

IDENTIFIKASI PARAMETER MODAL DAN KERUSAKAN STRUKTUR OLEH BEBAN OPERASIONAL

Alan Putranto

Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Ketapang
Jl. Ranga Sentap, Dalong-Sukaharja, Ketapang 78813
e-mail: alanputranto@politap.ac.id

Abstract: Dynamic behavior and system identification are very important issues for civil engineering practitioners, especially structural engineers. System identification using Second order blind identification (SOBI) method is non-parametric identification of time domain that used in operational modal analysis (OMA) base on experiment of plane truss with ambient excitation. SOBI method is validated with a finite element (FE) then used to estimate the modal parameter of the experimental model structure. The results of recorded data of normal and damaged structure response using USB accelerometer X16-1D then processed and the data is loaded in Matlab program ExpNor15mts.m and ExpDmg15mts.m to estimate the modal parameters of model structure. The modal parameters at normal state for frequency and mode shape are 68,6925 rad/s and 40,7983 respectively, while at damage state 50,9254 rad/s and 30,9473 respectively. The value of the frequency ratio decreased by 34.8884%. In this study, damage detection is only based on the frequency ratio. Damage detection cannot be check from the value of modal assurance criterion (MAC) because it only has one mode shape in experimental result. The SOBI method is accurate for estimate the modal parameters, especially for frequency, but it can only estimate damping ratio with very small value and less effective to estimate the second and third mode shape.

Keywords: second order blind identification (SOBI), finite element (FE), operational modal analysis (OMA), modal parameters, plane truss

Abstrak: Perilaku dinamik dan identifikasi sistem merupakan isu yang sangat penting bagi para praktisi teknik sipil terutama insinyur struktur. Identifikasi sistem menggunakan metode Second order blind identification (SOBI) merupakan metode non parametrik domain waktu yang digunakan sebagai analisis modal operasional (OMA) pada penelitian struktur truss rangka bidang guna mengestimasi parameter modal struktur yang diberikan input beban sembarang dan tak terukur (ambient vibration). Metode SOBI divalidasi dengan finite element (FE) kemudian digunakan untuk memprediksi nilai parameter modal struktur model eksperimen. Hasil data rekaman respon struktur normal dan rusak menggunakan USB akselerometer X16-1D kemudian diolah dan data tersebut dilakukan load ke program matlab ExpNor15mts.m dan ExpDmg15mts.m sehingga dihasilkan parameter modal struktur. Parameter modal struktur tersebut pada saat keadaan struktur normal untuk nilai frekuensi dan ragam getar secara berturut-turut adalah 68,6925 rad/s dan 40,7983, sedangkan pada saat kondisi rusak diperoleh 50,9254 rad/s dan 30,9473. Nilai rasio frekuensi mengalami penurunan sebesar 34,8884 %. Pada penelitian ini, deteksi kerusakan hanya didasarkan pada rasio frekuensi. Deteksi kerusakan tidak dapat dilihat dari nilai modal assurance criterion (MAC) karena hanya memiliki satu nilai ragam getar. Metode SOBI cukup akurat untuk estimasi parameter modal struktur terutama frekuensi, tetapi hanya bisa mengestimasi nilai rasio redaman yang sangat kecil dan kurang efektif untuk estimasi ragam getar kedua dan ketiga.

Kata kunci: *Second order blind identification (SOBI), finite element (FE), analisis modal operasional (OMA), parameter modal struktur, truss rangka bidang*

PENDAHULUAN

Perilaku dinamik dan identifikasi sistem merupakan isu yang sangat penting bagi para praktisi teknik sipil terutama insinyur struktur. Identifikasi sistem yang tidak diketahui informasi input dan langsung diperoleh output

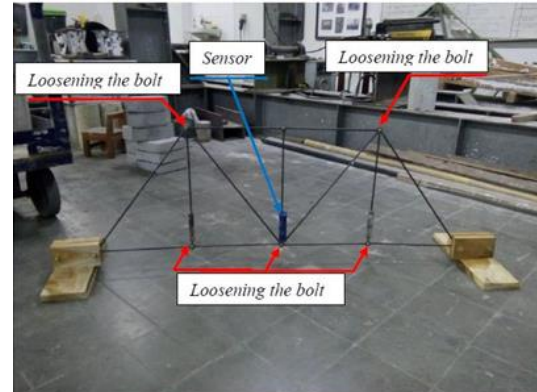
dari hasil respon struktur mewakili keadaan sesungguhnya pada identifikasi sistem struktur. Ketidakpastian beban pada struktur, terutama struktur jembatan akibat beban lalu-lintas, beban angin, beban gempa dan sebagainya merupakan suatu beban operasional yang bekerja pada sistem struktur. Analisis pada

sistem struktur tersebut dapat dilakukan dengan metode analisis modal operasional (OMA). Analisis modal operasional (OMA) adalah prosedur percobaan modal yang mengizinkan estimasi eksperimental pada parameter modal struktur dari pengukuran terhadap respon getaran (Rainieri dan Fabbrocino, 2014). Salah satu teknik yang digunakan pada analisis modal operasional (OMA) adalah teknik blind source separation (BSS). Studi yang telah dilakukan oleh (Poncelet dkk, 2007) membahas tentang eksperimental dan simulasi OMA menggunakan teknik BSS yang disebut independent component analysis dan second order blind identification. Metode identifikasi untuk bentuk linear normal (LMN) berdasarkan BSS lebih cocok untuk algoritma SOBI (Zhou dan Chelidze, 2007). Menurut Poncelet (2010) metode analisis modal berdasarkan hasil output menggunakan SOBI dapat dipertimbangkan untuk penerapan numerikal dan eksperimental yang tervalidasi dan dapat dipercaya. Metode tersebut juga menunjukkan peningkatan yang berarti untuk jangka waktu (time series) yang lebih lama (Hetland, 2015).

Berdasarkan uraian tersebut, penulis mencoba melakukan penelitian eksperimental pada struktur truss yang diberi getaran ambient pada kondisi struktur normal dan struktur yang dirusak dengan algoritma SOBI. Algoritma SOBI adalah metode identifikasi untuk bentuk linear dan belum pernah diterapkan pada struktur truss rangka bidang. Pada penelitian ini, parameter modal struktur teridentifikasi diharapkan dapat mengindikasikan kerusakan yang terjadi pada struktur truss tersebut.

MODEL STRUKTUR TRUSS RANGKA BIDANG, SKEMA KERUSAKAN DAN PEMASANGAN ALAT

Struktur truss baja rangka bidang dengan tumpuan sendi-sendi dikenai getaran *ambient*, baja polos diameter 6 mm, modulus elastisitas (E) = 200.000 Mpa dan masa jenis (ρ) = 7850 kg/m³ dipasang USB akselerometer X16-1D. Analisis numerik dengan bantuan program Matlab yang dikembangkan oleh Arfiadi (1996), dan program SOBI yang dikembangkan oleh Schanke (2015). Bahan uji, skema pemasangan alat dan kerusakan struktur dapat dilihat pada gambar 1 berikut.



Gambar 1. Skema pemasangan alat dan kerusakan struktur

ANALISIS NUMERIK STRUKTUR TRUSS RANGKA BIDANG (PLANE TRUSSES)

Menurut Mario (1985) elemen matriks kekakuan $[k]$ dan matriks massa $[m]$ untuk struktur truss rangka bidang dapat menggunakan persamaan berikut:

$$[k] = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

dengan $[k]$ = matriks kekakuan dalam koordinat lokal, A = luas penampang, E = modulus elastisitas, L = panjang bentang, sedangkan untuk matriks massa menggunakan persamaan berikut :

$$[m] = \frac{\bar{m}L}{6} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

dengan $[m]$ = matriks massa, \bar{m} = massa terdistribusi per unit panjang, dan L = panjang bentang.

Redaman pada struktur bukan merupakan hal yang mudah untuk dihitung. Pada penelitian ini redaman dianggap sebanding massa, sehingga matriks redaman dapat dilihat sebagai berikut:

$$[c] = a_m [m] \quad (3)$$

di mana:

$$a_m = 2\omega_r \zeta_r \quad (4)$$

KONDENSASI STATIK

Kondensasi statik dilakukan untuk mereduksi jumlah derajat kebebasan yang harus diselesaikan dalam suatu persamaan. Dengan cara ini ukuran persamaan yang harus diselesaikan akan lebih sederhana (Arfiadi, 2016b). Ditinjau suatu persamaan keseimbangan statik:

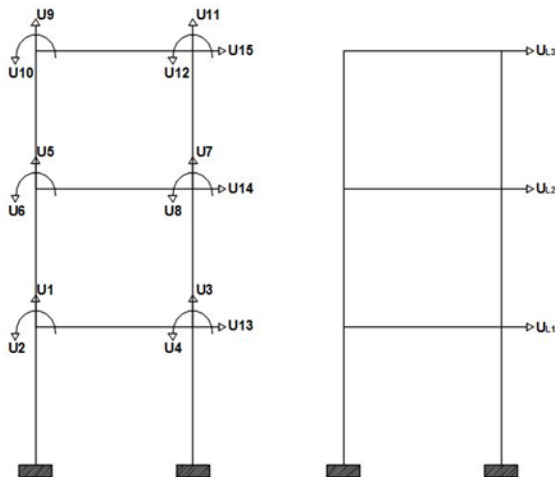
$$[K]\{U\} = \{P\} \quad (5)$$

Partisipasi matriks pada persamaan (5) di atas adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} [K_{CC}] & [K_{CL}] \\ [K_{LC}] & [K_{LL}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U_C\} \\ \{U_L\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{P_C\} \\ \{P_L\} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

Pada persamaan (6) $\{U_C\}$ adalah perpindahan yang akan di kondensasi sedangkan $\{U_L\}$ adalah perpindahan yang akan dipertahankan. Penjabaran lengkap dapat dilihat pada (Arfiadi, 2016b) sehingga persamaan menjadi :

$$[K_{LL}^*]\{U_L\} = \{P_L^*\} \quad (7)$$



(a) Sebelum dikondensasi (b) Setelah dikondensasi
Gambar 2. Kondensasi statik pada struktur 3 lantai

SIGNAL PROCESSING

Proses random merupakan kumpulan semua kemungkinan terjadi pada fenomena random.

Kumpulan fungsi sampel (*ensemble*) diperlukan untuk mengkaracterkan suatu proses yang random dan dapat dihitung:

$$\mu_x(\bar{t}) = \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x_k(\bar{t}) \quad (8)$$

dengan $\mu_x(\bar{t})$ = nilai rerata proses random, $x_k(\bar{t})$ = kumpulan fungsi ke k , \bar{t} = waktu sesaat tertentu. Autokorelasi dapat dihitung dengan cara yang sama yaitu rerata kumpulan hasil nilai pada waktu sesaat \bar{t} dan $\bar{t} + \tau$:

$$R_{xx}(\bar{t}, \bar{t} + \tau) = \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x_k(\bar{t})x_k(\bar{t} + \tau) \quad (9)$$

Proses *weakly stationary random* dengan autokorelasi hanya tergantung pada jeda waktu τ :

$$\mu_x(\bar{t}) = \mu_x \quad (10)$$

$$R_{xx}(\bar{t}, \bar{t} + \tau) = R_{xx}(\tau) \quad (11)$$

Hal yang telah dideskripsikan di atas merupakan ‘alat’ dalam analisis sinyal dan biasanya digunakan untuk mempersiapkan data pada kebanyakan teknik analisis modal operasional (OMA).

TRANSFORMASI FOURIR DISKRIT (DFT)

Transformasi fourir mengubah *series* waktu kedalam osilasi harmonik dan mengubah sinyal domain waktu menjadi sinyal domain frekuensi. Semua data diwakili oleh sampel diskrit sehingga transformasi yang digunakan adalah transformasi fourir diskrit.

Fourir diskrit sinyal domain waktu:

$$y_n = \sum_{k=1}^N Y_k e^{i2\pi(k-1)(n-1)/N} \quad (12)$$

Fourir diskrit sinyal domain frekuensi:

$$Y_k = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^n y_n e^{-i2\pi(k-1)(n-1)/N} \quad (13)$$

Total banyaknya pengukuran $N = T\Delta t$. Pengukuran N diambil pada saat waktu dan frekuensi yang sama yaitu $r = k = 0, 1, 2, \dots, N-1$. Evaluasi untuk persamaan di atas membutuhkan operasi N^2 sehingga dikembangkan transformasi fourier cepat (FFT). Pengukuran N dibagi menjadi $N = 2^p$ maka pengukuran dan metode tersebut hanya memerlukan operasi $N \log_2 N$.

STATE SPACE MODEL

Tinjauan *state space model* dalam penelitian ini mengacu pada persamaan yang telah dijabarkan pada Rainieri dan Fabbrocino (2014) dengan mengkonversikan permasalahan persamaan diferensial orde kedua menjadi persamaan diferensial orde pertama yang ditentukan dari persamaan *state* dan persamaan observasi. Persamaan diferensial orde kedua dituliskan sebagai berikut:

$$[M]\{\ddot{y}(t)\} + [C]\{\dot{y}(t)\} + [K]\{y(t)\} = \{f(t)\} \quad (14)$$

Persamaan *state space* dapat diperoleh dengan memfaktorkan vektor gaya $\{f(t)\}$ kedalam matriks $[B]$ dan vektor $\{u(t)\}$ yang secara berturut-turut merupakan lokasi *input* dan variasi waktu.

$$\{\dot{s}(t)\} = \begin{bmatrix} -[M]^{-1}[C] & -[M]^{-1}[K] \\ [I] & [0] \end{bmatrix} \{s(t)\} + \begin{bmatrix} [M]^{-1}[B] \\ [0] \end{bmatrix} \{u(t)\} \quad (15)$$

$$[A_c] = \begin{bmatrix} -[M]^{-1}[C] & -[M]^{-1}[K] \\ [I] & [0] \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$[B_c] = \begin{bmatrix} [M]^{-1}[B] \\ [0] \end{bmatrix} \quad (17)$$

Persamaan *state* dapat ditulis sebagai:

$$\{\dot{s}(t)\} = [A_c]\{s(t)\} + [B_c]\{u(t)\} \quad (18)$$

Subskrip *c* menunjukkan waktu kontinyu. Jika diasumsikan pengukuran respons struktur pada lokasi *l* dan berbagai sensor seperti *accelerometer*, *velocimeter*, dan transduser perpindahan. Vektor $\{y_l(t)\}$ merupakan vektor *output* terukur dan matriks $[C_a]$, $[C_v]$, dan

$[C_d]$ secara berturut-turut adalah matriks lokasi *output* dari percepatan, kecepatan, dan perpindahan. Persamaan observasi dapat ditulis sebagai berikut:

$$\{y(t)\} = [C_c]\{s(t)\} + [D_c]\{u(t)\} \quad (19)$$

Matriks $[C_c]$ merupakan matriks output pengaruh sedangkan matriks $[D_c]$ adalah matriks transisi langsung yang dapat ditentukan di mana:

$$[C_c] = [C_v] - [C_a][M]^{-1}[C] \quad [C_d] = [C_a][M]^{-1}[K] \quad (20)$$

$$[D_c] = [C_a][M]^{-1}[B] \quad (21)$$

METODE SECOND ORDER BLIND IDENTIFICATION (SOBI)

Second blind order identification adalah metode non parametrik yang mengekstrak sejumlah sinyal (*source*) dan diidentifikasi sebagai domain waktu. Data input yang diperlukan untuk algoritma ini adalah data matriks $[Y]$ dan waktu Δt . Respons terukur diasumsikan sebagai campuran sumber sinyal statik dan linear dan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\{y(t)\} = [A]\{s(t)\} + \{n(t)\} \quad (22)$$

dengan $\{y(t)\}$ = campuran sinyal terobservasi $[A]$ = *mixing matrix*, $\{s(t)\}$ = sumber sinyal, $\{n(t)\}$ = *noise sensor*.

Langkah awal perhitungan algoritma SOBI adalah *centering* (*zero mean*) dan *whitening* data:

$$[z] = [W][Y_c] \quad (23)$$

dengan $[Y_c]$ = matriks data terpusat, $[W]$ = *whitening matrix*, $[z]$ = *whitened data*.

Ambil *singular value decomposition* (SVD) dari data terpusat $[Y_c]$:

$$[Y_c] = [U][\Sigma][V]^T \quad (24)$$

Whitening matrix $[W]$ dihitung:

$$[W] = [\Sigma]^+ [V]^T \quad (25)$$

Matriks kovarian perpindahan waktu harus dihitung:

$$[R_z(\tau_k)] \quad (26)$$

dengan $k=1,2, \dots, p$

Teknik *joint approximation diagonalization* (JAD) digunakan pada matriks kovarian perpindahan waktu yang tujuannya adalah menentukan *unitary matrix* $[\tilde{A}']$ dengan meminimalkan jumlah *off diagonal* yang terlihat pada persamaan berikut:

$$\min \sum_{k=1}^n \left([\tilde{A}']^T [R_z(\tau_k)] [\tilde{A}'] \right) \quad (27)$$

Solusi dari permasalahan ini dapat dikerjakan dengan algoritma numerik berdasarkan teknik rotasi Jacobi. Ada 2 parameter yang harus ditentukan yaitu banyaknya *time lags* p dan *threshold* t . Nilai tersebut ditentukan untuk awalan:

$$p = \min(100, N/3) \quad (28)$$

Nilai tersebut dipilih karena performa dari diagonalisasi semakin baik dengan semakin bertambahnya nilai p tetapi dengan cepat *converge*. Sedangkan untuk nilai *threshold* (batas) dimana JAD harus berhenti, nilai yang dipilih sebagai awalan;

$$t = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (29)$$

Setelah *unitary matrix* $[\tilde{A}']$ ditemukan *mixing matrix* $[A_m]$ dapat dihitung:

$$[A_m] = [W]^+ [\tilde{A}'] \quad (30)$$

Sumber sinyal $[s_0(t)]$:

$$[s_0(t)] = [\tilde{A}']^T * [z(t)] \quad (31)$$

Ragam bentuk dapat ditemukan langsung dari kolom *mixing matrix*. Frekuensi alami dan rasio redaman ditentukan dengan estimator *curve fitting* SDOF yang didasarkan pada FFT dan kemudian mengambil satu *peak*.

DETEKSI KERUSAKAN

Indikasi kerusakan merupakan langkah awal (level 1) deteksi kerusakan pada struktur dan dapat dilakukan dengan membandingkan ragam bentuk pada struktur normal dan struktur rusak melalui *modal assurance criterion* (MAC). Nilai *modal assurance criterion* (MAC) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$MAC(\{\phi_n^a\}, \{\phi_n^e\}) = \frac{|\{\phi_n^a\}^T \{\phi_n^e\}|^2}{(\{\phi_n^a\}^T \{\phi_n^a\})(\{\phi_n^e\}^T \{\phi_n^e\})} \quad (31)$$

Dengan $\{\phi_n^e\}$ = ragam bentuk ke n terestimasi hasil eksperimental struktur rusak, dan $\{\phi_n^a\}$ = ragam bentuk ke n terestimasi hasil eksperimental struktur normal.

Nilai MAC berada diantara 0 dan 1 secara berturut-turut menunjukkan tidak konsisten dan sangat konsisten. Indikasi kerusakan struktur juga dapat dilihat dari pengurangan frekuensi alami terutama ragam bentuk pertama (Bernagozzi, *et al.*, 2016). Peraturan Pemeriksaan Jembatan Rangka Baja No. 005/BM/2009 Pedoman Konstruksi dan Bangunan Kementerian Pekerjaan Umum Direktorat Jendral Bina Marga menetapkan tingkat kerusakan dengan rasio (k), yaitu perbedaan Δf antara frekuensi alami terukur di lapangan dengan frekuensi alami teoritis terhadap frekuensi alami utuh jembatan. Nilai k dan kriteria penilaian dapat dikelompokkan seperti pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Kondisi Kriteria Rasio Frekuensi (k)

No	Rasio frekuensi (k) %	Kriteria
1	≥ 20	Kritis (telah terjadi retak struktural)
2	$15 \leq k < 20$	Kurang
3	10	Kurang cukup
4	0	Baik

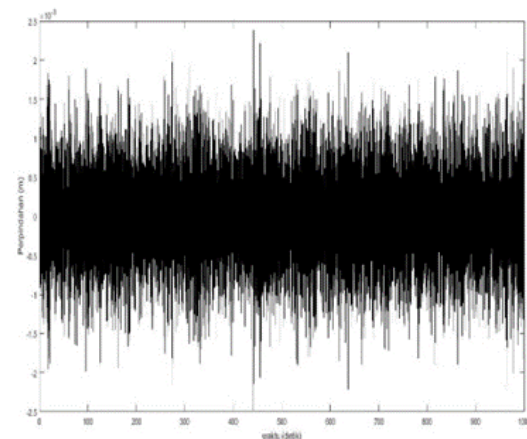
TAHAPAN ANALISIS

Struktur truss rangka bidang dibuat dengan bantuan program Matlab yang dikembangkan oleh Arfiadi (1996) dan dianalisis dengan metode *second order blind identification* (SOBI) yang dikembangkan oleh Schanke (2015) guna memperoleh parameter modal struktur. Nilai modulus elastisitas material dan massa jenis material pada bahan uji secara berturut-turut adalah 200.000 MPa dan 7850 kg/m³. Guna memprediksi frekuensi natural, ragam getar, dan rasio redaman struktur diperlukan teknik kondensasi statik. Struktur truss rangka bidang dengan input program trussexp.m dan dengan bantuan program Matlab oleh Arfiadi (1996) mulai dari tahap penentuan koordinat struktur sampai tahapan perakitan struktur dalam koordinat global dianalisis dan diperoleh nilai matriks kekakuan, matriks massa, dan matriks redaman. Respons struktur akibat getaran dengan input sembarang dan tak terukur (ambient vibration) menggunakan fungsi randn(). Data diasumsikan sebanyak (n)= 100.000 dengan nilai $\sigma = 0,01$ sehingga menghasilkan respons struktur seperti Gambar 3. Nilai masing-masing respons maksimum untuk setiap joint vertikal yang dipertahankan setelah dikondensasi statik secara berturut-turut adalah $y_1 = 0,0025$ m, $y_2 = 0,0036$, dan $y_3 = 0,0023$ m.

Parameter modal struktur diperkirakan dengan metode SOBI menggunakan solveso-bi.m. Parameter modal struktur yang dihasilkan antara *finite element* (FE) dan SOBI untuk nilai frekuensi natural dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2 menunjukkan nilai frekuensi alami hasil *finite element* (FE) dan SOBI tidak memiliki perbedaan yang berarti sehingga untuk eksperimen deteksi kerusakan tahap awal yaitu

indikasi kerusakan, nilai frekuensi alami bisa dijadikan sebagai tolak ukur kerusakan struktur serta dianggap cukup valid. Metode SOBI memiliki kekurangan yaitu tidak ada tolak ukur dan kontrol hasil estimasi tersebut benar atau salah sehingga perlu diberikan hasil pembandingan seperti metode *finite element* (FE). Nilai ragam getar dari hasil *finite element* (FE) dan SOBI ditunjukkan pada tabel 3. Ragam getar diperoleh langsung dari kolom *mixing matrix A* sedangkan untuk ragam getar *finite element* (FE) dapat dilihat pada eigen matrix nya. Ragam getar suatu struktur sangat dipengaruhi oleh input beban yang diberikan dan respons struktur yang terjadi. Nilai ragam getar antara *finite element* (FE) dan SOBI tidak menunjukkan perbedaan yang berarti seperti ditunjukkan tabel 3. Korelasi ragam getar yang baik dapat dibuktikan dengan nilai *modal assurance criterion* (MAC) yang hasilnya mendekati 1 dan diperoleh hasil seperti ditunjukkan pada Tabel 4. Tabel 4 menunjukkan nilai *modal assurance criterion* (MAC) untuk masing-masing ragam serta redaman prediksi menggunakan metode SOBI. Nilai *modal assurance criterion* (MAC) metode SOBI pada penelitian ini dapat digunakan sebagai indikasi kerusakan struktur.

**Gambar 3.** Respons struktur akibat ambient vibration**Tabel 2.** Perbandingan Nilai Frekuensi Alami antara *finite element* (FE) dan Metode SOBI

Ragam Getar	FE		SOBI	
	ω (rad/s)	f (Hz)	ω (rad/s)	f (Hz)
1	58,4315	9,2996	58,3423	9,2854
2	96,2913	15,3252	96,2700	15,3218
3	250,7423	39,9068	250,4503	39,8604

Tabel 3. Nilai Ragam Getar (ϕ_1) *finite element* (FE) dan SOBI

FE			Normalisasi		
ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3
-0,48	0,63	-0,99	-1,1	0,85	-10
-0,76	-0,18	0,0011	-1,7	-0,2	0,01
-0,43	0,74	0,0991	-1	1	1
SOBI			Normalisasi		
ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3
-610,5	380,15	-83,38	-1,1	0,87	-8,45
-931,0	-55,41	2,1417	-1,7	-0,1	0,21
-545,3	433,70	9,8675	-1	1	1

Tabel 4. Nilai *modal assurance criterion* (MAC) dan Rasio Redaman Prediksi

Ragam Getar	MAC	ξ prediksi (10^{-4})
1	0,9997	0,2860
2	0,9906	0,2429
3	0,9991	0,0718

TAHAP EKSPERIMEN

Tahap eksperimen menggunakan sensor X16-1D versi ADXL345 dengan sample rate 50 Hz dan perkiraan waktu 15 menit perekaman data serta $\Delta t = 0,02$ detik. Panjang data matriks (nfft) yang dipilih adalah 49160 pengukuran dan perubahan terhadap nilai nfft sangat mempengaruhi hasil parameter modal terestimasi, di mana:

$$\frac{49160}{50} = \frac{\text{Pengukuran}}{\text{Hz}} = 983,2 \text{ dtk} = 16,387 \text{ menit}$$

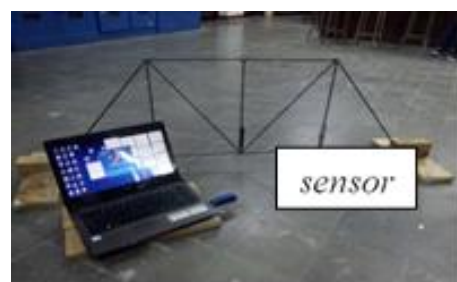
Sumber pengukuran yaitu 1 sumbu x dengan jumlah sensor 1 sehingga:

$$l = 1 \times 1 = 1 \text{ sumber pengukuran}$$

Langkah pertama dalam pengolahan data adalah *raw* data diolah dengan cara membagi data dengan angka 2048. Angka 2048 merupakan hasil dari konversi data yang diproses melalui *Finite Impulse Response* (FIR) *filter* (64 tap N4R4M2) yang menghasilkan data 16 bit (65536 *discreet counts*) meliputi *range* penuh sensor antara +/- 16 g. Maka dari itu, masing-masing *discreet counts* sama dengan

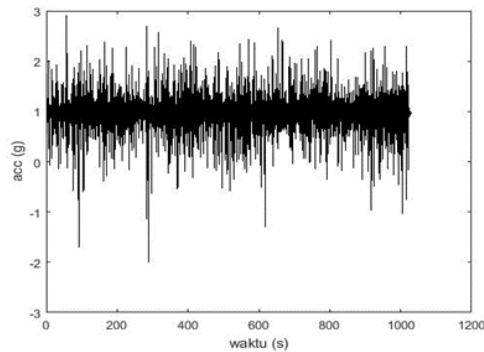
$\frac{32}{65536} = 2048 \text{ counts/g}$. Data yang telah diolah tersebut kemudian dimasukan kedalam suatu matriks yaitu data input matriks $[Y]$ yang kemudian di *detrend* sehingga nilai nilai rerata dan tren linear dapat dihilangkan. Data tersebut tidak perlu di *resample* karena diatur dengan frekuensi yang tidak begitu besar yang artinya tidak diperlukan waktu yang banyak dalam *processing* datanya. Pengaturan awal dilakukan dengan mengatur konfigurasi sensor dengan *editing config.txt* menggunakan WordPad sesuai kebutuhan. Langkah berikutnya membuat *time.txt file* untuk mengatur sensor agar sesuai dengan jam laptop atau *hand phone* dengan format 24 jam “yyy-MM-dd HH:mm:ss”. Setelah langkah-langkah tersebut dilakukan, pasang sensor pada struktur truss rangka bidang yang akan diuji untuk struktur normal. Langkah-langkah yang sama dilakukan untuk struktur yang rusak dengan mekanisme kerusakan mengurangi jepitan baut (*loosening the bolt*) pada beberapa joint serta mengekstrak data seperti gambar 1 dan data diekstrak seperti gambar berikut.

Jika ditinjau dari Peraturan Pemeriksaan Jembatan Rangka Baja No. 005/BM/2009 Pedoman Konstruksi dan Bangunan Kementerian Pekerjaan Umum Direktorat Jendral Bina Marga sudah melebihi 20 persen dan dapat dikategorikan pada kondisi kritis. Kriteria kesesuaian bentuk dengan menghitung nilai *modal assurance criterion* (MAC) sebagai salah satu indikator kerusakan menggunakan persamaan (29) adalah sebagai berikut:

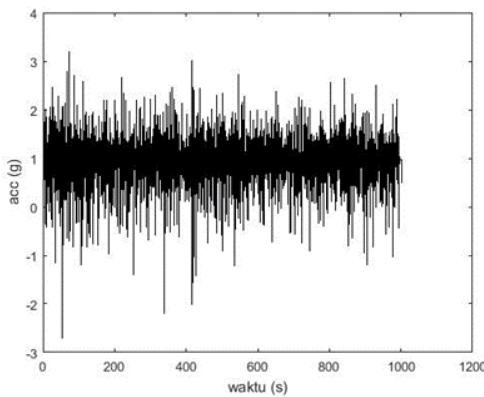
**Gambar 4.** Ekstrak data

Struktur yang telah dipasang sensor pada keadaan *recording* kemudian diberikan getaran *ambient* pada waktu yang telah diperkirakan yaitu 15 menit. Hasil pengolahan *raw* data disimpan pada file matlab *health15mts.mat* dan *damage15mts.mat* serta respons yang dihasilkan

untuk struktur normal dan struktur yang dirusak secara berturut-turut dapat dilihat pada gambar 5 dan 6 berikut.



Gambar 5. Respons struktur normal



Gambar 6. Respons struktur rusak

Data hasil rekaman sensor yang telah diolah yaitu *filehealth15mts.mat* dan *damage15mts.mat* di load ke program sobi seperti pada lampiran *file ExpNor15mts.m* dan *ExpDmg15mts.m* sehingga diperoleh hasil seperti Tabel 5 yang menunjukkan nilai prediksi frekuensi alami dan ragam getar untuk struktur normal dan struktur rusak menggunakan metode SOBI.

Tabel 5. Nilai frekuensi alami dan ragam getar prediksi SOBI

Jenis Struktur	Frekuensi (rad/s)	Ragam Getar
Normal	68,6925	40,7983
Rusak	50,9254	30,9473

Nilai rasio frekuensi (r) struktur normal dan struktur rusak dapat dihitung sebagai berikut:

$$r = \left(\frac{(68,6925 - 50,9254)}{50,9254} \right) \times 100\% = 34,8884 \%$$

Jika ditinjau dari Peraturan Pemeriksaan Jembatan Rangka Baja No. 005/BM/2009 Pedoman Konstruksi dan Bangunan Kementerian Pekerjaan Umum Direktorat Jendral Bina Marga sudah melebihi 20 persen dan dapat dikategorikan pada kondisi kritis. Kriteria kesesuaian bentuk dengan menghitung nilai *modal assurance criterion* (MAC) sebagai salah satu indikator kerusakan menggunakan persamaan (29) adalah sebagai berikut:

$$MAC(\{\phi_n^a\}, \{\phi_n^e\}) = \frac{|\{30,9473\}^T \{40,7983\}|^2}{(\{30,9473\}^T \{30,9473\})(\{40,7983\}^T \{40,7983\})}$$

Nilai *modal assurance criterion* (MAC) yang hanya memiliki satu ragam getar pada penelitian ini tidak dapat dijadikan indikator kerusakan struktur karena nilainya akan selalu satu.

KESIMPULAN

Berdasarkan bahasan pada hasil analisis dan eksperimen tersebut, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai parameter modal struktur terestimasi struktur truss rangka bidang kondisi normal secara berturut-turut untuk frekuensi alami dan ragam getar adalah 68,6925 rad/s dan 40,7983 sedangkan pada saat kondisi rusak diperoleh 50,9254 rad/s dan 30,9473.
2. Indikasi kerusakan struktur pada penelitian ini hanya didasarkan pada rasio frekuensi alami yang mengalami penurunan sebesar 34,8884 %, sedangkan untuk ragam getar yang dihitung dengan nilai modal assurance criterion (MAC) tidak digunakan karena hanya memiliki satu nilai ragam getar.
3. Metode second order blind identification (SOBI) cukup akurat untuk estimasi parameter modal struktur yaitu untuk nilai frekuensi alami tetapi hanya dapat memprediksi rasio redaman yang sangat kecil dan kurang efektif untuk memprediksi ragam bentuk kedua dan ketiga.

DAFTAR PUSTAKA

- Arfiadi Y., 1996, *Pengembangan Program Bantu untuk Analisis Struktur dengan Menggunakan Matlab*, Laporan Penelitian, Program Studi Teknik Sipil Fakultas

- Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Yogyakarta.
- Arfiadi Y., 2016a, *Analisis Struktur dengan Program Matlab dan FreeMat*, Cahaya Atma Pustaka, Kelompok Penerbit Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Yogyakarta.
- Arfiadi Y., 2016b, *Bahan Kuliah Dinamika Struktur Lanjut*, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Yogyakarta.
- Belouchrani, A. dan Abed-meraim, K, 1997, "Using Second-Order Statistics", *Journal IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol 45, pp. 434–444.
- Bernagozzi, G., Landi, L., dan Diotallevi, P.P., 2016, "On the Output-Only Vibration Based Damage Detection of Frame Structures", *Proceeding of Structural Health Monitoring, Damage Detection & Mechatronics*, Vol 7, pp. 23-33
- Brewick, P. T. dan Smyth, A. W, 2014, "On the Application of Blind Source Separation for Damping Estimation of Bridges Under Traffic Loading", *Journal of Sound and Vibration*, Vol 333, pp. 7333–7351.
- Brincker, R. dan Ventura, C, 2015, *Introduction to Operational Modal Analysis*, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom.
- Chen, H.L, Spyrakos, C.C., dan Venkatesh, G., "Evaluating Structural Deterioration by Dynamic Responce", *Journal of Structural Engineering*, 1995. 121(8): p. 1197-1204.
- Frans, R. dan Arfiadi, Y, 2017. "Sistem Identifikasi Struktur dengan Menggunakan Metode Frequency Domain Decomposition Natural Excitation Technique", *KonTeks II*, Universitas Tarumanegara.
- Graces, F., 2008, *Identification of Civil Engineering Structures*, Engineering Sciences [physics], Universite Paris-Est. <NNT : 2008PEST0238>. <tel-00470540>
- Hetland, R., 2015, "Operational Modal Analysis of the Dolmsundet Bridge During Construction", thesis of NTNU.
- MATLAB and Statistics Toolbox Release 2015b, "The MathWorks", Inc., Natick, Massachusetts, United States.
- Paz, M., 1986, *Microcomputer-Aid Engineering: Structural Dynamics*, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Paz, M., 1985, *Structural Dynamics: Theory and Computation*, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Pedoman Konstruksi dan Bangunan, 2009, Pemeriksaan Jembatan Rangka Baja (No. 005/BM/2009), Kementrian Pekerjaan Umum Direktorat Jendral Bina Marga, Jakarta.
- Poncelet, F., Kerschen, G., Golinval, J.C., dan Verhelst, D., 2007, "Output-only Modal Analysis using Blind Source Separation Techniques", *Journal Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol 21, pp. 2335–2358.
- Poncelet, F., 2010, "Experimental Modal Analysis using Blind Source Separation Techniques", Ph.D Dissertation, University of Liege.
- Rainieri, C. dan Fabbrocino, G., 2014, *Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structure*. Springer, New York.
- Sadhu, A., Hazra, B., dan Narasimhan, S., 2012, "Blind Identification of Earth-quake-Excited Structures", *Journal Smart Materials and Structures*, Vol 21, pp. 1-12.
- S. Beskhyroun dan Q. Ma., 2012, "Low-Cost Accelerometers for Experimental Modal Analysis", *15th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand.
- S.S. Rao, 2004, *Mechanical Vibrations*, Pearson, Upper Saddle River, NJ, New York.
- Schanke, SA., 2015, "Operational Modal Analysis of Large Bridges", thesis of NTNU.
- Spiridonakos, M., Yadav. N., dan Chatzi, E., 2014, "Identification and Damage Detection of Shear Frame Model Based on a Blind Source Separation Method", *7th European Workshop on Structural Health Monitoring*, July 8-11, Nantes, France.
- Zhou, W. dan Chelidze, D., 2007, "Blind Source Separation Based Vibration Mode Identification", *Journal Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 21, pp. 3072–3087.