

Deteksi Kerusakan Struktur Dengan Menggunakan Metode *Modal Assurance Criterion – Differential Evolution* (MAC-DE)

Rivaldo Siahaya^{[1]*}, Yoyong Arfiadi^[1], Ade Lisantono^[1], Junaedi Utomo^[1]

^[1] Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, 55281, Indonesia

Email: siahayarivaldo130@gmail.com

*) Corresponding Author

Received: 21 July 2025; Revised: 24 March 2026; Accepted: 24 June 2026

How to cited this article:

Siahaya, R., Arfiadi, Y., Lisantono, A., Utomo, J., (2026). Deteksi Kerusakan Struktur Dengan Menggunakan Metode *Modal Assurance Criterion – Differential Evolution* (MAC-DE). Jurnal Teknik Sipil, 22(2), 247–261. <https://doi.org/10.28932/jts.v22i2.12770>

ABSTRAK

Dalam bidang teknik sipil, deteksi kerusakan struktur menjadi perhatian penting seiring meningkatnya tuntutan terhadap keselamatan dan efisiensi biaya pemeliharaan. Umumnya, proses identifikasi kerusakan struktur terbagi ke dalam empat level, yaitu: (1) mendeteksi keberadaan kerusakan, (2) menentukan bagian atau elemen yang terdampak, (3) mengestimasi letak serta penurunan kekakuan atau kekuatan pada elemen yang rusak, dan (4) memperkirakan masa pakai yang tersisa dari elemen tersebut. Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan mengevaluasi metode deteksi kerusakan struktur pada level ketiga melalui kombinasi metode *Modal Assurance Criterion* dan algoritma *Differential Evolution* (MAC-DE), sehingga mampu menentukan lokasi serta besaran penurunan kekakuan elemen yang mengalami kerusakan secara akurat. Sebelum penerapan MAC-DE, digunakan terlebih dahulu pendekatan Vektor Beban Penentu Lokasi Kerusakan (VBPLK) untuk mengidentifikasi area yang berpotensi mengalami degradasi. Dua model struktur portal dua dimensi diuji melalui berbagai kasus kerusakan untuk mengevaluasi efektivitas metode yang diusulkan. Berdasarkan hasil simulasi numerik, pendekatan MAC-DE terbukti mampu mengidentifikasi secara tepat posisi serta tingkat penurunan kekuatan dan kekakuan pada elemen struktur yang mengalami kerusakan.

Kata kunci: Deteksi Kerusakan Struktur, *Modal Assurance Criterion*, *Differential Evolution*.

ABSTRACT. *Structural Damage Detection Using the Modal Assurance Criterion – Differential Evolution (MAC-DE) Method.* In the field of civil engineering, structural damage detection has become an important concern due to increasing demands for safety and cost-efficient maintenance. In general, the process of structural damage identification is divided into four levels: (1) detecting the presence of damage, (2) determining the affected components or elements, (3) estimating the location and the reduction in stiffness or strength of the damaged elements, and (4) predicting the remaining service life of those elements. This study aims to develop and evaluate a structural damage detection method at the third level by combining the *Modal Assurance Criterion* and the *Differential Evolution* algorithm (MAC-DE), enabling accurate identification of both the location and the magnitude of stiffness reduction in damaged structural elements. Prior to the implementation of MAC-DE, the *Damage Location Vector* approach (VBPLK) is first employed to identify areas potentially experiencing degradation. Two two-dimensional portal frame models are tested under various damage scenarios to assess the effectiveness of the proposed method. Based on numerical simulation results, the MAC-DE approach is proven to accurately identify both the position and the degree of strength and stiffness reduction in damaged structural elements.

Keywords: *Structural Damage Detection*, *Modal Assurance Criterion*, *Differential Evolution*.

1. PENDAHULUAN

Deteksi kerusakan struktural umumnya dibagi menjadi empat tahap identifikasi. Tahap pertama adalah mendeteksi keberadaan kerusakan pada struktur. Tahap kedua berfokus pada penentuan lokasi elemen yang mengalami kerusakan. Tahap ketiga bertujuan untuk memperkirakan posisi kerusakan serta besarnya penurunan kekuatan atau kekakuan elemen yang rusak. Tahap terakhir adalah memperkirakan sisa umur layanan elemen yang mengalami kerusakan (Frans dan Arfiadi, 2019).

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan metode deteksi kerusakan hingga tingkat ketiga. Frans dan Arfiadi (2017) mengusulkan metode MAC-FMSO yang mengkombinasikan *Modal Assurance Criterion* (MAC) dan *Fast Multi-Swarm Optimization* (FMSO). Metode ini menggunakan teknik tingkat kedua seperti mode *shape curvature*, VBPLK, dan *strain energy* untuk menentukan lokasi kerusakan, dilanjutkan dengan optimasi untuk memperkirakan penurunan kekakuan elemen. Selanjutnya, Frans dan Arfiadi (2019) mengembangkan metode MAC-FA yang menggabungkan MAC dengan *Firefly Algorithm* untuk mendeteksi kerusakan struktur hingga tingkat ketiga secara akurat.

Beberapa penelitian lain memanfaatkan algoritma *Differential Evolution* (DE) dalam deteksi kerusakan struktur. Seyedpoor dkk (2016) mengusulkan pendekatan dua tahap yang mengombinasikan metode FBDPI untuk menentukan elemen kandidat yang rusak dan DE untuk mengidentifikasi lokasi serta tingkat kerusakan secara akurat. Penelitian lain menunjukkan bahwa DE juga efektif digunakan dalam identifikasi kerusakan struktur berdasarkan respons dinamis struktur (Fallahian, dkk., 2018), serta dalam pendekatan multi-tahap untuk meningkatkan efisiensi komputasi dalam proses deteksi kerusakan (Dinh-Cong, dkk., 2017). Selain itu, DE merupakan algoritma optimasi yang efektif dalam menentukan lokasi dan tingkat kerusakan struktur dengan akurasi yang tinggi (Seyedpoor, Yazdanpanah, 2015).

Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, penelitian ini menawarkan metode deteksi kerusakan struktural pada tahap ketiga dengan menggunakan pendekatan MAC-DE. Metode ini terdiri dari dua langkah utama. Langkah pertama, metode Vektor Beban Penentu Lokasi Kerusakan (VBPLK) digunakan untuk mengidentifikasi elemen-elemen yang berpotensi mengalami kerusakan. Langkah kedua, metode MAC-DE diterapkan untuk mengestimasi besarnya penurunan kekuatan atau kekakuan elemen yang telah teridentifikasi sebagai rusak.

Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan mengevaluasi metode deteksi kerusakan struktur tingkat ketiga dengan mengkombinasikan *Modal Assurance Criterion* (MAC) dan algoritma *Differential Evolution* (DE). Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengidentifikasi lokasi elemen struktur yang mengalami kerusakan menggunakan metode VBPLK, serta (2) mengestimasi secara akurat persentase penurunan kekakuan elemen yang

teridentifikasi rusak melalui pendekatan optimasi MAC-DE. Keefektifan metode yang diusulkan diuji melalui simulasi numerik pada struktur portal dua dimensi dengan berbagai skenario kerusakan.

1.1 Vektor Beban Penentu Lokasi Kerusakan (VBPLK)

Vektor Beban Penentu Lokasi Kerusakan (VBPLK) merupakan salah satu metode identifikasi kerusakan struktur tingkat dua yang pertama kali diperkenalkan oleh Bernal pada tahun 2002. Teknik ini dikenal memiliki ketelitian tinggi dalam mengidentifikasi elemen struktur yang mengalami degradasi. Konsep dasarnya menggunakan pendekatan matriks fleksibilitas untuk mendeteksi lokasi kerusakan pada struktur.

Dalam penerapannya, metode VBPLK memanfaatkan serangkaian konfigurasi beban yang diformulasikan sebagai vektor beban khusus. Vektor ini dirancang sedemikian rupa sehingga ketika diterapkan pada titik pengukuran (sensor), elemen yang rusak akan menunjukkan respons tegangan mendekati nol. Meskipun demikian, akibat pengaruh ketidakakuratan data pengukuran dan perhitungan numerik, nilai tersebut tidak selalu tepat nol, melainkan hanya hampir nol. Fenomena ini justru menjadi dasar untuk memperkirakan dengan lebih akurat lokasi kerusakan pada struktur.

Tahapan utama dalam pelaksanaan metode VBPLK mengacu pada prosedur yang dikembangkan oleh Bernal (2002):

1. Menentukan seberapa besar perubahan pada matriks fleksibilitas sebagai dampak dari kerusakan elemen struktur.

$$\Delta F = F_u - F_d \quad (1)$$

Keterangan:

ΔF : perubahan pada matriks fleksibilitas.

F_u : matriks fleksibilitas pada kondisi sebelum terjadi kerusakan.

F_d : matriks fleksibilitas pada kondisi setelah terjadinya kerusakan.

2. Melakukan dekomposisi *singular value* (SVD) terhadap matriks ΔF .

$$\Delta f = U \begin{bmatrix} S_1 & 0 \\ 0 & S_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Dalam analisis menggunakan VBPLK, nilai singular terkecil kedua (S_2) biasanya sangat kecil dan dalam kondisi ideal, nilainya mendekati nol. VBPLK diperoleh dari vektor yang berada dalam ruang null dari matriks ΔF dengan tahapan untuk menentukan vektor tersebut:

- a. Terapkan vektor sebagai beban eksternal pada model struktur dalam keadaan utuh (belum mengalami kerusakan).
- b. Lakukan perhitungan tegangan normal yang timbul pada masing-masing elemen struktur akibat beban tersebut.

- c. Identifikasi nilai maksimum dari tegangan karakteristik C_j pada elemen-elemen struktur.

$$S_{vn} = \sqrt{\frac{S_i C_i^2}{S_q C_q^2}} \quad (3)$$

dengan

$$S_q S_q^2 = \max(S_i S_i^2) \text{ for } i = 1: m \quad (4)$$

- d. Kondisi nilai $S_{vn} \leq 0,20$ menunjukkan bahwa vektor memenuhi syarat sebagai VBPLK.
- e. Tentukan nilai tegangan yang telah dinormalisasi untuk setiap elemen dengan menggunakan Persamaan (5).

$$ns_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_{\max}} \quad (5)$$

3. Normalisasi Tegangan Kumulatif

Setiap beban yang dihasilkan dari analisis diterapkan sebagai beban statis pada model struktur yang tidak mengalami kerusakan. Hasil analisis menunjukkan gaya-gaya yang bekerja pada setiap elemen struktur termasuk gaya aksial (normal), gaya geser, dan momen. Selanjutnya dari gaya-gaya ini, tegangan normal dan momen dihitung untuk setiap ujung batang sebagai bagian dari proses evaluasi struktural.

$$\sigma_1 = \frac{N}{A} \quad (6)$$

$$\sigma_2 = \frac{My}{I} \quad (7)$$

N merupakan gaya aksial, A adalah area penampang lintang, M menyatakan momen lentur, y adalah jarak dari sumbu netral ke pusat massa penampang, dan I adalah momen inersia penampang. Tegangan total pada salah satu sisi ujung elemen dapat diperoleh dengan menjumlahkan dua komponen tegangan, yaitu σ_1 dan σ_2 . Untuk menghitung total tegangan pada setiap elemen secara keseluruhan, digunakan pendekatan SRSS (*Square Root of the Sum of Squares*) pada Persamaan (8).

$$\sigma_{\text{SRSS}} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (8)$$

Tegangan total yang telah dinormalisasi selanjutnya dapat dihitung. Apabila sebuah elemen memiliki tegangan total yang dinormalisasi sama dengan atau hampir nol, maka elemen itu berpotensi mengalami kerusakan.

1.2 Modal Assurance Criterion (MAC)

Pada awalnya, MAC dikembangkan untuk menilai kualitas vektor mode yang diperoleh melalui pengujian eksperimental, dengan menganalisis fungsi respons frekuensi (Allemang, 2003). MAC berfungsi sebagai ukuran statistik yang membandingkan vektor mode hasil estimasi

dengan vektor mode referensi. Nilai MAC berada dalam rentang 0 sampai 1, dengan nilai mendekati nol mengindikasikan ketidaksesuaian antara vektor mode, sedangkan nilai yang mendekati satu menunjukkan tingkat kecocokan yang sangat tinggi. Dalam konteks penelitian ini, MAC dimanfaatkan untuk membandingkan bentuk mode yang diprediksi dari model struktur dengan bentuk mode dari struktur yang telah mengalami kerusakan. Nilai MAC dijelaskan lebih lanjut sebagai berikut :

$$MAC_i = \frac{|\{\phi_a\}_i^T \{\phi_d\}_i|^2}{(\{\phi_a\}_i^T \{\phi_a\}_i)(\{\phi_d\}_i^T \{\phi_d\}_i)} \quad (9)$$

Keterangan: $\{\phi_a\}_i$ adalah *mode shape* ke- i yang telah diprediksi dari struktur, sedangkan $\{\phi_d\}_i$ adalah *mode shape* nyata dari struktur yang mengalami kerusakan. Apabila *mode shape* yang dimiliki serupa, maka nilai MAC adalah 1. Sebaliknya, jika *mode shape* tidak memiliki hubungan sama sekali, nilai MAC adalah 0.

1.3 Differential Evolution (DE)

Differential Evolution (DE) pertama kali diperkenalkan oleh Storn dan Price pada tahun 1997 sebagai metode optimasi berbasis populasi yang efektif dalam menyelesaikan permasalahan optimasi global. Seiring dengan perkembangannya, algoritma ini mengalami berbagai modifikasi dan peningkatan performa, serta telah banyak diterapkan dalam berbagai bidang optimasi rekayasa dalam satu dekade terakhir. DE memiliki beberapa keunggulan yang menjadikannya sebagai algoritma optimasi yang berkualitas:

- Mampu menyelesaikan permasalahan non-linier yang tidak dapat didiferensiasikan dan yang memiliki beberapa titik optimum lokal.
- Dapat berfungsi secara mandiri tanpa bergantung pada program lain untuk menekan biaya pengolahan.
- Sederhana dalam penggunaan dan memerlukan sedikit variabel kontrol, tetapi memiliki dampak yang signifikan terhadap algoritma.
- Dapat mencapai hasil yang konvergen pada titik minimum global setelah beberapa percobaan.

Dalam pelaksanaannya, DE memiliki tiga kegiatan utama untuk mencapai hasil yang maksimal, yaitu:

1. Mutasi

Fase mutasi dalam algoritma DE dilaksanakan dengan cara memilih tiga individu dari populasi secara acak, di mana ketiganya harus saling berbeda. Ketiga kelompok selanjutnya diintegrasikan dengan menggunakan Persamaan (10) untuk menghasilkan vektor mutasi.

$$V_{i,G+1} = X_{r1,G} + F(X_{r2,G} - X_{r3,G}) \quad (10)$$

G menyatakan indeks generasi, x merepresentasikan vektor populasi, sedangkan $r1$, $r2$, dan $r3$

merupakan bilangan acak yang dipilih berdasarkan ukuran populasi sebagai parameternya, dan F adalah konstanta yang berperan sebagai faktor skala.

2. Crossover

Persilangan dilaksanakan dengan tujuan untuk meningkatkan variasi suatu vektor. Pertama, vektor uji dibuat sesuai Persamaan (11) sampai Persamaan (13).

$$uji, G + 1 = (u1i,G+1, u2i,G+1, u3i,G+1, \dots, uDi,G+1) \quad (11)$$

$$uji, G + 1 \text{ if } (randb(j) \leq CR \text{ or } j = rnbr(i)) \quad (12)$$

$$uji, G + 1 \text{ if } (randb(j) \leq CR \text{ or } j \neq rnbr(i)) \quad (13)$$

3. Selection

Agar dapat memutuskan apakah vektor uji perlu dilanjutkan ke generasi berikutnya, penting untuk membandingkan *fitness value* dari populasi yang sudah ada. Apabila vektor uji menghasilkan nilai yang lebih baik maka vektor tersebut akan menggantikan salah satu populasi yang ada, namun jika nilainya tidak lebih baik dibandingkan populasi asli vektor uji akan dihapus dan populasi asli dipertahankan.

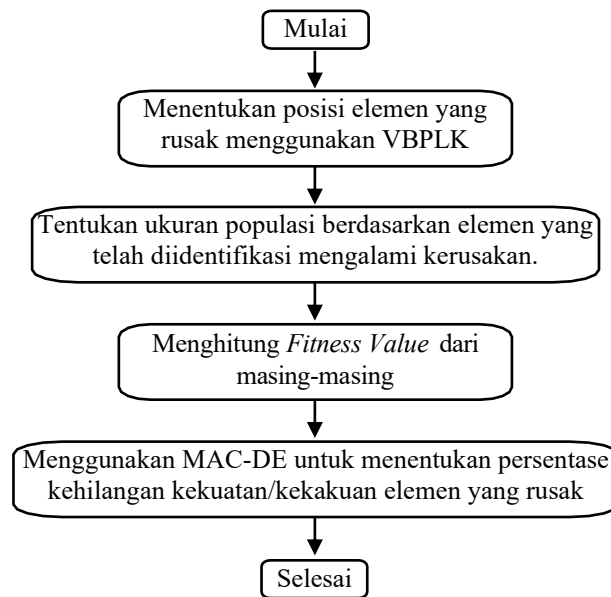
1.4 Modal Assurance Criterion - Differential Evolution (MAC-DE)

Algoritma MAC-DE berlandaskan pada penggabungan dua pendekatan: pendekatan MAC dan algoritma optimasi DE. Untuk mengidentifikasi kerusakan pada elemen struktur hingga tingkat 3, metode MAC-DE perlu menjalani dua langkah analisis. Langkah awal adalah pelaksanaan metode identifikasi kerusakan struktur tingkat 2. VBPLK digunakan pada struktur percobaan untuk menentukan posisi elemen struktur yang menunjukkan indikasi adanya cacat. Setelah lokasi ini ditentukan, algoritma MAC-DE digunakan untuk mengukur tingkat atau persentase penurunan kekuatan atau kekakuan dari elemen-elemen struktur tersebut.

Dalam konteks ini, fungsi tujuannya adalah nilai MAC dari perbedaan variabilitas antara getaran yang sebenarnya dan yang diprediksi. Karena algoritma optimasi (DE) yang diterapkan bertujuan untuk meminimalkan *fitness value* yang dihasilkan, maka fungsi objektif disesuaikan sehingga dapat menghasilkan *fitness value* Persamaan (14).

$$\text{Fitness} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \text{MAC}_i} \quad (14)$$

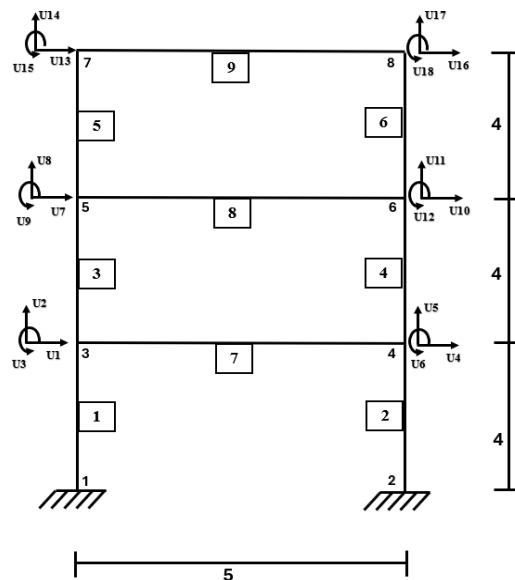
Dimana n merujuk pada jumlah mode yang digunakan dalam proses perhitungan. Apabila terdapat perbedaan antara mode yang diprediksi dan yang sebenarnya, *fitness value* akan mendekati nilai tak terhingga. Gambar 1 adalah diagram alir metode MAC-DE.



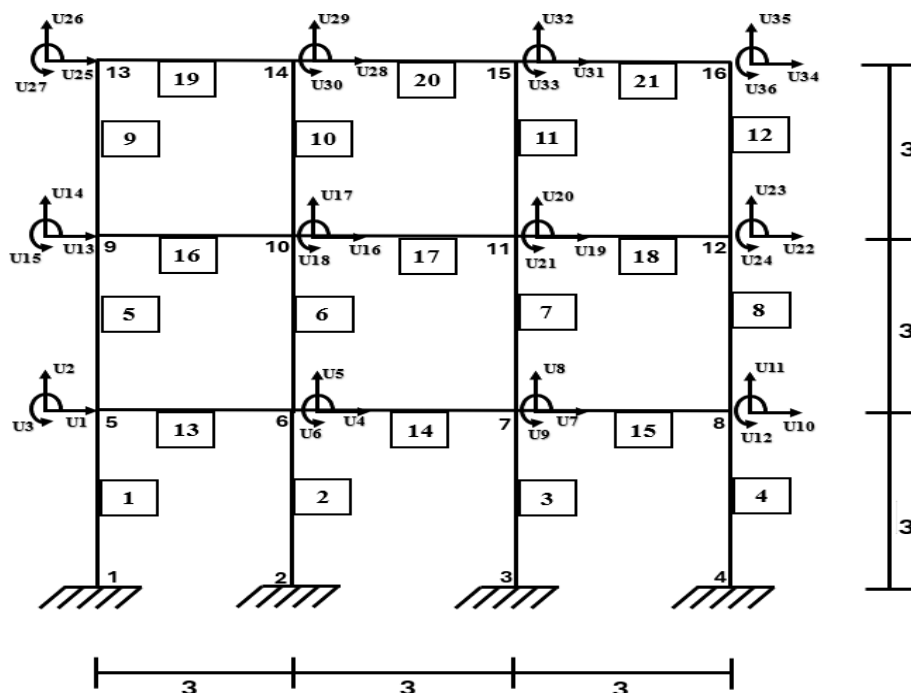
Gambar 1. Diagram Alir MAC-DE

2. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan dua tipe struktur rangka portal. Struktur pertama yang digunakan adalah rangka portal dengan 9 batang dan total 18 derajat kebebasan seperti pada Gambar 2. Struktur kedua yang digunakan adalah struktur rangka portal 21 batang dan total 36 derajat kebebasan pada Gambar 3, yang diadaptasi dari penelitian Yudhantha (2021). Dimensi dari kedua struktur terdapat pada Tabel 1. Program REALIND 2D yang dikembangkan oleh Arfiadi (2023) digunakan untuk analisis struktur.



Gambar 2. Rangka Portal 9 Batang



Gambar 3. Rangka Portal 21 Batang

Tabel 1. Dimensi Struktur Portal Bidang 9 Batang dan 21 Batang

Uraian	Dimensi
Luas Penampang Balok	0,14 m ²
Luas Penampang Kolom	0,16 m ²
Momen Inersia Balok	0,0019 m ⁴
Momen Inersia Kolom	0,0021 m ⁴
Modulus Elastisitas	2.35 x 10 ² kN/m ²

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Dasar Penentuan Tingkat Penurunan Kekakuan

Dalam penelitian ini, presentase penurunan kekakuan dan pemilihan beberapa elemen struktur, diasumsikan sebagai skenario pengujian untuk mengevaluasi kinerja metode deteksi kerusakan yang digunakan. Melalui pendekatan ini, metode VBPLK digunakan untuk mengidentifikasi elemen-elemen kandidat yang memiliki nilai tegangan kumulatif kecil. Selanjutnya, elemen-elemen tersebut dianalisis menggunakan metode MAC-DE untuk menentukan elemen yang benar-benar mengalami kerusakan serta mengestimasi persentase penurunan kekakuannya.

3.2 Dasar Penentuan Parameter *Differential Evolution* (DE)

Parameter DE yang diterapkan mencakup jumlah populasi = 50, faktor skala = 0,5, *crossover* = 0,9, serta total iterasi = 1000. Ukuran populasi sebesar 50 digunakan untuk memastikan keberagaman solusi dalam ruang pencarian sehingga proses eksplorasi global tetap

terjaga dan risiko konvergensi prematur dapat diminimalkan, dengan tetap mempertimbangkan efisiensi komputasi. Faktor skala sebesar 0,5 dipilih sebagai nilai moderat yang memungkinkan proses mutasi berlangsung stabil, sehingga tercapai keseimbangan antara kemampuan eksplorasi dan kestabilan konvergensi. Tingkat *crossover* sebesar 0,9 diterapkan untuk meningkatkan intensitas rekombinasi antar individu dalam populasi, sehingga pertukaran informasi solusi menjadi lebih efektif dan peluang pencapaian optimum global semakin besar. Jumlah iterasi maksimum sebanyak 1000 generasi ditetapkan untuk memberikan ruang evolusi yang memadai agar proses optimasi dapat mencapai kondisi konvergen secara konsisten dan menghasilkan estimasi parameter yang stabil.

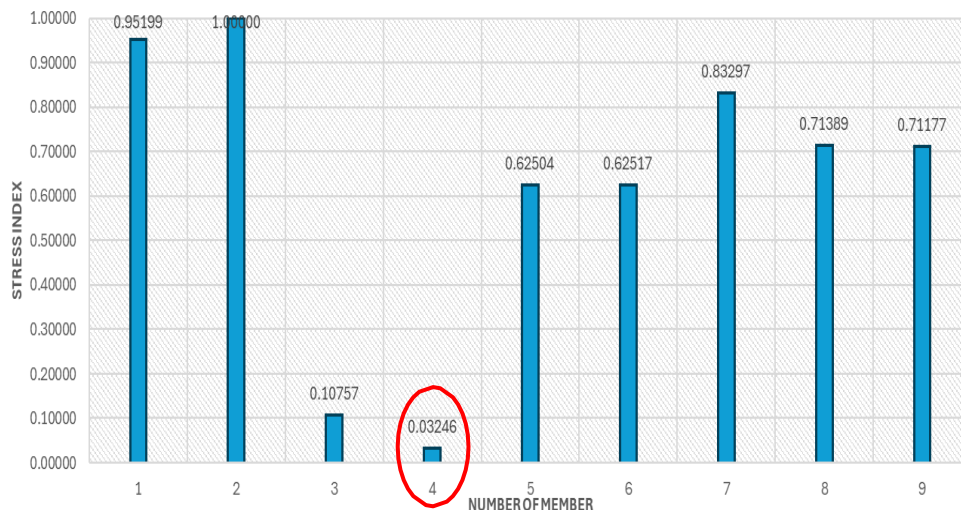
3.3 Kasus 1: Struktur Portal Bidang 9 Batang

Pada kasus pertama rangka portal Gambar 2, ada 3 kondisi kerusakan yang diasumsikan: Kondisi 1: Skenario pertama merupakan kerusakan tunggal, di mana hanya satu elemen struktur mengalami penurunan kekakuan, yaitu kolom (4), yang mengalami penurunan kekakuan sebesar 50% dari kondisi awalnya. Kondisi 2: Skenario kedua merupakan kerusakan ganda, di mana dua elemen struktur mengalami penurunan kekakuan, yaitu kolom (3) dan balok (7), masing-masing dengan tingkat reduksi kekakuan yang berbeda, yaitu 35 % dan 40 %. Kondisi 3: Skenario ketiga merupakan kerusakan ganda pada beberapa elemen, di mana kolom (1), kolom (5), dan balok (8) mengalami penurunan kekakuan secara simultan dengan tingkat penurunan yang bervariasi yaitu 25%, 30%, 35%.

Langkah pertama, VBPLK dimanfaatkan untuk menentukan lokasi elemen struktural yang mengalami kerusakan. Untuk kondisi 1, hasil VBPLK terdapat pada Tabel 2 dan Gambar 4 memperlihatkan grafik setelah pelaksanaan VBPLK pada struktur tersebut. Terlihat bahwa tegangan total pada kolom 4 yaitu sebesar 0,03246 hal ini mengindikasikan bahwa VBPLK telah berhasil diterapkan. Pada tahap kedua, MAC-DE digunakan untuk mengukur pengurangan kekakuan dalam kondisi 1. Tabel 3 memperlihatkan hasil dari MAC-DE untuk kondisi 1.

Tabel 2. Hasil Perhitungan VBPLK Kondisi 1

Parameter	Simbol	Nilai (i)	Nilai (j)
Luas Penampang	A	0,16	0,16
Momen Inersia	I	0,00	0,00
Gaya Normal	N	-0,19	0,19
Momen Lentur	M	0,02	0,00
Tegangan	σ	-1,18	1,18
Penjumlahan Tegangan	$\sigma_i + \sigma_j$	-0,55	1,18
σ_{RSS}		1,30	
σ Normalisasi		0,03246	

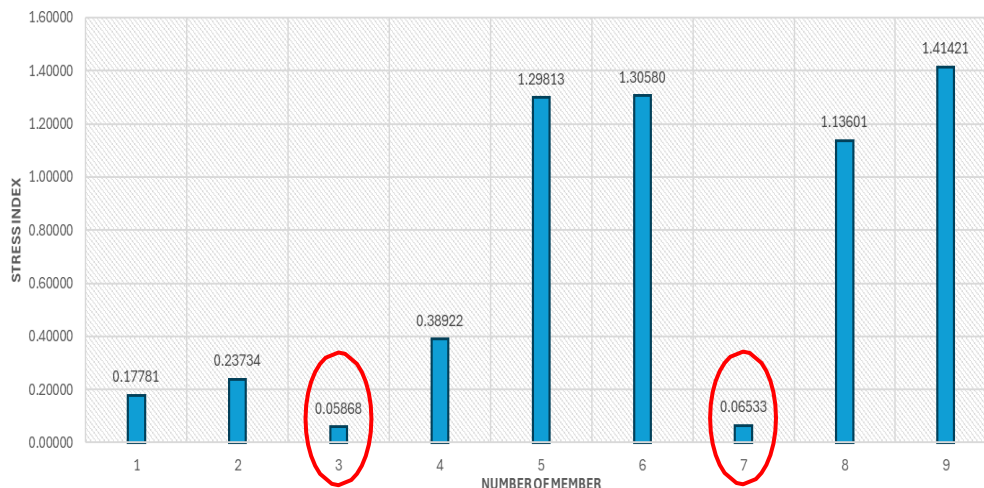


Gambar 4. Grafik VBPLK Kondisi 1 Struktur Portal Bidang 9 Batang

Tabel 3. Analisis MAC-DE Kondisi 1 Struktur Portal Bidang 9 Batang

Batang	Penurunan Kekakuan	
	Skenario 1	MAC-DE
4	50%	0,50000

Pada kondisi 2, perhitungan serupa diterapkan untuk mengidentifikasi nilai pengurangan kekakuan pada elemen-elemen yang telah dikenali mengalami kerusakan dalam hal ini nilai tegangan ternormalisasi pada kolom 3 dan balok 7 sebesar 0,05868 dan 0,06533. Gambar 5 dan Tabel 4 menyajikan hasil analisis untuk VBPLK dan MAC-DE dalam kondisi 2.

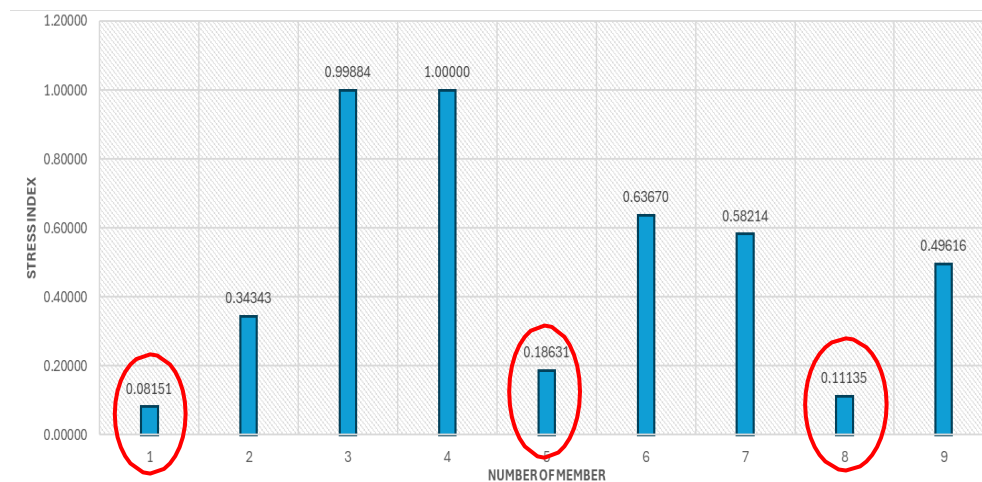


Gambar 5. Grafik VBPLK Kondisi 2 Struktur Portal Bidang 9 Batang

Tabel 4. Analisis MAC-DE Kondisi 2 Struktur Portal Bidang 9 Batang

Batang	Penurunan Kekakuan	
	Skenario 2	MAC-DE
3	35%	0,35000
7	40%	0,40000

Kondisi 3 merupakan kondisi kerusakan ganda yang terjadi pada struktur portal bidang, dimana kekakuan pada kolom 1, kolom 5, dan balok 8 diasumsikan mengalami penurunan masing-masing sebesar 25%, 30%, dan 35%. Gambar 6 memperlihatkan grafik untuk kondisi 3 setelah penerapan VBPL. Hasil menunjukkan bahwa nilai tegangan ternormalisasi dari elemen-elemen tersebut adalah 0,08151, 0,18631 dan 0,11135. Ini menunjukkan bahwa kolom 1, kolom 5, dan balok 8 telah terdeteksi terjadi kerusakan. Tabel 5 memperlihatkan perbandingan antara nilai pengurangan kekakuan yang diasumsikan dan pendekatan MAC-DE, dengan hasil menunjukkan tidak ada perbedaan yang berarti antara nilai keduanya.



Gambar 6. Grafik VBPLK Kondisi 3 Struktur Portal Bidang 9 Batang

Tabel 5. Analisis MAC-DE Kondisi 3 Struktur Portal Bidang 9 Batang

Batang	Penurunan Kekakuan	
	Skenario 3	MAC-DE
1	25%	0,25000
5	30%	0,30000
8	35%	0,35000

3.4 Kasus 2: Struktur Portal Bidang 21 Batang.

Pada kasus kedua rangka portal Gambar 3, ada 3 kondisi kerusakan yang direncanakan:

Kondisi 1: balok 21 menunjukkan penurunan kekakuan 50%.

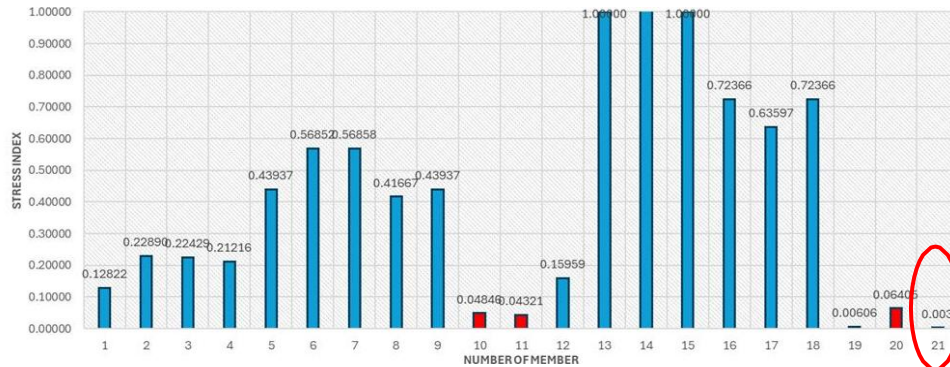
Kondisi 2: kekakuan kolom 2 dan balok 18 mengalami penurunan 30% dan 45%.

Kondisi 3: kekakuan kolom 6, balok 16 dan 20 mengalami penurunan 20%, 25% dan 30%.

Kondisi 1 menggambar *single damage*, kondisi 2 menggambarkan *double damage*, dan kondisi 3 menggambarkan *triple damage*.

Gambar 7 menunjukkan grafik tegangan normalisasi untuk metode VBPLK pada kondisi 1 yaitu untuk balok 21 memiliki nilai sebesar 0,003 dan Tabel 6 menunjukkan hasil analisis MAC-DE pada kondisi 1 didapatkan nilai penurunan kekakuan sebesar 0,50000 % yang mana hasil ini

menunjukkan kesesuaian dengan penurunan kekakuan yang telah ditentukan. Dalam hal ini metode VBPLK dan MAC-DE berhasil digunakan untuk mengidentifikasi elemen yang rusak dan persentase penurunan kekakuan yang terjadi.



Gambar 7. Grafik VBPLK Kondisi 1 Struktur Portal Bidang 21 Batang

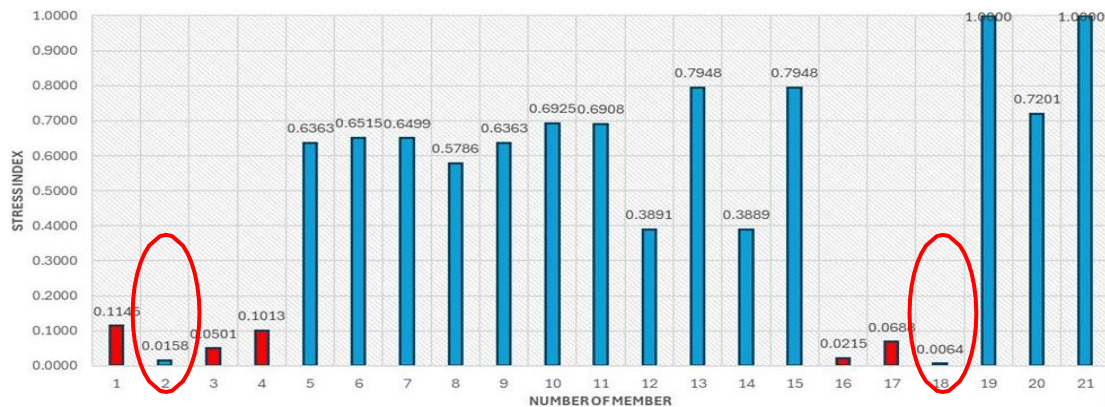
Tabel 6. Analisis MAC-DE Kondisi 1 Struktur Portal Bidang 21 Batang

Batang	Penurunan Kekakuan	
	Skenario 1	MAC-DE
21	50%	0,50000

Kondisi 2 yang ditunjukkan pada Gambar 8 juga menunjukkan pola yang sama, dapat dilihat bahwa selain batang 2 dan batang 18 yang di asumsikan rusak, pada batang 1,3,4,16 dan 17 juga memiliki nilai tegangan normalisasi kecil.

Hasil yang akurat juga diperoleh dengan menggunakan MAC-DE untuk presentase penurunan kekakuan pada elemen yang rusak yang terdapat pada Tabel 7. Perbedaan hasil antara VBPLK dan MAC-DE dapat dijelaskan dari sisi sensitivitas metode terhadap distribusi respons struktur. Metode VBPLK memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap perubahan respons lokal khususnya yang berkaitan dengan distribusi gaya dalam atau parameter turunan lainnya. Sensitivitas yang tinggi ini juga menyebabkan metode VBPLK rentan terhadap *overestimate* lokasi kerusakan, dimana elemen-elemen yang berdekatan atau memiliki keterkaitan struktural dengan elemen yang benar-benar rusak dapat ikut terindikasi mengalami kerusakan.

Dalam kondisi ini, meskipun penurunan kekakuan secara aktual hanya diberikan pada batang 2 dan 18, metode VBPLK juga mengindikasikan batang 1, 3, 4, 16, dan 17 sebagai elemen yang mengalami kerusakan. Hal ini menunjukkan bahwa VBPLK menangkap efek distribusi ulang gaya (*load redistribution*) akibat kerusakan, bukan semata-mata lokasi kerusakan. Untuk metode MAC-DE yang berbasis karakteristik dinamik global cenderung lebih selektif dalam mengidentifikasi elemen yang benar-benar memberikan kontribusi signifikan terhadap perubahan respons struktur.

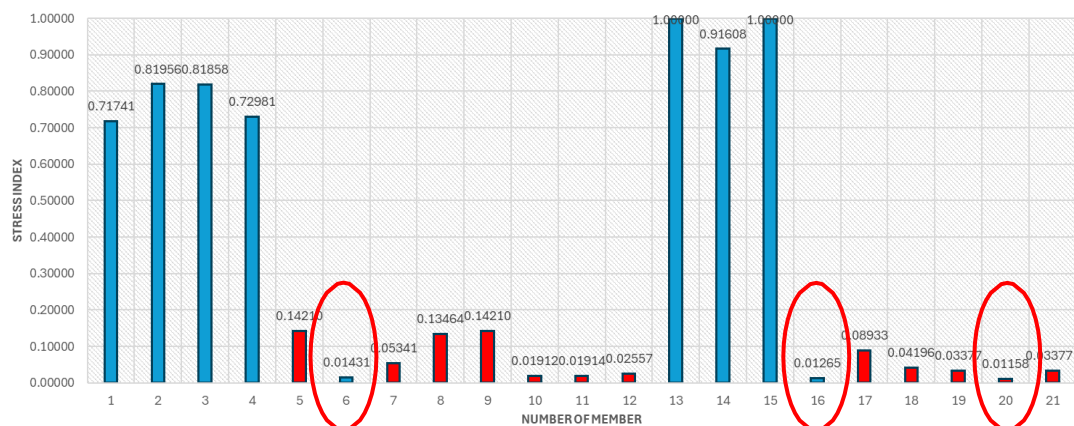


Gambar 8. Grafik VBPLK Kondisi 2 Struktur Portal Bidang 21 Batang

Tabel 7. Analisis MAC-DE Kondisi 2 Struktur Portal Bidang 21 Batang

Batang	Penurunan Kekakuan	
	Skenario 2	MAC-DE
2	30%	0,30000
18	45%	0,45000

Kondisi 3 merupakan kondisi *triple damage* dimana kekakuan kolom 6, balok 16, dan balok 20 diasumsikan mengalami penurunan masing-masing sebesar 20%, 25%, dan 30%. Gambar 9 memperlihatkan grafik untuk kondisi 3 pada kolom 6, balok 16, dan balok 20 setelah penerapan VBPLK. Hasil menunjukkan bahwa nilai tegangan normalisasi dari elemen-elemen ini adalah yang paling rendah. Ini menunjukkan bahwa kolom 6, balok 16, dan balok 20 telah terdeteksi terjadi kerusakan. Tabel 8 memperlihatkan perbandingan antara nilai pengurangan kekakuan yang diasumsikan dan pendekatan MAC-DE. Hasilnya menunjukkan tidak ada perbedaan yang berarti antara nilai pengurangan kekakuan yang diasumsikan dengan nilai pengurangan kekakuan yang diperoleh melalui metode MAC-DE.



Gambar 9. Grafik VBPLK Kondisi 3 Struktur Portal Bidang 21 Batang

Tabel 8. Analisis MAC-DE Kondisi 3 Struktur Portal Bidang 21 Batang

Batang	Penurunan Kekakuan	
	Skenario 3	MAC-DE
6	20%	0,20000
16	25%	0,25000
20	30%	0,30000

4. SIMPULAN

Penerapan metode Vektor Beban Penentu Lokasi Kerusakan (VBPLK) sebagai langkah awal dalam proses deteksi kerusakan struktur hingga tingkatan ketiga terbukti efektif dalam mengidentifikasi elemen-elemen struktur yang mengalami kerusakan.

Pada struktur portal bidang yang terdiri dari 9 batang, metode gabungan *Modal Assurance Criterion - Differential Evolution* (MAC-DE) mampu mengidentifikasi penurunan kekakuan secara akurat, baik untuk kasus kerusakan tunggal (*single damage*), kerusakan ganda (*double damage*), maupun tiga titik kerusakan (*triple damage*).

Evaluasi terhadap struktur portal bidang dengan 21 batang menunjukkan bahwa metode MAC-DE tetap menghasilkan deteksi yang akurat untuk berbagai skenario kerusakan, mencakup *single damage*, *double damage*, dan *triple damage*.

Dengan kemampuannya dalam menentukan lokasi serta estimasi tingkat kerusakan, metode MAC-DE dapat diklasifikasikan sebagai metode deteksi kerusakan struktur tingkat tiga, yang mencakup identifikasi lokasi dan besaran penurunan kekakuan elemen.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Allemang, R. J. (2003). The Modal Assurance Criterion—Twenty Years of Use and Abuse. *Sound and Vibration*, 37(8), 14-23.
- Arfiadi, Y. (2023). REALIN2D: Program Analisis Struktur 2 Dimensi dengan Octave. Penerbit Universitas Atma Jaya Yogyakarta.
- Baker. (2005). Singular Value Decomposition Tutorial. *Applied Mathematics and Computation*, 24, 22.
- Bernal, D. (2002). Load Vectors for Damage Localization. *Journal of Engineering Mechanics*, 128(1), 7-14.
- Frans, R., & Arfiadi, Y. (2017). Structural Damage Detection Using MAC-Fast Multi Swarm Optimization Technique (MAC-FMSO). *MATEC Web of Conferences*.
- Frans, R., & Arfiadi, Y. (2023). Aplikasi Vektor Beban Penentu Lokasi Kerusakan Struktur pada Struktur Portal Rangka Ruang. *Palarch's Journal of Archaeology of Egypt/Egyptology*, 12(2), 172-178.
- Richard Frans dan Yoyong Arfiadi. 2019. Deteksi Kerusakan Struktur Portal Bidang dengan Menggunakan *Modal Assurance Criterion–Firefly Algorithm* (MAC-FA). Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Makassar dan Universitas Atma Jaya Yogyakarta.
- Seyedpoor, S., & Yazdanpanah, O. (2015). Structural Damage Detection by Differential Evolution as a Global Optimization Algorithm. *International Journal of Structural Engineering*, 1(1), 52-62.

- Seyedpoor, S., & Montazer, M. (2016). A Damage Identification Method for Truss Structures Using a Flexibility-Based Damage Probability Index and Differential Evolution Algorithm. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 24(8), 1303-1322
- Yudhanta, A. B. P. (2021). Deteksi Kerusakan Struktur dengan Menggunakan *Modal Assurance Criterion-Symbiotic Organisms Search Algorithm* (MAC-SOS). Universitas Atma Jaya Yogyakarta