

PERBANDINGAN METODA EKSTRAKSI PARAMETER REDAMAN DARI SINYAL RESPON DINAMIK

COMPARISON METHOD OF DAMPING PARAMETER EXTRACTION DYNAMIC RESPONSE SIGNALS

Arizal Akbar Zikri, Angga Dwi Saputra
BBTA3 - BPPT
arizal.akbar@bppt.go.id

Abstrak

Pada pengujian aeroelastik pada uji terbang atau terowongan angin, parameter redaman merupakan sesuatu 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 sebuah sensor akselerometer. Metode ekstraksi yang dibandingkan, yaitu *Ibrahim Time Domain (ITD)*, *Least Square Complex Exponential (LSCE)*, dan *autoregressive moving-average (ARMA)*. Data yang dianalisa, merupakan sinyal impulsif yang disimulasikan dengan nilai parameter redaman dan frekuensi tertentu. Nilai ekstraksi parameter redaman yang didapatkan dari berbagai metode dibandingkan nilai parameter redaman yang sebenarnya. Berdasarkan hasil ekstraksi sinyal uji, metode LSCE dan ARMA memiliki performa yang lebih baik dibanding ITD dengan galat sebesar 3%.
Kata kunci: redaman, fleksibel, struktur, aeroelastik, ekstraksi

Abstract

In the aeroelastic test on flight test or wind tunnel, damping parameter is a critical to determine boundary flutter speed. Therefore, We need accurate and effective methods to extract damping parameter. Damping parameter were gathered by extraction dynamic response signals of accelerometers sensor. The comparable extraction methods are Ibrahim Time Domain (ITD), Least Square Complex Exponential (LSCE), and autoregressive moving-average (ARMA). Analyzed signals was a impulse signal which is simulated in certain damping and frequency value. Result of extraction were compared with the actual damping value. Based on the result of extraction, LSCE and ARMA have better performance than ITD with error 3%.

Keywords: damping, flexible, structure, aeroelastic, extraction

1. PENDAHULUAN

Redaman atau *damping* adalah 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 yang cenderung fleksibel. Pada sayap pesawat, bangunan tinggi, dan jembatan bentang panjang harus tahan terhadap osilasi yang disebabkan oleh interaksi antara aliran udara dan struktur. 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 berasal dari interaksi molekuler yang kompleks dalam sebuah material. Oleh karena itu nilai redaman material tergantung dari jenis material, metode dan proses manufaktur. Mekanisme *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

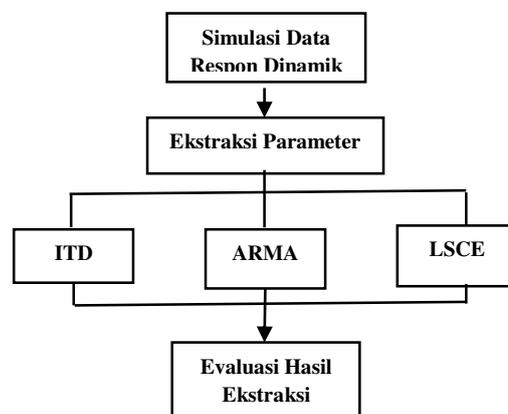
aerodinamik atau hidrodinamik terjadi pada struktur yang bergetar dalam udara atau air. Secara umum, redaman aerodinamik jauh lebih kecil dibanding dengan redaman mekanik. Pada redaman hidrodinamik cenderung besar, terutama pada bangunan diatas laut [3].

Redaman merupakan parameter kestabilan yang digunakan untuk menentukan batas kecepatan *flutter*. *Flutter* menghasilkan osilasi yang tidak stabil dan sering menghasilkan kerusakan pada struktur pesawat. 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 dieksitasi 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* [5].

Parameter redaman menjadi sangat kritikal pada pengujian aeroelastik di terowongan angin. Untuk itu dibutuhkan metode ekstraksi nilai redaman yang akurat. Nilai redaman didapatkan dari ekstraksi respon dinamik sebuah sensor akselerometer. Respon dinamik yang dihasilkan pada pengujian merupakan sinyal impulsif. Pada pengujian aeroelastik, model uji diberikan sumber eksitasi impulsif, ketika eksitasi tidak ada maka 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 membandingkan metode ekstraksi parameter redaman pada data respon dinamik. Metode ekstraksi yang akan dievaluasi, yaitu *Ibrahim Time Domain (ITD)*, *Least Square Complex Exponential (LSCE)*, dan *autoregressive moving-average (ARMA)*. Data yang dianalisa, merupakan sinyal impulsif yang disimulasikan dengan nilai parameter redaman dan frekuensi tertentu. Nilai ekstraksi parameter redaman yang didapatkan dari berbagai metode akan dibandingkan nilai PA redaman yang sebenarnya. Tujuan dari penelitian ini, mendapatkan metode ekstraksi parameter redaman yang akurat untuk pengujian aeroelastik di terowongan angin.

2. METODOLOGI

Gambar 1 menyatakan diagram alir penelitian ini. Pada tahap pertama, mensimulasikan data respon dinamik. Data respon dinamik merupakan sinyal impuls, dengan nilai parameter redaman dan frekuensi yang ditentukan. Sinyal yang disimulasikan merupakan multimode atau terdiri dari lebih dari satu sinyal. Ini merepresentasikan data respon dinamik yang dihasilkan dari pengujian. Selanjutnya, parameter redaman dilakukan pada data uji atau simulasi. Ekstraksi dilakukan dengan tiga metode, yaitu *Ibrahim Time Domain (ITD)*, *Least Square Complex Exponential (LSCE)*, dan *autoregressive moving-average (ARMA)*. Pada tahap akhir, data parameter yang dihasilkan akan dievaluasi keakuratannya.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Data respon dinamik yang simulasikan 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 [6]:

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

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 [7]:

$$\xi = c / c_c \quad (2)$$

$$\omega_d = \omega_n \left(\sqrt{1-\xi^2}\right)$$

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 Hz.

2.1. Metode Least Square Complex Exponential (LSCE)

Pengukuran respon data getaran digunakan untuk memperoleh modal parameter melalui model matematika [8]. Berdasarkan referensi [6], 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 $V_r = e^{S_r \Delta t}$, sisi kanan persamaan (4) merupakan bentuk polinomial 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:

$$R_r = \ln(V_r) = S_r \Delta t \quad (7)$$

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

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

2.2. Metode Ibrahim Time Domain (ITD)

Berdasarkan referensi [6], metode ini menggunakan sinyal respon bebas pada struktur selama pengujian. Respon untuk N derajat kebebasan pada titik i dan waktu t dapat dimodelkan dalam bentuk respon pada persamaan (3). Manipulasi sinyal respon ini digunakan untuk mencari *eigenvalue* dan *eigenvector* melalui pengelompokan matriks berikut ini:

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_{m-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P \\ P\hat{\Lambda} \\ P\hat{\Lambda}^2 \\ \vdots \\ P\hat{\Lambda}^{m-1} \end{bmatrix} \Lambda \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} [\Phi] \\ m \times L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\psi] \\ m \times L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Lambda] \\ L \times L \end{bmatrix} \quad (11)$$

Substitusi persamaan (10) dengan (11), untuk eliminasi $[\Lambda]$:

$$\begin{aligned} [\hat{\Phi}] &= [\hat{\psi}] [\psi]^{-1} [\Phi] \\ [A_s] &= [\hat{\psi}] [\psi]^{-1} \end{aligned} \quad (12)$$

Solusi dari $[A_s]$ dapat dilakukan melalui teknik *pseudo-inverse*. Teknik ini menghasilkan dua model persamaan (pergeseran positif dan negatif [9]) dan dikombinasikan (dikenal dengan istilah *Double Least-Squares* (DLS)) agar memperoleh prediksi faktor redaman yang lebih baik:

$$[A_s] = \frac{1}{2} \left[([\hat{\Phi}][\hat{\Phi}]^T) ([\Phi][\hat{\Phi}]^T)^{-1} + ([\hat{\Phi}][\Phi]^T) ([\Phi][\Phi]^T)^{-1} \right] \quad (13)$$

$$[A_s][\psi] = [\psi][\hat{\Lambda}]$$

$$[A_s][\psi] = [\psi]e^{s_r \Delta t} \quad (14)$$

Persamaan diatas merupakan permasalahan *eigenvalue*. Pemecahan permasalahan ini memberikan solusi perhitungan *modal parameter* yang dapat dihitung menggunakan persamaan (8) dan (9).

2.3. Metode Autoregressive Moving-Average (ARMA)

Data pengukuran harus melalui *filter* pada frekuensi tertentu, sehingga data merupakan respon dari modus *coupling mode*. Data pengukuran dinyatakan dalam model ARMA sebagai berikut [4]:

$$y_t + \alpha_1 y_{t-1} + \alpha_2 y_{t-2} + \alpha_3 y_{t-3} + \alpha_4 y_{t-4} = e_t + \gamma_1 e_{t-1} + \gamma_2 e_{t-2} + \gamma_{t-m} e_{t-m} \quad (15)$$

Dimana y_t adalah data yang diobservasi pada saat t , dan e_t merupakan *white noise*. Orde m pada sisi kanan persamaan (15) dihitung dengan metode *Akaike Information Criteria* (AIC). Pada sisi kiri persamaan (15) sesuai dengan persamaan karakteristik sistem berikut [4]:

$$G(z) = z^4 + \alpha_1 z^3 + \alpha_2 z^2 + \alpha_3 z + \alpha_4 = \prod_{i=1}^2 (z - z_i)(z - z_i^*) \quad (16)$$

Dimana z_i adalah akar karakteristik. Nilai redaman dapat dicari dengan menggunakan akar-akar z_i , dimana nilai z merupakan akar karakteristik domain waktu diskrit, dapat ditransformasikan menjadi [17]:

$$z_i = \exp(\lambda_i T) \quad (17)$$

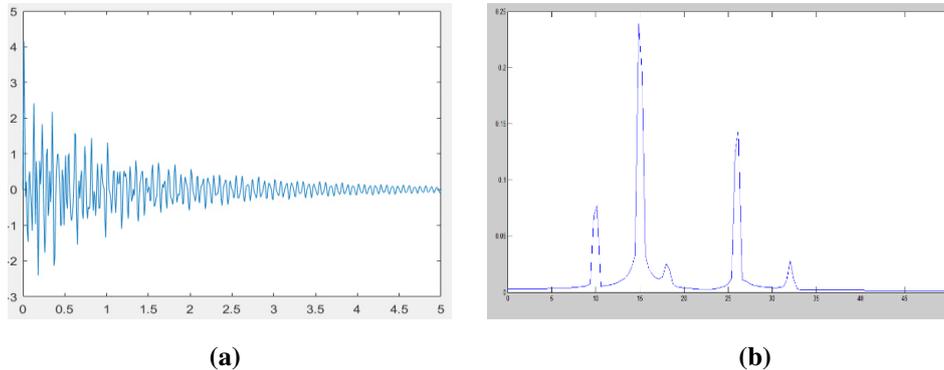
Nilai λ_i merupakan akar-akar karakteristik dari dua modus dinamik dan T merupakan interval pengambilan data atau *sampling time*, sehingga rasio modus redaman dari setiap modus getar dinyatakan dalam persamaan:

$$\xi_r = -(\ln|z_i| / |\ln z_i|) \quad (18)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sinyal yang disimulasikan terdiri merupakan representasi dari respon dinamik 5 derajat kebebasan atau memiliki nilai $N=5$ yang dinyatakan dalam persamaan (5). Pada Gambar 2, merupakan bentuk

sinyal respon dinamik yang disimulasikan. Data yang kita simulasikan terdiri dari 2 sinyal, sinyal pertama merupakan sinyal dengan redaman lebih tinggi dan sinyal kedua menggunakan redaman yang lebih rendah.



Gambar 2. Grafik sinyal respon rasio redaman rendah (a) Domain waktu (b) Frekuensi

Dengan menggunakan metode yang berbeda, hasil ekstraksi rasio redaman dan frekuensi teredam pada sinyal dengan rasio redaman tinggi (Sinyal I) ditampilkan Tabel 1. Adapun hasil dari masing-masing metode sebagai berikut:

Tabel 1. Perbandingan nilai frekuensi dan rasio redaman Sinyal I

No	Data Simulasi		LSCE			ARMA			ITD		
	fd (Hz)	Rasio Redaman	fd (Hz)	Rasio Redaman	Error Rasio Redaman (%)	fd (Hz)	Rasio Redaman	Error Rasio Redaman (%)	fd (Hz)	Rasio Redaman	Error Rasio Redaman (%)
1	10	0,01910	10	0,01909	0,08330	10	0,01909	0,08330	10,005	0,02123	11,106
2	15	0,00531	15	0,00531	0,00000	15	0,00530	0,19999	15,003	0,00592	11,577
3	18	0,01857	18	0,01857	0,04760	18	0,01857	0,04760	18,006	0,02092	12,624
4	26	0,00490	26	0,00489	0,12500	26	0,00489	0,12500	26,003	0,00557	13,736
5	32	0,01095	32	0,01095	0,00000	32	0,01095	0,00000	32,002	0,01258	14,900

Secara umum, hasil ekstraksi frekuensi teredam fd dan rasio redaman ξ dari masing-masing metode mendekati nilai sebenarnya. Berdasarkan hasil ekstraksi, metode ARMA dan LSCE memberikan hasil yang dengan tingkat keakuratan yang hampir sama. Metode ITD memberikan tingkat keakuratan yang paling rendah. Hal ini ditunjukkan pada nilai eror yang cukup signifikan dibanding metode yang lain. Metode LSCE memiliki tingkat keakuratan yang paling baik dibanding metode yang lain.

Tabel 2. Rancangan lain untuk nilai frekuensi dan redaman Sinyal II

No	Data Simulasi		LSCE			ARMA			ITD		
	fd (Hz)	Rasio Redaman	fd (Hz)	Rasio Redaman	Error Rasio Redaman (%)	fd (Hz)	Rasio Redaman	Error Rasio Redaman (%)	fd (Hz)	Rasio Redaman	Error Rasio Redaman (%)
1	16	0,00199	16	0,00199	0,00000	16	0,00199	0,00000	16	0,0020557	3,331
2	19	0,00084	19	0,00084	0,00000	19	0,00084	0,00000	19	0,0008769	4,687
3	26	0,00490	26	0,00490	0,00000	26	0,00490	0,00000	26	0,0050516	3,156
4	32	0,00099	32	0,00099	0,00000	32	0,00099	0,00000	32	0,0010271	3,259
5	42	0,00038	42	0,00038	0,00000	42	0,00038	0,00000	42	0,0003934	3,809

Hasil ekstraksi sinyal II dengan rasio redaman yang lebih rendah ditampilkan pada Tabel 2. Nilai keakuratan dari masing-masing metode cenderung lebih baik jika dibanding pada sinyal dengan rasio redaman yang lebih tinggi. Metode LSCE dan ARMA memberikan hasil ekstraksi yang sangat memuaskan karena memiliki nilai *error* yang sangat kecil. Untuk metode ITD secara umum memiliki nilai eror dibawah 5% untuk ekstraksi pada sinyal II. Berdasarkan hasil ekstraksi rasio redaman pada kedua sinyal, metode LSCE dan ARMA memberikan hasil yang lebih baik dibanding dengan ITD

4. KESIMPULAN

Parameter redaman menjadi sangat kritis pada pengujian aeroelastik di terowongan angin. Untuk itu dibutuhkan metode ekstraksi nilai redaman yang akurat. Nilai redaman didapatkan dari ekstraksi respon dinamik sebuah sensor akselerometer. Data respon dinamik merupakan sinyal impuls, dengan nilai parameter redaman dan frekuensi yang ditentukan. Sinyal yang disimulasikan merupakan *multimode* atau terdiri dari lebih dari satu sinyal. 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 yaitu *Ibrahim Time Domain (ITD)*, *Least Square Complex Exponential (LSCE)*, dan *autoregressive moving-average (ARMA)*. Nilai parameter rasio redaman yang dihasilkan dari ketiga metode memiliki nilai yang hampir sama dengan nilai aktual. Berdasarkan nilai eror dari setiap metode, LSCE dan ARMA memberikan performa yang lebih baik dari ITD.

UCAPAN TERIMA KASIH

kepada Ka. BBTA3 dan staf BBTA3-BPPT. Saya ucapkan terima kasih atas kerja samanya dalam *sharing knowledge* sehingga terlaksana dengan baik.

PERNYATAAN PENULIS

Penulis dengan ini menyatakan bahwa seluruh isi menjadi tanggung jawab penulis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J.-Y. Wu. "Thesis Extracting Damping Ratios Using Wavelets." Massachusetts. 2001.
- [2] R. Bisplinghoff. H. Ashley and L. R. Halfman. *Aeroelasticity*. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company. 1995.
- [3] A. Kareem and K. Gurley. "Damping in Structures: its evaluation and treatment of uncertainty." *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. vol. 59. pp. 131-157. 1996.
- [4] H. Torii . "THE EXTENSION OF DISCRETE-TIME *FLUTTER* MARGIN." in *INTERNATIONAL CONGRESS OF THE AERONAUTICAL SCIENCES* . 2012.
- [5] M. Samardžić . J. Isaković . M. Miloš . Z. Anastasijević and D. B. Nauparac . "Measurement of the Direct Damping Derivative in Roll of the Two Calibration Missile Models." vol. 41. no. 3. p. 194. 2013.
- [6] A. M. Iglesias. "Thesis Investigating Various Modal Analysis Extraction Techniques to Estimate Damping Ratio." Virginia. 2000.
- [7] A. G. Piersol and T. L. Paez. *HARRIS'SHOCK AND VIBRATION HANDBOOK*. New York: McGRAW-HILL. 2010.
- [8] J. He and Z.-F. Fu. *Modal Analysis*. Butterworth Heinemann. 2001.
- [9] L. Gunawan. H. Hafizh and H. Muhammad. "MEASUREMENTS OF *FLUTTER* DERIVATIVES OF A BRIDGE DECK SECTIONAL MODEL." *KONES*. vol. 20. no. 4. pp. 107-116 . 2015.
- [10] T. Hiroshi and Y. Matsuzaki. "*Flutter* Margin Evaluation for Discrete-Time Systems." *Journal of Aircraft*. vol. 38. no. 1. 2001.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP PENULIS

DATA UMUM

Nama Lengkap : Arizal Akbar Zikri
Tempat & Tgl. Lahir : Dumai, 12 April 1986
Jenis Kelamin : Laki-Laki
Instansi Pekerjaan : BBTA3 BPPT
NIP. / NIM. : 198604122009011003



DATA PENDIDIKAN

SLTA : SMAN 1 Bengkalis Tahun: 2001-2003
STRATA 1 (S.1) : Teknik Penerbangan ITB Tahun: 2004-2008

ALAMAT

Alamat Kantor / Instansi : Kawasan Puspiptek GD.240, Setu, Tangsel
Telp. : 021-7560902
Email : arizal.akbar@bppt.go.id