

OPTIMISASI PENEMPATAN SENSOR AKSELEROMETER DENGAN METODE *EFFECTIVE INDEPENDENCE* (OPTIMIZATION OF ACCELEROMETER SENSOR CONFIGURATION USING *EFFECTIVE INDEPENDENCE METHOD*)

Sofyan Ramadhani^{1),*)}

¹⁾ Direktorat Pembangunan Jembatan, Kementerian PUPR, Bandung, Indonesia

^{*)} e-mail: sofyan.ramadhani@pu.go.id

Diterima: 23 November 2023 ; direvisi: 11 Desember 2023; disetujui: 18 Desember 2023.

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan penempatan sensor accelerometer yang optimal melalui penggunaan metode *Effective Independence (EFI)*. Jembatan Pulau Balang digunakan sebagai lokasi studi. Dalam penelitian ini, metode *EFI* digunakan untuk mengoptimalkan lokasi sensor accelerometer dengan mempertimbangkan berbagai target mode shape. Metode *EFI* memberikan alternatif penempatan sensor yang optimal dengan jumlah sensor yang sesuai dengan jumlah target mode shape yang digunakan dalam analisis. Namun, penempatan sensor dapat menghasilkan penempatan yang tidak simetris yang dapat menyebabkan ketidakmampuan sensor yang berada di satu sisi jembatan untuk mendeteksi getaran dari sumber beban di sisi lainnya. Untuk mengatasi hal ini, dalam studi ini dilakukan penempatan sensor secara simetris melalui proses pencerminan (*mirroring*). Penelitian ini menghasilkan lima alternatif penempatan sensor yang memberikan fleksibilitas bagi pemilik jembatan dalam memilih konfigurasi yang sesuai dengan anggaran yang tersedia. Hasil penelitian ini dapat menjadi acuan bagi pemilik jembatan untuk memantau kesehatan struktural jembatan secara akurat dengan konfigurasi sensor yang optimal. Dengan adanya informasi ini, pemilik jembatan dapat membuat keputusan yang lebih efektif dan efisien dalam implementasi Sistem Monitoring Kesehatan Struktur sehingga meningkatkan keselamatan dan keandalan jembatan tersebut.

Kata Kunci: akselerometer, penempatan sensor optimal, metode *effective independence*, mode shape, sistem monitoring kesehatan struktur

ABSTRACT

This research aims to determine the optimal placement of the accelerometer sensor using the *Effective Independence (EFI)* method. The Balang Island Bridge was used as a study location. In this research, the *EFI* method is used to optimize the site of the accelerometer sensor by considering various target mode shapes. The *EFI* method provides alternative optimal sensor placement with the number of sensors corresponding to the number of target mode shapes used in the analysis. However, sensor placement can result in an asymmetrical arrangement, which can result in the inability of sensors on one side of the bridge to detect vibrations from load sources on the other side. In this study, the sensors were placed symmetrically through a *mirroring* process to overcome this. This research produces five alternative sensor placements that provide flexibility for bridge owners in choosing a configuration that suits the available budget. The results of this research can be a reference for bridge owners to monitor the structural health of bridges accurately with optimal sensor configurations. With this information, bridge owners can make more effective and efficient decisions in implementing the Structural Health Monitoring System, thereby increasing the safety and reliability of the bridge.

Key words: accelerometer, optimal sensor placement, *Effective Independence* method, mode shapes, structural health monitoring system

PENDAHULUAN

Struktur jembatan selama masa layan terekspos dengan berbagai kondisi lingkungan dan beban operasional, termasuk kombinasi dari radiasi sinar matahari, perubahan temperatur, gaya angin, gempa, fatigue, korosi, penurunan tanah atau beban layan (Górski, Napieraj, and Konopka 2020). Seiring berjalannya waktu, kondisi lingkungan dan operasional ini akan mengurangi kekuatan material jembatan, yang berdampak pada penurunan kekakuan dan daya dukung jembatan yang telah beroperasi selama bertahun-tahun. Deteriorasi yang terjadi pada struktur dapat menyebabkan terjadinya penurunan kenyamanan (*serviceability*) dan keamanan (*safety*) pengguna jembatan. Apabila tidak dimonitor secara berkala dan tidak dilakukan tindakan pemeliharaan, deteorisasi dapat menjadi penyebab terjadinya keruntuhan jembatan yang mengakibatkan korban jiwa, hilangnya investasi infrastruktur, serta terganggunya kegiatan sosial-ekonomi masyarakat. Potensi kegagalan jembatan dapat menyebabkan dampak serius dan menghancurkan, baik dalam hal korban manusia maupun kerugian ekonomi (Shokravi et al. 2020).

Untuk menjamin keselamatan dan keandalan struktur jembatan, penilaian kondisi struktur dan tindakan pemeliharaan selama masa layan struktur diperlukan. Penilaian sesuai dengan pedoman No. 01/P/BM/2022 tentang Pedoman Pemeriksaan Jembatan (pembaharuan dari Pedoman Pemeriksaan Jembatan No.005-01/P/BM/2011) dilakukan oleh Inspektur Jembatan secara visual melalui pemeriksaan inventarisasi pada saat jembatan selesai dibangun, pemeriksaan rutin setiap tahun, pemeriksaan detail lima tahun sekali, dan pemeriksaan khusus apabila diperlukan (Direktorat Jenderal Bina Marga 2022). Sistem Monitoring Kesehatan Struktur (SMKS) berbasis sensor menjadi alat pelengkap bagi metode evaluasi nondestruktif tradisional seperti inspeksi visual. Sistem ini memungkinkan pemantauan kondisi struktur secara *real time* dan memberikan data berharga untuk tujuan identifikasi kondisi struktural jangka panjang (Zhu et al. 2019).

SMKS di Indonesia telah diatur pada beberapa peraturan, yaitu SE Menteri PUPR No 24/SE/M/2015 tentang Pedoman Perencanaan Sistem Monitoring Kesehatan Struktur Jembatan (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat 2015), Skh-1.7.42 terkait Spesifikasi Khusus Interim Sistem Monitoring Kesehatan Struktur (MKS) Jembatan (Direktorat Jenderal Bina Marga 2020), dan pedoman No. 01/P/BM/2022 tentang Pedoman Pemeriksaan Jembatan (Direktorat Jenderal Bina Marga 2022). Pada peraturan tersebut telah diatur mengenai konsep perencanaan sistem sensor, sistem komunikasi, sistem pengolahan dan penyimpanan data, spesifikasi sensor dan alat-alat yang digunakan dalam SMKS, serta pemeriksaan kelengkapan dan fungsi SMKS. Namun, belum ada peraturan terkait panduan penetapan lokasi sensor, jenis dan jumlah sensor optimal, serta panduan pemeliharaan berdasarkan kinerja SMKS.

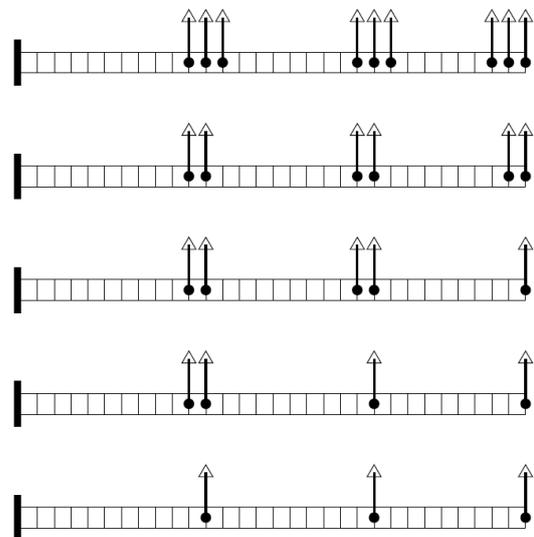
Konfigurasi sistem sensor dalam perencanaan SMKS merupakan kajian penting yang dapat menentukan kinerja dari sistem monitoring. Konfigurasi sensor yang optimal dapat menghasilkan informasi kesehatan struktur yang komprehensif, mengurangi jumlah sensor, mengurangi investasi perangkat keras, meningkatkan keandalan, dan menyediakan sistem yang kuat (Meo and Zumpano, 2005). Di beberapa struktur, monitoring dilakukan menggunakan sistem sensor yang mutakhir dengan jumlah yang sangat banyak, sebagai contoh di jembatan *cable stayed* Stonecutter di Hongkong yang dipasang lebih dari 1200 sensor, termasuk akselerometer, sensor temperatur, *strain gauge*, dan sensor lainnya (Ni et al. 2008). Di beberapa kasus akibat kurangnya pendekatan sistematis untuk menentukan konfigurasi sensor, jumlah dan posisi sensor ditentukan hanya menggunakan penilaian keteknikan (*engineering judgement*) saja (Laory et al. 2012). Pendekatan ini dapat menghasilkan data yang berlebihan sehingga menyebabkan biaya interpretasi data yang tinggi atau data yang tidak mencukupi menghasilkan interpretasi yang ambigu. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan sistematis untuk menentukan konfigurasi sensor yang memberikan kinerja yang baik serta efisiensi biaya.

Parameter yang biasanya diukur, direkam, dan dimonitor dalam SMKS diklasifikasikan menjadi parameter beban seperti berat kendaraan dan kecepatan angin, respon beban global seperti percepatan struktur, respon beban lokal seperti tegangan dan regangan, dan faktor lingkungan seperti temperatur dan kelembaban (Jinping Ou and Hui Li, 2010). Dari seluruh parameter tersebut, yang paling sering diukur adalah percepatan struktur karena dapat menunjukkan perilaku global dari struktur jembatan (Noel et al. 2017). Data yang diperoleh dari *accelerometer*, seperti frekuensi alami, bentuk mode, dan rasio redaman, berguna dalam mengevaluasi perubahan kekakuan, mengidentifikasi tanda-tanda kerusakan, dan perubahan faktor redaman pada jembatan. Dalam perspektif teknik sipil, penempatan sensor menentukan seberapa efektif sensor tersebut mengumpulkan informasi struktur (Noel et al. 2017). Untuk memantau karakteristik jembatan dengan akurat dan dapat diandalkan, *accelerometer* harus dipasang pada lokasi yang paling sensitif dan strategis. Penempatan sensor ini dianalisis berdasarkan pada properties struktur jembatan dan pola *mode shape* yang dihasilkan. Dengan memasang sensor pada posisi optimal, data yang dikumpulkan akan mencerminkan perilaku dinamis jembatan dengan akurat, sehingga memfasilitasi analisis dan evaluasi yang tepat terhadap kesehatan jembatan.

Penelitian ini memilih Jembatan Pulau Balang sebagai studi kasus yang berlokasi di Penajam Paser Utara, Provinsi Kalimantan Timur. Jembatan ini merupakan tipe *cabl stayed* dengan desain *fan* dan memiliki *pylon* kembar, dengan bentang total mencapai 804 meter dan bentang utama sepanjang 402 meter. Karena konfigurasi strukturnya yang cukup kompleks, jembatan ini memerlukan pemasangan Sistem Monitoring Kesehatan Struktur (SMKS) guna memantau kondisi keamanan struktur dan potensi deteriorasi yang mungkin terjadi. Salah satu aspek yang sangat penting dalam SMKS adalah penggunaan sensor *accelerometer* yang harus dipasang pada lokasi yang sangat strategis dan sensitif terhadap getaran. Dengan penempatan sensor *accelerometer* yang tepat, diharapkan dapat memantau perilaku dinamis jembatan secara akurat dan mendeteksi perubahan atau potensi

masalah struktural yang memerlukan tindakan pemeliharaan. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, penempatan optimal sensor *accelerometer* menjadi fokus utama untuk memastikan pemantauan yang efektif dan terpercaya terhadap kondisi keselamatan dan kehandalan jembatan Pulau Balang.

Banyak metode yang sudah dikembangkan dalam menentukan penempatan sensor optimum khususnya untuk pengujian dinamik. Metode *Effective Independence* (EFI) (Kammer 1991) adalah salah satu metode paling populer untuk mengoptimalkan lokasi sensor dalam pengujian dinamik struktur. Metode ini merupakan metode untuk memaksimalkan nilai determinan dari Fisher information matriks (FIM). Matriks tersebut didefinisikan sebagai produk dari matriks *mode shape* dan *transpose*. Jumlah sensor dapat dikurangi dengan menghapus derajat kebebasan (DoF) secara berturut-turut dari matriks *mode shape*. Dari penelitian yang dilakukan Friswell dan Castro-Triguero, jumlah sensor optimal yang dihasilkan dari metode EFI akan tergantung pada jumlah *mode shape* yang digunakan dalam analisis. Saat jumlah sensor yang digunakan lebih banyak dari jumlah *mode shape*, akan terbentuk kelompok-kelompok dengan jumlah kelompok juga sama dengan jumlah *mode shape* yang digunakan seperti ilustrasi pada Gambar 1 (Friswell and Castro-Triguero 2015).



Sumber: Friswell and Castro-Triguero (2015)

Gambar 1. Penentuan lokasi sensor berdasarkan metode EFI untuk 3 target mode shape dengan jumlah 9, 6, 5, 4, dan 3 sensor

Studi perbandingan *optimal sensor placement* (OSP) yang dilakukan pada jembatan gantung Nottingham Wilford menunjukkan kinerja metode *Effective Independence* (EFI) lebih baik dibandingkan dengan *kinetic energy method* (KEM), *variance method* (VM), dan metode pendekatan energi (Meo and Zumpano 2005). Pada jembatan *cable stayed* Wenhui menunjukkan metode *Effective Independence* (EFI) memiliki nilai determinan yang besar dan tetap memiliki informasi mode lebih banyak dibandingkan metode MAC dan metode *eigenvector sensitivity* (ES) (Jin and Song 2008). Begitu juga pada studi perbandingan metode OSP yang dilakukan pada SMKS Jembatan Soekarno menunjukkan metode *Effective Independence* (EFI) merupakan metode terbaik untuk menentukan jumlah dan posisi sensor yang menghasilkan determinan FIM relatif lebih besar dibandingkan dengan metode *eigenvalue component product* (ECP), *mode shape summation plot* (MSPP), dan *effective independent-drive point residu* (EI-DPR) (Aminullah, Suhendro, and Panuntun, 2022).

Berdasarkan studi yang telah dilakukan oleh Meo and Zumpano (2005), Jin and Song (2008), serta Aminullah, Suhendro, and Panuntun (2022), ditemukan bahwa metode *Effective Independence* (EFI) memiliki keunggulan dalam menghasilkan jumlah sensor yang paling optimal dibandingkan dengan metode lainnya dalam penempatan sensor pada jembatan. Studi tersebut mendukung penggunaan metode EFI dalam penelitian ini untuk mendapatkan konfigurasi sensor yang optimal.

Studi yang dilakukan oleh Friswell and Castro-Triguero (2015) menunjukkan bahwa jumlah sensor optimal yang dihasilkan dari metode EFI akan bergantung pada jumlah *mode shape* yang digunakan dalam analisis. Dalam penelitian ini akan dilakukan studi pemasangan sensor *accelerometer* menggunakan metode EFI pada Jembatan Pulau Balang di Kalimantan Timur dengan menggunakan beberapa jumlah *mode shape* yang berbeda. Dengan melakukan penelitian ini, diharapkan dapat ditemukan alternatif jumlah dan posisi sensor optimal yang dapat dipasang sesuai dengan ketersediaan

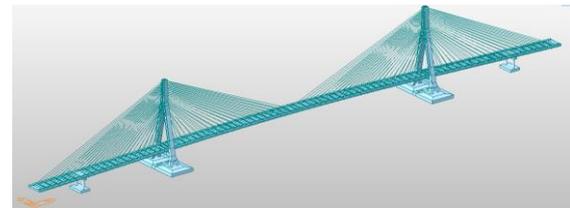
anggaran untuk implementasi awal maupun pemeliharaan.

HIPOTESIS

Penerapan metode *Effective Independence* (EFI) menghasilkan alternatif penempatan sensor yang memungkinkan pemilik Jembatan menentukan konfigurasi sensor yang paling optimal sesuai dengan ketersediaan anggaran, Metode membantu mengambil keputusan yang lebih efektif dan efisien dalam mengimplementasikan Sistem Monitoring Kesehatan Struktur (SMKS) sesuai dengan penempatan yang dianggap optimal oleh pemilik jembatan.

METODOLOGI

Metodologi yang digunakan untuk menentukan penempatan sensor yang optimal menggunakan metode *Effective Independence* (EFI) terdiri dari beberapa langkah. Pertama, dilakukan pemodelan elemen hingga dari struktur Jembatan Pulau Balang (Gambar 2).



Sumber: Ramadhani (2023)

Gambar 2. Pemodelan Jembatan Pulau Balang

Validasi Pemodelan

Untuk memastikan akurasi dan keandalan model, dilakukan validasi terhadap parameter statik dan dinamik dari laporan uji beban yang dilakukan oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (2021).

Uji beban statik dilakukan dalam 2 skema yang terdiri atas konfigurasi beban masing-masing. Skema 1 yang ditunjukkan pada Gambar 3, terdiri atas 7 tahap dan jembatan dibebani secara bertahap pada kedua lajur sampai total 70% beban *live load* rencana. Skema 2 yang ditunjukkan pada Gambar 4, terdiri atas 5 tahap dan jembatan dibebani asimetris pada 1 lajur sampai total 70% beban hidup rencana. Beban truk yang digunakan pada setiap tahap dipilih untuk mewakili persentase

yang berbeda dari beban hidup yang direncanakan seperti yang tertera pada Tabel 1.



Sumber: PT. PDCM (2021)

Gambar 3. Uji beban statis skema 1



Sumber: PT. PDCM (2021)

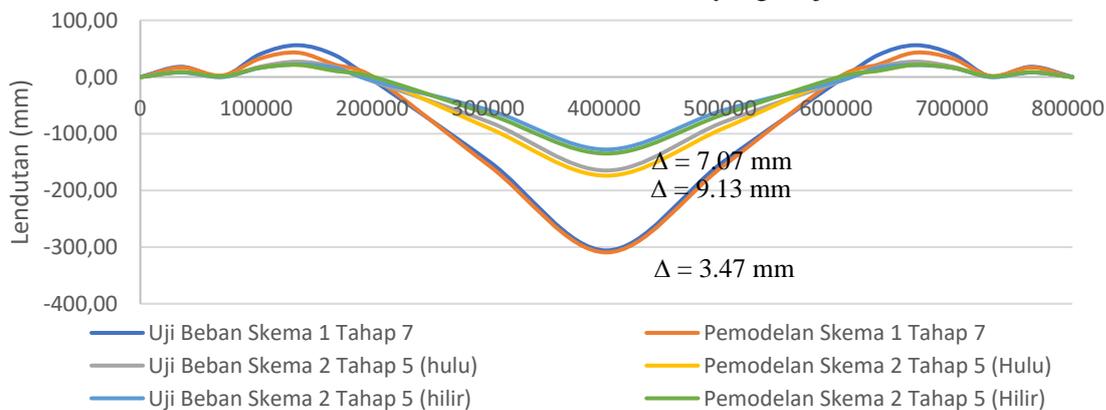
Gambar 4. Uji beban statis skema 2

Tabel 1. Konfigurasi uji beban statik

| Skema Pembebanan | Jumlah Truk | Total beban (ton) | % beban hidup (live load) rencana |
|------------------|-------------|-------------------|-----------------------------------|
| Skema 1 tahap 1 | 0 | 0 | 0% |
| Skema 1 tahap 2 | 4 | 104 | 4.7% |
| Skema 1 tahap 3 | 12 | 312 | 14.1% |
| Skema 1 tahap 4 | 28 | 728 | 32.9% |
| Skema 1 tahap 5 | 44 | 1144 | 51.7% |
| Skema 1 tahap 6 | 52 | 1352 | 61.1% |
| Skema 1 tahap 7 | 60 | 1560 | 70.5% |
| Skema 2 tahap 1 | 0 | 0 | 0% |
| Skema 2 tahap 2 | 6 | 156 | 14.1% |
| Skema 2 tahap 3 | 14 | 364 | 32.9% |
| Skema 2 tahap 4 | 22 | 572 | 51.7% |
| Skema 2 tahap 5 | 30 | 780 | 70.5% |

Sumber: Ramadhani (2023)

Validasi parameter statik dilakukan dengan membandingkan hasil lendutan jembatan yang dihasilkan dari pemodelan dengan hasil lendutan yang terjadi pada uji beban fisik dengan beban yang sama. Hasil validasi ini memberikan informasi tentang sejauh mana model analitis mampu merepresentasikan perilaku sebenarnya dari struktur jembatan. Dari validasi statik pada Gambar 5, lendutan yang dihasilkan dari pemodelan pada setiap tahap lebih besar daripada lendutan yang terjadi pada uji beban, dengan selisih maksimum mencapai 9.13 mm pada lendutan skema 2 tahap 5 sisi hulu. Hal ini menunjukkan bahwa struktur yang dimodelkan memiliki kekakuan yang lebih kecil daripada kekakuan struktur aktual yang diuji.



Sumber: Ramadhani (2023)

Gambar 5. Perbandingan lendutan uji beban dan pemodelan

Validasi parameter dinamik dilakukan dengan membandingkan parameter frekuensi alami jembatan dari pemodelan dengan frekuensi alami hasil analisa FFT (*fast fourier transform*) dan EMA (*experimental modal analysis*) pada saat pengujian dinamis jembatan. Dari hasil validasi dinamik yang ditunjukkan pada Tabel 2 didapatkan frekuensi pemodelan sedikit lebih kecil daripada frekuensi struktur hasil pengukuran uji beban karena frekuensi natural struktur sebanding dengan kekakuan struktur. Jadi, dapat disimpulkan bahwa struktur pemodelan memiliki kekakuan lebih kecil daripada kekakuan struktur aktual.

Tabel 2. Perbandingan frekuensi alami pemodelan dan pengujian dinamis

| Mode Shape | Frekuensi (Hz) | | | Jenis Mode Shape |
|------------|-------------------|-------|-----------------|-----------------------|
| | Pengujian Dinamis | | Pemodelan MIDAS | |
| | FFT | EMA | | |
| 1 | - | - | 0.156 | Long 1 st |
| 2 | 0.303 | 0.310 | 0.300 | Ver 1 st |
| 3 | - | - | 0.407 | Long 2 nd |
| 4 | - | 0.460 | 0.452 | Trans 1 st |
| 5 | 0.600 | 0.601 | 0.593 | Ver 2 nd |

Sumber: Ramadhani (2023)

Keterangan: Long = longitudinal, Ver = vertical, Trans = transversal.

Dari validasi yang dilakukan perbedaan parameter statik dan dinamik antara pemodelan dan uji beban relatif kecil sehingga pemodelan valid untuk dipergunakan pada analisis selanjutnya.

Ekstraksi Mode Shape

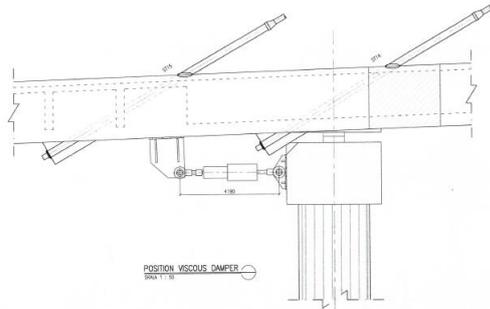
Untuk memperoleh informasi tentang respons dinamis dilakukan proses ekstraksi *mode shape* dari pemodelan. Dalam ekstraksi ini persamaan eigenvalue diselesaikan dalam pemodelan elemen hingga menggunakan perangkat lunak *Midas Civil* untuk mendapatkan frekuensi alami dan *mode shape* dari struktur jembatan. *Mode shape* yang dihasilkan mencerminkan pola getaran yang mungkin terjadi pada jembatan. Ekstraksi 30 *mode shape* pertama serta identifikasi jenis *mode shape* ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Frekuensi dan jenis *mode shape* pemodelan Jembatan Pulau Balang

| No. | Frekuensi (Hz) | Jenis |
|-----|----------------|--------|
| 1 | 0.156787 | TRAN-X |
| 2 | 0.300031 | TRAN-Z |
| 3 | 0.407452 | TRAN-X |
| 4 | 0.452606 | TRAN-Y |
| 5 | 0.593154 | TRAN-Z |
| 6 | 0.748739 | ROTN-Y |
| 7 | 0.781217 | TRAN-Z |
| 8 | 0.825433 | ROTN-Y |
| 9 | 0.988542 | TRAN-Z |
| 10 | 1.031442 | ROTN-Y |
| 11 | 1.045474 | TRAN-Z |
| 12 | 1.180991 | ROTN-X |
| 13 | 1.238988 | ROTN-Z |
| 14 | 1.242086 | ROTN-Y |
| 15 | 1.503452 | TRAN-Z |
| 16 | 1.548511 | ROTN-Y |
| 17 | 1.575697 | TRAN-Z |
| 18 | 1.734050 | ROTN-Z |
| 19 | 1.779092 | TRAN-Z |
| 20 | 1.871138 | ROTN-Y |
| 21 | 1.876327 | TRAN-Y |
| 22 | 1.941651 | ROTN-Z |
| 23 | 1.986044 | TRAN-Y |
| 24 | 2.152705 | TRAN-X |
| 25 | 2.217321 | ROTN-Z |
| 26 | 2.220102 | TRAN-Z |
| 27 | 2.225273 | ROTN-X |
| 28 | 2.356996 | TRAN-Z |
| 29 | 2.379823 | TRAN-Y |
| 30 | 2.381516 | ROTN-Z |

Keterangan: TRAN = translation, ROTN = rotational

Mode shape arah longitudinal (trans-x) menggetarkan seluruh *deck* sepanjang jembatan sehingga di mana pun posisi *accelerometer* dipasang, getaran arah longitudinal akan terdeteksi. Pada kolom K1 dan K2 Jembatan Pulau Balang juga dipasang *viscous damper* yang ditunjukkan pada Gambar 6 yang berfungsi untuk mengurangi efek getaran arah longitudinal sehingga *mode shape* longitudinal tidak menjadi penentu untuk menganalisis posisi *accelerometer*.



Sumber: P2JN Provinsi Kalimantan Timur (2017)

Gambar 6. Viscous damper pada Jembatan Pulau Balang

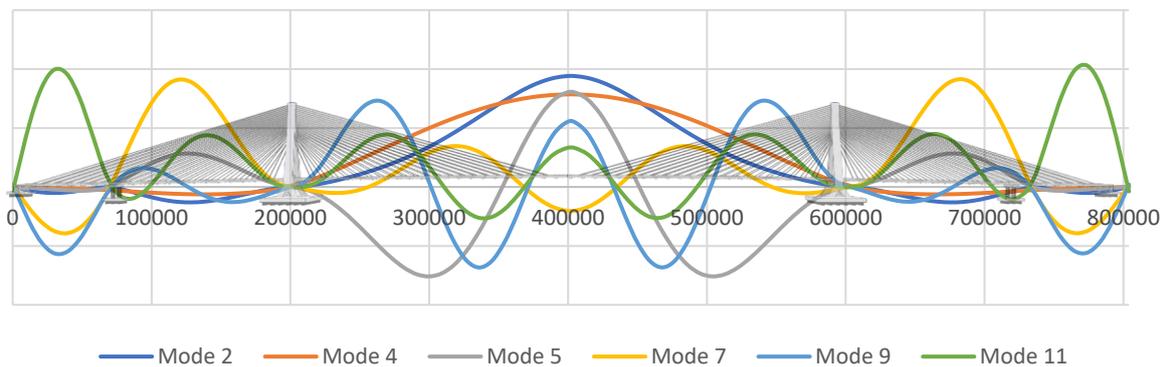
Sensor *accelerometer* perlu ditempatkan pada posisi yang dapat memberikan informasi terbesar untuk memonitor *mode shape* vertikal

dan transversal. Pada penelitian ini dilakukan filter untuk 6 *mode shape* vertikal (trans-z) dan transversal (trans-y) pertama yang ditunjukkan pada Tabel 4 dengan *eigen vector* ditunjukkan pada Gambar 7.

Tabel 4. 6 *mode shape* vertikal dan transversal pertama

| Mode No. | Frekuensi (Hz) | Jenis |
|----------|----------------|--------|
| 2 | 0.300031 | TRAN-Z |
| 4 | 0.452606 | TRAN-Y |
| 5 | 0.593154 | TRAN-Z |
| 7 | 0.781217 | TRAN-Z |
| 9 | 0.988542 | TRAN-Z |
| 11 | 1.045474 | TRAN-Z |

Keterangan: TRAN = translation



Gambar 7. Eigen vector 6 *mode shape* vertikal dan transversal pertama

Metode *Effective Independence* (EFI)

Fisher Information Matrix (FIM) merupakan metode statistik untuk mengukur jumlah informasi yang tampak dari suatu variabel acak. Algoritma penempatan sensor metode *Effective Independence* (EFI) didasarkan pada FIM F , yang didefinisikan sebagai berikut:

$$F = \Phi^T \Phi$$

Φ merupakan matriks *mode shape*. Jika vektor *mode shape* bebas secara linier, nilai FIM akan maksimum. Tujuan dari metode EFI adalah untuk memilih konfigurasi derajat kebebasan (di mana sensor akan ditempatkan) yang memaksimalkan nilai determinan FIM. FIM dapat dipecah untuk melihat kontribusi dari tiap kandidat lokasi sensor sebagai berikut:

$$F = \sum_{i=1}^n \Phi_{si}^T \Phi_{si}$$

Di mana Φ_{si} merupakan baris ke- i dari matriks modal yang dihubungkan dengan urutan kandidat lokasi sensor, n adalah jumlah kandidat sensor. Dengan metode EFI, prosedur pemilihan lokasi sensor dihitung dengan membuat matrix E . Matrix diagonal E diidentifikasi sebagai distribusi kebebasan dari kandidat sensor.

$$E = \Phi[\Phi^T \Phi]^{-1} \Phi^T$$

Nilai E juga dapat dipecah menjadi E_{ii} untuk meninjau kontribusi setiap sensor. Nilai E_{ii} merepresentasikan pengurangan dari determinan FIM jika sensor ke- i tersebut dihapus dari kandidat sensor.

$$E_{ii} = \Phi_{si} F^{-1} \Phi_{si}^T$$

$$0 \leq E_{ii} \leq 1$$

Jika $E_{ii} = 0$, maka baris ke- i pada Φ adalah nol dimana *mode shape* tidak dapat diamati dari lokasi sensor tersebut. Jika $E_{ii} = 1$,

lokasi sensor tersebut merupakan lokasi utama dan tidak dapat dihapus. Kandidat sensor dapat diurutkan berdasarkan nilai E_{ii} . Lokasi sensor dengan nilai terkecil akan dihapus dan nilai E_{ii} dihitung ulang untuk baris kandidat baru. Setelah sensor ke- i dihapus, determinan FIM baru didefinisikan sebagai berikut:

$$\det(F) = \det(F_0)(1 - E_{ii})$$

Di mana F_0 adalah nilai awal FIM dan F adalah nilai FIM setelah penghapusan sensor ke- i .

HASIL DAN ANALISIS

Dari keenam *mode shape* vertikal dan transversal pertama, dibentuk sebuah matriks *mode shape* Φ dengan ukuran $m \times n = 93 \times 6$, di mana m adalah jumlah derajat kebebasan (DOF) kandidat sensor sebanyak 93, dan n adalah jumlah target *mode shape* sebanyak 6. Matriks *mode shape* Φ ini digunakan untuk menghitung Fisher Information Matrix (FIM) menggunakan rumus $F = \Phi^T \Phi$. FIM menggambarkan sejauh mana informasi yang terkandung dari setiap *mode shape*.

Kontribusi dari setiap kandidat lokasi sensor dinilai dengan menggunakan nilai $E_{ii} = \Phi_{si} F^{-1} \Phi_{si}^T$. Nilai E_{ii} menggambarkan pengurangan dalam determinan FIM jika sensor pada kandidat lokasi tertentu dihapus. Untuk memvisualisasikan kontribusi kandidat lokasi sensor, nilai E_{ii} ditampilkan dalam Gambar 8.

Dalam tahap selanjutnya, kandidat lokasi sensor dengan nilai E_{ii} terbesar dinilai sebagai lokasi terbaik untuk penempatan sensor, karena memberikan kontribusi yang paling signifikan terhadap determinan FIM. Sebaliknya, kandidat lokasi sensor dengan nilai E_{ii} terkecil dieliminasi dari pertimbangan karena

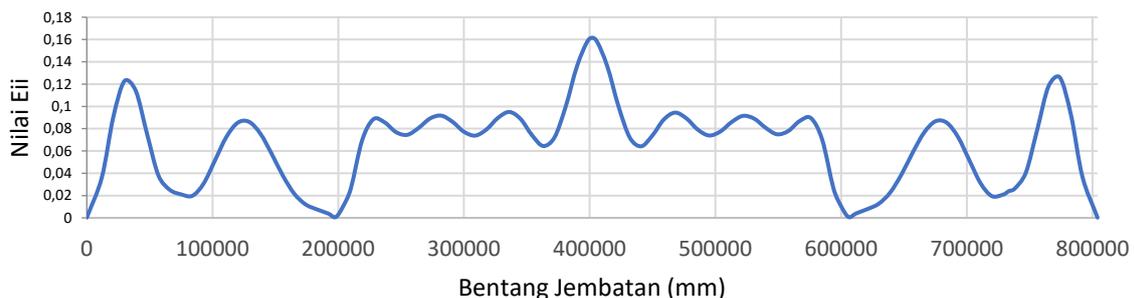
memberikan kontribusi yang paling kecil terhadap determinan FIM.

Setelah melalui proses eliminasi nilai E_{ii} terkecil, nilai E_{ii} dihitung ulang hingga diperoleh kandidat lokasi sensor dengan nilai konvergen $E_{ii} = 1$. Hasil iterasi ke-88, yang terlihat pada Gambar 9, menunjukkan enam kandidat lokasi sensor *accelerometer* yang paling optimal berdasarkan metode EFI.

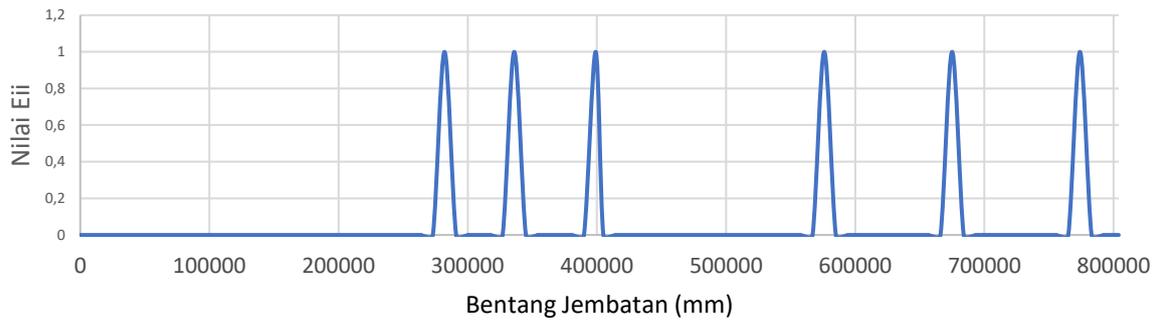
Pada Gambar 10 terlihat bahwa pemilihan posisi *accelerometer* dengan metode *Effective Independence* hingga nilai konvergen $E_{ii} = 1$ menghasilkan penempatan sensor di satu sisi saja sehingga penempatan sensor *accelerometer* menjadi tidak simetris.

Jembatan Pulau Balang adalah jembatan *cable stayed* dengan 2 pylon simetris dan total bentang sepanjang 804 meter. Penting untuk dicatat bahwa beban kendaraan operasional biasa tidak dapat menggetarkan jembatan secara keseluruhan. Namun, jika sensor *accelerometer* dipasang secara tidak simetris seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 10, *accelerometer* yang hanya terpasang di satu sisi jembatan tidak akan dapat mendeteksi getaran dari sumber beban di sisi lainnya.

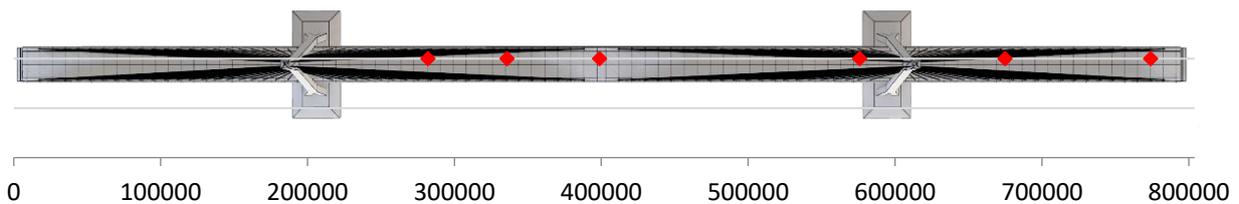
Oleh karena itu, dilakukan penempatan sensor dengan cara disimetriskan melalui proses pencerminan (*mirroring*). Dengan demikian, diperoleh kandidat lokasi sensor yang ditunjukkan dalam Gambar 11, yang menghasilkan penempatan sensor *accelerometer* yang simetris dan memungkinkan pengambilan data yang lebih representatif terhadap getaran dari berbagai sumber beban pada jembatan.



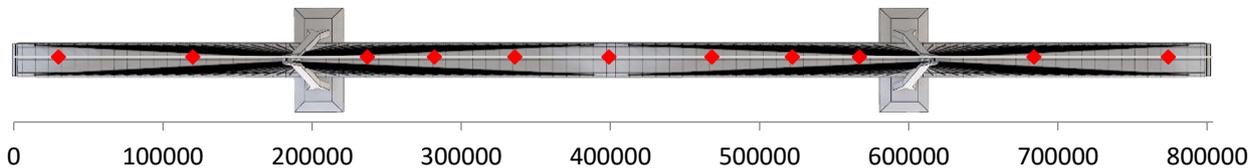
Gambar 8. Nilai E_{ii} iterasi ke-1 untuk 6 target *mode shape*



Gambar 9. Nilai Eii iterasi ke-88 untuk 6 *mode shape*



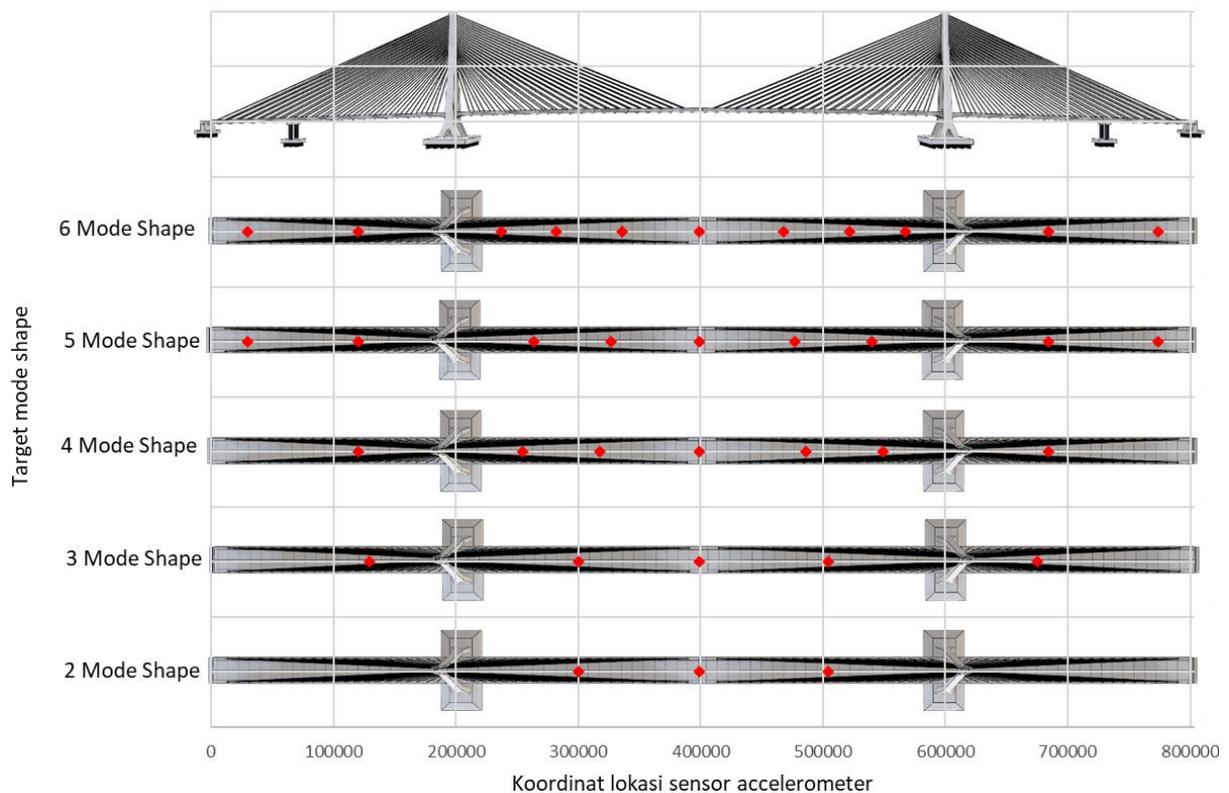
Gambar 10. Kandidat lokasi sensor *accelerometer* untuk 6 target *mode shape*



Gambar 11. Kandidat lokasi sensor *accelerometer* (setelah *mirroring*) untuk 6 target *mode shape*

Untuk mencari kandidat lokasi sensor yang paling optimal, langkah sebelumnya diulang dengan mempertimbangkan 5, 4, 3, dan 2 target *mode shape*. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan alternatif kandidat penempatan sensor *accelerometer* dengan berbagai jumlah target *mode shape*. Hasil dari proses ini ditampilkan dalam Gambar 12.

Selanjutnya, koordinat lokasi dan jumlah sensor *accelerometer* yang ditempatkan pada setiap kandidat lokasi tersebut dapat dilihat dalam Tabel 5. Informasi ini memberikan gambaran yang lebih terperinci mengenai penempatan sensor *accelerometer* pada setiap kandidat lokasi yang dihasilkan dari metode EFI.



Gambar 12. Kandidat lokasi sensor *accelerometer* untuk berbagai target *mode shape*

Tabel 5. Koordinat lokasi sensor *accelerometer* untuk berbagai target *mode shape*

| Target mode shape | Jumlah sensor accelerometer | Koordinat lokasi sensor (m) |
|-------------------|-----------------------------|--|
| 6 | 11 | 30, 120, 237, 282, 336, 402, 468, 522, 567, 684, 774 |
| 5 | 9 | 30, 120, 264, 327, 402, 477, 540, 684, 774 |
| 4 | 7 | 120, 255, 318, 402, 486, 549, 684 |
| 3 | 5 | 129, 300, 402, 504, 675 |
| 2 | 3 | 300, 402, 504 |

PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan metode *Effective Independence* (EFI) dalam penempatan sensor *accelerometer* pada Jembatan Pulau Balang menghasilkan jumlah sensor optimal yang sesuai dengan jumlah target *mode shape* yang digunakan dalam analisis. Hal ini konsisten dengan temuan studi sebelumnya oleh Friswell dan Castro-Triguero (2015). Namun, penelitian juga menunjukkan bahwa hasil dari metode EFI pada kasus ini menghasilkan penempatan sensor yang tidak simetris, seperti yang terlihat pada Gambar 10.

Hal ini menjadi perhatian penting karena jembatan Pulau Balang memiliki panjang yang

cukup besar sehingga beban kendaraan operasional di satu sisi tidak akan dapat menggetarkan sensor *accelerometer* yang berada di sisi lainnya. Untuk mengatasi masalah ini, dilakukan penempatan sensor secara simetris dengan menggunakan metode pencerminan (*mirroring*). Sebelas posisi *accelerometer* optimal diperoleh untuk 6 target *mode shape* (Gambar 11). Pola penempatan sensor ini sesuai dengan posisi nilai puncak Eii pada iterasi ke-1, sebagaimana terlihat pada Gambar 8.

Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa untuk target *mode shape* 6, jumlah sensor optimal yang diperoleh adalah 11, sementara untuk target *mode shape* 5, 4, 3, dan 2, jumlah sensor optimal berturut-turut adalah

9, 7, 5, dan 3 seperti yang terlihat pada Gambar 12 dan Tabel 5. Ditemukan pola, yaitu jumlah sensor yang sebanyak dua kali target *mode shape* dikurangi satu ($2n-1$).

Dengan mempertimbangkan berbagai jumlah target *mode shape*, penelitian ini menghasilkan 5 alternatif penempatan sensor *accelerometer* yang berpotensi menjadi solusi yang paling optimal untuk memonitor perilaku dinamis jembatan Pulau Balang. Informasi yang terdapat dalam Tabel 5 memberikan panduan yang jelas dalam menentukan jumlah dan lokasi sensor *accelerometer* yang akan dipasang pada jembatan tersebut.

Temuan ini sesuai dengan hipotesis awal, di mana ditemukan alternatif jumlah dan posisi sensor optimal untuk berbagai target *mode shape*. Hal ini memberikan fleksibilitas bagi pemilik jembatan dalam memilih konfigurasi penempatan sensor yang sesuai dengan ketersediaan anggaran. Selain itu, dengan hasil yang ditunjukkan dalam Gambar 12, pemilik jembatan juga mendapatkan opsi konfigurasi sensor jika ada kebutuhan penambahan sensor di masa depan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Dalam penelitian ini dilakukan studi penempatan sensor *accelerometer* pada Jembatan Pulau Balang menggunakan metode *Effective Independence* (EFI) dengan berbagai target *mode shape*.

Metode EFI memberikan alternatif penempatan sensor yang optimal sesuai dengan jumlah target *mode shape* yang digunakan dalam analisis. Namun, implementasi metode EFI pada jembatan Pulau Balang menghasilkan penempatan sensor *accelerometer* yang tidak simetris. Untuk memastikan pemantauan perilaku dinamis yang akurat dan representatif terhadap getaran dari berbagai sumber beban, penempatan sensor *accelerometer* disimetriskan melalui proses pencerminan (*mirroring*). Lima alternatif penempatan sensor *accelerometer* dihasilkan, yang berpotensi menjadi solusi paling optimal untuk memonitor perilaku dinamis jembatan. Alternatif-alternatif tersebut memberikan fleksibilitas bagi pemilik

jembatan dalam memilih konfigurasi penempatan sensor sesuai dengan anggaran yang tersedia.

Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan metode penempatan sensor yang efektif dan efisien pada jembatan. Hasil penelitian ini dapat menjadi acuan bagi pemilik infrastruktur jembatan dalam memilih konfigurasi sensor yang tepat untuk memantau kesehatan struktural jembatan secara akurat. Dengan adanya informasi ini, pemilik jembatan dapat membuat keputusan yang lebih efektif dan efisien dalam implementasi Sistem Monitoring Kesehatan Struktur (SMKS) sehingga meningkatkan keselamatan dan keandalan jembatan tersebut.

Saran

Disarankan untuk memperluas penelitian ini dengan mencakup lebih banyak jembatan untuk memvalidasi dan membandingkan hasil penempatan sensor *accelerometer* menggunakan metode *Effective Independence* (EFI). Hal ini akan membantu dalam memahami keberlakuan dan keefektifan metode EFI pada berbagai jenis jembatan.

Selanjutnya, penting untuk melakukan pemantauan langsung pada jembatan setelah pemasangan sensor *accelerometer*. Dengan mengumpulkan data aktual dari pemantauan tersebut, kita dapat memvalidasi keakuratan hasil penempatan sensor dan membuat penyesuaian jika diperlukan.

Melalui implementasi saran-saran ini, diharapkan pemahaman tentang penempatan sensor *accelerometer* yang optimal pada jembatan dapat ditingkatkan, serta strategi pemantauan yang lebih efektif dan efisien dapat dikembangkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Satuan Kerja Pelaksanaan Jembatan Pulau Balang dan Balai Jembatan yang telah memberikan referensi data dan laporan yang dibutuhkan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Aminullah, Akhmad, Bambang Suhendro, and Raka Bagus Panuntun. 2022. "Optimal Sensor Placement for Accelerometer in Single-Pylon Cable-Stayed Bridge," 63–79. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7924-7_5.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. 2020. *Spesifikasi Khusus Interim Sistem Monitoring Kesehatan Struktur (MKS) Jembatan*. Vol. Skh-1.7.42. Jakarta.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. 2022. *Pedoman Pemeriksaan Jembatan*. Vol. No. 01/ P/ BM/ 2022. Jakarta.
- Friswell, Michael I., and Rafael Castro-Triguero. 2015. "Clustering of Sensor Locations Using the Effective Independence Method." *AIAA Journal* 53 (5): 1388–91. <https://doi.org/10.2514/1.J053503>.
- Górski, Piotr, Monika Napieraj, and Eduard Konopka. 2020. "Variability Evaluation of Dynamic Characteristics of Highway Steel Bridge Based on Daily Traffic-Induced Vibrations." *Measurement* 164 (November): 108074. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREME NT.2020.108074>.
- Jin, H., and Y. Song. 2008. "Sensor Placement Optimization for Damage Detection." In *Earth & Space 2008*, 1–7. Reston, VA: American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/40988\(323\)186](https://doi.org/10.1061/40988(323)186).
- Jinping Ou, and Hui Li. 2010. "Structural Health Monitoring in Mainland China: Review and Future Trends." *Structural Health Monitoring* 9 (3): 219–31. <https://doi.org/10.1177/1475921710365269>.
- Kammer, Daniel C. 1991. "Sensor Placement for On-Orbit Modal Identification and Correlation of Large Space Structures." *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 14 (2): 251–59. <https://doi.org/10.2514/3.20635>.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. 2015. *Pedoman Perencanaan Sistem Monitoring Kesehatan Struktur Jembatan*. Vol. 24/SE/M2015. Jakarta.
- Laory, Irwanda, Nizar Bel Hadj Ali, Thanh N. Trinh, and Ian F. C. Smith. 2012. "Measurement System Configuration for Damage Identification of Continuously Monitored Structures." *Journal of Bridge Engineering* 17 (6): 857–66. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000386](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000386).
- Meo, M., and G. Zumpano. 2005. "On the Optimal Sensor Placement Techniques for a Bridge Structure." *Engineering Structures* 27 (10): 1488–97. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.03.015>.
- Ni, Y. Q., H. F. Zhou, K. C. Chan, and J. M. Ko. 2008. "Modal Flexibility Analysis of Cable-Stayed Ting Kau Bridge for Damage Identification." *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 23 (3): 223–36. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2008.00521.x>.
- Noel, Adam B., Abderrazak Abdaoui, Tarek Elfouly, Mohamed Hossam Ahmed, Ahmed Badawy, and Mohamed S. Shehata. 2017. "Structural Health Monitoring Using Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Survey." *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 19 (3): 1403–23. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2691551>.

- P2JN Provinsi Kalimantan Timur. 2017. “Gambar Rencana Konstruksi Proyek Jembatan Pulau Balang Bentang Panjang Kalimantan Timur.”
- PT. PDCM. 2021. “Laporan Akhir Uji Beban Statis Dan Dinamis Jembatan Pulau Balang.” Bekasi.
- Ramadhani, Sofyan. 2023. “Perencanaan Sistem Monitoring Kesehatan Struktur Pada Jembatan Cable Stayed Studi Kasus Jembatan Pulau Balang.” Tesis Program Magister, Institut Teknologi Bandung.
- Shokravi, Hoofar, Hooman Shokravi, Norhisham Bakhary, Seyed Saeid Rahimian Kolor, and Michal Petrú. 2020. “Health Monitoring of Civil Infrastructures by Subspace System Identification Method: An Overview.” *Applied Sciences* 10 (8): 2786. <https://doi.org/10.3390/app10082786>.
- Zhu, Yanjie, Yi-Qing Ni, Hui Jin, Daniele Inaudi, and Irwanda Laory. 2019. “A Temperature-Driven MPCA Method for Structural Anomaly Detection.” *Engineering Structures* 190 (July): 447–58. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.04.004>.