

Aplikasi vektor beban penentu lokasi kerusakan struktur pada struktur portal rangka ruang

Richard Frans^{1,*}, Yoyong Arfiadi²

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Makassar, Makassar, Indonesia

²Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia

*Corresponding authors: richardfrans.rf@gmail.com

Submitted: 17 March 2023, Revised: 14 October 2023, Accepted: 8 November 2023

ABSTRACT: Structural health monitoring system is one of the most interesting and important topics in civil engineering. This is because a good structural health monitoring system will increase the reliability of the structure. There are 4 (four) levels in the structural health monitoring system, one of which is damage localization. Damage localization requires an approach or method that can accurately predict the damaged member. One of the methods that is widely applied and proven to give good results for predicting damaged members called damage locating vector (DLV). The DLV method has been applied to several structures, such as plane truss structures, space truss structures, plane frame structures, shear buildings, plane stress elements, thick plate elements and several types of structures. The purpose of this research is to apply DLV method to space frame structures to find out the effectiveness of this method in damage detection. There are three damage scenarios used, two single damage scenarios and one multiple damage scenario. Based on the results obtained, the DLV method can accurately determine the damaged member in the space frame structure for single damage scenarios but in case of multiple damage scenarios, the DLV cannot predict the damaged member due to the values of the end forces and moments of the damaged members are similar to one another.

KEYWORDS: damage locating vector; damage detection; space frame structure.

ABSTRAK: Sistem monitoring kesehatan struktur merupakan salah satu topik yang sangat menarik dan penting dalam bidang teknik sipil. Hal ini dikarenakan dengan sistem monitoring kesehatan struktur yang baik akan meningkatkan kehandalan struktur tersebut. Terdapat 4 (empat) tingkatan dalam sistem monitoring kesehatan struktur, salah satunya adalah penentuan lokasi kerusakan (damage localization). Hal ini menjadi menarik dikarenakan tahap ini membutuhkan pendekatan atau metode yang dapat menghasilkan pembacaan yang akurat terhadap elemen yang mengalami kerusakan. Salah satu metode yang umumnya digunakan, diaplikasikan dan terbukti memberikan hasil yang baik untuk memprediksi elemen yang mengalami kerusakan. Metode ini adalah metode vektor beban penentu lokasi kerusakan (VBPLK). Metode VBPLK telah diaplikasikan pada beberapa struktur, seperti struktur rangka bidang, struktur rangka ruang, struktur portal bidang, shear building, elemen plane stress, elemen thick plate dan beberapa tipe struktur lainnya. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengaplikasikan metode VBPLK pada struktur portal ruang guna melihat efektivitas metode ini dalam mendeteksi kerusakan pada tipe struktur tersebut. Terdapat 3 (tiga) skenario kerusakan yang digunakan, yaitu 2 (dua) skenario kerusakan tunggal dan 1 (satu) skenario kerusakan ganda. Berdasarkan hasil yang didapatkan, metode VBPLK dapat dengan baik mendeteksi kerusakan elemen pada struktur portal ruang untuk skenario kerusakan tunggal tetapi tidak demikian halnya dengan skenario kerusakan ganda, di mana prediksi elemen yang mengalami kerusakan tidak dapat dilakukan dikarenakan nilai gaya-gaya dan momen-momen ujung dari elemen yang mengalami kerusakan mirip satu dengan yang lain.

KATA KUNCI: vektor beban penentu lokasi kerusakan; deteksi kerusakan; struktur portal ruang.

© The Author(s) 2020. This article is distributed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International license.

1 PENDAHULUAN

Sistem *monitoring* kesehatan struktur merupakan salah satu faktor yang penting dalam menentukan “keberlangsungan hidup” dari suatu struktur. Jika pemantauan berlangsung dengan lancar dan baik maka akan memberikan informasi yang akurat tentang kesehatan, tingkat pelayanan, integritas dan keamanan dari struktur tersebut. Terlebih lagi dapat memberikan informasi terkait pemeliharaan apa yang harus dilakukan pada struktur tersebut (Avci et al, 2020). Sistem *monitoring* kesehatan struktur telah terbukti

menjadi salah satu “tools” untuk mendeteksi kerusakan struktur pada tahap yang paling awal (Aguilar et al, 2019) sehingga memudahkan untuk melakukan pemeliharaan pada bagian-bagian atau elemen-elemen struktur yang mengalami kerusakan. Secara umum, terdapat 4 (empat) tingkatan dalam *monitoring* kerusakan struktur, antara lain (Rytter, 2013):

1. Tingkat 1, mengetahui apakah ada kerusakan pada suatu struktur (*damage detection*).
2. Tingkat 2, menentukan lokasi elemen yang mengalami kerusakan (*damage localization*).

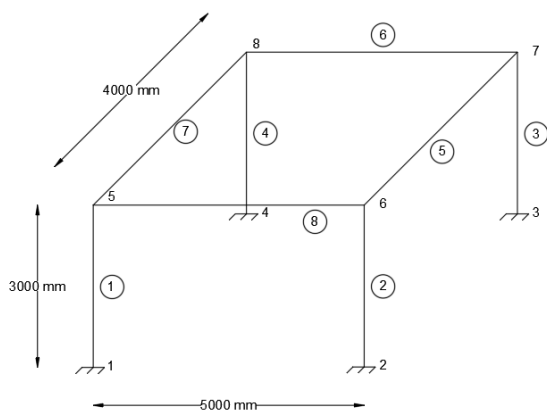
3. Tingkat 3, menentukan tingkat kerusakan elemen (*quantification of damage severity*).
4. Tingkat 4, memprediksi sisa waktu layan dari struktur (*prediction of remaining service life*).

Vektor Beban Penentu Lokasi Kerusakan (VBPLK) pertama kali dikemukakan oleh Bernal (2000). Metode ini adalah salah satu metode monitoring kerusakan struktur tingkat dua yaitu untuk menentukan lokasi kerusakan elemen pada suatu struktur. Pada awalnya VBPLK ini diaplikasikan pada struktur rangka bidang; akan tetapi seiring dengan perkembangan telah digunakan pada beberapa tipe struktur lainnya seperti rangka batang ruang, struktur balok, struktur portal bidang, *shear building*, elemen *plane stress* dan elemen *thick plate* (Bernal, 2000, 2002; Frans et al, 2017; Nguyen, et al, 2018; Frans & Arfiadi, 2017, 2018, 2019, 2020).

Penelitian-penelitian terkait penggunaan metode VBPLK pada struktur portal ruang masih sangat terbatas, termasuk efektivitas dari metode ini untuk digunakan dalam menentukan lokasi kerusakan elemen pada struktur portal ruang. Oleh karena itu, pada penelitian kali ini, metode VBPLK ini diaplikasikan pada struktur portal ruang sederhana 1 (satu) tingkat untuk melihat efektivitas metode ini dalam menentukan lokasi kerusakan elemen pada struktur portal ruang. Untuk hal tersebut maka ditentukan dua skenario kerusakan yang digunakan, yaitu skenario kerusakan tunggal dan skenario kerusakan ganda baik untuk elemen balok ataupun untuk elemen kolom.

2 METODOLOGI

Struktur portal ruang yang diambil pada penelitian ini adalah struktur portal ruang 1 (satu) lantai sederhana dengan 4 elemen balok dan 4 elemen kolom. Panjang dan lebar struktur portal ruang diambil 5 meter dan 4 meter dengan tinggi kolom adalah 3 meter. Gambar 1 menunjukkan struktur portal ruang yang digunakan. Struktur portal ruang ini diasumsikan merupakan struktur beton bertulang dengan kriteria penampang seperti yang dapat dilihat pada Tabel 1 sedangkan untuk kriteria material yang digunakan adalah beton dengan kuat tekan (f_c') = 25 MPa.

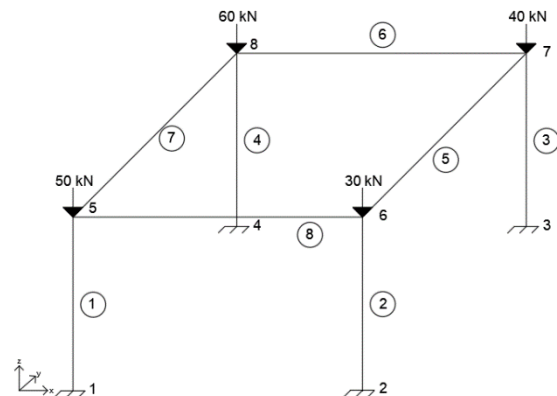


Gambar 1. Struktur portal ruang yang digunakan

Tabel 1. Kriteria penampang struktur portal ruang

Uraian	Dimensi
Ukuran kolom	300 mm x 300 mm
Ukuran balok	300 mm x 500 mm
Luas penampang kolom	90000 mm ²
Luas penampang balok	150000 mm ²
Momen inersia – y untuk kolom	6.75x10 ⁸ mm ⁴
Momen inersia – y untuk balok	31.25x10 ⁸ mm ⁴
Momen inersia – z untuk kolom	6.75x10 ⁸ mm ⁴
Momen inersia – z untuk balok	11.25x10 ⁸ mm ⁴
Konstanta torsi untuk kolom	11.4075x10 ⁸ mm ⁴
Konstanta torsi untuk balok	28.1737x10 ⁸ mm ⁴

Perhitungan analisis struktur menggunakan bantuan *software* MATLAB R2022a di mana seluruh fungsi untuk menghitung variabel dilakukan pengkodean terlebih dahulu (Mathworks, 2015). Setelah itu, dilakukan validasi dengan menggunakan *software* komersil untuk analisis struktur, yaitu ETABS (Computer & Structures, Inc, 2016), untuk memeriksa apakah hasil analisis struktur yang diperoleh adalah sama satu dengan yang lainnya. Beban terpusat arah sumbu z pada titik simpul 5, 6, 7 dan 8 masing-masing sebesar 50 kN, 30 kN, 40 kN dan 60 kN. Gambar 2 menunjukkan beban yang diaplikasikan pada struktur portal ruang tersebut untuk memeriksa hasil dari masing-masing *software* yang digunakan.



Gambar 2. Beban terpusat pada titik simpul 5, 6, 7 dan 8

Terdapat 3 skenario kerusakan yang digunakan dalam penelitian ini, antara lain:

1. Skenario pertama: kerusakan tunggal, di mana hanya terdapat satu elemen yang mengalami kerusakan, yaitu elemen kolom (3) di mana elemen kolom (3) mengalami penurunan kekakuan sebesar 50%.
2. Skenario kedua: kerusakan tunggal, di mana hanya terdapat satu elemen yang mengalami kerusakan, yaitu elemen balok (6) di mana

elemen balok (6) mengalami penurunan kekakuan sebesar 35%.

3. Skenario ketiga: kerusakan ganda, di mana dua elemen yang mengalami kerusakan, yaitu elemen kolom (2) dan elemen balok (6) dengan masing-masing penurunan kekakuan sebesar 25% dan 20%.

2.1 Struktur Portal Ruang

Struktur portal ruang merupakan struktur tiga dimensi dengan koordinat lokal dan global. Terdapat beberapa variabel yang dibutuhkan untuk merakit matriks kekakuan dari elemen struktur portal ruang, seperti modulus elastisitas material (E), modulus geser (G), luas penampang (A), momen inersia Ix dan Iy, momen inersia polar (J) dan panjang elemen (L) (Kattan, 2008). Elemen struktur portal ruang memiliki 6 (enam) derajat kebebasan pada masing-masing node, di mana terdapat 3 (tiga) derajat kebebasan translasi dan 3 (tiga) derajat kebebasan rotasi sehingga suatu elemen akan memiliki 12 (dua belas) derajat kebebasan. Gambar 3 menunjukkan ilustrasi penentuan derajat kebebasan dari elemen struktur portal ruang.

Pada penelitian ini, struktur portal ruang dianalisis dengan menggunakan metode matriks kekakuan. Secara umum, terdapat beberapa langkah untuk menganalisis struktur dengan menggunakan metode matriks kekakuan, antara lain (Arfiadi, 2011):

1. Menentukan matriks kekakuan elemen dalam koordinat lokal.
2. Menentukan matriks transformasi elemen lokal ke dalam elemen global.
3. Menentukan matriks kekakuan elemen dalam koordinat global.
4. Merakit matriks kekakuan struktur.
5. Menentukan vektor perpindahan global (deformasi global).
6. Menentukan vektor perpindahan lokal masing-masing elemen (deformasi lokal).
7. Menentukan gaya-gaya dan momen-momen ujung batang.



Gambar 3. Derajat kebebasan pada elemen struktur portal ruang

2.2 Vektor Beban Penentu Lokasi Kerusakan (VBPLK)

Vektor Beban Penentu Lokasi Kerusakan (VBPLK) merupakan salah satu teknik untuk mendeteksi lokasi elemen struktur yang mengalami kerusakan. Metode ini telah banyak digunakan untuk

mendeteksi kerusakan elemen struktur pada berbagai tipe struktur. Metode ini memiliki tingkat akurasi yang cukup baik dalam memprediksi lokasi kerusakan dari elemen struktur yang ditinjau. Metode ini didasarkan pada perubahan matriks fleksibilitas dari struktur sebelum dan setelah mengalami kerusakan. Secara umum, terdapat empat langkah untuk mengaplikasikan metode VBPLK (Bernal, 2002), yaitu:

1. Menentukan perubahan matriks fleksibilitas struktur,

$$\Delta f = f_U - f_D \dots\dots\dots (1)$$

dengan Δf adalah perubahan matriks fleksibilitas, f_U adalah matriks fleksibilitas struktur pada keadaan sebelum mengalami kerusakan, f_D adalah matriks fleksibilitas struktur pada keadaan setelah mengalami kerusakan

2. Menentukan matriks *singular value decomposition* dari Δf ,

$$\Delta f = U \begin{bmatrix} s_1 & 0 \\ 0 & s_2 \end{bmatrix} V^T \dots\dots\dots (2)$$

dengan s_2 adalah nilai singular yang sangat kecil; untuk kondisi ideal nilai s_2 mengandung nilai nol dan VBPLK adalah vektor V yang berhubungan dengan kondisi *null space*. Langkah-langkah berikut digunakan untuk menentukan VBPLK, antara lain:

- a. Mengaplikasikan vektor V menjadi vektor beban pada struktur dalam kondisi sebelum mengalami kerusakan.
- b. Menghitung tegangan normal pada setiap elemen struktur.
- c. Menentukan nilai maksimum dari tegangan karakteristik, c_j dan menghitung nilai indeks svn untuk setiap vektor beban V dengan menggunakan Persamaan (3).

$$svn_j = \sqrt{\frac{s_j c_j^2}{s_q c_q^2}} \dots\dots\dots (3)$$

dengan:

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

3. Vektor yang memiliki nilai $svn \leq 0.20$ dapat dikategorikan sebagai VBPLK.
4. Menghitung nilai tegangan normalisasi masing-masing elemen dengan persamaan sebagai berikut:

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

dengan nsi_i adalah tegangan normalisasi untuk elemen ke-i, σ_i adalah tegangan elemen ke-i, σ_{max} adalah tegangan elemen maksimum pada struktur tersebut.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 2 menunjukkan hasil perbandingan perpindahan global untuk masing-masing titik yang didapatkan dengan menggunakan *software* MATLAB R2022a dan ETABS. Berdasarkan tabel tersebut, dapat disimpulkan bahwa hasil yang didapatkan tidak menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan dan dapat digunakan untuk analisis lanjutan.

Tabel 2. Hasil perpindahan global masing-masing titik

Perpindahan global	MATLAB R2022a	ETABS	Selisih
Titik Simpul 5			
U_x (mm)	-0.0080	-0.0080	0.0000
U_y (mm)	0.0051	0.0050	0.0001
U_z (mm)	-0.0709	-0.0710	0.0001
R_x (rad)	0.0000	0.0000	0.0000
R_y (rad)	0.0000	0.0000	0.0000
R_z (rad)	0.0000	0.0000	0.0000
Titik Simpul 6			
U_x (mm)	-0.0080	-0.0080	0.0000
U_y (mm)	0.0051	0.0050	0.0001
U_z (mm)	-0.0426	-0.0430	0.0004
R_x (rad)	0.0000	0.0000	0.0000
R_y (rad)	0.0000	0.0000	0.0000
R_z (rad)	0.0000	0.0000	0.0000
Titik Simpul 7			
U_x (mm)	-0.0080	-0.0080	0.0000
U_y (mm)	0.0051	0.0050	0.0001
U_z (mm)	-0.0567	-0.0570	0.0003
R_x (rad)	0.0000	0.0000	0.0000
R_y (rad)	0.0000	0.0000	0.0000
R_z (rad)	0.0000	0.0000	0.0000
Titik Simpul 8			
U_x (mm)	-0.0080	-0.0080	0.0000
U_y (mm)	0.0051	0.0050	0.0001
U_z (mm)	-0.0851	-0.0850	0.0001
R_x (rad)	0.0000	0.0000	0.0000
R_y (rad)	0.0000	0.0000	0.0000
R_z (rad)	0.0000	0.0000	0.0000

Langkah selanjutnya yaitu mengaplikasi metode vektor beban penentu lokasi kerusakan struktur pada struktur portal ruang untuk mendeteksi kerusakan yang ada pada struktur portal ruang tersebut dan menentukan lokasi dari elemen yang mengalami kerusakan. Kerusakan struktur pada penelitian kali ini direpresentasikan dengan berkurangnya modulus elastisitas pada elemen yang mengalami kerusakan.

Tabel 3 menunjukkan hasil dari gaya-gaya dan momen-momen ujung yang didapatkan untuk setiap elemen dalam koordinat lokal untuk skenario pertama. Berdasarkan pada Tabel 3 elemen kolom (3) menunjukkan nilai gaya-gaya dan momen-momen ujung yang sangat kecil jika dibandingkan dengan elemen struktur lainnya, sehingga dapat dikategorikan bahwa elemen kolom (3) sudah mengalami kerusakan. Hal ini ditandai pada beberapa nilai gaya-gaya dan momen-momen ujung yang mendekati nol (≈ 0). Tabel 4 menunjukkan hasil dari gaya-gaya dan momen-momen ujung yang didapatkan untuk setiap elemen dalam koordinat lokal untuk skenario kedua. Sama halnya dengan skenario pertama, nilai gaya-gaya dan momen-momen ujung yang sangat kecil menunjukkan bahwa elemen tersebut sudah mengalami kerusakan, sehingga dalam skenario kedua ini, dapat dikatakan bahwa elemen balok (6) sudah mengalami kerusakan, akan tetapi lain halnya dengan skenario ketiga, di mana diasumsikan terjadi kerusakan ganda pada elemen kolom (2) dan balok (6). Pada skenario ketiga ini, nilai gaya-gaya dan momen-momen ujung untuk elemen kolom (2) dan balok (6) hampir mirip dengan nilai gaya-gaya dan momen-momen ujung elemen lainnya sehingga prediksi elemen yang mengalami kerusakan tidak dapat dilakukan (Tabel 5).

Gambar 4 menunjukkan *freebody diagram* untuk elemen yang mengalami kerusakan pada skenario pertama dan skenario kedua. Pada skenario pertama, elemen yang mengalami kerusakan adalah elemen kolom (3), dapat dilihat bahwa nilai gaya-gaya dan momen-momen ujung yang didapatkan cukup kecil jika dibandingkan dengan elemen lainnya. Hal ini juga terlihat pada skenario kedua, di mana elemen balok (6) yang mengalami kerusakan mempunyai nilai gaya-gaya dan momen-momen ujung yang cukup kecil, jika dibandingkan dengan elemen lainnya. Sedangkan untuk skenario ketiga, tidak dapat ditarik kesimpulan elemen yang mengalami kerusakan dikarenakan nilai gaya-gaya dan momen-momen ujung setiap elemen mirip satu dengan lainnya.

Tabel 3. Nilai gaya-gaya dan momen-momen ujung elemen untuk skenario pertama

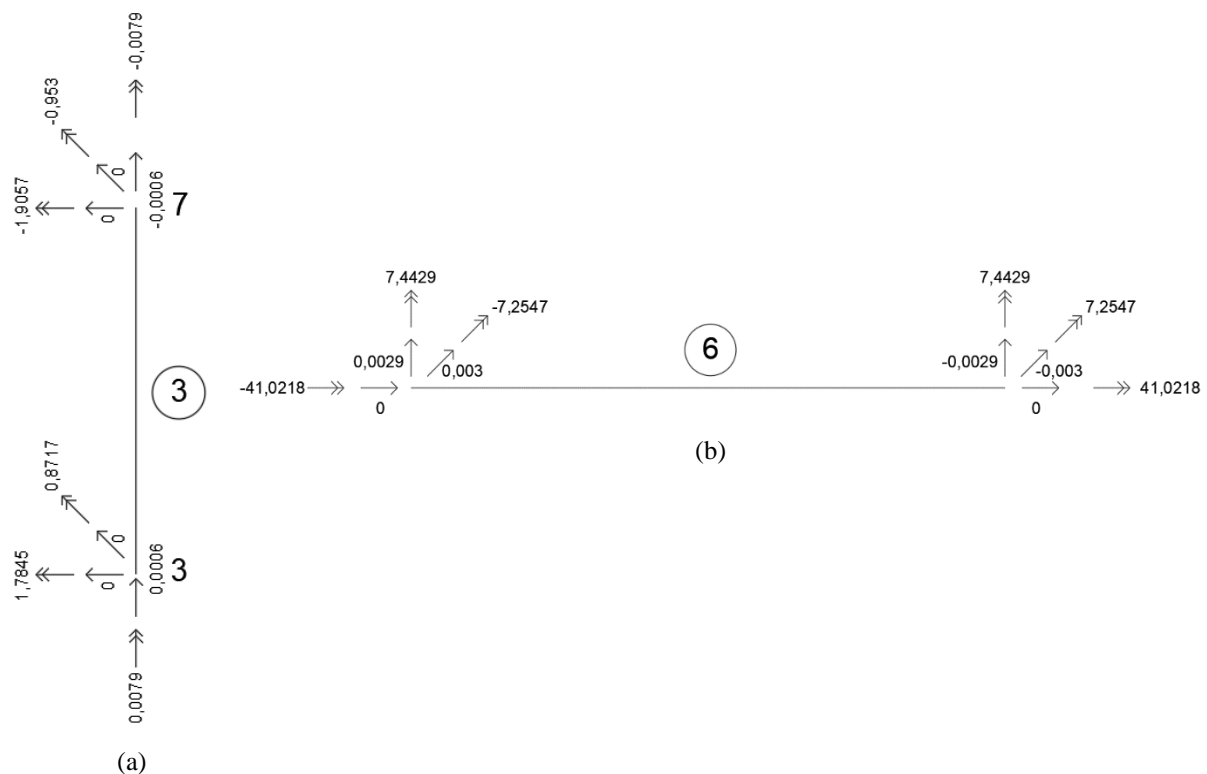
Elemen/DoF lokal	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.2903	0.6511	0.0006	0.0981	0.0649	0.0426	0.0105	0.0112
2	0.2325	-0.0004	0	0.2325	0.1172	0.0937	0.1172	-0.0938
3	-0.1461	-0.1461	0	0.0003	0.0062	0.0049	-0.1593	0.0778
4	0.0083	-0.0221	0.0079	0.0383	-13.35	14.4183	-13.4027	14.4737
5	230.2029	230.3243	0.8717	0.3603	-12.0575	-12.4145	318.6808	-194.551
6	364.3305	1.1453	1.7845	364.4224	234.4318	234.3176	234.4423	-234.54
7	-0.2903	-0.6511	-0.0006	-0.0981	-0.0649	-0.0426	-0.0105	-0.0112
8	-0.2325	0.0004	0	-0.2325	-0.1172	-0.0937	-0.1172	0.0938
9	0.1461	0.1461	0	-0.0003	-0.0062	-0.0049	0.1593	-0.0778
10	-0.0083	0.0221	-0.0079	-0.0383	13.35	-14.4183	13.4027	-14.4737
11	207.9549	208.0294	-0.953	-1.3368	-12.543	-12.06	318.5637	-194.681
12	333.0388	-2.4051	-1.9057	333.0969	234.3252	234.404	234.5487	-234.454

Tabel 4. Nilai gaya-gaya dan momen-momen ujung elemen untuk skenario kedua

Elemen/DoF lokal	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.0357	-0.0357	-0.237	0.237	0.0046	0	-0.0046	0
2	-0.3082	0.3082	0.3082	-0.3082	0.0409	0.003	0.0409	-0.003
3	-0.5128	-0.5128	0.0288	0.0288	0.2008	0.0029	0.2008	0.2707
4	74.2796	74.2796	74.2847	74.2847	-51.6144	-41.0218	-51.6144	-41.0127
5	809.8897	809.8897	-42.0676	-42.0676	-401.586	-7.2547	-401.617	-676.84
6	-481.903	481.9034	481.9497	-481.95	81.7451	7.4429	81.7269	-7.4655
7	-0.0357	0.0357	0.237	-0.237	-0.0046	0	0.0046	0
8	0.3082	-0.3082	-0.3082	0.3082	-0.0409	-0.003	-0.0409	0.003
9	0.5128	0.5128	-0.0288	-0.0288	-0.2008	-0.0029	-0.2008	-0.2707
10	-74.2796	-74.2796	-74.2847	-74.2847	51.6144	41.0218	51.6144	41.0127
11	728.4546	728.4546	-44.36	-44.36	-401.617	-7.2547	-401.586	-676.84
12	-442.599	442.5993	442.6369	-442.637	81.7269	7.4429	81.7451	-7.4655

Tabel 5. Nilai gaya-gaya dan momen-momen ujung elemen untuk skenario ketiga

Elemen/DoF lokal	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.4195	0.0809	-0.1219	-0.3485	-0.0035	0.0011	0.0016	-0.0027
2	0.6176	0.0405	0.0405	0.6176	0.0797	0.0817	0.0797	-0.0817
3	0.0351	0.0351	-0.1632	-0.1632	0.0473	0.0856	-0.4228	-0.0132
4	-44.8286	-44.8322	-44.8349	-44.8313	18.2299	38.7255	18.2239	38.7207
5	-54.15	-54.183	257.2702	257.256	-94.5794	-214.035	845.622	32.9858
6	968.3915	65.7014	65.6665	968.4076	159.3194	204.1645	159.3429	-204.162
7	-0.4195	-0.0809	0.1219	0.3485	0.0035	-0.0011	-0.0016	0.0027
8	-0.6176	-0.0405	-0.0405	-0.6176	-0.0797	-0.0817	-0.0797	0.0817
9	-0.0351	-0.0351	0.1632	0.1632	-0.0473	-0.0856	0.4228	0.0132
10	44.8286	44.8322	44.8349	44.8313	-18.2299	-38.7255	-18.2239	-38.7207
11	-51.2096	-51.2356	232.2649	232.2528	-94.5562	-214.029	845.6131	33.0055
12	884.3338	55.8588	55.8307	884.3473	159.3289	204.1748	159.3333	-204.151



Gambar 4. (a) *Freebody diagram* untuk elemen 3 pada skenario pertama, (b) *Freebody diagram* untuk elemen 6 pada skenario kedua

4 KESIMPULAN

Penelitian ini membahas tentang aplikasi VBPLK pada struktur portal ruang, di mana terdapat 3 (tiga) skenario kerusakan yang digunakan. Skenario pertama dan kedua adalah skenario kerusakan di mana satu elemen saja yang mengalami kerusakan (kerusakan tunggal), sedangkan untuk skenario ketiga adalah skenario kerusakan ganda di mana terdapat dua elemen yang mengalami kerusakan. Berdasarkan hasil yang didapat, deteksi kerusakan struktur dengan metode VBPLK menunjukkan hasil yang baik pada skenario kerusakan tunggal, yaitu skenario pertama dan kedua, di mana elemen yang mengalami kerusakan dapat ditentukan dengan jelas. Hal ini ditunjukkan dengan nilai gaya-gaya dan momen-momen ujung untuk elemen yang mengalami kerusakan cukup kecil, jika dibandingkan dengan elemen lainnya. Sedangkan untuk skenario ketiga, nilai gaya-gaya dan momen-momen ujung pada elemen yang mengalami kerusakan tidak menunjukkan nilai yang cukup kecil jika dibandingkan dengan elemen lainnya, sehingga tidak dapat disimpulkan elemen mana yang mengalami kerusakan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aguilar, R., Zonno, G., Lozano, G., Boroschek, R., & Lourenco, P. B. (2019). Vibration-based damage detection in historical adobe structures: laboratory and field applications. *International Journal of Architectural Heritage*, 13(7), 1005-1028. <https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1632974>
- Arfiadi, Y. (2011). *Analisis Struktur dengan Metode Matriks Kekakuan*. Cahaya Atma Pustaka.
- Avci, O., Abdeljaber, O., Kiranyaz, S., Hussein, M., Gabbouj, M. & Inman, D. J. (2020). A review of vibration-based damage detection in civil structures: from traditional methods to machine learning and deep learning applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 147, 107077, <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.107077>
- Bernal, D. (2000). *Extracting Flexibility Matrices from State-Space Realizations*.
- Bernal, D. (2002). Load Vector for Damage Localization. *Journal of Engineering Mechanics*, 128(1), 7-14. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2002\)128:1\(7\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2002)128:1(7))
- Computer & Structures, Inc. (2016). *CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CSI Bridge*, Computer & Structures, Inc.
- Frans, R., Arfiadi, Y., & Parung, H. (2017). Comparative study of mode shape curvature and damage locating vector methods for damage detection of structures. *Procedia Engineering*, 171, 1263-1271. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.420>
- Frans, R. & Arfiadi, Y. (2017). Structural damage detection using MAC-Fast Multi Swarm Optimization technique (MAC-FMSO). *Matec Web of Conferences*. 138, 02020. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713802020>
- Frans, R. & Arfiadi, Y. (2018). Aplikasi vektor beban penentu lokasi kerusakan pada struktur plane stress. *Seminar Nasional Riset dan Teknologi Terapan 8 (RITEKTRA 8)*, Universitas Atma Jaya Makassar.

- Frans, R. & Arfiadi, Y. (2020). Aplikasi metode vektor beban penentu lokasi kerusakan pada struktur thick plate. *Jurnal Teknik Sipil*, 15(4), 209-217. <https://doi.org/10.24002/jts.v15i4.3792>
- Kattan, P. I. (2008). *MATLAB guide to finite elements an interactive approach*. Springer.
- MathWorks. (2015). *MATLAB: Primer, Version 8.6*. The Mathworks, Inc.
- MathWorks. (2015). *MATLAB: Programming Fundamental, Version 8.6*. The Mathworks, Inc.
- Nguyen, T. T., Tran, V. A., Nguyen, M. N., Vo, D. T., & Ho, H. V. (2018). A combination of damage locating vector method (DLV) and differential evolution algorithm (DE) for structural damage assessment. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 12, 92-108. <https://doi.org/10.1007/s11709-016-0379-1>
- Rytter, A. (1993). *Vibration based inspection of civil engineering structures* [Doctoral dissertation, Aalborg University]. Department of Building Technology and Structural Engineering.