

IDENTIFIKASI MODAL PARAMETER STRUKTUR

Geofrie Azarya Putra¹, Ediansjah²

^{1,2}Magister Teknik Struktur Institut Teknologi Bandung
azaryageoffrey@outlook.com

ABSTRAK

Identifikasi modal parameter sebuah struktur bisa didapatkan melalui dua tahapan yaitu, pengukuran di lapangan dan analisis data hasil pengukuran tersebut dengan menggunakan metode analisis modal. Metode analisis modal dikelompokkan menjadi dua yaitu, analisis modal pada frequency domain dan analisis modal pada time domain. Salah satu metode analisis modal pada time domain adalah *Eigensystem Realization Algotrihm* (ERA). Modal parameter struktur yang dapat dicari adalah frekuensi alami, faktor redaman dan mode shape. Penelitian ini akan mengidentifikasi parameter modal struktur dari Jembatan Siti Nurbaya, Padang. Proses identifikasi menggunakan data pengukuran jembatan Siti Nurbaya yang kemudian dicari free response-nya dengan Random Decrement Technique (RDT) lalu dicari modal parameter-nya menggunakan ERA. Metode ERA pada penelitian ini menggunakan Single Input Single Output (SISO). Validasi dari metode RDT-ERA dilakukan dengan mengidentifikasi modal parameter yang berupa frekuensi alami dari benda uji yang berupa pelat tipis kantilever di laboratorium yang kemudian dibandingkan dengan hasil analisis modal dengan Metode Elemen Hingga dan *Fast Fourier Transform* (FFT). Validasi metode RDT-ERA di laboratorium menghasilkan error di bawah 1% untuk nilai frekuensi alami sedangkan untuk mode shape didapatkan bentuk yang tidak sesuai dengan hasil *mode shape* pada MEH. Dengan demikian, pada Jembatan Siti Nurbaya digunakan metode RDT-ERA untuk mengidentifikasi frekuensi alami sedangkan untuk *mode shape* digunakan metode *Frequency Response*. Analisis data pengukuran jembatan Siti Nurbaya, baik itu frekuensi alami dengan RDT-ERA dan *mode shape* dengan *Frequency Response*, menghasilkan nilai yang tidak konsisten. Hal ini diduga akibat data pengukuran lapangan yang tidak dilakukan *filtering* terlebih dahulu.

Kata kunci: Analisis Modal, Frekuensi, Alami, Mode Shape, Sistem Identifikasi

1. PENDAHULUAN

Seiring perkembangan zaman serta teknologi, dunia konstruksi pun berkembang sangat pesat. Hal ini ditandai dengan munculnya struktur-struktur megah (mega structure) serta unik seperti jembatan, yang dapat dijadikan icon suatu kota atau negara. Tentu saja untuk jembatan-jembatan tersebut, biaya dan waktu yang dibutuhkan tidaklah sedikit. Oleh karena itu, pemeliharaan harus dilakukan dengan baik agar jembatan tersebut dapat bertahan untuk generasi selanjutnya.

Terdapat berbagai jenis pemeliharaan yang dapat dilakukan untuk bangunan-bangunan struktur, baik itu pemeliharaan secara rutin-berkala dalam jangka pendek maupun jangka panjang. Salah satu contoh dari pemeliharaan rutin-berkala adalah *Structural Health Monitoring* (SHM).

SHM adalah topik yang ramai dibicarakan serta menarik banyak perhatian dari kalangan peneliti dalam beberapa dekade terakhir. Pengembangan teknik yang digunakan pada SHM pun berkembang sangat pesat. Berbagai jenis teknik yang digunakan pada SHM bergantung pada jenis monitoring yang akan dilakukan pada struktur tersebut. Pada struktur jembatan, SHM seringkali diterapkan dengan tujuan untuk melakukan kontrol serta mendeteksi kerusakan.

Metode untuk mendeteksi kerusakan struktur pada umumnya menggunakan parameter-parameter modal struktur sebagai data awal. Secara garis besar, dengan mengetahui parameter modal, kita dapat memperkirakan kondisi serta perilaku dinamik dari struktur tersebut. Contoh parameter modal yang bisa didapat adalah *damping ratios*, *frekuensi natural*, *mode shape*, faktor partisipasi modal.

Riset identifikasi parameter modal telah dilakukan sejak lama oleh berbagai bidang keilmuan lain seperti teknik penerbangan, teknik mesin serta teknik sipil. Berbagai teknik atau metode telah banyak dikembangkan, baik itu metode identifikasi modal pada frekuensi domain atau metode identifikasi modal pada time domain. Identifikasi modal pada time domain memiliki keuntungan diantaranya adalah kita tidak perlu mengetahui besar beban yang bekerja pada struktur tersebut untuk mendapatkan parameter modalnya.

Untuk mendapatkan parameter modal struktur, kita perlu melakukan pengukuran (monitoring) pada time domain yang kemudian diolah menjadi data free responsee. Data inilah yang kemudian diolah lebih lanjut dengan metode-metode analisis modal pada time domain seperti Ibrahim Time Domain (ITD), *Least Square Time Domain Method*, *ARMA Time Series*, *Eigensystem Realization Algorithm*, dan masih banyak lagi.

SISTEM IDENTIFIKASI

Analisis modal adalah proses identifikasi modal parameter dari sebuah struktur dalam bentuk frekuensi natural, damping ratio, dan mode shape dari data pengukuran getaran (Jimin He, 2001). Data pengukuran dapat disajikan dalam bentuk *frequency response function* atau *impulse response*, maka dari itu analisis modal dikelompokkan menjadi dua kategori yaitu metode analisis pada *frequency domain* dan metode analisis pada *time domain*.

Time Domain

Metode *time domain* adalah kategori lain dari metode analisis modal selain *frequency domain*. Pada *frequency domain* berhubungan dengan pengukuran data *Frequency Response Function* (FRF) sedangkan untuk time domain menggunakan data respons waktu atau *Impulse Response Function* (IRF).

Data FRF merupakan hasil transformasi dari pengukuran respon time history menjadi data pada domain frekuensi. Data FRF langsung diukur dari respon transducer yang berupa data akselerasi dan gaya luar. Dari teori analisis spektral, kita tahu bahwa FRF dan IRF adalah pasangan dari Fourier Transform. Dengan demikian, jika kita dapat menentukan informasi impulse response dari sebuah data pengukuran baik berupa time response atau FRF, kita dapat menentukan modal parameter dari data tersebut.

Modal analisis pada time domain memiliki beberapa keuntungan (Jimin He, 2001). Pada time domain, pengukuran tidak bergantung pada beban luar namun cukup hanya berupa eksitasi lingkungan (ambient excitation). Hal ini menjadi keuntungan tersendiri, karena pada frequency domain kita perlu mengetahui beban luar yang bekerja untuk mendapatkan data FRF. Sebagai contoh, pada struktur jembatan getaran yang bekerja pada jembatan dapat diukur menggunakan lalu lintas kendaraan sebagai eksitasi.

Metode analisis modal pada time domain cukup beragam, diantaranya adalah Ibrahim Time Domain (ITD), *Least Square Time Domain Method*, *ARMA Time Series*, *Eigensystem Realization Algorithm*, dan sebagainya. Pada penelitian ini dilakukan identifikasi parameter modal pada struktur jembatan dengan menggunakan metode *Eigensystem Realization Algorithm* (ERA) serta *Random Decrement Technique* (RDT). Data hasil dari pengukuran diolah dan dijadikan data *free vibration* dengan menggunakan RDT, kemudian dicari parameter modalnya dengan menggunakan ERA. Metode ERA yang digunakan adalah *Single Input Single Output* (SISO).

Random Decrement Technique

Metode RDT adalah metode untuk mendapatkan free responsee dari system dinamik sebuah struktur akibat pengaruh lingkungan (*Ambient Excitation*) pada waktu tertentu t_0 hingga $t_0 + t$ yang dapat dibagi menjadi tiga komponen:

1. Bagian deterministik dari step response akibat perpindahan awal pada waktu $t = t_0$.
2. Bagian deterministik dari impulse response function akibat kecepatan awal v_0 .
3. Bagian acak akibat random excitation yang dipasang pada struktur dalam rentang waktu t_0 hingga $t_0 + t$.

Prosedur RDT dimulai dengan pemilihan nilai respon awal dari segmen dengan rentang waktu tertentu yang sama dari (t hingga $t_0 + t$) data time histories yang diekstrak. Segmen ini kemudian dicari nilai rata-ratanya sehingga dapat mewakili respons yang dihasilkan.



Gambar 1 Diagram Alir RDT (Jimin He, 2001)

Eigensystem Realization Algorithm (ERA)

Eigensystem Realization Algorithm pertama kali dikembangkan oleh Juang dan Pappa pada tahun 1985 dan merupakan salah satu metode yang efektif untuk mengidentifikasi parameter modal pada sebuah struktur yang fleksibel. Algoritma metode ini menggunakan prinsip *minimum realization* untuk mendapatkan kondisi yang menggambarkan sistem tersebut.

Representasi dari *linear, time-invariant, discrete system* didefinisikan sebagai:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) &= Cx(k) + Du(k)\end{aligned}$$

Dimana A, B, C, dan D adalah matriks, dan x adalah vector pada saat k-th; u ($r \times 1$) dan y ($m \times 1$) adalah input dan output vector dari sistem.

Realization dari sebuah sistem didefinisikan sebagai matriks A, B, dan C yang menghasilkan respons dari sistem yang akan diidentifikasi. ERA adalah sebuah teknik yang digunakan untuk menentukan sistem matriks dari data getaran yang ada. ERA menggunakan Markov parameter untuk mengidentifikasi sistem tersebut [referensi].

2. METODOLOGI

Metode untuk mengidentifikasi parameter modal mencakup dua metode utama yaitu *Random Decrement Technique* (RDT) dan *Eigensystem Realization Algorithm* (ERA). Kedua metode ini akan dikaji terlebih dahulu pada sebuah struktur sederhana yang dibuat di laboratorium. Setelah dilakukan pengkajian serta validasi di laboratorium, metode RDT-ERA ini kemudian akan diimplementasikan pada data hasil pengukuran lapangan.

Uji Laboratorium

Studi eksperimental dilakukan dengan tujuan untuk me-validasi proses perhitungan modal parameter sebelum diaplikasikan terhadap struktur sebenarnya. Pada tahapan ini dibuat benda uji sederhana berupa pelat baja yang didesain berperilaku jepit-bebas. Pada pelat baja ini kemudian dipasang alat ukur pada beberapa titik lalu dibebani atau dicatat hasil pengukurannya yaitu berupa data *free response*. Pada penelitian ini akan dilakukan identifikasi parameter modal pada struktur jembatan dengan menggunakan metode analisis pada time domain yaitu Eigensystem Realization Algorithm (ERA) serta Random Decrement Technique (RDT). Data hasil dari pengukuran diolah dan dijadikan data *free response* dengan menggunakan RDT, kemudian dicari parameter modalnya dengan menggunakan ERA.

Uji di Lapangan

Jembatan yang dipilih untuk dilakukan pengukuran adalah jembatan Siti Nurbaya (Gambar 3) yang berlokasi di Padang, Sumatera Barat. Jembatan ini merupakan jembatan *box girder* dengan dua buah pier yang membagi jembatan ini menjadi tiga buah bentang. Bentang utama adalah bentang terpanjang yaitu 76 meter dan dua buah bentang lainnya dengan panjang +/- 50 meter. Gambar 4 menunjukkan tampak atas dan potongan memanjang jembatan Siti Nurbaya.



(a)

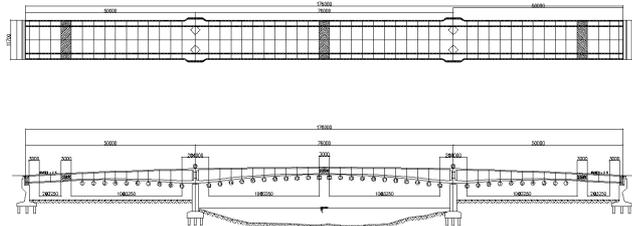


(b)

Gambar 2 (a) Konfigurasi 1 - Pemasangan *Accelerometer* - Benda Uji (b) Konfigurasi 2 - Pemasangan *Accelerometer* - Benda Uji

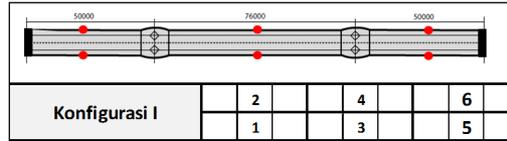


Gambar 3 Jembatan Siti Nurbaya, Padang

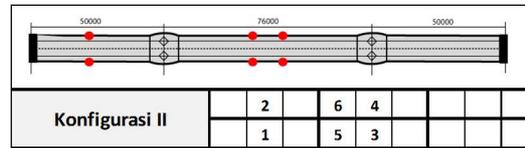


Gambar 4 Tampak Atas & Potongan Memanjang Jembatan Siti Nurbaya

Accelerometer dipasang pada titik-titik tertentu yang dapat mewakili jembatan secara keseluruhan sehingga hasilnya valid dan dapat digunakan untuk mencari parameter modal dari jembatan tersebut. Agar dapat dipelajari pengaruh dari penempatan *accelerometer* untuk pengukuran, posisi dari 6 buah *accelerometer* dibuat pada dua kombinasi yang berbeda (Gambar 5 dan Gambar 6).



Gambar 5 Kombinasi Denah I serta Nomor Accelerometer



Gambar 6 Kombinasi Denah II serta Nomor Accelerometer

Pada pengukuran ini digunakan beban impact atau beban kejut sebagai eksitasi tambahan. Beban kejut ini berupa sebuah truk bermuatan penuh yang kemudian melewati batang kayu dengan ukuran tertentu (Gambar 8). Hantaman roda pada saat jatuh setelah melewati batang kayu tersebut akan menimbulkan efek kejut pada jembatan yang kemudian dicatat hasilnya. Total berat truk beserta muatannya diperkirakan +/- 20 ton (Gambar 7).



Gambar 7 Truk Bermuatan +/- 20 ton



Gambar 8 Batang Kayu yang dilewati truk

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengukuran dari uji di laboratorium sudah berupa data *free response*. Hal ini dikarenakan set-up pengujian yang berupa benda uji dengan perletakan jepit-bebas yang dibebani pada ujungnya. Hasil pengukuran tersebut dikelompokan berdasarkan kombinasi posisi accelerometer. Hasil pengukuran kemudian diolah dengan menggunakan berbagai metode untuk dibandingkan nilai frekuensi alami yang didapat. Berikut adalah perbandingan nilai frekuensi alami yang dicari dengan metode teoritis, FFT, RDT-ERA dan MEH.

Tabel 1 Perbandingan Frekuensi Alami Denah 1

Kombinasi Denah 1								
Frekuensi pada saat Pengukuran	Theoretical	MEH	50	100	200	50	100	200
			Frekuensi Alami (FFT)			Frekuensi Alami (ERA)		
Acc-1	6.794	6.913	6.689	6.689	6.689	6.7123	6.6962	6.6679
Acc-2			6.689	6.689	6.689	6.7097	6.6979	6.6729
Acc-3			6.689	6.689	6.689	6.7089	6.6929	6.6699
Acc-4			6.689	6.689	6.689	6.6483	6.6763	6.6662
Acc-5			6.689	6.689	6.689	6.6908	6.6838	6.6655

Tabel 2 Perbandingan Frekuensi Alami Denah 2

Kombinasi Denah 2								
Frekuensi pada saat Pengukuran	Teoritical	MEH	50	100	200	50	100	200
No. Accelerometer			Frekuensi Alami (FFT)			Frekuensi Alami (ERA)		
Acc-1	6.794	6.913	6.445	6.445	6.445	6.4627	6.4664	6.4571
Acc-2			6.445	6.445	6.445	6.4461	6.4619	6.4543
Acc-3			6.445	6.445	6.445	6.7089	6.4424	6.485
Acc-4			6.445	6.494	6.494	6.4412	6.467	6.4707
Acc-5			6.445	6.445	6.445	6.456	6.4537	6.4612

Berdasarkan analisis data hasil pengukuran dilaboratorium dapat disimpulkan bahwa:

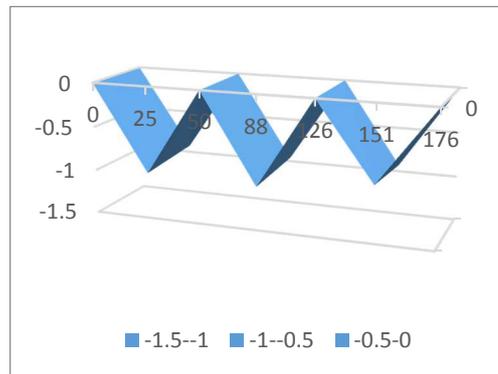
1. Data Pengukuran & Alat ukur sudah valid.
2. Metode RDT-ERA(SISO) valid untuk mendapatkan nilai frekuensi alami, namun tidak untuk mode shape.

Implementasi pada jembatan Siti Nurbaya, modal parameter struktur dicari dengan menggunakan RDT-ERA untuk mendapatkan nilai frekuensi alaminya, sedangkan untuk *mode shape* dicari menggunakan metode *Frequency Response*. Tabel dibawah ini menunjukkan salah satu hasil RDT-ERA. Dari keseluruhan hasil, dapat terlihat bahwa nilai frekuensi alami tidak konsisten.

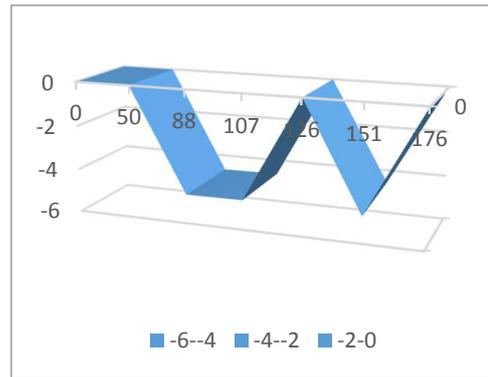
Tabel 3 Perbandingan Frekuensi Alami Jembatan

Kombinasi Denah II - 50 Hz			
No. Accelerometer	Pengujian	RDT-ERA	Error (%)
	ω (Hz)		
Acc-1	1.66	0.04	3630.70
Acc-2	1.64	1.59	2.99
Acc-3	1.66	1.64	1.19
Acc-4	1.66	1.63	1.95
Acc-5	1.66	0.04	4370.73
Acc-6	1.66	1.61	3.30

Agar didapatkan *mode shape* dengan menggunakan *Frequency Response*, perlu dibuat *loading function* dari muatan truk. *Frequency response function* untuk mencari mode shape didapatkan dengan cara membagi data pengukuran yang di telah di FFT dengan *loading function* yang telah di FFT juga. Dari nilai phase dari *frequency response function* inilah kita dapat mem-plot nilai tersebut menjadi bentuk dari *mode shape*. Gambar di bawah ini menunjukkan tipikal bentuk *mode shape* untuk masing-masing kombinasi.



Gambar 9 Tipikal Mode Shape Denah 1



Gambar 10 Tipikal Mode Shape Denah 1

4. KESIMPULAN

1. Validasi data hasil pengujian di laboratorium divalidasi dengan cara membandingkan nilai frekuensi alami data hasil pengukuran dengan metode FFT dengan nilai frekuensi alami yang didapat dengan Metode Elemen Hingga dan nilai frekuensi alami yang didapatkan dengan cara teoritis. Nilai frekuensi yang didapatkan dari keseluruhan metode tersebut, perbedaannya berkisar dibawah 5% Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa data hasil pengukuran di laboratorium adalah valid.
2. Validasi metode analisis modal dengan RDT-ERA dilakukan dengan membandingkan nilai frekuensi alami data hasil pengukuran di laboratorium dengan metode FFT, dengan nilai frekuensi alami data hasil pengukuran dengan metode RDT-ERA. Perbedaan yang didapat berkisar dibawah 1% .Dengan demikian dapat disimpulkan metode analisis modal RDT-ERA telah valid.
3. Metode Identifikasi ERA dengan sistem SISO, sudah akurat untuk mengidentifikasi nilai frekuensi alami dengan error dibawah 1%, namun untuk *mode shape* hasil yang didapat belum akurat jika dibandingkan dengan mode shape dari MEH.

DAFTAR PUSTAKA

- Caicedo, J.M. (2003). Structural Health Monitoring of Flexible Structures, Doctoral Dissertation, Washington University, USA.
- Computers and Structures. (2007). CSI Analysis Reference Manual SAP2000 v14.2.4 University Avenue Berkeley, California, USA.
- Widarda, D. R. dan Zulkifli, Ediansjah (2013). Penerapan Sistem Kontrol Struktur Pada Jembatan. 1st ed. Kementerian Pekerjaan Umum., Bandung.
- Zulkifli, Ediansjah (2008). Consistent Description of Radiation Damping in Transient Soil-Structure Interaction, Technische Universitat Dresden, Germany.
- Hadipratomo, W. (2005). Dasar - Dasar Metode Elemen Hingga. 1st ed. PT. Danamartha Sejahtera Utama., Bandung.
- He, Jimin. (2001). Modal Analysis. Butterworth Heinemann.
- Juang, J-N. (1993). Applied System Identification. Pearson Education.
- Juang, J.-N. and Pappa, R.S., "An Eigensystem Realization Algorithm for Modal Parameter Identification and Model Reduction." Journal of Guidance Control and Dynamics, Vol 8, pp. 620–627, 1985.
- Reto, Cantieni., (2010). "Traffic Excited Vibrations Acting on Pedestrians Using a Highway Bridge" Proceedings of the IMAC-XXVIII February, 2010.
- Siringoringo, D.M. and Fujino, Yozo (2008). "System Identification of suspension bridge from ambient vibration response" Engineering Structures 30 (2008) 463-447.