

PREDIKSI PARAMETER REDAMAN SINYAL RESPON DINAMIK MENGUNAKAN METODE LSCE DENGAN BAHASA PYTHON

PREDICTION OF DAMPING PARAMETER FROM DYNAMIC RESPONSE SIGNAL USING LSCE METHOD WITH PYTHON LANGUAGE

Arizal Akbar Zikri^{1*} dan Angga Dwi Saputra²
^{1,2}BBTA3-BPPT
Komplek Puspiptek, Tangsel, Indonesia

Abstrak

Pada pengujian aeroelastik pada uji terbang atau terowongan angin, redaman merupakan parameter yang kritikal untuk menentukan batas kecepatan *flutter*. Untuk itu dibutuhkan metode ekstraksi nilai redaman yang akurat dan efektif. Nilai redaman didapatkan dari ekstraksi respon dinamik struktur yang diuji. Metode ekstraksi yang digunakan, yaitu *Least Square Complex Exponential* (LSCE). Data yang dianalisis merupakan sinyal transien yang disimulasikan melalui pemrograman python dengan nilai parameter redaman dan frekuensi tertentu. Hasil perhitungan redaman menggunakan python dibandingkan dengan matlab.

Kata kunci : redaman, *flutter*, struktur, aeroelastik, ekstraksi

Abstract

In the aeroelastic test on flight test or wind tunnel, damping is a critical parameter to determine boundary flutter speed. Therefore, We need accurate and effective methods to extract damping. Damping parameter were obtained by extraction dynamic response signals of structure under test. Least Square Complex Exponential (LSCE) are used for extracting damping value. Analyzed signals was a transient signal which is simulated by python in certain damping and frequency value. The final results for damping value are compared between python and matlab.

Keywords: *damping, flutter, structure, aeroelastic, extraction*

I. PENDAHULUAN

Redaman atau damping merupakan sebuah mekanisme yang mendisipasi energi getaran pada sistem dinamik. Parameter ini sangat penting dalam proses desain dan analisis getaran struktur, karena kita harus mengetahui mekanisme redaman yang terjadi dari respon dinamik pada sebuah struktur dan perambatan getaran ke lingkungan sekitarnya [1]. Redaman menjadi hal yang lebih penting pada struktur fleksibel. Pada sayap pesawat, bangunan tinggi, dan jembatan bentang panjang harus tahan terhadap osilasi yang disebabkan oleh aliran udara. Fenomena interaksi antara gaya aerodinamika, elastisitas, dan inersia pada suatu struktur disebut aeroelastik [2]. Osilasi yang cukup besar dapat menyebabkan kerusakan struktur dan ketidaknyamanan penghuni bangunan.

Redaman struktural merupakan suatu besaran energi yang mendisipasi energi getaran menjadi kondisi diam atau stabil. Kapasitas redaman didefinisikan sebagai rasio energi yang didisipasikan pada satu siklus getaran terhadap total energi maksimum pada siklus tersebut. Ada beberapa mekanisme redaman, yang paling penting adalah redaman material dan interfacial damping. Redaman material yang dihasilkan dari interaksi molekuler yang kompleks dalam sebuah material. Oleh karena itu nilai redaman material tergantung dari jenis material, metode dan proses manufaktur. Interfacial damping adalah gesekan Coulomb antar bagian pada sambungan dari sistem struktur. Sambungan las cenderung mengurangi kontribusi terhadap interfacial damping dibanding dengan sambungan baut. Redaman aerodinamik atau hidrodinamik terjadi

* Corresponding Author. Tel: +62-852-1602-9963
E-mail: arizal.akbar@bppt.go.id

pada struktur yang bergetar dalam udara atau air. Secara umum, redaman aerodinamik jauh lebih kecil dibanding dengan redaman mekanik. Pada redaman hidrodinamik cenderung besar, terutama pada bangunan diatas laut.

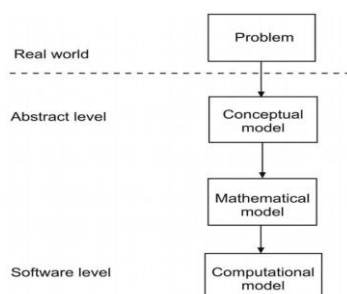
Pada pengujian aeroelastik pada uji terbang (flight test) atau terowongan angin. Energi yang dihasilkan dari aliran udara mengeksitasi dan menguatkan modus getar struktur [4]. Pada kecepatan flutter nilai redaman salah satu atau semua modus flutter memiliki nilai redaman mendekati nol. Pada pengujian aeroelastik di terowongan angin, redaman aerodinamik dihitung dengan mengurangi redaman total yang didapatkan ketika kondisi terdapat beban aerodinamik dengan redaman mekanik yang didapatkan ketika kondisi tidak ada beban aerodinamik. Pengujian dilakukan dua tahap, yaitu 1) tahap pertama model uji dieksitasi ketika tidak ada aliran udara atau tare run, nilai redaman yang didapatkan merupakan redaman mekanik 2) tahap kedua, model diekstasi pada kecepatan aliran udara atau wind on run tertentu, nilai redaman yang didapat merupakan redaman total, yang terdiri dari redaman aerodinamik dan mekanik. Nilai redaman aerodinamik merupakan selisih redaman total yang didapat dari wind on run dengan redaman mekanik yang didapat dari tare run.

Parameter redaman menjadi sangat kritical pada pengujian aeroelastik di terowongan angin. Untuk itu dibutuhkan metode ekstraksi nilai redaman yang akurat dan ditulis pada bahasa pemrograman yang open source. Nilai redaman didapatkan dari ekstraksi respon dinamik sebuah sensor akselerometer. Respon dinamik yang dihasilkan pada pengujian merupakan sinyal transien. Pada pengujian aeroelastik, model uji diberikan sumber eksitasi impulsif, sehingga model akan bergetar bebas sampai kondisi stabil. Nilai redaman yang didapatkan merupakan parameter kestabilan untuk memprediksi batas kecepatan flutter. Nilai redaman juga merupakan parameter yang dibutuhkan pada metode kriteria kestabilan flutter margin dan flutter derivative. Pada makalah ini, Least Square Complex Exponential (LSCE) merupakan metoda yang digunakan dalam memprediksi parameter redaman. Data yang dianalisis merupakan sinyal impulsif yang disimulasikan melalui python dengan nilai parameter redaman dan frekuensi tertentu.

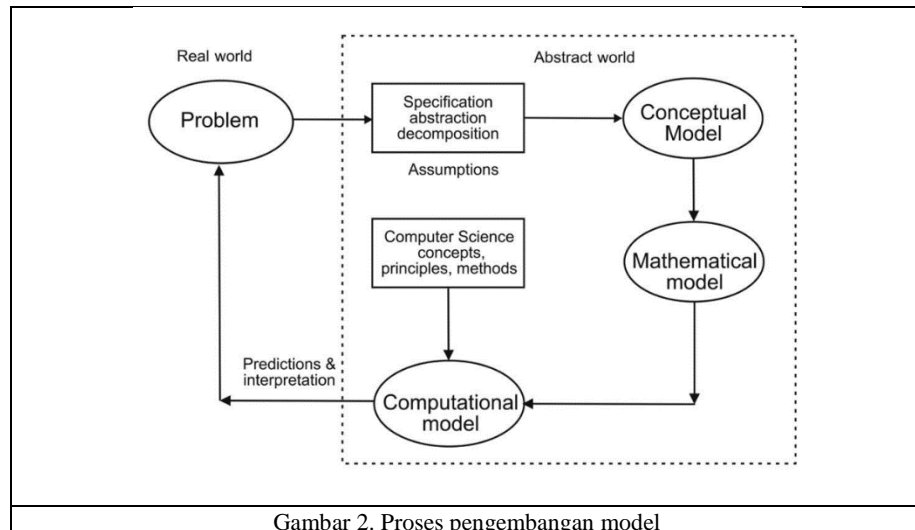
Python adalah bahasa pemrograman interpretatif multiguna. Tidak seperti bahasa lain yang susah untuk dibaca dan dipahami, python lebih menekankan pada keterbacaan kode agar lebih mudah untuk memahami sintaks. Hal ini membuat Python sangat mudah dipelajari baik untuk pemula maupun untuk yang sudah menguasai bahasa pemrograman lain. Python memiliki kemampuan untuk melakukan parallel distributed computing [3].

Python dikenal untuk kebutuhan sains dan teknologi. Salah satu penggunaannya adalah penerapan boundary element method [4]. Library pendukung utama untuk kebutuhan tersebut adalah NumPy. Pada tingkat atas, SciPy sama dengan NumPy. Kedua library tersebut membantu dalam membuat dan manipulasi data. Kedua library ini membantu dalam mempercepat komputasi melalui optimalisasi memory. Sebagai contohnya, apabila pengguna ingin melakukan proses looping pada multidimensional array dalam jumlah besar maka proses looping akan berjalan cepat ketika pengguna menggunakan alokasi alamat memory pada masing-masing elemen array tadi. Mekanisme ini sudah ditangani oleh Numpy dan SciPy. Sebagai keuntungan tambahan, library ini sangat intuitif dan penjelasan yang mudah dipahami melalui manual atau dokumentasi [5].

Penerapan bahasa pemrograman Python memberikan solusi terhadap permasalahan sains yang dimodelkan kedalam persamaan matematika dikenal dengan sebutan computational model (Gambar 1). Pemodelan ini diterapkan kedalam berbagai bidang sains dan teknologi untuk memecahkan permasalahan yang lebih rumit dan luas. Pengembangan model komputasi melibatkan penelaahan permasalahan, penurunan persamaan model matematika, penerapan solusi, dan validasi model melalui penerapan konsep, prinsip, dan metoda sains komputer beserta High Performance Computing (HPC) [6]. Proses pengembangan model komputasi (Gambar 2) terdiri dari urutan kegiatan mulai dari definisi tujuan pemodelan matematis hingga proses perulangan (iterasi). Pemodelan matematis merupakan penyederhanaan dari aktual sehingga mengurangi tingkat keakuratan.



Gambar 1. Tingkatan abstrak dan proses pemodelan



Gambar 2. Proses pengembangan model

II. DASAR TEORI

Gambar 3, menyatakan diagram alir penelitian ini. Pada tahap pertama, mensimulasikan data respon dinamik. Data respon dinamik merupakan sinyal transien, dengan nilai parameter redaman dan frekuensi yang telah ditentukan. Sinyal yang disimulasikan merupakan multi mode atau terdiri dari lebih dari satu modus getaran. Ini merepresentasikan data respon dinamik yang dihasilkan dari pengujian. Selanjutnya, parameter redaman dilakukan pada data uji atau simulasi. Ekstraksi dilakukan dengan metode, Least Square Complex Exponential (LSCE). Pada tahap akhir, data parameter yang dihasilkan akan dievaluasi keakuratannya.



Gambar 3. Diagram alir penelitian

Data respon dinamik yang disimulasikan adalah sinyal impuls multi *degree of freedom* (DOF) atau multi derajat kebebasan. Untuk sinyal impuls teredam *single degree of freedom* (SDOF) dinyatakan dengan persamaan berikut [7]:

$$x(t) = Ae^{-\xi\omega_n t} \sin(\omega_n (\sqrt{1-\xi^2}) * t) \quad (1)$$

Dengan ω_n adalah frekuensi natural (rad/s) dan ξ adalah rasio redaman. Nilai frekuensi teredam ω_d (rad/s), redaman kritis c_c , dan koefisien redaman c didapatkan dengan persamaan berikut [8]:

$$\begin{aligned} \xi &= c / c_c \\ \omega_d &= \omega_n * (\sqrt{1-\xi^2}) \end{aligned} \quad (2)$$

Dengan nilai $\omega_d = 2\pi f_d$ dan $\omega_n = 2\pi f_n$. Nilai f_n dan f_d masing-masing merupakan frekuensi natural dan frekuensi teredam dalam Hz.

A. Metoda *Least Square Complex Exponential* (LSCE)

Pengukuran respon data getaran digunakan untuk memperoleh modal parameter melalui model matematika [9]. Berdasarkan referensi [7], respon getaran dapat dimodelkan dalam persamaan berikut:

$$h(t) = \sum_{r=1}^{2N} A_r e^{s_r t} \quad (3)$$

Dengan $S_r = -\omega_n \xi_r + i\omega_d$ dan $h(t)$ respon getaran dengan interval waktu Δt . Persamaan (3) dikalikan kedua ruas dengan β_0 hingga β_L dan modifikasi persamaan menghasilkan model matematika baru:

$$\sum_{j=0}^L \beta_j h_j = \sum_{r=1}^{2N} \left(A_r' \sum_{j=0}^L \beta_j V_r^j \right) \quad (4)$$

Dengan $V_r = e^{S_r \Delta t}$, ruas kanan persamaan (4) merupakan bentuk polynomial dan memiliki solusi:

$$\sum_{j=0}^L \beta_j h_j = 0 \quad (5)$$

Vektor β dapat dihitung melalui teknik *pseudo-inverse* berikut:

$$\{\beta\} = ([h]^T [h])^{-1} ([h]^T [h']) \quad (6)$$

Dengan demikian, akar persamaan V_r dapat ditentukan:

$$R_r = \ln(\beta) / \Delta t \quad (7)$$

$$f_n = \frac{|R_r|}{2\pi} \quad (8)$$

$$\xi_r = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\text{Im}(R_r)}{\text{Re}(R_r)} \right)^2}} \quad (9)$$

B. Penerapan Metoda LSCE dalam Bahasa Python

Untuk memodelkan respon getaran dari persamaan (3) dengan python dapat dilakukan melalui normalisasi nilai sinyal getaran maksimum, manipulasi matriks, serta membuat matriks *Hankel* dari persamaan (5) dan (6) untuk menentukan nilai β , dapat dilakukan melalui metoda *least square* dalam python. Solusi dari β dapat digunakan untuk menentukan nilai frekuensi dan redaman diawali dari persamaan (7)

```
# Perform the least square to get the multiplier B
lsq = lstsq(H, Ho)[0]
flip = np.flipud(lsq)
B = np.insert(flip, 0, np.array(1))

root = np.roots(B)
S = np.log(root) / c

freqf = np.imag(S) / 2 / np.pi
dampf = np.real(S)
```

$$M = np.amax(np.absolute(yH))$$

Normalizing

$$h = np.transpose(np.matrix(yH / M))$$

Construct the HANKEL matrix

$$xlsce = h[:h.size-Moda]$$

$$ylsce = h[h.size-Moda-1:h.size-1]$$

$$H = hankel(xlsce, ylsce)$$

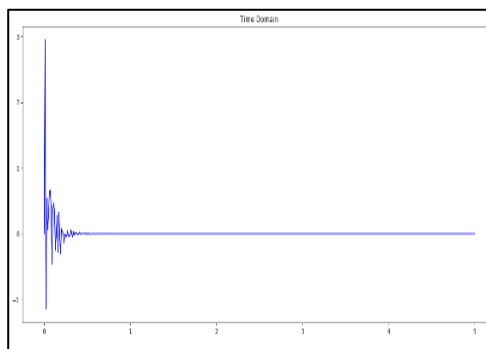
$$Ho = -h[Moda:h.size]$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

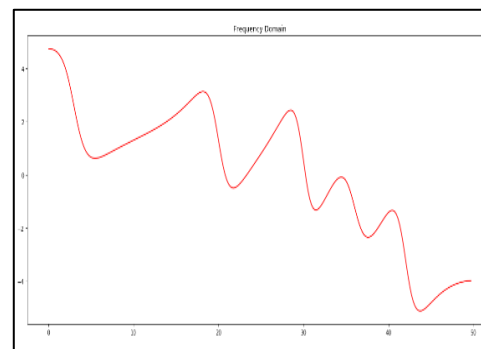
Sinyal yang disimulasikan merupakan representasi dari respon dinamik 5 derajat kebebasan atau memiliki nilai $N=5$ yang dinyatakan dalam persamaan (1). Pada **Gambar 4**, merupakan bentuk sinyal respon dinamik yang disimulasikan. Data yang disimulasikan terdiri dari 2 sinyal, sinyal pertama merupakan sinyal dengan redaman lebih tinggi dan sinyal kedua menggunakan redaman yang lebih rendah.

Tabel 1. Parameter simulasi sinyal response redaman tinggi

Sinyal I	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5
f	20	30	36	42	48
c (%)	12.4	11	14.1	11.6	14.4



(a)



(b)

Gambar 4 Grafik sinyal respon rasio redaman tinggi dalam domain waktu (a) dan frekuensi (b)

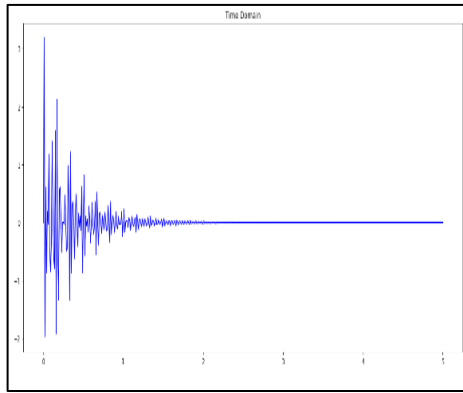
Dengan menggunakan bahasa pemrograman yang berbeda, hasil ekstraksi rasio redaman dan frekuensi teredam pada sinyal dengan rasio redaman tinggi (Sinyal I) ditampilkan Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan nilai frekuensi dan rasio redaman Sinyal I

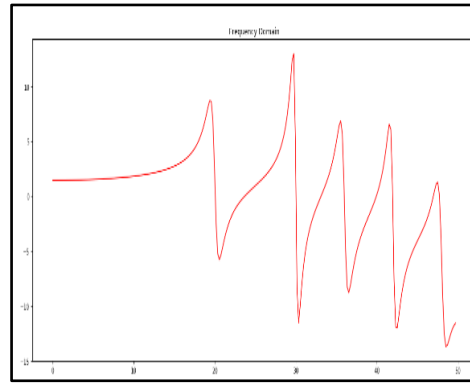
No	Data Simulasi		LSCE (Python)		LSCE (Matlab)	
	fd (Hz)	Rasio Redaman (%)	fd (Hz)	Rasio Redaman (%)	fd (Hz)	Rasio Redaman (%)
1	20	12.4	20.0	12.4	20.0	12.4
2	30	11.0	30.0	11.0	30.0	11.0
3	36	14.1	36.0	14.1	36.0	14.1
4	42	11.6	42.0	11.6	42.0	11.6
5	48	14.4	48.0	14.4	48.0	14.4

Tabel 3. Parameter simulasi sinyal response redaman rendah

Sinyal II	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5
f	20	30	36	42	48
c (%)	3.4	2	3.1	2.6	3.4



(a)



(b)

Gambar 5. Grafik sinyal respon rasio redaman rendah dalam domain waktu (a) dan frekuensi (b)

Dengan menggunakan bahasa pemrograman yang berbeda, hasil ekstraksi rasio redaman dan frekuensi teredam pada sinyal dengan rasio redaman rendah (Sinyal II) ditampilkan Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan nilai frekuensi dan rasio redaman Sinyal II

No	Data Simulasi		LSCE (Python)		LSCE (Matlab)	
	fd (Hz)	Rasio Redaman (%)	fd (Hz)	Rasio Redaman (%)	fd (Hz)	Rasio Redaman (%)
1	20	3.4	20.0	3.4	20.0	3.4
2	30	2.0	30.0	2.0	30.0	2.0
3	36	3.1	36.0	3.1	36.0	3.1
4	42	2.6	42.0	2.6	42.0	2.6
5	48	3.4	48.0	3.4	48.0	3.4

Secara umum, hasil ekstraksi frekuensi teredam dan redaman dengan metoda LSCE memiliki nilai sama. Dengan demikian, bahasa pemrograman *open source* seperti python juga memiliki kemampuan untuk komputasi dengan keakuratan yang sama dengan Matlab.

IV. KESIMPULAN

Redaman menjadi parameter yang kritical pada pengujian aeroelastik di terowongan angin. Untuk itu dibutuhkan metode ekstraksi nilai redaman yang akurat. Nilai redaman didapatkan dari ekstraksi respon dinamik sebuah struktur yang diuji. Data respon dinamik merupakan sinyal transien, dengan nilai parameter redaman dan frekuensi yang ditentukan. Sinyal yang disimulasikan merupakan multimode atau terdiri dari lebih dari satu modus getar. Hal itu, untuk merepresentasikan data respon dinamik yang dihasilkan dari pengujian. Sinyal yang diuji merupakan respon dinamik terdiri dari 5 derajat kebebasan. Ekstraksi dilakukan dengan menggunakan metode Least Square Complex Exponential (LSCE). Nilai parameter redaman yang diekstraksi menggunakan metode LSCE menghasilkan nilai yang sama dengan nilai aktual atau nilai redaman yang disimulasikan. Dengan bahasa pemrograman python (*open source*) tetap memberikan hasil dan keakuratan yang sama dengan bahasa pemrograman lainnya seperti Matlab. Oleh karena itu, Python dapat dijadikan alternatif bahasa pemrograman *open source* pada pemrosesan data dinamik pengujian terowongan angin

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. He and Z.-F. Fu, Modal Analysis, Butterworth Heinemann, 2001.
- [2] R. Bisplinghoff, H. Ashley and L. R. Halfman, Aeroelasticity, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1995.

-
- [3] L. D. Dalcin, R. R. Paz, P. A. Kler and A. Cosimo, "Parallel distributed computing using Python," *Advances in Water Resources*, vol. 34, p. 1124–1139, 2011.
 - [4] C. D. Cooper and L. A. Barba, "Efficient boundary element method on Python using GPUs," *World Congress on Computational Mechanics (WCCM)*, pp. 8-13, 2012.
 - [5] S. J. Rojas G., E. A. Christensen and F. J. Blanco-Silva, *Learning SciPy for Numerical and Scientific Computing*, Birmingham: Packt Publishing Ltd., 2015.
 - [6] J. M. Garrido, *INTRODUCTION TO Computational Models with Python*, Georgia: CRC Press, 2016.
 - [7] J.-Y. Wu, "Thesis Extracting Damping Ratios Using Wavelets," Massachusetts, 2001.
 - [8] A. M. Iglesias, "Thesis Investigating Various Modal Analysis Extraction Techniques to Estimate Damping Ratio," Virginia, 2000.
 - [9] A. G. Piersol and T. L. Paez, *HARRIS'SHOCK AND VIBRATION HANDBOOK*, New York: McGRAW-HILL, 2010.