

DETEKSI KERUSAKAN STRUKTUR PORTAL BIDANG DENGAN MENGGUNAKAN MODAL ASSURANCE CRITERION-FIREFLY ALGORITHM (MAC-FA)

Richard Frans¹ dan Yoyong Arfiadi²

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Makassar

²Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta

Email: richardfrans.rf@gmail.com

Abstrak: Dewasa ini deteksi kerusakan pada struktur menjadi semakin populer dalam dunia ketekniksipilan. Hal ini dikarenakan dengan sistem deteksi kerusakan struktur yang baik akan mengurangi biaya perawatan pada struktur tersebut. Secara umum, deteksi kerusakan struktur mempunyai 4 tingkatan, yaitu: (1) mendeteksi apakah struktur tersebut mengalami kerusakan atau tidak, (2) menentukan lokasi kerusakan dari struktur tersebut (elemen yang mengalami kerusakan), (3) menentukan lokasi serta memprediksi penurunan kekuatan/kekakuan dari elemen struktur yang mengalami kerusakan, (4) memprediksi sisa umur yang dapat dicapai oleh elemen struktur yang mengalami kerusakan. Penelitian ini membahas deteksi kerusakan struktur untuk tingkatan ketiga. Untuk tujuan tersebut digunakan metode yang disebut dengan Modal Assurance-Criterion-Firefly Algorithm (MAC-FA). Metode ini merupakan penggabungan dari tiga metode yaitu: metode deteksi kerusakan tingkat kedua, Modal Assurance Criterion (MAC) dan Firefly Algorithm (FA). Sedangkan untuk mendeteksi lokasi elemen yang rusak digunakan metode Vektor Beban Penentu Lokasi Kerusakan. Terdapat dua struktur portal bidang yang digunakan untuk mengaplikasikan metode MAC-FA ini dengan beberapa skenario kerusakan struktur. Hasil analisis menunjukkan bahwa metode MAC-FA dapat memprediksi secara akurat lokasi serta penurunan kekuatan/kekakuan elemen struktur yang diidentifikasi mengalami kerusakan.

Kata kunci: deteksi kerusakan struktur, metode *modal assurance criterion*, *firefly algorithm*

DAMAGE DETECTION ON PLANE FRAME STRUCTURE USING MODAL ASSURANCE CRITERION (MAC-FA)

Abstract: Nowadays, damage detection become more popular especially in civil engineering application. With a good damage detection method, the maintenance cost of structure can be optimally reduced. Generally, there are four levels of damage detection: (1) determine whether the damage is exist or not, (2) determine the location of damaged member/part in structure, (3) determine the location and the reduction of stiffness/strength of damaged member of structures, (4) predict the remaining life time of damaged member. This research discusses the third level of damage detection. For that purpose, Modal Assurance Criterion-Firefly Algorithm (MAC-FA) was used. This method is based on the combination of three methods: second level of damage detection method, modal assurance criterion (MAC), and firefly algorithm (FA). Damage locating vector was chosen as the second level damage detection method. There are two types of plane frame considered in this research, in which various damage scenarios were considered. The results show that MAC-FA can accurately predict the location as well as the stiffness reduction of the identified damage members.

Keywords: damage detection, modal assurance criterion, firefly algorithm

PENDAHULUAN

Deteksi kerusakan struktur dapat dikategorikan ke dalam 4 tingkatan identifikasi. Tingkatan pertama adalah mendeteksi apakah struktur mengalami kerusakan atau tidak. Tingkatan kedua adalah menentukan lokasi dari elemen yang mengalami kerusakan. Tingkatan ketiga adalah menentukan lokasi kerusakan dan memprediksi tingkat penurunan kekuatan/kekakuan dari elemen yang diidentifikasi mengalami kerusakan. Tingkatan keempat adalah memprediksi sisa waktu yang dapat dicapai oleh elemen yang mengalami kerusakan. Pada penelitian ini, suatu metode deteksi kerusakan struktur tingkatan ketiga diusulkan yang disebut dengan MAC-FA. MAC-FA mempunyai dua tahapan dalam memprediksi tingkat penurunan kekuatan/kekakuan dalam elemen yang mengalami kerusakan. Tahap pertama yaitu mengaplikasikan metode deteksi kerusakan struktur tingkatan kedua, seperti *mode shape curvature method*, vektor beban penentu lokasi kerusakan (VBPLK), metode energi regangan, dan lain-lain, untuk menentukan lokasi kerusakan dari elemen. Dalam penelitian ini, metode tingkatan kedua yang digunakan adalah vektor beban penentu lokasi kerusakan. Selanjutnya, metode MAC-FA digunakan untuk mendapatkan tingkat penurunan kekuatan/kekakuan dari elemen yang diidentifikasi mengalami kerusakan. Untuk mengetahui kemampuan dari metode ini, penelitian ini meninjau dua struktur portal bidang dengan beberapa skenario kerusakan.

Vektor Beban Penentu Lokasi Kerusakan (VBPLK)

Vektor beban penentu lokasi kerusakan (VBPLK) adalah salah satu teknik deteksi kerusakan struktur tingkat dua yang pertama kali diusulkan oleh Bernal (2002). Metode ini mempunyai tingkat akurasi yang baik dalam memprediksi lokasi dari elemen struktur yang mengalami kerusakan. Secara umum, langkah-langkah untuk menerapkan vektor beban penentu lokasi kerusakan pada struktur adalah sebagai berikut ini.

1. Menghitung nilai perubahan matriks fleksibilitas struktur yang mengalami kerusakan

$$\Delta F = F_U - F_D \tag{1}$$

dengan ΔF adalah perubahan matriks fleksibilitas, F_U adalah matriks fleksibilitas dari struktur pada kondisi awal (“sehat”), F_D adalah matriks fleksibilitas dari struktur saat mengalami kerusakan.

2. Menghitung *singular value decomposition* dari ΔF

$$\Delta F = U \begin{bmatrix} s_1 & 0 \\ 0 & s_2 \end{bmatrix} V^T \tag{2}$$

dengan s_2 adalah nilai singular sangat kecil, untuk kondisi ideal nilai s_2 mengandung nilai nol dan vektor beban penentu lokasi kerusakan adalah vektor V yang berhubungan dengan kondisi *null space*. Vektor beban penentu lokasi kerusakan didapatkan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- a. Hitung tegangan pada struktur dalam kondisi “sehat” dengan menggunakan vektor V menjadi vektor beban.
- b. Hitung tegangan normal pada setiap elemen.
- c. Tentukan nilai maksimum dari tegangan karakteristik, c_j . Hitung nilai indeks svn untuk setiap vektor beban V dengan menggunakan persamaan:

$$svn_j = \sqrt{\frac{s_j c_j^2}{s_q c_q^2}} \tag{3}$$

dengan

$$s_q c_q^2 = \max(s_j c_j^2) \quad \text{untuk} \quad j = 1 : m \tag{4}$$

3. Vektor yang memiliki nilai $svn \leq 0,20$ dapat dikategorikan sebagai VBPLK.
4. Hitung nilai tegangan normalisasi masing-masing elemen dengan persamaan sebagai berikut:

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

dengan nsi_i adalah tegangan normalisasi untuk elemen ke- i , σ_i adalah tegangan yang ditinjau pada elemen/member ke- i , σ_{max} adalah tegangan maksimum dari seluruh elemen pada struktur tersebut.

Jika nilai nsi mendekati nol, maka elemen struktur tersebut dapat dikategorikan sebagai elemen yang mengalami kerusakan pada struktur tersebut.

Modal Assurance Criterion (MAC)

Salah satu metode yang digunakan untuk mengukur perbedaan dari dua ragam getar adalah *modal assurance criterion* (MAC). MAC pada awalnya digunakan untuk mengukur kualitas dari vektor modal yang didapatkan dari percobaan eksperimental dengan fungsi respons frekuensi yang diukur (Allemang, 2003). MAC merupakan pengukuran statistik antara vektor modal yang diestimasi dengan vektor modal riil. Nilai MAC berkisar antara 0 sampai dengan 1. Jika MAC bernilai hampir sama dengan nol, berarti bahwa vektor modal tidak konsisten, sebaliknya jika nilai MAC sama dengan 1, hal ini berarti bahwa terdapat kekonsistenan antara vektor modal yang ditinjau. Nilai MAC pada penelitian ini digunakan untuk membandingkan antara ragam getar struktur prediksi dan ragam getar struktur yang mengalami kerusakan. Nilai MAC dapat didefinisikan sebagai:

$$MAC_i = \frac{|\{\phi_a\}_i^T \{\phi_d\}_i|^2}{(\{\phi_a\}_i^T \{\phi_a\}_i)(\{\phi_d\}_i^T \{\phi_d\}_i)} \quad (6)$$

dengan $\{\phi_a\}_i$ adalah ragam getar ke- i struktur prediksi dan $\{\phi_d\}_i$ adalah ragam getar aktual dari struktur yang mengalami kerusakan. Jika ragam getar identik, maka nilai MAC akan sama dengan 1, sebaliknya

jika ragam getar tidak berkorelasi sama sekali, nilai MAC akan sama dengan 0.

Firefly Algorithm (FA)

Firefly algorithm pertama diusulkan oleh Yang (2008), dan telah berhasil diaplikasikan untuk melakukan optimasi dalam berbagai hal (Fister dkk, 2013, Arora dan Singh, 2013, Ritthipakdee dkk., 2014, Cheung dkk, 2014). Teori ini didasarkan pada perilaku dari kunang-kunang (*firefly*). Cahaya yang dipancarkan oleh kunang-kunang merupakan suatu pemandangan yang menakjubkan di langit pada musim panas di daerah tropis dan beriklim sedang. Setiap spesies dari kunang-kunang menghasilkan cahaya-cahaya kecil dan berirama dan beberapa spesies dari kunang-kunang tersebut mengeluarkan pola cahaya unik. Dua variabel penting dalam *firefly algorithm*, yaitu formulasi dari daya tarik oleh masing-masing kunang-kunang, dan variasi dari intensitasi cahaya oleh masing-masing kunang-kunang. Secara sederhana, daya tarik dari kunang-kunang ditentukan dari tingkat kecerahan yang berhubungan dengan fungsi obyektif yang ingin dicapai. Adapun langkah-langkah dalam *firefly algorithm* adalah sebagai berikut ini.

1. Tentukan fungsi sasaran (*objective function*) $f(x_i)$.
2. *Generate* populasi awal dari masing-masing kunang-kunang x_i ($i = 1, 2, 3, 4, \dots, n$).
3. Tentukan intensitas cahaya masing-masing kunang-kunang I_i yang berhubungan dengan posisi awal dari kunang-kunang x_i berdasarkan fungsi sasaran $f(x_i)$.
4. Definisikan koefisien penyerapan cahaya, γ .
5. Untuk $i = 1:n$ (semua kunang-kunang)
Untuk $j = 1:n$ (semua kunang-kunang)
Jika nilai $I_i < I_j$: Pindahkan kunang-kunang i ke j
Formulasikan daya tarik untuk masing-masing kunang-kunang
Evaluasi solusi yang baru dan perbarui intensitas cahaya masing-masing kunang-kunang

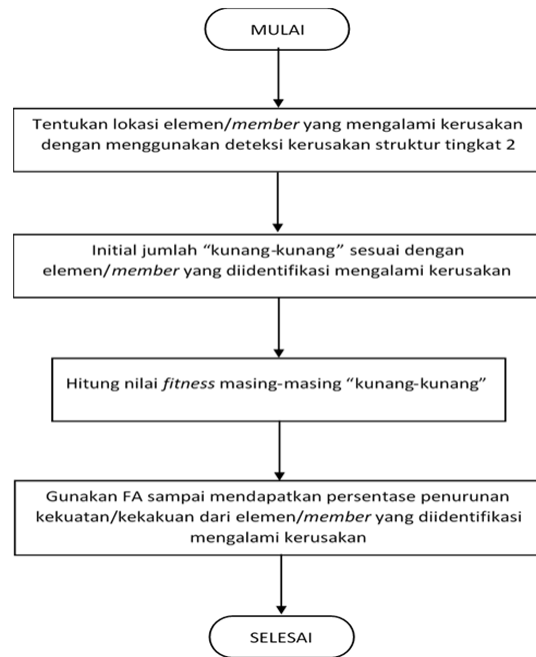
- Akhir loop j
 Akhir loop i
6. Susun peringkat kunang-kunang dan tentukan nilai global terbaik (g^*).
 7. Interpretasikan hasil yang didapatkan.

Modal Assurance Criterion-Firefly Algorithm (MAC-FA)

Algoritma MAC-FA ini didasarkan pada penggabungan dua metode, yaitu metode MAC dan algoritma optimasi FA. Sebelum menggunakan kedua metode ini, teknik deteksi struktur tingkat dua digunakan terlebih dahulu untuk menentukan lokasi dari elemen struktur yang diidentifikasi mengalami kerusakan. Setelah mendapatkan lokasi dari elemen struktur yang diidentifikasi mengalami kerusakan, algoritma MAC-FA baru diterapkan untuk mencari persentase pengurangan kekuatan/kekakuan pada elemen struktur yang diidentifikasi mengalami kerusakan. Gambar 1 menunjukkan diagram alir (*flowchart*) dari metode MAC-FA ini. Dalam hal ini fungsi objektif adalah nilai MAC dari ragam getar prediksi dan ragam getar aktual. Akan tetapi karena algoritma optimasi yang digunakan (FA) adalah untuk meminimumkan nilai *fitness* yang didapatkan, maka fungsi objektif yang digunakan untuk mendapatkan nilai *fitness* adalah sebagai berikut:

$$fitness = \frac{1}{\sum_{j=1}^n MAC_j} \quad (7)$$

dengan n adalah jumlah ragam getar yang digunakan dalam hitungan. Jika ragam getar yang dibandingkan adalah 5, maka nilai *fitness* yang dihasilkan bernilai 0,2 yang berarti bahwa terdapat kesesuaian 100% antara ragam getar prediksi dan ragam getar aktual, sebaliknya nilai *fitness* akan mendekati tak berhingga jika ragam getar prediksi dan ragam getar aktual tidak memiliki kesesuaian.



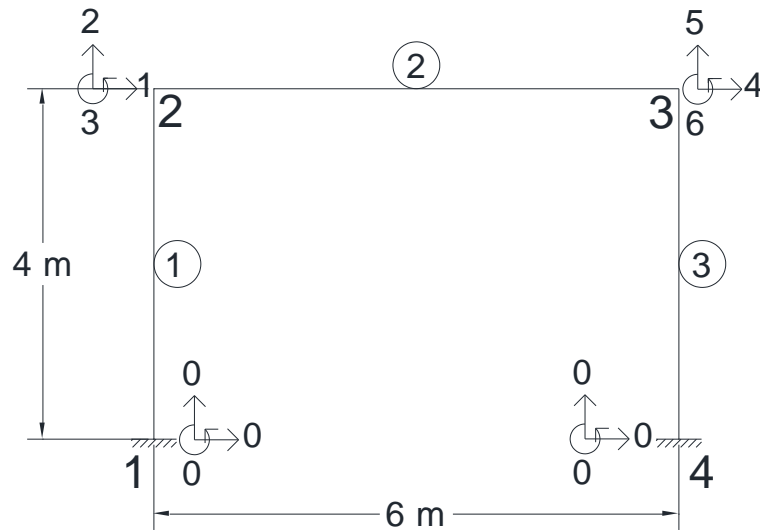
Gambar 1. Diagram alir MAC-FA

APLIKASI DAN PEMBAHASAN

Aplikasi 1: Struktur portal bidang dengan 3 batang.

Ditinjau suatu struktur portal bidang sederhana dengan 3 batang seperti yang terlihat pada Gambar 2. Tabel 1 menunjukkan sifat-sifat bahan dan penampang dari balok dan kolom yang digunakan. Terdapat tiga skenario kerusakan dari struktur yang dibuat, yaitu:

1. Skenario 1: kolom (1) mengalami penurunan kekakuan sebesar 20% dari kekakuan mula-mula.
2. Skenario 2: balok (2) mengalami penurunan kekakuan sebesar 50% dari kekakuan mula-mula.
3. Skenario 3: kolom (3) dan balok (2) mengalami penurunan kekakuan masing-masing sebesar 20% dan 50% dari kekakuan mula-mula.



Gambar 2. Struktur portal bidang aplikasi pertama

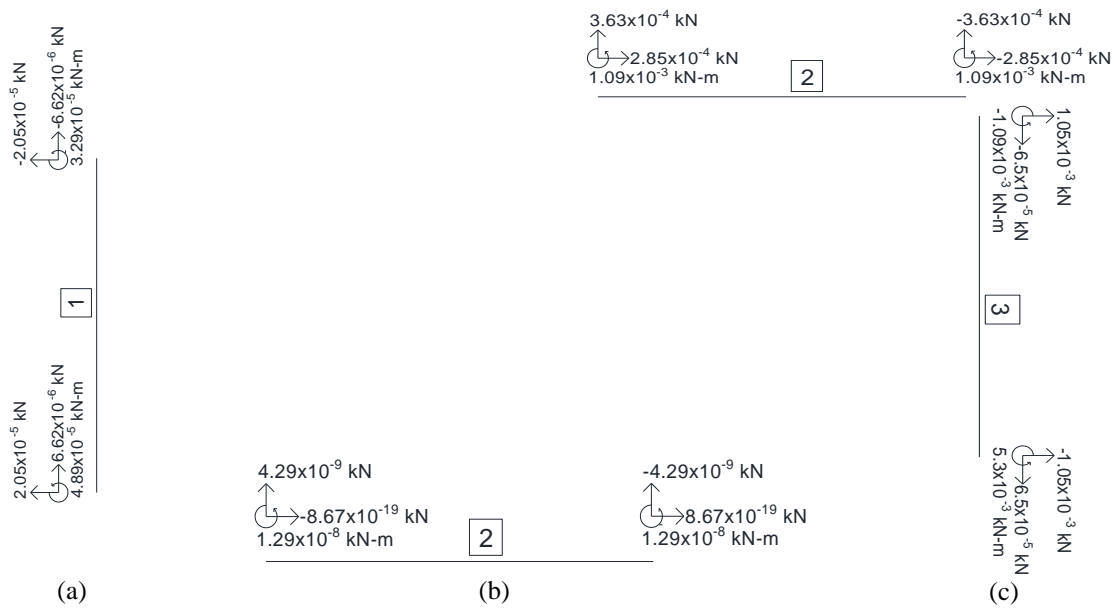
Tabel 1. Karakteristik material dan penampang

Batang	A (m ²)	I (m ⁴)	E (kN/m ²)
1	0,25	0,005208	
2	0,18	0,0054	23,5 x 10 ⁶
3	0,25	0,005208	

Seperti telah diuraikan sebelumnya, deteksi kerusakan struktur dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama adalah pengaplikasian VBPLK pada struktur untuk mengetahui batang mana saja yang mengalami kerusakan. Gambar 3 (a) menunjukkan diagram *free body* untuk kolom (1) setelah VBPLK diaplikasikan untuk skenario 1. Gambar 3 (a) menunjukkan bahwa nilai gaya-gaya internal yang terjadi pada kolom (1) mendekati nol. Hal ini mengindikasikan bahwa kolom (1) mengalami penurunan kekakuan.

Selanjutnya, FA diaplikasikan untuk mengetahui penurunan kekakuan dari kolom (1). Nilai batas bawah diambil sama dengan nol dan nilai batas atas diambil sama dengan 1. Hal ini dikarenakan nilai penurunan kekakuan dari satu elemen struktur diasumsikan antara 0 sampai dengan 1. Nilai 0 berarti terjadi penurunan kekakuan 100% pada elemen struktur yang diidentifikasi mengalami kerusakan dan sebaliknya. Nilai 1 berarti tidak terjadi penurunan kekakuan pada elemen struktur yang diidentifikasi mengalami kerusakan; dengan kata lain

elemen struktur tersebut tidak mengalami penurunan kekakuan dan dapat dikatakan *member* tersebut masih dalam kondisi “sehat”. Pengambilan nilai batas bawah dan batas atas ini juga bermaksud untuk mempersingkat waktu *running* sehingga tidak membutuhkan waktu yang lama untuk mendapatkan nilai penurunan kekakuan, yaitu akan mengurangi jumlah iterasi yang digunakan untuk mendapatkan nilai penurunan kekakuan. Skala logaritma digunakan untuk mendapatkan perbedaan antara nilai *fitness* iterasi ke-*n* dan iterasi ke *n-1*. Hal ini dikarenakan nilai perbedaan MAC yang ingin didapatkan relatif sangat kecil. Jika digunakan skala biasa, maka tidak terlihat perbedaan yang cukup signifikan dari nilai *fitness* iterasi ke *n* dan iterasi ke *n-1*. Tabel 2 menunjukkan perbandingan nilai asumsi penurunan kekakuan (skenario 1) dengan hasil MAC-FA.



Gambar 3. (a) Diagram *freebody* pada kolom (1) untuk skenario 1, (b) Diagram *freebody* pada balok (2) untuk skenario 2, (c) Diagram *freebody* pada kolom (3) dan balok (2) untuk skenario 3

Pada skenario 2, langkah yang sama digunakan untuk mendapatkan nilai penurunan kekakuan dari elemen struktur yang identifikasi sebagai batang yang “rusak”. Gambar 3 (b) menunjukkan diagram *freebody* dari balok (2), seperti yang terlihat bahwa nilai gaya-gaya internal yang terjadi hampir mendekati nol. Hal ini berarti balok (2) tersebut diindikasikan mengalami kerusakan.

Tabel 2. Perbandingan penurunan nilai kekakuan antara skenario dan MAC-FA untuk skenario 1 pada aplikasi pertama

Batang	Penurunan Kekakuan (%)	
	Skenario	MAC-FA
Kolom (1)	20	20,0007

Diagram *freebody* dibuat dengan menggunakan bantuan program seperti yang dibahas dalam Arfiadi (2016). Tabel 3 menunjukkan perbandingan nilai penurunan kekakuan antara asumsi (skenario 2) dan MAC-FA. Berdasarkan Tabel 3, tidak terdapat perbedaan antara nilai penurunan kekakuan dengan metode MAC-FA jika dibandingkan dengan nilai penurunan kekakuan asumsi (skenario 2).

Tabel 3. Perbandingan penurunan nilai kekakuan antara skenario dan MAC-FA untuk skenario 2 pada aplikasi pertama

Batang	Penurunan Kekakuan (%)	
	Skenario	MAC-FA
Balok (2)	50	50,0001

Skenario 3 merupakan skenario *double damage* pada struktur portal sederhana, dimana diasumsikan kolom (3) dan balok (2) mengalami pengurangan kekakuan masing-masing sebesar 20% dan 50% dari kekakuan semula. Gambar 3 (c) menunjukkan hasil diagram *freebody* kolom (3) dan balok (2) setelah VBPLK diaplikasikan. Dari hasil ini tampak bahwa nilai gaya-gaya ujung mempunyai nilai yang hampir mendekati nol. Hal ini mengindikasikan bahwa kolom (3) dan balok (2) diidentifikasi mengalami kerusakan. Tabel 4 menunjukkan perbandingan antara nilai penurunan kekakuan asumsi (skenario 3) dengan metode MAC-FA. Dari Tabel 4 terlihat bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara nilai penurunan kekakuan asumsi (skenario 3) dan nilai penurunan kekakuan dengan metode MAC-FA.

Tabel 4. Perbandingan penurunan nilai kekakuan antara skenario dan MAC-FA untuk skenario 3 pada aplikasi pertama

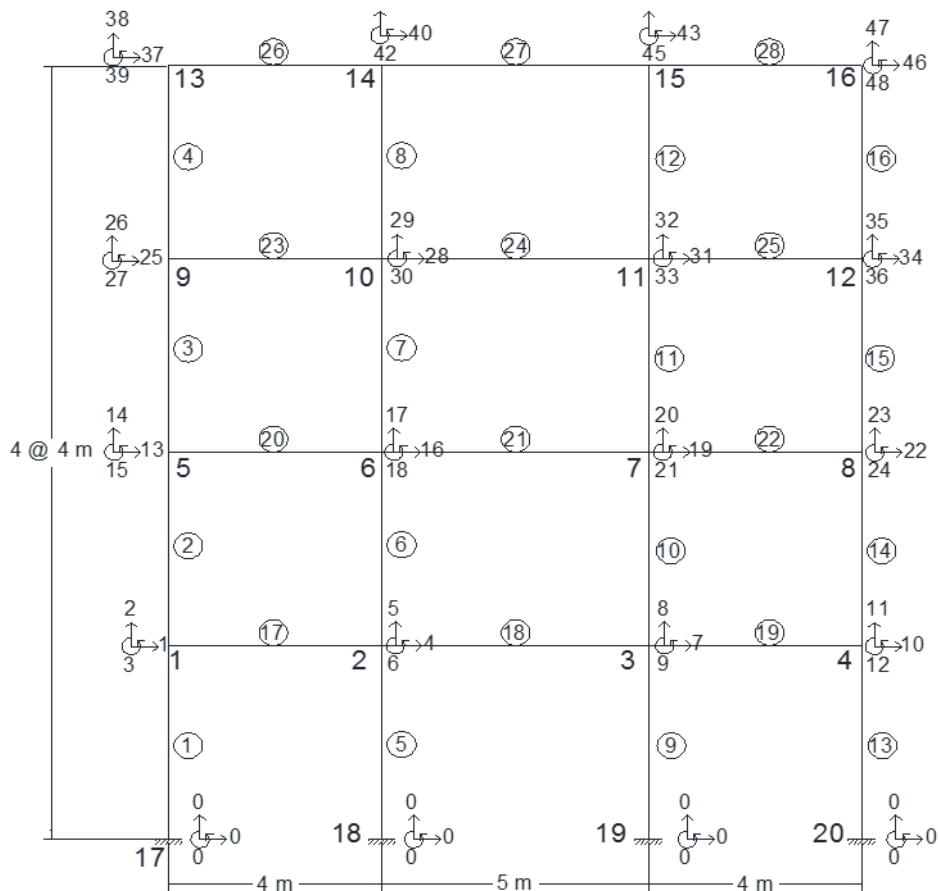
Batang	Penurunan Kekakuan (%)	
	Skenario	MAC-FA
Kolom (3)	20	20,0032
Balok (2)	50	50,0005

Aplikasi 2: Struktur portal bidang dengan 28 batang.

Struktur portal bidang kedua yang ditinjau adalah struktur portal bidang dengan 28 batang, 16 joint, serta 48 derajat kebebasan seperti yang dapat terlihat pada Gambar 4.

Tinggi masing-masing lantai adalah tipikal 4 m. Sifat-sifat bahan sama dengan struktur portal pada aplikasi pertama dengan menggunakan nilai modulus elastisitas sebesar $23,5 \times 10^6$ kN/m², sedangkan untuk sifat tampang digunakan dua ukuran, yaitu ukuran 40 cm x 40 cm untuk kolom dan 30 cm x 60 cm untuk balok. Pada aplikasi kedua ini, terdapat 4 skenario kerusakan yang diasumsikan, sebagai berikut:

1. Skenario 1: kolom (10) mengalami penurunan kekakuan sebesar 20% dari kekakuan mula-mula.
2. Skenario 2: kolom (7) dan balok (25) mengalami penurunan kekakuan masing-masing sebesar 20% dan 30% dari kekakuan mula-mula.
3. Skenario 3: kolom (2), kolom (9) dan balok (24) mengalami penurunan kekakuan masing-masing sebesar 20%, 35%, dan 25% dari kekakuan mula-mula.
4. Skenario 4: kolom (5), kolom (8), kolom (11), kolom (14) mengalami penurunan kekakuan masing-masing sebesar 20%, 35%, 35%, dan 20% sedangkan untuk elemen balok, balok (18), balok (20), dan balok (27) mengalami penurunan kekakuan masing-masing sebesar 25%, 40%, dan 30% dari kekakuan mula-mula.



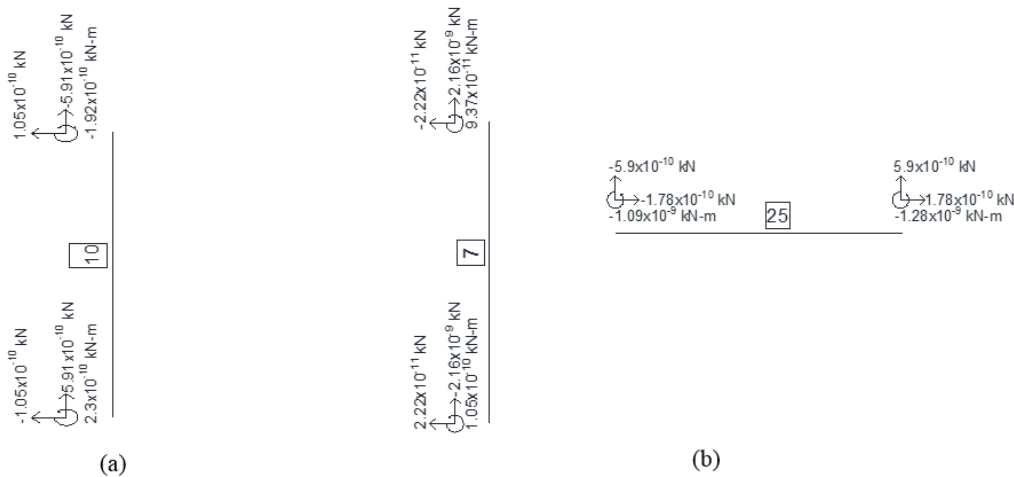
Gambar 4. Struktur portal bidang aplikasi kedua

Skenario 1 menggambarkan *single damage* pada struktur portal, skenario 2 menggambarkan *double damage* pada struktur portal, skenario 3 menggambarkan *triple damage* pada portal sedangkan skenario 4 menggambarkan *multiple damage* pada struktur portal.

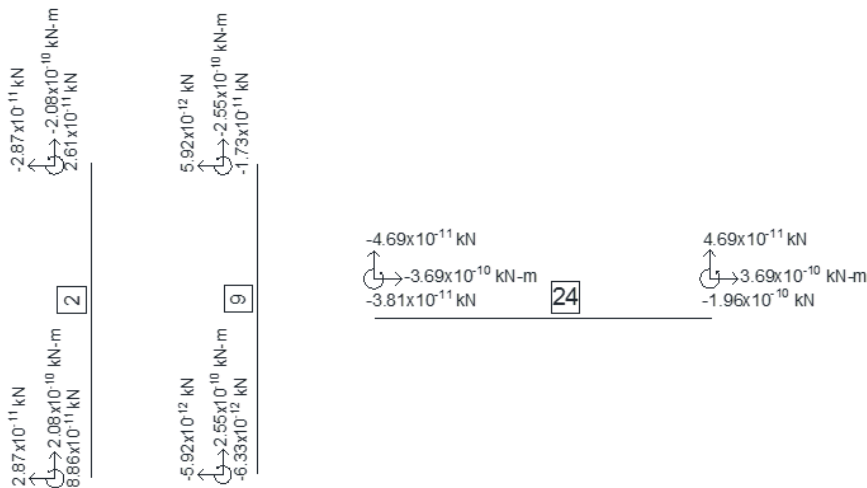
Sama halnya dengan aplikasi pertama, deteksi kerusakan struktur pada struktur portal kedua dilakukan dalam dua tahap, yaitu pertama identifikasi struktur yang dianggap mengalami kerusakan, kemudian menentukan nilai penurunan kekakuan pada struktur yang mengalami kerusakan dengan metode MAC-FA.

Gambar 5 sampai Gambar 7 menunjukkan hasil diagram *freebody* untuk elemen struktur yang diidentifikasi mengalami kerusakan dengan metode VBPLK. Berdasarkan Gambar 5 sampai Gambar 7, dapat dilihat bahwa semua nilai

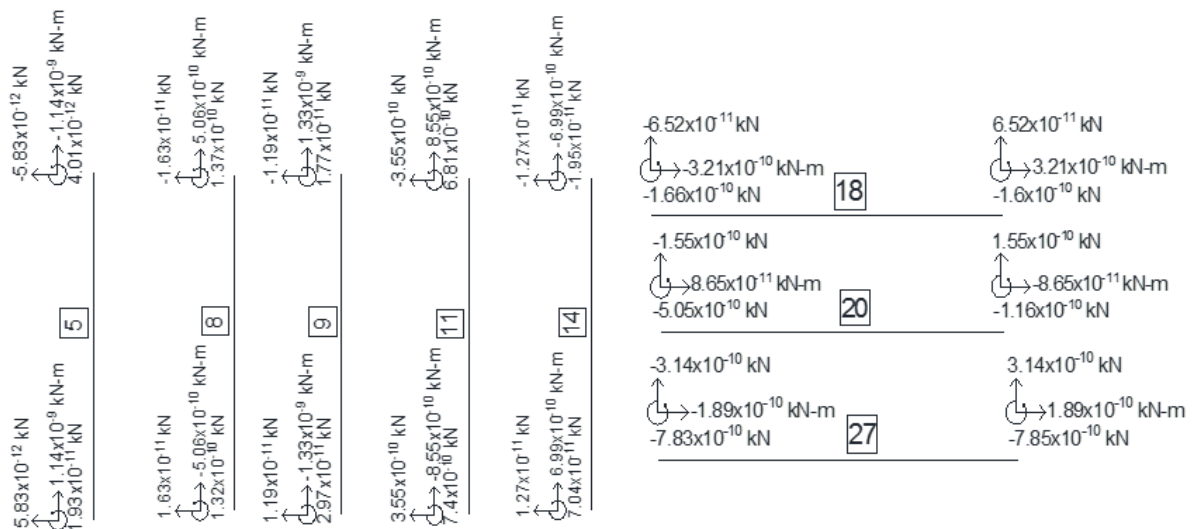
gaya-gaya ujung pada elemen struktur yang diidentifikasi mengalami kerusakan hampir sama dengan nol. Hal ini mengindikasikan batang-batang tersebut mengalami penurunan nilai kekakuan. Akan tetapi hal lain terjadi pada skenario 4, kolom (9) yang seharusnya tidak mengalami penurunan kekakuan, diidentifikasi oleh VBPLK mengalami kerusakan atau penurunan kekakuan. Oleh karena itu, kolom (9) akan tetap dikategorikan sebagai salah satu batang yang mengalami kerusakan. Namun analisis selanjutnya dengan menggunakan metode MAC-FA menunjukkan bahwa kolom (9) mengalami penurunan kekakuan yang mendekati nol, sehingga dapat disimpulkan bukan sebagai batang yang rusak. Tabel 5 menunjukkan hasil perbandingan dari asumsi (skenario 1 sampai skenario 4) dan metode MAC-FA.



Gambar 5. (a) Diagram *freebody* pada kolom (10) untuk skenario 1, (b) Diagram *freebody* pada kolom (7) dan balok (25) untuk skenario 2



Gambar 6. Diagram *freebody* pada kolom (2), kolom (9) dan balok (24) untuk skenario 3



Gambar 7. Diagram *freebody* pada kolom (5), kolom (8), kolom (9), kolom (11), kolom (14) dan balok (18), balok (20), balok (27) untuk skenario 4

Tabel 5. Perbandingan penurunan nilai kekakuan antara skenario dan MAC-FA untuk masing-masing skenario kerusakan pada aplikasi kedua

Skenario	Member	Penurunan Kekakuan (%)	
		Skenario kerusakan	MAC-FA
1	Kolom (10)	20	19,9998
		20	19,9941
2	Balok (25)	30	30,0084
		20	19,9906
3	Kolom (9)	35	35,0563
	Balok (24)	25	24,9780
	Kolom (5)	20	20,3602
	Kolom (8)	35	34,5616
4	Kolom (9)	0	0,3085
	Kolom (11)	35	34,8880
	Kolom (14)	20	19,8573
	Balok (18)	25	24,9618
	Balok (20)	40	40,1589
	Balok (27)	30	30,1027

Dari analisis yang dilakukan, tampak bahwa metode MAC-FA berhasil diaplikasikan pada struktur portal kedua. Hal ini dibuktikan dengan kesamaan nilai penurunan kekakuan asumsi (skenario) dengan hasil penurunan kekakuan dengan metode MAC-FA untuk semua skenario. Hal yang menarik adalah pada skenario keempat, di mana nilai penurunan kekakuan yang dihasilkan oleh metode MAC-FA untuk kolom (9) adalah sebesar 0,3085%. Nilai ini mendekati nol yang berarti bahwa tidak

terdapat penurunan kekakuan pada kolom (9). Hasil ini berbeda dengan prediksi yang dihasilkan dengan menggunakan metode VBPLK, di mana jika hanya digunakan VBPLK kolom (9) diindikasikan sebagai batang yang rusak. Oleh karena itu, penggunaan metode MAC-FA telah meningkatkan akurasi dalam mendeteksi kerusakan struktur, sehingga nilai penurunan kekakuan/kekuatan pada batang dapat diprediksi dengan akurat.

SIMPULAN

Metode MAC-FA telah diaplikasikan pada penelitian ini untuk struktur portal bidang. Metode MAC-FA diterapkan dalam dua tahapan. Tahapan pertama adalah menerapkan deteksi kerusakan struktur tingkat kedua untuk mengetahui lokasi dari elemen struktur yang diidentifikasi mengalami kerusakan, yang dalam penelitian ini menggunakan metode vektor beban penentu lokasi kerusakan (VBPLK). Tahapan kedua adalah menerapkan metode MAC-FA pada elemen struktur yang diidentifikasi mengalami kerusakan. Hasil-hasil analisis menunjukkan bahwa metode MAC-FA dapat memprediksi dengan akurat tingkat penurunan kekuatan/kekakuan dari elemen struktur yang diidentifikasi mengalami kerusakan. Oleh karena itu, metode MAC-FA dapat digolongkan sebagai metode deteksi kerusakan struktur tingkat ketiga.

for Optimization Problems". *ADCONP, Hisoshima*, p. 159-164.
 Yang, X.S. 2008. *Nature Inspired Metaheuristic Algorithm*. Luniver Press, UK

DAFTAR PUSTAKA

- Allemang, R.J. 2003. The Modal Assurance Criterion – Twenty Years of Use and Abuse. *Journal of Sound and Vibration*, 37 .8, p.14-21.
- Arora, S., Singh, S. 2013. The Firefly Optimization Algorithm: Convergence Analysis and Parameter Selection. *Interbational Journal of Computer Application*, 69.3, p. 48-52.
- Arfiadi, Y. 2016. *Analisis struktur dengan program Matlab dan FreeMat*. Cahaya Atma Pustaka, Yogyakarta.
- Bernal, D. 2000. Damage Localization Using Load Vectors. *COST F3*,p. 223-231, Madrid, Spain.
- Cheung, NJ, Ding X-M, Shen H-B 2014. Adaptive Firefly Algorithm: Parameter Analysis and Its Application. *PLOS ONE* 9.11:e112634.doi:10.1372/jornnal.one.0112634.
- Fister, I, Fister Jr., I, Yang, X-S, Brest, J. 2013. A Comprehensive Review of Firefly Algorithms. *Swarm and Evolutinary Computation* 13, p. 34-46.
- Ritthipakdee, A., Thammano, A., Premasathian, N., Uyyanonvara, B. 2014. An Improved Firefly Algorithm