

DETEKSI KERUSAKAN BANGUNAN GESER MENGGUNAKAN ALGORITMA GENETIKA RIIL DENGAN PERSILANGAN ARITMETIKA

Yoyong Arfiadi¹ dan Richard Frans^{2*}

¹Departemen Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari 44, Yogyakarta

e-mail: yoyong.ar@uajy.ac.id

² Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Makassar, Jl. Tanjung Alang No. 23, Makassar

**e-mail:* richardfrans.rf@gmail.com (corresponding author)

ABSTRAK

Dalam tulisan ini deteksi kerusakan struktur menggunakan algoritma genetika riil (AG riil) dievaluasi efektivitasnya. Struktur yang ditinjau adalah bangunan geser 3 dan 10 lantai. Sebagai fungsi obyektif adalah rerata perbedaan frekuensi natural struktur dan kriteria jaminan ragam. Perbedaan antara frekuensi natural dan kriteria jaminan ragam kemudian dievaluasi dengan metode optimasi. Algoritma yang digunakan untuk melakukan optimasi adalah algoritma genetika riil dengan persilangan aritmetika. Persilangan aritmetika digunakan, karena batas atas dan batas bawah dari desain variabel sudah tertentu. Dalam kasus deteksi kerusakan ini sebagai desain variabel adalah rasio kekakuan terdeteksi terhadap kekakuan struktur sehat. Dengan demikian batas bawah rasio ini bernilai 0 (rusak total) dan batas atasnya bernilai 1 (struktur sehat). Sebagai fungsi obyektif adalah rerata selisih frekuensi tiap ragam ditambah dengan *modal assurance criterion*. Pada bagian akhir disajikan contoh numerik metode ini, yang diaplikasikan pada bangunan geser 3 lantai dan 10 lantai. Beberapa skenario sebagai skenario kerusakan tunggal dan kerusakan jamak dilakukan. Hasil analisis menunjukkan bahwa metode ini cukup efektif untuk mendeteksi kerusakan struktur yang dievaluasi.

Kata kunci: deteksi kerusakan struktur, algoritma genetika, bangunan geser, *modal assurance criterion*

1. PENDAHULUAN

Deteksi kerusakan struktur saat ini merupakan topik yang banyak menarik perhatian peneliti. Seperti kita ketahui infrastruktur teknik sipil, seperti jembatan, bangunan, bendungan, dan lain-lain, merupakan infrastruktur yang penting untuk melayani kegiatan masyarakat. Infrastruktur teknik sipil juga berpengaruh pada kelancaran distribusi barang sebagai bagian dari rantai pasok. Gedung-gedung perlu dirawat dan dievaluasi agar dapat berfungsi menurut fungsinya masing-masing. Dam yang sudah dibangun perlu dirawat agar pengelolaan air dapat sesuai dengan peruntukannya. Dapat dikatakan struktur bidang teknik sipil perlu dijaga dan dirawat agar dapat berfungsi sesuai dengan fungsinya. Akibat tidak berfungsinya infrastruktur tersebut dapat mempengaruhi banyak aspek, seperti terganggunya kegiatan perekonomian, bahkan dapat menyebabkan korban jiwa. Untuk itu mengetahui kesehatan struktur sejak dini dan deteksi kerusakan struktur dapat mencegah hal-hal yang tidak diinginkan.

Monitoring kesehatan struktur dapat dilakukan secara visual langsung. Namun inspeksi langsung saja akan kurang efektif di samping ada kemungkinan kesalahan akibat faktor manusia. Perlu dicari upaya lain, yang tidak selalu bergantung pada monitoring secara visual langsung. Cara ini dikombinasikan dengan monitoring secara visual akan menjadi upaya yang baik dan efektif untuk monitoring kesehatan dan deteksi kerusakan struktur yang mungkin terjadi.

2. DETEKSI KERUSAKAN STRUKTUR

Berbagai upaya untuk melakukan deteksi kerusakan telah diajukan oleh para peneliti. Dalam penentuan kerusakan terdapat beberapa tingkatan sebagai berikut (Ryter, 1993):

- Tingkat 1: mengetahui apakah struktur tersebut rusak atau tidak,
- Tingkat 2: mengetahui letak kerusakan struktur yang ada,
- Tingkat 3: mengetahui tingkat kerusakan struktur yang ada,
- Tingkat 4: mengetahui sisa waktu layan struktur.

Beberapa metode yang pernah diajukan untuk mendeteksi kerusakan struktur di antaranya diajukan oleh Bernal (2002), yang mengajukan vektor penentu lokasi kerusakan. Secara eksperimental metode ini telah diuji oleh Gao dkk. (2004). Metode ini juga telah digunakan oleh Frans dan Arfiadi (2024) untuk mendeteksi tingkat kerusakan struktur rangka ruang (*space truss*) dengan mengkombinasikannya dengan metode optimasi *Firefly Algorithm* (Yang, 2014) dan *Modal Assurance Criterion* (Allemang dan Brown, 1982). Peneliti lain seperti Kaveh dkk. (2021) menggunakan metode Graph-based Adaptive Threshold (GAT) dan Improved Water Strider Algorithm untuk deteksi kerusakan balok terjepit, jembatan baja menerus 2 bentang, dan struktur portal 1 tingkat.

3. FUNGSI OBYEKTIF

Fungsi obyektif telah banyak digunakan untuk mendeteksi kerusakan struktur, Perbedaan frekuensi digunakan oleh Nouri dkk. (2014) untuk memprediksi kerusakan pada balok kantilever dan struktur rangka bidang (*plane truss*). Particle swarm optimization (PSO) digunakan untuk mengoptimasi selisih frekuensi antara struktur sehat dan rusak.

Dalam penelitian ini, perbedaan frekuensi antara hasil simulasi pengukuran dan algoritma deteksi kerusakan diambil sebagai nilai absolut kesalahan frekuensi pada setiap ragam sebagai berikut:

$$\text{freq_err}_i = \left| \frac{f_{a,i}}{f_{d,i}} - 1 \right| \quad (1)$$

dengan $f_{a,i}$ = frekuensi dari “pengukuran”, dan $f_{d,i}$ = frekuensi dari analisis. Fungsi obyektif terkait selisih frekuensi menjadi:

$$J_{\text{freq}} = \frac{1}{n_m} \sum_{i=1}^{n_m} \text{freq_err}_i \quad (2)$$

Dalam hal ini n_m = jumlah ragam, yang diperhitungkan.

Peneliti lain menggunakan *Modal Assurance Criterion* (MAC) atau kriteria jaminan ragam. *Modal Assurance Criterion* (MAC) mengukur similaritas antara 2 bentuk ragam (Allemang dan Brown, 1982). Untuk ragam ke i :

$$\text{MAC}_i = \frac{(\phi_i^{aT} \phi_i^d)^2}{(\phi_i^{aT} \phi_i^a)(\phi_i^{dT} \phi_i^d)}$$

dengan:

ϕ_i^a = vektor bentuk ragam struktur dari “pengukuran”

ϕ_i^d = vektor bentuk ragam mode dari analisis. Nilai MAC = 1 jika ragam saling berkorelasi dan MAC = 0 jika ragam sama sekali tidak berkorelasi. Selanjutnya fungsi obyektif dari jaminan kriteria ragam menjadi:

$$J_{\text{mac}} = 1 - \frac{1}{n_m} \sum_{i=1}^{n_m} \text{MAC}_i \quad (4)$$

Dalam tulisan ini, sebagai fungsi obyektif diambil kombinasi antara kesalahan dalam prediksi frekuensi dan nilai korelasi antar ragam, sehingga fungsi obyektif menjadi:

$$J = w_1 J_{\text{freq}} + w_2 J_{\text{mac}} \quad (5)$$

dengan w_1 dan w_2 faktor skala masing-masing fungsi obyektif.

4. ALGORITMA GENETIKA RIIL

Untuk melakukan optimasi antara nilai-nilai yang didapat dari pengukuran dan hasil analisis digunakan algoritma genetika (Holland, 1992). Algoritma genetika (AG) merupakan salah satu teknik optimasi metaheuristik yang banyak dipakai untuk optimasi permasalahan yang kompleks. Dalam tulisan ini algoritma genetika riil digunakan untuk mengoptimasi perbedaan frekuensi dan kriteria ragam. Langkah optimasi dimulai dengan menginisialisasi sejumlah individu sebagai kandidat penyelesaian. Dalam kasus deteksi kerusakan bangunan geser, kandidat merupakan kekakuan dari masing-masing tingkat yang akan dideteksi. Kandidat tersebut mempunyai nilai ketahanan masing-masing yang diambil dari fungsi obyektif yang kita tentukan. Nilai kekakuan yang terdeteksi kemudian dibandingkan dengan kekakuan awal struktur. Misal kekakuan awal struktur untuk suatu tingkat = k_i dan kekakuan yang terdeteksi = k_{di} , maka:

$$\alpha_i = \frac{k_{di}}{k_i} \quad (6)$$

merupakan rasio kekakuan yang terdeteksi dan kekakuan awal. Sehingga:

$$\alpha_i \begin{cases} = 1 \rightarrow \text{tidak rusak} \\ < 1 \rightarrow \text{rusak} \end{cases} \quad (7)$$

Untuk masalah deteksi kerusakan yang sedang dibahas, nilai ketahanan masing-masing individu pada setiap generasi dinyatakan dengan

$$\text{fitness}(s) = \frac{1}{(1 + J)} \quad (8)$$

dengan fitness = ketahanan, dan s = individu dalam populasi dalam suatu generasi tertentu.

Selanjutnya beberapa individu mengalami mutasi dan persilangan. Untuk mutasi digunakan mutasi sederhana, di mana individu yang terpilih untuk mutasi \hat{g}_i menjadi:

$$\tilde{\mathbf{G}} = [\hat{g}_1 \quad \hat{g}_2 \quad \dots \quad \hat{g}_i' \quad \dots \quad \hat{g}_r] \quad (9)$$

dengan $\hat{g}_i' = \bar{\alpha} a \hat{g}_i$, $\bar{\alpha} > 1$, dan a = variabel random antara 0 dan 1.

Untuk persilangan, mengingat setiap individu dalam hal ini k_{di} dinyatakan sebagai $k_{di} = \alpha_i k_i$ maka α_i dibatasi nilainya antara 0 sampai dengan 1, sehingga persilangan aritmetika digunakan. Persilangan ini memastikan bahwa tidak ada individu hasil persilangan yang hasilnya di luar domain orang tuanya. Persilangan aritmetika dilakukan sebagai berikut ini.

Dari orang tua yang terpilih untuk persilangan dengan metode roda *Roulette* $\tilde{\mathbf{G}}$ dan $\bar{\mathbf{G}}$, turunan yang dihasilkan adalah:

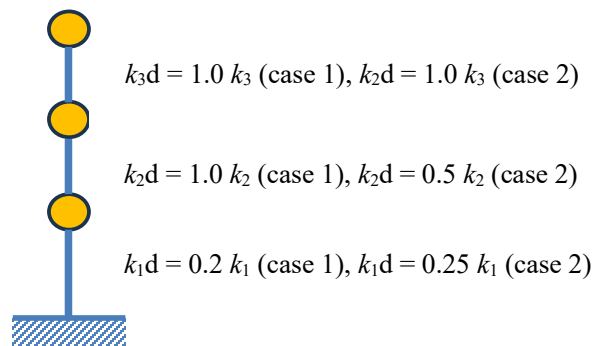
$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{G}}' &= a\tilde{\mathbf{G}} + (1 - a)\bar{\mathbf{G}} \\ \bar{\mathbf{G}}' &= (1 - a)\tilde{\mathbf{G}} + a\bar{\mathbf{G}} \end{aligned}$$

dengan a = variabel random antara 0 dan 1. Persilangan ini untuk memastikan agar turunan yang dihasilkan berada dalam batas bawah dan batas atas variabel yang ditetapkan. Untuk kasus deteksi kerusakan, karena α_i diambil sebagai variabel desain maka nilai batas bawah = 0 dan batas atas = 1. Persilangan lain, yang dapat mengeksplorasi domain yang belum diketahui dibahas dalam Arfiadi dan Hadi (2001).

5. SIMULASI NUMERIK

Contoh 1:

Suatu bangunan geser 3 lantai dengan data sebagai berikut: massa: $m_1 = 15\text{ t}$, $m_2 = 15\text{ t}$, dan $m_3 = 12\text{ t}$; kekakuan: $k_1 = 12000\text{ kN/m}$, $k_2 = 12000\text{ kN/m}$, dan $k_3 = 10000\text{ kN/m}$. Dalam tulisan ini, diskennariokan secara numerik dengan skenario kerusakan diambil seperti terlihat pada Tabel 1. Skenario 1 merupakan skenario dengan kerusakan tunggal, sedangkan Skenario 2 merupakan skenario dengan kerusakan jamak.



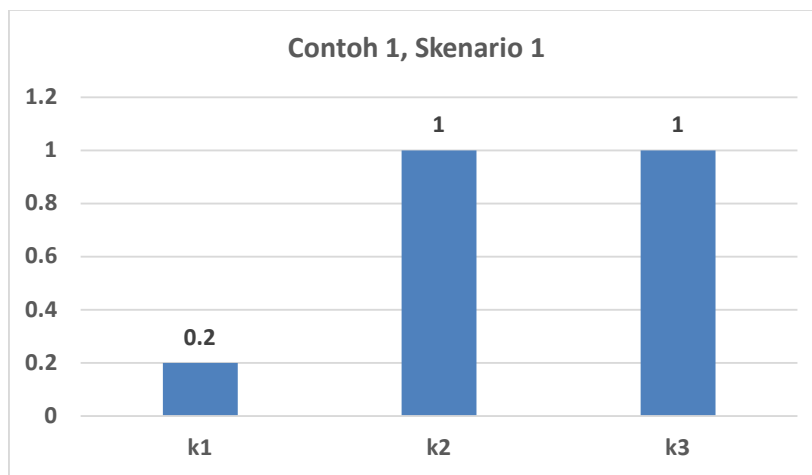
Gbr. 1. Bangunan geser 3 lantai

Tabel 1. Skenario kerusakan contoh 1

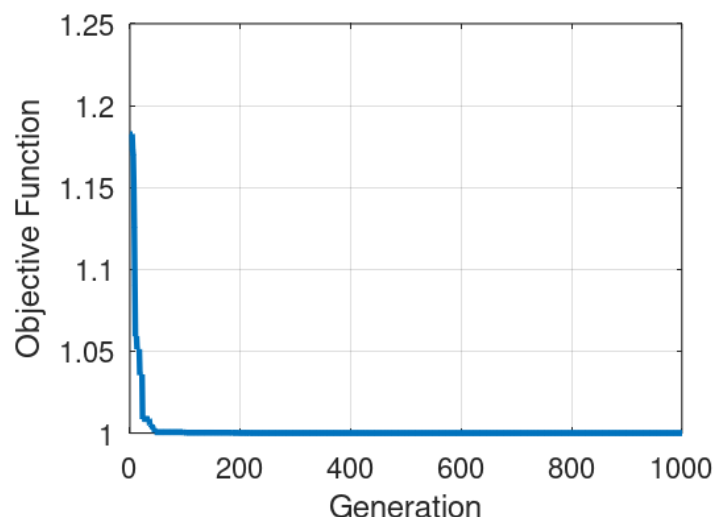
Kekakuan tingkat (kN/m)	Skenario 1	Skenario 2
1	20%	25%
2	100%	50%
3	100%	100%

AG riil dengan parameter: jumlah populasi = 30, probabilitas persilangan = 0,8, probabilitas mutasi = 0,1, dan jumlah maksimum generasi = 1000, digunakan untuk meminimumkan fungsi obyektif J (pers. (5)) atau memaksimumkan fungsi ketangguhan $fitness$ (pers. (8)). Nilai w_1 dan w_2 pada pers. (5) diambil berturut-turut sama dengan 1 dan 2

Untuk Skenario 1, hasil deteksi kekakuan struktur ditunjukkan pada Gbr. 2. Sedangkan grafik fungsi obyektif generasi per generasi dapat dilihat ada Gbr. 3.



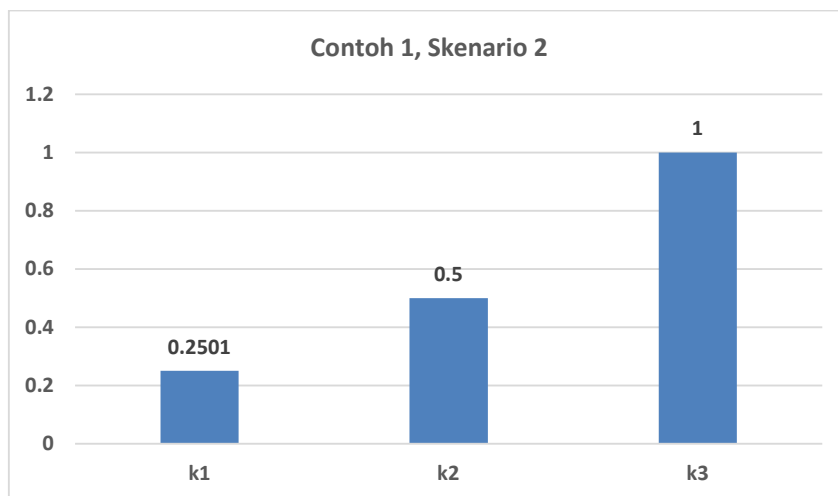
Gbr. 2. Deteksi kekakuan Contoh 1 Skenario 1



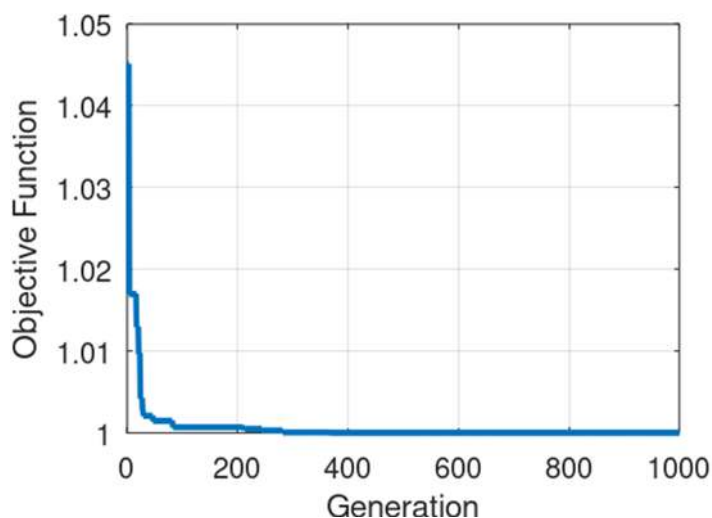
Gbr. 3. Fungsi obyektif Contoh 1 Skenario 1

Untuk Skenario 2, hasil deteksi kekakuan struktur ditunjukkan pada Gbr. 4. Sedangkan grafik fungsi obyektif

generasi per generasi dapat dilihat ada Gbr. 5.



Gbr. 4. Deteksi kekakuan Contoh 1 Skenario 2

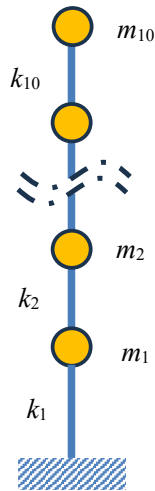


Gbr. 5. Fungsi obyektif Contoh 1 Skenario 2

Berdasarkan hasil simulasi, baik untuk Skenario 1 maupun Skenario 2, tampak bahwa AG riil dengan persilangan aritmetika dapat mendeteksi kerusakan struktur dengan baik. Untuk Skenario 1 fungsi obyektif mendekati konvergen pada generasi kurang dari 200 generasi, sedangkan untuk Skenario 2 konvergen dicapai sebelum generasi 400. Hasil deteksi kerusakan sangat baik, seperti yang ditunjukkan pada Gbr. 2 dan 4.

Contoh 2:

Suatu bangunan geser 10 lantai yang digunakan dalam Sadek dkk. (1997) dan Hadi dan Arfiadi (1998), dengan data sebagai berikut: massa: $m_1=179$ t; $m_2=170$ t; $m_3=161$ t; $m_4=152$ t; $m_5=143$ t; $m_6=134$ t; $m_7=125$ t; $m_8=116$ t; $m_9=107$ t; $m_{10}=98$ t; kekakuan: $k_1=62.47\text{e}3$ kN/m; $k_2=52.26\text{e}3$ kN/m; $k_3=56.14\text{e}3$ kN/m; $k_4=53.02\text{e}3$ kN/m; $k_5=49.91\text{e}3$ kN/m; $k_6=46.79\text{e}3$ kN/m; $k_7=43.67\text{e}3$ kN/m; $k_8=40.55\text{e}3$ kN/m; $k_9=37.43\text{e}3$ kN/m; $k_{10}=34.31\text{e}3$ kN/m. Dalam tulisan ini, kerusakan diskensariokan secara numerik dengan skenario kerusakan diambil seperti terlihat pada Tabel 2. Baik Skenario 1 maupun Skenario 2 merupakan skenario dengan kerusakan jamak.

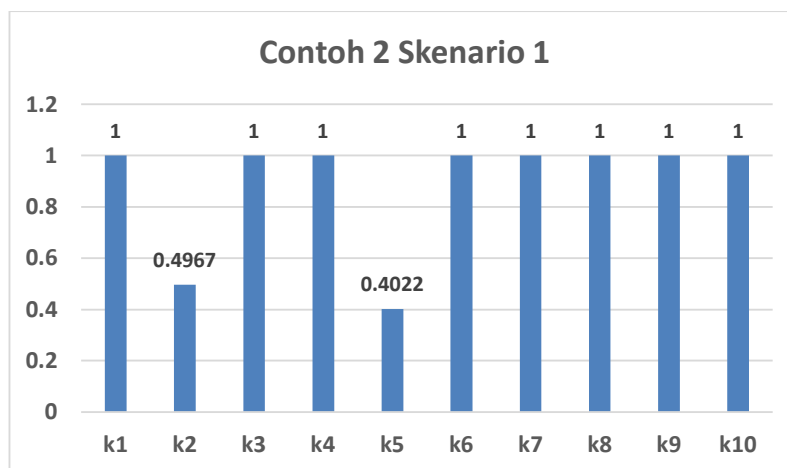


Gbr. 6. Bangunan geser 10 lantai

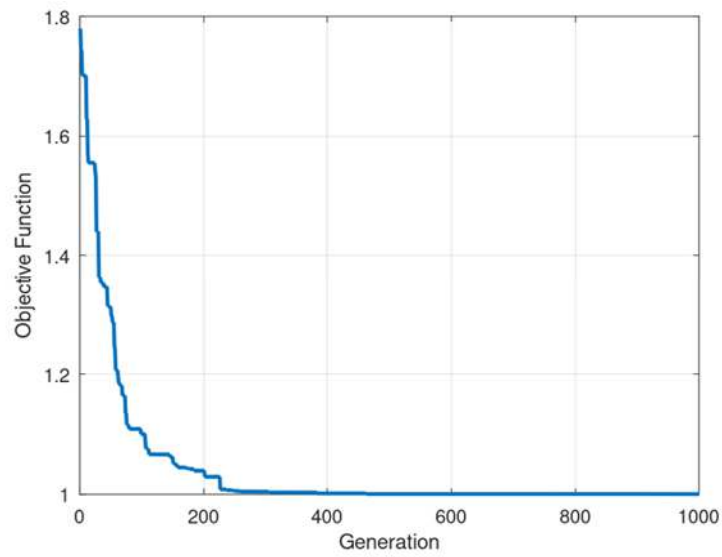
Tabel 2. Skenario kerusakan contoh 2

Kekakuan tingkat (kN/m)	Skenario 1	Skenario 2
1	100%	30%
2	50%	60%
3	100%	100%
4	100%	100%
5	40%	100%
6	100%	70%
7	100%	100%
8	100%	100%
9	100%	100%
10	100%	40%

AG riil dengan persilangan aritmetika digunakan untuk mendeteksi kerusakan struktur ini. Parameter AG yang sama seperti pada Contoh 1 digunakan pada Contoh 2 ini. Hasil simulasi untuk Skenario 1 dapat dilihat pada Gbr. 7 untuk hasil deteksi kerusakan kekakuan tingkat, sedangkan perkembangan fungsi obyektif dapat dilihat pada Gbr. 8.

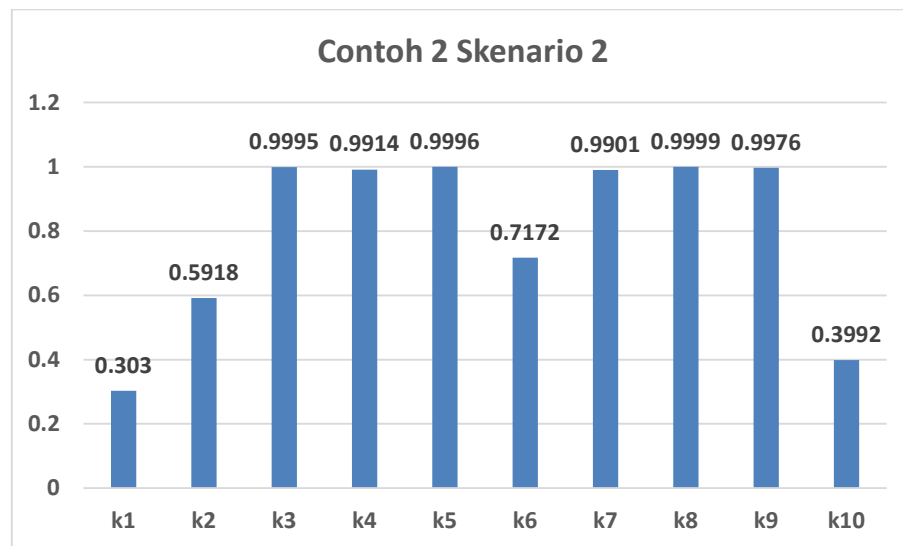


Gbr. 7. Deteksi kekakuan Contoh 2 Skenario 1

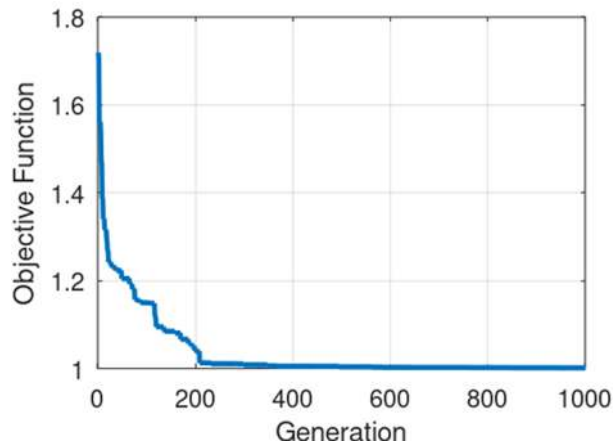


Gbr. 8. Fungsi obyektif Contoh 1 Skenario 1

Untuk Skenario 2, hasil simulai AG untuk deteksi kerusakan dapat dilihat pada Gbr. 9. Sedangkan perkembangan fungsi obyektif dapat dilihat pada Gbr. 10.



Gbr. 9. Deteksi kekakuan Contoh 2 Skenario 2



Gbr. 10. Fungsi obyektif Contoh 2 Skenario 2

Dari Gbr. 8 dan 10 tampak bahwa AG riil dengan persilangan aritmetika dapat mendeteksi kekakuan tingkat dengan cukup akurat, baik untuk Skenario 1 maupun Skenario 2.

6. KESIMPULAN

Deteksi kerusakan struktur menggunakan algoritma genetika riil (AG riil) dengan persilangan aritmetika telah digunakan dalam tulisan ini. Fungsi obyektif yang digunakan rerata selisih dari frekuensi setiap ragam dan kriteria jaminan ragam (*modal assurance criterion*). Selisih frekuensi pada setiap ragam untuk mendeteksi deviasi sifat-sifat struktur yang terdeteksi, sedangkan kriteria jaminan ragam untuk memeriksa similaritas antar ragam. Karena nilai kekakuan yang dideteksi dinyatakan dengan rasio terhadap kekakuan struktur yang sehat, maka persilangan aritmetika digunakan dalam AG riil dalam tulisan ini. Dalam hal ini batas atas dan batas bawah variabel desain bernilai 0 sampai dengan 1, yang menunjukkan seberapa besar deviasi kekakuan tingkat terhadap kekakuan tingkat struktur yang sehat.

DAFTAR PUSTAKA

- Allemang, R.J. dan Brown, D.L. (1982). A correlation coefficient for modal vector analysis. In In Proceedings of the 1st SEM International Modal Analysis Conference, Orlando, FL, USA, 8-10 November.
- Arfiadi, Y. and Hadi, MNS. (2001). "Optimal direct (static) output feedback controller using real coded genetic algorithms", *Computers and Structures*, 79, 1625-1634.
- Bernal, D. (2002). Load vectors for damage localization. *Journal of Engineering Mechanics* 128(1): 7-14.
- Frans, R., Arfiadi, Y. (2024). Damage detection in space truss structures using a third-level approach. *Discov Civ Eng* 1, 13, <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00013-x>
- Gao, Y., Spencer Jr., B.F., and Bernal, D. 2004. Experimental verification of the damage locating vector method, *Proc., 1st International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology*, Honolulu, Hawaii, January 12-14.
- Hadi, M. N. S. dan Arfiadi, Y. (1998). Optimum design of absorber for MDOF structure. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 124(11), 1272-1280.
- Holland, J. H. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems*. MIT Press, Mass.
- Kaveh, A., Rahmani, P., Dadras Eslamlou, A. (2021) "Damage Detection Using a Graph-based Adaptive Threshold for Modal Strain Energy and Improved Water Strider Algorithm", *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 65(4), pp. 989–1007. <https://doi.org/10.3311/PPci.17903>.
- Rytter, A. (1993). *Vibration based inspection of civil engineering structures*. Doctoral dissertation, Aalborg University. Department of Building Technology and Structural Engineering.
- Sadek, F., Mohraj, B., Taylor, A. W., Chung, R. M. (1997). "A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic application." *Earthquake Engrg. and Struct. Dynamics*, 26, 617-635.
- Sarraf, M. And Bruneau, M. (1998). "Ductile seismic retrofit of steel deck-truss bridges, II: Design applications." *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 124(11), 1263-1271.
- Shirazi, M.R. N., · Mollamahmoudi, H. · Seyedpoor, S.M. (2014). "Structural Damage Identification Using an Adaptive Multi-stage Optimization Method Based on a Modified Particle Swarm Algorithm", *J. Optim Theory Appl* (2014) 160:1009–1019, DOI 10.1007/s10957-013-0316-6
- Yang, X.S. (2014). *Nature-inspired metaheuristic algorithm*. 1st ed. London: Elsevier.