

Penentuan posisi retak pada balok dengan tumpuan bebas-bebas melalui analisis kurva modus getar

Ferdian Kusuma¹, Meifal Rusli², Lovely Son², Mulyadi Bur²

¹Program Sarjana Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala
Jl. Teuku Chik Pante Kulu No.7, Banda Aceh, 23373

²Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Andalas
Kampus Limau Manis, Padang, 25163
Email korespondensi: mulyadibur@ft.unand.ac.id

Abstrak

Retak adalah salah satu masalah yang sering terjadi pada suatu struktur. Identifikasi retak adalah aspek penting dalam menentukan kondisi suatu struktur. Structural Health monitoring menjadi salah satu solusi mendeteksi retak. Secara teori, jika terdapat retak awal dan menjalar, frekuensi pribadi suatu struktur akan berubah karena penurunan kekakuan dan kurva modus getar berubah. Penelitian ini merupakan pengembangan dari penelitian sebelumnya dan bertujuan untuk mengidentifikasi posisi retak pada balok bebas-bebas melalui perubahan kurva modus getar yang dilakukan dengan model elemen hingga (MEH) dan Analisis modus getar eksperimental (EMA). Pertama, balok tanpa retak dimodelkan dengan MEH dan diidentifikasi dengan EMA. Lalu retak buatan diberikan pada balok dengan variasi 1 retak dan 2 retak dan dilakukan EMA dan MEH. Posisi retak diidentifikasi melalui perubahan kurva modus getar menggunakan perubahan nilai kurva modus getar, karena penurunan kekakuan yang disebabkan oleh retak. Hasil menunjukkan bahwa perubahan kurva modus getar lebih baik mendeteksi posisi retak. Dan hasil eksperimen menunjukkan hasil yang bagus dengan hasil analisis model elemen hingga..

Kata kunci: posisi retak, frekuensi pribadi, kurva modus getar, analisis modus getar, model elemen hingga.

Abstract

Crack is a problem that frequently found in a structure. Identification of crack is a crucial aspect in decision making about structure condition. Structural Health monitoring has become a solution to detect the crack. Basically, if a crack initiates and propagates in a structure, the natural frequencies of the structure will change because of decreasing stiffness and abrupt curvature of mode shapes will occur. This research is developed from before research and aimed to identify the crack position in a free free cantilever beam experimentally by analytically using finite element model (FEM) and experimental modal analysis (EMA). First, a perfect cantilever beam without any cracks is modeled by FEM and identified by EMA. Then artificial cracks are created to the beam with single and two cracks, and FEA model and EMA identification is developed. The position of the crack then is identified by the change of mode shape curvature using curvature change index that obtained from the difference in mode shape curvature between the damage and the undamaged cases, and mode shape curvature based on curvature sensitivity caused by decreasing stiffness caused by cracks. The result shows that mode shape curvature has better sensitivity to detect the position of cracks, and results of experiment show good correlation with results of finite element analysis.

Keywords: crack position, natural frequency, vibration mode curve, vibration mode analysis, finite element analysis.

1. Pendahuluan

Pada suatu struktur mekanik, seperti jembatan, poros, sayap pesawat, sudu turbin dan banyak struktur lainnya yang mengalami kerusakan pada umumnya dimulai oleh retak awal yang disebabkan oleh konsentrasi tegangan, bahan yang tidak sempurna dan akibat proses manufaktur. Retak awal kemudian merambat disebabkan oleh fluktuasi beban atau beban dinamis. Retak yang dalam keadaan tertentu tidak dapat diamati secara kasat mata dapat menyebabkan terjadinya kegagalan suatu struktur yang berakibat terjadinya kerugian besar. Oleh sebab itu, diperlukan suatu metode yang dapat mendeteksi kerusakan yang dikenal dengan Structural health monitoring (SHM).

Structural health monitoring (SHM) merupakan salah satu kunci penting dalam perawatan struktur untuk menghindari kerugian yang lebih besar karena bencana kegagalan struktur [1]. Untuk itu, beberapa metode telah dikembangkan para peneliti untuk mengidentifikasi kerusakan, baik itu secara numerik maupun eksperimental. Beberapa diantaranya adalah dengan memanfaatkan perubahan frekuensi pribadi struktur dan respon percepatan dari struktur [2-5]. Namun, metode ini baru sebatas untuk mengetahui ada atau tidaknya kerusakan. Selanjutnya, metode dengan teknologi Laser Illumination atau Laser Doppler Vibrometers, Fibre Optic, Acoustic Emission, Sensor Inertial, Ultra Sound, dan X-ray

juga dikembangkan untuk mendeteksi posisi kerusakan [6-8]. Akan tetapi, metode ini memerlukan biaya yang relatif besar.

Selain itu, Metode lain dikembangkan dengan membandingkan modus getar struktur tanpa retak dan ada retak, sehingga posisi retak dapat diketahui. Akan tetapi, metode ini memiliki harga rendah dan waktu yang efisien [9-11]. Penelitian juga tidak hanya dilakukan secara eksperimen, tetapi juga dikaji secara numerik menggunakan ketidakaturan modus getar dan beda hingga untuk modus getar, serta beberapa perbandingan metode matematis untuk mendapatkan modus getar [1, 12, 13]. Namun, hasil identifikasi yang kurang sensitif, maka diperlukan suatu metode baru yang tidak hanya memiliki harga rendah dan waktu yang efisien, tetapi sensitif untuk retak yang kecil dan bisa diperoleh dari seluruh modus getar. Hal itu dapat dilakukan dengan melihat perubahan kurva modus getar (gradien) dan tidak perlu di bandingkan dengan struktur yang ada retak dan tanpa retak, dan bisa dilakukan diseluruh modus getar.[14].

Pada penelitian ini akan dikembangkan metode deteksi atau penentuan posisi retak pada balok dengan tumpuan bebas-bebas secara numerik (Program Komputasi Matlab R2013a dan Autodesk Inventor 2013) dan eksperimen melalui perubahan kurva modus getar (gradien). Penelitian ini dilakukan pada model balok dengan tumpuan yang berbeda dengan penelitian sebelumnya. Proses identifikasi ini juga ditujukan untuk melihat respon dinamik atau parameter modal suatu struktur. Parameter modal hasil identifikasi, yaitu frekuensi pribadi dan modus getar struktur, akan dipengaruhi oleh retak awal dan penjaralan retak dalam bentuk perubahan kekakuan, serta perubahan gradien diseluruh modus getar yang menyebabkan dapat diketahui posisi retak.

Struktur uji yang digunakan adalah balok dengan tumpuan bebas-bebas, yang mana dilakukan pemodelan elemen hingga dengan menggunakan Program Komputasi Matlab R2013a dan Autodesk Inventor 2013 untuk mendapatkan parameter modal, yaitu frekuensi pribadi dan modus getar. Struktur yang dimodelkan terlebih dahulu adalah struktur uji tanpa retak, lalu diberikan satu retak dan dua retak secara berurutan. Setiap langkah dilihat perubahan kurva modus getar untuk mendapatkan posisi retak yang ada. Lalu, juga dilihat apakah frekuensi pribadi juga mengalami perubahan. Setelah didapatkan hasil analisis secara numerik, maka akan dilakukan secara eksperimen dengan langkah yang sama. Hasil yang didapatkan pada eksperimen akan dibandingkan dengan hasil numerik. Jika terdapat perbedaan, akan dilakukan pengulangan dan pengecekan, dimana terjadi kesalahan. Setelah hasil yang didapatkan sama, maka akan dilanjutkan dengan pemberian retak dan seterusnya.

Metode Elemen Hingga pada Balok

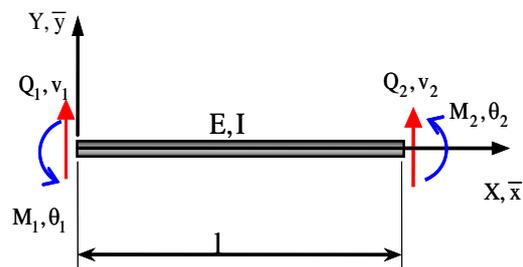
Rumusan dasar statika yang menjadi landasan dari analisis keseimbangan adalah

$$k \cdot u = f \tag{1}$$

dengan k merupakan kekakuan struktur, u adalah perpindahan yang terjadi baik perpindahan linear atau rotasi, f merupakan gaya atau momen, baik momen lentur maupun momen puntir, E merupakan modulus Elastisitas, dan I merupakan Inersia Penampang serta merupakan panjang balok. Struktur yang terdiri dari banyak elemen dan tiap-tiap elemen memiliki derajat kebebasan yang lebih dari satu, maka persamaan (1) dapat ditulis menjadi

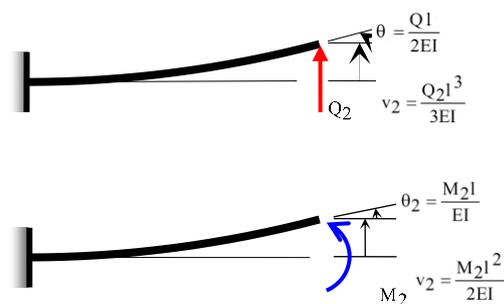
$$[k] \cdot \{u\} = \{f\} \tag{2}$$

Dimana adalah matrik kekakuan, merupakan vektor perpindahan dan adalah vektor gaya. Matriks kekakuan elemen (elemen stiffness matrix) adalah matriks bujur sangkar yang berisi koefisien dari sekumpulan persamaan linear simultan yang diperoleh dari keseimbangan satu elemen. Penyusunan matrik kekakuan balok diasumsikan gaya normal diabaikan dan koordinat lokal identik / sama dengan koordinat global, maka tidak dibutuhkan transformasi matrik, sehingga perpindahan yang terjadi hanya dalam arah vertikal dan akibat momen lentur yang dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Gaya dan perpindahan elemen Balok

Untuk menganalisis kasus pada Gambar 1 dilakukan dengan prinsip superposisi, yaitu dengan menganalisis pegas dengan satu gaya dan satu momen lentur yang bekerja dan kondisi nodal lainnya dijepit (tahan). Langkah pertama dengan kondisi 1 nodal ditahan atau perpindahan sama dengan nol.



Gambar 2. Balok dengan nodal 1 dijepit

Dari Gambar 2 dapat diperoleh persamaan lendutan[19] akibat Gaya vertikal dan momen lentur dan dijumlahkan, maka persamaannya adalah

$$\theta_2 = \frac{Q_2 l^2}{2EI} + \frac{M_2 l}{EI} \quad (3)$$

dan

$$v_2 = \frac{Q_2 l^3}{3EI} + \frac{M_2 l^2}{2EI} \quad (4)$$

Selanjutnya, dengan penyederhanaan, persamaan (3) dan (4) dapat ditulis menjadi

$$\begin{aligned} 6EI v_2 &= 2Q_2 l^3 + 3M_2 l^2 \\ 2EI \theta_2 &= Q_2 l^2 + 2M_2 l \end{aligned} \quad (5)$$

Dari persamaan (5) dilakukan eliminasi dan substitusi dapat ditulis dalam bentuk matrik menjadi

$$\begin{Bmatrix} Q_2 \\ M_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ -\frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

Dengan menggunakan Hukum Newton 1, maka

$$\begin{aligned} \sum F = 0 &\rightarrow Q_1 + Q_2 = 0 \\ \sum M = 0 &\rightarrow M_1 + M_2 + Q_1 l = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

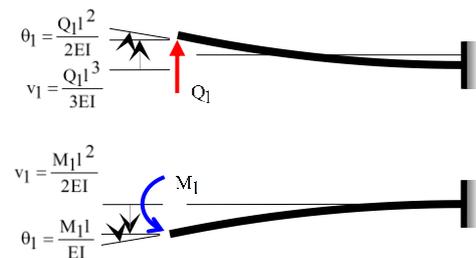
Persamaan (7) dapat ditulis dalam matrik menjadi

$$\begin{Bmatrix} Q_1 \\ M_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Q_2 \\ M_2 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

Dengan demikian, untuk mendapatkan perpindahan dinodal 2 akibat gaya vertikal dan momen lentur nodal 2, maka dilakukan substitusi persamaan (6) ke persamaan (8) dan dapat ditulis menjadi

$$\begin{Bmatrix} Q_1 \\ M_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ -\frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

Langkah selanjutnya adalah dengan mengasumsikan nodal 2 yang dijepit berarti perpindahan sama dengan nol.



Gambar 3. Pegas dengan nodal 1 ditahan

Dari Gambar 3 diperoleh persamaan lendutan[18] akibat Gaya vertikal dan momen lentur dan dijumlahkan, maka persamaannya adalah

$$v_1 = \frac{Q_1 l^3}{3EI} - \frac{M_1 l^2}{2EI} \quad (10)$$

Dan

$$\theta_1 = -\frac{Q_1 l^2}{2EI} + \frac{M_1 l}{EI} \quad (11)$$

Selanjutnya dengan penyederhanaan, persamaan (10) dan (11) dapat ditulis menjadi

$$\begin{aligned} 6EI v_1 &= 2Q_1 l^3 - 3M_1 l^2 \\ 2EI \theta_1 &= -Q_1 l^2 + 2M_1 l \end{aligned} \quad (12)$$

Dari persamaan (12) dilakukan eliminasi dan substitusi dapat ditulis dalam bentuk matrik menjadi

$$\begin{Bmatrix} Q_1 \\ M_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ \frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ \theta_1 \end{Bmatrix} \quad (13)$$

Dengan menggunakan Hukum Newton 1, maka

$$\begin{aligned} \sum F = 0 &\rightarrow Q_1 + Q_2 = 0 \\ \sum M_2 = 0 &\rightarrow M_1 + M_2 - Q_1 l = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Persamaan (14) dapat ditulis dalam matrik menjadi

$$\begin{Bmatrix} Q_2 \\ M_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Q_1 \\ M_1 \end{Bmatrix} \quad (15)$$

Dengan demikian, untuk mendapatkan perpindahan dinodal 1 akibat gaya vertikal dan momen lentur nodal 2, maka dilakukan substitusi persamaan (13) ke persamaan (15) dan dapat ditulis menjadi

$$\begin{Bmatrix} Q_2 \\ M_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ \frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ \theta_1 \end{Bmatrix} \quad (16)$$

Apabila persamaan (8), persamaan (10), persamaan (15) dan persamaan (16) digabungkan, maka diperoleh persamaan linear simultan yang dapat dituliskan dalam bentuk matriks sebagai

$$\begin{Bmatrix} Q_1 \\ M_1 \\ Q_2 \\ M_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & -\frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ \frac{6EI}{l^2} & 4EI & -\frac{6EI}{l^2} & 2EI \\ -\frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ \frac{6EI}{l^2} & 2EI & -\frac{6EI}{l^2} & 4EI \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ \theta_1 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} \quad (17)$$

Dari persamaan (17), dapat diperoleh matrik kekakuan, yaitu :

$$\{k\} = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & -\frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ \frac{6EI}{l^2} & 4EI & -\frac{6EI}{l^2} & 2EI \\ -\frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ \frac{6EI}{l^2} & 2EI & -\frac{6EI}{l^2} & 4EI \end{bmatrix} \quad (18)$$

Untuk mendapatkan frekuensi pribadi dan modus getar, diperlukan juga matrik massa balok, yaitu[19]

$$[\bar{m}] = \frac{\rho \cdot A \cdot l}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22l & 54 & -13l \\ 22l & 4l^2 & 22l & 3l^2 \\ 54 & 13l & 156 & -22l \\ -13l & 3l^2 & -22l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Sehingga, dengan menggunakan program komputasi matlab R2013a akan diperoleh frekuensi pribadi dan modus getar. Sama halnya dengan elemen batang (batang elastis), harga k (kekakuan) dapat ditentukan dari persamaan defleksi batang yang salah satunya dijepit yang dapat dilihat pada Gambar 4 dan persamaan (21).

Balok Jepit

Untuk mendapatkan kekakuan sistem dapat digunakan persamaan kesetimbangan statik di mana untuk sistem balok jepit, defleksi pada ujung jarak dari tumpuan jepit adalah

$$\delta = \frac{P \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad (20)$$

Dari persamaan (1) dan (20) dapat ditulis nilai kekakuan pada persamaan (21)

$$k = \frac{3 \cdot E \cdot I}{l^3} \quad (21)$$



Gambar 4. Sistem massa-balok jepit

Besarnya frekuensi pribadi sistem massa-balok jepit pada Gambar 4 adalah

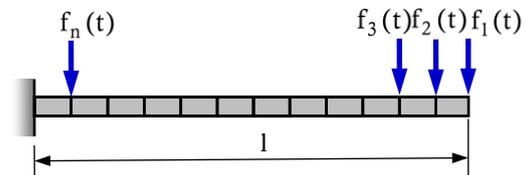
$$\omega_n^2 = \frac{3 \cdot E \cdot I}{m \cdot l^3} \quad (22)$$

Dengan merupakan frekuensi pribadi dan m merupakan massa. Dari persamaan (22), maka dapat dilihat bahwa nilai frekuensi pribadi dan modus getar dipengaruhi oleh Inersia penampang, yang mana jika memiliki retak akan mengakibatkan nilai inersia penampang berkurang, sehingga nilai frekuensi pribadi menurun.

Analisis Modal untuk Getaran tanpa redaman untuk system banyak derajat kebebasan

Analitik

Untuk sistem banyak derajat kebebasan yang dapat dilihat pada Gambar 5[20].



Gambar 4. Balok dengan MDof

Berdasarkan keseimbangan dinamik, didapatkan

$$[m]\{\ddot{x}(t)\} + [k]\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (23)$$

Misal jawab persamaan untuk getaran harmonik persamaan (23) adalah seperti persamaan (24)

$$x = X \sin \omega t$$

$$\ddot{x} = -\omega^2 X \sin \omega t = -\omega^2 x \quad (24)$$

Sehingga persamaan (23) dapat ditulis menjadi

$$([K] - \omega^2 [M])\{X\} = \{F\} \quad (25)$$

Matriks $[K] - \omega^2 [M]$ merupakan matriks kekakuan dinamik. Dan invers dari matriks kekakuan dinamik adalah matrik Frequency Respons Function receptance. Sehingga persamaannya menjadi

$$\{X\} = \frac{1}{([K] - \omega^2 [M])} \{F\} \quad (26)$$

Eksperimental

Analisis Modal Ekperimental merupakan penentuan frekuensi pribadi, modus getar dan rasio redaman dari pengukuran getaran secara eksperimen. Teori dasarnya adalah membuat hubungan antara respon getaran sistem pada suatu lokasi dan eksitasi pada suatu lokasi sebagai fungsi dari frekuensi eksitasinya.

Hubungan ini disebut sebagai Frequency Response Function (FRF). Pengukuran getaran untuk experimental modal analysis (EMA) dikenal sebagai modal testing. Analisis modal merupakan hal yang penting dalam menganalisis, mendiagnosa, mendesain dan mengontrol getaran.

Pengukuran getaran secara eksperimen umumnya memerlukan beberapa perangkat. Perangkat tersebut terdiri dari sumber eksitasi yang disebut exciter, untuk menghasilkan input gaya pada struktur, transducer accelerometer untuk mengkonversi gerakan mekanik pada struktur ke sinyal elektrik, signal conditioning amplifier untuk mencocokkan karakteristik transducer dengan input elektronik data digital dan analyzer dimana terdapat program komputer pemrosesan sinyal dan analisis modal. Untuk mengukur getaran terdapat beberapa mekanisme, antara lain mekanisme eksitasi, mekanisme pembacaan, mekanisme akuisisi data dan pengolahan.

Mekanisme eksitasi ditentukan dari sistem yang menyediakan input gerakan terhadap struktur dalam analisis, umumnya berupa gaya yang diberikan pada koordinat tertentu. Alat eksitasi yang populer, yaitu impuls atau impact hammer, yang terdiri dari hammer dengan transducer gaya yang terpasang pada kepalanya. Hammer merupakan mekanisme eksitasi yang digunakan untuk memberikan pengaruh pada struktur sehingga bereksitasi dengan range frekuensi yang besar.

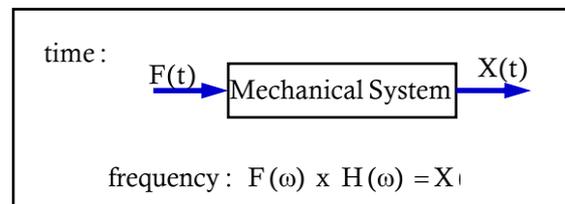
Mekanisme pembacaan pada dasarnya digunakan sensing device yang dikenal sebagai force transducers. Banyak variasi dari alat tersebut dan biasanya yang digunakan pada experimental modal analysis adalah piezoelectric transducer baik untuk mengukur gaya eksitasi (force transducers) atau untuk mengukur respon getaran (accelerometers). Transducer menghasilkan sinyal elektrik yang sesuai dengan parameter fisik target pengukuran. Pada kebanyakan kasus, sinyal elektrik yang dihasilkan transducer tidak dapat digunakan untuk pengukuran langsung dan pengolahan. Masalah ini biasanya berhubungan dengan sinyal yang menjadi lemah sehingga biasanya diselesaikan dengan menggunakan amplifier. Amplifier berfungsi untuk mencocokkan dan memperbesar sinyal dalam hal besaran dan fase diatas range frekuensi yang dibutuhkan

Mekanisme akuisisi data dan pengolahan mengukur sinyal yang terbaca dari transducer dan memastikan besaran dan fase dari eksitasi dan respon. Analisis digunakan untuk menggali dan memperoleh parameter modal (frekuensi alami, rasio redaman, dan modus getar) dari struktur. Analisis yang paling umum dilakukan adalah berdasarkan algoritma Fast Fourier Transform (FFT) dan menghasilkan pengukuran langsung dari FRF. Keduanya disebut sebagai spektrum voltasi analog yang mempresentasikan percepatan (gaya, kecepatan, displacement, atau regangan) dari signal conditioning

amplifier. Sinyal ini disaring dan digitalisasi untuk perhitungan. Analisis sinyal kemudian dapat dimanipulasi dengan berbagai macam cara untuk menghasilkan frekuensi pribadi, rasio redaman dan modus getar dalam hasil numerik atau dalam bentuk grafis. Metode time domain menghasilkan parameter modal langsung dari rekaman respon dalam domain waktu. Metode frequency domain menyelesaikan hal yang sama dengan mengkonversi sinyal respon kedalam domain frekuensi.

Frequency Respon Function

Frequency Respon Function (FRF) adalah suatu kurva hasil pengukuran yang memisahkan parameter dinamik dari suatu struktur. Parameter dinamik sebuah system terdiri dari frekuensi pribadi, rasio redaman, modus getar. FRF mendeskripsikan hubungan input-output antara dua titik pada struktur sebagai fungsi frekuensi. Ilustrasi balok diagram dari FRF dapat dilihat pada Gambar 5.[21]



Gambar 5. Blok diagram dari FRF

FRF dari system SDOF (getaran bebas satu derajat kebebasan) linier dibuat dari hubungan antara transformasi fourier dari sinyal input $F(\cdot)$ dan sinyal output $X(\cdot)$. Sebagai contoh, saat gaya impuls dan respon displacement akibat gaya tersebut dari suatu system diukur, hasil data tersebut digunakan untuk menghasilkan FRF dari system. Hubungan umumnya diberikan seperti persamaan (27).

$$X(\omega) = H(\omega) \cdot F(\omega) \text{ atau } H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} \quad (27)$$

Dimana $H(\omega)$ adalah matriks FRF, $X(\cdot)$ adalah vector discrete fourier transform respon displacement, $F(\cdot)$ vector discrete transform gaya luar. FRF dari suatu sistem adalah fungsi yang bernilai kompleks dari variable independen ω yang bernilai real sehingga memiliki komponen yang real dan imajiner.

Dari FRF Imajiner dapat digunakan untuk membentuk modus getar. Sedangkan FRF Magnitude hanya mendapatkan frekuensi pribadi. Caranya adalah dengan menghubungkan nilai puncak FRF imajiner setiap elemen dengan titik yang sama, sehingga titik pertama hingga titik terakhir adalah urutan modus getar terkecil hingga terbesar.

Metode untuk mendeteksi retak melalui perubahan modus getar

Untuk mendeteksi retak melalui perubahan modus getar dapat dilihat dari nilai gradiennya. Gradien atau

kemiringan suatu garis adalah perbandingan perubahan sisi tegak dengan perubahan posisi mendatar atau dalam koordinat kartesius adalah perubahan komponen y dan dan perubahan komponen x.

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \tag{28}$$

Karena dimensi retak yang sangat kecil. Maka untuk mendapatkan nilai kemiringan yang besar, perubahan komponen x dikuadratkan.

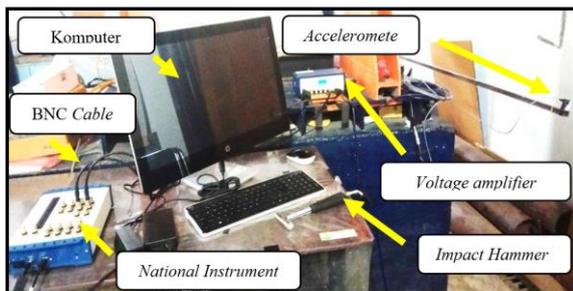
$$m = \frac{y_2 - y_1}{(x_2 - x_1)^2} \tag{29}$$

2. Metode

Pada penelitian ini menggunakan struktur uji balok dengan penampang *hollow*. Selanjutnya, pembuatan model struktur Elemen Hingga dengan Matlab R2013a dan Autodesk Inventor 2013 untuk menghitung frekuensi pribadi dan modus getar dengan kondisi tanpa retak. Selanjutnya, pengujian struktur uji tanpa retak untuk mendapatkan frekuensi pribadi dan modus getar, yang mana dalam tahap ini menggunakan *impact Hammer*. Tahap selanjutnya adalah pemberian retak pada model elemen hingga dan pengujian struktur uji untuk 1 dan 2 retak. Tahap terakhir adalah menganalisis perbedaan frekuensi pribadi dan modus getar antara variasi retak yang diberikan. Posisi retak akan diidentifikasi akibat perubahan kurva modus getar.

Struktur uji memiliki panjang 2100 mm dan luas penampang (20x10) - (17x8.5) mm² yang dibagi atas 10 elemen balok untuk tanpa retak, 11 elemen untuk 1 retak dan 12 elemen untuk 2 retak. Pemodelan retak dimulai pada posisi 630 mm - 631 mm dan 1470 mm - 1471 mm, serta dimensi luas penampang retak, yaitu setengah dari luas penampang struktur uji.

Pengujian ini menggunakan alat uji getar yang mana struktur uji dengan tumpuan bebas-bebas dan diletakkan di ujung *accelerometer*, kemudian dipukul menggunakan *Impact Hammer* yang terhubung ke *National Instrument*. Bentuk pemasangan dari alat uji diperlihatkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Perangkat Uji

3. Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini, data yang didapatkan adalah perubahan nilai frekuensi pribadi, perbandingan modus getar semua variasi, grafik posisi retak akibat perubahan kurva modus getar dan hubungan grafik FRF sebelum dan sesudah retak. Data diperoleh dari perhitungan numerik melalui metode elemen hingga dengan Matlab R2013a dan autodesk Inventor 2013, serta pengujian struktur uji. Balok menghasilkan banyak frekuensi pribadi dan modus getar. Hal itu disebabkan akibat pengaruh perpindahan arah tegak lurus dengan balok dan momen. Akan tetapi, data yang digunakan hanya yang disebabkan oleh perpindahan arah tegak lurus balok, karena sensor accelerometer hanya dapat memproses arah tegak lurus balok.

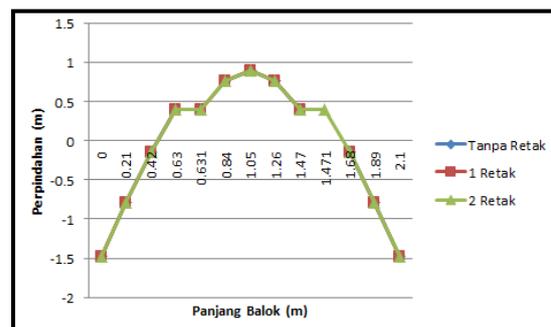
Deteksi posisi retak melalui Model Elemen Hingga dengan Matlab R2013a

Hasil Perubahan frekuensi pribadi dengan menggunakan Matlab R2013a dapat dilihat pada Tabel 1. Semakin tinggi frekuensi pribadi, semakin besar penurunan nilai frekuensi pribadi. Perubahan nilai cenderung tetap, hal itu disebabkan dimensi retak 1 dan retak 2 sama.

Tabel 1. Perubahan frekuensi pribadi Balok dengan tumpuan Jepit bebas

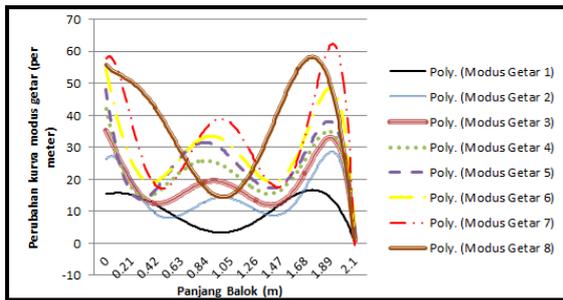
| Tanpa retak | 1 retak | 2 retak |
|-------------|---------|---------|
| 31.14 | 31.13 | 31.13 |
| 85.45 | 85.42 | 85.39 |
| 168.91 | 168.71 | 168.51 |
| 279.45 | 279.37 | 279.30 |
| 406.07 | 405.98 | 405.89 |
| 563.48 | 563.41 | 563.30 |
| 738.98 | 738.55 | 738.12 |
| 950.44 | 950.20 | 950.06 |

Hasil perbandingan modus getar pertama pada balok dengan variasi tanpa retak, 1 retak dan 2 retak dapat dilihat pada Gambar 7. Dapat dilihat bahwa diposisi 0.63 m mengalami perubahan kurva modus getar, baik pada variasi 1 retak dan 2 retak. Pada posisi 1.47 m juga mengalami perubahan kurva modus getar pada variasi 2 retak. Namun perubahan yang didapat sangat kecil dan hampir mendekati sama, maka dilihat dari perubahan kurva modus getar dari variasi masing-masing.



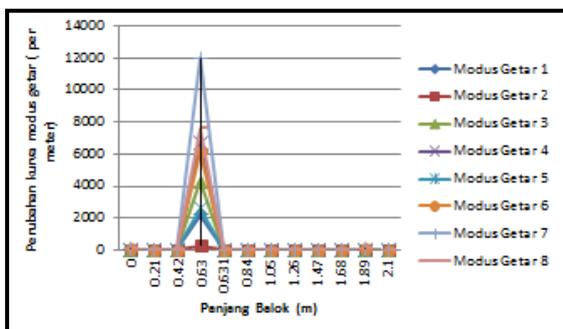
Gambar 7. Perbandingan kurva modulus getar pada Model Elemen Hingga dengan Matlab R2013a

Hasil penghitungan perubahan seluruh kurva modulus getar balok dengan tumpuan bebas-bebas tanpa retak dari program Metode Elemen Hingga dengan Matlab R2013a dapat dilihat pada Gambar 8. Pada gambar tersebut terlihat bahwa nilai kurva modulus getar cenderung tidak mengalami perubahan, sehingga balok dianalisis tidak terjadi kerusakan (retak). Dari gambar tersebut cenderung bahwa posisi retak berada dielemen terakhir balok dengan panjang 0 m dan 2.1 m. Hal itu disebabkan karena memiliki perpindahan dalam arah tegak lurus dengan balok paling besar akibat pemberian gaya yang diberikan.

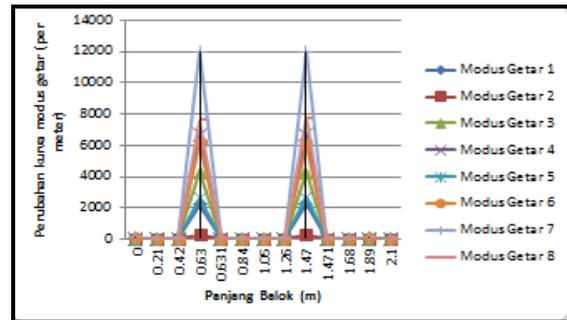


Gambar 8. Perubahan kurva modulus getar pada balok dengan tumpuan bebas-bebas tanpa retak dengan Matlab R2013a

Hasil penghitungan perubahan seluruh kurva modulus getar balok dengan tumpuan bebas-bebas 1 retak dari program Metode Elemen Hingga dengan Matlab R2013a dapat dilihat pada Gambar 9. Dari Gambar 9 dapat dilihat bahwa retak berada pada posisi 0.63 m dan terjadi diseluruh modulus getar. Hal itu sesuai dengan retak yang diberikan. Retak cenderung lebih mudah dideteksi pada modulus getar yang lebih tinggi. Sedangkan untuk variasi 2 retak dapat dilihat pada Gambar 10 dan retak berada pada 0.63 m dan 1.47 m, dimana memiliki nilai perubahan kurva modulus getar yang sama disetiap modulus getar.



Gambar 9. Posisi retak pada balok dengan tumpuan bebas-bebas dengan 1 retak dengan Matlab R2013a

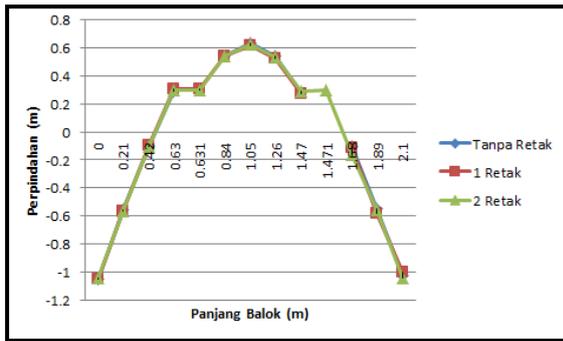


Gambar 10. Posisi retak pada balok dengan tumpuan bebas-bebas dengan 2 retak dengan Matlab R2013a
 Deteksi posisi retak melalui Metode Elemen Hingga dengan Autodesk Inventor 2013. Hasil Perubahan frekuensi pribadi dengan menggunakan Autodesk Inventor 2013 dapat dilihat pada Tabel 2. Frekuensi pribadi cenderung semakin tinggi mengakibatkan semakin besar penurunan nilai frekuensi pribadi. Namun, perubahan frekuensi pribadi dari tanpa retak ke 1 retak lebih kecil dari pada variasi 1 retak ke 2 retak yang berbeda dengan menggunakan Matlab R2013a yang relatif tetap. Hal itu dikarenakan elemen yang digunakan lebih banyak, sehingga penghitungan lebih presisi.

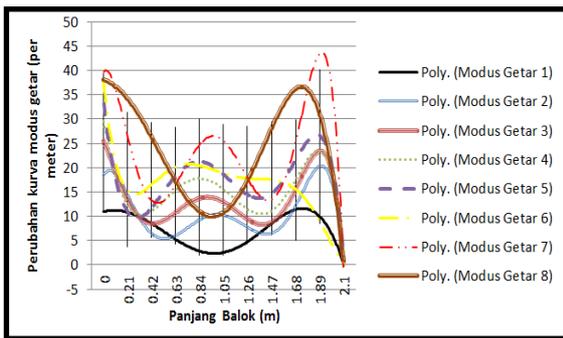
Tabel 1. Perubahan frekuensi pribadi Balok dengan tumpuan Bebas – bebas

| Tanpa retak | 1 retak | 2 retak |
|-------------|---------|---------|
| 31.43 | 30.6 | 23.36 |
| 86.62 | 82.16 | 62.73 |
| 169.34 | 167.93 | 127.31 |
| 279.29 | 278.47 | 213.02 |
| 415.38 | 400.66 | 306.97 |
| 577.99 | 565.51 | 432.59 |
| 764.75 | 765.33 | 591.02 |
| 978.42 | 953.45 | 737.89 |

Hasil perbandingan modulus getar pertama pada balok dengan variasi tanpa retak, 1 retak dan 2 retak dengan Autodesk Inventor 2013 dapat dilihat pada Gambar 11. Dapat dilihat bahwa retak diposisi 0.63 m dan 1.47 m mengalami perubahan kurva modulus getar, baik pada variasi 1 retak dan 2 retak. Akan tetapi, perubahan yang terjadi sangat kecil dan tidak terlihat jelas. Sementara, hasil penghitungan perubahan kurva modulus getar balok dengan tumpuan bebas-bebas tanpa retak dari program Metode Elemen Hingga dengan Autodesk Inventor 2013 dapat dilihat pada Gambar 12. Hasil yang didapat cenderung sama dengan hasil Metode Elemen Hingga dengan Matlab R2013a. Dari gambar tersebut cenderung bahwa posisi retak berada dielemen awal dan akhir balok. Hal itu disebabkan karena memiliki perpindahan dalam arah tegak lurus dengan balok paling besar akibat pemberian gaya yang diberikan.

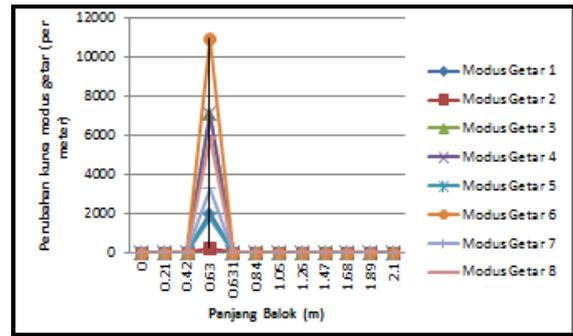


Gambar 11. Perbandingan kurva modulus getar pada Model Elemen Hingga dengan Autodesk Inventor 2013

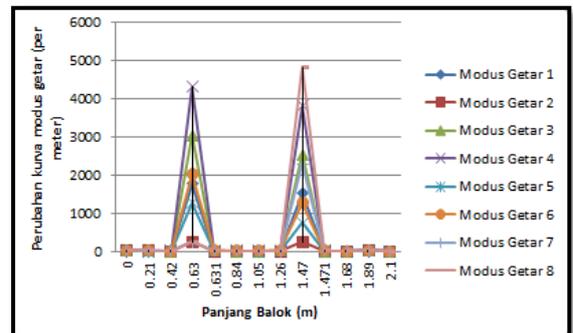


Gambar 12. Perubahan kurva modulus getar pada balok dengan tumpuan bebas-bebas tanpa retak dengan Autodesk Inventor 2013

Hasil penghitungan perubahan seluruh kurva modulus getar balok dengan tumpuan bebas-bebas 1 retak dari program Metode Elemen Hingga dengan Autodesk Inventor 2013 dapat dilihat pada Gambar 13. Dari Gambar 13 dapat dilihat bahwa retak berada pada posisi 0.63 m. Hal itu sesuai dengan retak yang diberikan. Dan dapat dilihat juga nilai tertinggi terdapat pada kurva modulus getar yang tinggi, hal itu disebabkan retak terletak pada bukit atau lembah modulus getar, sedangkan pada modulus getar yang rendah berada pada simpul modulus getar yang terjadi. Sementara, hasil penghitungan perubahan seluruh kurva modulus getar balok dengan tumpuan bebas-bebas 2 retak dari program Metode Elemen Hingga dengan Autodesk Inventor 2013 dapat dilihat pada 14. Dari Gambar 14 dapat dilihat bahwa retak berada pada posisi 0.63 m dan 1.47 m. Hal itu sesuai dengan retak yang diberikan. Dan dapat dilihat juga nilai tertinggi pada modulus ke 8, baik 1 retak maupun 2 retak. Retak 1 akan mempengaruhi retak ke 2, sehingga nilai perubahan kurva modulus getar retak ke 2 lebih besar dari retak 1.



Gambar 13. Posisi retak pada balok dengan tumpuan bebas-bebas dengan 1 retak dengan Autodesk Inventor 2013



Gambar 14. Posisi retak pada balok dengan tumpuan bebas-bebas dengan 2 retak dengan Autodesk Inventor 2013

Deteksi retak melalui pengujian struktur uji (Analisis Modus Getar Eksperimental)

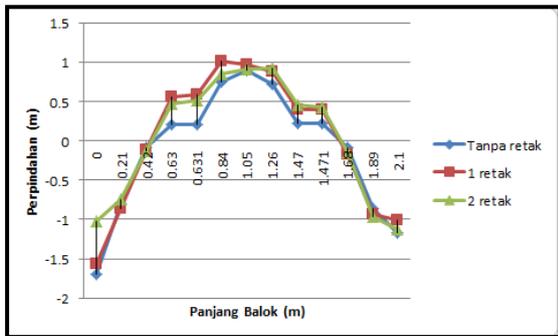
Hasil Perubahan frekuensi pribadi melalui pengujian dapat dilihat pada Tabel 3. Kecenderungan nilai frekuensi pribadi menurun, baik pada retak 1 dan retak 2. Penurunan yang terjadi cenderung sama, dimana memiliki kemiripan dengan model elemen hingga menggunakan Matlab R2013a, karena menggunakan sama elemen yang sama. Sedangkan model elemen hingga dengan autodesk inventor 2013 menggunakan banyak elemen. Jadi, untuk mengetahui adanya retak atau kerusakan dapat dilihat dari banyak frekuensi. Hal itu disebabkan karena retak mengakibatkan perubahan luas penampang (A) dan momen inersia (I), sehingga kekakuan balok menurun. Akibat turunnya kekakuan balok, frekuensi pribadi juga menurun.

Tabel 2. Perubahan frekuensi pribadi Balok dengan tumpuan bebas-bebas

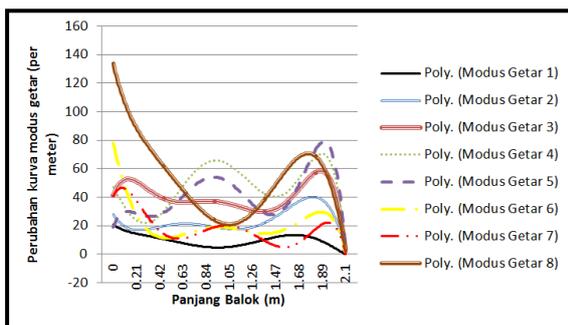
| Tanpa retak | 1 retak | 2 retak |
|-------------|---------|---------|
| 30.07 | 29.06 | 28.06 |
| 81.18 | 76.17 | 73.16 |
| 159.4 | 156.3 | 152.3 |
| 262.6 | 258.6 | 263.6 |
| 390.9 | 370.8 | 359.8 |
| 544.2 | 534.2 | 514.1 |

| | | |
|-------|-------|-------|
| 717.6 | 723.6 | 724.6 |
| 920 | 891 | 878.9 |

Hasil perbandingan modulus getar pertama pada balok dengan variasi tanpa retak, 1 retak dan 2 retak dapat dilihat pada Gambar 18. Dapat dilihat bahwa diposisi 0.63 m dan 1.47 m mengalami perubahan kurva modulus getar. Namun, perubahan yang didapat sangat kecil, maka dilihat dari perubahan kurva modulus getar dari variasi masing-masing. Hasil penghitungan perubahan seluruh kurva modulus getar balok dengan tumpuan bebas-bebas tanpa retak dari pengujian dapat dilihat pada Gambar 19. Pada gambar tersebut terlihat bahwa nilai kurva modulus getar cenderung tidak mengalami perubahan, sehingga balok dianalisis tidak terjadi kerusakan (retak). Dari gambar tersebut cenderung bahwa posisi retak berada dielemen awal dan akhir balok. Hal itu disebabkan karena memiliki perpindahan dalam arah tegak lurus dengan balok paling besar akibat pemberian gaya yang diberikan.



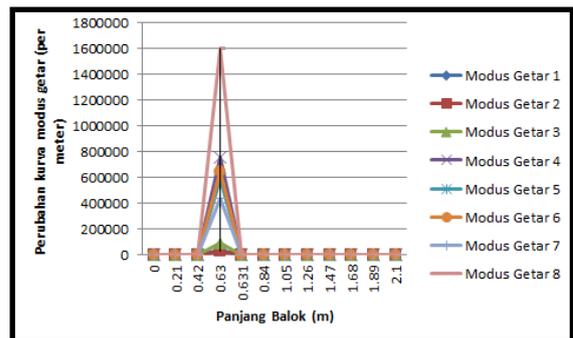
Gambar 18 Perbandingan kurva modulus getar pada Model Elemen Hingga dengan pengujian EMA



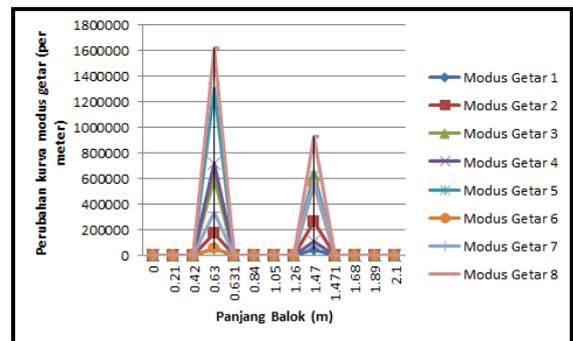
Gambar 19 Perubahan kurva modulus getar pada balok dengan tumpuan bebas-bebas tanpa retak pada pengujian

Hasil penghitungan perubahan seluruh kurva modulus getar balok dengan tumpuan bebas-bebas 1 retak dari pengujian dapat dilihat pada Gambar 20. Dari Gambar 20 dapat dilihat bahwa retak berada pada posisi 0.63 m. Perubahan kurva modulus getar tertinggi juga didapat dari modulus getar ke 8 sama seperti model elemen hingga dengan Matlab R2013a dan autodesk Inventor 2013. Sementara, hasil penghitungan perubahan seluruh kurva modulus getar balok dengan tumpuan bebas-bebas 2 retak dari pengujian dapat

dilihat pada Gambar 21. Dari Gambar 21 dapat dilihat bahwa retak berada pada posisi 0.63 m dan 1.47 m. Hal itu sesuai dengan retak yang diberikan. Dan dapat dilihat juga nilai tertinggi terdapat pada kurva modulus getar 8. Akan tetapi, perubahan kurva modulus getar retak 1 lebih besar dari retak 2. Hal itu disebabkan karena pemukulan yang tetap dan hanya menggunakan 1 Accelerometer saja yang dipindahkan kesetiap nodal elemen. Sehingga, jarak impact hummer dan Accelerometer yang jauh akibat posisi retak mengakibatkan kurangnya kesensitifan Accelerometer.



Gambar 20. Perubahan kurva modulus getar pada balok dengan tumpuan bebas-bebas 1 retak pada pengujian



Gambar 22. Perubahan kurva modulus getar pada balok dengan tumpuan bebas-bebas 2 retak pada pengujian

4. Kesimpulan

Berdasarkan data yang didapat dan pembahasan yang dilakukan, maka dapat disimpulkan :

1. Dari hasil Matlab R2013a, Autodesk Inventor 2013, dan pengujian didapatkan bahwa posisi retak dari perubahan kurva modulus getar dapat dilihat diseluruh modulus getar.
2. Semakin banyak retak atau kerusakan yang terjadi mengakibatkan semakin besar penurunan frekuensi pribadi.
3. Perubahan kurva modulus getar berubah relatif konstan terhadap panjang balok. Jika terjadi retak, mengakibatkan kelengkungan kurva

modus getar semakin besar, hal itu yang menyebabkan posisi retak diketahui.

4. Metode Analisis modus getar eksperimental dapat digunakan sebagai metode untuk memonitor kondisi struktur mekanik pada sistem perawatan prediktif.

Daftar Pustaka

- [1] Wang, J. and Qiao, P., *On irregularity-based damage detection method for cracked beams*, International Journal of Solids and Structures 45, 688–704, 2008.
- [2] Yinghui, L., Qikuan, L., and Haiwei, L., *Dynamic Characteristics of Lag Vibration of a Wind Turbine Blade*, Acta Mechanica Sinica ISSN 0894-9166, Vol. 26, No. 6, 2013.
- [3] Shuklaa, A. and Harshab, S.P., *Vibration response Analysis of Last stage LP turbine blades for variable size of crack in root*, Procedia Technology 23, 232 – 239, 2016.
- [4] Thalapil, J. and Maiti, S.K., *Detection of longitudinal cracks in long and short beams using changes in natural frequencies*, International Journal of Mechanical Sciences 83, 38–47, 2014.
- [5] Hoell, S. and Omenzetter, P., *Damage Detection in a Wind Turbine Blade Based on Time Series Methods*, EWSHM - 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, hal-01020344, 2014
- [6] Lopes, H., Ribeiro, J., Santos, J. V. A. D. and Maia, N. M. M., *Localization of Damage in Beams Using Interferometric Techniques*, 6th European Workshop on Structural Health Monitoring - Fr.2.D.2, 2014.
- [7] Staszewski, W.J., Jenal, R., Klepka1, A., Szwedo, M. and Uhl, T., *Review of Laser Doppler Vibrometry for Structural Health Monitoring Applications*, Engineering Materials ISSN: 1662-9795, Vol. 518, pp 1-15, 2012.
- [8] Sørensen, B.F., Lading, L., Sendrup, P., McGugan, M., Debel, C.P., Kristensen, O.J.D., Larsen, G., Hansen, A.M., Rheinländer, J., Rusborg, J. and Vestergaard, J.D., *Fundamentals for Remote Structural Health Monitoring of Wind Turbine Blades – a Preproject*, Risø-R-1336(EN), 2002.
- [9] Lopes, H.M.R., Santos, J.V.A.D., Monteiro, J. and Ribeiro, J., *Improvements In Damage Detection Using Modal Strain Fields Measured By Digital Shearography*, 16th International Conference on Composite Structures ICCS 16, 2011.
- [10] Santos, D.F.L.M., Peeters, B., Auweraer, H.V.D., Go, L.C.S. and Desmet, W., *Vibration-based damage detection for a composite helicopter main rotor blade*, Mechanical Systems and Signal Processing 3, 22–27, 2016.
- [11] Waldron, K., Ghoshal, A., Schulz, M.J., Sundaresan, M.J. and Ferguson, F., *The use of operational deflection shapes structural damage detection*, Thesis, University of Missouri, Columbia, 2001.
- [12] Saleh, F., *Determination of Damage Location in Reinforced Concrete Beams Using Mode Shape Curvature Square (MSCS) Method*, Tesis, Vitoria University, Australia, 2016.
- [13] Agarwal, S. and Chaudhuri, S.R., *Damage Detection In Large Structures Using Modes Shapes And Its Derivatives*, IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology eISSN: 2319-1163 | pISSN: 2321-7308, 2015.
- [14] Wang, Y., Liang, M. and Xiang, J., *Damage detection method for wind turbine blades based on dynamics analysis and mode shape difference curvature information*, Mechanical Systems and Signal Processing 48, 351–367, 2014.
- [15] Dawari, V. B. and Vesmawala, G. R., *Structural Damage Identification Using Modal Curvature Differences*, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) ISSN: 2278-1684, PP: 33-38, 2013.
- [16] Dessi, D. and Camerlengo, G., *Damage identification techniques via modal curvature analysis: Overview and comparison*, Mechanical Systems and Signal Processing 52-53, 181–205, 2015.
- [17] Kusuma, F., Rusli, M. and Bur, M., *Identifikasi Posisi Retak Pada Balok Dengan Tumpuan Jepit-Bebas Melalui Analisis Modus Getar Eksperimental Dan Model Elemen Hingga*, Thesis, Universitas Andalas, Padang 2016.
- [18] Yang, T.Y., *Finite Element Structural Analysis*, Prentice-Hall.Inc. Englewood Cliff, N.J, 1986.
- [19] Beer, F.P., Johnston, E.S. and Dewolf, J.T., *Mechanics of materials 4th in SI units*, McGraw-Hill Higher Education, Singapore, 2006
- [20] He, J. and Fu, Z.F., *Modal Analysis*, Butterworth-Heinemann. Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8 DP, 2001.