

# DETEKSI KERUSAKAN PADA STRUKTUR RANGKA BATANG RUANG DENGAN MENGGUNAKAN *BINARY BAT ALGORITHM* DAN *EUCLIDEAN DISTANCE* SEBAGAI FUNGSI OBYEKTIF

Richard Frans<sup>1\*</sup> dan Yoyong Arfiadi<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Makassar, Jl. Tanjung Alang No. 23, Makassar  
e-mail: [richardfrans.rf@gmail.com](mailto:richardfrans.rf@gmail.com)

<sup>2</sup> Departemen Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari No. 44, Yogyakarta  
e-mail: [yoyong.ar@uajy.ac.id](mailto:yoyong.ar@uajy.ac.id)

## ABSTRAK

Deteksi kerusakan merupakan salah satu tahapan penting dari suatu sistem monitoring kerusakan struktur (*structural health monitoring system*). Resiko kerusakan bahkan keruntuhan dapat dihindari dengan melakukan deteksi kerusakan secara berkala, selain itu, perawatan (*maintenance*) dan penanganan dapat dilakukan dengan efektif. Terdapat berbagai metode yang telah diusulkan untuk mendeteksi kerusakan dari metode statik hingga perilaku dinamik dari struktur. Penelitian ini membahas suatu metode untuk mendeteksi kerusakan elemen/batang pada struktur rangka batang ruang berdasarkan salah satu kriteria/perilaku dinamik dari struktur, yaitu frekuensi natural dari struktur. Metode ini menggabungkan antara algoritma optimasi, yaitu *binary bat algorithm* dan *euclidean distance* sebagai fungsi obyektif, dimana perhitungan *euclidean distance* berdasarkan pada selisih frekuensi natural struktur analisis dan frekuensi natural struktur aktual (kondisi mengalami kerusakan). Struktur rangka batang ruang yang ditinjau adalah struktur rangka batang ruang dengan 32 elemen/batang dengan berbagai skenario kerusakan, mulai dari skenario kerusakan tunggal, ganda hingga kerusakan pada berbagai elemen/batang. Selain itu, pada penelitian ini, nilai biner digunakan untuk merepresentasikan ada atau tidaknya kerusakan pada masing-masing elemen. Berdasarkan hasil yang didapatkan, metode yang diusulkan dapat dengan akurat memprediksi elemen/batang yang mengalami kerusakan untuk berbagai skenario kerusakan dengan iterasi yang kurang dari 100. Hal ini menunjukkan tingkat keefektifan dari algoritma BBA untuk mendapatkan solusi yang optimum secara konvergen.

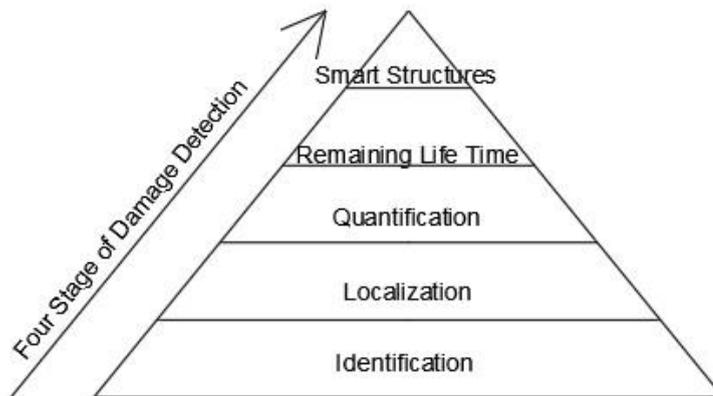
Kata kunci: deteksi kerusakan, struktur rangka batang ruang, *binary bat algorithm*, *euclidean distance*.

## 1. PENDAHULUAN

Sistem monitoring kesehatan struktur didefinisikan sebagai “proses untuk menerapkan identifikasi kerusakan pada bidang *aerospace*, sipil, serta mekanikal infrastruktur. Proses ini meliputi pengamatan struktur dari waktu ke waktu menggunakan pengukuran berkala. Hasil ekstraksi pada proses ini akan dianalisis untuk menentukan kondisi kesehatan pada struktur tersebut (Wilson et al, 2018). Penjaminan fungsi yang optimal dari semua komponen dalam suatu struktur adalah hal yang sangat penting bagi para perancang dan pengguna. Dalam banyak situasi, pemantauan yang berkelanjutan dapat mengidentifikasi kerusakan pada tahap awal serta menghindari kemungkinan kerusakan, kecelakaan, dan bencana yang disebabkan oleh pemeriksaan yang kurang memadai atau kerusakan dalam proses evaluasi (Burgos et al, 2020). Salah satu tahapan dalam suatu sistem monitoring kesehatan struktur adalah deteksi elemen yang mengalami kerusakan (*damage*). Menurut Sohn dan Farrar (2001), kerusakan didefinisikan sebagai perubahan properti elemen baik secara material maupun geometrik pada suatu sistem struktur termasuk perubahan *boundary condition* dan sistem sambungan, yang berdampak negatif pada kinerja dari sistem struktur. Secara umum, terdapat 4 (empat) tingkatan dalam mendeteksi kerusakan struktur menurut Rytter (1993), yaitu:

1. Tingkat pertama, mendeteksi apakah terjadi kerusakan pada struktur tersebut (*damage identification*). Hal ini biasanya ditandai dari perubahan perilaku struktur yang tidak teratur dimana dalam kondisi tertentu dapat diartikan sebagai kemungkinan kerusakan.
2. Tingkat kedua, menentukan lokasi kerusakan pada struktur tersebut secara lokal (*damage localization*). Elemen/bagian yang mengalami kerusakan ditentukan dengan menggunakan beberapa metode yang telah dikembangkan sesuai dengan informasi yang didapatkan.
3. Tingkat ketiga, menentukan tingkat kerusakan/klasifikasi kerusakan pada elemen tersebut (*damage quantification*). Pada tingkat ini, kuantifikasi penurunan/perubahan material/geometrik pada elemen/bagian yang mengalami kerusakan akan dilakukan pada tingkatan ini. Luaran dari tingkat ketiga ini adalah penurunan kekakuan/kekuatan/performa pada elemen/bagian yang mengalami kerusakan.

- Tingkat keempat, menentukan sisa layan dari elemen/bagian yang mengalami kerusakan (*remaining life time*).



**Gambar 1.** Tingkat deteksi kerusakan (Burgos et al, 2020)

Pada penelitian ini, suatu metode tingkat dua diusulkan untuk mendeteksi kerusakan elemen dari suatu struktur rangka batang ruang. Konsep dari metode ini adalah dengan mengombinasikan algoritma optimasi dan membandingkan vektor frekuensi natural struktur analisis dan frekuensi natural struktur aktual. Frekuensi natural struktur analisis didapatkan berdasarkan data kekakuan dari elemen yang dikalikan dengan faktor penurunan kekakuan sedangkan frekuensi natural struktur aktual adalah frekuensi natural struktur dalam kondisi mengalami kerusakan. Untuk menentukan selisih kedua vektor frekuensi ini, digunakan nilai *euclidean distance* sebagai fungsi objektif.

## 2. BINARY BAT ALGORITHM (BBA)

*Bat algorithm* pertama kali diperkenalkan oleh Yang (2010). Algoritma ini terinspirasi oleh cara kelelawar menggunakan "*echolocation*". Menurut Mirjalili, Mirjalili, dan Yang (2013), bat algorithm ini dianggap lebih efektif dibandingkan dengan algoritma lain, seperti algoritma genetika dan *particle swarm optimization*. Persamaan umum yang diterapkan dalam *bat algorithm* menurut Yang (2010) adalah sebagai berikut

$$f_i = f_{best} + (f_{max} - f_{best})r_i \quad (1)$$

$$v_i^{t+1} = v_i^t + (x_i^* - x_i) * r_i \quad (2)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (3)$$

dimana  $f_i$  adalah frekuensi,  $r_i$  adalah angka acak dari 0 sampai 1,  $v$  adalah vektor kecepatan,  $x$  adalah vektor posisi serta  $x_*$  adalah lokasi global terbaik pada iterasi tersebut. Selain menggunakan persamaan (1), (2), dan (3), terdapat persamaan tambahan untuk memperbarui lokasi lokal dari kelelawar tersebut, yaitu

$$x_{local} = x_{local} + v \quad (4)$$

$$l_{local}^{t+1} = l_{local}^t + v \quad (5)$$

$$l_{local}^{t+1} = l_{local}^0 [1 - \exp(-r_i)] \quad (6)$$

dimana:  $f_i$  adalah *loudness*,  $r_i$  adalah *rate of pulse emission*,  $f_{max}$  dan  $f_{best}$  adalah konstanta (biasanya diambil  $f_{max} =$

$f_{best}$ ) Persamaan (1) hingga (6) diterapkan untuk mengatasi masalah yang bersifat kontinu dengan variabel riil,

sedangkan dalam kasus ini, variabel yang digunakan adalah variabel biner. Oleh karena itu, persamaan (1) hingga (6) dimodifikasi agar dapat diterapkan pada optimasi dengan variabel biner. Mirjalili, Mirjalili, dan Yang (2014) melakukan modifikasi pada *bat algorithm* yang awalnya dirancang untuk variabel riil, sehingga menjadi alat optimasi untuk variabel biner yang dikenal sebagai *binary bat algorithm* (BBA). Teori ini menggunakan fungsi transfer berbentuk v (*v-shaped transfer function*). Persamaan yang digunakan untuk memperbarui posisi dan kecepatan mengikuti persamaan (7) dan (8).

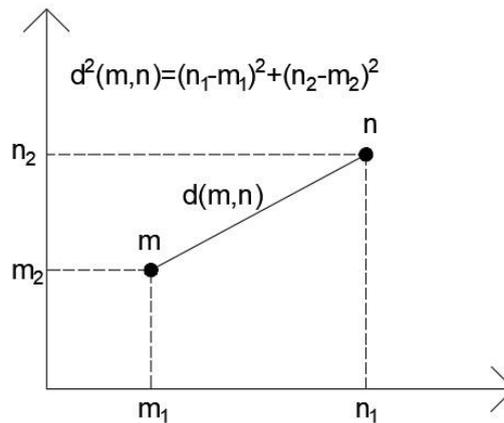
$$v_i(t+1) = \left| \frac{\pi}{a} \cdot an \right| \quad (7)$$

$$p_i(t+1) = \begin{cases} p_i(t) + v_i(t+1) & \text{if } i \cdot n < p_i(t) \\ p_i(t) - v_i(t+1) & \text{if } i \cdot n > p_i(t) \end{cases} \quad (8)$$

dimensi  $p_i(t)$  dan  $v_i(t)$  masing-masing adalah posisi dan kecepatan kelelawar ke- $i$  pada iterasi  $t$  pada dan  $i \cdot n$  adalah komplemen dari  $p_i(t)$ .

### 3. EUCLIDEAN DISTANCE

*Euclidean distance* atau yang biasa disebut sebagai jarak Euclidean didefinisikan sebagai jarak antara dua buah titik. Jarak ini juga sering disebut sebagai jarak Pythagoras dikarenakan persamaan yang digunakan sama dengan rumus Pythagoras. Gambar 2 menunjukkan ilustrasi untuk menentukan jarak Euclidean. Penerapan konsep jarak Euclidean telah digunakan dalam berbagai bidang keilmuan seperti kesehatan, industri, sains, teknik, olah citra, dan lain sebagainya (Sekarrini, et al, 2020; Jannah dan Humaira, 2019; Nabilla, et al, 2023; Dokmanic, et al, 2015).



Gambar 2. Ilustrasi penentuan jarak Euclidean

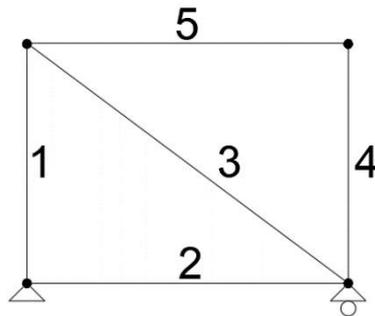
Pada penelitian ini jarak Euclidean ini digunakan untuk mendapatkan hubungan antara dua buah vektor. Secara umum, persamaan Euclidean Norm yang digunakan dapat dilihat pada persamaan (9).

$$\|V\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n |V_i|^2} \quad (9)$$

dimana:  $\|V\|$  merupakan nilai yang menggambarkan perbedaan antara dua buah vektor sedangkan  $V_i$  adalah selisih antara vektor pertama dan vektor kedua, dimana tiap vektor memiliki  $n$ -elemen.

### 4. ANGKA BINER

Penggunaan nilai biner pada penelitian ini dimaksudkan untuk merepresentasikan elemen yang mengalami kerusakan. Angka 0 merepresentasikan tidak terjadi kerusakan pada elemen tersebut sebaliknya angka 1 merepresentasikan terdapat kerusakan pada elemen tersebut. Sebagai contoh, jika terdapat struktur rangka batang bidang sederhana seperti yang terlihat pada Gambar 3, jika vektor dari nilai biner menunjukkan hasil = [1 0 1 1 0], hal ini berarti bahwa terdapat kerusakan pada elemen/batang 1, 3 dan 4 sedangkan elemen/batang 2 dan 5 tidak mengalami kerusakan.

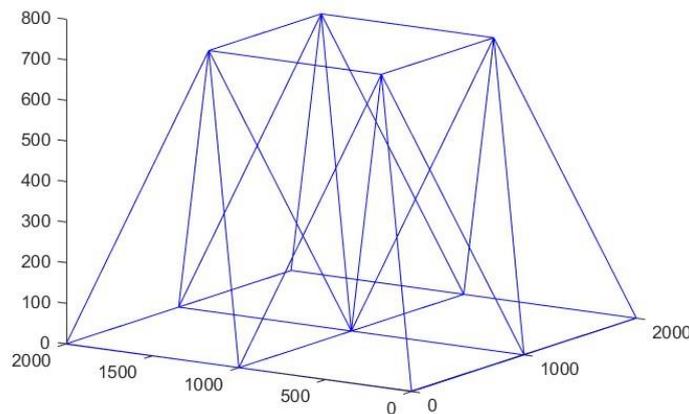


**Gambar 3.** Contoh struktur rangka batang bidang

## 5. METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini, struktur rangka batang ruang dengan 32-batang ditinjau sesuai yang dapat dilihat pada Gambar 4. Bentuk ini merupakan modul piramid dengan panjang, lebar dan tinggi masing-masing 2000 mm, 2000 mm, 700mm. Konfigurasi struktur rangka batang ruang ini diambil dari penelitian yang dilakukan oleh Bezerra, et al (2009); Freitas, et al (2019); Frans dan Arfiadi (2024). Modulus elastisitas material dan ukuran penampang diambil seragam, yaitu sebesar 68,95 MPa dan 1354,8 mm<sup>2</sup>. Tabel 1 menunjukkan empat skenario kerusakan yang digunakan. Perlu diketahui sebelumnya, batasan masalah pada penelitian ini adalah penurunan kekakuan yang dialami oleh elemen yang mengalami kerusakan adalah sama, yaitu sebesar 20% sehingga kekakuan residual struktur yang mengalami kerusakan adalah 80% dari kekakuan mula-mula (kekakuan pada saat kondisi sehat).

**Gambar 4.** Struktur rangka batang ruang dengan 32-batang



**Tabel 1.** Skenario kerusakan dari struktur rangka batang ruang

No	Skenario	Elemen yang mengalami kerusakan
1	S1	6
2	S2	8,32
3	S3	3,8,10,15
4	S4	2,3,8,10,15,22,25,32

Fungsi obyektif pada penelitian ini adalah untuk meminimumkan nilai *Euclidean Norm* dari 2 (dua) buah vektor. Vektor pertama adalah vektor frekuensi natural analisis sedangkan vektor kedua adalah vektor yang berisi frekuensi natural dari struktur yang mengalami kerusakan (kondisi aktual). Kedua vektor ini dibandingkan dengan menggunakan persamaan (9) yang merupakan hasil penyesuaian persamaan (10)

$$\frac{\omega_{\text{actual}} - \omega_{\text{analysis}}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n |\omega_{\text{actual}_i} - \omega_{\text{analysis}_i}|^2}} = \quad (10)$$

dimana:  $\omega_{\text{actual}}$  merupakan nilai yang menggambarkan perbedaan antara dua buah vektor frekuensi natural sedangkan  $\omega_{\text{analysis}}$  adalah vektor frekuensi natural analisis dan  $\omega_{\text{actual}_i}$  adalah vektor frekuensi natural aktual (struktur yang mengalami kerusakan),  $n$  adalah jumlah ragam yang dipertimbangkan.

Seluruh perhitungan termasuk pembuatan algoritma, fungsi dan analisis struktur dikerjakan dengan bantuan perangkat lunak MATLAB R2022b (Mathworks, 2021; 2023).

## 6. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 2 menunjukkan variabel optimasi yang digunakan. Jumlah iterasi maksimum yang digunakan adalah 500 iterasi dengan jumlah partikel dan jumlah variabel yang sama, yaitu 32. Nilai ini sesuai dengan jumlah elemen / batang yang ada dan digunakan sebagai representasi nilai biner. Nilai *loudness* dan *pulse rate* diambil sama, yaitu sebesar 0,1.

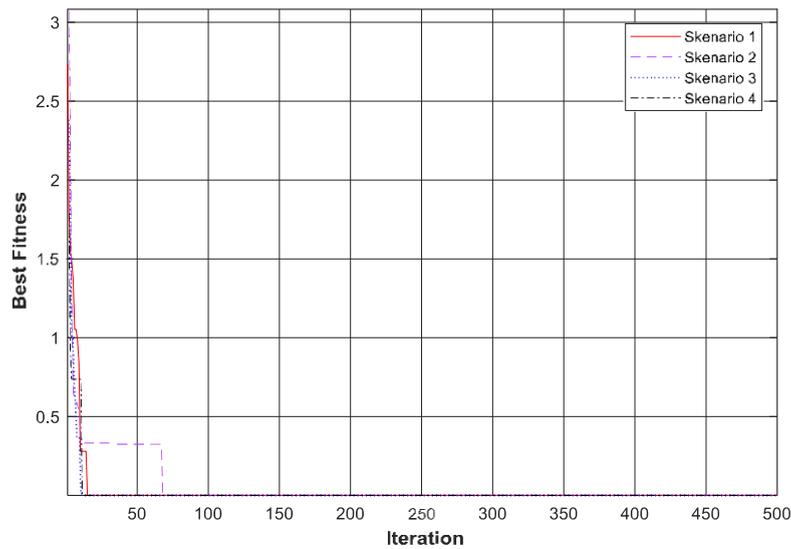
**Tabel 2.** Variabel optimasi dengan menggunakan BBA

Variabel optimasi	Nilai
Maksimum iterasi	500
Jumlah partikel	32
Jumlah variabel	32
<i>Loudness</i>	0,1
<i>Pulse rate</i>	0,1

**Tabel 3.** Hasil vektor angka biner untuk masing-masing elemen

Skenario	Hasil angka biner yang ditunjukkan
S1	[0 0 0 0 0 1 0]
S2	[0 0 0 0 0 0 0 1 0 1]
S3	[0 0 1 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]
S4	[0 1 1 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 1]

Tabel 3 menunjukkan hasil vektor angka biner untuk masing-masing skenario. Untuk skenario pertama, vektor angka biner menunjukkan nilai [0 0 0 0 0 1 0]. Pada kolom-6, angka biner menunjukkan nilai 1, yang berarti bahwa terjadi penurunan kekakuan/kerusakan pada elemen ke-6. Sama halnya pada skenario kedua, vektor angka biner menunjukkan [0 0 0 0 0 0 0 1 0 1], angka biner 1 ditunjukkan pada kolom 8 dan 32, yang menunjukkan bahwa elemen 8 dan 32 mengalami penurunan kekakuan/kerusakan. Pada skenario ketiga dan keempat, vektor angka biner menunjukkan [0 0 1 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0] dan [0 1 1 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1], yang berarti bahwa terjadi kerusakan pada elemen 3,8,10 dan 15 untuk skenario ketiga dan elemen 2,3,8,10,15,22,25,32 pada skenario keempat.



**Gambar 5.** Penurunan nilai fitness untuk tiap iterasi

Gambar 5 menunjukkan penurunan nilai fitness untuk tiap iterasi, dapat terlihat bahwa solusi yang didapatkan konvergen untuk seluruh skenario kerusakan dan solusi yang didapatkan dapat mencapai kekonvergenan dengan kurang dari 100 iterasi. Hal ini menunjukkan bahwa BBA memiliki kemampuan yang baik untuk mendapatkan solusi yang optimum dengan jumlah iterasi yang sedikit (<100 dari 500 iterasi maksimum yang ditetapkan).

## 7. KESIMPULAN

Penelitian ini membahas teknik deteksi kerusakan pada struktur rangka batang ruang dengan 32-elemen/batang. Teknik deteksi kerusakan yang digunakan adalah gabungan dari BBA dan konsep *euclidean distance* dimana *euclidean distance* digunakan untuk membandingkan dua vektor yang merupakan vektor frekuensi natural analisis dan frekuensi natural struktur aktual (yang mengalami kerusakan) sedangkan BBA digunakan untuk mencari lokasi kerusakan dari struktur rangka batang ruang tersebut dengan memanfaatkan nilai biner yang memrepresentasikan ada atau tidaknya kerusakan pada suatu elemen. Terdapat berbagai skenario kerusakan yang ditinjau, mulai dari kerusakan tunggal, kerusakan ganda, hingga kerusakan pada beberapa elemen/batang. Berdasarkan hasil yang didapatkan, gabungan antara BBA dan konsep *Euclidean Distance* dapat dengan akurat menentukan lokasi elemen yang mengalami kerusakan pada struktur rangka batang ruang tersebut. Solusi konvergen yang didapatkan kurang dari 100 iterasi, hal ini juga menggambarkan keefektifan dari BBA sebagai salah satu algoritma optimasi untuk variabel biner.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bezerra, L.M.; Freitas, C.A.S.; Matias, W.T. dan Nagato, Y. (2009). "Increasing load capacity of steel space trusses with end-flattened connections". *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 65, 2197-2206.
- Burgos, D.A.T., Vargas, R.C.G., Pedraza, C., Agis, D. dan Pozo, F. (2020). "Damage identification in structural health monitoring: a brief review from its implementation to the use of data-driven applications". *Sensors*, Vol. 20, 733.
- Dokmanic, R. Parhizkar, J. Ranieri dan M. Vetterli. (2015). "Euclidean Distance Matrices: Essential theory, algorithms, and applications". *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 32, No. 6, pp. 12-30.
- Frans, R. dan Arfiadi, Y. (2024). "Damage detection in space truss structures using a third-level approach". *Discover Civil Engineering*, 1:13.
- Freitas, C.A.S., Silva, V.W., Bezzerra, L.M., Junior, F.F.S.M., Neto, V.C.P. dan Ribeiro, B.A.T. (2019). "Experimental analysis of space trusses with typical connections reinforced with steel and sisal resin spacers". *Advanced Steel Construction*, Vol. 15, No. 4, 398-405.
- Junnah, M. dan Humaira, N. (2019). "Implementasi metode euclidean distance untuk ekstraksi fitur jarak pada citra skeleton". *Jurnal Ilmiah Informatika Komputer Volume*, Vol. 24, No. 2, 134-139.
- MathWorks. (2023). *MATLAB: Primer, Version 9.14*. The Mathworks, Inc.
- MathWorks. (2021). *MATLAB: Programming Fundamental, Version 9.10*. The Mathworks, Inc.
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M. dan Yang, X.S. (2014). "Binary bat algorithm". *Neural Computing and Applications*, Vol. 25, 663-681.
- Nabilla, V.H., Fitri, D., Permana, D., dan Fitri, F. (2023). "Comparison of haversine and euclidean distance formulas for calculating distance between regencies in west sumatra". *UNP Journal Of Statistics And Data Science*, Vol

1, No.3, 120-125.

- Rytter, A, *Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures*. Ph.D. Thesis, University of Aalborg, Aalborg, Denmark, 1993.
- Sekkarini, C.E., Sumarmi, Bachri, S., Taryana, D., dan Giofandi, E.A. (2022). "Euclidean Distance Modeling of Musi River in Controlling the Dengue Epidemic Transmission in Palembang City". *Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences*, Vol. 10(G), 422-429.
- Sohn, H. dan Farrar, C.R. (2001). "Damage diagnosis using time series analysis of vibration signals". *Smart Mater. Struct.* Vol. 10, 446-451.
- Wilson, C.L., Lankar, K., Roy, S., Kopsaftopoulos, F., dan Chang F-K. (2018). *Structural Health Monitoring of Composites*. *Comprehensive Composite Materials II*, Vol 7, pp 382-407.
- Yang, X.S. (2010). *Nature-inspired optimization algorithms*. Elsevier, London.