465	1.0157	Normal	5.2292	1.0256	Normal	1.1713	1.0399	Normal	1.0078	1.0029	Normal
0.9451	0.9379	Rusak	0.9688	0.8785	Rusak	2.0763	0.9267	Rusak	0.9672	0.9373	Rusak
1.075	1.025	Rusak	0.6667	1.0756	Rusak	2.7222	1.0586	Rusak	0.6178	1.1129	Rusak
0.8145	0.9075	Normal	0.8431	0.8789	Normal	0.6	0.9347	Normal	0.72	0.9361	Normal
0.5805	1.042	Normal	0.8323	1.1489	Normal	0.9474	1.0299	Normal	0.5502	1.0521	Normal
0.163	0.9582	Rusak	0.3194	1	Rusak	1.614	0.9821	Rusak	0.9115	0.9759	Rusak
0.1163	1.0058	Rusak	0.5446	1.0319	Rusak	1.84	1.0064	Rusak	0.8512	1.0395	Rusak
2.4783	0.9636	Normal	2.5	0.8658	Normal	0.962	0.9459	Normal	0.9917	0.944	Normal
0.9828	1.0013	Normal	1.068	1.0019	Normal	1.0224	1.0439	Normal	2.0517	0.9972	Normal
1.2927	0.951	Rusak	0.1218	0.8091	Rusak	1.519	0.9338	Rusak	0.8071	0.8592	Rusak
1.314	1.0397	Rusak	0.1101	1.0361	Rusak	2.243	1.029	Rusak	0.8039	1.0278	Rusak
1.026	0.9974	Normal	0.8099	0.9602	Normal	0.6134	0.9706	Normal	1.0041	0.9189	Normal
0.9657	1.0086	Normal	1.5077	1.0112	Normal	0.5385	1.1451	Normal	2.1304	1.0149	Normal
1.622	1.0022	Rusak	0.5278	0.9344	Rusak	0.1404	0.9841	Rusak	0.4361	0.8974	Rusak
3.4333	1.0785	Rusak	0.9852	1.0438	Rusak	0.0383	1.0249	Rusak	0.4884	1.0265	Rusak
1.9612	0.9577	Normal	0.8738	0.8056	Normal	0.7	0.8443	Normal	0.9695	0.7802	Normal
1.8036	1.0123	Normal	1.3235	1.002	Normal	1.9167	1.0007	Normal	1.0063	1.0206	Normal
5.1591	0.9712	Rusak	0.5219	0.8857	Rusak	0.9652	0.965	Rusak	0.8438	0.9517	Rusak
2.6706	1.0012	Rusak	0.5198	1.0019	Rusak	0.4644	1.1137	Rusak	18	1.0306	Rusak
0.3451	0.9288	Normal	0.0606	0.9225	Normal	3.2273	0.9353	Normal	0.5847	0.9903	Normal
0.5132	1.0193	Normal	0.0201	1.0873	Normal	0.9861	1.0072	Normal	0.6053	1.0824	Normal
0.9434	0.7554	Rusak	0.4687	0.9483	Rusak	1.4646	0.8643	Rusak	0.3088	0.901	Rusak
1.3333	1.0329	Rusak	0.5	1.0943	Rusak	1.4308	1.0113	Rusak	0.3014	1.0395	Rusak
0.9333	0.8452	Normal	0.0606	0.9352	Normal	48	0.9547	Normal	0.7832	0.9646	Normal
0.1167	1.0533	Normal	0.0201	1.0908	Normal	64	1.0212	Normal	0.8175	1.0399	Normal
1.0323	0.9352	Rusak	1.1356	0.9497	Rusak	0.7104	0.9209	Rusak	0.9496	0.9734	Rusak
0.6095	1.0086	Rusak	0.3583	1.0533	Rusak	1.0408	1.0124	Rusak	1.1092	1.0346	Rusak
1.0317	0.9533	Normal	1.2743	0.9763	Normal	0.962	0.9304	Normal	0.958	0.9022	Normal
0.5856	1.0622	Normal	0.7755	1.0585	Normal	1.0224	1.072	Normal	0.9013	1.0419	Normal
1.9444	0.9721	Rusak	3.1311	0.9986	Rusak	1.4744	0.8294	Rusak	1.0159	0.8247	Rusak
3	1.0265	Rusak	1.7054	1.0496	Rusak	0.575	1.0116	Rusak	0.3478	1.0546	Rusak
0.2594	0.9742	Normal	0.0096	0.9522	Normal	0.6525	0.9223	Normal	1.1223	0.9556	Normal
1.0185	1.1128	Normal	0.0078	1.079	Normal	0.8462	1.013	Normal	1.013	1.0384	Normal
4.4306	0.9399	Rusak	4.4306	0.9399	Rusak	0.9954	0.9109	Rusak	1.1898	0.9555	Rusak
2.1441	1.0099	Rusak	2.1441	1.0099	Rusak	0.9353	1.0562	Rusak	1.1088	1.03	Rusak

Sensor 5			Sensor 6			Sensor 7			Sensor 8		
Freq	Magnitu	Label									
0.9831	0.8483	Normal	2.1468	0.9751	Normal	1.0312	0.9712	Normal	65	0.9125	Normal
1.4321	1.094	Normal	0.9398	1.122	Normal	0.3	1.0896	Normal	1.0156	1.1923	Normal
0.9831	0.8483	Rusak	0.4856	0.95	Rusak	0.9935	0.909	Rusak	1.0496	0.9199	Rusak
1.4321	1.094	Rusak	1.0978	1.1087	Rusak	0.9279	1.0253	Rusak	1.0647	1.0866	Rusak
0.9828	0.8711	Normal	0.9828	0.8711	Normal	0.9697	0.9887	Normal	1.0385	0.9399	Normal
1.0654	1.0948	Normal	1.0654	1.0948	Normal	0.1531	1.1243	Normal	1.2462	1.0311	Normal
1.7246	0.9379	Rusak	1.1154	0.8308	Rusak	1.8831	0.9698	Rusak	9.8125	0.9865	Rusak
1.8308	1.0646	Rusak	43.5	1.0425	Rusak	0.8192	1.0928	Rusak	0.9691	0.1045	Rusak
0.8145	0.9075	Normal	1.0083	0.9307	Normal	0.9947	0.9633	Normal	1.0714	0.9336	Normal
0.5805	1.042	Normal	0.6576	1.2301	Normal	1.6757	1.275	Normal	0.375	1.0383	Normal
1.0104	0.9999	Rusak	0.9667	0.9	Rusak	1.1582	0.9907	Rusak	0.1832	0.9215	Rusak
0.4409	0.9909	Rusak	0.4265	1.0336	Rusak	1.1885	1.0365	Rusak	0.1373	1.0251	Rusak
0.3025	0.83	Normal	1.1268	0.8852	Normal	0.3025	0.83	Normal	1.2308	0.9674	Normal
0.1925	1.0344	Normal	1.5686	1.0558	Normal	0.1925	1.0344	Normal	1.1429	1.0098	Normal
1.2234	0.9933	Rusak	2.5714	0.9907	Rusak	0.7764	0.8853	Rusak	2.1959	0.771	Rusak
1.0649	1.0151	Rusak	0.9908	1.0866	Rusak	0.9485	1.1227	Rusak	2.4205	1.0167	Rusak
0.9412	0.9656	Normal	1.0714	0.9877	Normal	0.8772	0.974	Normal	6.1081	0.8398	Normal
0.9655	1.019	Normal	1.2439	1.0113	Normal	0.8929	1.0396	Normal	11.3	1.0164	Normal
0.9704	0.7867	Rusak	7.5833	0.9359	Rusak	0.4569	0.9281	Rusak	0.0562	0.8866	Rusak
0.1031	1.0053	Rusak	8.2727	1.1908	Rusak	0.4362	1.0246	Rusak	0.1042	1.1316	Rusak
0.2647	0.9485	Normal	0.3485	0.8992	Normal	0.705	0.9373	Normal	1.625	0.972	Normal
0.266	1.0114	Normal	0.2863	1.1124	Normal	1.5313	1.0116	Normal	1.625	0.972	Normal
0.9902	0.8433	Rusak	2.0789	0.8269	Rusak	0.9073	0.9904	Rusak	1.0278	0.7564	Rusak
0.6545	1.1348	Rusak	2.1351	1.0109	Rusak	1.0469	1.0357	Rusak	0.8409	1.0129	Rusak
1.2422	0.941	Normal	2.3205	0.9224	Normal	0.5847	0.9903	Normal	3.1579	0.9945	Normal
1.272	1.0001	Normal	1.6018	1.168	Normal	0.6053	1.0824	Normal	1.8182	1.2261	Normal
1.5221	0.9218	Rusak	2.9666	0.942	Rusak	1.0044	0.9169	Rusak	1.4643	0.9305	Rusak
2.5294	1.0058	Rusak	1.9402	1.0055	Rusak	1.0365	1.0322	Rusak	0.9462	1.0204	Rusak
1.8015	0.9867	Normal	0.6298	0.9684	Normal	2.1545	0.9283	Normal	0.5507	0.962	Normal
1.0306	1.0433	Normal	0.6333	1.0048	Normal	1.9587	1.0259	Normal	0.95	1.0355	Normal
2.1466	0.9545	Rusak	0.061	0.9389	Rusak	0.5381	0.996	Rusak	0.7556	0.9912	Rusak
2.0081	1.0211	Rusak	0.9091	1.1303	Rusak	0.6165	1.1037	Rusak	0.1567	1.0375	Rusak
1.0377	0.9665	Normal	0.9936	0.9872	Normal	0.5288	0.8901	Normal	1.0156	0.9532	Normal
0.991	1.1121	Normal	0.6582	1.1221	Normal	0.4044	1.0515	Normal	0.9848	1.1469	Normal
0.9902	0.9394	Rusak	1.7705	0.9622	Rusak	0.7432	0.9294	Rusak	0.8273	0.9563	Rusak
0.7891	1.0029	Rusak	1.0189	1.0264	Rusak	0.7473	1.006	Rusak	0.4815	1.0139	Rusak
0.9912	0.8411	Normal	2.0455	0.9309	Normal	1.6359	0.9423	Normal	1.0175	0.8587	Normal
0.4726	1.0419	Normal	1.2414	1.0123	Normal	1.6091	1.0048	Normal	1.0357	1.1128	Normal
2.5632	0.9201	Rusak	1.4412	0.9479	Rusak	0.5	0.9825	Rusak	8.0417	0.9469	Rusak
1.006	1.036	Rusak	1.0426	1.0215	Rusak	0.4776	1.0458	Rusak	1.1557	1.1743	Rusak

