

PENEMPATAN SENSOR AKSELEROMETER PADA JEMBATAN MERAH PUTIH

Johan Lautan Wijaya Nusantara^{1,*}, Akhmad Aminullah², Suprpto Siswosukarto²

¹Program Studi D3 Teknik Sipil, Sekolah Vokasi, Universitas Sebelas Maret, 57126, Indonesia

²Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Gadjah Mada, 55284, Indonesia

*Corresponding authors: johan.lautan.w.n@staff.uns.ac.id

Abstrak: Kegiatan *monitoring* pada jembatan perlu dilakukan sebagai upaya dalam menjamin keamanan jembatan. Secara umum terdapat dua metode *monitoring* kesehatan struktur jembatan yaitu dengan melakukan *Loading Test* secara langsung dan melalui *Structural Health Monitoring System* (SHMS) yang dapat dipantau secara *real time* dan kontinu. Salah satu sensor yang penting dan populer dalam kegiatan SHMS adalah akselerometer. Data dari sensor tersebut dapat diproses lebih lanjut untuk mengetahui nilai frekuensi struktur, *mode shape*, dan *displacement* yang terjadi. Hal tersebut bermanfaat dalam pemantauan kesehatan struktur jembatan secara keseluruhan dan dapat dijadikan dasar penetapan kebijakan untuk pemeliharaan jembatan, serta penyusunan tindakan preventif dan kuratif. Penempatan sensor yang baik dengan jumlah sensor yang tepat harus ditentukan untuk mengetahui perilaku struktur yang sebenarnya dengan biaya yang minimal. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi penempatan sensor akselerometer pada dek Jembatan Merah-Putih yang memiliki tipe *double pylon cable stayed* dengan bentang 300 m yang terletak di Kota Ambon, Provinsi Maluku, Indonesia. Empat metode *Optimal Sensor Placement* (OSP) telah dilakukan yaitu dengan *Effective Independence* (EI) Method, *Eigenvalue Component Product* (ECP), *Mode Shape Summation Plot* (MSSP) Method, serta *Effective Independence – Drive Point Residu* (EI-DPR) Method. Dari keempat metode tersebut, didapatkan bahwa penempatan sensor yang paling optimal didapatkan dari metode EI dengan jumlah sensor yang optimal adalah berjumlah 10. Konfigurasi sensor tersebut memiliki performa yang sedikit lebih baik dari konfigurasi sensor eksisting.

Kata kunci: : *Structural Health Monitoring*, *Optimal Sensor Placement*, Akselerometer

PENDAHULUAN

Structural Health Monitoring

Kompleksitas struktur yang ada sekarang semakin tinggi dan menantang dengan pembebanan dinamik, efek cuaca, operasional, dan faktor lingkungan; hal ini membuat kerusakan atau penurunan performa struktur krusial dapat berdampak serius pada ekonomi, *safety*, dan sosial (Wang et al., 2023). Beberapa bencana keruntuhan jembatan mengindikasikan kurangnya perbaikan dan tindakan pencegahan. Ini merupakan aspek serius yang tidak bisa diabaikan, yang bahkan banyak jembatan di dunia yang sudah melampaui umur rencananya (Masciotta et al., 2024).

Sebagai upaya dalam menjamin keamanan jembatan, kegiatan *monitoring* pada jembatan harus dilakukan. *Monitoring* kesehatan struktur jembatan merupakan bagian dari *Structural Health Monitoring System* (SHMS) yang berfokus pada struktur jembatan. Salah satu

yang diharapkan dari SHMS adalah mendapatkan informasi struktural secara maksimal. Semakin banyak sensor yang digunakan, maka informasi struktur yang didapatkan akan semakin detail. Namun demikian, dalam banyak kasus hal tersebut sangat dibatasi oleh tingginya biaya (Lizana & Casas, 2021). Hasil pengecekan kondisi jembatan akibat dari beban berlebih dapat dijadikan sebagai dasar penetapan kebijakan dalam pemeliharaan jembatan (Kader & Budi, 2021).

Secara konvensional, *monitoring* jembatan dapat dilakukan dengan *Loading Test* secara statis dan dinamik. Pengujian ini dilakukan dengan melakukan pembebanan pada titik tengah jembatan dan dilakukan pengukuran dengan *accelerometer*, *load cell*, *tiltmeter*, dan *strain gauge*. Selain itu, *Monitoring* kondisi struktur jembatan juga dapat dilakukan dengan menempatkan sensor pada jembatan yang bisa

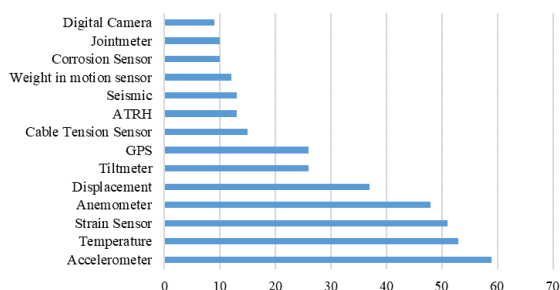
dipantau secara kontinu (J. Li et al., 2015). Pembacaan data dari sensor secara *real-time* dapat digunakan untuk verifikasi numerik, sehingga sistem ini tidak memerlukan observasi langsung (Qowiy et al., 2024).

SHMS menyediakan informasi yang komprehensif dan penting untuk menilai kondisi jembatan secara *real time*. Beberapa yang dapat disediakan oleh SHMS menurut Phares et al. (2020) diantaranya adalah:

1. Mengidentifikasi tegangan maksimum pada girder
2. Identifikasi fatik, regangan berlebih, tingkat pembebanan, dengan tanpa mengganggu layanan jembatan.

Di Indonesia, Sistem Monitoring Kesehatan Struktur (SMKS) pada beberapa jembatan telah terintegrasi menjadi satu kesatuan sistem yang saling berhubungan sesuai dengan kebutuhan pekerjaan SMKS jembatan (Zahdian et al., 2023). Namun demikian, penelitian terkait SHMS di Indonesia masih belum banyak (Kurniawan et al., 2023).

Berdasarkan data 70 jembatan kabel di dunia yang bersumber dari buku dan penelitian Shenton, III et al. (2014), Atharva Kekare1 (2014), Li, H. & Ou (2016), Sayed et al. (2013) Zhou, J. et al. (2017), Zhou, G.-D. & Yi (2013), Ni et al. (2008), serta Xu, Y.-L. & Yong Xia (2012), sudah cukup banyak jembatan penting yang sudah dipasangi sensor yang dirangkum pada Gambar 1. Sensor yang paling banyak digunakan adalah Akselerometer, *Temperature*, *Strain* sensor, Anemometer, *Displacement*, *Tiltmeter*, dan GPS. Dari segi statistik, sensor Akselerometer sangat umum dan merupakan sensor yang paling banyak digunakan dalam *monitoring* jembatan.



Gambar 1. Penggunaan Sensor pada Jembatan

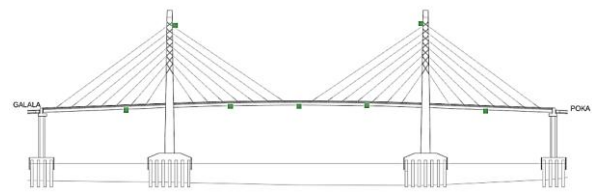
Jembatan Merah Putih

Jembatan Merah-Putih merupakan jembatan dengan tipe *double pylon cable stayed* dengan bentang 300 m yang terletak di Kota

Ambon, Provinsi Maluku, Indonesia. Beberapa sensor telah terpasang dengan jumlah tertentu di jembatan tersebut antara lain adalah Akselerometer, Anemometer Biaksial dan Triaksial, ATRH, sensor *Displacement*, sensor *Electro Magnetic*, *Seismic*, *Strain Transducer*, *Temperature*, dan *Tiltmeter*. Sensor-sensor tersebut membantu pemilik jembatan dalam melakukan *monitoring* jembatan secara aktual yang dapat diakses secara daring dari mana saja. Dengan demikian, kondisi jembatan dapat selalu dipastikan aman, dan dapat dilakukan tindakan preventif dan kuratif bila memang ada kejanggalaan pada perilaku jembatan.

Penempatan Sensor

Monitoring kesehatan struktur yang efektif sangat ditentukan dengan penempatan sensor yang tepat dengan jumlah sensor yang optimal. Penempatan sensor yang baik dengan jumlah sensor yang tepat harus ditentukan untuk mengetahui perilaku struktur yang sebenarnya dengan biaya yang minimal. Analisis dinamik jembatan secara umum dilakukan dengan salah satunya menggunakan sensor akselerometer. Menurut Neves (2020), mayoritas SHMS berfokus pada pengukuran percepatan dan regangan sehingga dua hal tersebut menjadi sumber data utama dalam *monitoring* kesehatan struktur. Data akselerometer dapat dimanfaatkan untuk mengestimasi *displacement* jembatan dengan akurasi yang baik (Umekawa & Sukanuma, 2018). Selain itu, data akselerometer dapat digunakan untuk mengetahui frekuensi jembatan aktual melalui analisis Fast Fourier Transfer (Hapsari et al., 2021), serta untuk mendapatkan *mode shape* dari getaran tersebut (Dinesh et al., 2018). Penempatan sensor akselerometer yang telah terpasang pada Jembatan Merah Putih dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Penempatan akselerometer di Jembatan Merah-Putih

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi penempatan sensor akselerometer pada dek Jembatan Merah-Putih. Penempatan sensor yang optimal diharapkan dapat

memberikan respons struktur yang baik dengan jumlah sensor yang minimal. Penentuan jumlah dan penempatan sensor sangat berdampak pada jumlah dan kualitas data yang didapatkan, yang juga berdampak secara signifikan pada aspek finansial (Wang et al., 2023).

METODE PENELITIAN

Optimal Sensor Placement (OSP)

Terdapat cukup banyak teori tentang teknik OSP. Teknik tersebut memiliki peran yang signifikan dalam pemilihan konfigurasi sensor sehingga diperlukan teknik yang tepat dan efektif agar didapatkan konfigurasi yang optimal. Melalui teknik iterasi, setiap kandidat penempatan sensor dievaluasi kontribusinya sehingga kandidat yang memiliki kontribusi terkecil dieliminasi hingga jumlah sensor yang dikehendaki tercapai (Tong et al., 2014). Penempatan sensor yang simetris pada dua sisi jembatan dapat memungkinkan pengambilan data yang lebih representatif terhadap getaran dari berbagai sumber beban pada jembatan (Ramadhani, 2023).

1. Effective Independence (EI) Method

Metode EI dikembangkan untuk memaksimalkan kekuatan sinyal dari jumlah target *mode shape* yang hendak dianalisis. Metode EI merupakan metode iteratif yang memaksimalkan *Fisher Information Matrix* (FIM) sebagai kriteria (Jiang et al., 2017). Penelitian Zhang et al. (2022) membuktikan bahwa metode ini dapat menunjukkan performa terbaik dalam penentuan lokasi sensor yang optimal.

$$[A]_{M \times M} = [\Phi]_{M \times N}^T [\Phi]_{N \times M} = \sum_{i=1}^N ([\Phi]_i^T [\Phi]_i) \quad (1)$$

Eigensolution dari matriks A dapat ditentukan dengan rumus:

$$([A] - [\lambda]_i [I]) [\psi]_i = 0 \quad (2)$$

Penempatan sensor yang paling optimal diperoleh apabila nilai determinan A mencapai nilai maksimumnya. Semua titik dievaluasi sebagai kandidat posisi sensor dengan titik yang memiliki kontribusi terkecil dieliminasi hingga mencapai jumlah sensor rencana (Lee & Eun, 2022). Proses tersebut dilakukan dengan coba-coba dan mengeliminasi posisi sensor. Dalam mencapai nilai maksimum, *Effective*

Independence Distribution (EI_D) dievaluasi pada setiap kandidat penempatan sensor.

$$EI_D = (\Phi \psi)^2 \lambda^{-1} \{1\}_k \quad (3)$$

keterangan:

N : Target *Degree of Freedom* (DOF)

M : Jumlah *Mode Shape* yang ditinjau dalam analisis

Φ : *Vibration vector* pada *mode shape*

$[\Phi]_i$: $[\Phi_{i1}, \Phi_{i2}, \Phi_{i3}, \dots, \Phi_{im}]$

λ_i : *Eigenvalue* matriks A pada DOF ke i

ψ_i : *Eigenvector* matriks A pada DOF ke i

$\{1\}_k$: jumlah semua koefisien pada baris k

EI_D : faktor EI

2. Eigenvalue Component Product (ECP)

Metode ini merupakan suatu teknik yang berbasis pada energi dengan mengevaluasi vektor ECP. Metode ECP menghitung produk absolut dari setiap basis vektor. Posisi sensor dengan nilai indeks ECP terbesar dipilih sebagai kandidat posisi sensor sehingga dapat memaksimalkan energi getarannya.

$$ECP_i = \prod_{k=i}^M |\Phi_{ik}| \quad (4)$$

keterangan:

I : DOF yang ditinjau

k : *Mode shape* yang ditinjau

ECP_i : Indeks ECP pada DOF ke i

3. Mode Shape Summation Plot (MSSP) Method

Metode MSSP merupakan pengembangan dari metode ECP. Matriks MSSP dihitung berdasarkan penjumlahan *vibration vector* pada setiap baris (DOF). Kandidat posisi sensor dipilih berdasarkan nilai indeks MSSP yang terbesar. MSSP bertujuan untuk meningkatkan rasio sinyal dan *noise* pada data yang terkoleksi dengan menghitung jumlah variabel pada baris vektor dari matriks modal untuk mengevaluasi performa penempatan sensor (Wang et al., 2023).

$$MSSP_i = \sum_{k=1}^M |\Phi_{ik}| \quad (5)$$

keterangan:

i : DOF yang ditinjau

k : *Mode shape* yang ditinjau

$MSSP_i$: Indeks MSSP pada DOF ke i

4. *Effective Independence – Drive Point Residu (EI-DPR) Method*

Metode EI-DPR merupakan gabungan dari metode EI dan DPR. Metode ini menggunakan faktor pemberat berupa koefisien DPR untuk berfokus pada posisi sensor dengan konten energi yang besar. Semakin besar nilainya, maka respon struktur yang dihasilkan semakin besar, yang mengindikasikan pada tingginya rasio sinyal dan *noise*. Metode ini mengatasi kecenderungan pada metode EI yang memilih titik kandidat pada intensitas getaran yang rendah (Wang et al., 2023). Koefisien DPR dirumuskan sebagai berikut:

$$DPR_i = \sum_{k=1}^M \frac{\Phi_{ik}^2}{\omega_k} \quad (6)$$

sehingga mengubah faktor EI_D menjadi:

$$EI_D = (\Phi \psi)^2 \lambda^{-1} \{1\}_i DPR_i \quad (7)$$

keterangan:

ω_k : frekuensi pada *mode shape* ke k

DPR_i : koefisien DPR pada DOF ke i

Efektivitas OSP

Salah satu tujuan optimasi penempatan sensor adalah meminimalkan penggunaan sensor dengan kualitas hasil yang baik. Jumlah sensor dan penempatan yang optimal secara simultan dapat mengurangi biaya manajemen sensor dengan akurasi estimasi pada parameter modal struktur yang cukup baik. Beberapa metode penilaian efektivitas OSP adalah sebagai berikut:

1. Interpolasi Spline

Kurva spline Kubik adalah kurva yang dihasilkan dengan polinomial derajat tiga oleh beberapa titik-titik acuan secara fleksibel untuk menghasilkan kurva yang *smooth*. Hasil penempatan sensor dari beberapa teknik OSP dievaluasi dengan menggambarkan kurva spline dengan ordinat *mode shape* pada posisi sensor hasil sebagai titik-titik kontrolnya.

Mean Square Error (MSE) adalah suatu metode yang dapat digunakan untuk menilai tingkat akurasi dalam suatu model peramalan. MSE dalam hal ini digunakan untuk mengukur efektivitas setiap teknik OSP dengan membandingkan hasil

interpolasi spline yang terbentuk dari nilai-nilai yang terukur oleh lokasi terpilih dengan hasil dari *Finite Element Model* (FEM). Analisis MSE dapat mengidentifikasi derajat kebebasan yang dapat membaca respons dinamik struktur dengan baik (Mghazli et al., 2023). Selain efektivitas, metode ini juga dapat digunakan sebagai pertimbangan penentuan jumlah sensor optimal. MSE diukur dengan menghitung rata-rata dari nilai kuadrat erornya. Nilai ini dapat digunakan dalam mengevaluasi penempatan sensor dimana perbedaan nilai respons pada titik-titik yang tidak diukur diharapkan memiliki nilai yang kecil (Chai et al., 2022).

$$MSE = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} \frac{\sum_{k=1}^M (\Phi_{ik}^{SI} - \Phi_{ik}^{FEM})^2}{M} \quad (8)$$

keterangan:

i : DOF yang ditinjau

k : *Mode shape* yang ditinjau

N : Target *Degree of Freedom* (DOF)

M : Jumlah *Mode Shape* yang ditinjau dalam analisis

Φ^{SI} : Hasil *vector vibration* dengan *Spline Interpolation*

Φ^{FEM} : Hasil *vector vibration* dengan *Finite Element Model*

σ_i : Standar deviasi pada DOF ke i

2. *Modal Assurance Criterion* (MAC)

MAC dihitung berdasarkan perbandingan interpolasi vektor *mode shape* dengan yang sebenarnya. MAC direpresentasikan dalam bentuk matriks. Pada diagonal elemen diharapkan untuk bernilai dekat dengan 1, sedangkan elemen non-diagonal diharapkan untuk bernilai dekat dengan nol (Lizana & Casas, 2021).

$$MAC_i = \frac{|\tilde{\varphi}^T \bar{\varphi}|}{\sqrt{(\bar{\varphi}^T \bar{\varphi})(\tilde{\varphi}^T \tilde{\varphi})}} \quad (9)$$

keterangan:

i : 1, 2, 3, ..., N

N : Target *Degree of Freedom* (DOF)

$\tilde{\varphi}$: Vektor *mode shape* yang sebenarnya

$\bar{\varphi}$: Vektor *mode shape* hasil interpolasi

Akurasi penentuan jumlah sensor didasarkan pada nilai eror MAC (eMAC) yang dirumuskan :

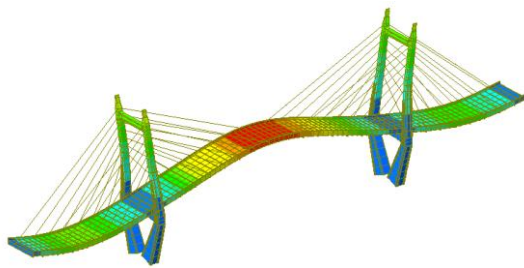
$$\varepsilon_{MACi} = 1 - \min(MAC_i) \quad (10)$$

3. Fisher Information Matrix (FIM)

Kekuatan sinyal dari hasil konfigurasi sensor harus menghasilkan nilai yang setinggi mungkin. Determinan FIM dihitung selama pemilihan lokasi sensor agar setiap teknik dapat dievaluasi untuk setiap jumlah sensor tertentu. Metode ini dapat menggambarkan perbandingan karakter dinamik struktur pada setiap jumlah sensor dengan kekuatan sinyalnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemodelan *finite element* Jembatan Merah-Putih telah dilakukan dengan Midas Civil 2011 Trial Edition. Model tersebut telah divalidasi dengan membandingkannya dengan laporan *Load Test* Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat tahun 2016. Hasil pemodelan pada Mode 1 ditampilkan pada Gambar 3.



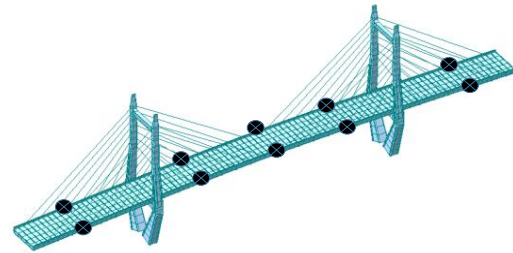
Gambar 3. Hasil Pemodelan Mode 1

Optimal Sensor Placement (OSP)

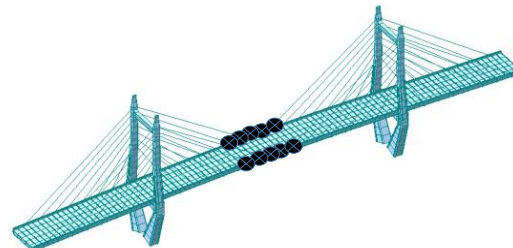
Analisis OSP dilakukan dengan menggunakan empat metode yaitu EI, ECP, MSSP, dan EI-DPR. Lokasi sensor yang menjadi kandidat adalah bagian dek pada kedua sisi jembatan yang merupakan sambungan dengan diafragma. Kandidat lokasi sensor berjarak setiap tiga meter sehingga untuk bentang 300 m maka didapatkan kandidat lokasi sensor sebanyak 202 titik. Setelah itu dilakukan iterasi dan seleksi pada setiap *node* hingga semua kandidat *node* habis terseleksi. Berdasarkan hasil analisis dengan keempat metode, didapatkan 10 lokasi terbaik pada masing-masing metode yang disajikan pada Gambar 4, Gambar 5, Gambar 6, dan Gambar 7.

Hasil konfigurasi sensor metode ECP dan MSSP terpusat di tengah bentang sehingga kurang baik dalam membaca karakteristik dinamik struktur secara keseluruhan. Sedangkan pada konfigurasi sensor hasil metode EI dan EI-

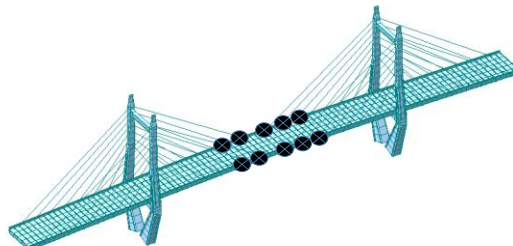
DPR memiliki persebaran yang cukup baik di sepanjang dek jembatan.



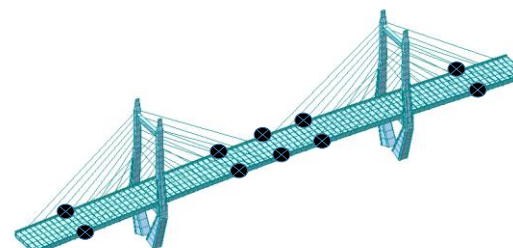
Gambar 4. Konfigurasi Sensor Berdasarkan Metode EI



Gambar 5. Konfigurasi Sensor Berdasarkan Metode ECP



Gambar 6. Konfigurasi Sensor Berdasarkan Metode MSSP



Gambar 7. Konfigurasi Sensor Berdasarkan Metode EI-DPR

Evaluasi Hasil OSP

Evaluasi hasil OSP yang dilakukan dibatasi pada pergerakan vertikal saja, sehingga *mode shape* arah vertikal diseleksi untuk selanjutnya dievaluasi lebih lanjut berdasarkan beberapa parameter di bawah ini:

1. *Mean Square Error (MSE)*

MSE dapat menilai seberapa baik hasil prediksi mode dengan jumlah sensor dan konfigurasi terhadap hasil sebenarnya. Berdasarkan hasil analisis, didapatkan bahwa metode EI, dan EI-DPR memiliki nilai yang lebih kecil, disusul dengan metode MSSP, dan ECP. Hal tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi sensor yang dihasilkan oleh metode EI mempunyai performa yang lebih baik dibandingkan dengan metode yang lain.

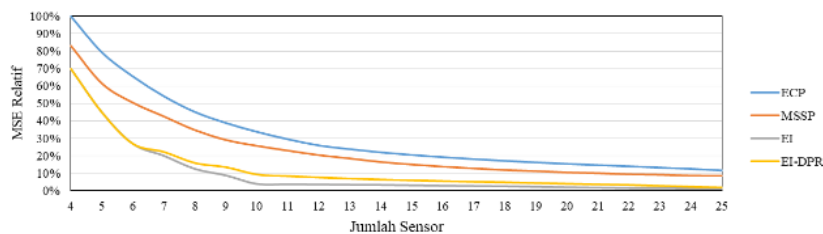
Pada grafik metode EI, terlihat bahwa peningkatan jumlah sensor setelah 10 sensor tidak menunjukkan penurunan nilai eror yang berarti. Hal tersebut mengindikasikan bahwa jumlah sensor optimal untuk jembatan Merah-Putih adalah sebanyak 10 sensor dengan konfigurasi mengikuti teknik EI.

Berdasarkan analisis eMAC yang telah dilakukan, didapatkan bahwa metode EI memiliki performa yang lebih baik, disusul oleh metode EI-DPR, ECP, dan MSSP. Selain itu, jumlah sensor lebih dari 10 pada metode EI tidak menunjukkan pengurangan eror yang cukup berarti. Hal tersebut mengindikasikan bahwa jumlah sensor 10 merupakan jumlah yang optimal dengan menggunakan konfigurasi sensor hasil teknik EI.

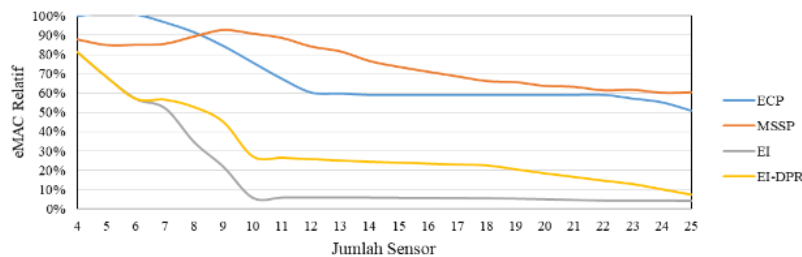
3. FIM

Nilai determinan matriks FIM yang semakin tinggi menunjukkan performa dari setiap metode. Grafik perbandingan yang didapatkan dari hasil analisis menunjukkan bahwa metode EI memiliki performa yang lebih baik, disusul oleh metode EI-DPR, ECP, dan MSSP.

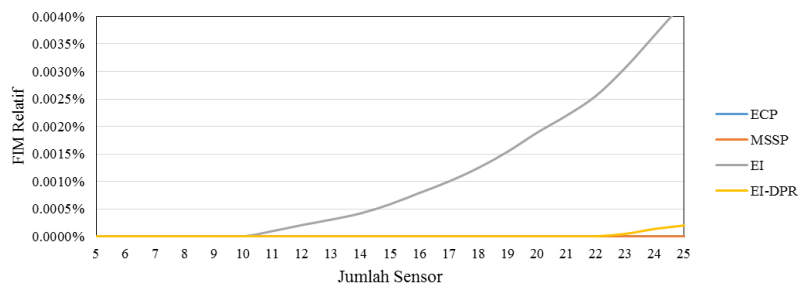
2. *Modal Assurance Criterion Error (eMAC)*



Gambar 8. Evaluasi MSE



Gambar 9. Evaluasi eMAC

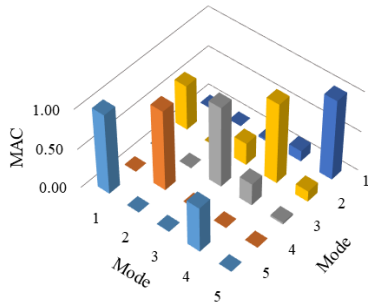


Gambar 10. Evaluasi FIM

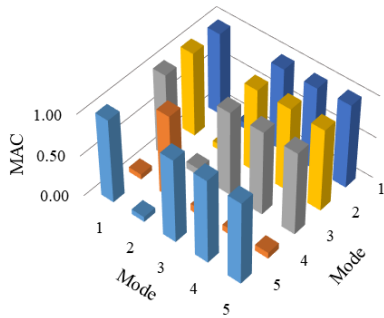
4. *Matriks Modal Assurance Criterion (MAC)*

MAC dihitung berdasarkan data pemodelan dan hasil prediksi dari masing-

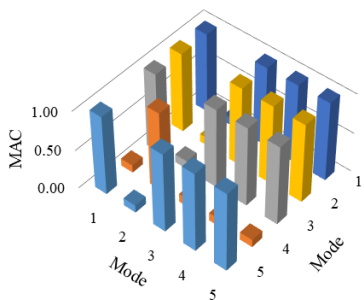
masing teknik OSP. MAC menggunakan ortogonalitas properti dari *mode shape* untuk membandingkan dua mode pada hasil data yang sama ataupun berbeda. Berdasarkan hasil analisis, didapatkan bahwa metode yang memiliki matriks dengan kecenderungan ortogonalitas yang lebih baik adalah metode EI. Hal tersebut menunjukkan bahwa data pemodelan dan hasil prediksi memiliki hubungan yang baik.



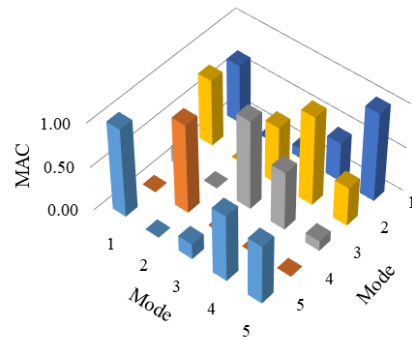
Gambar 11. Matriks MAC EI



Gambar 12. Matriks MAC ECP



Gambar 13. Matriks MAC MSSP



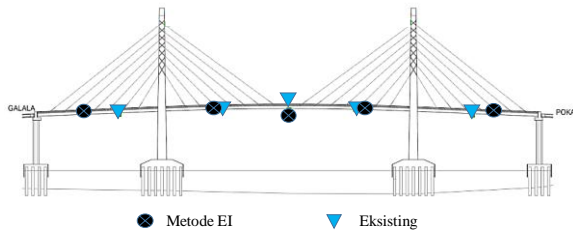
Gambar 14. Matriks MAC EI-DPR

Hasil konfigurasi sensor metode ECP dan MSSP terpusat di tengah bentang sehingga kurang baik dalam membaca karakteristik dinamik struktur secara keseluruhan. Hal tersebut juga didukung dengan hasil FIM, MSE, eMAC, dan MAC yang kurang baik. Sedangkan pada konfigurasi sensor hasil metode EI dan EI-DPR memiliki persebaran yang cukup baik di sepanjang dek jembatan. Hasil FIM, MSE, eMAC, dan MAC juga memberikan hasil yang baik pada kedua metode tersebut. Namun dalam ke semua parameter tersebut, metode EI memberikan performa yang terbaik dibandingkan dengan tiga metode lainnya.

Berdasarkan empat metode OSP yang telah dilakukan di atas, maka ditentukan bahwa jumlah sensor optimal untuk Jembatan Merah-Putih adalah sebanyak 10 sensor dengan konfigurasi mengikuti teknik EI yaitu pada 0,1L; 0,34L; 0,5L; 0,66L; dan 0,9L di setiap sisi jembatan.

Evaluasi Kondisi Eksisting

Jembatan Merah-Putih telah terpasang 10 sensor akselerometer pada sepanjang dek jembatan. Jumlah sensor 10 merupakan jumlah optimal yang harus dipasang, sehingga jumlah sensor yang terpasang pada jembatan Merah-Putih sudah sesuai. Namun konfigurasi sensor yang terpasang sedikit berbeda dengan hasil konfigurasi sensor dengan metode EI. Perbedaan penempatan sensor dapat dilihat di Gambar 15 dan Tabel 1.

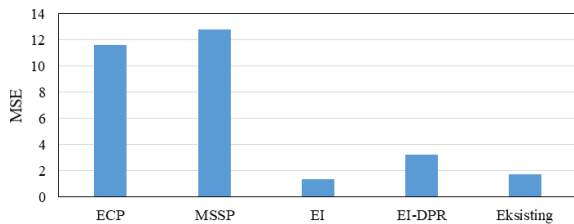


Gambar 15. Perbandingan Konfigurasi Sensor dengan Metode EI dan Kondisi Eksisting

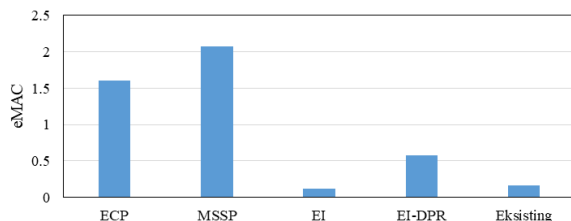
Tabel 1. Posisi Sensor Akselerometer hasil Metode EI dan Kondisi Eksisting

Sensor	STA (m)		Jarak (m)
	Metode EI	Kondisi Eksisting	
1 dan 2	30	48	18
3 dan 4	102	111	9
5 dan 6	150	150	0
7 dan 8	198	198	0
9 dan 10	270	267	3

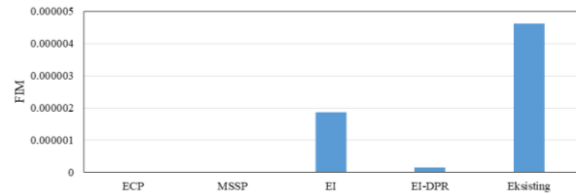
Konfigurasi sensor akselerometer yang telah terpasang telah dievaluasi dengan konfigurasi 10 sensor yang didapatkan sebelumnya pada metode ECP, MSSP, EI, dan EI-DPR dengan membandingkan nilai MSE, eMAC, dan FIM. Berdasarkan hasil analisis tersebut, didapatkan bahwa berdasarkan nilai MSE dan eMAC, konfigurasi sensor terbaik didapatkan pada konfigurasi dengan metode EI. Sedangkan berdasarkan nilai determinan matriks FIM, konfigurasi terbaik didapatkan pada konfigurasi eksisting.



Gambar 16. Perbandingan MSE

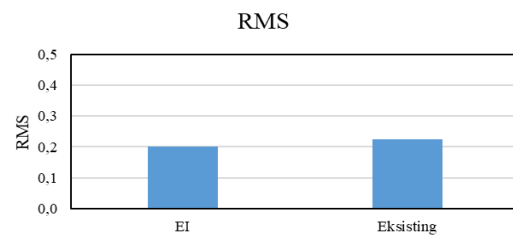


Gambar 17. Perbandingan eMAC

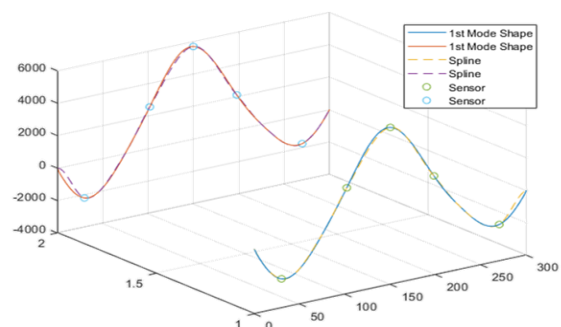


Gambar 18. Perbandingan FIM

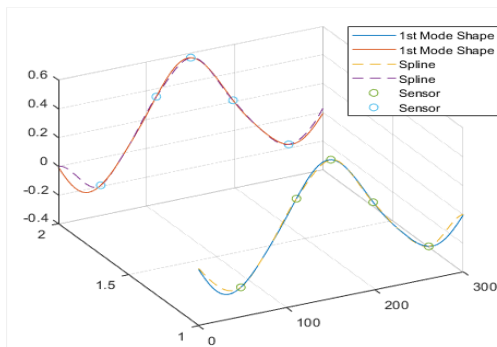
Berdasarkan hasil analisis evaluasi kelima konfigurasi sensor di atas, didapatkan bahwa konfigurasi sensor terbaik didapatkan pada konfigurasi metode EI dan eksisting. Setelah itu dilakukan perbandingan interpolasi Spline dan *Root Mean Square* (RMS). Hasil interpolasi Spline yang mendekati perilaku struktur serta nilai RMS yang kecil menunjukkan hubungan yang cukup baik karakter dinamik struktur hasil analisis dengan prediksi sensor. Berdasarkan hasil analisis tersebut, didapatkan bahwa interpolasi pada metode EI menunjukkan pola yang sedikit lebih baik dengan nilai RMS yang lebih kecil. Hal tersebut mengindikasikan bahwa konfigurasi sensor pada metode EI memiliki performa yang sedikit lebih baik dalam menggambarkan perilaku struktur jembatan secara keseluruhan.



Gambar 19. Perbandingan RMS



Gambar 20. Interpolasi Spline pada Konfigurasi Metode EI



Gambar 21. Interpolasi Spline pada Kondisi Eksisting

KESIMPULAN

Dari hasil analisis yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Metode EI memiliki performa yang lebih baik dalam menentukan posisi sensor berdasarkan hasil evaluasi MSE, eMAC, FIM, dan Matriks MAC.
2. Jumlah sensor akselerometer yang optimal pada jembatan Merah-Putih adalah 10 buah.
3. Penempatan sensor akselerometer yang paling optimal didapatkan dengan metode EI dengan penempatan sensor pada 1L; 0,34L; 0,5L; 0,66L; dan 0,9L pada setiap sisi jembatan.
4. Jumlah sensor akselerometer pada kondisi eksisting sudah optimal, namun performa konfigurasi penempatannya sedikit lebih rendah bila dibandingkan dengan konfigurasi hasil dari metode EI.

DAFTAR PUSTAKA

- Atharva Kekare1. (2014). Bridge Health Monitoring System. *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE)*, 9(3), 08–14.
- Chai, W., Yang, Y., Yu, H., Yang, F., & Yang, Z. (2022). Optimal Sensor Placement of Bridge Structure Based on Sensitivity-effective Independence Method. *IET Circuits, Devices and Systems*, 125–135. <https://doi.org/10.1049/cds2.12078>
- Dinesh, P. B., Lakshmi, T. J. N., & Kishoreraja, P. C. (2018). Monitoring of Strength of a Bridge Using Accelerometer. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 119, 1503–1511. <http://www.acadpubl.eu/hub/>
- Hapsari, A. A., Supriyanto, E., Hasan, A., & Suharjono, A. (2021). Accelerometer Sensor Data Analysis of Bridge Structural Health Monitoring System. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1108(1), 012026. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1108/1/012026>
- Jiang, Y., Li, D., & Song, G. (2017). On the Physical Significance of the Effective Independence Method for Sensor Placement. *12th International Conference on Damage Assessment of Structures*, 842(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/842/1/012030>
- Kader, K. D. A., & Budi, A. S. (2021). Sistem Monitoring Struktur Jembatan dengan Metode Real Time Operating System (RTOS). *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer*, 5(2), 566–571. <http://j-ptiik.ub.ac.id>
- Kurniawan, R., Susanti, B., & Hanafiah. (2023, October). *Kajian Literatur Pemeliharaan Jemnabtan yang Menggunakan Metode SHMS*.
- Lee, E. T., & Eun, H. C. (2022). Optimal Sensor Placement in Reduced-Order Models Using Modal Constraint Conditions. *Sensors*, 22(2). <https://doi.org/10.3390/s22020589>
- Li, H., & Ou, J. (2016). The state of the art in structural health monitoring of cable-stayed bridges. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6, 43–67. <https://doi.org/10.1007/s13349-015-0115-x>
- Li, J., Zhang, X., Xing, J., Wang, P., Yang, Q., & He, C. (2015). Optimal Sensor Placement for Long-span Cable-stayed Bridge Using a Novel Particle Swarm Optimization Algorithm. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 5(5), 677–685. <https://doi.org/10.1007/s13349-015-0145-4>
- Lizana, M., & Casas, J. R. (2021). *Optimal Sensor Placement Methods and Criteria in Dynamic Testing-Comparison and Implementation on a Pedestrian Bridge*.
- Masciotta, M. G., Barontini, A., Pellegrini, D., Brando, G., & Lourenço, P. B. (2024). Optimal Sensor Placement for Bridge Structural Health Monitoring: Integration of Physics-Based Models with Data-driven Approaches. *Procedia Structural Integrity*, 62, 932–939.

- <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.09.125>
- Mghazli, M. O., Zoubir, Z., Nait-Taour, A., Cherif, S., Lamdouar, N., & El Mankibi, M. (2023). Optimal Sensor Placement Methodology of Triaxial Accelerometers Using Combined Metaheuristic Algorithms for Structural Health Monitoring Applications. *Structures*, *51*, 1959–1971.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.093>
- Neves, C. (2020). *Structural Health Monitoring of Bridge*. KTH Royal Institute of Technology.
- Ni, Y. Q., Zhou, H. F., Chan, K. C., & Ko, J. M. (2008). Modal flexibility analysis of cable-stayed Ting Kau bridge for damage identification. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, *23*, 223–236.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2008.00521.x>
- Phares, B., Jayathilaka, S., Deng, Y. J., Greimann, L., & Wipf, T. (2020). *Development of a Structural Health Monitoring System to Evaluate Structural Capacity and Estimate Remaining Service Life for Bridges*. <https://intrans.iastate.edu/>
- Qowiy, O. A., Aspar, W. A. N., Susanto, H., Fiantika, T., Suwarjono, Muharam, A., Setiawan, F. D., & Burhanuddin, R. (2024). Online Real-Time Monitoring System of a Structural Steel Railway Bridge Using Wireless Smart Sensors. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, *14*(2).
- Ramadhani, S. (2023). Optimasi Penempatan Sensor Akselerometer dengan Metode Effective Independence. *Jurnal Jalan-Jembatan*, *40*, 123–135.
- Sayed, M., Kaloop, M., & Kim, D. K. (2013). *Damage Detection of Cable-stayed Bridge using Combined GPS and Accelerometer Observations*.
<https://www.researchgate.net/publication/261031775>
- Shenton, III, H. W., Chajes, M. J., Wenczel, G., Ramanna, N., Al-Khateeb, H., Davidson, K., & Marquez, P. (2014). Structural Health Monitoring of Delaware's Indian River Inlet Bridge: Year One Update. *Structures Congress 2014*.
<https://doi.org/10.1061/9780784413357.032>
- Tong, K. H., Bakhary, N., Kueh, A. B. H., & Yassin, A. Y. M. (2014). Optimal sensor placement for mode shapes using improved simulated annealing. *Smart Structures and Systems*, *13*(3), 389–406.
<https://doi.org/10.12989/sss.2014.13.3.389>
- Umekawa, Y., & Suganuma, H. (2018, September). *Bridge Displacement Monitoring using Acceleration Measurement and Development of Efficient Bridge Management System*.
- Wang, Y., Chen, Y., Yao, Y., & Ou, J. (2023). Advancements in Optimal Sensor Placement for Enhanced Structural Health Monitoring: Current Insights and Future Prospects. *Buildings*, *13*(12).
<https://doi.org/10.3390/buildings13123129>
- Xu, Y.-L., & Yong Xia. (2012). *Structural Health Monitoring of Long-Span Suspension Bridges*. Spon Press.
- Zahdian, Moch. H. A., Herbudiman, B., & Wardana, P. K. (2023). Structural Health Monitoring System (SHMS) pada Jembatan Fisabilillah Batam. In *FTSP Series*.
- Zhang, Y., Chai, S., An, C., Lim, F., & Duan, M. (2022). A New Method for Optimal Sensor Placement Considering Multiple Factors and Its Application to Deepwater Riser Monitoring Systems. *Ocean Engineering*, *244*.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110403>
- Zhou, G.-D., & Yi, T.-H. (2013). Recent Developments on Wireless Sensor Networks Technology for Bridge Health Monitoring. *Mathematical Problems in Engineering*, *2013*.
<https://doi.org/10.1155/2013/947867>
- Zhou, J., Li, X., Xia, R., Yang, J., & Zhang, H. (2017). Health monitoring and evaluation of long-span bridges based on sensing and data analysis: A survey. *Sensors (Switzerland)*, *17*.
<https://doi.org/10.3390/s17030603>