

Pemanfaatan WSN (Wireless Sensor Network) Untuk Menganalisis Perilaku Jembatan Menggunakan Metode ARIMA

Ahmad Syaiful Anam¹, Dr. Setyorini, ST., M.T.², Dr. Seno Adi Putra, S.Si., M.T.³

^{1,2}Fakultas Informatika³Fakultas Rekayasa Industri, Universitas Telkom, Bandung
¹syiaifulanam@students.telkomuniversity.ac.id, ²setyorini@telkomuniversity.ac.id,
³adiputra@telkomuniversity.ac.id₂

Abstrak

Monitoring kesehatan structural berupa jembatan merupakan hal penting untuk mengetahui kesehatan pada jembatan agar dapat mengantisipasi terjadinya kerusakan pada struktur. Dengan adanya monitoring pada jembatan dapat memberikan banyak informasi dan mengatasi masalah pada kinerja struktur jembatan secara umum. Dalam makalah ini menyajikan diagnosis dua tahap yaitu berupa deteksi kerusakan pada jembatan dan menemukan lokasi kerusakan pada jembatan. Model (ARIMA) dipasang pada rangkaian sinyal Accelerometer atau getaran yang direkam sensor. Pada tahap pertama model ARIMA1 diterapkan sebagai indikator aman kemudian model ARIMA2 diterapkan sebagai indikator kerusakan baru sehingga dapat mendefinisikan sebagai jarak antara model ARIMA1 dan ARIMA2 untuk menentukan adanya kerusakan pada struktur. Pada tahap kedua menentukan lokasi kerusakan dengan membandingkan jarak antara model ARIMA1 dan model ARIMA2 kemudian menambahkan klasifikasi pada kedua model untuk mendapatkan indikator lokasi kerusakan pada struktur. Hasil pengujian menunjukkan bahwa algoritma ARIMA dapat mengidentifikasi kerusakan dan lokasi kerusakan, dari struktur jembatan menggunakan skenario perbandingan kondisi struktur jembatan normal dan rusak, identifikasi kerusakan dan lokasi kerusakan berasal dari rata-rata nilai MAPE dari setiap model ARIMA, dimana sesuai skenario kerusakan pada pegas satu berimbas pada sensor kesatu sampai dengan sensor keempat. Dari hasil perhitungan presentase semua sensor dari skenario kerusakan pada pegas satu, mendapatkan hasil perhitungan kerusakan dari setiap skenario diantaranya skenario struktur jembatan rusak beban kosong sebesar 12% dan skenario struktur jembatan beban penuh sebesar 13%.

Kata kunci: Jembatan, ARIMA, Damage Detection, Structural health monitoring system

Abstract

Structural health monitoring in the form of a bridge is important to determine the health of the bridge to anticipate damage to the structure. With monitoring on the bridge, it can provide a lot of information and solve problems with the bridge structure performance in general. This paper presents a two-stage diagnosis, detecting damage to the bridge and finding the location of the damage to the bridge. The model (ARIMA) is mounted on a series of Accelerometer signals or vibrations recorded by the sensor. In the first stage, the ARIMA1 model is applied as a safe indicator, then the ARIMA2 model is applied as a new damage indicator so that it can define as the distance between the ARIMA1 and ARIMA2 models to determine the presence of damage to the structure. In the second stage, determine the location of the damage by comparing the distance between the ARIMA1 and the ARIMA2 model than adding classifications to the two models to obtain an indicator of the location of the damage to the structure. The results show that the ARIMA algorithm can identify the damage and the location of the damage, from the bridge structure using a comparison scenario of the normal and damaged bridge structure conditions, the identification of the damage and the location of the damage comes from the average MAPE value of each ARIMA model, where according to the scenario of damage to the first spring it affects the first sensor to the fourth sensor. From the calculation of the percentage of all sensor from the scenario of damage to spring one, the results of the calculation of damage from each scenario include the damaged bridge structure scenario with an empty load of 12% and the full load bridge structure scenario of 13%.

Keywords: Bridge, ARIMA, Damage Detection, Structural health monitoring system

1. Pendahuluan

Latar Belakang

Dalam pengembangan prasarana jalan dan jembatan terutama jalan yang menghubungkan daerah terisolasi atau pun akses yang sulit untuk menuju pusat perekonomian sehingga distribusi hasil bumi dapat dengan mudah di salurkan tanpa harus memakan biaya yang sangat mahal, pertumbuhan penduduk dan perekonomian akan bertambah pesat seiring dengan bertambahnya sarana dan prasarana jalan.

Di dalam kehidupan sehari-hari, jembatan merupakan sarana akomodasi yang menunjang kelancaran lalu lintas di seluruh dunia tak terkecuali Indonesia. Jembatan merupakan suatu struktur yang di bangun melintasi sungai atau penghalang lalu lintas lainnya, jadi jika suatu jembatan mengalami runtuhnya maka hal ini dirasakan sangatlah mengganggu kenyamanan berlalulintas. Di Indonesia sendiri pada titik tertentu baik jembatan yang terletak di Indonesia atau daerah mengalami kerusakan yang tercatat pada *Traffic Management Center* (TMC), dimana kerusakan yang di akibatkan oleh jembatan ini telah mengganggu aktivitas lalu lintas dan berkendara.

Umumnya penyebab kerusakan jembatan diakibatkan oleh suatu beban yang berlebihan seperti kendaraan besar yang memuat beban berlebih, saluran air yang tidak baik sehingga menimbulkan genangan air, serta kurangnya perawatan beberapa elemen dari jembatan tersebut [1].

Structural Health Monitoring System (SHMS) merupakan sebuah sistem monitoring kesehatan struktur bangunan berbasis teknologi yang terdiri dari berbagai jenis sensor yang dapat memberikan data-data nyata dari elemen-elemen bangunan. SHMS merupakan implementasi dari strategi pengidentifikasian kerusakan infrastruktur dibidang teknik sipil. Kerusakan tersebut didefinisikan sebagai bentuk perubahan dari sifat material atau kerusakan, umumnya terdiri dari empat tingkat yaitu deteksi kerusakan, lokasi kerusakan, jenis kerusakan dan taraf kerusakan. SHMS ini bertujuan untuk memberikan informasi yang berkaitan dengan operasional dan pemantauan kondisi kesehatan dari sebuah struktur terutama jembatan yang memiliki beban hidup yang efektif tinggi, mewujudkan perencanaan pemeliharaan yang rasional dan ekonomis, serta mengidentifikasi penyebab terjadinya kondisi struktur yang tidak layak [2].

Damage Detection Time Domain Based merupakan Analisis domain waktu, data deret waktu yang dikumpulkan dari node sensor langsung diproses untuk mengekstrak parameter modal. Teknik umum yang digunakan adalah metode *Two-stage Least Square* atau dikenal sebagai metode model *Autoregressive Integrated Moving Average* (ARIMA), metode *Ibrahim time-domain* (ITD), metode *impulse response function* (IRF) driven, dan metode matriks kovarians. Salah satu keuntungan umum dari teknik domain waktu adalah bahwa mereka memberikan hasil yang stabil, namun mereka bekerja untuk sistem yang sedikit teredam karena mereka memerlukan sejumlah besar sampel domain waktu untuk beroperasi secara efisien pada sistem yang sangat teredam [3].

Metode berbasis *Time-series* atau *Time Domain Based* telah mendapat banyak perhatian dan meningkatnya jumlah penelitian terkait metode berbasis *Time-series* yang telah didokumentasi dan diterbitkan, salah satunya merupakan metode *Auto-regressive moving average* (ARIMA) sinyal Accelerometer atau getaran yang direkam pada sensor dimodelkan menggunakan model deret waktu *Auto-regressive* (AR). Dengan memeriksa perubahan koefisien AR, dapat mengklasifikasikan sinyal Accelerometer atau getaran yang tidak rusak dan rusak, dengan mempertimbangkan pendekatan kontrol proses statistik untuk mendeteksi kerusakan, menggunakan mean dan varian dari masing-masing Model *Auto-regressive* (AR).

Model ARIMA sering diterapkan untuk mempresentasikan deret waktu atau *Time-series*, Model ARIMA dipasang sebagai referensi terhadap respon getaran dari struktur yang tidak rusak, untuk mewakili keadaan struktur aman. Kemudian struktur diskenario mengalami kerusakan dan diterapkan pada model ARIMA yang berbeda untuk referensi terhadap respon getaran dari struktur yang rusak dan mewakili keadaan struktur yang rusak, dan jarak antara kedua model ini mungkin berkorelasi dengan posisi dan tingkat keparahan kerusakan [4].

Topik dan Batasannya

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan diatas, jembatan perlu pengawasan yang cepat dan dapat menentukan prioritas jembatan mana yang akan diawasi terlebih dahulu yang dimana hal ini dapat mempermudah pengawasan dan meminimalisir kerusakan parah yang dialami oleh jembatan. Masalah yang ada pada pengawasan pada saat ini masih memiliki kelemahan yaitu pengawasan dilakukan secara manual dengan mengirim inspektur ke jembatan yang akan memakan waktu lama dan keefektifan pemilihan jembatan yang akan diperiksa belum dapat dilakukan dan masalah kedua yaitu belum adanya pengembangan baru akan sistem pengawasan yang dapat menghasilkan data pengawasan yang cepat yang dapat menampilkan kesehatan struktur jembatan secara jelas.

Berdasarkan permasalahan yang ada, maka dapat terlihat jelas tindakan yang harus diambil atau tujuan dilaksanakan penelitian ini. Sehingga dapat sesuai memenuhi atau memecahkan permasalahan yang telah dipaparkan yaitu mengembangkan sistem pengawasan jembatan ke dalam sistem dengan menggunakan *Structural Health Monitoring System* (SHMS) untuk mempermudah pengambilan data yang digunakan untuk menghitung nilai jembatan sehingga dapat menjadi bahan pengambil keputusan untuk menentukan tindakan lebih lanjut untuk menangani jembatan tersebut. Pada penelitian ini berfokus kepada pengambilan dan pengolahan data getaran dan amplitudo getaran yang diproses menjadi data nilai kesehatan struktur jembatan.

Perumusan masalah yang akan dibahas berdasarkan dari latar belakang yang dikemukakan diatas. Permasalahan pertama yaitu, bagaimana melakukan studi pada algoritma berdasarkan deret waktu untuk mendeteksi kerusakan pada struktur jembatan menggunakan jarak antara model ARIMA. Permasalahan kedua, membangun algoritma untuk menentukan model terbaik dari jarak antara model ARIMA dan memprediksi akurasi dari peramalan. Permasalahan ketiga, bagaimana mengevaluasi hasil performasi berdasarkan algoritma yang dibangun untuk mendeteksi kerusakan dan lokasi kerusakan pada struktur jembatan.

Dari perumusan masalah tersebut, diberikan batasan-batasan agar penelitian ini lebih terarah, terfokus dan menghindari pembahasan menjadi terlalu luas. Adapun batasan masalah dalam penelitian ini, yang pertama objek yang di gunakan dalam penelitian ini yaitu jembatan yang dimana merupakan jembatan *Miniature Test-bed* 1 bentang yang menerapkan model *Single Degree of Freedom* (SDOF). Permasalahan kedua pada bagian *Structural Health Monitoring System* (SHMS) jenis yang digunakan merupakan *Sensor Sun Small Programmable Object Technology* (SunSPOT) yang dimana sensor tersebut hanya tersedia beberapa saja karena sensor tersebut sudah tidak di produksi lagi. Permasalahan ketiga keterbatasan waktu yang ada terlalu singkat, dengan adanya *pandemic* tahun ini pembuatan jembatan *Test-bed* terhalang sehingga waktu pengambilan data terlalu singkat. Permasalahan keempat data sinyal getaran yang diuji hanya memiliki dua skenario yaitu skenario normal dan rusak dan jarak antara model *Autoregressive Integrated Moving Average* (ARIMA) pada struktur jembatan normal dan rusak memiliki dua model ARIMA Model (1.1.0) referensi jembatan normal, model ARIMA (2.1.0) sebagai referensi jembatan rusak.

Tujuan

Tujuan dari penelitian yang dicapai adalah yang pertama, Melakukan studi pada algoritma berdasarkan deret waktu untuk mendeteksi kesehatan pada sturuktur jembatan berbasis sinyal getaran Accelerometer serta mendeteksi kerusakan pada struktur jembatan menggunakan jarak antara model ARIMA. Yang kedua, membangun algoritma untuk menentukan model terbaik dari jarak antara model ARIMA dan memprediksi akurasi dari peramalan. Yang ketiga, mengevaluasi hasil performasi berdasarkan algoritma yang dibangun untuk mendeteksi kerusakan dan lokasi kerusakan pada struktur jembatan.

Organisasi Tulisan

Pada bagian selanjutnya dibahas mengenai penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut: pada bagian 1 merupakan uraian latar belakang serta permasalahan penelitian. Bagian 2 menunjukan 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. Kajian Pustaka

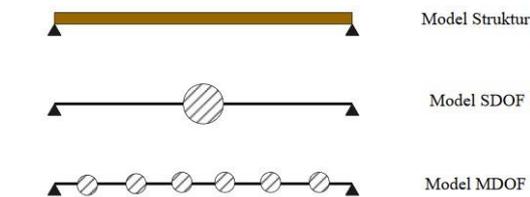
Studi Terkait

Ya-wen Wang, Zhong-zhou Shen, dan Yu Jiang (2018) mengusulkan metode ARIMA lalu membandingkannya dengan GM (1.1) pada nilai RMSE, MAE, dan MAPE. Model ARIMA yang digunakan yaitu ARIMA(3.1.1)(0.1.2)12 memperoleh nilai lebih rendah pada bagian fitting ketika dibandingkan dengan GM(1.1) [5].

Tias Safitri, Nurkaromah Dwidayati dan Sugiman (2017) melakukan penelitian terkait model peramalan terbaik dengan metode *Exponential Smoothing Holt-Winters* dan ARIMA serta mengetahui perbandingan hasil peramalan dengan kedua metode tersebut sehingga diperoleh metode terbaik. Dengan nilai MSE dan MAPE terkecil. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peramalan dengan metode exponential smoothing HoltWinters menghasilkan model dengan nilai MSE 1436553590 dan MAPE 8.86198 %. Peramalan dengan metode ARIMA menghasilkan model ARIMA (2,1,0)(0,1,1) 12 dengan transformasi logaritma dengan nilai MSE 1353169319 dan MAPE 9,40981% dan perbandingan peramalan lebih tepat menggunakan metode exponential smoothing Holt-Winters daripada ARIMA karena menghasilkan nilai error lebih kecil daripada nilai error metode ARIMA [6].

Derajat Kebebasan (*Degrees of Freedom*)

Sistem derajat kebebasan tunggal (SDOF) hanya memiliki satu koordinat yang diperlakukan untuk menyatakan posisi masa pada saat tertentu yang ditinjau. Jembatan satu bentang adalah salah satu contoh bangunan derajat kebebasan tunggal. Sistem SDOF ter sebut dapat dilihat ada gambar dibawah ini, Sistem terdiri dari masa (m) yang terkonsentrasi ada tingkat atap, dengan rangka masa kecil memiliki kekakuan pada sistem dan redaman pelek (dashpot) [7].



Gambar 1 Model struktur derajat kebebasan SDOF dan MDOF

Model matematis dalam analisa dinamika struktur mempunyai beberapa elemen sebagai berikut:

- Massa m menyatakan dan sifat inersia dari struktur.
- Pegas k menyatakan gaya balik elastic dan kapasitas energy potensial dari struktur.
- Redaman c menyatakan sifat geseran dan kehilangan energy dari struktur.
- Gaya pengaruh $F(t)$ menyatakan gaya luar yang bekerja pada sistem struktur sebagai fungsi dari waktu.

Damage Detection

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 SHM di deteksi kerusakan dan lokalisasi. Sisa dari bagian ini membahas teknik deteksi kerusakan dan lokalisasi yang umum digunakan.

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. Penggunaan parameter modal seperti frekuensi dan bentuk mode dalam lokalisasi kerusakan diinginkan karena kesederhanaan dalam menentukan parameter modal ini. Dalam baik lokalisasi kerusakan berbasis frekuensi dan algoritma lokalisasi kerusakan berbasis-mode diusulkan. Algoritma deteksi kerusakan berbasis frekuensi yang diusulkan menggunakan perubahan dalam bentuk mode yang diukur untuk melokalisasi kerusakan dan perubahan dalam frekuensi alami yang diukur untuk memperkirakan tingkat kerusakan. Demikian pula, algoritma deteksi kerusakan berbasis-mode, yang menggunakan perubahan energi regangan modal untuk melokalisasi kerusakan, diusulkan. Eksperimen menunjukkan bahwa metode berbasis frekuensi melokalisasi kerusakan dengan kesalahan kecil sedangkan metode berbasis mode melokalisasi kerusakan dengan hampir tidak ada kesalahan.

Analisis domain dalam waktu, deret waktu yang dikumpulkan dari sensor langsung diproses untuk mengekstrak parameter modal. Teknik umum yang digunakan adalah metode *Two-stage Least Square* atau dikenal sebagai metode model *Autoregressive Integrated Moving Average* (ARIMA), metode *Ibrahim Time-domain* (ITD), metode *Impulse Response function* (IRF) driven, dan metode matriks kovarians. Salah satu keuntungan umum dari teknik domain waktu adalah bahwa mereka memberikan hasil yang stabil, namun mereka bekerja untuk sistem yang sedikit teredam karena mereka memerlukan sejumlah besar sampel domain waktu untuk beroperasi secara efisien pada sistem yang sangat teredam.

ARIMA Model

Model ARIMA dibagi menjadi berbagai macam kondisi diantaranya. Model *Autoregressive* (AR), *Moving Average* (MA), Model *Autoregressive Moving Average* (ARIMA) dan Model *Autoregressive Moving Average* musiman (SARIMA). Parameter ARIMA dinyatakan sebagai berikut ARIMA (p,d,q) umumnya p berarti urutan *Autoregressive* (AR) merupakan jumlah observasi lag atau biasa disebut urutan lag, d berarti derajat perbedaan tren, q berarti urutan *Moving Average* (MA) atau biasa disebut order dari rata-rata bergerak. Sedangkan untuk parameter SARIMA dinyatakan sebagai berikut SARIMA $(p,d,q)(P,D,Q)S$, umumnya P berarti lag *Autoregressive* (AR) musiman, D berarti derajat perbedaan musiman, Q *Moving Average* (MA) rata-rata pergerakan musiman, S berarti panjang pola siklus. Stasioner deret waktu, estimasi parameter, pengecekan model, dan prediksi dilakukan untuk membentuk model ARIMA [7].

- Model *Autoregressive* (AR)

Model AR (p) adalah model dimana X_t merupakan fungsi dari data di masa yang lalu, yakni $t-1, t-2, \dots, t-p$. Persamaan AR diberikan oleh [8]:

$$X_t = \mu + \phi_1 X_{t-1} + \phi_2 X_{t-2} + \dots + \phi_p X_{t-p} + e_t,$$

b. Model *Moving Average (MA)*

Model *MA (q)* adalah model untuk memprediksi X_t sebagai fungsi dari kesalahan prediksi di masa lalu (*past forecast error*) dalam memprediksi X_t . Persamaan *MA* diberikan oleh:

$$X_t = \mu + e_t - \theta_1 e_{t-1} - \theta_2 e_{t-2} - \dots - \theta_q e_{t-q} \tag{2}$$

c. Model *Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA)*

Model ARIMA dilakukan pada data stasioner atau data yang didifferencing se-hingga data telah stasioner. Secara umum, model ARIMA dinotasikan sebagai ARIMA (p,d,q). Model ini merupakan gabungan dari model ARMA (p,q) dan proses differencing, yaitu

$$\phi_p(B)(1-B)^d X_t = \theta_q(B)e_t \tag{3}$$

d. Model *Autoregressive Integrated Moving Average musiman (SARIMA)*

Musiman adalah kecenderungan mengulangi pola tingkah gerak dalam periode musim, biasanya satu tahun untuk data bulanan. Model ARIMA Musiman merupakan model ARIMA yang digunakan untuk menyelesaikan time series musiman yang terdiri dari dua bagian, yaitu bagian tidak musiman (non-musiman) dan bagian musiman. Bagian non-musiman dari metode ini adalah model ARIMA. Secara umum bentuk model ARIMA musiman atau ARIMA (p,d,q)(P,Q,S) adalah:

$$\phi_p(B)\Phi_P(B)(1-B)^d(1-B^s)^D X_t = \theta_q(B)\Theta_Q(B)\delta_S(B)e_t \tag{4}$$

e. *Time Series Stationary* pada model ARIMA membutuhkan deret waktu stasioner, yang artinya deret waktu tidak menunjukkan fluktuasi atau periodisitas dengan waktu. *The Augmented Dickey-Fuller* Uji unit-root (ADF) dapat membantu memperkirakan apakah deret waktu stasioner atau tidak. Hipotesis nol untuk pengujian adalah bahwa data harus memiliki nilai p-value kurang dari 0,05 atau lebih kecil untuk medeklarasi bahwa data sudah stasioner.

$$\Delta y_t = \alpha + \beta t + \gamma y_{t-1} + \delta_1 \Delta y_{t-1} + \delta_2 \Delta y_{t-2} + \dots \tag{5}$$

f. Estimasi parameter model ARIMA diestimasi dengan autokorelasi grafik dari (ACF) dan (PACF), estimasi dilakukan secara otomatis, estimasi otomatis diadopsi terlebih dahulu untuk mengidentifikasi parameter model. Kemudian ACF dan PACF digunakan untuk mengidentifikasi parameter dari model ARIMA. Kriteria ACF dan PACF dapat dirumuskan sebagai berikut :

Autokorelasi (ACF) adalah suatu ukuran yang mengukur besarnya hubungan linear antara suatu variabel dengan variabel itu sendiri dalam waktu yang berbeda. Autokorelasi menggambarkan susunan atau struktur data dan polanya. Fungsi autokorelasi (ACF) dari $\{x_t\}$ pada lag k ditulis ρ_k didefinisikan sebagai fungsi yang nilainya pada lag k adalah [9]:

$$\rho_k = \frac{cov(x_t, x_{t+k})}{\sqrt{var(x_t)}\sqrt{var(x_{t+k})}} = \frac{\gamma_k}{\sqrt{\gamma_0}\sqrt{\gamma_0}} = \frac{\gamma_k}{\gamma_0} \tag{6}$$

Dalam praktek, harus dihitung nilai estimasi dari fungsi autokorelasi yang disebut dengan fungsi autokorelasi sampel. Fungsi didefinisikan dengan:

$$\rho_k = \frac{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x})}{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2} \tag{7}$$

Nilai dari fungsi autokorelasi sampel ini dapat digunakan untuk menentukan orde dari model *Moving Average*. Selain itu dengan melihat plot fungsi autokorelasi (ACF), maka dapat dilihat apakah data deret waktu yang diamati adalah data stasioner.

Autokorelasi Parsial (PACF) adalah fungsi yang digunakan untuk mengukur tingkat keeratan antara x_t dan x_{t-k} apabila pengaruh dari *time lag* 1,2,3,...k-1 dianggap terpisah. Koefisien autokorelasi parsial berorde p didefinisikan sebagai koefisien *Autoregressive* terakhir dari model AR berorder p , sebagai contoh:

$$x_t = \phi_1 x_{t-1} + \phi_2 x_{t-2} + \dots + \phi_{m-1} x_{t-m+1} + \phi_m x_{t-m} + \varepsilon_t \quad (8)$$

Koefisien terakhir x dari persamaan AR yaitu ϕ_1, ϕ_2, \dots , dan ϕ_m diatas merupakan koefisien autokorelasi parsial. Perhitungan autokorelasi parsial bertujuan untuk membantu menentukan orde dari proses *Autoregressive*. Adapun nilai dari fungsi autokorelasi parsial sampel dirumuskan sebagai berikut:

$$\phi_{kk} = \frac{\rho_k - \sum_{j=1}^{k-1} \phi_{k-1,j} \rho_{k-j}}{1 - \sum_{j=1}^{k-1} \phi_{k-1,j} \rho_j} \quad \text{untuk } k = 2, 3, 4, \dots$$

$$\text{dengan } \phi_{kj} = \phi_{k-1,j} - \phi_{kk} \phi_{k-1,k-j} \quad \text{untuk } j = 1, 2, \dots, k-1 \quad (9)$$

Nilai dari masing-masing ϕ_{kk} juga akan membentuk suatu plot fungsi autokorelasi parsial sampel (PACF).

- g. Evaluasi model dari berbagai urutan p,q dan P,Q di uji, kemudian semua model yang lulus uji residual dibandingkan menggunakan *Akaike Information Criteria* (AIC) dan *Bayesian Information Criterion* (SBIC) sehingga dapat ditemukan model terbaik. Kriteria (AIC) dan (SBIC) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$AIC = n \ln \left(\frac{SSE}{n} \right) + 2f + n + n \ln(2\pi) \quad (10)$$

Dimana *SSE* merupakan *Sum Square Error*, n banyaknya pengamatan dan f banyaknya parameter dalam model.

$$SBC = n \ln \left(\frac{SSE}{n} \right) + f \ln n + n + n \ln(2\pi) \quad (11)$$

Dimana *SSE* merupakan *Sum Square Error*, n banyaknya pengamatan dan f banyaknya parameter dalam model.

- h. Evaluasi *Root Mean Square Error* (RMSE) dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE).

RMSE merupakan untuk mencari kesalahan dari rata-rata error pada observasi. RMSE dapat digunakan mencari tahu seberapa besar kesalahan pada data dari model yang digunakan. RMSE dapat dijadikan sebagai indikator ketidakcocokan dalam pemodelan. RMSE dapat dicari dengan menggunakan:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (\hat{x}_i - x_i)^2}{n}} \quad (12)$$

Dimana \hat{x} hasil dari prediksi x_i nilai observasi dan n banyak sampel data.

Mean Absolute Percentage Error (MAPE) adalah kesalahan absolut pada tiap periode dibagi dengan nilai observasi yang nyata untuk periode itu. Kemudian dihitung rata-rata dari kesalahan persentase absolut tersebut. Sama seperti halnya RMSE, MAPE menghitung kesalahan dari data observasi dan prediksi yang dimunculkan dalam nilai persen. Nilai MAPE dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$MAPE = \left(\frac{100\%}{n} \right) \frac{\sum_i^n x_i - \hat{x}}{x_i} \quad (13)$$

Jarak antara Model ARIMA

Model ARIMA adalah representasi deret waktu parametrik yang tepat hanya untuk respons. Pada penelitian ini observasi respon struktural yang direkam dimodelkan dengan menggunakan representasi Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) [4].

$$x_n = - \sum_{i=1}^p a_i x_{n-i} + \sum_{i=0}^q b_i e_{n-i} \tag{14}$$

Respon struktural pada indeks sampel index n, sebagaimana dilambangkan dengan x_n , diekspresikan sebagai fungsi dari p pengamatan sebelumnya dan q istilah kesalahan residual. P dan q sering disebut sebagai urutan model proses AR dan MA, masing-masing. Bobot dari pengamatan sebelumnya dan istilah kesalahan residual, a_i dan b_i , masing-masing disebut koefisien AR dan MA. Diasumsikan bahwa kesalahan residual model ARMA, e_n adalah dipengaruhi oleh eksitasi yang tidak diketahui ke struktur dan dimodelkan dengan warna putih. -proses kebisingan dengan varians σ^2 .

Hal ini dapat dibuktikan bahwa cukup mempertimbangkan parameter AR untuk mengukur jarak antara model ARIMA Model(1) dan ARIMA Model(2) Metrik cepstral ini dapat disederhanakan menggunakan kutub model AR sebagai berikut di mana $p(1), p(2)$ dan $\alpha(1), \alpha(2)$ masing-masing adalah orde dan kutub model ARIMA Model(1), ARIMA Model(2).

$$D(M^{(1)}, M^{(2)})^2 = \log \frac{\prod_{i=1}^{p(1)} \prod_{j=1}^{p(2)} (1 - \alpha_i^{(1)} \bar{\alpha}_j^{(2)}) \prod_{i=1}^{p(2)} \prod_{j=1}^{p(1)} (1 - \alpha_i^{(2)} \bar{\alpha}_j^{(1)})}{\prod_{i=1}^{p(1)} \prod_{j=1}^{p(1)} (1 - \alpha_i^{(1)} \bar{\alpha}_j^{(1)}) \prod_{i=1}^{p(2)} \prod_{j=1}^{p(2)} (1 - \alpha_i^{(2)} \bar{\alpha}_j^{(2)})} \tag{15}$$

3. Sistem yang Dibangun

Riset Framework



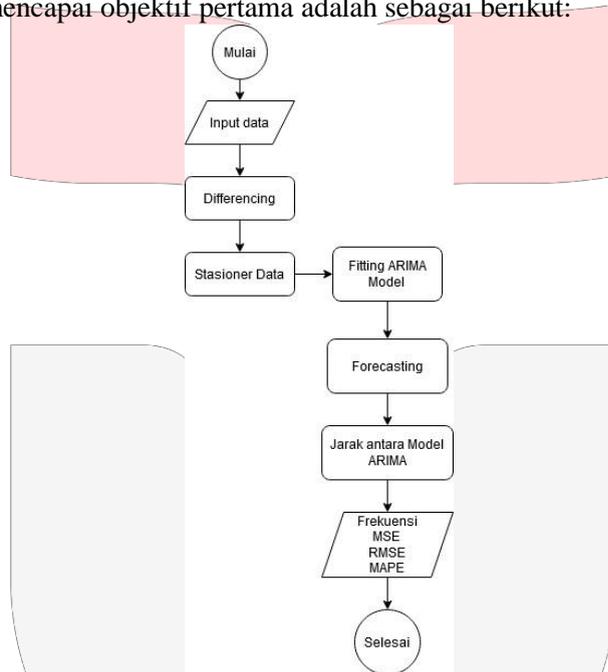
Gambar 2 Diagram Alur Riset Framework

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.

Metodologi Penelitian

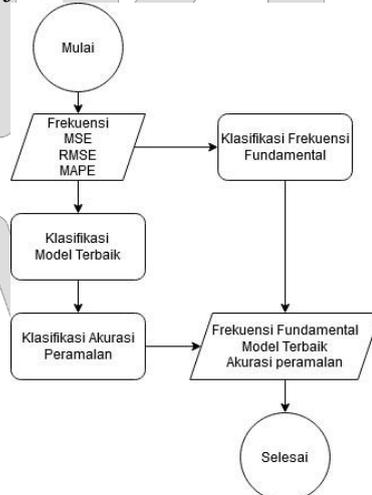
a. Metodologi untuk mencapai objektif pertama adalah sebagai berikut:



Gambar 3 Alur untuk mencapai metodologi pertama

Pada tahap input data, data yang sebelumnya sudah rekam menggunakan sensor SunSpot. Diproses berdasarkan deret waktu atau Time Series kemudian data dilakukan proses Differencing untuk memenuhi karakteristik pada tahap stasioner data menggunakan proses The Augmented Dickey-Fuller Uji unit-root (ADF) , jika sudah dikatakan stasioner maka proses selanjutnya masuk pada tahap fitting model ARIMA dimana tahap untuk menentukan model terbaik dengan menggunakan Akaike Information Criteria (AIC) dan Bayesian Information Criterion (SBIC). Model ARIMA yang sudah didapat selanjut dilakukan tahap Forecasting untuk mendapatkan data prediksi yang mengacu pada data aktual berdasarkan parameter dari model ARIMA yang sudah ditentukan. Pada tahap jarak antara model ARIMA teknik analisis diperlukan untuk membedakan kinerja dari jarak antara model ARIMA yang nantinya digunakan sebagai proses pendeteksi kerusakan pada struktur jembatan dan pencarian model terbaik dari setiap percobaan, pada tahap ini menggunakan nilai MAPE sebagai pendeteksi kerusakan dan nilai MAE, MSE dan RMSE sebagai acuan model ARIMA terbaik yang dipilih.

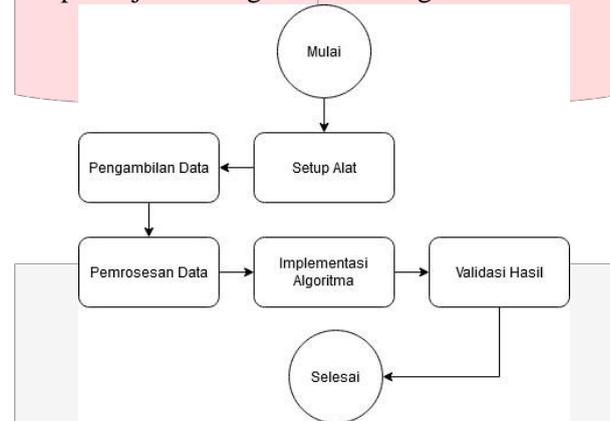
b. Metodologi untuk mencapai objektif kedua



Gambar 4 Alur untuk mencapai metodologi kedua

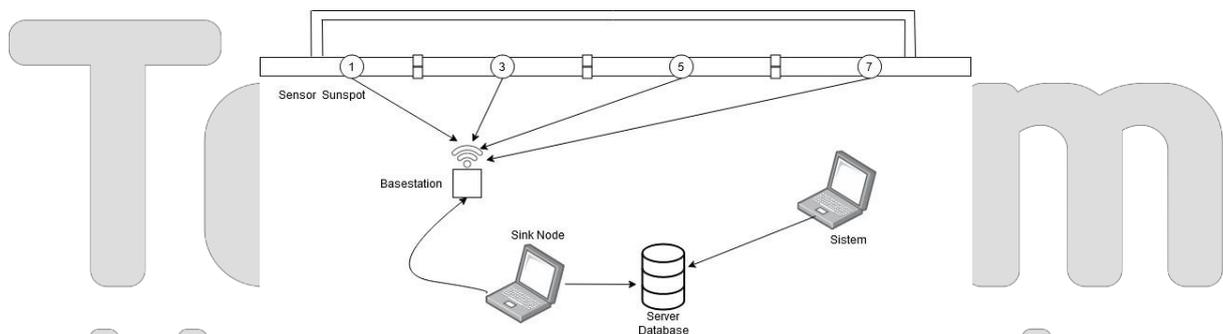
Pada tahap berikutnya merupakan hasil nilai frekuensi, MAE, MSE, RMSE dan MAPE diklasifikasikan sesuai kegunaannya masing masing dimana pada tahap pengklasifikasian frekuensi dibagi menjadi dua macam pengklasifikasian diantaranya sebagai referensi frekuensi fundamental dari struktur jembatan normal dan struktur jembatan rusak. Kemudian pada tahap pencarian model terbaik menggunakan nilai MAE, MSE dan RMSE sebagai acuannya diambil yang terkecil untuk mempresentasikan model terbaik dari setiap percobaan. Kemudian pada akurasi peramalan menggunakan nilai MAPE sebagai acuannya dimana semakin kecil output dari nilai MAPE maka dikatakan semakin bagus proses peramalannya.

c. Metodologi untuk mencapai objektif ketiga adalah sebagai berikut:



Gambar 5 Alur untuk mencapai metodologi ketiga

Pada setup alat, alat ditempelkan pada sisi sebelah kiri dan kanan pada jembatan, setelah alat ditempelkan 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. Setelah pengambilan data, data di proses dengan cara memotong data agar data menjadi lebih akurat pada implementasi algoritma, kemudian pada implementasi algoritma, algoritma yang digunakan adalah ARIMA dan jarak antara model ARIMA dimana ada dua macam model ARIMA yang digunakan diantaranya model ARIMA (1.1.0) merupakan referensi dari struktur jembatan normal dan model ARIMA (2.1.0) merupakan referensi dari struktur jembatan yang mengalami kerusakan. Tahap terakhir merupakan tahap validasi hasil dengan membandingkan kedua referensi dari jarak antara model ARMA untuk memperoleh diagnosis kerusakan dan lokasi kerusakan pada struktur jembatan.



Gambar 6 Desain pengambilan data

Jembatan SDOF (*Single Degree of Freedom System*) merupakan jembatan yang hanya memiliki satu gerak bebas, dimana 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.

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, dimana setiap sensor saling berkaitan untuk merekam perilaku jembatan berdasarkan kekauan pegas dari masing-masing sensor yang terkait, contoh (sensor 1 berkaitan dengan sensor 2).
- Dari kedelapan sensor node kemudian diaktifkan dan dihubungkan pada Basestation untuk melakukan akuisisi data sebanyak 2^n sebanyak 5.12 detik, selanjutnya data yang sudah diterima pada Basestation disimpan didalam sistem server database.
- Skenario beban truk dilakukan dengan dua macam yaitu kondisi beban truk kosong dan beban truk penuh (8kg), 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

4. Evaluasi

4.1 Hasil Pengujian Sistem

4.1.1 Sistem mengakses dataset yang sudah diambil dari database server.

Table	Action	Rows	Type	Collation	Size	Overhead
p1_d_e_s1	Browse Structure Search Insert Empty Drop	512	InnoDB	utf8mb4_general_ci	48.0 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	48.0 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	48.0 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	48.0 KiB	-
p1_n_e_s3	Browse Structure Search Insert Empty Drop	512	InnoDB	utf8mb4_general_ci	48.0 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 7 Dataset Jembatan pada server database

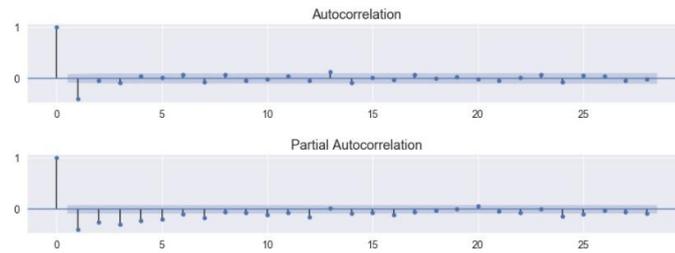
Pada proses ini sistem mengakses dataset dari server kemudian dilanjutkan perhitungannya menggunakan metode ARIMA untuk mendeteksi kerusakan dan mengidentifikasi lokasi kerusakan sesuai skenario pengambilan data yang sudah ditentukan, dimana skenario pengambilan data diambil sebanyak 10 kali dari masing-masing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

4.1.2 Hasil Stasioneritas sinyal, ACF, dan PACF

Pada proses stasioneritas sinyal ini menentukan nilai P-value < 0.5 untuk menentukan sinyal data dapat dikatakan stasioner, maka dibutuhkan proses Differencing pertama agar nilai P-value < 0.5 data sinyal dapat dikatakan sudah stasioner, kemudian plot nilai ACF dan PACF dari data yang sudah dilakukan Differencing pertama plot tersebut dapat digunakan untuk mencari model ARIMA yang akan digunakan.



Gambar 8 Grafik differencing data



Gambar 9 Plot ACF dan PACF

4.1.3 Pencarian Model ARIMA Otomatis

Pada proses pencarian model ARIMA secara Otomatis menggunakan metode *Akaike Information Criteria* (AIC) dihitung nilai terkecilnya dan model ARIMA terbaik yang akan digunakan pada pengujian ini model ARIMA yang digunakan yaitu model ARIMA (1,1,0) sebagai referensi struktur jembatan normal dan model ARIMA (2,1,0) sebagai referensi struktur jembatan yang mengalami kerusakan.

```

Performing stepwise search to minimize aic
ARIMA(0,1,0)(0,1,1)[12]      : AIC=inf, Time=4.01 sec
ARIMA(0,1,0)(0,1,0)[12]     : AIC=-1165.706, Time=0.08 sec
ARIMA(1,1,0)(1,1,0)[12]     : AIC=-1406.408, Time=0.74 sec
ARIMA(0,1,1)(0,1,1)[12]     : AIC=inf, Time=3.46 sec
ARIMA(1,1,0)(0,1,0)[12]     : AIC=-1284.436, Time=0.10 sec
ARIMA(1,1,0)(2,1,0)[12]     : AIC=-1461.499, Time=3.02 sec
ARIMA(1,1,0)(2,1,1)[12]     : AIC=inf, Time=13.98 sec
ARIMA(1,1,0)(1,1,1)[12]     : AIC=inf, Time=5.09 sec
ARIMA(0,1,0)(2,1,0)[12]     : AIC=-1362.367, Time=1.76 sec
ARIMA(1,1,1)(2,1,0)[12]     : AIC=inf, Time=11.64 sec
ARIMA(0,1,1)(2,1,0)[12]     : AIC=inf, Time=9.99 sec
ARIMA(1,1,0)(2,1,0)[12] intercept : AIC=-1459.499, Time=11.40 sec

Best model: ARIMA(1,1,0)(2,1,0)[12]
Total fit time: 65.272 seconds

SARIMAX Results
-----
Dep. Variable:          Data      No. Observations:      512
Model:                 SARIMAX(1, 1, 0)      Log Likelihood        840.831
Date:                 Tue, 29 Dec 2020      AIC                  -1677.661
Time:                 05:33:42             BIC                  -1669.188
Sample:               - 0                HQIC                 -1674.340
Covariance Type:      opg

-----
coef      std err      z      P>|z|      [0.025      0.975]
-----
ar.L1     -0.4103      0.033     -12.382   0.000     -0.475     -0.345
sigma2    0.0022      8.85e-05  24.604   0.000     0.002     0.002
-----
Ljung-Box (Q):          118.96      Jarque-Bera (JB):      169.94
Prob(Q):                0.00       Prob(JB):              0.00
Heteroskedasticity (H): 2.35       Skew:                  0.21
Prob(H) (two-sided):    0.00       Kurtosis:              5.79
-----

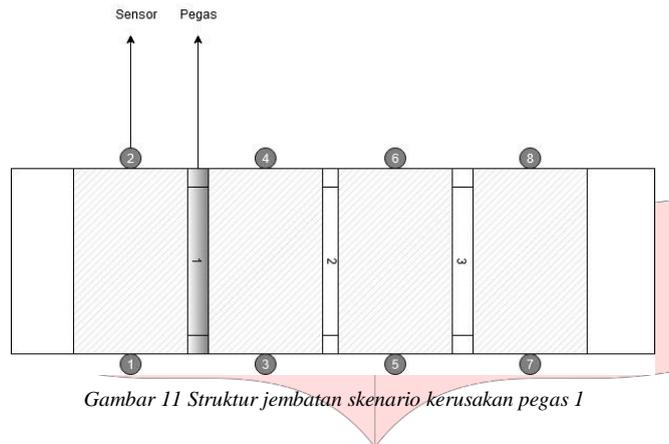
Warnings:
[1] Covariance matrix calculated using the outer product of gradients (complex-step).

```

Gambar 10 Fitting ARIMA model

4.1.4 Hasil dan pembahasan

Dalam penelitian ini, jarak antara model ARIMA disebut sebagai indikator kerusakan, yang mempresentasikan tingkat kerusakan dan lokasi kerusakan. Untuk mendemostrasikan kinerja kerusakan ini, simulasi telah dilakukan pada model struktur jembatan satu bentang SDOF (*Single Degree of Freedom System*) yang digambarkan pada gambar 10. Struktur pegas diasumsikan mengalami pengurangan kekakuan pada pegas satu dari struktur jembatan. Untuk menggambarkan kerusakan struktural dan mendeteksi kerusakan pada struktur jembatan. Total ada dua skenario kerusakan, model ARIMA referensi yang disesuaikan dengan deret waktu percepatan dari struktur aslinya, mewakili struktur yang tidak rusak, sedangkan model ARIMA baru dipasang dengan model dari struktur yang rusak untuk skenario kerusakan yang berbeda. Kemudian indikator kerusakan dihitung sebagai jarak antara model ARIMA yang mewakili struktur jembatan normal dan struktur jembatan rusak.



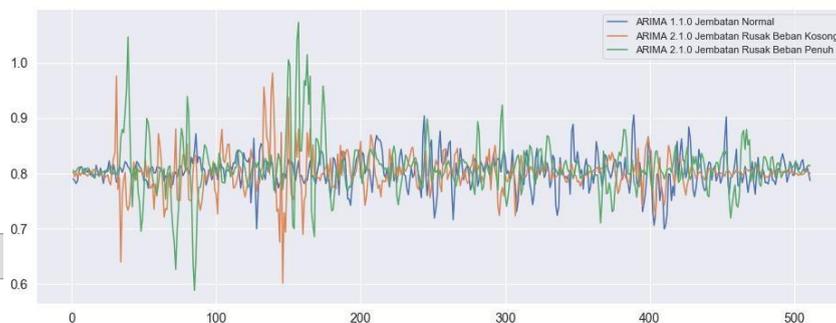
Gambar 11 Struktur jembatan skenario kerusakan pegas 1

Tabel 1 Skenario kerusakan pegas 1 pada sensor

SKENARIO KERUSAKAN STRUKTUR JEMBATAN PADA PEGAS 1								
SKENARIO	Kerusakan				Normal			
Struktur Jembatan Rusak Beban Kosong	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8
Struktur Jembatan Rusak Beban Penuh	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8

a. Jarak antar model ARIMA(1.1.0) dan model ARIMA(2.1.0)

Dalam kasus penelitian ini, 512 kumpulan data diasumsikan dan masing masing terdiri dari 10 kali percobaan dari setiap skenario dan kondisi yang berbeda, dari setiap percobaan masing-masing terdiri dari 512 sampel data (pada periode pengambilan sample 0.01 milidetik sehingga totalnya selama 5.12 detik dari setiap percobaan), data ARIMA (1.1.0) sebelumnya merupakan skenario riwayat percepatan waktu dari struktur jembatan normal. Sedangkan data ARIMA (2.1.0) sesudahnya berasal dari skenario struktur jembatan yang rusak yang memiliki varian beban kosong dan beban penuh. Pada proses analisis ini digunakan untuk perbandingan referensi model ARIMA yang ditempatkan pada struktur jembatan normal dan struktur jembatan rusak, kemudian dari hasil ketiga model, output nilai MSE, RMSE dan MAPE digunakan sebagai pembanding dari setiap model ARIMA



Gambar 12 Jarak antara model ARIMA

b. Nilai MSE dan RMSE

Hasil dari penelitian ini, mencari nilai Mean Square Error (MSE) dan Root Mean Square Error (RMSE) yang akan digunakan untuk mencari model ARIMA terbaik dari semua percobaan dimana ada tiga output nilai MSE dan RMSE yang dicari paling kecil untuk menentukan nilai dari model ARIMA terbaik, dari referensi model ARIMA (1.1.0) terbaik dari struktur jembatan normal bernilai MSE : 0.001408549 dan RMSE : 0.037530638, sedangkan untuk referensi model ARIMA (2.1.0) terbaik dari struktur jembatan rusak beban kosong MSE : 0.001182568 dan RMSE : 0.034388489 untuk referensi model ARIMA (2.1.0) terbaik dari struktur jembatan rusak beban penuh MSE : 0.001564655 dan RMSE : 0.039555714.

Tabel 2 Nilai MSE

Sensor 1-8	
Percobaan 1-10	MSE
Jembatan Nomal	0.001408549

Jembatan Rusak Beban Kosong	0.001182568
Jembatan Rusak Beban Penuh	0.001564655

Tabel 3 Nilai RMSE

Sensor 1-8	
Percobaan 1-10	RMSE
Jembatan Nomal	0.037530638
Jembatan Rusak Beban Kosong	0.034388489
Jembatan Rusak Beban Penuh	0.039555714

c. Frekuensi Natural

Hasil dari penelitian, mencari rata-rata nilai frekuensi jembatan dari semua percobaan sebanyak 10 kali percobaan dimana ada tiga macam referensi untuk frekuensi natural berdasarkan struktur jembatan yang sudah diskenario mengalami kerusakan, terlihat penurunan nilai frekuensi dari skenario dua macam kerusakan diantaranya untuk referensi struktur jembatan rusak beban kosong dan struktur jembatan rusak beban penuh.

Tabel 4 Nilai Frekuensi Natural Jembatan

Frekuensi Natural Jembatan								
Percobaan 1-10	Sensor1	Sensor2	Sensor3	Sensor4	Sensor5	Sensor6	Sensor7	Sensor8
Jembatan Nomal	11.72	13.65	12.85	22.03	19.80	18.89	8.65	9.84
Jembatan Rusak Beban Kosong	5.55	9.59	11.19	8.69	9.34	7.38	5.94	5.96
Jembatan Rusak Beban Penuh	9.63	11.52	9.16	12.34	10.00	10.78	6.93	4.84

d. Nilai MAPE

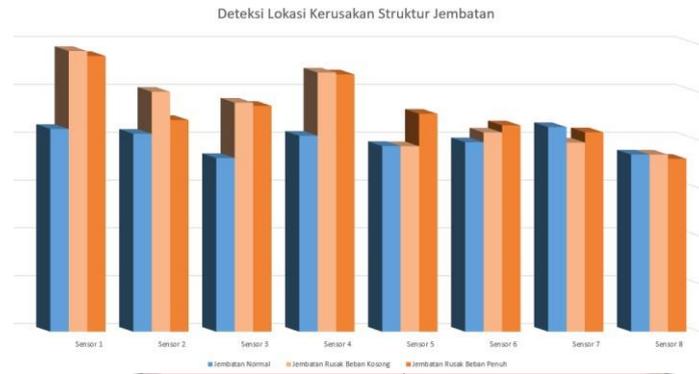
Nilai *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) dicari untuk perhitungan nilai *error* untuk melihat akurasi dari seriap peramalan, dari semua percobaan, kondisi dan skenario didapatkan nilai rata-rata MAPE, yang dicari dari setiap model ARIMA. Nilai MAPE yang didapatkan dibagi menjadi tiga referensi dimana jumlah seluruh percobaan sebanyak 10 kali untuk jembatan normal dan rusak kemudian nilai MAPE dirata-ratakan dari setiap sensor. Hasil dari rata-rata 10 kali percobaan mendapatkan delapan nilai MAPE untuk setiap sensor, dimana nilai MAPE terkecil dari skenario struktur jembatan normal MAPE: 3.632609654, nilai MAPE terkecil skenario jembatan rusak beban kosong MAPE: 3.703711043 dan nilai MAPE terkecil skenario jembatan rusak beban penuh MAPE: 3.61655498.

Tabel 5 Nilai MAPE

MAPE								
Percobaan 1-10	Sensor1	Sensor2	Sensor3	Sensor4	Sensor5	Sensor6	Sensor7	Sensor8
Jembatan Nomal	4.240852444	4.140064919	3.632609654	4.097668607	3.883398564	3.962076981	4.278616531	3.704525389
Jembatan Rusak Beban Kosong	5.869992352	5.01813209	4.790339669	5.419165319	3.879848312	4.166231208	3.955654884	3.703711043
Jembatan Rusak Beban Penuh	5.765527585	4.426362152	4.722565207	5.380168467	4.5573378	4.314761759	4.16940529	3.61655498

e. Deteksi kerusakan dan lokasi kerusakan

Kerusakan struktural diasumsikan dengan mengurangi kekakuan pegas satu pada struktur jembatan, 16 seri waktu dibagi menjadi dua kelompok skenario kerusakan, hasilnya pada gambar 14, menunjukkan indikator kerusakan yang dihitung, yaitu jarak model ARIMA(1.1.0) sebagai referensi struktur jembatan normal, sedangkan jarak model ARIMA(2.1.0) merupakan referensi dari struktur jembatan yang mengalami kerusakan.



Gambar 13 grafik lokasi kerusakan pada struktur jembatan

Dari hasil skenario kerusakan dengan mengurangi kekakuan pada pegas satu, dari hasil perhitungan dengan membandingkan jarak antara model ARIMA terlihat skenario kerusakan dan lokasi kerusakan yang ditimbulkan dimana kerusakan terdeteksi pada sensor kesatu sampai sensor keempat sesuai gambar 14, dimana indikator jembatan normal dilihat dari grafik berwarna biru dan indikator jembatan yang mengalami kerusakan dari grafik berwarna orange.

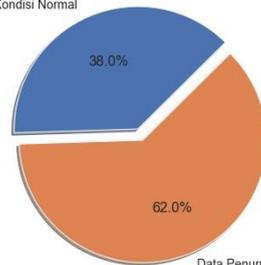
- f. Perbandingan nilai data rata-rata dari keempat sensor yang mengalami kerusakan dan perbandingan data rata-rata dari semua sensor yang diambil dari skenario kerusakan pegas satu berdasarkan referensi jembatan normal dan referensi jembatan rusak beban kosong.

Tabel 6 Perbandingan rata-rata 4 sensor jembatan rusak beban kosong

PRESENTASE PERBANDINGAN RATA-RATA 4 SENSOR				
Sensor	Struktur Normal	Struktur Rusak	Kondisi Normal	Kondisi Rusak
Sensor 1	100%	72%	38%	62%
Sensor 2	100%	83%		
Sensor 3	100%	76%		
Sensor 4	100%	76%		

Data Perbandingan Rata-Rata 4 Sensor

Data Perbandingan Jembatan Kondisi Normal



Data Penurunan dari Perbandingan Jembatan Rusak

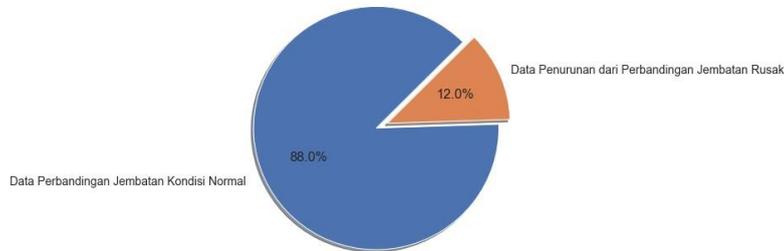
Gambar 14 Presentase perbandingan rata-rata 4 sensor jembatan rusak beban kosong

Berdasarkan hasil presentase yang didapatkan dengan membandingkan nilai dari keempat sensor yang mengalami kerusakan skenario pada pegas 1 menunjukkan bahwa penurunan kondisi jembatan, penurunan kondisi jembatan dihitung berdasarkan nilai rata-rata dari keempat sensor struktur jembatan normal dan struktur jembatan rusak beban kosong, dari gambar tersebut kondisi jembatan normal mengalami penurunan sebesar 62%, sehingga dapat dikatakan bahwa skenario kerusakan pada pegas 1 dengan menghitung rata-rata dari 4 sensor mendapatkan nilai presentase 38% untuk struktur jembatan normal dan 62% untuk presentase kerusakannya.

Tabel 7 Perbandingan rata-rata 8 sensor jembatan rusak beban kosong

PRESENTASE PERBANDINGAN RATA-RATA 8 SENSOR				
Sensor	Struktur Normal	Struktur Rusak	Kondisi Normal	Kondisi Rusak
Sensor 1	100%	74%	88%	12%
Sensor 2	100%	83%		
Sensor 3	100%	76%		
Sensor 4	100%	76%		
Sensor 5	100%	100%		
Sensor 6	100%	95%		
Sensor 7	100%	100%		
Sensor 8	100%	100%		

Data Perbandingan Rata-Rata 8 Sensor



Gambar 15 Presentase perbandingan rata-rata 8 sensor jembatan rusak beban kosong

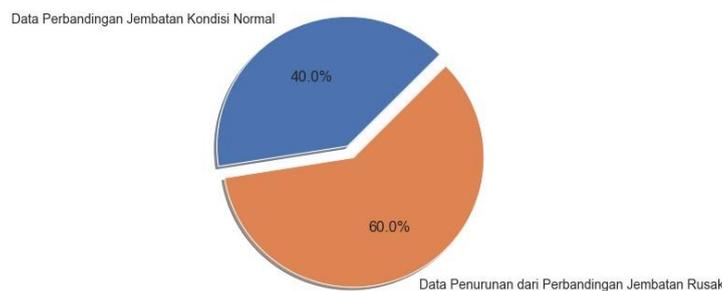
Kemudian berdasarkan hasil presentase yang didapatkan dengan membandingkan nilai dari semua sensor yang mengalami kerusakan skenario pada pegas 1 menunjukkan bahwa penurunan kondisi jembatan, penurunan kondisi jembatan dihitung berdasarkan nilai rata-rata dari semua sensor struktur jembatan normal dan struktur jembatan rusak beban kosong, dari gambar tersebut kondisi jembatan normal mengalami penurunan sebesar 12%, sehingga dapat dikatakan bahwa skenario kerusakan pada pegas 1 dengan menghitung rata-rata dari semua sensor mendapatkan nilai presentase 88% untuk struktur jembatan normal dan 12% untuk presentase kerusakannya.

- g. Perbandingan nilai data rata-rata dari keempat sensor yang mengalami kerusakan dan perbandingan data rata-rata dari semua sensor yang diambil dari skenario kerusakan pegas satu berdasarkan referensi jembatan normal dan referensi jembatan rusak beban penuh.

Tabel 8 Perbandingan rata-rata 4 sensor jembatan rusak beban penuh

PRESENTASE PERBANDINGAN RATA-RATA 4 SENSOR				
Sensor	Struktur Normal	Struktur Rusak	Kondisi Normal	Kondisi Rusak
Sensor 1	100%	74%	40%	60%
Sensor 2	100%	94%		
Sensor 3	100%	77%		
Sensor 4	100%	76%		

Data Perbandingan Rata-Rata 4 Sensor



Gambar 16 Presentase perbandingan rata-rata 4 sensor jembatan rusak beban penuh

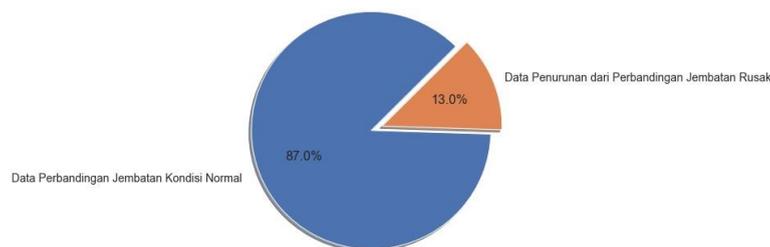
Berdasarkan hasil presentase yang didapatkan dengan membandingkan nilai dari keempat sensor yang mengalami kerusakan skenario pada pegas 1 menunjukkan bahwa penurunan kondisi jembatan, penurunan kondisi

jembatan dihitung berdasarkan nilai rata-rata dari keempat sensor struktur jembatan normal dan struktur jembatan rusak beban penuh, dari gambar tersebut kondisi jembatan normal mengalami penurunan sebesar 60%, sehingga dapat dikatakan bahwa skenario kerusakan pada pegas 1 dengan menghitung rata-rata dari 4 sensor mendapatkan nilai presentase 40% untuk struktur jembatan normal dan 60% untuk presentase kerusakannya.

Tabel 9 Perbandingan rata-rata 8 sensor jembatan rusak beban penuh

PRESENTASE PERBANDINGAN RATA-RATA 8 SENSOR				
Sensor	Struktur Normal	Struktur Rusak	Kondisi Normal	Kondisi Rusak
Sensor 1	100%	74%	87%	13%
Sensor 2	100%	94%		
Sensor 3	100%	77%		
Sensor 4	100%	76%		
Sensor 5	100%	85%		
Sensor 6	100%	92%		
Sensor 7	100%	100%		
Sensor 8	100%	100%		

Data Perbandingan Rata-Rata 8 Sensor



Gambar 17 Presentase perbandingan rata-rata 4 sensor jembatan rusak beban penuh

Kemudian berdasarkan hasil presentase yang didapatkan dengan membandingkan nilai dari semua sensor yang mengalami kerusakan skenario pada pegas 1 menunjukkan bahwa penurunan kondisi jembatan, penurunan kondisi jembatan dihitung berdasarkan nilai rata-rata dari semua sensor struktur jembatan normal dan struktur jembatan rusak beban penuh, dari gambar tersebut kondisi jembatan normal mengalami penurunan sebesar 13%, sehingga dapat dikatakan bahwa skenario kerusakan pada pegas 1 dengan menghitung rata-rata dari semua sensor mendapatkan nilai presentase 87% untuk struktur jembatan normal dan 13% untuk presentase kerusakannya.

5. Kesimpulan

Pada penelitian ini telah dilakukan percobaan untuk diagnosis kesehatan pada struktur jembatan yang diusulkan, untuk mengidentifikasi kerusakan dan lokasi kerusakan, indikator kerusakan yang definisikan sebagai jarak antara model ARIMA, didapatkan bahwa algoritma ARIMA dapat menganalisis perilaku jembatan berdasarkan respon dinamikanya dalam mengidentifikasi kerusakan dan menentukan lokasi kerusakan pada struktur jembatan. Dari struktur jembatan yang menggunakan skenario perbandingan kondisi antara struktur jembatan normal dan struktur jembatan rusak, indentifikasi lokasi kerusakan berasal dari nilai rata-rata MAPE untuk setiap model ARIMA yang ditentukan pada masing-masing sensor, dimana sesuai skenario kerusakan pada pegas 1 berimbas pada sensor kesatu sampai sensor keempat, dimana sensor kesatu sampai sensor keempat merupakan representasi dari pegas 1 pada struktur jembatan. Dari hasil perhitungan nilai rata-rata dari keempat sensor yang mengalami kerusakan pada pegas 1 didapatkan bahwa penurunan kerusakan dari skenario jembatan rusak beban kosong sebesar 62% dan kerusakan skenario jembatan rusak beban penuh sebesar 60%, kemudian hasil perhitungan nilai rata-rata dari semua sensor untuk skenario jembatan rusak beban kosong sebesar 12% dan skenario jembatan rusak beban penuh sebesar 13%.

Lampiran

Lampiran dapat berupa detail data dan contoh lebih lengkapnya, data-data pendukung, detail hasil pengujian, analisis hasil pengujian, detail hasil survey, surat pernyataan dari tempat studi kasus, screenshot tampilan sistem

Tabel 10 Nilai MSE dan RMSE

Struktur Jembatan Normal																
Sensor	Sensor1		Sensor2		Sensor3		Sensor4		Sensor5		Sensor6		Sensor7		Sensor8	
	MSE	RMSE														
P1	0.003629	0.060245	0.002469	0.049687	0.002044	0.045209	0.002093	0.045746	0.002087	0.045689	0.003629	0.060245	0.00141	0.037544	0.002195	0.046846
P2	0.002178	0.046674	0.002472	0.049716	0.002968	0.054475	0.004616	0.067938	0.003944	0.062797	0.003618	0.06015	0.001409	0.037531	0.00552	0.074366
P3	0.003255	0.057049	0.005316	0.07291	0.003161	0.056227	0.003568	0.059735	0.004378	0.066166	0.003539	0.059492	0.003109	0.055754	0.003678	0.06065
P4	0.003469	0.058898	0.003776	0.061447	0.003478	0.058976	0.004785	0.069176	0.003563	0.059692	0.004032	0.063496	0.00197	0.044381	0.003653	0.060441
P5	0.002111	0.045945	0.004547	0.067431	0.003142	0.056051	0.003747	0.061215	0.003576	0.0598	0.003221	0.056757	0.001873	0.043282	0.003202	0.056594
P6	0.002902	0.053869	0.005204	0.072142	0.002905	0.053901	0.004247	0.065172	0.003205	0.056614	0.003568	0.059731	0.003177	0.05636	0.005103	0.071437
P7	0.00248	0.049796	0.004911	0.070079	0.003317	0.057592	0.005236	0.072361	0.004888	0.069917	0.003601	0.060012	0.002655	0.051531	0.003251	0.057016
P8	0.002558	0.050577	0.00491	0.070074	0.003766	0.061368	0.004046	0.063605	0.005103	0.071435	0.003096	0.055638	0.002484	0.049838	0.003434	0.058601
P9	0.002801	0.052927	0.00275	0.052444	0.003455	0.058775	0.004794	0.069239	0.003576	0.0598	0.007298	0.085429	0.003742	0.061173	0.00393	0.062694
P10	0.002476	0.049757	0.004955	0.070395	0.002751	0.05245	0.004071	0.063804	0.003963	0.062951	0.004186	0.064701	0.001821	0.04267	0.002596	0.050949

Struktur Jembatan Rusak Beban Kosong																
Sensor	Sensor1		Sensor2		Sensor3		Sensor4		Sensor5		Sensor6		Sensor7		Sensor8	
	MSE	RMSE														
P1	0.00373	0.061077	0.004747	0.0689	0.004822	0.069438	0.006394	0.079962	0.00269	0.051863	0.004831	0.069503	0.001734	0.041638	0.002353	0.048511
P2	0.005581	0.074703	0.004761	0.069002	0.004192	0.064747	0.005402	0.0735	0.003614	0.060118	0.003334	0.057742	0.001183	0.043488	0.001924	0.043866
P3	0.006198	0.083176	0.006599	0.081231	0.008644	0.092973	0.009439	0.097154	0.008625	0.060205	0.004534	0.067332	0.001706	0.041298	0.003488	0.059059
P4	0.005406	0.073527	0.004366	0.066079	0.005253	0.072481	0.005646	0.075142	0.003862	0.062143	0.004103	0.064058	0.001692	0.041136	0.002518	0.050175
P5	0.011211	0.105455	0.008691	0.093224	0.005973	0.077284	0.007973	0.089293	0.003605	0.060043	0.003125	0.0559	0.002466	0.049838	0.003434	0.058601
P6	0.005405	0.073515	0.011609	0.107746	0.005476	0.074001	0.006043	0.077739	0.00353	0.059415	0.004752	0.068934	0.002139	0.046253	0.002568	0.05068
P7	0.004678	0.06208	0.005203	0.07213	0.006049	0.077758	0.007548	0.086877	0.003439	0.058647	0.003693	0.060766	0.002737	0.052317	0.003665	0.060543
P8	0.008334	0.09129	0.006117	0.078214	0.005863	0.076571	0.006248	0.079044	0.004129	0.06426	0.005291	0.072737	0.002209	0.047002	0.002878	0.05365
P9	0.005485	0.074062	0.006598	0.081228	0.004468	0.066842	0.004262	0.065284	0.003648	0.0604	0.003338	0.057779	0.001487	0.038556	0.002364	0.048624
P10	0.006671	0.081678	0.008989	0.094811	0.006452	0.080322	0.006642	0.081496	0.002755	0.052486	0.00459	0.067753	0.002462	0.04962	0.002778	0.052703

Struktur Jembatan Rusak Beban Kosong																
Sensor	Sensor1		Sensor2		Sensor3		Sensor4		Sensor5		Sensor6		Sensor7		Sensor8	
	MSE	RMSE														
P1	0.006297	0.079354	0.004581	0.067681	0.006535	0.080836	0.005809	0.076215	0.004486	0.066979	0.004204	0.064838	0.001652	0.040644	0.001935	0.043991
P2	0.008156	0.090313	0.004118	0.064168	0.006697	0.081834	0.014111	0.11879	0.003814	0.061758	0.004436	0.066603	0.002236	0.04729	0.002555	0.050547
P3	0.00632	0.079501	0.003934	0.062724	0.004697	0.068535	0.007198	0.084841	0.004216	0.064932	0.002592	0.050912	0.002599	0.050978	0.002184	0.046735
P4	0.00677	0.06839	0.005313	0.072893	0.005229	0.07231	0.00607	0.077908	0.004702	0.068573	0.004871	0.069796	0.001654	0.040666	0.002135	0.046206
P5	0.005504	0.074188	0.005004	0.07074	0.004676	0.068381	0.007598	0.087167	0.004592	0.067766	0.004381	0.066188	0.001565	0.039556	0.003636	0.060301
P6	0.004203	0.06483	0.004523	0.067253	0.004551	0.067459	0.004526	0.067274	0.004436	0.066602	0.002778	0.052709	0.00203	0.045058	0.002115	0.045985
P7	0.003794	0.061596	0.005313	0.072893	0.004843	0.06959	0.008178	0.090432	0.003751	0.061243	0.004386	0.066225	0.00205	0.045278	0.002373	0.048715
P8	0.003128	0.059227	0.00457	0.067602	0.004343	0.065905	0.006773	0.082296	0.00499	0.070639	0.004863	0.069738	0.002302	0.047981	0.001832	0.0428
P9	0.004316	0.06597	0.006517	0.080726	0.005013	0.0708	0.005661	0.075241	0.004477	0.066911	0.00337	0.050848	0.002379	0.048777	0.001761	0.041964
P10	0.003774	0.061434	0.003854	0.062079	0.005162	0.071848	0.005887	0.076729	0.005051	0.071072	0.002874	0.053611	0.002255	0.047487	0.001829	0.042763

Tabel 11 Nilai MAPE

Struktur Jembatan Normal									Struktur Jembatan Rusak Beban Kosong								
Sensor	Sensor1	Sensor2	Sensor3	Sensor4	Sensor5	Sensor6	Sensor7	Sensor8	Sensor	Sensor1	Sensor2	Sensor3	Sensor4	Sensor5	Sensor6	Sensor7	Sensor8
Nilai	MAPE	Nilai	MAPE														
P1	3.57488	3.346659	3.115107	3.174055	3.175806	3.920915	3.501524	3.115064	P1	5.184403	4.351359	4.590961	5.228246	3.546335	4.274775	3.678061	3.482349
P2	4.210652	3.349201	3.905825	4.478733	4.262721	4.208406	3.509724	3.945347	P2	5.510175	4.384025	4.266813	5.043046	4.119287	3.848824	3.230678	3.288818
P3	4.651272	4.40788	3.703876	3.747402	4.243575	3.856405	4.724755	3.886407	P3	6.632921	4.847324	6.054152	6.829509	3.89347	4.260974	3.83523	4.028561
P4	4.305448	4.144473	3.543503	4.303569	3.513315	3.987417	3.947829	3.545925	P4	4.980094	4.179798	4.436002	4.820746	3.955943	4.016916	3.672339	3.56382
P5	3.958215	4.422267	3.576335	4.306146	3.940659	4.082735	4.019809	3.588255	P5	7.595026	5.880873	4.945372	6.175226	3.868027	3.735461	4.359094	4.21335
P6	4.423887	4.705403	3.685946	4.24931	3.688271	4.056116	4.977364	4.317538	P6	5.390066	6.77043	4.711863	5.329953	3.991625	4.374202	4.365751	3.499453
P7	4.238528	4.440256	3.810162	4.461278	3.893381	3.686286	4.121698	3.713443	P7	5.256541	4.582691	5.140887	6.001082	3.920209	4.235385	4.494534	3.972809
P8	4.320716	4.441323	4.082616	4.292989	4.467159	3.554952	4.416743	3.5694	P8	6.269635	4.903012	4.515888	5.151204	4.03066	4.456553	3.991623	3.720794
P9	4.512407	3.66666	3.500375	4.128722	3.947013	4.38851	5.63	3.885238	P9	5.684651	4.847143	4.308213	4.452169	4.042683	4.086723	3.692332	3.533114
P10	4.212519	4.476526	3.402353	3.834483	3.702085	3.879029	3.93672	3.478637	P10	6.196412	5.434667	4.933245	5.160473	3.430245	4.3725	4.236906	3.734044
Rata-rata	4.240852	4.140065	3.63261	4.097669	3.883399	3.962077	4.278617	3.704525	Rata-rata	5.869992	5.018132	4.79034	5.419165	3.879848	4.166231	3.955655	3.703711

Struktur Jembatan Rusak Beban Penuh								
Sensor	Sensor1	Sensor2	Sensor3	Sensor4	Sensor5	Sensor6	Sensor7	Sensor8
Nilai	MAPE							
P1	6.937693	4.411438	5.777173	5.235495	4.917844	4.391119	3.959597	3.567789
P2	6.592566	4.088383	5.748231	7.601291	4.334083	4.63965	4.562987	3.937126
P3	6.519247	4.299898	4.302881	5.025593	4.462344	3.658986	4.619655	3.598409
P4	5.714089	4.461914	4.569735	5.091973	4.651165	4.990078	3.891372	3.618354
P5	6.157531	4.219902	4.363474	5.261214	4.410119	4.520616	3.752882	4.448992
P6	5.504449	4.201098	4.357332	4.508785	4.490403	3.798498	3.898862	3.594758
P7	5.241155	4.461914	4.422227	5.729695	4.315732	4.449404	3.897378	3.691845
P8	4.619421	4.62882	4.295775	5.428609	4.654698	4.688453	4.345125	3.253086
P9	5.360214	5.166959	4.565741	4.894534	4.789991	4.164769	4.558295	3.159013
P10	5.008911	4.323295	4.823084	5.024495	4.546999	3.846043	4.207901	3.296178
Rata-rata	5.765528	4.426362	4.722565	5.380168	4.557338	4.314762	4.169405	3.616555