

APLIKASI METODE VEKTOR BEBAN PENENTU LOKASI KERUSAKAN PADA STRUKTUR THICK PLATE

Richard Frans¹, dan Yoyong Arfiadi²

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Makassar
Jalan Tanjung Alang No. 23, Makassar
Telp. (0411) 871038

² Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta
Jalan Babarsari No. 44, Yogyakarta
E-mail: richardfrans.rf@gmail.com, yoyong.ar@uajy.ac.id

Abstrak: Salah satu metode yang sering digunakan dalam mendeteksi kerusakan elemen dalam struktur adalah metode vektor beban penentu lokasi kerusakan. Hal ini dikarenakan metode ini cukup mudah untuk digunakan dan memberi hasil yang cukup memuaskan dalam mendeteksi kerusakan struktur. Pada penelitian-penelitian sebelumnya, metode vektor beban penentu lokasi kerusakan ini telah banyak diaplikasikan ke berbagai jenis (tipe) struktur misalnya pada struktur balok, struktur rangka, struktur portal, dan lain sebagainya. Oleh karena itu, pada penelitian ini, metode beban penentu lokasi kerusakan ini diaplikasikan pada *struktur thick plate*. Terdapat dua skenario pembagian elemen dengan masing-masing tiga skenario kerusakan. Skenario pembagian elemen yaitu struktur thick plate akan dibagi menjadi 4 elemen dan 81 elemen. Pemodelan yang digunakan adalah dengan menggunakan metode elemen hingga dengan mengasumsikan elemen pelat tersebut sebagai elemen *eight-noded quadratic quadrilateral plate bending*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kemampuan dari metode vektor beban penentu lokasi kerusakan dalam menentukan elemen rusak. Berdasarkan hasil yang didapatkan, metode vektor beban penentu lokasi kerusakan cukup akurat dalam menentukan elemen yang diasumsikan mengalami kerusakan.

Kata Kunci: deteksi kerusakan, vektor beban penentu lokasi kerusakan, struktur thick plate.

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Metode Vektor Beban Penentu Lokasi Kerusakan (VBPLK) telah banyak digunakan dalam dunia ketekniksipil khususnya untuk deteksi kerusakan struktur seperti pada struktur balok, struktur rangka batang, ataupun struktur bangunan geser. Hal ini dikarenakan keandalan dari metode ini yang dapat menentukan lokasi kerusakan elemen dari struktur dengan tingkat akurasi yang cukup memuaskan (Gao, Spencer, dan Bernal, 2007). Metode ini didasarkan pada perubahan matriks fleksibilitas pada struktur. Pada penelitian sebelumnya metode VBPLK juga telah berhasil diaplikasikan pada struktur *plane stress* (Frans dan Arfiadi, 2018). Oleh karena itu, pada penelitian ini, metode VBPLK diterapkan pada struktur *thick plate* dan untuk mengetahui keakuratan metode VBPLK pada struktur *thick plate*. Keakuratan yang dimaksudkan adalah ketepatan metode VBPLK dalam menentukan lokasi dari elemen yang mengalami kerusakan. Oleh karena itu, dua skenario pembagian elemen dengan masing-masing tiga skenario kerusakan ditinjau.

Kerusakan yang dimaksud dalam penelitian ini adalah penurunan kekakuan dari elemen dimana hal ini dapat terjadi dikarenakan lama layan dari struktur tersebut. Pemodelan struktur *thick plate* mengikuti teori Reissner (1945) dan Mindlin (1951) dan seluruh algoritma perhitungan struktur dan model elemen hingga dikerjakan dengan menggunakan bantuan MATLAB (Mathworks, 2015).

1.2 Tinjauan Pustaka

1.2.1. Metode Vektor Beban Penentu Lokasi Kerusakan (VBPLK)

Metode VBPLK adalah salah satu metode deteksi kerusakan struktur yang sangat populer untuk digunakan. Keunggulan dari metode ini adalah mudah untuk digunakan dengan tingkat akurasi yang cukup memuaskan. Fungsi dari metode ini adalah untuk menentukan lokasi kerusakan dari suatu struktur. Metode ini pertama kali diusulkan oleh Bernal (2002). Secara umum, terdapat tiga langkah untuk menerapkan metode ini, yaitu sebagai berikut:

1. Menentukan matriks fleksibilitas dari struktur sebelum dan sesudah terjadi kerusakan sesuai dengan persamaan (1),

$$\Delta F = F_U - F_D \quad (1)$$

di mana, ΔF adalah perubahan matriks fleksibilitas, F_U adalah matriks fleksibilitas dari struktur pada kondisi "sehat", F_D adalah matriks fleksibilitas dari struktur saat setelah mengalami kerusakan.

2. Menentukan nilai *singular value decomposition* dari perubahan matriks fleksibilitas (ΔF) sesuai dengan persamaan (2),

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

dengan s_2 adalah nilai singular yang sangat kecil, di mana pada kondisi ideal nilai s_2 mengandung nilai nol dan VBPLK adalah vektor V yang berhubungan dengan kondisi *null space*. Secara umum, VBPLK didapatkan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- a. Menghitung tegangan setiap elemen pada struktur dalam kondisi sebelum terjadi kerusakan dengan menggunakan vektor V sebagai vektor beban.
- b. Menghitung tegangan normal untuk setiap elemen.
- c. Menentukan nilai maksimum dari tegangan karakteristik, c_j .
- d. Menghitung nilai indeks *svn* untuk setiap vektor beban V dengan menggunakan persamaan (3),

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

3. Vektor beban (V) yang memiliki nilai $svn \leq 0,20$ dapat dikategorikan sebagai VBPLK.

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

4. Menghitung nilai tegangan normalisasi masing-masing elemen dengan persamaan (5),

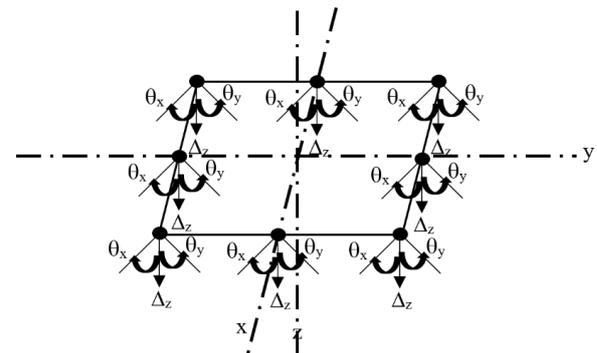
$$nsi_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_{max}} \quad (5)$$

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

Jika nilai nsi_i mendekati nilai nol, maka elemen tersebut dapat digolongkan sebagai elemen yang mengalami kerusakan (Bernal, 2002). Akan tetapi, untuk menyederhanakan proses penentuan VBPLK, gaya-gaya dalam yang berhubungan dengan tegangan seperti momen lentur, gaya lintang (geser), ataupun gaya aksial dapat digunakan sebagai penanda bahwa vektor beban tersebut merupakan VBPLK, karena prinsip dari metode ini adalah jika gaya-gaya dalam (*internal forces*) dari elemen tersebut mendekati nilai nol, maka vektor beban tersebut dapat dikategorikan sebagai VBPLK tanpa lebih lanjut menghitung tegangannya (Frans dan Arfiadi, 2018). Oleh karena itu, pada penelitian ini, yang dijadikan acuan untuk menentukan vektor beban tersebut adalah VBPLK atau bukan adalah nilai momen lentur di tengah elemen (momen tengah).

1.2.2. Struktur *thick plate*

Pelat didefinisikan sebagai suatu struktur bidang yang mempunyai ketebalan yang sangat kecil jika dibandingkan dengan kedua panjang sisi lainnya. Pelat didesain untuk memikul momen lentur baik arah sumbu x maupun momen lentur arah sumbu y , serta momen puntir (*twisting moment*).



Gambar 1. Eight noded quadratic quadrilateral

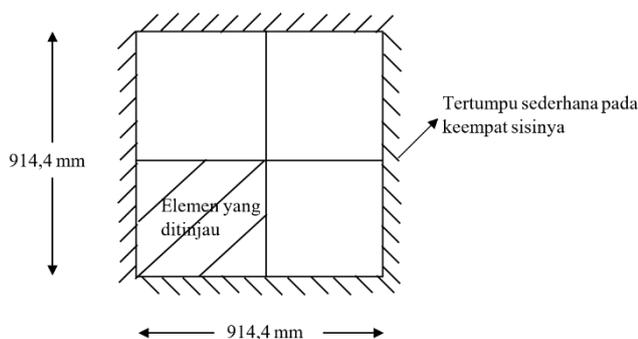
Secara umum, pelat dapat dikategorikan menjadi dua jenis yaitu *thin plate* dan *thick plate*. Teori *thin plate* didasarkan pada formula Kirchoff pada tahun 1850, dan pada tahun 1945. Pada tahun 1951 teori *thin plate* tersebut dimodifikasi

oleh Reissner dan Mindlin yang menjadi dasar teori *thick plate* untuk pertama kali. Perbedaan mendasar dari kedua teori ini adalah teori *thin plate* tidak memperhitungkan deformasi geser transversal sehingga tidak memperhitungkan perilaku geser dari struktur pelat sebaliknya pada struktur *thick plate*, deformasi geser diperhitungkan (Zienkiewicz dan Taylor, 2005).

Gambar 1 menunjukkan elemen yang digunakan dalam penelitian ini yaitu *eight noded quadratic quadrilateral*, di mana setiap *node* mempunyai tiga derajat kebebasan sehingga tiap elemen memiliki 24 derajat kebebasan. Algoritma dan perhitungan model elemen hingga menggunakan bantuan MATLAB.

1.3 Metodologi Penelitian

Ditinjau sebuah elemen *thick plate* berukuran $914,4 \times 914,4 \text{ mm}^2$ dengan tebal 6.35 mm yang terbuat dari material baja yang mempunyai modulus elastisitas sebesar 206.843 MPa dan $\nu = 0,3$ seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2. Keempat sisi ditumpu secara sederhana (*simply supported*). Struktur *thick plate* ini diambil dari Khennane (2013), akan tetapi dikarenakan elemen *thick plate* tersebut simetris, maka hanya satu bagian saja yang ditinjau yaitu daerah yang diarsir.

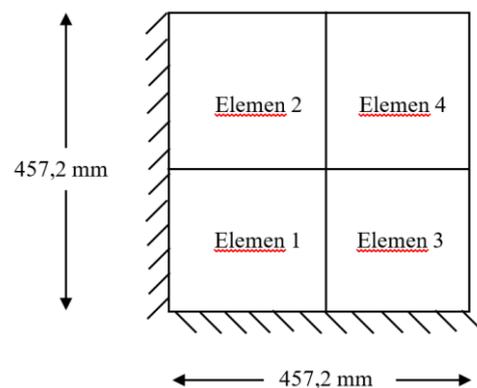


Gambar 2. Struktur *thick plate* dengan tertumpu sederhana pada keempat sisinya

Berdasarkan Gambar 2, maka elemen struktur *thick plate* yang ditinjau hanya berukuran $457,2 \times 457,2 \text{ mm}^2$. Kemudian terdapat 2 skenario pembagian elemen yaitu 4 elemen dan 81 elemen guna melihat pengaruh dari kerapatan *meshing* yang mempengaruhi jumlah elemen pada struktur *thick plate* tersebut (Gambar 3 dan Gambar 4) dan pada masing-masing skenario

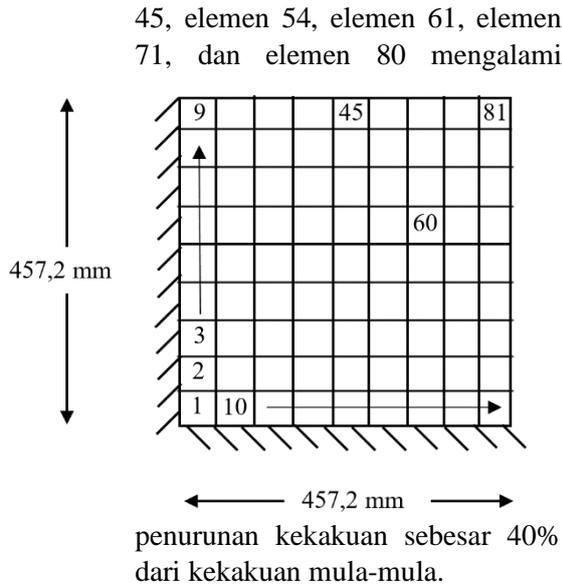
pembagian elemen, terdapat 3 skenario kerusakan yang ditinjau, sebagai berikut:

- a. Skenario pembagian elemen yang pertama adalah struktur *thick plate* dibagi menjadi 4 elemen seperti yang terlihat pada Gambar 2 dengan skenario kerusakan, antara lain:
 - i. Skenario kerusakan pertama, elemen 3 mengalami penurunan kekakuan sebesar 50% dari kekakuan mula-mula
 - ii. Skenario kerusakan kedua, elemen 4 mengalami penurunan kekakuan sebesar 25% dari kekakuan mula-mula
 - iii. Skenario kerusakan ketiga, elemen 1 dan elemen 4 mengalami penurunan kekakuan masing-masing sebesar 30% dan 70% dari kekakuan mula-mula.



Gambar 3. Pembagian struktur *thick plate* menjadi 4 elemen

- b. Skenario pembagian elemen yang kedua adalah struktur *thick plate* dibagi menjadi 81 elemen seperti yang terlihat pada Gambar 3 dengan skenario kerusakan, antara lain:
 - i. Skenario kerusakan pertama, elemen 55 mengalami penurunan kekakuan sebesar 50% dari kekakuan mula-mula
 - ii. Skenario kerusakan kedua, elemen 15 dan elemen 43 mengalami penurunan kekakuan sebesar 25% dari kekakuan mula-mula
 - iii. Skenario kerusakan ketiga, elemen 10, elemen 21, elemen 32, elemen



Gambar 4. Pembagian struktur *thick plate* menjadi 81 elemen

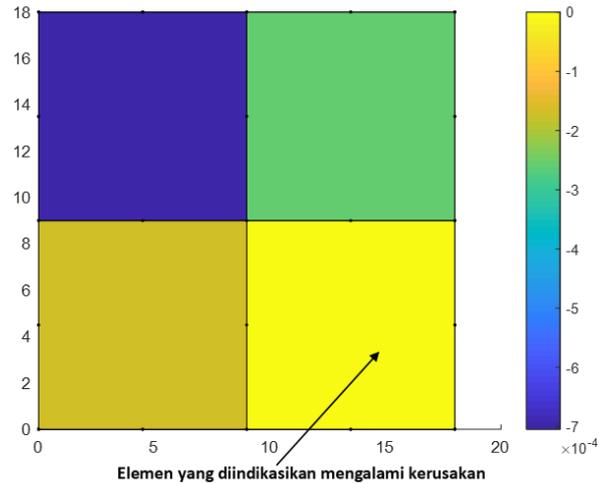
2. PEMBAHASAN

2.1. Pembagian struktur *thick plate* menjadi 4 elemen: skenario kerusakan pertama, elemen 3 mengalami penurunan kekakuan sebesar 50% dari kekakuan mula-mula

Gambar 5 menunjukkan kontur momen yang terjadi pada struktur *thick plate* untuk skenario pertama, dapat dilihat bahwa untuk elemen 3 menunjukkan nilai momen yang hampir sama dengan nol atau dapat dikatakan bahwa nilai momen yang dihasilkan akibat vektor beban penentu lokasi kerusakan sangat kecil sekali dengan nilai yang menghampiri nol. Untuk lebih jelasnya, nilai momen dapat dilihat pada Tabel 1. Hal ini menunjukkan bahwa elemen 3 terindikasi mengalami kerusakan dikarenakan nilai momen pada elemen 3 adalah $4.407.10^{-12}$ N-m.

Tabel 1. Nilai momen tengah masing-masing elemen untuk skenario pertama (4 elemen)

Elemen	Momen ($.10^{-4}$ N-m)
1	-7,042
2	-1,7391
3	$4,407.10^{-12}$
4	-2,555



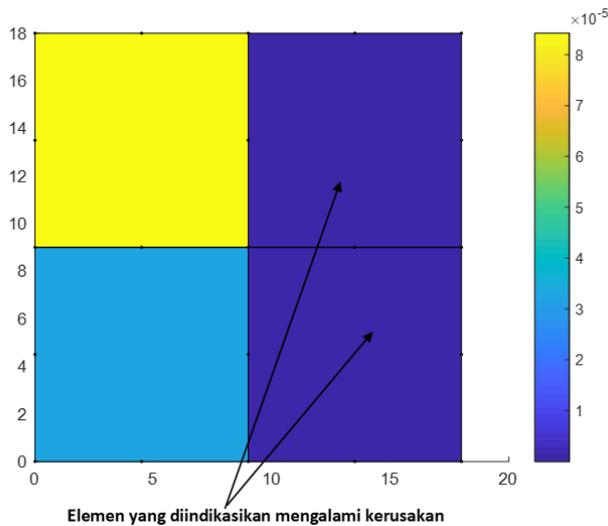
Gambar 5. Kontur nilai momen tengah pada masing-masing elemen untuk skenario pertama (4 elemen)

2.2. Pembagian struktur *thick plate* menjadi 4 elemen: skenario kerusakan kedua, elemen 4 mengalami penurunan kekakuan sebesar 25% dari kekakuan mula-mula

Skenario kedua masih merupakan skenario dengan *single damage* (kerusakan tunggal). Berdasarkan Gambar 6 dan Tabel 2, nilai momen elemen 3 dan 4 adalah masing-masing sebesar $4.4428.10^{-11}$ N-m dan $1.5234.10^{-11}$ N-m, terlihat bahwa kedua nilai momen pada elemen 3 dan 4 adalah mendekati nol, sehingga elemen 3 dan elemen 4 dapat dikategorikan sebagai elemen yang mengalami kerusakan, akan tetapi pada skenario kedua, elemen yang seharusnya mengalami kerusakan adalah hanya elemen 4 saja akan tetapi elemen 3 dikategorikan sebagai elemen yang mengalami kerusakan oleh metode vektor beban penentu lokasi kerusakan. Berdasarkan hal tersebut, perlu adanya kajian yang lebih dalam mengenai pembacaan yang kurang tepat tersebut.

Tabel 2. Nilai momen tengah masing-masing elemen untuk skenario kedua (4 elemen)

Elemen	Momen ($.10^{-5}$ N-m)
1	8,4226
2	3,1773
3	$4,4428.10^{-11}$
4	$1,5234.10^{-11}$



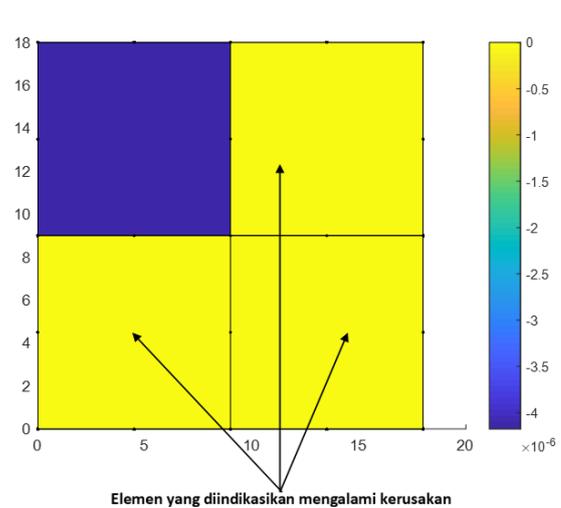
Gambar 6. Kontur nilai momen tengah pada masing-masing elemen untuk skenario kedua (4 elemen)

2.3. Pembagian struktur *thick plate* menjadi 4 elemen: skenario kerusakan ketiga, elemen 1 dan elemen 4 mengalami penurunan kekakuan sebesar 30% dan 70% dari kekakuan mula-mula

Skenario ketiga adalah skenario kerusakan ganda (*double damage*) yang terjadi pada elemen 1 dan elemen 4. Gambar 7 dan Tabel 3 menunjukkan nilai momen pada masing-masing elemen. Berdasarkan Gambar 7 dan Tabel 3, elemen yang diindikasikan mengalami kerusakan adalah elemen 1, elemen 3, dan elemen 4 yaitu dengan nilai momen masing-masing sebesar $3.661.10^{-9}$ N-m, $-9.0863.10^{-10}$ N-m dan $2.3814.10^{-10}$ N-m. Hasil ini menunjukkan hal yang sama dengan skenario kedua, di mana terdapat elemen yang seharusnya tidak mengalami kerusakan (elemen 3), akan tetapi diindikasikan mengalami kerusakan oleh metode vektor beban penentu lokasi kerusakan, sehingga perlu ada kajian yang lebih lanjut mengenai fenomena tersebut.

Tabel 3. Nilai momen tengah masing-masing elemen untuk skenario kedua (4 elemen)

Elemen	Momen ($.10^{-5}$ N-m)
1	$3,661.10^{-9}$
2	-4,1754
3	$-9,0863.10^{-10}$
4	$-2,3814.10^{-10}$



Gambar 7. Kontur nilai momen tengah pada masing-masing elemen untuk skenario ketiga (4 elemen)

2.4. Pembagian struktur *thick plate* menjadi 81 elemen: skenario kerusakan ketiga, elemen 55 mengalami penurunan kekakuan sebesar 50% dari kekakuan mula-mula

Gambar 8 dan Tabel 4 menunjukkan nilai momen tengah pada skenario pertama di mana kerusakan terjadi pada elemen 55. Skenario kerusakan yang pertama ini adalah kerusakan tunggal (*single damage*). Dikarenakan jumlah elemen yang cukup banyak, maka pada Tabel 4 hanya ditampilkan nilai momen tengah dari beberapa elemen saja. Untuk elemen lainnya, dapat langsung dilihat pada Gambar 8 (kontur momen tengah). Berdasarkan Gambar 8, elemen 55 mempunyai kontur berwarna biru muda yang berarti bahwa nilai momen tengah dari elemen 55 adalah mendekati nol. Oleh karena itu, elemen 55 dapat dikategorikan sebagai elemen yang diindikasikan mengalami kerusakan.

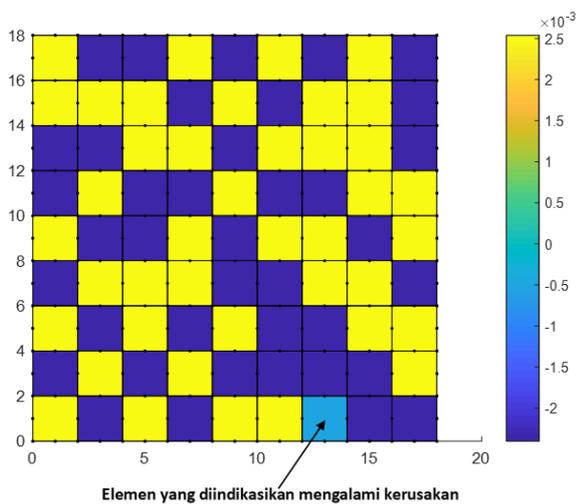
2.5. Pembagian struktur *thick plate* menjadi 81 elemen: skenario kerusakan kedua, elemen 15 dan elemen 43 mengalami penurunan kekakuan sebesar 25% dari kekakuan mula-mula

Pada skenario kerusakan kedua, elemen 15 dan elemen 43 diasumsikan menjadi elemen yang mengalami kerusakan, tipe skenario kerusakan yang kedua adalah kerusakan ganda di mana kerusakan terjadi pada 2 elemen dalam suatu struktur. Gambar 9 dan Tabel 5 menunjukkan

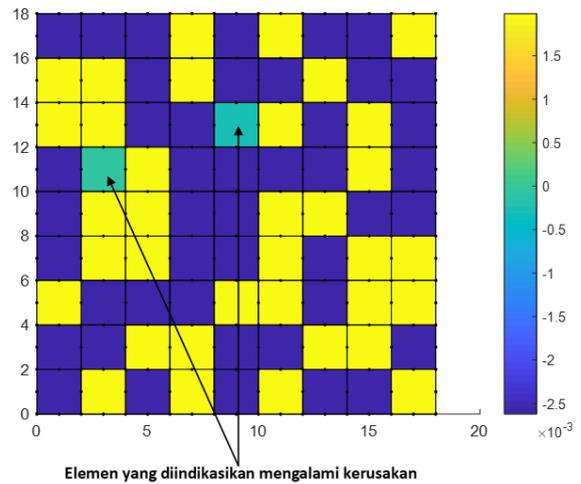
hasil nilai momen tengah untuk skenario kedua dengan menggunakan metode vektor beban penentu lokasi kerusakan. Dari Gambar 9 tersebut, dapat disimpulkan bahwa elemen 13 dan elemen 43 mengalami kerusakan karena mempunyai kontur tegangan yang berwarna biru muda dan pada Tabel 5 dapat dilihat juga bahwa nilai momen tengah untuk elemen 15 dan elemen 43 adalah $-4,95,10^{-14}$ N-m dan $-2,49,10^{-14}$ N-m. Hal ini mengindikasikan bahwa elemen 15 dan elemen 43 diidentifikasi mengalami kerusakan.

Tabel 4. Nilai momen tengah masing-masing elemen untuk skenario pertama (81 elemen)

Elemen	Momen ($\cdot 10^{-4}$ N-m)
50	4.9240
51	-3.2663
52	8.1728
53	-4.1139
54	1.7001
55	$-4.95 \cdot 10^{-10}$
56	-1.5853
57	-4.7512
58	7.6666
59	9.8061
60	-19.0881



Gambar 8. Kontur nilai momen tengah pada masing-masing elemen untuk skenario pertama (81 elemen)



Gambar 9. Kontur nilai momen tengah pada masing-masing elemen untuk skenario kedua (81 elemen)

Tabel 5. Nilai momen tengah masing-masing elemen untuk skenario kedua (81 elemen)

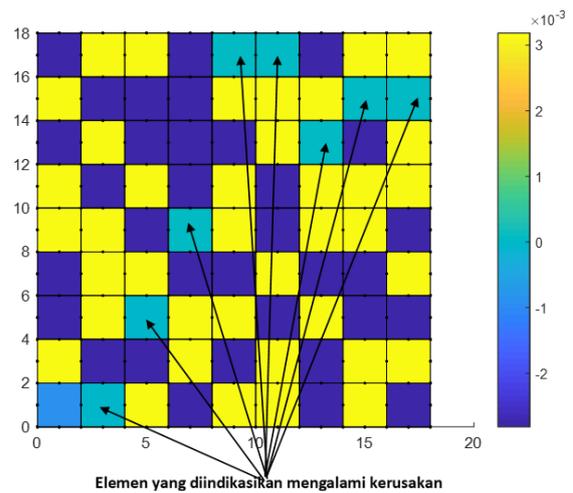
Elemen	Momen ($\cdot 10^{-4}$ N-m)
10	7,5958
11	-5,5710
12	-7,4437
13	1,9579
14	3,4610
15	$-4,95,10^{-10}$
16	2,4212
17	2,2907
18	-3,6089
19	-10,2822
20	13,9084
40	-0,3388
41	-1,1502
42	-0,1140
43	$-2,49,10^{-10}$
44	-5,5115
45	-3,2981
46	8,9302
47	-7,4985
48	4,0581
49	2,3282
50	0,7896

2.5. Pembagian struktur *thick plate* menjadi 81 elemen: skenario kerusakan kedua, elemen 10, elemen 21, elemen 32, elemen 45, elemen 54, elemen 61, elemen 70, dan elemen 80 mengalami penurunan kekakuan sebesar 40% dari kekakuan mula-mula

Skenario kerusakan terakhir atau yang ke tiga adalah skenario kerusakan majemuk di mana elemen yang mengalami kerusakan lebih dari dua. Pada kasus ini, jumlah elemen yang mengalami kerusakan adalah 8 elemen. Gambar 10 dan Tabel 6 menunjukkan nilai momen tengah pada setiap elemen untuk skenario kerusakan ketiga. Sekali lagi dikarenakan jumlah elemen yang cukup banyak, maka untuk skenario ketiga ini, nilai momen tengah yang ditampilkan pada Tabel 6 hanya kedelapan elemen yang mengalami kerusakan. Berdasarkan Gambar 10, elemen 10, elemen 21, elemen 32, elemen 45, elemen 54, elemen 61, elemen 71, dan elemen 80 mempunyai warna kontur biru muda yang menandakan bahwa kedelapan elemen tersebut diidentifikasi sebagai elemen yang mengalami kerusakan. Hal ini juga dapat dilihat pada Tabel 6, di mana nilai momen tengah pada kedelapan elemen tersebut sangat kecil, di mana nilai momen tengah dari ke delapan elemen tersebut mendekati nol.

Tabel 6. Nilai momen tengah masing-masing elemen untuk skenario kedua (81 elemen)

Elemen	Momen ($\cdot 10^{-15}$ N-m)
10	-0,8055
21	-0,5753
32	1,3574
45	1,9147
54	0,0375
61	1,8103
71	1,1875
80	0,0339



Gambar 10. Kontur nilai momen tengah pada masing-masing elemen untuk skenario ketiga (81 elemen)

3. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil yang didapatkan, metode VBPLK dapat dengan akurat menentukan lokasi kerusakan dari elemen pada struktur *thick shell* baik untuk pembagian 4 elemen maupun 81 elemen dengan berbagai skenario kerusakan (skenario kerusakan tunggal, ganda, maupun majemuk). Hal lain yang didapatkan dari penelitian ini adalah penguatan teori mengenai penggunaan nilai gaya-gaya dalam (*internal forces*) sebagai variabel untuk menentukan VBPLK. Hal ini dibuktikan dengan tegangan normalisasi tidak dihitung untuk masing-masing elemen dan hanya menggunakan nilai momen tengah untuk menentukan VBPLK sehingga dapat menghemat langkah perhitungan untuk menentukan lokasi kerusakan dari struktur.

DAFTAR PUSTAKA (DAN PENULISAN PUSTAKA)

- Bernal, D. (2002). Load Vectors for Damage Localization. *J of Engrg. Mech.*, 128(1):7–14
- Frans, R dan Arfiadi, Y. (2018). *Aplikasi Vektor Beban Penentu Lokasi Kerusakan Pada Struktur Plane Stress*. Makalah disajikan dalam Seminar Nasional Riset dan Teknologi Terapan 2018 (RITEKTRA 2018), Universitas Atma Jaya Makassar, 02-03 Agustus 2018.

- Gao, Y., Spencer, B.F., dan Bernal, D. (2007). Experimental Verification of the Flexibility-Based Damage Locating Vector. *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, 133 (10): 1043-1049.
- Khennane, A. (2013). *Finite element analysis using MATLAB and Abaqus*. Taylor & Francis Group, LLC.
- MathWorks. (2015). *MATLAB: Primer, Version 8.6*. The Mathworks, Inc.
- MathWorks. (2015). *MATLAB: Programming Fundamental, Version 8.6*. The Mathworks, Inc.
- Mindlin, R.D. (1951). Influence of Rotatory Inertia and Shear on Flexural Motions of Isotropic, Elastic Plates. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 18: 31-38
- Reissner, E. (1945). The Effect of Transverse Shear Deformation on The Bending of Elastic Plates. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 12: A68-77
- Zienkiewicz, O.C. dan Taylor, R.L. (2005). *The Finite Element Method: Sixth Edition*. Elsevier Ltd.