

PENGARUH JUMLAH SENSOR PADA DETEKSI KERUSAKAN STRUKTUR DENGAN METODE VEKTOR BEBAN PENENTU LOKASI RUSAK

Yoyong Arfiadi¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari 44 Yogyakarta
Email: yoyong@mail.uajy.ac.id

ABSTRAK

Infrastruktur dalam bidang teknik sipil merupakan bagian yang penting dalam menunjang perekonomian suatu wilayah. Akibat tidak berfungsinya suatu infrastruktur dapat menyebabkan terhambatnya laju perekonomian wilayah tersebut. Walaupun suatu infrastruktur telah direncanakan untuk dapat menahan beban-beban yang bekerja, namun karena pengaruh waktu, lingkungan, kurang baiknya pemeliharaan, dan sebab-sebab lain, dapat mempengaruhi kekuatan struktur tersebut. Pengaruh-pengaruh tersebut dapat menyebabkan terjadinya kerusakan atau pengurangan kekuatan pada struktur atau elemen struktur. Untuk itu, deteksi dini terjadinya kerusakan pada suatu struktur, diperlukan untuk menghindari korban jiwa maupun kerugian harta benda. Dalam tulisan ini dibahas metode deteksi kerusakan struktur berdasarkan perubahan matriks fleksibilitas yang diperoleh dari pengukuran sejumlah sensor. Dengan teknik *singular value decomposition (SVD)* selanjutnya dapat diekstraksi suatu persamaan, sehingga dapat ditentukan vektor beban penentu lokasi kerusakan. Dengan teknik ini, lokasi kerusakan pada struktur dapat dideteksi. Ukuran vektor beban untuk mengidentifikasi kerusakan tergantung dari ukuran matriks fleksibilitas, yang diperoleh dari informasi pengukuran sensor. Untuk menunjukkan efektivitas metode ini dalam mendeteksi lokasi rusak, dilakukan simulasi numerik pada suatu sistem jembatan rangka hipotesis dengan variasi jumlah pengukuran. Dari simulasi dapat dilihat bahwa metode ini cukup efektif dalam mendeteksi lokasi rusak dengan jumlah pengukuran yang relatif sedikit.

Kata kunci: deteksi kerusakan struktur, lokasi kerusakan, jumlah sensor, matriks fleksibilitas, vektor beban penentu lokasi rusak, *singular value decomposition*

1. PENDAHULUAN

Deteksi kerusakan struktur merupakan hal yang penting dalam bidang teknik, khususnya teknik sipil. Hal ini mengingat struktur dalam bidang teknik sipil harus berfungsi dengan baik agar keamanan dapat dipastikan. Selain itu struktur bidang teknik sipil, yang merupakan bagian infrastruktur dalam menunjang perekonomian, harus dipastikan berfungsi agar dapat mencegah kerugian yang diakibatkan oleh tidak berfungsinya infrastruktur tersebut.

Suatu struktur dapat mengalami proses pengurangan kekuatan yang dapat diakibatkan di antaranya oleh pengaruh lingkungan, kekurang- sempurnaan pengerjaan, pengaruh beban yang berlebihan, dan kurang baiknya pemeliharaan. Pemeliharaan yang baik akan menunjang keawetan suatu infrastruktur, namun pemeliharaan yang kurang optimal dapat menyebabkan proses pengurangan kekuatan berjalan dengan relatif lebih cepat dari yang seharusnya.

Pemeriksaan infrastruktur teknik sipil dapat didasarkan pada pemeriksaan langsung oleh manusia. Kondisi ini tentu saja kurang praktis mengingat keadaan infrastruktur sipil yang besar dan bersifat spasial. Pemeriksaan secara langsung sangat tergantung pada kondisi si pemeriksa dan dalam kondisi tertentu dapat membahayakan pemeriksa itu sendiri. Selain itu, kerusakan struktur sering tersembunyi, sehingga tidak mudah teramati secara langsung. Mengingat keadaan ini pemeriksaan kesehatan dan deteksi kerusakan secara otomatis diperlukan agar dapat dicapai hasil yang lebih baik.

Perkembangan dalam teknologi sensor dan teknologi informasi memungkinkan dilakukannya pemeriksaan secara otomatis. Kondisi ini memunculkan konsep sistem *monitoring* kesehatan struktur. Dengan sistem ini diharapkan dapat diketahui kondisi keamanan infrastruktur sipil, baik kesehatan secara umum maupun kondisi-kondisi lain agar infrastruktur ini dapat berfungsi untuk melayani masyarakat. Pada level tertentu, kondisi ini dapat digunakan oleh pengelola infrastruktur untuk mengambil keputusan kapan pengoperasian suatu infrastruktur harus dihentikan, agar korban jiwa dapat dihindari.

Sistem *monitoring* kesehatan struktur umumnya didasarkan pada cara-cara berdasarkan analisis dinamik (Sohn dkk. 2004, Montalvao dkk, 2006), sehingga pengetahuan mengenai metode dinamik merupakan hal

Struktur

yang penting. Teknik *monitoring* kesehatan struktur dapat dikategorikan ke dalam beberapa tingkat identifikasi sebagai berikut (Sohn dkk., 2004):

1. Level 1: Menentukan apakah ada kerusakan pada struktur
2. Level 2: Menentukan adanya kerusakan serta lokasi kerusakan
3. Level 3: Menentukan adanya kerusakan, lokasinya serta menilai tingkat kerusakan
4. Level 4: Menentukan adanya kerusakan, lokasinya, tingkat kerusakan serta memperkirakan sisa usia pakai struktur

Untuk memperkirakan proses pengurangan kekuatan struktur perlu dicari suatu metode deteksi kerusakan agar pengaruh pengurangan kekuatan struktur dapat diketahui sedini mungkin. Dengan diketahuinya kerusakan yang terjadi pada suatu infrastruktur, dapat mengurangi biaya perbaikan dan mencegah keruntuhan struktur yang dapat menyebabkan korban jiwa. Proses *monitoring* yang berkelanjutan merupakan syarat agar suatu infrastruktur bekerja dengan baik dan kesehatan struktur dapat diketahui secara terukur. Survey mengenai *monitoring* kesehatan struktur, yang cukup menyeluruh terhadap beberapa metode yang ada, telah dilakukan di antaranya oleh Sohn dkk. (2004), Montalvao dkk. (2006) dan Guan dan Karbhari (2008).

Dalam tulisan ini, deteksi kerusakan berdasarkan *singular value decomposition* dari selisih matriks fleksibilitas struktur dalam kondisi rusak dan tidak rusak (Bernal, 2002) digunakan untuk menentukan letak elemen rusak dari suatu struktur rangka batang. Variasi jumlah dan letak sensor dilakukan untuk menilai efektivitas vektor penentu lokasi rusak berdasarkan matriks fleksibilitas ini.

2. MATRIKS FLEKSIBILITAS STRUKTUR BERDASARKAN RAGAM GETARAN

Ditinjau suatu persamaan gerak dari suatu system berderajat kebebasan majemuk:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (1)$$

dengan \mathbf{M} = massa, \mathbf{C} = redaman, \mathbf{K} = kekakuan, \mathbf{F} = vektor beban.

Dengan analisis ragam dan sifat-sifat ortogonalitas bentuk ragam selanjutnya dapat diperoleh

$$\mathbf{M}^* = \boldsymbol{\phi}^T \mathbf{M} \boldsymbol{\phi} \quad (2a)$$

dan

$$\mathbf{K}^* = \boldsymbol{\phi}^T \mathbf{K} \boldsymbol{\phi} \quad (2b)$$

dengan $\boldsymbol{\phi}$ = bentuk ragam dengan sembarang normalisasi.

Selanjutnya dari sifat-sifat getaran bebas dapat diperoleh

$$\mathbf{K}^* - \omega^2 \mathbf{M}^* = 0 \quad (3)$$

atau

$$\omega^2 = \lambda = \mathbf{M}^{*-1} \mathbf{K}^* \quad (4)$$

Dengan mengkombinasikan persamaan (4) dan (2) diperoleh

$$\boldsymbol{\phi}^T \mathbf{K} \boldsymbol{\phi} - \boldsymbol{\phi}^T \mathbf{M} \boldsymbol{\phi} \lambda = 0 \quad (5)$$

Definisikan

$$\mathbf{v} = (\boldsymbol{\phi}^T \mathbf{M} \boldsymbol{\phi})^{1/2} = \mathbf{M}^{1/2} \quad (6)$$

di mana \mathbf{v} adalah matriks diagonal dengan indeks massa ternormalisasi pada diagonal utamanya.

Dengan mensubstitusikan persamaan (6) pada persamaan (5) diperoleh

$$\boldsymbol{\phi}^T \mathbf{K} \boldsymbol{\phi} - \mathbf{v}^2 \lambda = 0$$

atau

Struktur

$$\boldsymbol{\varphi}^T \mathbf{K} \boldsymbol{\varphi} = \mathbf{v}^T \boldsymbol{\lambda} \mathbf{v} \quad (7)$$

Dari persamaan (7) matriks kekakuan dapat diperoleh dari

$$\mathbf{K} = \left(\boldsymbol{\varphi}^T\right)^{-1} \mathbf{v}^T \boldsymbol{\lambda} \mathbf{v} \boldsymbol{\varphi}^{-1} \quad (8)$$

Dari persamaan (6) diperoleh

$$\left(\mathbf{v}^{-2} \boldsymbol{\varphi}^T \mathbf{M}\right) \boldsymbol{\varphi} = \mathbf{I} \quad \text{dan} \quad \boldsymbol{\varphi}^T \left(\mathbf{M} \boldsymbol{\varphi} \mathbf{v}^{-2}\right) = \mathbf{I} \quad (9)$$

sehingga

$$\boldsymbol{\varphi}^{-1} = \left(\mathbf{v}^{-2} \boldsymbol{\varphi}^T \mathbf{M}\right) \quad \text{dan} \quad \left(\boldsymbol{\varphi}^T\right)^{-1} = \left(\mathbf{M} \boldsymbol{\varphi} \mathbf{v}^{-2}\right) \quad (10)$$

Dengan menggunakan persamaan (10), persamaan (8) sekarang menjadi

$$\mathbf{K} = \mathbf{M} \boldsymbol{\varphi} \mathbf{v}^{-1} \boldsymbol{\lambda} \mathbf{v}^{-1} \boldsymbol{\varphi}^T \mathbf{M} \quad (11)$$

Karena hubungan antara matriks kekakuan dan matriks fleksibilitas, matriks fleksibilitas dapat diperoleh dari persamaan (8) sebagai

$$\mathbf{F} = \left(\boldsymbol{\varphi} \mathbf{v}^{-1}\right) \boldsymbol{\lambda}^{-1} \left(\boldsymbol{\varphi} \mathbf{v}^{-1}\right)^T \quad (12)$$

Dengan membandingkan matriks kekakuan dari persamaan (11) dan matriks fleksibilitas dari persamaan (12), tampak bahwa pengaruh setiap ragam frekuensi pada matriks kekakuan dan fleksibilitas. Pengaruh ragam ke-j pada matriks kekakuan bertambah sebanding dengan pertambahan kuadrat frekuensi ragam ke-j ($= \omega_j^2$). Sedangkan pengaruh ragam ke-j berkurang sebanding dengan kuadrat frekuensi ke-j ($= \omega_j^{-2}$). Hal ini menunjukkan bahwa matriks kekakuan sensitif terhadap frekuensi ragam yang lebih tinggi, sedangkan matriks fleksibilitas tidak begitu sensitif. Kenyataan ini menunjukkan bahwa identifikasi matriks fleksibilitas akan lebih menguntungkan dibandingkan matriks kekakuan sebab ragam-ragam yang lebih tinggi biasanya sulit dideteksi dalam percobaan di lapangan (Gao, 2005).

3. VEKTOR BEBAN PENENTU LOKASI RUSAK

Mengikuti langkah yang diajukan Bernal (2002), jika matriks fleksibilitas pada lokasi sensor pada kondisi tidak rusak dan rusak dapat ditentukan dan dinyatakan berturut-turut dengan \mathbf{F}_u dan \mathbf{F}_d dan vektor beban yang dinyatakan dengan \mathbf{L} memenuhi persamaan

$$\mathbf{F}_u \mathbf{L} = \mathbf{F}_d \mathbf{L} \quad (13a)$$

atau

$$\mathbf{F}_\Delta \mathbf{L} = (\mathbf{F}_d - \mathbf{F}_u) \mathbf{L} = \mathbf{0} \quad (13b)$$

maka berarti vektor beban \mathbf{L} menghasilkan perpindahan yang sama pada lokasi sensor pada kondisi sebelum dan sesudah rusak, Karena vektor beban penentu lokasi rusak (VBPLR) tidak menghasilkan tegangan pada elemen yang rusak, maka kerusakan elemen tersebut tidak mempengaruhi perpindahan pada tempat yang diukur. Dengan demikian vektor beban \mathbf{L} merupakan VBPLR.

Untuk menentukan vektor beban penentu kerusakan \mathbf{L} dapat dilakukan sebagai berikut ini. Perbedaan dari matriks fleksibilitas dari kondisi tidak rusak dan rusak dapat dinyatakan dalam *singular value decomposition* (SVD) sebagai

$$\mathbf{F}_\Delta = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^T \quad (14)$$

atau

$$\mathbf{F}_\Delta = [\mathbf{U}_1 \quad \mathbf{U}_o] \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} [\mathbf{V}_1 \quad \mathbf{V}_o]^T \quad (15)$$

Dengan mengingat sifat-sifat *SVD*

$$[\mathbf{V}_1 \quad \mathbf{V}_o]^T [\mathbf{V}_1 \quad \mathbf{V}_o] = \mathbf{I} \quad (16)$$

pers. (15) dapat ditulis menjadi

$$[\mathbf{F}_\Delta \mathbf{V}_1 \quad \mathbf{F}_\Delta \mathbf{V}_o] = [\mathbf{U}_1 \mathbf{S}_1 \quad 0] \quad (17)$$

sehingga

$$\mathbf{F}_\Delta \mathbf{V}_o = \mathbf{0} \quad (18)$$

Dengan membandingkan pers. (18) dan (13) tampak bahwa $\mathbf{L} = \mathbf{V}_o$. Jadi vektor beban penentu kerusakan dapat diperoleh dari *SVD* perbedaan matriks fleksibilitasnya.

Aplikasi pada beberapa kondisi kerusakan suatu rangka batang telah ditinjau secara numerik (Arfiadi dan Wibowo, 2005). Sedangkan percobaan di laboratorium telah dilakukan oleh Gao (2005) dan Gao dkk. (2004) untuk melihat efektivitas metode ini dalam mendeteksi lokasi rusak.

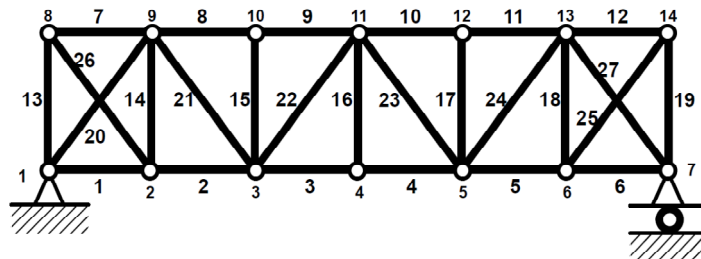
4. APLIKASI DENGAN VARIASI JUMLAH DAN LETAK SENSOR

Ditinjau suatu struktur rangka jembatan hipotesis seperti terlihat pada Gambar 1. Jumlah batang dalam rangka jembatan adalah 27, sedangkan derajat kebebasan yang ada adalah 25. Model struktur dibentuk berdasarkan metode matriks kekakuan (Arfiadi, 2011) dengan program Matlab yang telah dikembangkan dalam Arfiadi (1996). Jumlah derajat kebebasan struktur = 25. Matriks massa dibentuk dengan cara yang sama dengan matriks kekakuan dengan model matriks massa konsisten (*consistent mass*). Sifat-sifat batang yang digunakan dalam analisis adalah $E = 2 \times 10^8$ kN/m², $A_o = 1.785 \times 10^{-3}$ m².

Misal batang 8 rusak dengan $A = 50\% A_o$. Beberapa kondisi ditinjau sebagai berikut ini.

- (a) Kasus 1: jumlah sensor 4, diletakkan pada titik 3, 4, 5, dan 6.
- (b) Kasus 2: jumlah sensor 3, diletakkan pada titik 3, 4, dan 5.
- (c) Kasus 3: jumlah sensor 3, diletakkan pada titik 2, 4, dan 6.
- (d) Kasus 4: jumlah sensor 3, diletakkan pada titik 2, 3, dan 4.
- (e) Kasus 5: jumlah sensor 3, diletakkan pada titik 4, 5, dan 6.
- (f) Kasus 6: jumlah sensor 2, diletakkan pada titik 3 dan 5.
- (g) Kasus 7: jumlah sensor 2, diletakkan pada titik 2 dan 6.
- (h) Kasus 8: jumlah sensor 2, diletakkan pada titik 2 dan 4.
- (i) Kasus 9: jumlah sensor 2, diletakkan pada titik 5 dan 6.

Hasil analisis *SVD* untuk kasus 1 diperoleh 3 set vektor beban penentu lokasi rusak. Masing-masing vektor beban dikerjakan pada lokasi sensor, lalu model struktur sebelum rusak dianalisis berdasarkan vektor beban ini. Hasil tegangan yang terjadi dinormalisasi sehingga batang dengan tegangan yang terbesar mempunyai nilai absolut sebesar 1. Dari analisis diperoleh kandidat batang yang rusak sama untuk ketiga vektor beban.



Gambar 1. Rangka jembatan hipotesis

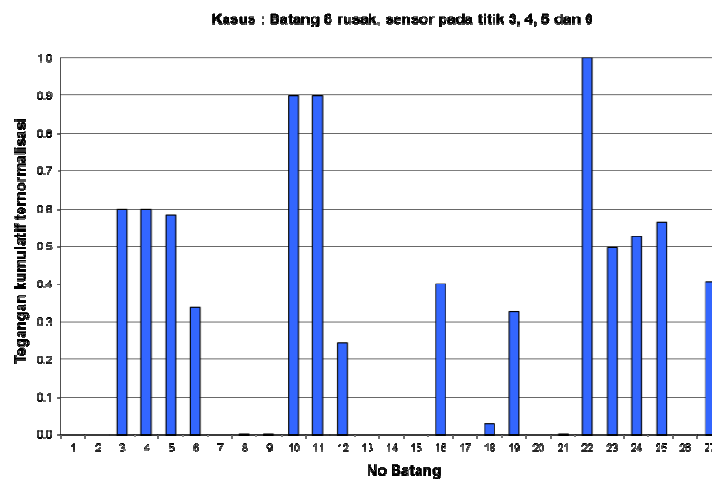
Hasil analisis oleh vektor beban ke-1 disajikan pada Gambar 2. Dari Gambar 2, tampak bahwa nilai tegangan pada batang 8 sangat kecil. Hal ini menunjukkan bahwa batang 8 merupakan batang dengan

Struktur

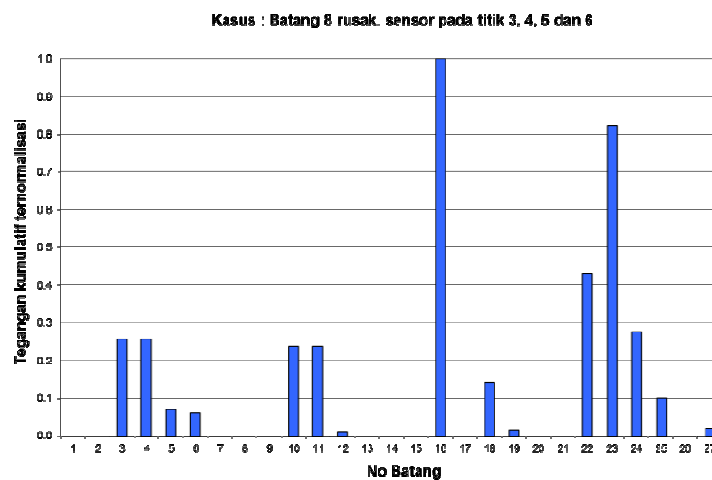
potensi rusak. Selain batang 8, batang-batang lain juga ada yang mempunyai tegangan yang kecil atau nol, sehingga batang-batang ini pun perlu diperiksa sebagai batang yang berpotensi rusak.

Hasil analisis untuk vektor beban ke-2 disajikan pada Gambar 3. Dari Gambar 3 tampak bahwa batang 8 mempunyai tegangan sama dengan nol. Sama seperti oleh vektor beban ke-1, terdapat batang-batang lain yang mempunyai tegangan sangat kecil atau sama dengan nol, sehingga perlu diselidiki potensi kerusakannya.

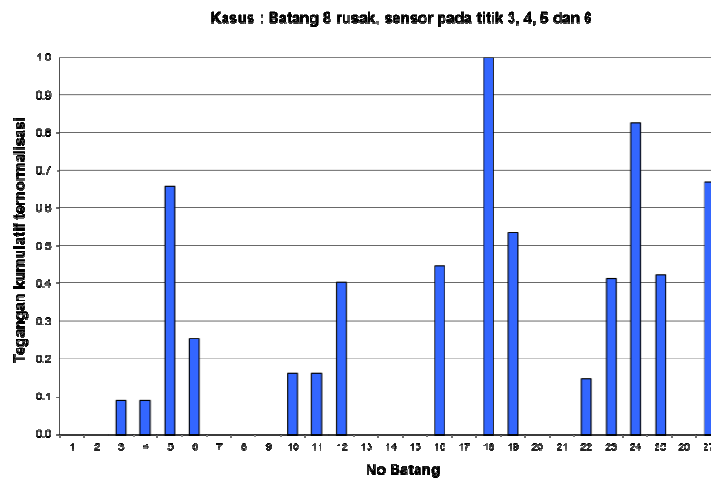
Hasil analisis oleh vektor beban ke-3 disajikan pada Gambar 4. Dari Gambar 4, tampak bahwa batang 8 mempunyai tegangan sama dengan nol, sehingga merupakan batang dengan potensi rusak. Selain itu, batang-batang lain dengan tegangan yang sangat kecil atau sama dengan nol perlu diselidiki terhadap potensi rusak.



Gambar 2. Kasus 1 oleh vektor beban ke-1.



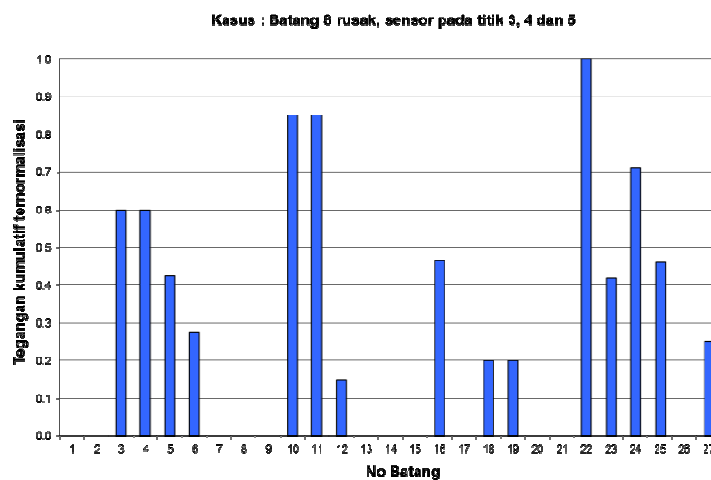
Gambar 3. Kasus 1 oleh vektor beban ke-2.



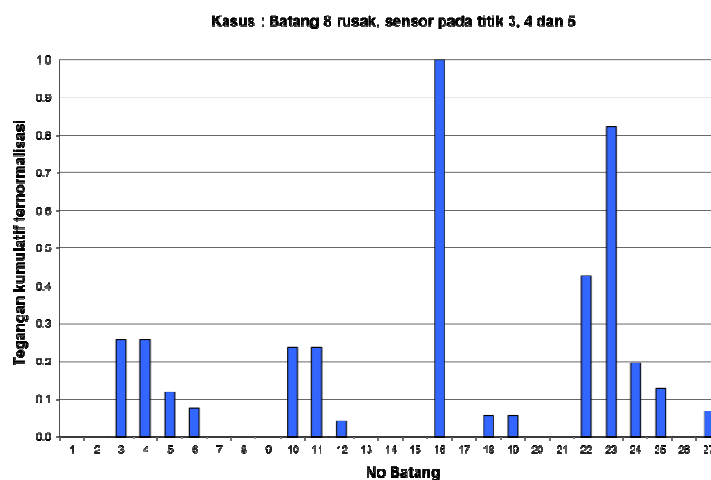
Gambar 4. Kasus 1 oleh vektor beban ke-3

Hasil analisis *SVD* untuk kasus 2 (jumlah sensor 3) menunjukkan terdapat 2 buah vektor beban sebagai penentu lokasi rusak. Selanjutnya masing-masing vektor beban dikerjakan pada struktur dengan model tak rusak. Hasil analisis normalisasi tegangan oleh vektor beban ke-1 disajikan pada Gambar 5, sedangkan hasil analisis normalisasi tegangan oleh vektor beban ke-2 disajikan pada Gambar 6.

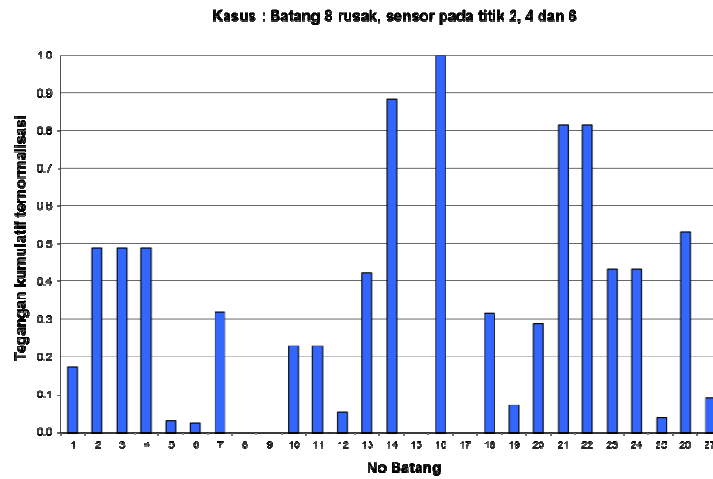
Dengan cara yang sama, hasil analisis untuk 3 buah sensor yang lain dilakukan. Hasil analisis untuk kasus 3 dengan sensor diletakkan pada titik 2, 4 dan 6 disajikan pada Gambar 7 dan 8.



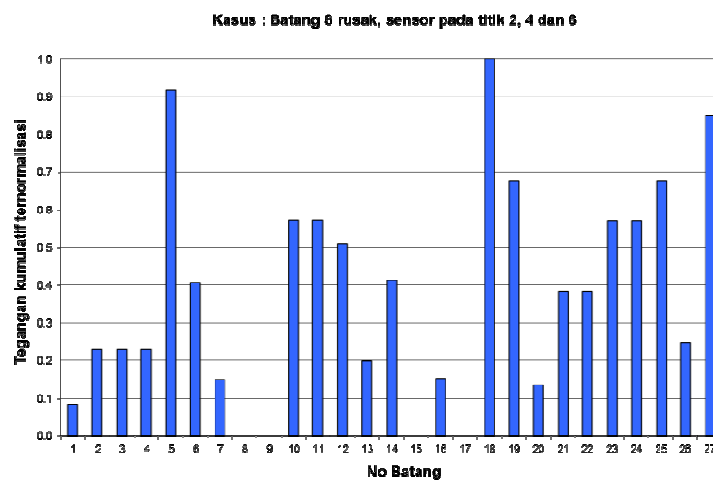
Gambar 5. Kasus 2 oleh vektor beban ke-1



Gambar 6. Kasus 2 oleh vektor beban ke-2

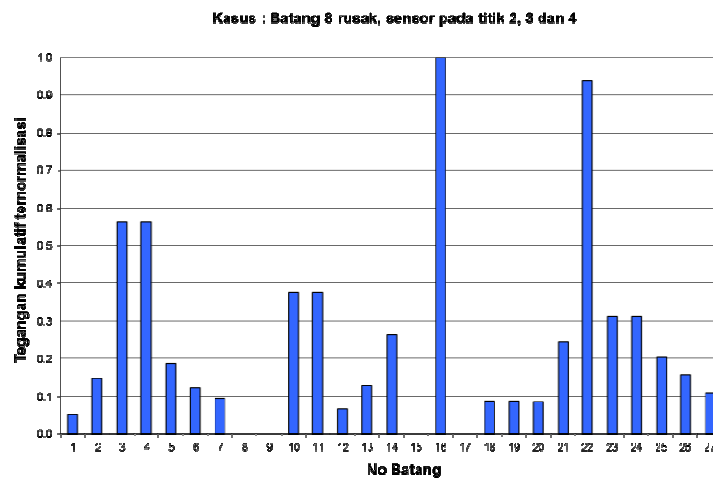


Gambar 7. Kasus 3 oleh vektor beban ke-1

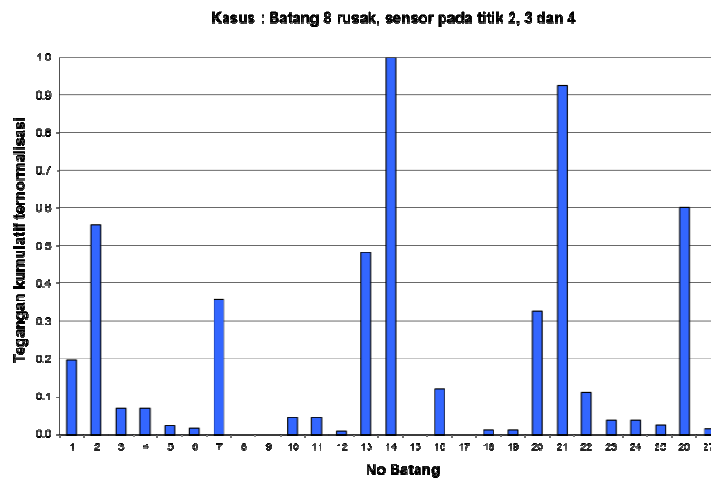


Gambar 8. Kasus 3 oleh vektor beban ke-2

Hasil analisis kasus 4 dengan sensor yang diletakkan pada titik 2, 3, dan 4 dapat dilihat pada Gambar 9 dan 10.



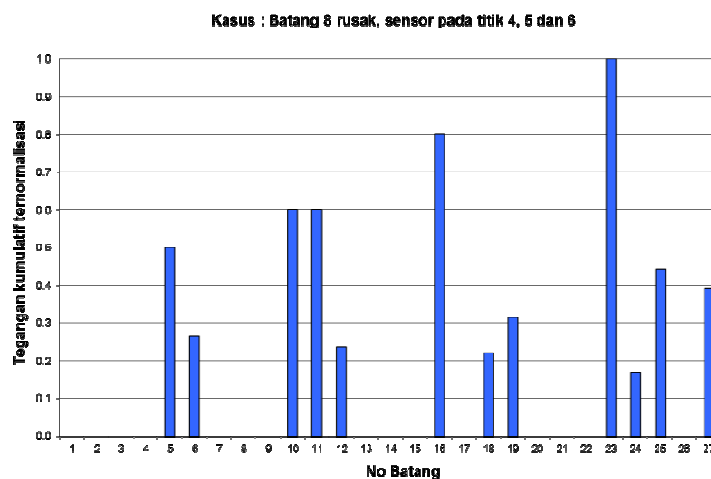
Gambar 9. Kasus 4 oleh vektor beban ke-1



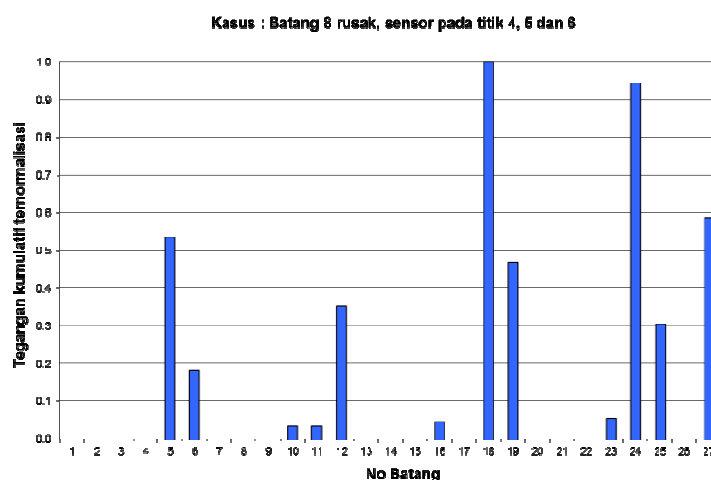
Gambar 10. Kasus 4 oleh vektor beban ke-2

Untuk kasus 5 dengan sensor diletakkan pada titik 4,5 dan 6, tegangan ternormalisasi oleh beban ke-1 dan beban ke-2 disajikan pada Gambar 11 dan 12.

Deteksi dengan jumlah sensor 3 buah menunjukkan kasus 4 dengan sensor dipasang pada 2, 3 dan 4 merupakan deteksi yang paling baik, karena jumlah batang yang terdeteksi rusak selain batang 8 lebih sedikit.



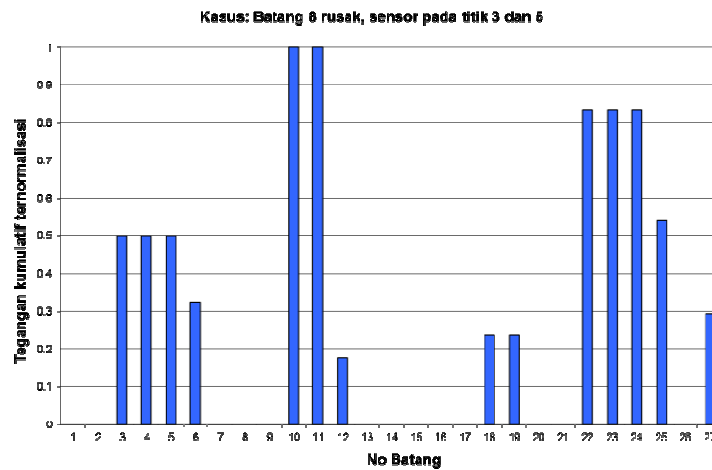
Gambar 11 . Kasus 5 oleh vektor beban ke-1



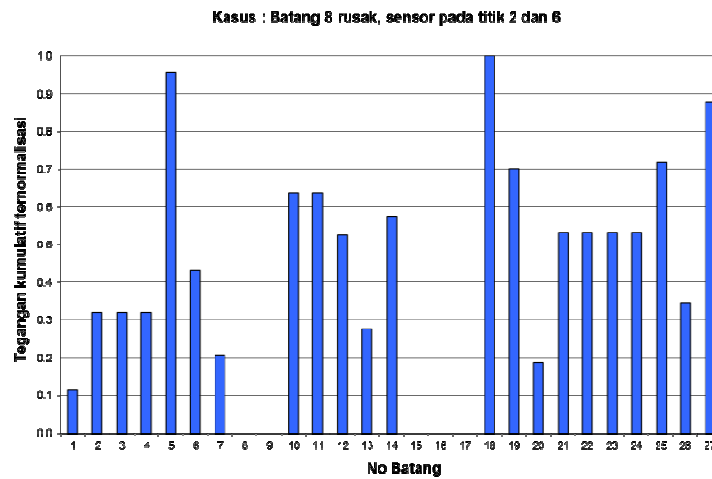
Gambar 12. Kasus 5 oleh vektor beban ke-2

Struktur

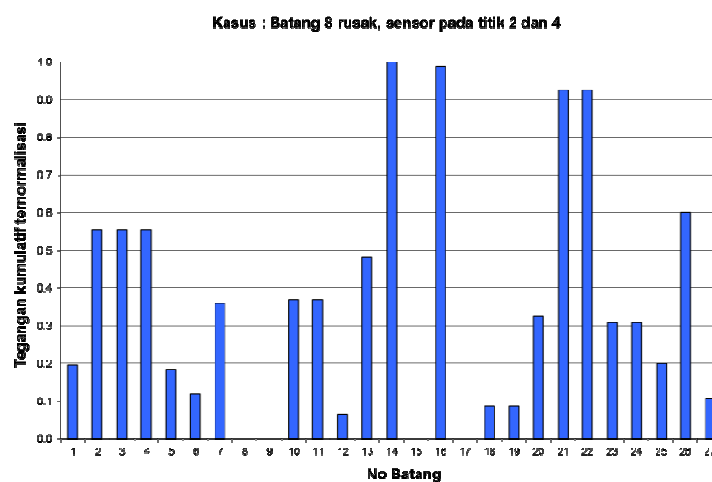
Pada kasus dengan 2 buah sensor; dengan variasi pengukuran pada titik 3 dan 5 (kasus 6), titik 2 dan 6 (kasus 7), titik 2 dan 4 (kasus 8), dan titik 5 dan 6 (kasus 9), masing-masing menghasilkan satu vektor penentu lokasi rusak. Tegangan ternormalisasi dapat dilihat pada Gambar 13 sampai dengan Gambar 16.



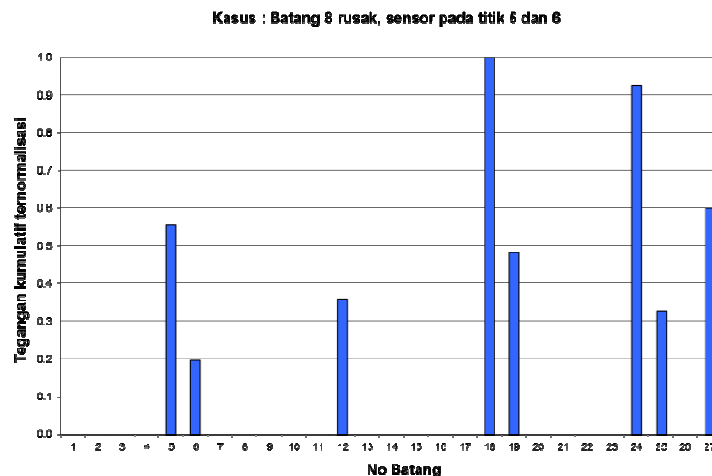
Gambar 13. Kasus 6



Gambar 14. Kasus 7



Gambar 15. Kasus 8



Gambar 16. Kasus 9

Dari Gambar 13 sampai dengan Gambar 16 untuk kasus dengan 2 buah sensor, batang 8 dapat terdeteksi sebagai batang yang rusak. Dari variasi pemasangan sensor yang ada, kasus 8 dengan sensor pada titik 2 dan 4, merupakan pilihan yang paling baik, karena menghasilkan kandidat batang yang terdeteksi rusak paling sedikit dibandingkan kasus lainnya.

KESIMPULAN

Dalam tulisan ini telah dibahas metode deteksi kerusakan dengan jumlah dan variasi sensor yang berbeda. Metode deteksi yang digunakan adalah dengan menggunakan nilai *singular value decomposition* dari perbedaan matriks fleksibilitas untuk kondisi tidak rusak dan kondisi rusak. Metode ini dapat mendeteksi lokasi batang yang rusak. Dengan jumlah dan variasi sensor yang berbeda, jumlah batang yang terdeteksi rusak juga berbeda. Dari hasil analisis diperoleh semakin banyak sensor yang digunakan, jumlah batang yang terdeteksi sebagai kandidat batang yang rusak juga semakin banyak. Dari simulasi tampak pula bahwa untuk struktur dengan jumlah derajat kebebasan sebesar 25, jumlah sensor 2 buah dapat mendeteksi lokasi kerusakan batang.

DAFTAR PUSTAKA

- Arfiadi, Y. (1996). "Pengembangan program bantu simbolik untuk analisis struktur dengan menggunakan Matlab", *Laporan Penelitian, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta*.
- Arfiadi, Y. dan Wibowo, F.X.N. (2005). "Deteksi kerusakan struktur dengan pendekatan matriks fleksibilitas". *Seminar Solusi Inovatif dalam Desain/Kegagalan Struktur Teknik Sipil*, Universitas Pelita Harapan, 19 Oktober.
- Arfiadi, Y. (2011). *Analisis struktur dengan metode matriks kekakuan*. Cahaya Atma Pustaka, Yogyakarta.
- Bernal, D. (2002), "Load vectors for damage localization," *Journal of Engineering Mechanics*, 128(1), pp. 7-14.
- Gao, Y. (2005). "Structural health monitoring strategies for smart sensor networks". *PhD. Dissertation*, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois.
- Gao, Y., Spencer, Jr., B.F. and Bernal, D. (2004) "Experimental verification of the damage locating vector method," *Proc. of the 1st International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology*, Honolulu, Hawaii, January 12-14.
- Guan, H. and Karbhari, V. M. (2008). "Vibraton based structural health monitoring of highway bridges". *Structural Systems Research Report, Report No. SSRP 2006/14*, Department of Structural Engineering, University of California, San Diego.
- Montalvao, D., Maia, N.M.M., Ribeiro, A.M.R. (2006). "A review of vibration-based structural health monitoring with special emphasis on composite materials". *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 8, No. 4.
- Sohn, H., Farrar, C.R., Hemez, F.M., Shunk, D.D., Stinemat, D.W. and Nadler, B.R. (2004). "A review of structural health monitoring literature: 1996-2001". *Los Alamos National Library Report LA-13976-MS*. Los Alamos National Laboratory, USA,