

Identifikasi Parameter Modal Model Bangunan Dua Lantai Menggunakan Metode *Covariance-driven Stochastic Subspace Identification*

Adriyan

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Riau
Jl. Tuanku Tambusai, Delima, Pekanbaru, 28294

E-mail: adriyan@umri.ac.id

Abstract

The modal parameters identification is a crucial part for designing and monitoring of a structure. This research is aimed to identify natural frequency and damping ratio of a lab-scaled two-story building model as a structure-under-test (SUT). The identification applies an operational modal analysis (OMA) technique, leveraging an algorithm of covariance-driven stochastic subspace identification (SSI-Cov) within PyOMA2 libraries. The SUT is subjected to random excitations using pseudo random signals within 0.1-25 Hz frequency range. The acceleration responses were sampled at 7.5 ms rate for 1 minute at each floor. Consequently, two modes with frequencies 2.2384 Hz and 5.9220 Hz are successfully identified below 25 Hz. These two modes yield 0.0135 and 0.0069 of damping ratios, respectively. These findings are compared to those of other algorithms that demonstrated a satisfactory identification of natural frequencies. However, a significant difference emerges in the identified damping ratios, particularly with regard to the second mode.

Keywords: modal parameters, two storey building model, OMA, SSI-Cov

Abstrak

Identifikasi parameter modal struktur dari respons getarannya merupakan hal krusial dalam perancangan dan pemantauan kondisi struktur. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi parameter modal frekuensi pribadi dan rasio redaman model bangunan dua lantai skala laboratorium sebagai struktur uji melalui penerapan teknik operational modal analysis (OMA) dengan algoritma identifikasi covariance-driven stochastic subspace identification (SSI-Cov) melalui pustaka PyOMA2. Struktur uji dieksitasi secara acak dengan sinyal pseudorandom pada rentang frekuensi 0.1–25 Hz. Respons percepatan di setiap lantai dicuplik pada waktu sampling 7.5 ms selama 1 menit. Hasil identifikasi menunjukkan bahwa respons getaran mengandung dua modus untuk frekuensi di bawah 25 Hz dengan masing-masing frekuensi pribadi yang diidentifikasi sebesar 2.2384 Hz dan 5.9220 Hz. Sementara itu, identifikasi rasio redaman di kedua modus bernilai masing-masingnya 0.0135 dan 0.0069. Hasil komparasi dengan algoritma lainnya menunjukkan hasil identifikasi frekuensi pribadi yang baik. Namun, hasil identifikasi rasio redaman masih menunjukkan perbedaan yang signifikan pada modus kedua.

Kata kunci: parameter modal, model bangunan dua lantai, OMA, SSI-Cov

1. Pendahuluan

Proses pengujian berbasis sinyal getaran ditujukan untuk mendapatkan sifat inheren struktur berupa parameter modal, yaitu frekuensi pribadi, rasio redaman, dan modus getar [1]. Pengetahuan akan parameter modal ini akan membantu insinyur dalam mendesain struktur agar beroperasi jauh dari zona resonansi serta membantu dalam pemantauan kondisi struktur [2]. Untuk itu, parameter modal dapat ditentukan melalui algoritma-algoritma identifikasi. Algoritma-algoritma ini diterapkan berdasarkan teknik pengujian modal (*modal testing*) yang

digunakan. Teknik pengujian modal terdiri atas teknik *experimental modal analysis* (EMA) dan teknik *operational modal analysis* (OMA) [3–5].

Selanjutnya, teknik EMA membutuhkan eksitasi buatan agar respons strukturnya dapat dicuplik, sedangkan eksitasi pada teknik OMA berasal dari kondisinya ketika beroperasi [6]. Berdasarkan komparasi ini terlihat dengan gamblang bahwa OMA efektif diterapkan untuk struktur skala penuh saat beroperasi. Beberapa contoh penggunaannya dapat ditemukan pada kasus identifikasi mesin perkakas akibat eksitasi sendiri [4], turbin angin lepas pantai [7], *turbomachines* [8], kapal laut [9], bangunan [10],

dam [11], dan jembatan [12]. Dengan demikian, teknik OMA hanya membutuhkan pencuplikan data respons struktur saja tanpa dibutuhkan pencuplikan data eksitasi seperti pada teknik EMA.

Algoritma-algoritma identifikasi pada teknik OMA dapat digolongkan pada algoritma-algoritma dalam ranah waktu dan ranah frekuensi [13]. Algoritma ranah waktu merupakan algoritma yang cukup populer digunakan. Salah satu algoritma yang mumpuni ini yaitu SSI-Cov yang diajukan oleh Peeters dan De Roeck [14]. Meskipun algoritma dinamakan dengan basis identifikasi *subspace*, namun ia tergolong ke dalam algoritma dalam sistem realisasi. Algoritma ini dapat diimplementasi untuk identifikasi struktur yang dieksitasi dengan berbagai jenis eksitasi seperti ekitasi impuls yang menghasilkan respons getaran bebas [15], eksitasi harmonik [16], dan eksitasi acak [11].

Mengacu pada kemampuan algoritma identifikasi SSI-Cov ini, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi parameter modal frekuensi pribadi dan rasio redaman model bangunan dua lantai skala laboratorium sebagai struktur uji melalui penerapan SSI-Cov. Struktur uji ini dieksitasi secara acak dan respons percepatannya diukur pada setiap lantainya.

Kajian yang disajikan ini merupakan keberlanjutan penerapan teknik dan algoritma identifikasi lainnya pada struktur uji ini. Penerapan teknik EMA dengan algoritma identifikasi *half power point* (HPP) dan *rational fraction polynomial* (RFP) telah dibahas untuk mengkarakterisasi struktur uji [17]. Di samping itu, penerapan teknik OMA dengan menggabungkan metode *random decrement* dan algoritma identifikasi Ibrahim *time domain* (RD-ITD) juga telah sukses digunakan dalam mengidentifikasi parameter modal struktur uji ini [18]. Dengan demikian, komparasi teknik dan algoritma identifikasi dapat dibahas secara komprehensif dengan bersandar pada respons struktur uji model bangunan dua lantai.

2. Metodologi

2.1. Dinamika Struktur

Suatu struktur dinamik dengan n derajat kebebasan dan memiliki sifat *linear time invariant* (LTI) dalam waktu kontinu (*continuous time*) dapat dinyatakan secara matematis melalui persamaan diferensial geraknya, yaitu

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{z}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{z}} + \mathbf{K}\mathbf{z} = \mathbf{f}. \quad (1)$$

Dalam persamaan (1) ini diketahui bahwa $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, dan $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ masing-masingnya merupakan matriks massa, redaman dan kekakuan struktur dengan ukuran $n \times n$ ($\mathbb{R}^{n \times n}$). Selanjutnya, $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^n$, $\dot{\mathbf{z}} \in \mathbb{R}^n$, dan $\ddot{\mathbf{z}} \in \mathbb{R}^n$ masing-masingnya menyatakan respons struktur dalam bentuk vektor simpangan, kecepatan, dan percepatan struktur. Sementara itu, $\mathbf{f} \in \mathbb{R}^n$ merupakan vektor gaya eksternal yang mengeksitasi struktur.

Sistem dinamik dengan karakteristik LTI pada persamaan (1) dapat direalisasikan dengan memanfaatkan representasi *state space* dalam waktu kontinu. Namun, respons struktur dinamik umumnya diakuisisi secara digital melalui pengukuran dengan sensor yang besarnya disampel dengan data akuisisi. Untuk itu, representasi *state space*-nya dalam bentuk waktu diskrit dapat ditulis dalam bentuk

$$\dot{\mathbf{x}}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k \quad (2)$$

dan

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k, \quad (3)$$

dengan subskrip k ($1 \dots k \dots n_k$) menyatakan indeks waktu dalam pencuplikan (*sampling index*). n_k merupakan panjang pencuplikan data respons.

Melalui persamaan (2) dapat diketahui bahwa $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}$ merupakan matriks sistem

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{D} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

$\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}$ menyatakan matriks *influence input-output*

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{M}^{-1} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Sementara itu, $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{m \times 2n}$ merupakan matriks *output* sistem atau matriks observasi. Matriks ini menghubungkan *state responses* $\mathbf{x}_k \in \mathbb{R}^{2n}$,

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_k \\ \dot{\mathbf{z}}_k \end{bmatrix}, \quad (6)$$

dengan posisi (informasi spasial penempatan sensor) dan jenis respons yang disampel $\mathbf{y}_k \in \mathbb{R}^m$. Selanjutnya, vektor *input* $\mathbf{u}_k \in \mathbb{R}^{2n}$ dinyatakan secara matematis oleh

$$\mathbf{u}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{f}_k \end{bmatrix}. \quad (7)$$

2.2. Covariance-driven Stochastic Subspace Identification (SSI-Cov)

Respons percepatan merupakan respons getaran struktur yang umum diukur karena ketersediaan sensor *accelerometer* yang luas. Dalam pengukuran tidak seluruh posisi di struktur untuk ditempatkan sensor *accelerometer* ini. Untuk itu, pengukuran dilakukan di beberapa posisi di struktur (m buah posisi) yang bukan merupakan titik simpul dalam modus getarnya seperti yang dinyatakan oleh persamaan (3), $\mathbf{y}_k$.

Respons yang diukur $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^{m \times n_k}$ ini akan ditumpuk untuk membentuk matriks blok respons

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_- \\ \mathbf{Y}_+ \end{bmatrix}, \quad (8)$$

dengan $\mathbf{Y} \in \mathbb{R}^{2mr \times j}$ serta $\mathbf{Y}_- \in \mathbb{R}^{mr \times j}$ dan $\mathbf{Y}_+ \in \mathbb{R}^{mr \times j}$ masing-masingnya menyatakan matriks blok respons *past* dan *future*. Kedua matriks ini dinyatakan dengan

$$\mathbf{Y}_- = \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{y}}_1 & \cdots & \ddot{\mathbf{y}}_j \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \ddot{\mathbf{y}}_r & \cdots & \ddot{\mathbf{y}}_{r+j} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

dan

$$\mathbf{Y}_+ = \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{y}}_{r+1} & \cdots & \ddot{\mathbf{y}}_{r+j+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \ddot{\mathbf{y}}_{2r} & \cdots & \ddot{\mathbf{y}}_{2r+j} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

dengan j merupakan jumlah bilangan bulat indeks waktu yang digunakan dan r menyatakan bilangan bulat jumlah blok respons. Kedua bilangan bulat j dan r ini harus memenuhi $2r + j \leq n_k$.

Metode SSI-Cov menerapkan perhitungan kovarians dari matriks blok respons $\mathbf{Y}_-$ dan $\mathbf{Y}_+$ untuk membentuk matriks Hankel $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{mr \times mr}$ [14]

$$\mathbf{H} = \mathbf{Y}_+ \mathbf{Y}_-^T. \quad (11)$$

Selanjutnya, dekomposisi nilai singular (*singular value decomposition*) diimplementasikan pada matriks Hankel $\mathbf{H}$ ini [19]

$$\mathbf{USV}^T = \mathbf{H}, \quad (12)$$

dengan $\mathbf{U} \in \mathbb{R}^{mr \times mr}$, $\mathbf{S} = \text{diag}(\mathbf{s}) \in \mathbb{R}^{mr \times mr}$, $\mathbf{s} \in \mathbb{R}^{mr}$, dan $\mathbf{V} \in \mathbb{R}^{mr \times mr}$.

Berdasarkan ketiga buah matriks hasil dekomposisi nilai singular ini dapat dibentuk sebuah matriks observabilitas, $\mathbf{O} \in \mathbb{R}^{mr \times mr}$,

$$\mathbf{O} = \mathbf{US}^{1/2}, \quad (13)$$

dan matriks kontrolabilitas, $\mathbf{\Gamma} \in \mathbb{R}^{mr \times mr}$,

$$\mathbf{\Gamma} = \mathbf{S}^{1/2} \mathbf{V}^T. \quad (14)$$

Selanjutnya, matriks observabilitas $\mathbf{O}$ tanpa m -baris pertama $\mathbf{O}_\downarrow \in \mathbb{R}^{(m-1)r \times mr}$ dan m -baris terakhir $\mathbf{O}_\uparrow \in \mathbb{R}^{(m-1)r \times mr}$ dimanfaatkan untuk menghasilkan matriks sistem $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{(m-1)r \times (m-1)r}$ melalui hubungan matematis

$$\mathbf{A} = \mathbf{O}_\downarrow \mathbf{O}_\uparrow^+, \quad (15)$$

dengan $\mathbf{O}_\uparrow^+$ menyatakan pseudo invers matriks $\mathbf{O}_\uparrow$. Sementara itu, matriks observasi $\mathbf{C}$ dapat ditentukan dari matriks observabilitas m -baris pertama, $\mathbf{O}_m \in \mathbb{R}^{m \times mr}$.

2.3. Estimasi Parameter Modal

Parameter modal struktur yang diidentifikasi dapat ditentukan berdasarkan matriks sistem $\mathbf{A}$ pada persamaan (15) dan matriks observasi $\mathbf{C}$. Sebagaimana diketahui bahwa proses identifikasi dengan teknik OMA umumnya menerapkan *overdetermined model order* yaitu pemodelan sistem dari data pengukuran melebihi *model order* yang dimiliki oleh sistem itu sendiri. Untuk itu, matriks sistem $\mathbf{A}$ dapat dipartisi dari *model order* 2 hingga nilai tertentu N , yaitu $\mathbf{A}_q \in \mathbb{R}^{q \times q}$ ($q = 2 \dots N$). Hal yang sama juga diterapkan pada matriks observasi $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{m \times q}$.

Untuk setiap matriks sistem $\mathbf{A}_i$ ini dikenakan dekomposisi nilai karakteristik (*eigen value decomposition* yang disingkat dengan *evd*) sehingga diperoleh nilai dan vektor karakteristik kompleks,

$$\mathbf{\Psi} \mathbf{\Lambda} \mathbf{\Psi}^H = \mathbf{A}, \quad (16)$$

dengan $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\boldsymbol{\lambda}) \in \mathbb{C}^{q \times q}$, $\boldsymbol{\lambda} \in \mathbb{C}^q$ dan, $\mathbf{\Psi} \in \mathbb{C}^{q \times q}$. Nilai dan vektor karakteristik kompleks ini harus dikonversi ke sistem waktu kontinu dari sistem waktu diskrit. Untuk itu, nilai karakteristik kompleks dalam waktu kontinu, $\boldsymbol{\lambda}_c \in \mathbb{C}^q$,

$$\boldsymbol{\lambda}_c = \frac{\ln(\boldsymbol{\lambda})}{t_s}, \quad (17)$$

dengan t_s menyatakan waktu *sampling* pengukuran respons. Sedangkan, vektor

karakteristik kompleks dalam waktu kontinu $\Psi_c = \Psi$.

Selanjutnya, nilai karakteristik kompleks dalam waktu kontinu ini untuk setiap *model order* terdiri atas nilai kompleks $\lambda_{c,q}$ dan kompleks konjugatnya $\lambda_{c,q}^*$. Dengan demikian, frekuensi pribadi, f_q , dan rasio redaman, ζ_q , masing-masingnya dapat diekstraksi berdasarkan persamaan (17), yaitu [19,20]

$$f_q = \frac{\sqrt{a_q^2 + b_q^2}}{2\pi t_s}, \quad (18)$$

dan

$$\zeta_q = \frac{a_q}{\sqrt{a_q^2 + b_q^2}}, \quad (19)$$

dengan $a_q = \ln(\lambda_{c,q} \lambda_{c,q}^*)$ dan $b_q = 2 \cos^{-1} \left(\frac{\lambda_{c,q} + \lambda_{c,q}^*}{2\sqrt{\lambda_{c,q} \lambda_{c,q}^*}} \right)$. Sedangkan, modulus getarnya Φ_q dapat ditentukan melalui

$$\Phi_q = C_q \Psi_q. \quad (20)$$

2.4. Penerapan Pustaka PyOMA2 untuk Identifikasi Struktur

Pustaka PyOMA2 [21] merupakan versi lanjutan dari PyOMA [22] sebagai pustaka peningkatan untuk proses identifikasi struktur berbasis OMA. Peningkatan ini dengan melibatkan pengukuran secara *multi setup* yang umum ditemui dalam praktisnya karena keterbatasan jumlah sensor. Di samping itu, algoritma identifikasi baru juga ditambahkan. Penggunaan API (*application programming interface*) untuk *end user* juga ditingkatkan sehingga dapat digunakan meskipun tanpa menggunakan antar muka grafis.

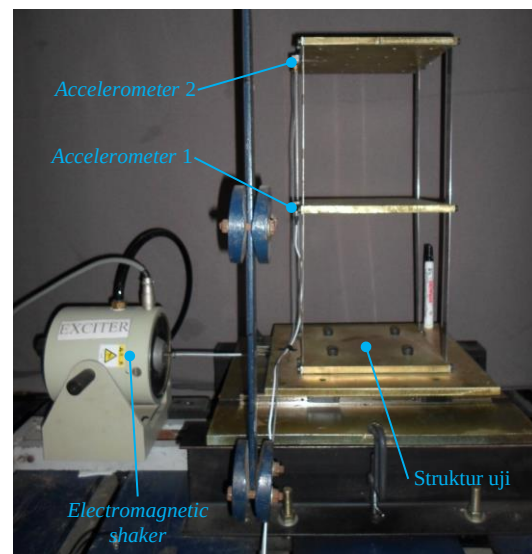
Algoritma SSI-Cov merupakan salah satu algoritma yang dapat digunakan melalui pustaka PyOMA2 ini. Penggunaan PyOMA2 ini memiliki alur secara berurutan, yaitu:

1. impor data pengukuran yang telah diambil,
2. *instantiate setup* baik *setup* tunggal atau *setup* jamak (PoSER dan PreGER), pada bagian ini pengguna dapat menerapkan pengolahan sinyal seperti *filter* data dan *decimation* (*down-sampling*), serta menambahkan geometri struktur uji,
3. *instantiate* algoritma identifikasi seperti FDD, EFDD, SSI-Data, SSI-Cov, dan pLSCF,
4. menambahkan algoritma pada langkah 3 ke *setup* pada langkah 2,

5. menjalankan proses identifikasi yang dimulai dengan membentuk matriks Hankel, membentuk matriks sistem **A** dan matriks observasi **C**, dan mengekstraksi parameter modal.

2.5. Struktur Uji

Struktur uji yang digunakan berupa model bangunan penahan geser dua derajat kebebasan (atau dua lantai) seperti pada Gambar 1. Struktur ini dieksitasi melalui tumpuan dengan menggunakan *electromagnetic shaker* dengan sinyal *pseudorandom* dengan kandungan frekuensi eksitasi antara 0.1 - 25 Hz.



Gambar 1. Struktur uji dan penempatan sensor accelerometer.

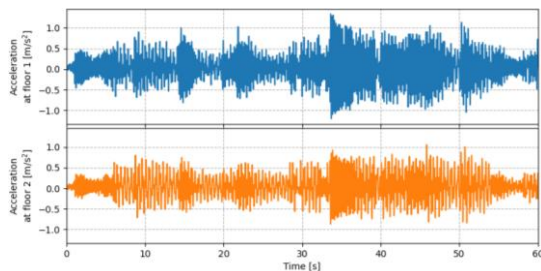
Accelerometer ditempatkan pada setiap lantai pada struktur uji untuk mendapatkan respons percepatan struktur uji ketika dieksitasi oleh *electromagnetic shaker*. Accelerometer yang digunakan merupakan accelerometer Brüel & Kjær (B&K) tipe 4507 dengan sensitivitas sebesar 0.01 V/m·s⁻². Untuk mengakuisisi data respons digunakan data akuisisi 4 kanal B&K dan perangkat lunak Pulse Analyzer versi 7.0.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Akuisisi Data Respons Percepatan

Respons percepatan struktur uji pada Gambar 1 diakuisisi melalui sensor accelerometer B&K tipe 4507, data akuisisi 4 kanal B&K, dan perangkat lunak Pulse Analyzer versi 7.0 dengan frekuensi *sampling* sebesar $F_s = 133.33$ Hz atau waktu *sampling* sebesar 7.5 ms. Selanjutnya, respons percepatan yang diperoleh pada masing-

masing lantai model bangunan struktur uji untuk 60 s akusisi data ditunjukkan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Respons percepatan pada masing-masing lantai struktur uji.

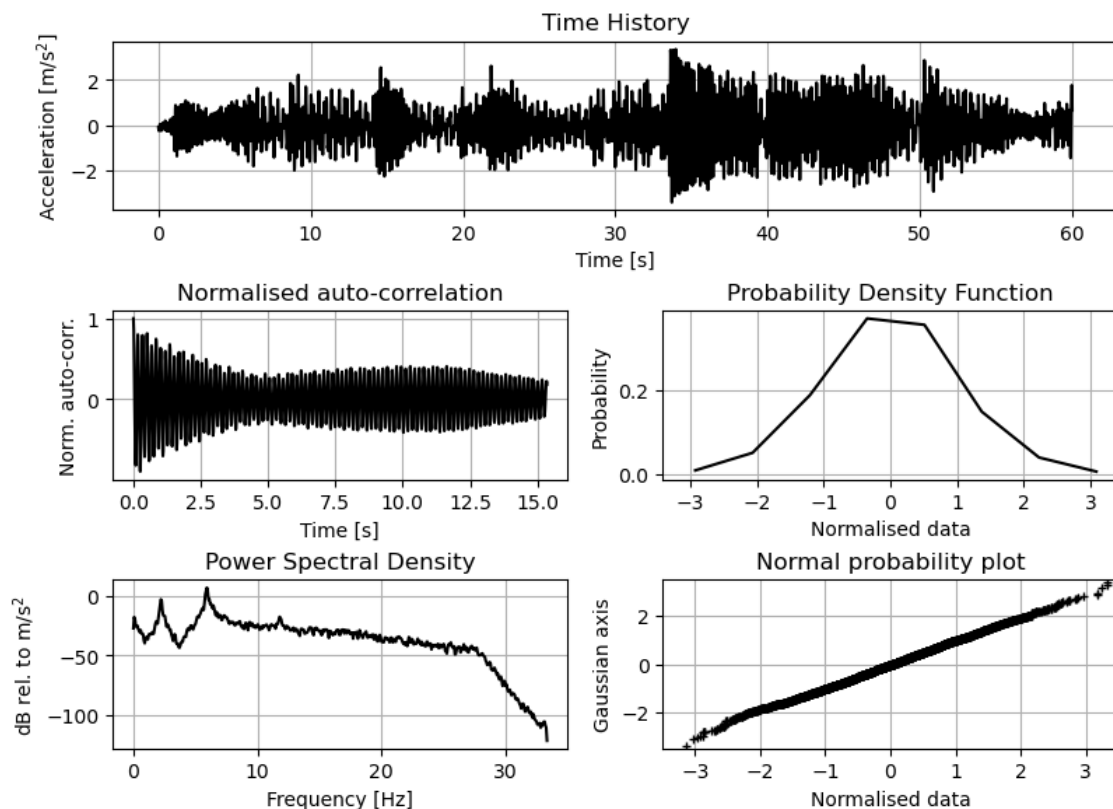
3.2. Setup Identifikasi dengan PyOMA2

Parameter modal struktur uji diidentifikasi dengan menerapkan algoritma identifikasi SSI-Cov melalui pustaka PyOMA2. Untuk itu, alur penggunaannya diterapkan dengan membaca data respons terlebih dahulu ke lingkungan bahasa pemrograman python melalui aplikasi Jupyter Notebook [23]. Data respons percepatan ini merupakan input pada *setup* tunggal melalui class `setup.SingleSetup` bersamaan dengan nilai frekuensi *sampling* data ($F_s = 133.33$ Hz). Hasil penerapan class ini dinyatakan ke dalam sebuah *instance* `tssb_single_setup`.

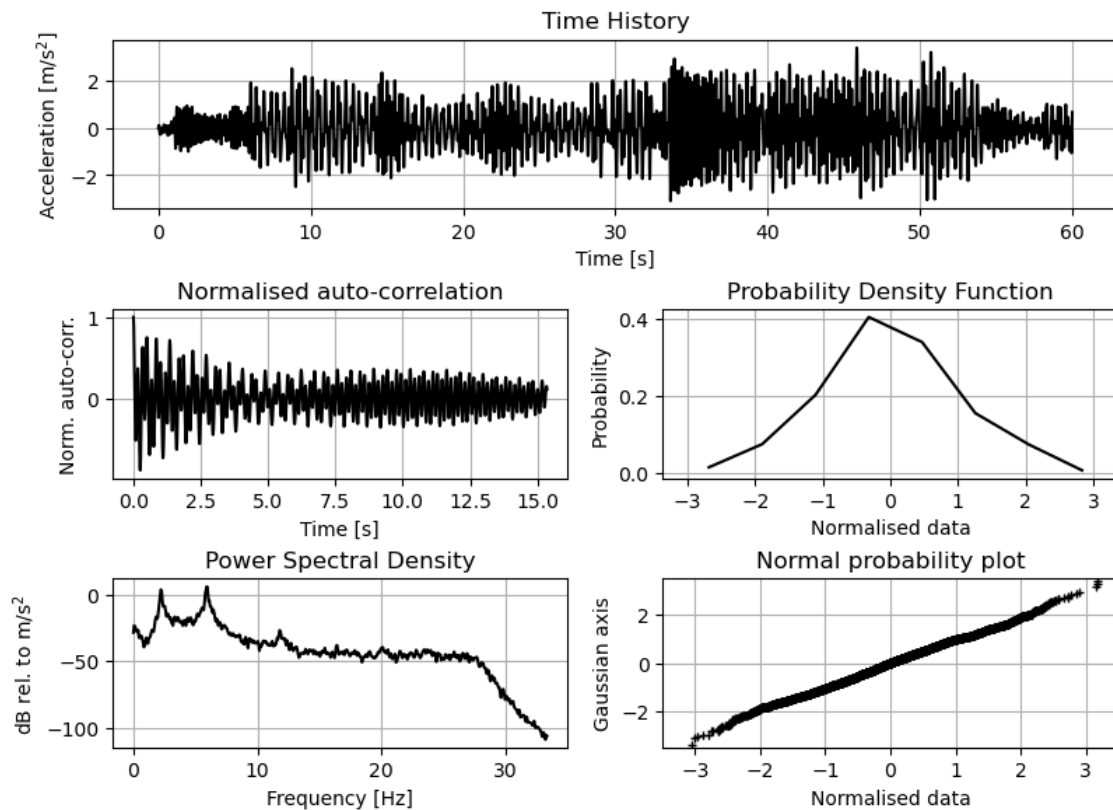
Selanjutnya, proses pengolahan sinyal diimplementasikan pada data respons ini berupa penerapan *low pass filter* pada frekuensi *cutoff* sebesar 50 Hz. Penggunaan *low pass filter* ini secara langsung diimplementasi melalui method `.filter_data()` dengan mengentrikan argumen frekuensi *cutoff* dan nama *filter* "lowpass". Proses *decimation* data respons atau *downsampling* dilakukan dengan menerapkan method `.decimate_data()` dengan argumen berupa faktor 2.

Dengan demikian, melalui penggunaan method `.plot_ch_info()` pada *instance* `tssb_single_setup` dapat diketahui informasi tambahan dari masing-masing respons yang dicuplik. Informasi tambahan respons percepatan pada lantai 1 dan 2 masing-masingnya ditampilkan dalam Gambar 3 dan 4.

Informasi tambahan ini berupa autokorelasi sinyal respons, spektrumnya dalam bentuk *power spectral density* (PSD), fungsi kepadatan probabilitas sinyal, dan plot probabilitas normal. Untuk respons getaran paksa secara acak dengan kandungan frekuensi eksitasi pada struktur uji dapat digolongkan ke dalam jenis *narrow band*. Jenis *narrow band* ini dapat dilihat melalui grafik autokorelasi untuk respons percepatan di dua titik pengukuran.

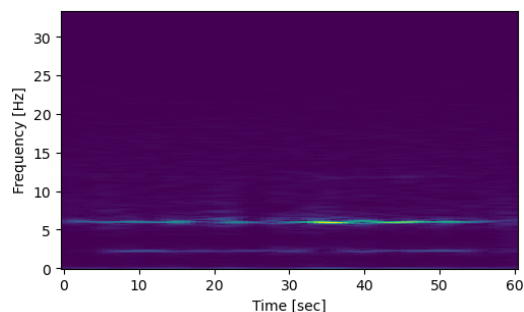


Gambar 3. Informasi tambahan respons percepatan pada lantai 1 struktur uji.



Gambar 4. Informasi tambahan respons percepatan pada lantai 2 struktur uji.

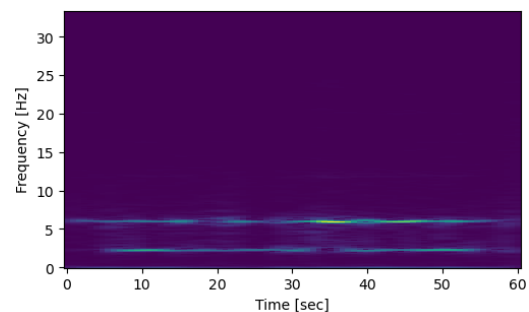
Kemudian, PSD ke dua respons percepatan menunjukkan terdapat dua puncak frekuensi yang signifikan. Kondisi menunjukkan bahwa struktur uji memiliki dua modus dalam rentang pengekstiasian. Untuk mendukung kondisi ini dapat dimanfaatkan juga `.plot_STFT()` pada `instance` `tssb_single_setup`. Spektrogram untuk STFT (*short-time Fourier transform*) kedua respons percepatan ini ditampilkan dalam Gambar 5 dan 6.



Gambar 5. Spektrogram dari STFT respons percepatan pada lantai 1 struktur uji.

Berdasarkan spektrogram pada Gambar 5 dan 6 mengkonfirmasi bahwa terdapat dua frekuensi signifikan yang dimiliki oleh respons percepatan. Selanjutnya, informasi dari fungsi kepadatan probabilitas sinyal dan plot probabilitas normal

menunjukkan bahwa kedua respons percepatan memiliki karakteristik Gaussian.



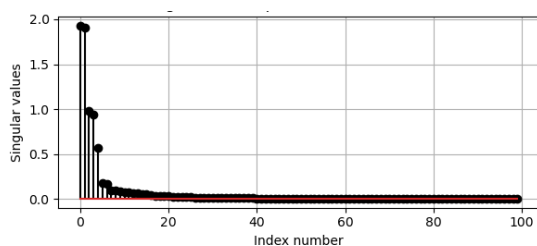
Gambar 6. Spektrogram dari STFT respons percepatan pada lantai 2 struktur uji.

3.3. Identifikasi Parameter Modal Struktur Uji dengan SSI-Cov di PyOMA2

Proses selanjutnya adalah menset algoritma identifikasi. SSI-Cov merupakan algoritma yang dipilih untuk proses identifikasi model bangunan dua lantai. Untuk itu, `class` `algorithm.SSICov` di-`instantiate` dengan menerapkan argumen berupa jumlah blok respons `r (br)` sebesar 50, dan jumlah `model order N (ordmax)` sebesar 50. `Instance` dari penggunaan `class` ini dinyatakan ke dalam variabel `id_ssicov`.

Algoritma identifikasi pada variabel `id_ssicov` digunakan sebagai argumen untuk `method.add_algorithms()` dari `instance tssb_single_setup`. Setelah algoritma identifikasi berhasil ditambahkan, proses identifikasi dapat dijalankan yang akan menghasilkan informasi berupa suksesnya asembli matriks Hankel, membentuk matriks sistem dan matriks observasi untuk setiap *model order*, dan mengkomputasi parameter modal untuk setiap *model order*. Dengan suksesnya ketiga informasi menunjukkan bahwa keseluruhan proses identifikasi telah selesai dengan baik.

Meskipun, proses identifikasi telah sukses secara basis perangkat lunak, namun interpretasi langkah identifikasinya dapat dideskripsikan satu persatu. Nilai singular s pada persamaan (12) dapat divisualisasikan berdasarkan nilai indeksnya ($mr = 100$) seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 7. Melalui dekomposisi nilai singular pada matriks Hankel dapat diketahui jumlah parameter yang tidak diketahui pada sistem yang diidentifikasi.



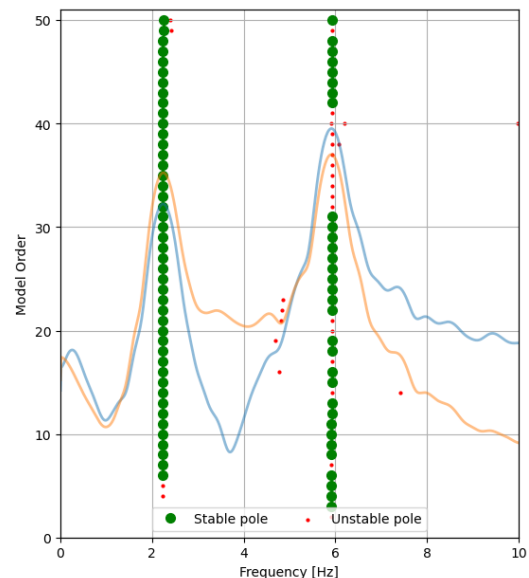
Gambar 7. Nilai singular struktur uji.

Berdasarkan Gambar 7 dapat diestimasi setidaknya terdapat 5 nilai singular yang signifikan untuk 90% besar penurunan nilai singular. Dengan demikian, 5 nilai singular ini dapat dikorelasikan dengan jumlah *model order* minimum untuk dapat mendeteksi jumlah parameter yang dimiliki struktur uji. Meskipun nilai singular pada Gambar 7 dapat digunakan untuk mengestimasi jumlah parameter struktur uji. Penggunaan diagram stabilisasi dapat menguatkan untuk interpretasi.

Merujuk pada spektrum PSD dan spektrogram STFT diketahui ada dua nilai frekuensi struktur uji yang dominan di bawah 10 Hz. Untuk itu, pada diagram stabilisasi akan digunakan rentang frekuensi 0 – 10 Hz seperti yang ditampilkan dalam Gambar 8. Melalui diagram stabilisasi yang dilengkapi PSD kedua respons dinyatakan posisi nilai *pole* (terutama frekuensi) untuk setiap *model order*.

Diagram stabilisasi struktur uji menunjukkan bahwa terdapat 2 frekuensi utama pada struktur uji atau model dengan 4 *poles*. *Stable pole*

(*physical mode*) dan *unstable pole* (*spurious mode*) ditentukan berdasarkan seperangkat kriteria yang telah ditetapkan dan dapat dirujuk pada referensi [24–26].



Gambar 8. Diagram stabilisasi struktur uji.

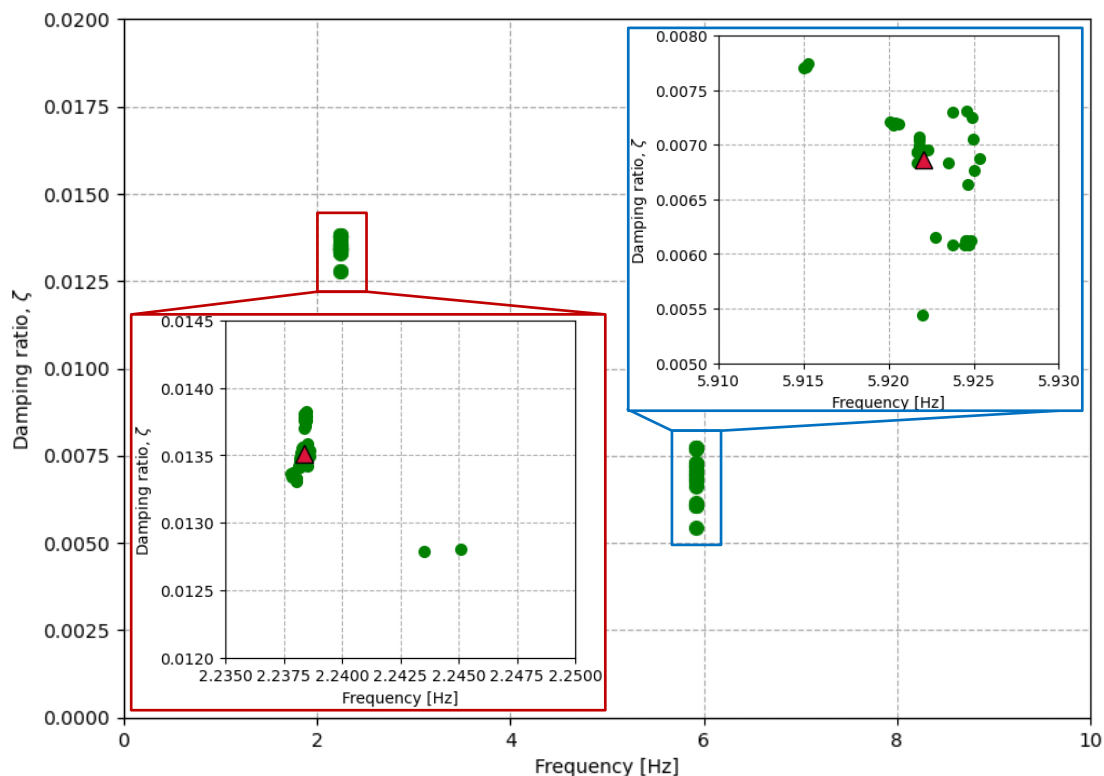
Setiap *stable pole* yang dinyatakan dalam diagram stabilisasi dapat digunakan untuk menyatakan hubungan frekuensi dan redaman. Hubungan ini dinyatakan ke dalam diagram pencar (*scatter*) frekuensi vs redaman seperti yang diplotkan pada Gambar 9. Melalui perbesaran dari kedua modus terlihat masing-masingnya berupa kluster antara frekuensi dan redaman. Untuk itu, *centroid* kedua kluster ini dapat ditentukan sebagai nilai rerata nilai frekuensi dan redaman. *Centroid*-nya ditandai dengan tanda segitiga dengan warna merah dengan nilai numeriknya ditampilkan dalam Tabel 1.

Tabel 1.

Frekuensi dan rasio redaman hasil identifikasi struktur uji dengan metode SSI-Cov

Modus	Frekuensi [Hz]	Rasio redaman
1	2.2384	0.0135
2	5.9220	0.0069

Selanjutnya, hasil identifikasi yang telah diperoleh melalui Tabel 1 dapat dikomparasikan dengan hasil yang diperoleh dengan metode identifikasi lainnya. Metode identifikasi lainnya yang dimaksud yaitu metode *half power point* (HPP) SDOF dalam teknik EMA [17], metode *curve fitting rational fraction polynomials* (RFP) MDOF dalam teknik EMA [17], dan metode identifikasi *random decrement* (*level crossing triggering*)-Ibrahim *time domain* (RD(T^L)-ITD) dalam teknik OMA [18]. masing-masingnya untuk frekuensi dan rasio redaman struktur uji.



Gambar 9. Diagram frekuensi dan redaman untuk kedua modulus berikut dengan posisi *centroid* klusternya.

Tabel 2.

Perbandingan identifikasi frekuensi struktur uji untuk berbagai metode identifikasi dalam teknik EMA dan OMA

Modus	HPP (EMA) [17]	RFP (EMA) [17]	RD(T^L)-ITD (OMA) [18]	SSI-Cov (OMA)
1	2.2500	2.2715	2.1667	2.2384
2	5.8750	5.9091	5.9911	5.9220

Tabel 3.

Perbandingan identifikasi rasio redaman struktur uji untuk berbagai metode identifikasi dalam teknik EMA dan OMA

Modus	HPP (EMA) [17]	RFP (EMA) [17]	RD(T^L)-ITD (OMA) [18]	SSI-Cov (OMA)
1	0.0128	0.0033	0.0127	0.0135
2	0.0109	0.0092	0.0170	0.0069

Komparasi dengan ketiga algoritma identifikasi lainnya disajikan ke dalam Tabel 2 dan 3. Identifikasi frekuensi pribadi untuk berdasarkan keempat algoritma identifikasi menunjukkan hasil yang relatif sama ketika dibandingkan pada kedua modulusnya. Namun, hasil identifikasi rasio redaman menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan terutama pada modulus kedua. Secara keseluruhan, identifikasi rasio redaman dengan algoritma RFP yang menunjukkan hasil yang berbeda jauh dengan tiga algoritma lainnya.

4. Simpulan

Telah dilakukan kajian proses identifikasi parameter modal frekuensi pribadi dan rasio redaman pada model bangunan dua lantai skala laboratorium menggunakan algoritma SSI-Cov

melalui pustaka PyOMA2. Dengan bantuan pustaka PyOMA2, proses identifikasi menjadi lebih mudah dan dapat diinterpretasikan secara langsung melalui grafik yang disediakan seperti grafik nilai singular, diagram stabilisasi, dan grafik frekuensi vs rasio redaman. Komparasi dengan hasil identifikasi menggunakan algoritma lainnya menunjukkan kekonsistenan hasil identifikasi frekuensi pribadi namun tidak untuk rasio redaman. Kedepannya penggunaan algoritma *data-driven stochastic subspace identification* (SSI-Data) dapat digunakan lebih lanjut termasuk penerapannya untuk data pengukuran *multi-setup*.

Daftar Pustaka

- [1] Liu D, Tang Z, Bao Y, Li H. Machine-learning-based methods for output-only

- structural modal identification. *Struct Control Heal Monit* 2021;28:e2843. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/stc.2843>.
- [2] Xu Y, Zheng D, Shao C, Zheng S, Gu H. Structural Modal Parameter Identification Method Based on the Delayed Transfer Rate Function under Periodic Excitations. *Mathematics* 2023;11. <https://doi.org/10.3390/math11041019>.
 - [3] Tavares A, Di Lorenzo E, Cornelis B, Manzato S, Peeters B, Desmet W, et al. Automated experimental modal analysis with density-based clustering: A benchmark validation through jury testing. *Mech Syst Signal Process* 2025;232:112714. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2025.112714>.
 - [4] Ebrahimi-Tirtashi A, Ahmadi K. Automated Operational Modal Analysis of self-excited vibrations in turning. *Mech Syst Signal Process* 2025;233:112705. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2025.112705>.
 - [5] Volkmar R, Soal K, Govers Y, Böswald M. Experimental and operational modal analysis: Automated system identification for safety-critical applications. *Mech Syst Signal Process* 2022;183:1–19. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109658>.
 - [6] Orlowitz E, Brandt A. Comparison of experimental and operational modal analysis on a laboratory test plate. *Meas J Int Meas Confed* 2017;102:121–30. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.02.001>.
 - [7] Galván J, Domínguez JM, Albizuri J. Operational modal analysis applied to floating offshore wind turbine dynamics identification in wave basins in the presence of free-surface modes. *Ocean Eng* 2025;327. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120909>.
 - [8] Dreher N, Machado T, Paulsen T, Santos I. Toward online stability margin tracking of Turbomachines via operational modal analysis. *J Sound Vib* 2025;610:119094. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2025.119094>.
 - [9] Pais T, Silvestri P. Full scale cruise ship dynamic identification using operational modal analysis on sea trial data measurements. *Ocean Eng* 2024;311. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118931>.
 - [10] Pan H, Jiang F, Wu J, Deng T, Fu J. Bayesian operational modal analysis of two supertall buildings under Super Typhoon Saola. *Eng Struct* 2025;330:119907. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.119907>.
 - [11] Li S, Wang JT, Jin AY, Luo GH. Parametric analysis of SSI algorithm in modal identification of high arch dams. *Soil Dyn Earthq Eng* 2020;129:105929. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105929>.
 - [12] Desjardins SL, Lau DT. Enhanced operational modal analysis and change point detection for vibration-based structural health monitoring of bridges. *J Infrastruct Intell Resil* 2024;3:100121. <https://doi.org/10.1016/j.iintel.2024.100121>.
 - [13] Zini G, Betti M, Bartoli G, Chiostrini S. Frequency vs time domain identification of heritage structures. *Procedia Struct Integr* 2018;11:460–9. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.115>.
 - [14] Peeters B, De Roeck G. Reference-based stochastic subspace identification for output-only modal analysis. *Mech Syst Signal Process* 1999;13:855–78. <https://doi.org/10.1006/mssp.1999.1249>.
 - [15] Bono FM, Argentino A, Bernardini L, Benedetti L, Cazzulani G, Somaschini C, et al. Automated Operational Modal Analysis of a steel truss railway bridge employing free decay response. *J Infrastruct Intell Resil* 2025;4:100145. <https://doi.org/10.1016/j.iintel.2025.100145>.
 - [16] Xu M, Au FTK, Wang S, Tian H. Operational modal analysis under harmonic excitation using Ramanujan subspace projection and stochastic subspace identification. *J Sound Vib* 2023;545:117436. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117436>.
 - [17] Adriyan, Bur M, Son L, Rusli M. Penerapan Analisis Modal Analitik dan Eksperimental untuk Identifikasi Parameter Modal Model Bangunan Dua Lantai. *Semin. Nas. Tah. Tek. Mesin XI, Yogyakarta*: 2012, p. 2188–94.
 - [18] Bur M, Rusli M, Adriyan, Son L. Kaji Eksperimental Penerapan Metode Ibrahim Time Domain Untuk Identifikasi Model Bangunan Dua Lantai Dengan Gangguan Pada Tumpuan. *Semin. Nas. Tah. Tek. Mesin XIII, Depok*: 2014, p. 34–43.
 - [19] Cao J, Yang Z, Lu M, Chen X. Compressive stochastic subspace identification: A modal parameter identification method suitable for compressive sampling. *Mech Syst Signal*

- Process 2025;223:111847.
<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111847>.
- [20] Salhi B, Lardiès J, Berthillier M, Voinis P, Bodel C. Modal parameter identification of mistuned bladed disks using tip timing data. *J Sound Vib* 2008;314:885–906. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.01.050>.
- [21] Pasca DP, Margoni DF, Rosso MM, Aloisio A. PyOMA2: An Open-Source Python Software for Operational Modal Analysis. In: Rainieri C, Gentile C, López MA, editors. *Proc. 10th Int. Oper. Modal Anal. Conf. (IOMAC 2024)*. *Lect. Notes Civ. Eng.* vol 514., Cham: Springer; 2024, p. 423–434. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-031-61421-7_42.
- [22] Pasquale D, Aloisio A, Martino M, Sotiropoulos S. PyOMA and PyOMA_GUI: A Python module and software for Operational Modal Analysis. *SoftwareX* 2022;20:101216. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2022.101216>.
- [23] Granger BE, Pérez F. Jupyter: Thinking and Storytelling With Code and Data. *Comput Sci Eng* 2021;23:7–14. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2021.3059263>.
- [24] Döhler M, Jaishi B, Mevel L, Brownjohn JMW, Michael D, Jaishi B, et al. Data fusion for system identification of the humber bridge. *Conf Proc Soc Exp Mech Ser* 2011;4:83–98. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9316-8_7.
- [25] Dreher NR, Storti GC, Machado TH. Automated Operational Modal Analysis for Rotating Machinery Based on Clustering Techniques. *Sensors* 2023;23. <https://doi.org/10.3390/s23031665>.
- [26] Martino M, Aloisio A, Parol J, Carlo G, Quaranta G. Intelligent automatic operational modal analysis. *Mech Syst Signal Process* 2023;201:110669. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110669>.