



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Unand.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Unand.

OPERATIONAL MODAL ANALYSIS UNTUK STRUKTUR YANG DIEKTASI ACAK

TESIS



**ADRIYAN
NIM.1120912003**

**PROGRAM STUDI
MAGISTER TEKNIK
MESIN FAKULTAS
TEKNIK, UNIVERSITAS
ANDALAS PADANG 2014**

SARI

Proses identifikasi memainkan peranan penting dalam masalah dinamika struktur. Melalui proses identifikasi, karakteristik dinamik atau parameter *modal* suatu struktur dapat ditentukan. Dalam penelitian ini telah dikembangkan sebuah paket program identifikasi (PPI) menggunakan *operational modal analysis* (OMA) atau proses identifikasi berdasarkan informasi data respons saja. Dengan menggunakan PPI yang dikembangkan, parameter *modal* struktur diekstraksi melalui penerapan metode Ibrahim *time domain* (ITD) dan *random decrement* (RD). Metode ITD digunakan untuk proses identifikasi berdasarkan respons getaran bebas struktur, sedangkan data respons getaran paksa struktur diidentifikasi dengan menggunakan metode gabungan RD dan ITD.

PPI dibangun dengan memanfaatkan bahasa pemrograman MATLAB. PPI ini dilengkapi dengan tampilan grafis untuk kemudahan dalam penggunaan. *Engineering Analysis Package* (EAPack) merupakan nama yang diberikan untuk PPI yang telah dibangun dan dikembangkan. Selanjutnya, PPI divalidasi untuk mengetahui unjuk kerja kedua metode identifikasi dalam menentukan parameter *modal* struktur berdasarkan data respons hasil simulasi numerik dan data eksperimen. Untuk itu, dua struktur uji skala laboratorium digunakan sebagai studi kasus dalam proses validasi PPI ini. Struktur uji pertama adalah balok gantung dengan tiga massa tambahan dan model bangunan dua lantai sebagai struktur uji kedua.

Identifikasi parameter *modal* berdasarkan respons getaran bebas hasil simulasi numerik memperlihatkan penyimpangan yang cukup kecil dibandingkan dengan parameter-parameter yang digunakan untuk penghitungan respons. Kondisi ini ditunjukkan oleh penyimpangan hasil identifikasi frekuensi pribadi lebih kecil dari 0.5% dan hasil identifikasi rasio redaman yang berada di bawah 1%. Sementara itu, hasil identifikasi berdasarkan data respons getaran bebas yang diperoleh melalui pengujian mengindikasikan deviasi yang lebih tinggi dibandingkan hasil identifikasi menggunakan data respons simulasi numerik, yaitu di bawah 6.5%. Penyimpangan ini terutama terjadi pada modulus tertinggi hasil identifikasi. Hasil identifikasi modulus getar normal memperlihatkan kesesuaian dengan modulus getar normal hasil komputasi numerik. Penyimpangan hasil identifikasi modulus getar normal yang cukup besar terjadi untuk respons dengan kandungan *noise* yang tinggi pada modulus tertinggi struktur.

Lebih lanjut lagi, unjuk kerja metode gabungan dalam identifikasi parameter modal struktur berdasarkan respons paksa acak hasil komputasi numerik memberikan harga dengan deviasi di bawah 2% untuk frekuensi pribadi dan kurang dari 5% untuk rasio redaman. Sementara itu, penyimpangan di bawah 3% diperoleh ketika proses identifikasi dilakukan melalui data respons getaran paksa hasil pengujian. Modus getar normal hasil identifikasi menunjukkan kesesuaian dengan hasil komputasi masalah bilangan pribadi. Kesesuaian modus getar ini dihasilkan oleh proses identifikasi berdasarkan fungsi RD melalui *positive points triggering*. Berdasarkan hasil simulasi dan eksperimen didapatkan bahwa jumlah titik-titik *triggering* yang digunakan berhubungan langsung dengan kualitas fungsi RD yang dihasilkan. Dengan demikian, PPI yang telah dikembangkan memperlihatkan kemampuan yang cukup handal dalam proses identifikasi berdasarkan respons getaran bebas dan respons getaran paksa.

Kata kunci: OMA, parameter *modal*, metode ITD, metode RD, PPI EAPack.



ABSTRACT

Identification process plays an important role in the area of structural dynamics. Through this process, the dynamics parameters of a structure can be identified by using information from measured input and output. This research was conducted to develop an identification program package using information from output data only or operational modal analysis (OMA). Using the developed identification program, the modal parameters of the structure were extracted by applying the Ibrahim time domain (ITD) identification method and the random decrement (RD) method. ITD method was utilized to identify the modal parameter of the structure from its free responses, while the forced responses were identified by using the combined method, i.e. ITD and RD.

The identification program package was built in the MATLAB programming environment. This identification package was also complemented with the graphical user interface to create an easy use application. The developed program package is named as Engineering Analysis Package (EAPack). The numerical and experimental studies were conducted to validate the performance of both methods on identifying the modal parameters using numerical simulation and measurement data. Then, two structures under test (SUT) on laboratory scale were tested by using two identification procedures. The first SUT was the hanging cantilever beam with three additional lumped masses and the second one was the model of two storeys building.

The identified modal parameters obtained from the free responses of the structure have lower deviation when compared to the parameters used in the simulation. The deviations were less than 0.5% for the identified natural frequencies and less than 1% for the identified damping ratios. Meanwhile, the identification result of measured free responses indicated larger deviation than the computed free responses. This deviation mainly occurred at the higher mode of the identification result. The normal modes showed a good agreement between the identified results and the computed ones. High deviation of the identified normal modes appeared on the higher modes in the case of responses with high noise content.

Identification of the modal parameters using forced responses data showed the deviation under 2% for the natural frequencies and below 5% for the damping ratios. In other hand, the identification result using experimental data gave the deviation under 3% compared to the numerical calculation. A good agreement between the identified normal modes and the computed normal modes were obtained in the calculation of RD function using positive points triggering instead

of level crossing triggering. This condition was due to the number of triggering points which gave the significant effect to the quality of RD function. It can be concluded that the developed identification program package shows its performance on extracting modal parameters from free and forced vibration responses.

Keywords: *OMA, modal parameters, ITD method, RD method, EAPack identification package.*



KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji dan syukur penulis sampaikan kehadirat Allah SWT, karena dengan berkat rahmat dan karunia-Nya jualah penulis dapat menyelesaikan tesis ini.

Tesis ini merupakan salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan tahap magister di Program Studi Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Andalas dan dibuat ketika penulis melakukan penelitian di Laboratorium Dinamika Struktur.

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada Bapak Prof. Dr.-Ing. Mulyadi Bur, Bapak Dr.Eng. Lovely Son dan Bapak Dr.Eng. Meifal Rusli yang telah membimbing, memberi pengarahan, nasehat dan diskusi-diskusi selama penyelesaian tesis ini. Di samping itu Bapak Prof. Dr.-Ing. Mulyadi Bur juga berperan sebagai ketua sidang magister yang telah berlangsung pada hari Jum'at tanggal 10 Januari 2014 pukul 9.30 WIB di ruang sidang Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Andalas.

Kepada Bapak Dedison Gasni, Ph. D, Bapak Dr.-Ing. Jhon Malta, dan Bapak Dr.Eng. Eka Satria, sebagai tim penguji sidang magister, penulis sampaikan pula rasa terimakasih atas perhatian dan nasehat-nasehat beliau ketika sidang magister berlangsung.

Semua yang penulis kerjakan ini tidak ada artinya tanpa dukungan orang tua penulis: Ayah, Ibu dan Paman. Pengertian, dukungan dan do'a mereka selama penulis menempuh pendidikan merupakan dorongan yang tidak ternilai. Semoga Allah senantiasa memberikan rahmat dan karunia-Nya kepada mereka semua.

Terakhir, ucapan terima kasih kepada seluruh asisten Laboratorium Dinamika Struktur yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian dan penulisan tesis, kepada rekan-rekan Program Studi Magister Teknik Mesin angkatan 2011, dan pihak-pihak lainnya yang telah memberikan dorongan dan motivasi, yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Akhir kata semoga tesis ini bermanfaat bagi kita semua.

Padang, Januari 2014

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
SARI	
ABSTRACT	
KATA PENGANTAR	
DAFTAR ISI	...
DAFTAR GAMBAR	...
DAFTAR TABEL	...
DAFTAR NOTASI	...
DAFTAR SINGKATAN	...
1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	...
1.2 Rumusan dan Batasan Masalah	...
1.3 Tujuan Penelitian	...
1.4 Manfaat Penelitian	...
1.5 Sistematika Penulisan	...
2 METODE IDENTIFIKASI STRUKTUR DALAM RANAH WAKTU	
2.1 Metode Ibrahim <i>Time Domain</i> (ITD)	...
2.1.1 Penentuan parameter <i>modal</i> struktur yang diidentifikasi	...
2.1.2 Pengukuran <i>pseudo</i>	...
2.1.3 <i>Modal confidence factor</i> (MCF)	...
2.1.4 Perlakuan respons kecepatan dan percepatan dalam metode ITD	...

2.1.5	Konstanta parametrik metode ITD	...	18
2.2	Metode <i>Random Decrement</i>	...	20
2.3	Kriteria Penilaian Hasil Identifikasi	...	23
3	METODOLOGI PENELITIAN		
3.1	Kaji Numerik	...	27
3.2	Kaji Eksperimental	...	31
4	IDENTIFIKASI PARAMETER MODAL MELALUI PENERAPAN METODE IBRAHIM TIME DOMAIN		
4.1	Identifikasi Parameter <i>Modal</i> Struktur Melalui Metode ITD dengan Menggunakan Data Respons Hasil Komputasi Numerik	...	35
4.1.1	Kasus 1: Identifikasi berdasarkan kontribusi 6 modus getar terendah	...	38
4.1.2	Kasus 2: Identifikasi berdasarkan kontribusi 12 modus getar terendah	...	49
4.2	Identifikasi Parameter <i>Modal</i> Struktur Melalui Metode ITD dengan Menggunakan Data Respons Hasil Pengujian	...	60
5	IDENTIFIKASI PARAMETER MODAL MELALUI PENERAPAN METODE <i>RANDOM DECREMENT</i> DAN <i>IBRAHIM TIME DOMAIN</i>		
5.1	Penerapan Metode RD dan ITD Untuk Identifikasi Parameter <i>Modal</i> Struktur Menggunakan Data Respons Hasil Komputasi Numerik	...	72
5.2	Penerapan Metode RD dan ITD Untuk Identifikasi Parameter <i>Modal</i> Struktur Menggunakan Data Respons Hasil Pengujian	...	83

6	PENUTUP		
6.1	Kesimpulan	...	91
6.2	Saran untuk Penelitian Mendatang	...	92

UCAPAN TERIMAKASIH

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN A



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Bagian riil dan imajiner modulus getar kompleks dalam diagram Argand beserta batasan yang digunakan untuk menyatakannya sebagai modulus getar normal pendekatan [1, 25].	... 12
Gambar 2.2 Ilustrasi penerapan konstanta parametrik untuk membentuk matriks sistem dengan metode ITD [13, 20].	... 19
Gambar 2.3 Ilustrasi konsep RD [21].	... 21
Gambar 3.1 Model balok dengan tambahan 3 massa terpusat sebagai struktur uji 1 (a) foto struktur uji dan (b) model skematik....	25
Gambar 3.2 Model bangunan dua lantai sebagai struktur uji 2 (a) foto struktur uji dan (b) model skematik.	... 25
Gambar 3.3 Tampilan antarmuka PPI EAPack.	... 29
Gambar 3.4 Tampilan antarmuka PPI EAPack untuk modul (a) <i>modal analysis</i> dan (b) <i>dynamic analysis</i>.	... 30
Gambar 3.5 Tampilan antarmuka PPI EAPack untuk modul <i>operational modal analysis (OMA)</i> .	30
Gambar 3.6 Struktur uji dan instrumentasi pengujian untuk model uji 1 (model balik gantung dengan 3 massa tambahan).	... 32
Gambar 3.7 Struktur uji dan instrumentasi pengujian untuk model uji 2 (model bangunan dua lantai).	... 33
Gambar 4.1 Enam modulus getar terendah balok uji (a) modulus pertama ($f_1 = 3.1037$ Hz), (b) modulus kedua ($f_2 = 19.5281$ Hz), (c) modulus ketiga ($f_3 = 52.5920$ Hz), (d) modulus keempat ($f_4 = 165.8033$ Hz), (e) modulus kelima ($f_5 = 246.8868$ Hz), (f) modulus keenam ($f_6 = 356.2033$ Hz).	... 36

Gambar 4.2	Respons percepatan di ketiga massa tambahan akibat eksitasi impuls setengah sinus pada m_3 (a) ketiga respons untuk durasi 0-1 ms dan (b) ketiga respons untuk durasi 0-5 s.	... 38
Gambar 4.3	Variasi NDoF (N) yang digunakan dalam proses identifikasi dengan metode ITD berdasarkan kontribusi 6 modus terendah pada data respons percepatan untuk variasi NSR di 4 kondisi penempatan sensor.	... 40
Gambar 4.4	Hasil identifikasi 6 modus terendah model balok berdasarkan respons percepatan kontribusi 6 modus terendah dengan metode ITD untuk 4 kondisi penempatan sensor dan variasi NSR.	... 42
Gambar 4.5	Diagram kestabilan (<i>stabilization diagram</i>) hasil identifikasi data simulasi respons percepatan kontribusi 6 modus terendah.	... 44
Gambar 4.6	Enam modus getar normal terendah balok uji berdasarkan perhitungan masalah bilangan pribadi dan hasil identifikasi respons dengan metode ITD untuk data respons dengan 0.00% NSR, keenam modus dinormalisasi terhadap nilai maksimum pada setiap modulusnya, (a) modus pertama, (b) modus kedua, (c) modus ketiga, (d) modus keempat, (e) modus kelima, dan (f) modus keenam.	... 46
Gambar 4.7	Enam modus getar normal terendah balok uji berdasarkan perhitungan masalah bilangan pribadi dan hasil identifikasi respons dengan metode ITD untuk data respons dengan 0.00% NSR, keenam modus dinormalisasi terhadap nilai maksimum pada setiap modulusnya dengan data modus getar pada setiap massa tambahan, (a) modus pertama, (b) modus kedua, (c) modus ketiga, (d) modus keempat, (e) modus kelima, dan (f) modus keenam	... 47
Gambar 4.8	Enam modus getar normal terendah balok uji berdasarkan perhitungan masalah bilangan pribadi dan hasil identifikasi respons dengan metode ITD untuk data respons dengan 10.00% NSR, keenam modus dinormalisasi terhadap nilai maksimum pada setiap modulusnya, (a) modus pertama, (b) modus kedua, (c) modus ketiga, (d) modus keempat, (e) modus kelima, dan (f) modus keenam.	... 48

Gambar 4.9	Enam modus getar normal terendah balok uji berdasarkan perhitungan masalah bilangan pribadi dan hasil identifikasi respons dengan metode ITD untuk data respons dengan 100.00% NSR, keenam modus dinormalisasi terhadap nilai maksimum pada setiap modulusnya, (a) modus pertama, (b) modus kedua, (c) modus ketiga, (d) modus keempat, (e) modus kelima, dan (f) modus keenam.	...	48
Gambar 4.10	Variasi NDoF (N) yang digunakan dalam proses identifikasi dengan metode ITD berdasarkan kontribusi 12 modus terendah pada data respons percepatan untuk variasi NSR di 4 kondisi penempatan sensor.	...	50
Gambar 4.11	Hasil identifikasi 6 modus terendah model balok berdasarkan respons percepatan kontribusi 12 modus terendah dengan metode ITD untuk 4 kondisi penempatan sensor dan variasi NSR	...	51
Gambar 4.12	Diagram kestabilan (<i>stabilization diagram</i>) hasil identifikasi data simulasi respons percepatan kontribusi 12 modus terendah untuk nilai parameter N_4 seperti yang diberikan dalam Tabel 4.4.	...	52
Gambar 4.13	Frekuensi alias dalam identifikasi dengan metode ITD untuk $N_4 = 40$ atau $f_{id\ max} = 416.6667$ Hz.	...	55
Gambar 4.14	Frekuensi alias dalam identifikasi dengan metode ITD untuk $N_4 = 44$ atau $f_{id\ max} = 378.7879$ Hz.	...	55
Gambar 4.15	Frekuensi alias dalam identifikasi dengan metode ITD untuk $N_4 = 45$ atau $f_{id\ max} = 370.3704$ Hz.	...	55
Gambar 4.16	Frekuensi alias dalam identifikasi dengan metode ITD untuk $N_4 = 46$ atau $f_{id\ max} = 362.3188$ Hz.	...	56
Gambar 4.17	Diagram kestabilan (<i>stabilization diagram</i>) hasil identifikasi data simulasi respons percepatan kontribusi 12 modus terendah untuk nilai parameter N_4 sebesar 20.	...	57
Gambar 4.18	Enam modus getar normal terendah balok uji berdasarkan perhitungan masalah bilangan pribadi dan hasil identifikasi respons dengan metode ITD untuk data respons dengan 0.00% NSR, keenam modus dinormalisasi terhadap nilai maksimum pada setiap modulusnya, (a) modus pertama, (b) modus kedua, (c) modus ketiga, (d) modus keempat, (e) modus kelima, dan (f) modus keenam.	...	58

- Gambar 4.19** Enam modus getar normal terendah balok uji berdasarkan perhitungan masalah bilangan pribadi dan hasil identifikasi respons dengan metode ITD untuk data respons dengan 10.00% NSR, keenam modus dinormalisasi terhadap nilai maksimum pada setiap modusnya, (a) modus pertama, (b) modus kedua, (c) modus ketiga, (d) modus keempat, (e) modus kelima, dan (f) modus keenam. ... 59
- Gambar 4.20** Enam modus getar normal terendah balok uji berdasarkan perhitungan masalah bilangan pribadi dan hasil identifikasi respons dengan metode ITD untuk data respons dengan 100.00% NSR, keenam modus dinormalisasi terhadap nilai maksimum pada setiap modusnya, (a) modus pertama, (b) modus kedua, (c) modus ketiga, (d) modus keempat, (e) modus kelima, dan (f) modus keenam. ... 59
- Gambar 4.21** Respons percepatan hasil pengujian *modal* balok gantung dengan tiga massa tambahan yang dicuplik pada ketiga massa tambahan dimana eksitasi impuls diberikan pada m_3 60
- Gambar 4.22** Eksitasi kejut yang diberikan dengan *impact hammer* pada posisi m_3 dalam pengujian getaran balok gantung dengan tiga massa tambahan. ... 61
- Gambar 4.23** Diagram kestabilan identifikasi hasil pengujian *modal* balok gantung dengan tiga massa tambahan berdasarkan data respons percepatan yang dicuplik pada ketiga massa tambahan untuk waktu awal identifikasi 0.1000 s. ... 62
- Gambar 4.24** Diagram kestabilan identifikasi hasil pengujian *modal* balok gantung dengan tiga massa tambahan berdasarkan data respons percepatan yang dicuplik pada ketiga massa tambahan untuk waktu awal identifikasi 0.2500 s. ... 63
- Gambar 4.25** Diagram kestabilan identifikasi hasil pengujian *modal* balok gantung dengan tiga massa tambahan berdasarkan data respons percepatan yang dicuplik pada ketiga massa tambahan untuk waktu awal identifikasi 0.4000 s. ... 64
- Gambar 4.26** Hasil identifikasi rasio redaman hasil pengujian *modal* balok gantung (Gambar 3.1) berdasarkan data respons percepatan ketiga massa tambahan untuk 10 variasi waktu awal identifikasi. ... 65
- Gambar 4.27** FRF $H_{33}(f)$ melalui penerapan *estimator* $H_v(f)$ beserta koherensi ($\gamma^2(f)$) dan fasa yang ditentukan dengan estimator $H_1(f)$ hasil pengujian *modal* EMA yang mengindikasikan 7 resonans pada kurva FRF. ... 66

Gambar 4.28	Tujuh modus getar normal terendah balok uji berdasarkan hasil identifikasi respons percepatan dengan metode ITD, ketujuh modus dinormalisasi terhadap nilai maksimum pada setiap modulusnya, (a) modus pertama (3.1869 Hz), (b) modus kedua (19.5042 Hz), (c) modus ketiga (52.3604 Hz), (d) modus kelima (155.3103 Hz).	... 71
Gambar 5.1	Enam modus getar terendah model bangunan dua lantai melalui pendekatan rangka bidang (a) modus pertama ($f_1 = 2.2148$ Hz), (b) modus kedua ($f_2 = 5.8067$ Hz), (c) modus ketiga ($f_3 = 115.7282$), (d) modus keempat ($f_4 = 115.9221$ Hz), (e) modus kelima ($f_5 = 115.9221$ Hz), dan (f) modus keenam ($f_6 = 116.8303$ Hz).	... 74
Gambar 5.2	Respons percepatan masing-masing lantai bangunan (idealisasi sistem massa terpusat 2 DoF) akibat eksitasi <i>white noise</i> berupa simpangan yang diterapkan pada tumpuan.	... 76
Gambar 5.3	Respons percepatan pada setiap lantai (idealisasi struktur rangka bidang dengan kontribusi 6 modus terendah) akibat eksitasi <i>white noise</i> berupa simpangan yang diterapkan pada tumpuan.	... 76
Gambar 5.4	Hubungan jumlah titik <i>triggering</i> dengan besar waktu estimasi untuk membentuk fungsi RD.	... 77
Gambar 5.5	Fungsi RD respons percepatan struktur model 2 DoF akibat eksitasi <i>white noise</i> berdasarkan (a) <i>level crossing triggering</i> acuan L_1 , (b) <i>level crossing triggering</i> acuan L_2 , dan (c) <i>positive point triggering</i> acuan L_1.	... 78
Gambar 5.6	Fungsi RD respons percepatan struktur model rangka bidang akibat eksitasi <i>white noise</i> berdasarkan (a) <i>level crossing triggering</i> acuan L_1 , (b) <i>level crossing triggering</i> acuan L_2 , dan (c) <i>positive point triggering</i> acuan L_1.	... 79
Gambar 5.7	Persentase kesalahan hasil identifikasi frekuensi pribadi dan rasio redaman [%] model 2 DoF untuk kedua kondisi <i>triggering</i> pada setiap respons referensi <i>triggering</i>.	... 81
Gambar 5.8	Persentase kesalahan hasil identifikasi frekuensi pribadi dan rasio redaman [%] model rangka bidang untuk kedua kondisi <i>triggering</i> pada setiap respons referensi <i>triggering</i>.	... 81

Gambar 5.9	Visualisasi modus getar normal hasil identifikasi berdasarkan fungsi RD dengan penerapan kedua kondisi <i>triggering</i> terhadap data respons percepatan akibat eksitasi <i>white noise</i> yang telah dinormalisasi (a) model 2 DoF dan (b) model rangka bidang.	... 83
Gambar 5.10	Respons percepatan pada setiap lantai bangunan hasil pengujian akibat eksitasi <i>white noise</i> dalam rentang frekuensi 0-25 Hz berupa simpangan yang diterapkan pada tumpuan.	... 84
Gambar 5.11	Respons percepatan pada setiap lantai bangunan hasil pengujian akibat eksitasi <i>pseudorandom</i> dengan lebar frekuensi (<i>bandwidth</i>) 0-25 Hz berupa simpangan yang diterapkan pada tumpuan.	... 84
Gambar 5.12	Fungsi RD respons percepatan struktur akibat eksitasi <i>white noise</i> berdasarkan (a) <i>level crossing triggering</i> acuan L_1 , (b) <i>level crossing triggering</i> acuan L_2 , dan (c) <i>positive point triggering</i> acuan L_1.	... 86
Gambar 5.13	Fungsi RD respons percepatan struktur akibat eksitasi <i>pseudorandom</i> berdasarkan (a) <i>level crossing triggering</i> acuan L_1 , (b) <i>level crossing triggering</i> acuan L_2 , dan (c) <i>positive point triggering</i> acuan L_1.	... 86
Gambar 5.14	Diagram kestabilan hasil identifikasi dengan metode ITD dari kedua kondisi <i>triggering</i> untuk membentuk fungsi RD berdasarkan respons percepatan struktur akibat eksitasi <i>white noise</i> pada tumpuan.	... 87
Gambar 5.15	Diagram kestabilan hasil identifikasi dengan metode ITD dari kedua kondisi <i>triggering</i> untuk membentuk fungsi RD berdasarkan respons percepatan struktur akibat eksitasi <i>pseudorandom</i> pada tumpuan	... 87
Gambar 5.16	Visualisasi modus getar normal hasil identifikasi berdasarkan fungsi RD dengan penerapan kedua kondisi <i>triggering</i> terhadap data respons percepatan akibat eksitasi <i>white noise</i> yang telah dinormalisasi.	... 89
Gambar 5.17	Visualisasi modus getar normal hasil identifikasi berdasarkan fungsi RD dengan penerapan kedua kondisi <i>triggering</i> terhadap data respons percepatan akibat eksitasi <i>pseudorandom</i> yang telah dinormalisasi.	... 90
Gambar A.1	Hirarki <i>top-level</i> EAPack.	... A-1

Gambar A.2	Hirarki modul Structural Identification – OMA untuk metode identifikasi ITD dan RD.	... A-3
Gambar A.3	Tampilan antarmuka PPI EAPack.	... A-4
Gambar A.4	Tampilan antarmuka PPI EAPack untuk modul <i>operational modal analysis</i> (OMA).	... A-4
Gambar A.5	Salah satu format data respons yang telah dihitung dengan analisis dinamik respons pada modul FEA.	... A-5
Gambar A.6	Format variabel <i>cell DataSave.mNode</i> untuk data respons yang disimpan pada nomor-nomor nodal tertentu.	... A-6
Gambar A.7	Format variabel <i>structure DataSave.Conf</i>.	... A-6
Gambar A.8	<i>Dialog box Select responses from the listed ones</i>.	... A-7
Gambar A.9	<i>Dialog box OMA – Select recorded responses</i>.	... A-8
Gambar A.10	Visualisasi SUT setelah membaca <i>file grid SUT (*.grf)</i>.	... A-8
Gambar A.11	Susunan file *.grf, contoh untuk model bangunan dua lantai.	... A-9
Gambar A.12	Parameter-parameter untuk identifikasi dengan metode ITD.	... A-10
Gambar A.13	Kotak dialog identifikasi dengan metode ITD melalui tanpa atau dengan diagram kestabilan.	... A-11
Gambar A.14	Diagram kestabilan hasil identifikasi.	... A-11
Gambar A.15	Parameter-parameter dalam metode RD.	... A-12
Gambar A.16	Fungsi RD setelah proses estimasi selesai.	... A-12
Gambar A.17	Hasil identifikasi parameter modal struktur uji.	... A-13

DAFTAR TABEL

		Halaman
Tabel 3.1	Sifat-sifat fisik balok gantung dengan tambahan tiga massa terpusat (Gambar 3.1).	... 26
Tabel 3.2	Sifat-sifat fisik model struktur bangunan dua lantai (Gambar 3.2).	... 26
Tabel 4.1	Frekuensi pribadi balok gantung dengan tiga massa tambahan.	... 36
Tabel 4.2	Parameter N_4 yang digunakan dalam proses identifikasi dengan metode ITD untuk keempat kondisi posisi pengukuran respons (kontribusi 6 modus getar terendah).	... 39
Tabel 4.3	Parameter N_4 yang digunakan dalam proses identifikasi dengan metode ITD untuk keempat kondisi posisi pengukuran respons (kontribusi 12 modus getar terendah).	... 50
Tabel 4.4	Modus <i>alias</i> teoritik dalam rentang 0-400 Hz dari penerapan $f_{id\ max}$ yang sesuai dengan N_4 pada Tabel 4.3 dan $\Delta t = 10^{-5}$ s (* frekuensi balok gantung hasil penghitungan EVP, ** frekuensi <i>alias</i> yang memiliki kesimetrian posisi frekuensi terhadap nilai $f_{id\ max}$).	... 54
Tabel 4.5	Modus <i>alias</i> teoritik dalam rentang 0-400 Hz dari penerapan $f_{id\ max}$ untuk nilai-nilai parameter numerik $N_4 = 20$ dan $\Delta t = 10^{-5}$ s (* frekuensi balok gantung hasil penghitungan EVP, ** frekuensi <i>alias</i> yang memiliki kesimetrian posisi frekuensi terhadap nilai $f_{id\ max}$).	... 56
Tabel 4.6	Hasil identifikasi frekuensi pribadi hasil pengujian <i>modal</i> balok gantung (Gambar 3.1) berdasarkan data respons percepatan ketiga massa tambahan akibat eksitasi impuls pada posisi m_3 untuk 10 variasi waktu awal identifikasi.	... 64

Tabel 4.7	Hasil identifikasi rasio redaman hasil pengujian <i>modal</i> balok gantung (Gambar 3.1) berdasarkan data respons percepatan ketiga massa tambahan akibat eksitasi impuls pada posisi m_3 untuk 10 variasi waktu awal identifikasi. ...	65
Tabel 4.8	Perbandingan frekuensi pribadi balok gantung (Gambar 3.1) hasil penghitungan EVP-FEM model balok Euler-Bernoulli dan hasil identifikasi melalui metode ITD dan metode HPP pada kurva FRF berdasarkan data pengujian <i>modal</i> dalam rentang frekuensi 0-400 Hz (¹ Tabel 4.2, ² nilai rata-rata pada Tabel 4.7, dan ³ Gambar 4.27). ...	66
Tabel 4.9	Frekuensi pribadi balok gantung (Gambar 3.1) hasil penghitungan EVP-FEM model balok 3D dalam rentang frekuensi 0-400 Hz beserta <i>modal participation</i> (%) pada keenam arah getar balok, T_x , T_y , T_z , R_x , R_y , dan R_z masing-masingnya merupakan arah getar translasi terhadap sumbu x , y , dan z serta rotasi terhadap sumbu x , y dan z	68
Tabel 4.10	Perbandingan frekuensi pribadi balok gantung (Gambar 3.1) hasil penghitungan EVP-FEM model balok 3D dan hasil identifikasi melalui metode ITD dan metode HPP pada kurva FRF berdasarkan data pengujian <i>modal</i> berikut persentase terhadap EVP-FEM (ϵ_f [%]) dalam rentang frekuensi 0-400 Hz (¹ Tabel 4.10, ² nilai rata-rata pada Tabel 4.7, dan ³ Gambar 4.27). ...	69
Tabel 4.11	Perbandingan rasio redaman balok gantung (Gambar 3.1) hasil identifikasi melalui metode ITD dan metode HPP pada kurva FRF berdasarkan data pengujian <i>modal</i> dalam rentang frekuensi 0-400 Hz [%] (¹ nilai rata-rata pada Tabel 4.8, dan ² Gambar 4.27). ...	70
Tabel 5.1	Frekuensi pribadi terendah [Hz] model bangunan dua lantai yang dimodelkan sebagai sistem terpusat 2 DoF dan model rangka bidang yang didiskritisasi melalui penerapan FEM. ...	73
Tabel 5.2	Persentase rasio redaman <i>modal</i> [%] dari model bangunan dua lantai yang digunakan untuk menghasilkan respons. ...	75
Tabel 5.3	Jumlah titik <i>triggering</i> berdasarkan penerapan dua kondisi <i>triggering</i> terhadap data respons percepatan akibat eksitasi <i>white noise</i> (berikut waktu estimasi fungsi RD [s]) di mana L_i menyatakan lantai ke- i ; $i = 1, 2$; dan * digunakan sebagai acuan untuk proses <i>triggering</i>	77

Tabel 5.4	Frekuensi pribadi [Hz] hasil identifikasi dengan metode ITD berdasarkan fungsi RD yang diperoleh melalui kedua kondisi <i>triggering</i> terhadap data respons percepatan akibat eksitasi <i>white noise</i> dengan L_i menyatakan lantai ke- i ; $i = 1, 2$; dan sebagai acuan untuk proses <i>triggering</i>)	...	79
Tabel 5.5	Rasio redaman [%] hasil identifikasi dengan metode ITD berdasarkan fungsi RD yang diperoleh melalui kedua kondisi <i>triggering</i> terhadap data respons percepatan akibat eksitasi <i>white noise</i> dengan L_i menyatakan lantai ke- i ; $i = 1, 2$; dan sebagai acuan untuk proses <i>triggering</i>.	...	80
Tabel 5.6	OAMCF [%] hasil identifikasi dengan metode ITD berdasarkan fungsi RD yang diperoleh melalui kedua kondisi <i>triggering</i> terhadap data respons percepatan akibat eksitasi <i>white noise</i> dengan L_i menyatakan lantai ke- i ; $i = 1, 2$; dan sebagai acuan untuk proses <i>triggering</i>.	...	80
Tabel 5.7	Modus getar normal hasil identifikasi berdasarkan fungsi RD yang dibentuk melalui penerapan kedua kondisi <i>triggering</i> terhadap data respons percepatan akibat eksitasi <i>white noise</i> yang telah dinormalisasi dengan L_i menyatakan lantai ke- i ; $i = 1, 2$; sebagai acuan untuk proses <i>triggering</i>.	...	82
Tabel 5.8	Jumlah titik <i>triggering</i> berdasarkan penerapan dua kondisi <i>triggering</i> terhadap data respons percepatan akibat eksitasi <i>white noise</i> dan pseudorandom dalam rentang frekuensi eksitasi 0-25 Hz dengan L_i menyatakan lantai ke- i ; $i = 1, 2$; dan L_i digunakan sebagai acuan untuk proses <i>triggering</i>.	...	85
Tabel 5.9	Frekuensi pribadi [Hz] hasil identifikasi dengan metode ITD berdasarkan fungsi RD dengan penerapan kedua kondisi <i>triggering</i> terhadap data respons percepatan akibat eksitasi <i>white noise</i> dan <i>pseudorandom</i> dengan L_i menyatakan lantai ke- i ; $i = 1, 2$; dan L_i sebagai acuan untuk proses <i>triggering</i>.	...	88
Tabel 5.10	Rasio redaman [%] hasil identifikasi dengan metode ITD berdasarkan fungsi RD dengan penerapan kedua kondisi <i>triggering</i> terhadap data respons percepatan akibat eksitasi <i>white noise</i> dan <i>pseudorandom</i> dengan L_i menyatakan lantai ke- i ; $i = 1, 2$; dan L_i sebagai acuan untuk proses <i>triggering</i>.	...	88

Tabel 5.11 OAMCF [%] hasil identifikasi dengan metode ITD berdasarkan fungsi RD dengan penerapan kedua kondisi *triggering* terhadap data respons percepatan akibat eksitasi *white noise* dan *pseudorandom* dengan L_i menyatakan lantai ke- i ; $i = 1, 2$; dan * sebagai acuan untuk proses *triggering*. ... 88

Tabel 5.12 Modus getar normal hasil identifikasi berdasarkan fungsi RD dengan penerapan kedua kondisi *triggering* terhadap data respons percepatan akibat eksitasi *white noise* dan *pseudorandom* yang telah dinormalisasi dengan L_i menyatakan lantai ke- i ; $i = 1, 2$; dan * sebagai acuan untuk proses *triggering*. ... 89



DAFTAR NOTASI

Simbol	Arti
Latin	
C	: Matriks redaman struktur (global)
D_{xx}, D_{xy}	: Fungsi RD (langsung dan silang)
H	: Matriks sistem metode ITD
I	: Matriks identitas
K	: Matriks kekakuan struktur (global)
M	: Matriks massa struktur (global)
N	: Derajat kebebasan struktur
	Jumlah titik <i>triggering</i> dalam metode RD
N_1, N_2, N_3, N_4	: Bilangan bulat konstanta waktu parametrik metode ITD
N_{DoF}	: Bilangan yang digunakan untuk menyatukan jumlah modus yang akan diidentifikasi dengan metode ITD
N_{col}	: Jumlah kolom matriks sistem H
T	: Matriks transformasi linier
T_{span}	: Lama pencuplikan respons getaran bebas untuk proses identifikasi dengan metode ITD [s]
$T_{\mathbf{x}}(t)$	: Kondisi <i>trigger</i> dalam metode RD
$T_{\mathbf{x}}^L$	: <i>Level crossing triggering</i>
$T_{\mathbf{x}}^P$	: <i>Positive point triggering</i>
$T_{\mathbf{x}}^E$	: <i>Local extremum triggering</i>
$\mathbf{X}, \hat{\mathbf{X}}, \tilde{\mathbf{X}}, \hat{\hat{\mathbf{X}}}$	: Matriks respons perpindahan struktur dalam metode ITD
$\ddot{\mathbf{X}}, \hat{\hat{\mathbf{X}}}, \tilde{\tilde{\mathbf{X}}}, \hat{\hat{\hat{\mathbf{X}}}}$	: Matriks respons percepatan struktur dalam metode ITD
\mathbf{x}, \mathbf{y}	: Vektor respons perpindahan [m]

$\dot{\mathbf{x}}$	: Vektor respons kecepatan [m/s]
$\ddot{\mathbf{x}}$	: Vektor respons percepatan [m/s ²]
\mathbf{x}_0	: Vektor kondisi awal respons perpindahan [m]
$\dot{\mathbf{x}}_0$	: Vektor kondisi awal respons kecepatan [m/s]
$\ddot{\mathbf{x}}_0$	: Vektor kondisi awal respons percepatan [m/s ²]
a_i	: Redaman struktur modulus ke- i
b_i	: Frekuensi pribadi teredam sirkular struktur modulus ke- i
$f_{id\ max}$	: Rentang frekuensi maksimum yang dapat diidentifikasi [Hz]
j	: $\sqrt{-1}$
n	: Jumlah stasiun pengukuran ril dari respons yang dicuplik dengan sensor.
p	: Jumlah stasiun pengukuran <i>pseudo</i> .
t	: Variabel waktu [s]
t_0	: Waktu untuk kondisi awal jawab persamaan diferensial [s]
t_i	: Waktu awal untuk proses identifikasi dengan metode ITD [s]
t_e	: Waktu akhir untuk proses identifikasi dengan metode ITD [s]
u_i	: Bagian ril vektor karakteristik kompleks modulus ke- i
v_i	: Bagian imajiner vektor karakteristik kompleks modulus ke- i

Yunani

Δt	: Waktu cuplik respons struktur [s]
$\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$	: Konstanta waktu parametrik metode ITD [s]
$\Phi, \hat{\Phi}, \tilde{\Phi}, \hat{\hat{\Phi}}$	: Matriks vektor karakteristik normal (<i>normal eigenvectors</i>)
$\Psi, \hat{\Psi}, \tilde{\Psi}, \hat{\hat{\Psi}}$	: Matriks vektor karakteristik kompleks (<i>complex eigenvectors</i>)
Λ	: Matriks eksponensial akar-akar karakteristik berdasarkan data perpindahan struktur.
Λ''	: Matriks eksponensial akar-akar karakteristik berdasarkan respons percepatan struktur
α_i	: Bagian ril dari eksponensial nilai karakteristik kompleks
α_1, α_2	: Batasan \pm nilai sudut fasa vektor karakteristik kompleks [°]

β_i	: Bagian imajiner dari eksponensial nilai karakteristik kompleks
λ	: Vektor akar-akar karakteristik sistem dinamik
λ_i	: Akar-akar karakteristik sistem dinamik modulus ke- i
ϕ_1, ϕ_2	: Modus normal pendekatan dari modulus kompleks
ψ	: Vektor modulus kompleks
ψ_i	: Vektor modulus kompleks untuk modulus ke- i
σ_x	: <i>Root mean square</i> (RMS) respons struktur
τ	: <i>Time lag triggering</i> dalam metode RD [s]
θ_i	: Sudut fasa vektor karakteristik kompleks modulus ke- i [°]
$\omega_{n,i}$	: Frekuensi pribadi sirkular struktur modulus ke- i [rad/s]
$\omega_{d,i}$	: Frekuensi pribadi teredam sirkular struktur modulus ke- i [rad/s]
ζ_i	: Rasio redaman struktur modulus ke- i [%]

Fraktur

$\Re(\dots)$	: Bagian riil dari suatu skalar, vektor, atau matriks
$\Im(\dots)$	: Bagian imajiner dari suatu skalar, vektor, atau matriks

Fungsi

$\dots(t)$	: Fungsi dari variabel waktu
$\dots(\tau)$	: Fungsi dari variabel waktu <i>trigger</i>

DAFTAR SINGKATAN

Singkatan	English	Bahasa Indonesia
ALPF	<i>Analog Low-Pass Filter</i>	
ARMA	<i>Auto Regresive Moving Average</i>	
DoF	<i>Degree of Freedom</i>	Derajat Kebebasan
DSA	<i>Digital Signal Analyzer</i>	
ERA	<i>Eigen Realization Algorithm</i>	
EVP	<i>Eigenvalue Problem</i>	Masalah Bilangan Pribadi
FDD	<i>Frequency Domain Decomposition</i>	
FEA	<i>Finite Element Analysis</i>	
FEM	<i>Finite Element Method</i>	Metode Elemen Hingga
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>	Transformasi Fourier Cepat
FRF	<i>Frequency Response Function</i>	Fungsi Respons Frekuensi
HPP	<i>Half Power Point</i>	
ITD	<i>Ibrahim Time Domain</i>	
LPF	<i>Low-Pass Filter</i>	
LTI	<i>Linear Time Invariant</i>	
MCF	<i>Modal Confidence Factor</i>	
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>	
OMA	<i>Operational Modal Analysis</i>	
OAMCF	<i>Overall Modal Confidence Factor</i>	
PSD	<i>Power Spectral Density</i>	
RD	<i>Random Decrement</i>	
RFP	<i>Rational Fraction Polynomial</i>	
SHM	<i>Structural Health Monitoring</i>	
SIMO	<i>Single Input Multiple Output</i>	
SISO	<i>Single Input Single Output</i>	

1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proses identifikasi memiliki peranan penting dalam kajian dinamika struktur, karena proses ini ditujukan untuk menentukan karakteristik dinamik atau parameter *modal* suatu struktur. Parameter *modal* struktur hasil identifikasi terdiri dari frekuensi pribadi, rasio redaman dan modus getar. Proses identifikasi biasanya dilakukan berdasarkan informasi data masukan (gangguan) dan keluaran (respons) dari struktur atau yang dikenal dengan *experimental modal analysis* (EMA) [1]. EMA biasanya dilakukan di dalam suatu lingkungan terkondisi untuk mendapatkan kualitas hasil identifikasi yang memuaskan. Parameter *modal* struktur diperoleh dengan menerapkan teknik identifikasi numerik seperti seperti HPP (*half power point*) [1], metode *least square* [2], dan RFP (*rational fraction polynomial*) [3].

Penerapan identifikasi struktur dengan EMA secara praktis sangat terbatas. Hal ini disebabkan karena struktur mengalami gangguan secara alami (*ambient*) seperti pada kasus aeroelastisitas sayap pesawat terbang, getaran bangunan akibat beban angin atau gempa, dan aeroelastisitas jembatan bentang panjang akibat beban angin. Berdasarkan kondisi ini, sinyal gangguan pada struktur sulit diperoleh. Dengan demikian *operational modal analysis* (OMA) dapat digunakan sebagai pilihan utama, karena proses identifikasi dapat dilakukan dengan menggunakan data respons struktur.

OMA merupakan metode yang aplikatif digunakan dalam penerapan praktis secara luas [4] dan dapat digunakan untuk menyelesaikan beberapa masalah lainnya. Masalah-masalah tersebut berupa *structural health monitoring* (SHM),

rekonstruksi gangguan [5, 6], dan perkiraan kelelahan struktur (*fatigue*) berdasarkan rekam data tegangan yang bekerja [7]. Di samping itu, metode numerik identifikasi berbasiskan data respons saja juga cukup banyak tersedia, baik dalam ranah waktu dan ranah frekuensi. Metode identifikasi ranah waktu seperti metode Ibrahim *time domain* (ITD) [8-13] digunakan untuk identifikasi parameter *modal* berdasarkan data respons getaran bebas struktur. Sementara itu, untuk data respons getaran paksa acak dapat diidentifikasi dengan menggunakan metode *random decrement* (RD) [14-21]. Metode RD dapat dikombinasikan dengan metode ITD [15, 16, 20] atau metode identifikasi ranah frekuensi *frequency domain decomposition* (FDD) [21]. Hal ini disebabkan karena fungsi RD yang dihasilkan oleh metode ini adalah ekuivalen dengan respons getaran bebas atau fungsi korelasi respons.

Dewasa ini, paket program komersial untuk identifikasi struktur berbasis data respons belum banyak tersedia di pasaran [22, 23]. Mengacu pada kondisi ini, sebuah penelitian awal telah dilakukan oleh Bur [24] dengan membangun program identifikasi berbasis metode ITD melalui bahasa pemrograman FORTRAN dan Maple. Pada penelitian ini dilakukan kaji numerik proses identifikasi dengan menggunakan metode ITD berdasarkan informasi data respons simpangan getaran bebas model balok kantilever dengan tiga massa tambahan. Modus getar normal hasil identifikasi yang diperoleh berdasarkan metode ITD yang dikembangkan pada program ini menggunakan metode modus normal pendekatan (menerapkan batasan sudut fasa vektor karakteristik sebesar $0^\circ \pm 90^\circ$ dan $180^\circ \pm 90^\circ$) [25].

Berdasarkan penelitian tersebut disusun dan dikembangkan sebuah paket program identifikasi (PPI) dengan penambahan metode RD. PPI dibangun dengan menggunakan bahasa pemrograman MATLAB pada perangkat lunak MATLAB R2013a. Pemilihan perangkat lunak MATLAB didasari pada kemampuan dan kecepatannya dalam melakukan operasi dan manipulasi *array* baik 1, 2, dan 3 dimensi atau dikenal dengan vektor dan matriks [26-28]. Alasan pemilihan berikutnya adalah kemudahan dalam implementasi fitur grafis serta aktivitas antar data untuk berbagai jenis tipe data dan aktivitas antar *file* [29-32].

Data masukan untuk proses identifikasi pada PPI dapat berupa respons getaran bebas dan respons getaran paksa acak untuk tiga jenis respons yaitu: respons simpangan, respons kecepatan, dan respons percepatan. Data keluaran proses identifikasi melalui PPI terdiri atas frekuensi pribadi, rasio redaman, modus getar normal berikut visualisasinya, dan diagram kestabilan hasil identifikasi. Khusus untuk modus getar normal diperoleh dengan menerapkan metode Niedbal. Metode Niedbal merupakan suatu metode yang digunakan untuk mengubah modus getar kompleks menjadi modus getar normal berdasarkan transformasi kompleks [1, 33, 34]. Penerapan metode Niedbal ditujukan untuk menghindari penyimpangan dari syarat keortogonalitasan modus getar normal sebagaimana yang dihasilkan oleh metode modus normal pendekatan [25]. Diagram kestabilan hasil identifikasi digunakan untuk lebih memudahkan dalam mengenali modus-modus riil struktur maupun modus *noise* atau *false*.

1.2 Rumusan dan Batasan Masalah

Melalui penelitian ini dibangun dan dikembangkan suatu paket program identifikasi struktur berbasis metode ITD dan RD dengan menggunakan bahasa pemrograman MATLAB. Implementasi fitur grafis juga diikutsertakan untuk kemudahan dalam proses identifikasi nantinya. Selanjutnya, validasi paket program identifikasi yang telah disusun dilakukan melalui kaji numerik dan eksperimental. Sebagai model uji dipilih dua buah struktur yaitu balok yang digantung dengan tambahan tiga massa terpusat dan model bangunan dua lantai. Kaji numerik proses identifikasi dilakukan dengan menggunakan respons model struktur uji yang dihasilkan melalui analisis respons pada metode elemen hingga. Sementara itu, respons struktur uji yang dicuplik melalui pengujian getaran digunakan sebagai data masukan untuk kaji eksperimental proses identifikasi.

Penelitian ini dilakukan dengan mengacu pada asumsi-asumsi yang dinyatakan sebagai berikut:

1. Struktur uji yang dikaji dalam penelitian ini merupakan sistem *single input multiple output* (SIMO).
2. Struktur uji memiliki karakteristik *linear time invariant* (LTI).

1 Pendahuluan

3. Material struktur uji diasumsikan memiliki karakteristik elastik linier dan isotropik.
4. Respons getaran paksa acak memenuhi statistik Gaussian.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian yang dilakukan ini diantaranya adalah:

1. Membangun paket program identifikasi yang berbasis metode ITD dan RD.
2. Mengevaluasi efektivitas program identifikasi yang telah dibangun melalui kaji numerik dan eksperimental.

1.4 Manfaat Penelitian

Paket program identifikasi yang telah dibangun dapat digunakan untuk proses identifikasi parameter *modal* struktur berdasarkan data respons struktur saja. Data respons struktur yang dimaksud merupakan data respons getaran bebas dan data respons getaran paksa acak struktur akibat gangguan secara alami. Proses identifikasi dari struktur yang kompleks seperti kendaraan dan bangunan dalam skala sesungguhnya dapat dilakukan melalui paket program identifikasi yang telah dibangun ini.

1.5 Sistematika Penulisan

Penulisan tesis terdiri atas enam bab yang menjelaskan secara terstruktur tentang penelitian yang dilakukan. Penulisan diawali dengan Bab 1 yang menyajikan tentang latar belakang atau motivasi dan telaah literatur dari penelitian-penelitian sebelumnya. Bab ini diawali dengan tinjauan analisis *modal* sebagai metode identifikasi struktur. Subbab berikutnya berisi rumusan dan batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat yang dapat dicapai dan susunan tesis ini sendiri.

Bab 2 menjelaskan tentang metode identifikasi parameter dinamik struktur dalam ranah waktu. Metode ITD yang digunakan untuk identifikasi struktur berdasarkan data respons getaran bebas dijelaskan secara ringkas dan menyeluruh. Metode RD dideskripsikan berikut variasinya untuk memperoleh respons getaran bebas dari respons getaran paksa yang diwakili ke dalam fungsi RD. Kriteria untuk

menjustifikasi modus riil struktur berdasarkan keluaran hasil identifikasi juga dijelaskan pada bagian ini.

Bab 3 memaparkan metodologi dari penelitian berupa skema untuk kaji numerik dan eksperimental yang dilakukan. Algoritma identifikasi seperti yang dinyatakan dalam Bab 2 diterapkan pada perangkat lunak MATLAB R2013a. Dalam hal ini, algoritma identifikasi yang dibangun akan dievaluasi nantinya melalui kaji numerik dan eksperimental. Evaluasi dilakukan melalui serangkaian proses identifikasi berdasarkan data respons yang dihasilkan dari hasil simulasi numerik dan pengujian untuk beberapa kondisi yang telah ditentukan. Susunan perangkat dan peralatan uji pada kaji eksperimental juga dideskripsikan pada bagian ini.

Selanjutnya, untuk analisis dan pembahasan ditulis ke dalam dua bab agar penyajian kajian identifikasi lebih terstruktur. Bab 4 menekankan kajian identifikasi dengan metode ITD dan Bab 5 menekankan kajian identifikasi dengan metode RD dan ITD. Melalui Bab 4 akan dijelaskan tentang kaji proses identifikasi berdasarkan data respons hasil simulasi numerik dan hasil pengujian untuk struktur uji balok yang digantung dengan tiga massa tambahan. Beberapa kondisi yang memiliki kesamaan dengan keadaan yang akan ditemui dalam eksperimen skala laboratorium juga disimulasikan dalam bagian ini. Hal ini ditujukan untuk mengetahui unjuk kerja metode ITD yang telah dibangun dalam mengekstrak parameter *modal*. Selanjutnya, validasi program identifikasi dengan mengacu pada data pengujian *modal* dijelaskan pada bagian akhir bab ini.

Bab 5 menjelaskan kajian identifikasi yang dilakukan dengan menerapkan kombinasi metode RD dan ITD. Struktur uji model bangunan dua lantai digunakan sebagai studi kasus untuk proses identifikasi baik dengan menggunakan data hasil simulasi numerik maupun hasil pengujian. Penggunaan kedua jenis data ini ditujukan untuk mengetahui keefektifan kedua metode dalam mengidentifikasi parameter *modal* struktur uji.

Laporan ini ditutup pada Bab 6 yang berisikan kesimpulan dari hal-hal penting yang ditemukan dalam penelitian ini. Selanjutnya juga dituliskan saran untuk penelitian yang akan dilakukan berikutnya.

2 METODE IDENTIFIKASI STRUKTUR DALAM RANAH WAKTU

Metode identifikasi parameter *modal* struktur telah cukup banyak dilakukan baik dengan mengacu pada data gangguan dan respons (dikenal dengan EMA) atau hanya menggunakan data respons struktur saja (dikenal dengan OMA). Metode identifikasi struktur ini berupa metode numerik yang dapat diprogram pada komputer digital. Metode *curve fitting* FRF atau metode RFP merupakan dua dari beberapa metode numerik yang dikenal untuk identifikasi parameter *modal* dalam pengujian melalui teknik EMA. Metode ITD, ERA, SSI, dan FDD diterapkan untuk mengekstrak parameter *modal* struktur berdasarkan data respons struktur. Proses identifikasi tidak hanya dapat dilakukan dalam ranah waktu seperti metode ITD dan ERA, tetapi juga dalam ranah spektral (*spectral domain*) atau frekuensi seperti metode FDD.

2.1 Metode Ibrahim *Time Domain* (ITD)

Persamaan gerak untuk kondisi getaran bebas sistem dinamik dapat diturunkan melalui satu dari penerapan hukum Newton, prinsip d'Alembert, metode Lagrange atau prinsip *extended* Hamilton. Persamaan gerak ini didefinisikan secara matematis oleh [35, 36]

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{0}, \quad (2.1)$$

dengan \mathbf{M} , \mathbf{C} , dan \mathbf{K} menyatakan matriks massa, matriks redaman, dan matriks kekakuan struktur yang berukuran $N \times N$ untuk sistem N derajat kebebasan, serta $\ddot{\mathbf{x}}$, $\dot{\mathbf{x}}$, dan \mathbf{x} merupakan vektor percepatan, kecepatan, dan perpindahan nodal struktur yang berukuran $N \times 1$. Persamaan (2.1) berlaku untuk sistem dengan model

massa terpusat atau sistem massa kontinu. Untuk sistem dinamik LTI jawab sistem dipenuhi oleh fungsi eksponensial berikut

$$\mathbf{x}(t) = \Psi e^{\lambda t}. \quad (2.2)$$

Melalui penyulihan persamaan (2.2) ke dalam persamaan (2.1) diperoleh

$$[\lambda^2 \mathbf{M} + \lambda \mathbf{C} + \mathbf{K}] \Psi e^{\lambda t} = \mathbf{0}, \quad (2.3)$$

di mana Ψ dan λ merupakan matriks vektor karakteristik dan akar-akar karakteristik sistem yang dianalisis. Untuk setiap akar-akar karakteristik, λ , memiliki hubungan langsung dengan satu vektor karakteristik, ψ , dari matriks vektor karakteristik sistem. Persamaan (2.3) memiliki penyelesaian non-trivial jika dan hanya jika determinan matriks $[\lambda^2 \mathbf{M} + \lambda \mathbf{C} + \mathbf{K}]$ bernilai nol. Kondisi ini kemudian akan menghasilkan $2N$ akar-akar karakteristik kompleks yaitu N akar kompleks yang berpasangan, dengan N merupakan akar-akar konjugat. Sehingga jawab umum persamaan (2.1) merupakan kombinasi linier dari $2N$ akar-akar dan vektor karakteristik kompleks beserta konjugatnya. Dengan demikian, respons perpindahan struktur pada persamaan (2.2) dapat dinyatakan dalam notasi vektorial

$$\mathbf{x}(t) = \Psi \exp(\lambda t), \quad (2.4)$$

dengan λ menyatakan vektor akar-akar karakteristik. Persamaan (2.4) dapat juga dituliskan ke dalam notasi sigma

$$x_j(t) = \sum_{i=1}^{2N} \psi_{ij} e^{\lambda_i t}; \quad (j=1,2,\dots,2N). \quad (2.5)$$

atau dalam bentuk matriks

$$\begin{Bmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_j(t) \\ \vdots \\ x_{2N}(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_{1,1} & \cdots & \psi_{i,1} & \cdots & \psi_{2N,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_{1,j} & \cdots & \psi_{i,j} & \cdots & \psi_{2N,j} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_{1,2N} & \cdots & \psi_{i,2N} & \cdots & \psi_{2N,2N} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} e^{\lambda_1 t} \\ \vdots \\ e^{\lambda_j t} \\ \vdots \\ e^{\lambda_{2N} t} \end{Bmatrix}, \quad (2.6)$$

Persamaan (2.2), (2.4), (2.5) atau (2.6) mengindikasikan bahwa respons struktur dibentuk dari kombinasi setiap modus getarnya.

Ide dasar dari identifikasi sistem dalam domain waktu dengan metode ITD adalah membentuk matriks sistem dari pengukuran respons struktur uji. Matriks sistem dibentuk melalui pencuplikan respons di setiap stasiun pengukuran pada suatu interval waktu cuplik dalam selang Δt untuk m data pencuplikan atau dalam waktu $m \cdot \Delta t$. Selanjutnya, persamaan (2.4) ditulis ulang dalam bentuk [8, 9, 13]

$$\mathbf{X} = \Psi \Lambda, \quad (2.7)$$

di mana

$$\mathbf{X} = (\mathbf{x}(t_1) \quad \dots \quad \mathbf{x}(t_k) \quad \dots \quad \mathbf{x}(t_m)),$$

$$\mathbf{x}(t_k) = (x_1(t_k) \quad \dots \quad x_j(t_k) \quad \dots \quad x_{2N}(t_k))^T,$$

$$\Psi = (\psi_1 \quad \dots \quad \psi_i \quad \dots \quad \psi_{2N}),$$

$$\psi_i = (\psi_{i,1} \quad \dots \quad \psi_{i,j} \quad \dots \quad \psi_{i,2N})^T,$$

$$\Lambda = \exp(\lambda_1 \quad \dots \quad \lambda_k \quad \dots \quad \lambda_m),$$

$$\lambda = (\lambda_1 \quad \dots \quad \lambda_i \quad \dots \quad \lambda_{2N})^T,$$

dengan \mathbf{X} adalah matriks respons struktur dengan ukuran $2N \times m$, $\mathbf{x}(t_k)$ merupakan vektor perpindahan yang dicuplik pada waktu ke- k , Ψ adalah matriks vektor karakteristik kompleks dengan ukuran $2N \times 2N$, ψ_i adalah vektor karakteristik kompleks untuk modus ke- i yang berukuran $2N \times 1$ dan Λ adalah matriks eksponensial akar-akar karakteristik struktur yang berukuran $2N \times m$, Persamaan (2.7) belum dapat ditemukan penyelesaiannya sehingga dibutuhkan formulasi lainnya. Jika data respons dalam persamaan (2.7) digeser dengan interval waktu Δt_1 dan tetap memiliki m panjang data, maka persamaan (2.7) ditulis ulang menjadi [8, 9, 13]

$$\hat{\mathbf{X}} = \hat{\Psi} \Lambda, \quad (2.8)$$

di mana

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{x}(t_1 + \Delta t_1) \quad \dots \quad \mathbf{x}(t_k + \Delta t_1) \quad \dots \quad \mathbf{x}(t_m + \Delta t_1)),$$

$$\mathbf{x}(t_k + \Delta t_1) = (x_1(t_k + \Delta t_1) \quad \dots \quad x_j(t_k + \Delta t_1) \quad \dots \quad x_{2N}(t_k + \Delta t_1))^T,$$

$$\hat{\Psi} = \Psi \begin{bmatrix} e^{\lambda_1 \Delta t_1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & e^{\lambda_{2N} \Delta t_1} \end{bmatrix} = \Psi \text{diag}(\exp(\lambda \Delta t_1)),$$

di mana $\hat{\mathbf{X}}$ adalah matriks respons struktur yang mengalami pergeseran interval waktu pencuplikan dengan ukuran $2N \times m$, Λ adalah matriks eksponensial akar-akar karakteristik struktur yang berukuran $2N \times m$, dan $\hat{\Psi}$ adalah matriks vektor karakteristik yang mengalami keterlambatan pencuplikan dengan ukuran $2N \times 2N$.

2.1.1 Penentuan parameter *modal* struktur yang diidentifikasi

Penerapan operasi aljabar matriks terhadap persamaan (2.7) dan (2.8) menghasilkan suatu formulasi yang dikenal dengan permasalahan nilai karakteristik standar (*standard eigen value problem* atau *standard EVP*) yang secara matematis dinyatakan oleh

$$\mathbf{H}\Psi - \hat{\Psi} = [\mathbf{H} - \text{diag}(\exp(\lambda \Delta t_1))]\Psi = \mathbf{0}, \quad (2.9)$$

dengan \mathbf{H} merupakan matriks sistem. Matriks sistem ini diperoleh dengan melakukan manipulasi secara matematis operasi aljabar matriks pada persamaan (2.7) dan (2.8) melalui penyelesaian kuadrat terkecil (*least square method*) untuk mendapatkan bentuk seperti pada persamaan (2.9). Matriks sistem dalam bentuk penyelesaian kuadrat terkecilnya dinyatakan secara matematis sebagai

$$\mathbf{H} = \hat{\mathbf{X}} \mathbf{X}^T [\mathbf{X} \mathbf{X}^T]^{-1} \quad (2.10)$$

atau

$$\mathbf{H} = \hat{\mathbf{X}} \hat{\mathbf{X}}^T [\hat{\mathbf{X}} \hat{\mathbf{X}}^T]^{-1}. \quad (2.11)$$

Matriks sistem seperti yang dideskripsikan oleh persamaan (2.10) dan (2.11) dapat diselesaikan untuk memperoleh parameter *modal* struktur melalui dekomposisi QR atau dekomposisi nilai singular (*singular value decomposition* atau SVD) [12, 13]. Untuk meminimalisasi galat dalam penghitungan rasio redaman, nilai rerata dari kedua persamaan ((2.10) dan (2.11)) dapat digunakan, yaitu [20]

$$\mathbf{H} = \frac{1}{2} \left[\hat{\mathbf{X}} \mathbf{X}^T [\mathbf{X} \mathbf{X}^T]^{-1} + \hat{\mathbf{X}} \hat{\mathbf{X}}^T [\hat{\mathbf{X}} \hat{\mathbf{X}}^T]^{-1} \right]. \quad (2.12)$$

Persamaan (2.12) merupakan matriks sistem yang dibentuk dari penerapan metode kuadrat terkecil ganda (*double least square method*).

Jika nilai dan vektor karakteristik kompleks dari penyelesaian EVP persamaan (2.9) untuk modulus ke-*i*-nya dapat ditulis masing-masingnya menjadi

$$\tilde{\lambda}_i = \Re(\tilde{\lambda}_i) + j\Im(\tilde{\lambda}_i) = \alpha_i + j\beta_i, \quad (2.13)$$

dan

$$\psi_i = \Re(\psi_i) + j\Im(\psi_i) = u_i + jv_i, \quad (2.14)$$

dengan α_i dan β_i menyatakan bagian riil dan imajiner eksponensial nilai akar-akar karakteristik kompleks (*complex eigenvalue*) ke-*i* matriks \mathbf{H} , serta $\tilde{\lambda}_i$ mengandung akar karakteristik ke-*i* dari sistem atau struktur yang diidentifikasi yang didefinisikan dengan

$$\tilde{\lambda}_i = e^{\lambda_i \Delta t_i}. \quad (2.15)$$

Kemudian dapat ditentukan nilai bagian riil dan imajiner akar-akar karakteristik kompleks, λ_i , yaitu

$$\Re(\lambda_i) = \alpha_i = \frac{1}{2\Delta\tau_i} \ln(\alpha_i^2 + \beta_i^2), \quad (2.16)$$

$$\Im(\lambda_i) = \beta_i = \frac{1}{\Delta\tau_i} \tan^{-1} \left(\frac{\beta_i}{\alpha_i} \right). \quad (2.17)$$

Parameter *modal* frekuensi pribadi dan redaman struktur dapat ditentukan berdasarkan persamaan (2.16) dan (2.17)

$$\omega_{n,i} = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}, \quad (2.18)$$

$$\omega_{d,i} = b_i, \quad (2.19)$$

$$\zeta_i = \frac{a_i}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}}. \quad (2.20)$$

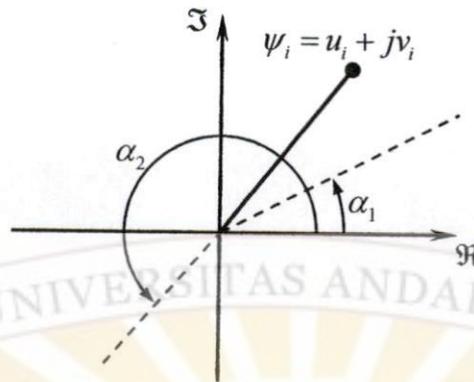
Vektor karakteristik kompleks (*complex eigenvectors*) atau disebut dengan modus getar kompleks, yaitu Ψ , merupakan modus getar struktur yang diperoleh melalui identifikasi dengan penerapan metode ITD. Interpretasi modus getar kompleks tidak seperti interpretasi modus getar normal (*normal eigenvectors*) yang mudah diperoleh melalui penyelesaian EVP matriks kekakuan dan massa struktur. Modus getar normal yang dihitung dari penyelesaian EVP ini selalu memiliki fasa 0 atau π . Modus getar normal dapat direpresentasikan sebagai gelombang berdiri (*standing wave*) sedangkan modus getar kompleks dapat dinyatakan sebagai gelombang berjalan (*travelling wave*) [1].

Ada beberapa metode untuk menginterpretasikan modus getar kompleks menjadi modus getar normal pendekatan. Diagram Argand dapat digunakan dalam merepresentasikan modus getar kompleks untuk menggambarkan sebaran komponen riil dan imajiner vektor kompleks yang diidentifikasi, seperti yang ditunjukkan oleh (Gambar 2.1) beserta dengan nilai konjugatnya [1, 25]. Mengacu pada komponen riil dan imajiner dapat diketahui bahwa untuk setiap nilai vektor modus getar kompleks memiliki distribusi magnitudo dan fasa tertentu. Berdasarkan diagram Argand juga dapat ditentukan kekompleksitasan suatu modus getar kompleks yang diidentifikasi [1, 37].

Jika setiap elemen vektor modus getar kompleks pada persamaan (2.14) dapat dinyatakan ke dalam magnitudo dan fasanya, maka dapat dituliskan sebagai

$$|\psi_i| = \sqrt{u_i^2 + v_i^2}, \quad (2.21)$$

$$\angle \psi_i = \theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{v_i}{u_i} \right). \quad (2.22)$$



Gambar 2.1 Bagian riil dan imajiner modulus getar kompleks dalam diagram Argand beserta batasan yang digunakan untuk menyatakannya sebagai modulus getar normal pendekatan [1, 25].

Nilai magnitudo pada persamaan (2.21) terdiri atas nilai positif dan negatif yang berkorelasi dengan fasa 0 atau π dan bergantung pada fasa modulus getar kompleks, persamaan (2.22). Persamaan (2.22) mengacu pada fasa sebarang α_1 dan α_2 seperti Gambar 2.1. Jika ϕ merupakan vektor modulus normal pendekatan, maka korelasinya dengan modulus getar kompleks dapat dinyatakan dengan [25, 37]

$$\angle \phi = \begin{cases} 0; & (\alpha_2 < \theta_i < \alpha_1), \\ \pi; & (\alpha_1 < \theta_i < \alpha_2). \end{cases} \quad (2.23)$$

Pemilihan α_1 dan α_2 yang tidak sesuai akan menghasilkan kekeliruan interpretasi dari hasil identifikasi modulus getar. Hal ini dapat dihindari melalui pengecekan keortogonalitas modulus normal pendekatan terhadap matriks massa struktur [33]. Keortogonalitas modulus normal pendekatan harus terpenuhi dengan persyaratan bahwa hasil perkalian berikut

$$\Phi^T \mathbf{M} \Phi = \mathbf{I}, \quad (2.24)$$

dengan \mathbf{I} menyatakan matriks identitas, Φ merupakan modulus normal pendekatan dan \mathbf{M} matriks massa struktur. Kekeliruan interpretasi dapat ditentukan jika perkalian $\Phi^T \mathbf{M} \Phi$ tidak menghasilkan nilai yang tidak nol pada *off-diagonal*-nya.

Metode lainnya yang juga dapat digunakan untuk menentukan modus getar normal dari modus getar kompleks hasil identifikasi, yaitu teori *oversized model* [11] dan metode Niedbal [33, 34, 38, 39]. Metode Niedbal dipilih untuk digunakan dalam penelitian ini disebabkan oleh kemudahan dalam penerapannya. Penerapan metode Niedbal didasarkan pada suatu asumsi bahwa modus getar normal dan modus getar kompleks dapat dihubungkan secara linier melalui penggunaan suatu matriks transformasi linier T . Hubungan secara matematis pernyataan ini didefinisikan dalam bentuk [33]

$$\Phi = \Psi T, \quad (2.25)$$

dengan Φ dan Ψ masing-masingnya merupakan matriks modus getar normal dan matriks modus getar kompleks. Matriks modus getar normal Φ hanya memiliki komponen riil saja, sedangkan matriks modus getar kompleks Ψ dan matriks transformasi linier T memiliki komponen riil dan imajiner (*complex matrices*). Untuk keperluan praktis komponen riil matriks transformasi linier T biasanya dinyatakan sebagai matriks riil identitas, I [33]. Melalui pemisahan persamaan (2.25) ke dalam komponen riil dan imajiner diperoleh

$$\Phi = \Re(\Psi)\Re(T) - \Im(\Psi)\Im(T), \quad (2.26)$$

$$0 = \Im(\Psi)\Re(T) + \Re(\Psi)\Im(T). \quad (2.27)$$

Dengan melakukan proses manipulasi matematis pada persamaan (2.27) didapatkan

$$\Im(T) = -[\Re(\Psi)^T \Re(\Psi)]^{-1} \Re(\Psi)^T \Im(\Psi)\Re(T). \quad (2.28)$$

Selanjutnya, pensubstitusian persamaan (2.28) ke dalam persamaan (2.26) menghasilkan modus getar normal Φ , yaitu

$$\Phi = \left[\Re(\Psi) + \Im(\Psi) [\Re(\Psi)^T \Re(\Psi)]^{-1} \Re(\Psi)^T \Im(\Psi) \right] \Re(T). \quad (2.29)$$

Persamaan (2.29) merupakan modus getar normal hasil transformasi linier dari modus getar kompleks.

2.1.2 Pengukuran *pseudo*

Matriks respons struktur (\mathbf{X} dan $\hat{\mathbf{X}}$) dibentuk berdasarkan jumlah respons terukur yang berkorelasi dengan jumlah kanal (*channel*) instrumen pengukuran. Mengacu pada persamaan (2.7) dan (2.8) diketahui bahwa pencuplikan respons memerlukan $2N$ kanal pada instrumen pengukuran yang realitanya terbatas. Kondisi ini dapat diatasi melalui penerapan pengukuran *pseudo* [12]. Pengukuran *pseudo* dilakukan pada n ($1 \leq n < 2N$) stasiun pengukuran di mana sisa $2N-n$ stasiun diberikan keterlambatan waktu pengukuran sebesar Δt_2 terhadap pengukuran di n stasiun pengukuran. Matriks respons yang dibentuk dari penerapan teknik pengukuran *pseudo* dideskripsikan secara matematis sebagai

$$\tilde{\mathbf{X}} = \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_n(t) \\ \mathbf{x}_p(t+r\Delta t_2) \end{Bmatrix}, \quad (2.30)$$

dengan $p = \text{ceil}(2N/n)$, $r = 1, 2, \dots, p$, dan $\text{ceil}(\dots)$ merupakan pembulatan ke bilangan bulat terdekat arah positif tak hingga. Demikian juga dengan persamaan matriks respons berikutnya, yaitu

$$\hat{\mathbf{X}} = \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_n(t+\Delta t_1) \\ \mathbf{x}_p(t+\Delta t_1+r\Delta t_2) \end{Bmatrix}. \quad (2.31)$$

Matriks sistem \mathbf{H} seperti yang diberikan oleh persamaan (2.12) dapat dibentuk dengan mengacu pada persamaan (2.30) dan (2.31).

2.1.3 Modal confidence factor (MCF)

Modus tertentu yang diekstraksi dari matriks sistem yang dibentuk melalui pengukuran *pseudo* dapat ditentukan apakah modus bersangkutan adalah modus riil struktur atau modus hasil komputasi. Untuk menyatakan modus tersebut otentik maka MCF digunakan untuk menjustifikasi kondisi ini. Faktor ini diperkenalkan dalam metode ITD pada tahun 1978 [40]. MCF ditentukan dengan menggunakan modus getar hasil identifikasi pada stasiun pengukuran sebenarnya dan dibandingkan dengan hasil identifikasi pada stasiun pengukuran yang sama yang telah mengalami keterlambatan pengukuran sebesar Δt_3 . Jika modus yang

diidentifikasi pada satu stasiun pengukuran adalah $\tilde{\psi}_{1,1}$ dan modulus teridentifikasi setelah keterlambatan pengukuran Δt_3 adalah $\tilde{\psi}_{n+1,1}$, maka MCF dapat dihitung sebagai berikut

$$\begin{aligned} \text{MCF}_1 &= \left| \frac{\tilde{\psi}_{n+1,1} e^{\lambda \Delta t_3}}{\tilde{\psi}_{n+1,1}} \right| \times 100\% \quad (\tilde{\psi}_{n+1,1} > \tilde{\psi}_{n+1,1} e^{\lambda \Delta t_3}), \\ &= \left| \frac{\tilde{\psi}_{n+1,1}}{\tilde{\psi}_{n+1,1} e^{\lambda \Delta t_3}} \right| \times 100\% \quad (\tilde{\psi}_{n+1,1} < \tilde{\psi}_{n+1,1} e^{\lambda \Delta t_3}), \end{aligned} \quad (2.32)$$

dengan $\tilde{\psi}_{n+1,1} = \tilde{\psi}_{1,1} e^{\lambda \Delta t_3}$ merupakan modulus yang diharapkan pada stasiun yang telah ditransformasikan. MCF selanjutnya dapat dideskripsikan dengan

$$\begin{aligned} \text{MCF}_2 &= \left| \frac{\tilde{\psi}_{n+2,1} e^{\lambda \Delta t_3}}{\tilde{\psi}_{n+2,1}} \right| \times 100\% \quad (\tilde{\psi}_{n+2,1} > \tilde{\psi}_{n+2,1} e^{\lambda \Delta t_3}), \\ &= \left| \frac{\tilde{\psi}_{n+2,1}}{\tilde{\psi}_{n+2,1} e^{\lambda \Delta t_3}} \right| \times 100\% \quad (\tilde{\psi}_{n+2,1} < \tilde{\psi}_{n+2,1} e^{\lambda \Delta t_3}), \end{aligned} \quad (2.33)$$

dengan $\tilde{\psi}_{n+2,1} = \tilde{\psi}_{1,1} e^{2\lambda \Delta t_3}$ dan seterusnya. Akhirnya, keseluruhan MCF (*Overall Modal Confidence Factor* atau OAMCF) dapat ditentukan dengan merata-ratakan nilai MCF, yaitu

$$\text{OAMCF} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \text{MCF}_i. \quad (2.34)$$

Penerapan selang waktu tunda sebesar Δt_3 berimplikasi pada proses penyusunan matriks sistem H , sehingga parameter *modal* berikut OAMCF setiap modulus dapat ditentukan. Berdasarkan kondisi ini, pengukuran *pseudo* sekarang ditujukan untuk mengisi setengah bagian atas matriks respons, \tilde{X} atau persamaan (2.30). Sementara itu, setengah bagian bawah matriks respons \tilde{X} diisi oleh setengah bagian atas matriks respons \tilde{X} yang telah ditunda selama interval waktu Δt_3 . Dengan demikian, matriks respons pada persamaan (2.30) dapat ditulis dalam bentuk [13]

$$\tilde{\mathbf{X}} = \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_n(t) \\ \mathbf{x}_p(t+r\Delta t_2) \\ \mathbf{x}_n(t+\Delta t_3) \\ \mathbf{x}_p(t+r\Delta t_2+\Delta t_3) \end{Bmatrix}, \quad (2.35)$$

dan

$$\hat{\tilde{\mathbf{X}}} = \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_n(t+\Delta t_1) \\ \mathbf{x}_p(t+\Delta t_1+r\Delta t_2) \\ \mathbf{x}_n(t+\Delta t_1+\Delta t_3) \\ \mathbf{x}_p(t+\Delta t_1+r\Delta t_2+\Delta t_3) \end{Bmatrix}. \quad (2.36)$$

dengan $p = \text{ceil}(N/n)$ dan $r = 1, 2, \dots, p$.

2.1.4 Perlakuan respons kecepatan dan percepatan dalam metode ITD

Metode ITD yang dibahas dalam bagian sebelumnya hanya menjelaskan masalah identifikasi parameter *modal* berdasarkan respons perpindahan struktur. Pengujian getaran secara luas dilakukan dengan menggunakan sensor percepatan (*accelerometer*) untuk mencuplik respons struktur uji. Meskipun tersedia sensor kecepatan dan perpindahan tetapi biasanya sensor tipe ini jarang digunakan. Untuk memperoleh respons perpindahan dari data percepatan yang dicuplik diperlukan proses integrasi sebanyak dua kali. Integrasi dapat dilakukan dengan menerapkan metode integrasi numerik atau integrator digital pada perangkat lunak instrumen akuisisi data.

Penggunaan integrasi ini harus dilakukan dengan hati-hati karena jika dalam data percepatan yang dicuplik terdapat *offset* dan adanya nilai awal yang tidak nol, maka akan menghasilkan hasil itegrasi yang salah (*erroneous*). Untuk mengatasi hal ini tentunya diperlukan *offsetting* data percepatan dan awal integrasi ketika respons melalui kondisi seimbang (*zero crossing*). Menurut Ibrahim [9], proses integrasi respons percepatan menjadi respons perpindahan tidak diperlukan, karena metode ITD juga dapat digunakan untuk identifikasi berdasarkan respons percepatan atau respons kecepatan. Kondisi ini dapat direalisasikan dengan melakukan manipulasi matematis.

Respons percepatan struktur dinyatakan dalam notasi sigma

$$\ddot{x}_j(t) = \sum_{i=1}^{2N} \lambda_i^2 \psi_{ij} e^{\lambda_i t}; \quad (j = 1, 2, \dots, 2N), \quad (2.37)$$

atau dalam notasi vektorial yang kompak

$$\ddot{\mathbf{X}} = \Psi \Lambda^n, \quad (2.38)$$

di mana

$$\Lambda^n = \begin{bmatrix} \lambda_1^2 e^{\lambda_1 t_1} & \dots & \lambda_1^2 e^{\lambda_1 t_k} & \dots & \lambda_1^2 e^{\lambda_1 t_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_1^2 e^{\lambda_1 t_1} & \dots & \lambda_1^2 e^{\lambda_1 t_k} & \dots & \lambda_1^2 e^{\lambda_1 t_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{2N}^2 e^{\lambda_{2N} t_1} & \dots & \lambda_{2N}^2 e^{\lambda_{2N} t_k} & \dots & \lambda_{2N}^2 e^{\lambda_{2N} t_m} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Persamaan (2.38) juga dapat dinyatakan dalam representasi *oversized model* dengan teknik pengukuran *pseudo*, seperti yang diberikan oleh persamaan (2.35) dan (2.36),

$$\tilde{\tilde{\mathbf{X}}} = \tilde{\tilde{\Psi}} \Lambda^n, \quad (2.40)$$

dan

$$\hat{\hat{\mathbf{X}}} = \hat{\hat{\Psi}} \Lambda^n = \tilde{\tilde{\Psi}} \text{diag}(\exp(\lambda \Delta t_i)) \Lambda^n. \quad (2.41)$$

Berdasarkan kedua persamaan ini dapat dibentuk matriks sistem dengan menerapkan metode kuadrat terkecil ganda [20]

$$\mathbf{H} = \frac{1}{2} \left[\hat{\hat{\mathbf{X}}} \tilde{\tilde{\mathbf{X}}}^T \left[\tilde{\tilde{\mathbf{X}}} \tilde{\tilde{\mathbf{X}}}^T \right]^{-1} + \tilde{\tilde{\mathbf{X}}} \hat{\hat{\mathbf{X}}}^T \left[\hat{\hat{\mathbf{X}}} \hat{\hat{\mathbf{X}}}^T \right]^{-1} \right]. \quad (2.42)$$

Parameter *modal* kemudian dapat diekstrak dengan menerapkan persamaan (2.17) dan (2.18) serta persamaan (2.21) dan (2.22). Sementara itu, untuk kasus respons kecepatan dapat dilakukan dengan mengikuti penjabaran dalam memperoleh persamaan (2.42).

2.1.5 Konstanta parametrik metode ITD

Identifikasi parameter *modal* berdasarkan respons getaran bebas melalui metode ITD dilakukan dengan memilih lima konstanta parametrik yaitu Δt_1 , Δt_2 , Δt_3 , T_{span} , dan N . Kelima konstanta parametrik tersebut terdiri atas empat konstanta waktu dan satu konstanta jumlah DoF (NDoF) yang diizinkan untuk diidentifikasi. Tulisan Pappa dan Ibrahim [13] merupakan bahan rujukan yang komprehensif untuk mengetahui bagaimana memilih kelima konstanta parametrik ini untuk proses identifikasi struktur dengan metode ITD.

Batas maksimum frekuensi struktur yang dapat diidentifikasi melalui penerapan metode ITD secara langsung berhubungan dengan pemilihan konstanta parametrik bersangkutan. Hubungan ini didefinisikan secara matematis sebagai [8]

$$f_{id \max} = \frac{1}{2\Delta t_1} = \frac{1}{2N_1\Delta t} \quad (2.43)$$

Ketika proses identifikasi dilakukan dengan metode ITD waktu cuplik antar pencuplikan respons dapat lebih besar dari waktu cuplik yang digunakan pada data akuisisi, misalkan $N_4\Delta t$, selanjutnya rentang maksimum frekuensi yang dapat diidentifikasi menjadi [20]

$$f_{id \max} = \frac{1}{2N_1N_4\Delta t} \quad (2.44)$$

dengan N_4 menyatakan bilangan bulat perkalian waktu cuplik. Jumlah kolom untuk proses identifikasi dengan metode ITD dapat ditentukan dari T_{span} yang merupakan waktu akhir (t_e) dikurangi waktu awal (t_i) respons yang akan diidentifikasi. Penghitungan jumlah kolom secara matematis mengacu pada

$$N_{col} = \frac{T_{span}}{N_4\Delta t} = \frac{t_e - t_i}{N_4\Delta t} \quad (2.45)$$

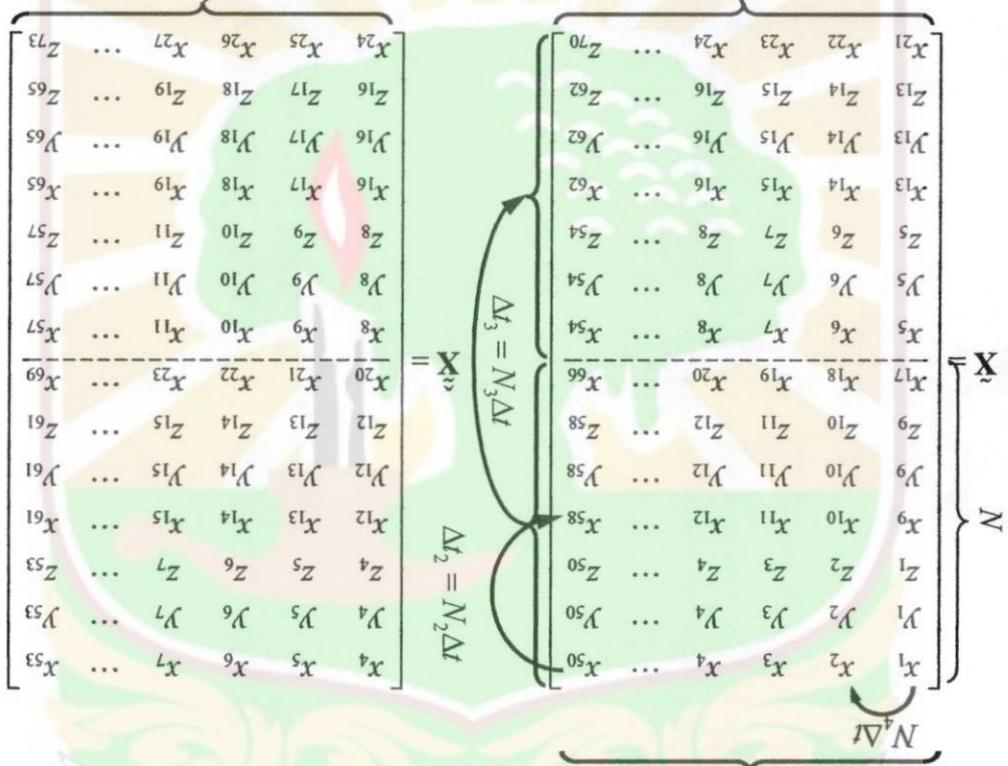
Ilustrasi penerapan persamaan (2.35) dan (2.36), serta kelima konstanta parametrik untuk membentuk matriks sistem untuk proses identifikasi dengan metode ITD ditunjukkan dalam Gambar 2.2.

Respons perpindahan dicuplik dengan interval Δt sebanyak 100 kali di tiga posisi pengukuran ($x, y, \text{ dan } z$)

$$\begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & \dots & x_{100} \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 & \dots & y_{100} \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 & \dots & z_{100} \end{pmatrix},$$

ingin diidentifikasi 7 modus ($2N = 14$), sehingga diperlukan teknik pengukuran *pseudo* untuk membentuk matriks respons \tilde{X} dan \tilde{X} , disini digunakan:

$$T^{\text{span}} = 50\Delta t, \quad M_1 = 3, N_2 = 8, N_3 = 4, N_4 = 1, \text{ dan } N = 7 \text{ DOF.}$$



Matriks sistem (persamaan (2.12))

$$H = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \tilde{X} \tilde{X}^T & \tilde{X} \tilde{X}^T \\ \tilde{X} \tilde{X}^T & \tilde{X} \tilde{X}^T \end{bmatrix}^{-1} + \tilde{X} \tilde{X}^T \begin{bmatrix} \tilde{X} \tilde{X}^T & \tilde{X} \tilde{X}^T \\ \tilde{X} \tilde{X}^T & \tilde{X} \tilde{X}^T \end{bmatrix}^{-1},$$

berlaku juga untuk respons kecepatan dan percepatan.

Gambar 2.2 Ilustrasi penerapan konstanta parametrik untuk membentuk matriks sistem dengan metode ITD [13, 20].

2.2 Metode *Random Decrement*

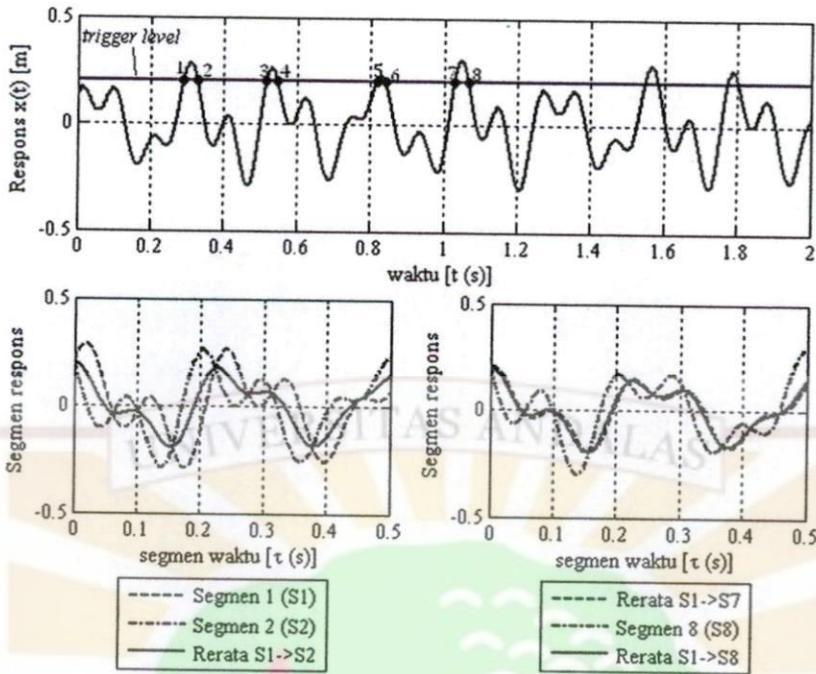
Metode RD diajukan pertama kali oleh Cole di akhir dekade 1960-an [14]. Metode ini merupakan metode untuk mengkonversikan respons acak (akibat eksitasi acak yang tidak terukur atau diketahui) dari suatu struktur yang diidentifikasi menjadi respons getaran bebas melalui proses perataan (*averaging*) respons. Respons dinamik sistem LTI akibat gangguan acak merupakan kombinasi dari respons (jawab sistem) bagian getaran bebas (jawab *transient*) dan bagian getaran paksa akibat eksitasi acak (jawab *steady state*). Respons bagian getaran bebas (jawab *transient*) dibangun atas dua kondisi awal, yaitu simpangan awal dan kecepatan awal. Ketiga kombinasi respons ini untuk suatu posisi pengukuran respons dinyatakan secara matematis sebagai

$$\mathbf{x}(t+t_0) = \mathbf{x}(t+t_0)|_{x_0} + \mathbf{x}(t+t_0)|_{\dot{x}_0} + \mathbf{x}(t+t_0)|_{f(t)}, \quad (2.46)$$

di mana suku pertama ruas kanan merupakan respons karena kondisi simpangan awal saat t_0 , suku keduanya adalah respons struktur akibat kondisi kecepatan awal saat t_0 dan suku ketiga ruas kanan merupakan respons akibat gangguan acak dari t_0 hingga $t+t_0$.

Fungsi RD diperoleh melalui perataan respons dari setiap segmen waktu (τ) dari setiap respons terukur. *Noise* yang terkandung dalam respons dapat direduksi melalui penerapan perataan respons tiap segmen waktu seperti yang dihasilkan oleh fungsi RD [14-21]. Awal dari setiap segmen respons dimulai ketika respons perpindahan mencapai suatu nilai tertentu (kondisi *trigger*), yaitu $x(t_0) = x_0$. Ilustrasi dari konsep dasar RD ditunjukkan oleh Gambar 2.3.

Mengacu pada Gambar 2.3 diketahui terdapat 12 titik *trigger* dan hanya 8 titik *trigger* yang digunakan untuk segmen waktu τ selama 0.5 s. Jika hanya digunakan 2 titik *trigger*, maka fungsi RD yang diperoleh merupakan rerata dari segmen respons dari titik 1 hingga titik 1 ditambah τ dan segmen respons dari titik 2 hingga titik 2 ditambah τ . Dengan penerapan 8 titik *trigger* menghasilkan rerata kedelapan segmen respons dimulai dari titik 1 hingga 8 untuk segmen waktu 0.5 s.



Gambar 2.3 Ilustrasi konsep RD [21].

Untuk suatu respons tunggal akibat eksitasi acak tunggal fungsi RD dapat dinyatakan secara matematis dengan

$$D_{xx}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \{ \mathbf{x}(\tau + t_i) | \mathbf{x}_0 \}, \quad (2.47)$$

dengan N jumlah titik-titik *trigger*, x_0 merupakan kondisi pen-*trigger*-an dan selang waktu setiap *trigger* dilakukan adalah $\tau = t - t_i$. Persamaan (2.47) dikenali sebagai korelasi langsung satu sinyal respons tercuplik. Fungsi RD dapat juga dinyatakan sebagai korelasi silang dua sinyal respons di posisi pencuplikan berbeda yang diformulasikan secara matematis sebagai

$$D_{xy}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \{ \mathbf{y}(\tau + t_i) | \mathbf{x}_0 \}. \quad (2.48)$$

Persamaan (2.48) menyatakan respons $y(t)$ direratakan dengan menggunakan *triggering level* respons $x(t)$. Formulasi umum dari persamaan (2.47) dan (2.48) dinyatakan kembali dalam bentuk

$$D_{xx}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \{ \mathbf{x}(\tau + t_i) | T_{\mathbf{x}}(t_i) \}, \quad (2.49)$$

$$D_{xy}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \{ \mathbf{y}(\tau + t_i) | T_{\mathbf{x}}(t_i) \}, \quad (2.50)$$

dengan $T_{\mathbf{x}}(t_i)$ merupakan kondisi *triggering* dalam metode RD, yaitu:

1. *level crossing*

$$T_{\mathbf{x}}(t_i) = T_{\mathbf{x}}^L = \{ \mathbf{x}(t_i) = \mathbf{x}_0 \}, \quad (2.51)$$

2. *positive points*

$$T_{\mathbf{x}}(t_i) = T_{\mathbf{x}}^P = \{ 0 \leq \mathbf{x}(t_i) < \mathbf{x}_0 \}, \quad (2.52)$$

3. *local extremum*

$$T_{\mathbf{x}}(t_i) = T_{\mathbf{x}}^E = \{ \mathbf{x}_0 \leq \mathbf{x}(t_i) < \mathbf{x}_0, \dot{\mathbf{x}}(t_i) = 0 \}, \quad (2.53)$$

Triggering selalu mengacu pada nilai akar kuadrat rata-rata (*root mean square* atau disingkat dengan RMS) dari respons struktur, $\sigma_{\mathbf{x}}$, dengan \mathbf{x} menyatakan data respons struktur (*time series response*). Nilai optimum dari *triggering* jenis level crossing dipenuhi ketika $\sqrt{2}\sigma_{\mathbf{x}}$ [18]. Untuk *positive points* biasanya dipilih kondisi *triggering* dari 0 hingga ∞ dari RMS respons, karena jumlah titik-titik *triggering* menjadi maksimum [18]. Kondisi ini akan memiliki pengaruh langsung pada kualitas hasil identifikasi, karena proses *triggering* ditujukan untuk menghasilkan fungsi RD.

2.3 Kriteria Penilaian Hasil Identifikasi

Keabsahan hasil identifikasi dalam ranah waktu secara umum mengacu pada kriteria-kriteria penilaian (*assesment*). Kriteria ini berdasarkan suatu kondisi di mana modus hasil identifikasi dapat ditentukan sebagai modus riil (*real modes*) struktur atau hanya modus *noise* (*noise modes*). Kriteria-kriteria yang digunakan untuk menjustifikasi hasil identifikasi dinyatakan sebagai berikut:

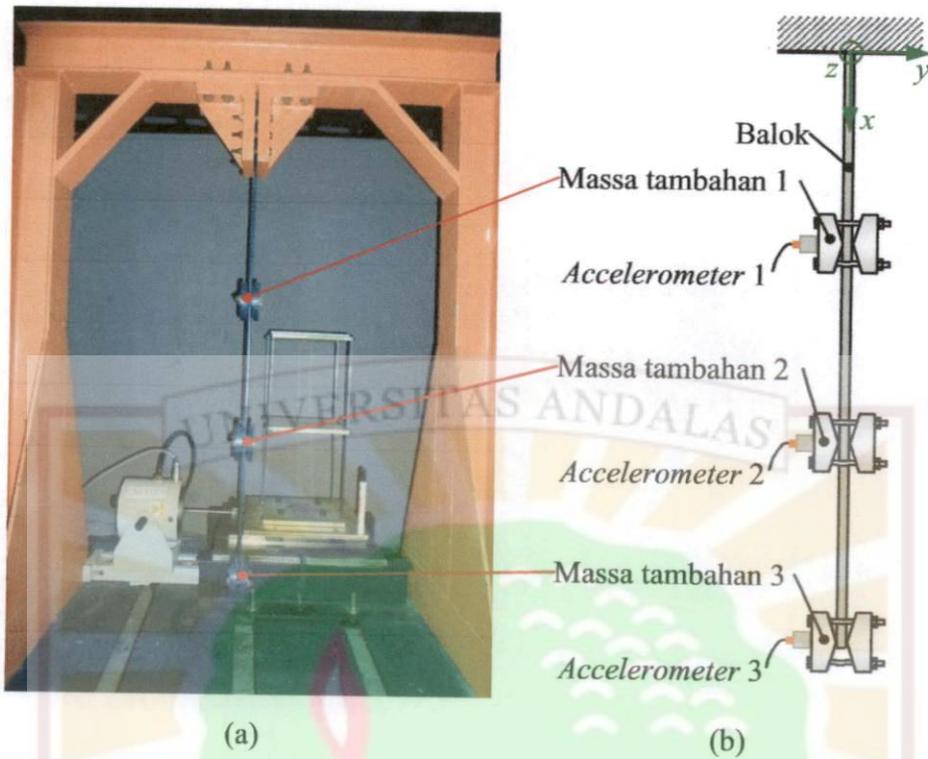
1. Akar-akar karakteristik merupakan pasangan akar-akar kompleks dan konjugatnya [18]. Jika akar-akar karakteristik hanya memiliki bagian riil saja, maka akar-akar terkait dapat dikeluarkan dari hasil identifikasi, karena menghasilkan identifikasi rasio redaman dengan nilai sebesar 100%.
2. Struktur secara umum memiliki karakteristik redaman rendah (*light damping*) dan biasanya rasio redaman ini bernilai di bawah 5%, kadang juga disebutkan di bawah 10% [18]. Penelitian ini menerapkan hasil identifikasi maksimum nilai redaman *modal* sebesar 5%, tetapi program komputasi metode ITD tetap menampilkan redaman *modal* yang bernilai kecil dari 10%.
3. OAMCF seperti yang telah dijelaskan sebelumnya digunakan untuk membedakan suatu modus merupakan modus riil struktur atau hanya modus hasil komputasi (*computed or noise modes*). Nilai OAMCF dari modus riil struktur bernilai di atas 90%, sedangkan untuk nilai OAMCF di bawah 90% dinyatakan sebagai modus hasil komputasi [18, 40].
4. Diagram kestabilan dapat diterapkan untuk menentukan suatu modus apakah merupakan modus stabil atau modus takstabil (atau disebut juga modus *noise*). Modus stabil dinyatakan dengan keasimtotikan hasil identifikasi pada nilai frekuensi pribadi struktur untuk setiap kenaikan NDoF yang digunakan. Sedangkan modus takstabil ditentukan sebaliknya. Diagram kestabilan dibangun berdasarkan tiga kriteria penilaian hasil identifikasi yang telah disebutkan di atas. Melalui diagram ini dapat diketahui suatu hubungan antara rasio redaman terhadap frekuensi dan jumlah NDoF yang digunakan untuk proses identifikasi.

3 METODOLOGI PENELITIAN

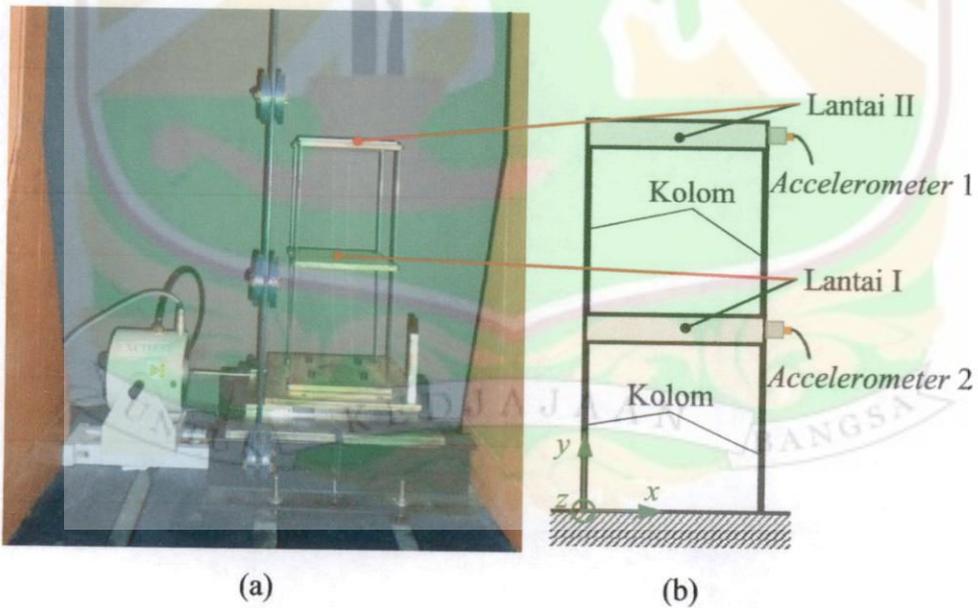
Struktur umumnya menerima sejumlah gangguan yang cukup sulit diketahui selama masa operasinya dan bersifat acak. Sebagai contoh, mobil yang sedang dikendarai di jalan raya mengalami gangguan luar dari kontur jalan yang ditempuhnya dan pengaruh gaya aerodinamik. Tipe gangguan seperti ini dapat dikelompokkan sebagai jenis gangguan acak. Gangguan ini dapat dimodelkan ke dalam persamaan matematika tetapi parameter-parameter tertentu cukup sulit diketahui. Penerapan OMA sebagai alternatif untuk menanggulangi kondisi ini dapat diimplementasikan pada struktur yang akan diidentifikasi. OMA sangat handal digunakan untuk proses identifikasi berdasarkan data respons ketika ketiadaan data gangguan yang tercuplik.

Penelitian ini dilakukan dalam ranah identifikasi struktur akibat eksitasi acak. Metode ITD dan RD secara penuh diterapkan untuk proses identifikasi struktur. Proses identifikasi dilakukan melalui kaji numerik dan eksperimental dari kedua metode tersebut. Untuk mendukung kelancaran penelitian beberapa program simulasi berbasis metode elemen hingga (*finite element method* atau FEM) dan identifikasi dengan basis kedua metode tersebut dibangun dalam bahasa pemrograman MATLAB berikut fitur grafisnya. Program yang telah dibangun ini dinamakan dengan EAPack (*Engineering Analysis Package*).

Dua struktur uji skala laboratorium yang ditunjukkan dalam Gambar 3.1 dan Gambar 3.2, digunakan dalam penelitian ini. Model balok gantung dengan tiga massa tambahan (struktur uji 1) dan model bangunan dua lantai (struktur uji 2) akan dikaji dengan penerapan analisis numerik dan pengujian *modal*. Nilai-nilai numerik dari sifat-sifat fisik kedua struktur uji diperlihatkan dalam Tabel 3.1 dan Tabel 3.2.



Gambar 3.1 Model balok dengan tambahan 3 massa terpusat sebagai struktur uji 1 (a) foto struktur uji dan (b) model skematik.



Gambar 3.2 Model bangunan dua lantai sebagai struktur uji 2 (a) foto struktur uji dan (b) model skematik.

Tabel 3.1 Sifat-sifat fisik balok gantung dengan tambahan tiga massa terpusat (Gambar 3.1).

Parameter	Nilai numerik
Balok:	
Panjang (ℓ)	0.8400 m
Penampang ($A = b \times h$)	$0.0381 \text{ m} \times 0.0060 \text{ m}$
Modulus elastisitas (E)	$1.9000 \times 10^{11} \text{ Pa}$
Massa jenis (ρ)	$7.5722 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Massa tambahan 1:	
Massa (m_1)	1.0950 kg
Inersia massa (J_{1zz})	$5.1352 \times 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
Massa tambahan 2:	
Massa (m_2)	1.0530 kg
Inersia massa (J_{2zz})	$4.8836 \times 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
Massa tambahan 3:	
Massa (m_3)	1.0650 kg
Inersia massa (J_{3zz})	$4.9548 \times 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

Tabel 3.2 Sifat-sifat fisik model struktur bangunan dua lantai (Gambar 3.2).

Parameter	Nilai numerik
Kolom:	
Dimensi ($p \times \ell \times t$)	$210 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$
Modulus elastisitas (E)	$1.9000 \times 10^{11} \text{ Pa}$
Massa jenis (ρ)	7700 kg/m^3
Lantai:	
Dimensi ($p \times \ell \times t$)	$200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$
Modulus elastisitas (E)	$2.0000 \times 10^{11} \text{ Pa}$
Massa jenis (ρ)	7900 kg/m^3
Poisson's ration (ν)	0.2900

3.1 Kaji Numerik

Kaji numerik proses identifikasi merupakan suatu tahap awal untuk mengetahui keefektifan program identifikasi yang telah dibangun. Simulasi proses identifikasi dilakukan dengan pembuatan program komputasi struktur dan identifikasinya. Tahap pertama adalah menentukan respons struktur akibat gangguan luar yang diberikan. Kedua struktur uji skala laboratorium berikut dengan parameter fisiknya ditransfer ke model fisik untuk selanjutnya didiskritisasi dengan FEM dalam rangka memperoleh model matematikanya.

Diskritisasi struktur uji model pertama (Gambar 3.1) untuk 120 elemen dilakukan dengan menggunakan elemen balok berdasarkan teori Euler-Bernoulli (hipotesa Bernoulli-Naviér) [35, 36]. Model kedua (Gambar 3.2) didiskritisasi melalui penggunaan elemen rangka bidang sebanyak 72 elemen. Elemen pada struktur kolom didekati dengan teori Euler-Bernoulli sedangkan elemen pada lantainya dimodelkan dengan teori balok Timoshenko [35, 36]. Respons struktur uji dapat dengan mudah ditentukan dari model model matematik yang telah dibangun.

Respons struktur disimulasikan secara numerik berdasarkan data dari struktur uji melalui penerapan FEM. Metode integrasi langsung Newmark- β yang dikombinasi dengan analisis *modal* diterapkan untuk memperoleh hasil simulasi respons struktur. Metode Newmark- β merupakan metode numerik integrasi langsung yang mengasumsikan variasi linier percepatan dalam selang waktu Δt (dari t ke $t+\Delta t$). Integrasi Newmark- β memiliki kestabilan tidak bersyarat (*unconditionally stable*) yang ditentukan dari kedua parameter integrasi, α dan β , yang biasa dipilih masing-masingnya 0.5 dan 0.25 [41]. Simulasi numerik respons struktur dilakukan dalam selang waktu (*numerical sampling time*) yang memenuhi persyaratan $\Delta t \leq 0.05/f_h$, dengan f_h merupakan frekuensi tertinggi struktur [41]. Analisis *modal* (penyelesaian EVP) struktur diselesaikan dengan penerapan metode Arnoldi/Lanczos [27].

Simulasi respons pada model struktur uji 1 dilakukan dengan memberikan gangguan impuls setengah sinus pada massa tambahan ketiga. Sementara itu, gangguan acak yang memenuhi statistik Gaussian digunakan untuk mengeksitasi

struktur uji kedua yang diberikan pada tumpuannya. Untuk model redaman dipilih jenis redaman *modal*. Nilai redaman modal yang disimulasikan dinyatakan sebagai redaman rendah dengan nilai $\leq 5\%$. Kontribusi redaman *modal* ini disimulasikan dengan nilai yang sama (struktur uji 1) dan bervariasi (struktur uji kedua) untuk setiap modus yang terlibat. Respons percepatan dipilih sebagai data masukan untuk proses identifikasi.

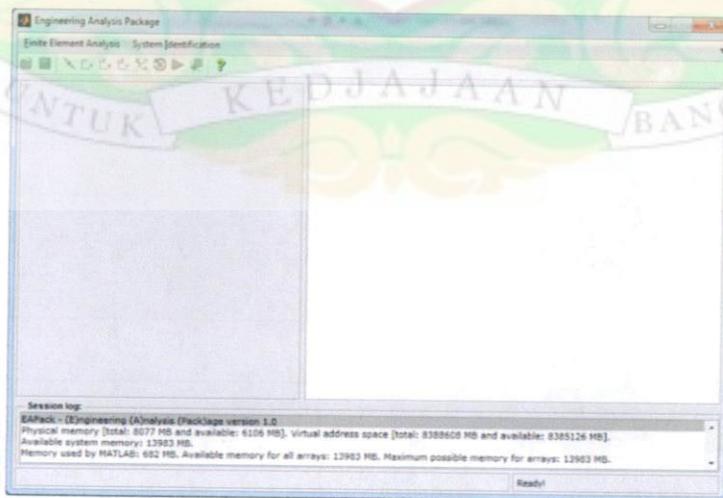
Metode ITD diterapkan untuk identifikasi respons getaran bebas dan kombinasi RD dan ITD untuk respons getaran paksa acak. Untuk dapat menghampiri kondisi dalam pengujian *modal* sejumlah *noise* ditambahkan pada data respons struktur. Model *noise* yang ditambahkan pada respons struktur berupa Gaussian *white noise* dengan rasio *noise* terhadap sinyal (*noise to signal ratio* disingkat NSR) bervariasi. Variasi tingkat *noise* yang terkandung dalam data respons (NSR) ditentukan berdasarkan rasio RMS (*root mean square*) *noise* terhadap RMS respons. Partisipasi *noise* yang ditambahkan adalah sebesar 0.01%, 0.05%, 0.10%, 0.50%, 1.00%, 2.00%, 5.00%, 10.00%, 20.00%, 50.00%, 100.00% dan 200.00%. Adanya penambahan *noise* ini ditujukan untuk mengetahui keefektifan metode ITD dalam mengekstrak parameter *modal* struktur.

Respons getaran bebas atau dikenal dengan fungsi RD diperoleh melalui penerapan kondisi *triggering* pada respons getaran paksa acak yang dicuplik. Proses *triggering* dapat diimplementasikan pada respons simpangan, kecepatan, dan percepatan struktur akibat eksitasi paksa. Penelitian ini akan membahas penerapan untuk data respons percepatan dengan alasan yang telah disebutkan sebelumnya. Untuk metode RD dipilih tiga jenis *triggering* yaitu *level crossing* ($T_{x(t)}^L$) dan *positive points* ($T_{x(t)}^P$). Pemilihan ketiga jenis kondisi *triggering* ini disebabkan oleh kemudahan dalam penggunaannya untuk memperoleh fungsi RD.

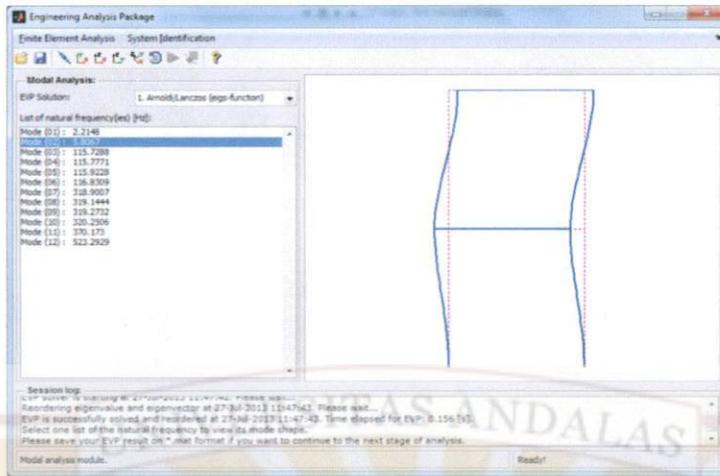
Program analisis *modal* dan respons secara numerik serta program identifikasi parameter *modal* dari respons struktur diimplementasikan dalam EAPack (*Engineering Analysis Package*) pada perangkat lunak MATLAB R2013a. Perangkat lunak MATLAB R2013a dijalankan pada PC *desktop* Intel® Core™ i7-3770K 8 × 3.50 GHz arsitektur 64 bit dengan *memory* (RAM) 8 GB. Modul

EAPack ini dibangun secara interaktif dengan mengimplementasikan fitur grafis (*graphical user interface*), seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3.3. Konten dari MATLAB-EAPack ini secara garis besar dibagi atas dua, yaitu

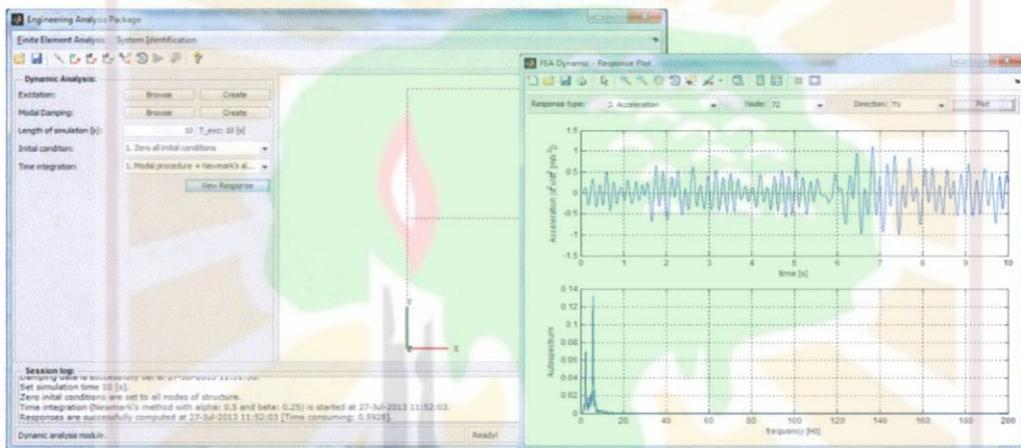
1. Modul analisis elemen hingga untuk simulasi numerik dinamika struktur (submodul *Modal Analysis* dan *Dynamic Analysis*) melalui prosedur analisis *modal*, yang terdiri atas baca data *mesh* struktur, pembentukan dan penggabungan matriks massa dan kekakuan struktur, penghitungan masalah nilai dan vektor karakteristik (*eigenvalue problem* atau EVP), eksitasi luar pada struktur untuk tipe gangguan di tumpuan dan di nodal, redaman *modal* struktur, kondisi awal struktur, penghitungan respons dengan metode numerik integrasi waktu, serta *post-processing*. Tampilan antarmuka submodul ini diperlihatkan dalam Gambar 3.4.
2. Modul identifikasi struktur dengan kajian *Operational Modal Analysis* (OMA) yang berbasis metode ITD berikut kombinasinya dengan metode RD, terdiri atas subprogram baca data respons dan koordinat *virtual sensor placement*, subprogram identifikasi untuk mengekstrak data parameter *modal* berdasarkan data respons dengan berbagai teknik yang digunakan, dan *post-processing* untuk visualisasi modus getar struktur yang teridentifikasi. Submodul ini dapat digunakan untuk data respons simulasi numerik dan data respons yang dicuplik dalam pengujian *modal*. Tampilan antarmuka submodul ini diperlihatkan dalam Gambar 3.5.



Gambar 3.3 Tampilan antarmuka PPI EAPack.

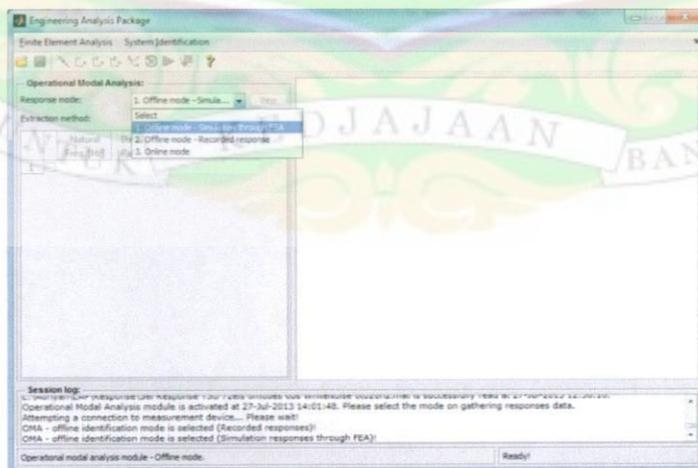


(a)



(b)

Gambar 3.4 Tampilan antarmuka PPI EAPack untuk modul (a) *modal analysis* dan (b) *dynamic analysis*.



Gambar 3.5 Tampilan antarmuka PPI EAPack untuk modul *operational modal analysis (OMA)*.

3.2 Kaji Eksperimental

Pengujian *modal* pada struktur uji dalam Gambar 3.1 dan 3.2 dilakukan untuk validasi simulasi numerik yang telah dilakukan. Struktur uji dieksitasi dengan tiga jenis sumber gangguan, yaitu eksitasi kejut, *random white noise* dan *pseudorandom*. Ketika jenis eksitasi yang diterapkan diasumsikan berupa eksitasi *ambient*. Eksitasi pertama diberikan pada struktur uji 1 (model 1) berupa eksitasi kejut yang dihasilkan melalui penerapan *impact hammer* pada massa tambahan ketiga. Data *random white noise* dan *pseudorandom* dikirim ke *vibration generator* agar dapat digunakan oleh *exciter* untuk mengeksitasi struktur uji 2 (model kedua). Kedua pengujian modal beserta konfigurasi peralatan pengujian kedua model ini ditunjukkan dalam Gambar 3.6 dan 3.7.

Pengujian *modal* dilakukan melalui penerapan kajian OMA, sehingga hanya data respons struktur uji yang dicuplik. Respons struktur uji berupa respons percepatan dicuplik dengan menggunakan sensor *accelerometer* Brüel & Kjær (B&K) tipe 4507 dan 4508 data akusisi *digital signal analyzer* (DSA) B&K. Kedua tipe *accelerometer* B&K ini memiliki sensitivitas sebesar $0.01 \text{ V/m}\cdot\text{s}^{-2}$. Sementara itu, respons yang telah diakusisi ditampilkan secara interaktif dengan perangkat lunak B&K Pulse 7.0. Melalui perangkat lunak ini, data respons yang dicuplik disimpan dalam media penyimpanan (*hard disk*) di komputer untuk digunakan dalam proses identifikasi dengan menggunakan modul EAPack submodul OMA.

Respons kedua struktur uji yang dicuplik adalah berupa respons getaran bebas untuk struktur uji 1 dan respons getaran paksa acak untuk struktur uji 2. Selang waktu pencuplikan kedua respons ini mengacu pada kondisi rentang frekuensi maksimum yang akan diidentifikasi. *Low pass filter* (LPF) diterapkan secara otomatis oleh perangkat lunak B&K Pulse 7.0 berdasarkan nilai frekuensi maksimum yang akan diidentifikasi. LPF ditujukan untuk menghindari fenomena *aliasing* pada sinyal respons yang dicuplik.



Gambar 3.6 Struktur uji dan instrumentasi pengujian untuk model uji 1 (model balok gantung dengan 3 massa tambahan).



Gambar 3.7 Struktur uji dan instrumentasi pengujian untuk model uji 2 (model bangunan dua lantai).

Metode ITD serta RD dan ITD dalam modul EAPack digunakan untuk mengekstrak parameter *modal* struktur uji berdasarkan data respons yang telah dicuplik. Kaji eksperimental ini ditujukan untuk melakukan validasi algoritma identifikasi yang telah dibangun dan digunakan untuk data respons hasil simulasi. Teknik-teknik pengolahan sinyal hasil pengujian *modal* juga diterapkan pada modul EAPack ini. Tampilan antarmuka submodul OMA diperlihatkan dalam Gambar 3.5.



4 IDENTIFIKASI PARAMETER *MODAL* MELALUI PENERAPAN METODE IBRAHIM *TIME DOMAIN*

Bagian ini menyajikan hasil dan pembahasan dari penerapan metode ITD dalam proses identifikasi parameter *modal* struktur melalui kaji numerik dan kaji eksperimental. Kedua kajian dilakukan melalui penggunaan paket program identifikasi yang telah dibangun dengan struktur uji seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3.1. Gangguan transien berupa eksitasi kejut diberikan pada struktur di massa tambahan ketiga sehingga respons getaran yang terjadi merupakan respons getaran bebas. Respons getaran bebas tersebut selanjutnya digunakan sebagai data masukan untuk proses identifikasi parameter *modal* melalui metode ITD.

4.1 Identifikasi Parameter *Modal* Struktur Melalui Metode ITD dengan Menggunakan Data Respons Hasil Komputasi Numerik

Model uji balok gantung dengan tambahan tiga massa terpusat (Gambar 3.1) dimodelkan berdasarkan teori balok Euler-Bernoulli (Bernoulli-Navier *hypothesis*). Persamaan gerak sistem diturunkan secara numerik dengan menggunakan metode elemen hingga (FEM). Elemen balok isoparametrik linier digunakan dalam analisis FEM berdasarkan model balok Euler-Bernoulli. Sifat-sifat fisik model balok gantung diperlihatkan dalam Tabel 3.1.

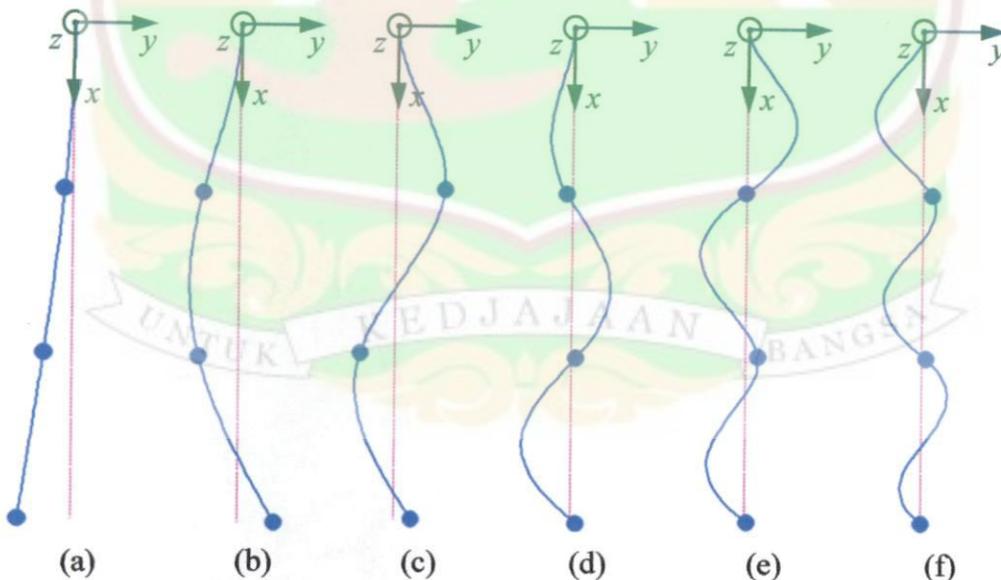
Sebagai bahan perbandingan, parameter *modal* struktur hasil identifikasi dikomparasi dengan parameter *modal* yang diperoleh dari simulasi numerik masalah bilangan pribadi (EVP). Simulasi numerik EVP diterapkan melalui penggunaan metode Arnoldi/Lanczos [27]. Hasil penghitungan frekuensi pribadi

balok uji melalui simulasi numerik ditunjukkan dalam Tabel 4.1. Modus getar struktur hasil penghitungan numerik selanjutnya ditunjukkan dalam Gambar 4.1.

Tabel 4.1 Frekuensi pribadi balok gantung dengan tiga massa tambahan.

Modus	f [Hz]	Modus	f [Hz]
1	3.1037	7	476.3872
2	19.5281	8	595.9389
3	52.5920	9	701.0229
4	165.8033	10	1132.2211
5	246.8868	11	1188.3678
6	356.2033	12	1246.9751

Pada Gambar 4.1 terlihat bahwa posisi ketiga massa tambahan pada modus keempat, kelima dan keenam berada di sekitar simpul modus getar. Kondisi ini disebabkan oleh konstribusi respons dari modus-modus tersebut sangat kecil dibandingkan dengan ketiga modus terendah. Pada saat pengujian *modal* dilakukan perlu diperhatikan bahwa penempatan sensor pada posisi massa tambahan sedapat mungkin dihindari, karena pada kondisi ini respons yang dicuplik sangat sulit dibedakan dengan *noise*.

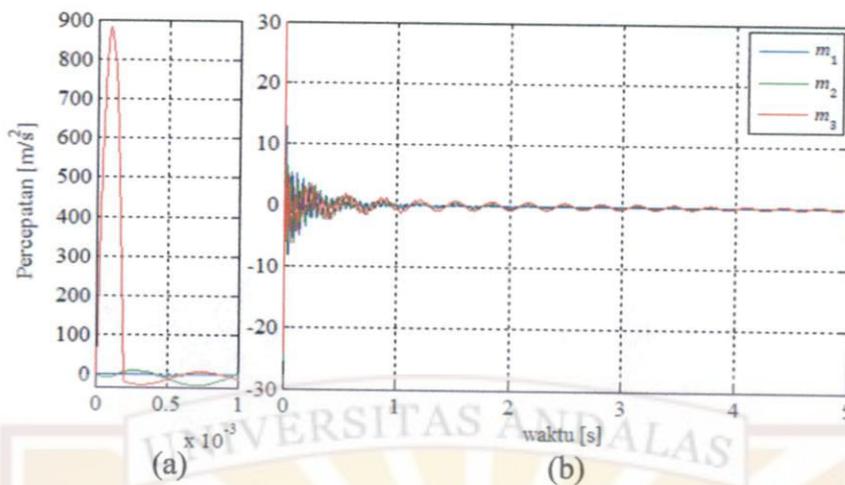


Gambar 4.1 Enam modus getar terendah balok uji (a) modus pertama ($f_1 = 3.1037$ Hz), (b) modus kedua ($f_2 = 19.5281$ Hz), (c) modus ketiga ($f_3 = 52.5920$ Hz), (d) modus keempat ($f_4 = 165.8033$ Hz), (e) modus kelima ($f_5 = 246.8868$ Hz), (f) modus keenam ($f_6 = 356.2033$ Hz).

Simulasi respons struktur dalam ranah waktu dihitung dengan menggunakan metode integrasi numerik Newmark- β . Integrasi numerik dilakukan dalam koordinat *modal* untuk 6 dan 12 modus getar terendah. Selang waktu integrasi numerik untuk 6 dan 12 modus getar terendah masing-masing sebesar 10^{-4} s dan 10^{-5} s. Pemilihan dua belas modus terendah ditujukan untuk melihat pengaruh frekuensi-frekuensi tinggi terhadap data respons struktur. Kondisi ini dibuat untuk mengevaluasi kemampuan metode ITD dalam mengidentifikasi 6 modus terendah struktur dalam lingkungan yang tercemar *noise* frekuensi tinggi. Di samping adanya *noise* frekuensi tinggi yang berasal dari modus getar orde tinggi, pada data respons struktur juga ditambahkan *noise* buatan yang berupa *white noise*.

Gaya gangguan berupa impuls setengah sinus diterapkan pada model balok uji pada posisi massa tambahan ketiga (m_3). Amplitudo gangguan adalah sebesar 1000 N dengan durasi impuls selama 2×10^{-4} s. Respons percepatan struktur dicuplik pada ketiga posisi massa tambahan. Kondisi awal berupa simpangan awal dan kecepatan awal struktur balok berharga nol. Sementara itu, redaman struktur diasumsikan berupa redaman *modal* dengan nilai sebesar 2% untuk keseluruhan modus yang terlibat dalam proses penghitungan respons. Simulasi respons struktur dilakukan selama 5 s melalui integrasi numerik Newmark- β . Hasil simulasi respons percepatan untuk kontribusi 12 modus terendah yang dicuplik pada ketiga posisi massa tambahan ditunjukkan dalam Gambar 4.2.

Parameter *modal* struktur diidentifikasi melalui metode ITD dengan menggunakan data respons struktur yang telah dihitung. Seperti yang telah dinyatakan sebelumnya bahwa identifikasi digunakan untuk menentukan modus-modus struktur yang berada dalam rentang frekuensi 0-400 Hz. Identifikasi dilakukan pada data respons percepatan struktur untuk beberapa kondisi. Pada kondisi pertama, identifikasi dilakukan terhadap data respons yang dihitung menggunakan 6 modus terendah struktur. Dalam hal ini, kontribusi dari modus lainnya diabaikan. Sedangkan pada kondisi kedua, 12 modus terendah struktur digunakan untuk membangun respons untuk proses identifikasi.



Gambar 4.2 Respons percepatan di ketiga massa tambahan akibat eksitasi impuls setengah sinus pada m_3 (a) ketiga respons untuk durasi 0-1 ms dan (b) ketiga respons untuk durasi 0-5 s.

Proses identifikasi terhadap data respons hasil simulasi dilakukan untuk kondisi data respons yang bercampur *noise*. Kandungan *noise* dalam data respons struktur ditentukan oleh rasio RMS *noise* terhadap respons seperti yang telah disebutkan pada Bab 3. Keefektifan metode ITD dalam proses identifikasi dievaluasi berdasarkan jumlah data respons yang digunakan. Dalam kaji numerik digunakan paling sedikit 2 data respons untuk menentukan minimum 6 modus terendah struktur (*identified DoF* atau NDoF (N)).

4.1.1 Kasus 1: Identifikasi berdasarkan kontribusi 6 modus getar terendah

Identifikasi dilakukan terhadap hasil komputasi respons percepatan struktur balok menggunakan 6 modus terendah. Penggunaan data respons percepatan disebabkan karena respons percepatan lebih mudah diukur dalam pengujian. Posisi pencuplikan data respons percepatan divariasikan untuk posisi-posisi sensor sebagai berikut: kondisi A pada massa tambahan 1 (m_1) dan 2 (m_2), kondisi B pada m_1 dan m_3 , kondisi C pada m_2 dan m_3 , dan kondisi D pada m_1 , m_2 dan m_3 . Waktu cuplik respons disesuaikan dengan selang waktu yang digunakan dalam proses integrasi respons, atau dalam pengertian lain tidak dicuplik ulang (*resampling*). Interval data respons getaran bebas yang digunakan untuk proses identifikasi dipilih dalam rentang 0.01-0.50 s.

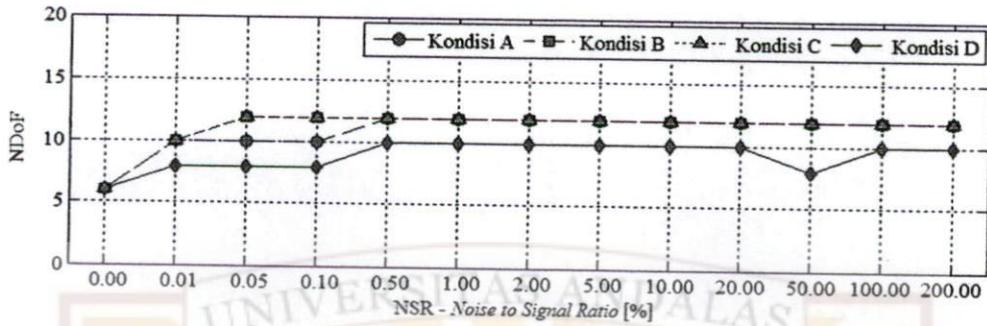
Parameter numerik N_1 , N_2 dan N_3 dipilih berdasarkan nilai optimum yang disarankan oleh Pappa dan Ibrahim [13] atau Gambar 2.2. Parameter numerik N_4 selanjutnya ditentukan berdasarkan nilai maksimum frekuensi yang akan diidentifikasi, dalam kasus ini adalah 400 Hz. Dengan menggunakan persamaan (2.44) dapat diperoleh nilai N_4 yaitu sebesar 4. Dalam simulasi, N_4 dapat dipilih lebih besar atau kecil dari 4 sesuai dengan variasi jumlah modus atau NDoF (N) yang digunakan untuk memperoleh hasil identifikasi parameter *modal* yang optimum. Harga parameter N_4 yang digunakan untuk keempat posisi pencuplikan respons beserta variasi rasio NSR yang digunakan ditampilkan dalam Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Parameter N_4 yang digunakan dalam proses identifikasi dengan metode ITD untuk keempat kondisi posisi pengukuran respons (kontribusi 6 modus getar terendah).

NSR [%]	Kondisi A	Kondisi B	Kondisi C	Kondisi D
0.00	4	4	4	4
0.01	4	4	4	4
0.05	4	4	4	4
0.10	4	4	4	4
0.50	4	4	4	4
1.00	4	4	4	4
2.00	4	4	4	4
5.00	4	4	4	4
10.00	4	4	4	4
20.00	4	4	4	4
50.00	4	4	4	4
100.00	4	4	4	4
200.00	4	4	4	4

Jumlah modus atau NDoF (N) minimum yang digunakan dalam proses identifikasi ditentukan oleh kontribusi *noise* dalam sinyal respons. Kondisi ini memungkinkan struktur dapat dimodelkan dengan jumlah modus (N) yang lebih besar dari modus riil struktur sesungguhnya yang terkandung di dalam data respons. Berdasarkan proses identifikasi yang telah dilakukan dapat diketahui jumlah modus atau NDoF yang sukses diterapkan untuk memodelkan struktur menggunakan data respons yang terkontaminasi oleh *noise*. Gambar 4.3 menyajikan grafik yang

menunjukkan hubungan jumlah modus atau NDoF minimum yang digunakan dalam proses identifikasi terhadap tingkat *noise* dalam data respons.



Gambar 4.3 Variasi NDoF (N) yang digunakan dalam proses identifikasi dengan metode ITD berdasarkan kontribusi 6 modus terendah pada data respons percepatan untuk variasi NSR di 4 kondisi penempatan sensor.

Pada Gambar 4.3 terlihat bahwa untuk keadaan tanpa *noise* (0.00% NSR), proses identifikasi dapat dilakukan dengan jumlah modus atau NDoF yang sama dengan modus atau NDoF yang akan diidentifikasi ($N = 6$). Pengaruh jumlah sensor yang digunakan terhadap kualitas hasil identifikasi juga tidak menampilkan perbedaan, baik penggunaan 2 sensor atau 3 sensor. Untuk tingkat $NSR \geq 0.01\%$ dapat dilihat bahwa proses identifikasi menghendaki jumlah modus atau NDoF yang besar ($N > 6$). Kondisi ini disebabkan karena dalam proses identifikasi didapatkan modus riil struktur ditambah dengan modus *noise*.

Melalui Gambar 4.3 juga terlihat bahwa pencuplikan respons pada kondisi D memberikan kualitas hasil identifikasi yang cukup bagus dibandingkan pencuplikan respons yang hanya menggunakan dua data respons saja. Hal ini dibuktikan dengan jumlah NDoF yang cukup besar dibutuhkan untuk proses identifikasi. Kondisi ini terjadi karena posisi pencuplikan respons berada pada titik simpul atau hampir mendekati posisi simpul modus getar. Akibatnya, perubahan respons struktur tidak dapat diamati atau cukup kecil dan hal ini dapat mengaburkan modus struktur akibat kehadiran *noise* dalam respons.

Pengetahuan tentang posisi pencuplikan respons yang mampu merepresentasikan keseluruhan modus getar memainkan peranan yang krusial dalam proses identifikasi. Hal ini disebabkan karena posisi pencuplikan respons berpengaruh langsung pada hasil identifikasi. Kondisi ini juga ditemui dalam proses

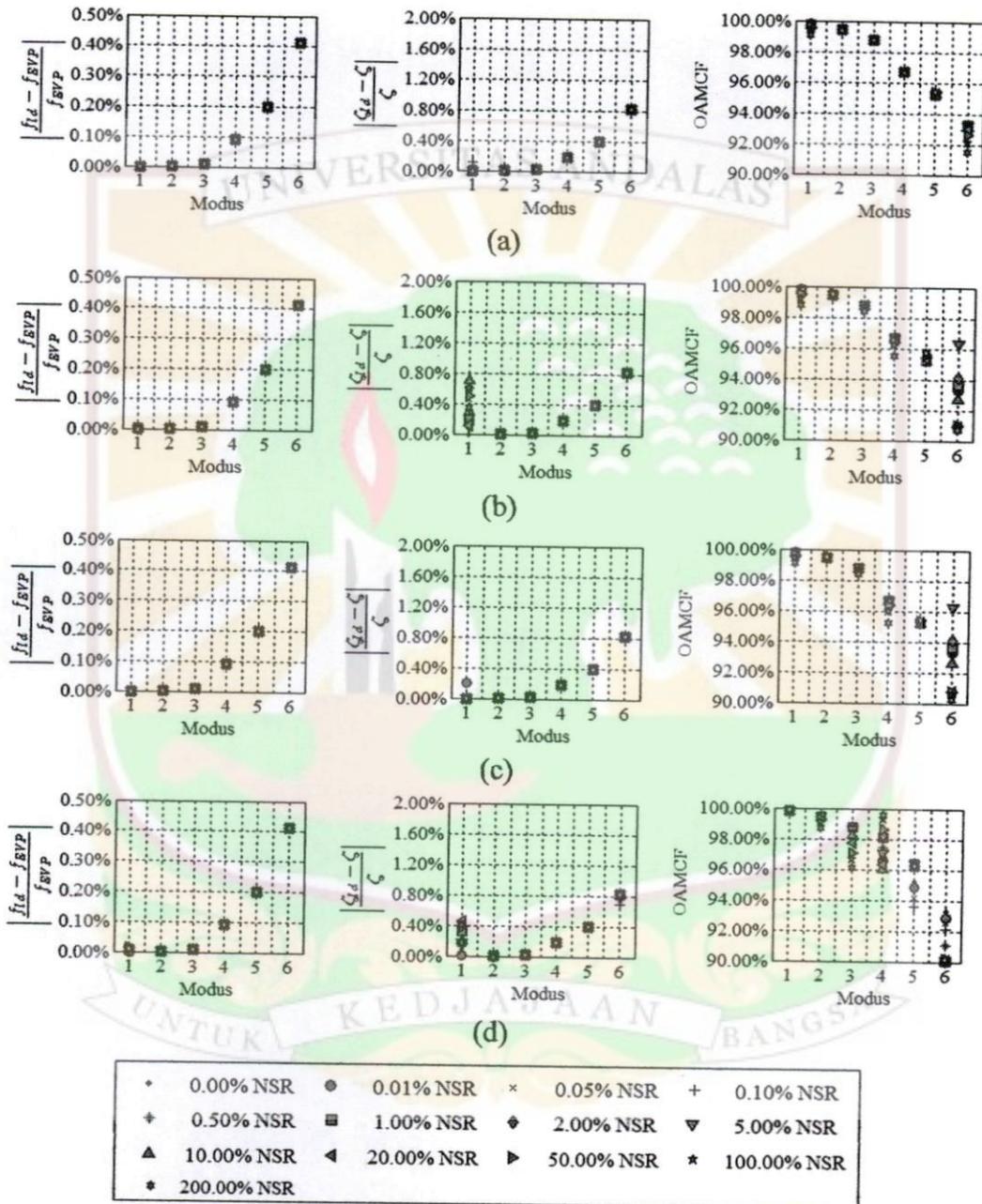
identifikasi struktur berdasarkan data respons dan eksitasi menggunakan prosedur EMA. Penerapan teknik komputasi numerik menggunakan FEM dalam analisis struktur dapat membantu dalam proses penentuan posisi penempatan sensor berdasarkan informasi modus getar yang diperoleh dari hasil simulasi.

Hasil simulasi proses identifikasi frekuensi pribadi ditampilkan dalam bentuk persentase nilai frekuensi pribadi pada setiap modus terhadap hasil simulasi numerik EVP yang diperlihatkan dalam Tabel 4.1. Demikian juga dilakukan terhadap identifikasi rasio redaman. Dalam hal ini harga rasio redaman hasil identifikasi dibandingkan terhadap rasio redaman modal yang digunakan dalam penghitungan respons, yaitu 2% untuk keseluruhan modus struktur. Persentase penyimpangan hasil identifikasi frekuensi pribadi, rasio redaman, dan OAMCF sebagai justifikasi hasil identifikasi ditampilkan dalam Gambar 4.4. Perbedaan hasil identifikasi frekuensi pribadi struktur terhadap harga yang diperoleh dari hasil komputasi numerik EVP berharga di bawah 0.50%. Sementara itu, persentase perbedaan hasil identifikasi rasio redaman berada di bawah 1.00%. Harga penyimpangan ini jauh lebih rendah dari yang telah dilaporkan oleh Bur [24] untuk kondisi respons tanpa kehadiran *noise*.

Hasil identifikasi secara umum menunjukkan adanya kecenderungan peningkatan persentase kesalahan hasil identifikasi pada modus tinggi baik untuk frekuensi pribadi maupun rasio redaman. Khusus untuk modus pertama diperoleh variasi hasil identifikasi rasio redaman terhadap jumlah kandungan *noise* dalam data respons. OAMCF sebagai parameter yang digunakan dalam menjustifikasi kualitas hasil identifikasi menyatakan untuk ketiga modus terendah memiliki nilai OAMCF di atas 95% sedangkan tiga modus berikutnya memiliki OAMCF di atas 90%. Kondisi ini menyatakan bahwa modus tersebut merupakan modus otentik atau modus riil dari struktur yang diidentifikasi.

Identifikasi modus dengan menggunakan nilai OAMCF saja cukup sulit dilakukan dalam pengujian. Kondisi ini disebabkan oleh *noise* yang mengkontaminasi data respons lebih bersifat acak dibandingkan dengan *noise* dalam simulasi yaitu *white-noise*. Diagram kestabilan (*stabilization diagram*) dapat digunakan untuk menjustifikasi dan memastikan bahwa pada frekuensi teridentifikasi memang

merupakan modus riil struktur seperti yang telah dijelaskan sebelumnya (Bab 2 subbab 2.3). Diagram ini juga dapat dikombinasikan dengan PSD (*power spectral density*) dari data respons yang digunakan untuk identifikasi. Kombinasi ini akan mempertajam dan mempermudah dalam melakukan penilaian hasil identifikasi.

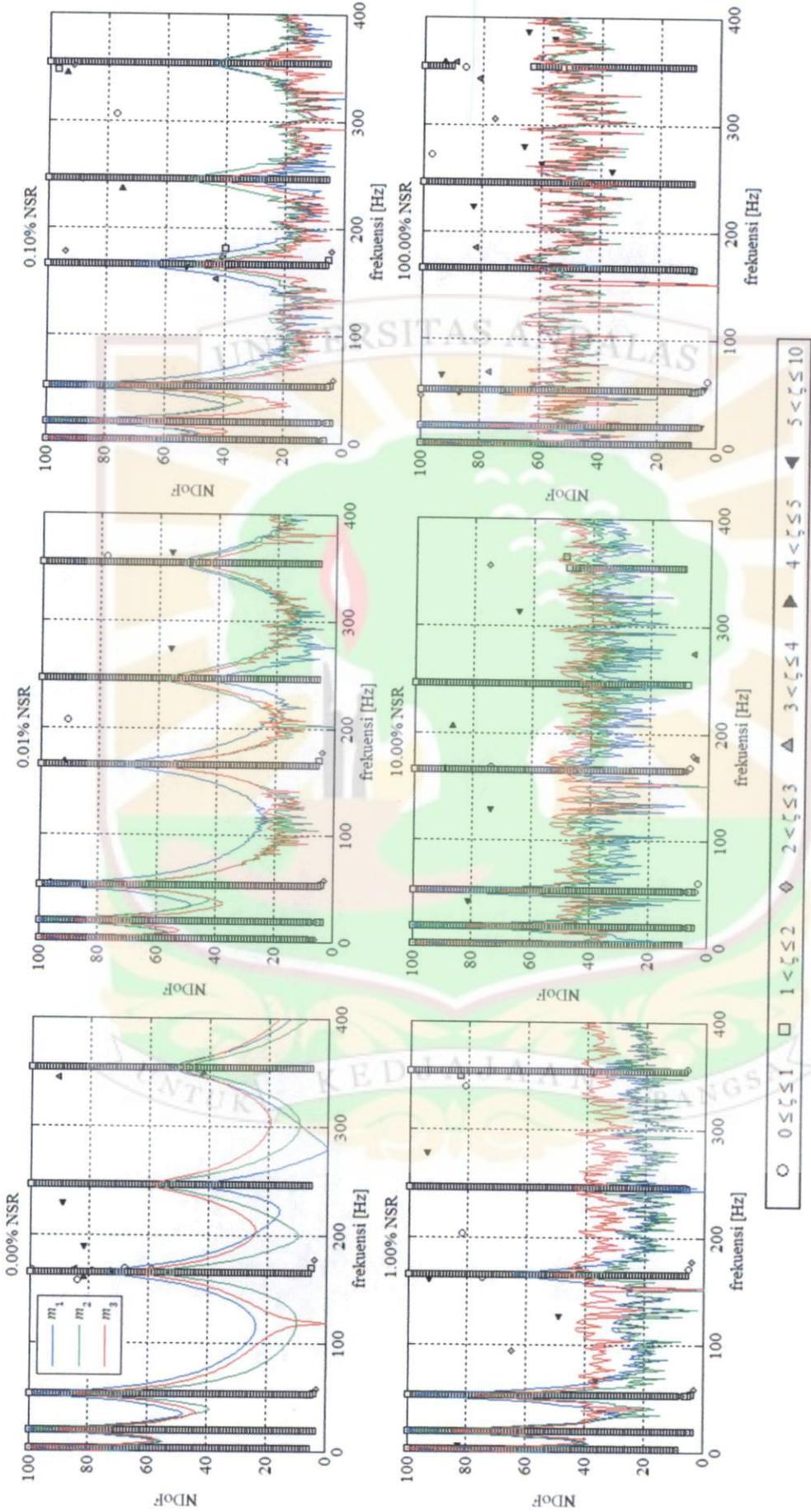


Gambar 4.4 Hasil identifikasi 6 modus terendah model balok berdasarkan respons percepatan kontribusi 6 modus terendah dengan metode ITD untuk 4 kondisi penempatan sensor dan variasi NSR (a) kondisi A, (b) kondisi B, (c) kondisi C, dan (d) kondisi D.

PSD dihitung dengan menggunakan metode Welch. Penerapan metode Welch dilakukan dengan pengambilan rentang data respons untuk durasi waktu tertentu. Setiap rentang data respons kemudian dilewatkan pada suatu fungsi *window* yang digunakan untuk mengurangi efek kebocoran spektral (*spectral leakage*). *Window* Hanning dipilih dalam penghitungan PSD ini karena *window* jenis ini cukup baik dalam membedakan nilai puncak-puncak frekuensi spektral yang berbeda cukup jauh. Dengan demikian, penggabungan PSD ke dalam diagram kestabilan memiliki keuntungan di mana frekuensi pribadi struktur yang diidentifikasi bersesuaian dengan posisi resonans dari PSD respons.

Penempatan hasil identifikasi pada diagram kestabilan diawali dengan menggunakan nilai NDoF minimum (tiga) seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 4.3. Kondisi ini bersesuaian dengan jumlah data respons yang digunakan untuk proses identifikasi. Selanjutnya, untuk membentuk diagram kestabilan digunakan nilai NDoF sebesar 100. Parameter-parameter numerik yang digunakan untuk penentuan diagram kestabilan sama seperti yang digunakan pada proses simulasi identifikasi sebelumnya, termasuk Tabel 4.2. Partisipasi *noise* dalam data respons (NSR) yang dilibatkan untuk penentuan diagram kestabilan ini adalah 0.00%, 0.01%, 0.10%, 1.00%, 10.00%, dan 100.00%. Hasil identifikasi yang diperoleh digambarkan ke dalam diagram kestabilan diperlihatkan pada Gambar 4.5. Informasi dalam diagram kestabilan digunakan untuk menjustifikasi bahwa suatu modus yang diidentifikasi merupakan modus riil dari struktur.

Kestabilan hasil identifikasi ditunjukkan oleh adanya garis vertikal kontinu yang dibangun oleh data hasil identifikasi sesuai dengan perolehan harga frekuensi dan rasio redaman. Hasil identifikasi berdasarkan diagram kestabilan menunjukkan bahwa secara umum identifikasi dilakukan dengan sukses, terutama untuk tiga modus terendah. Hal ini dibuktikan dengan stabilnya hasil identifikasi untuk setiap kenaikan harga NDoF pada ketiga modus terendah.



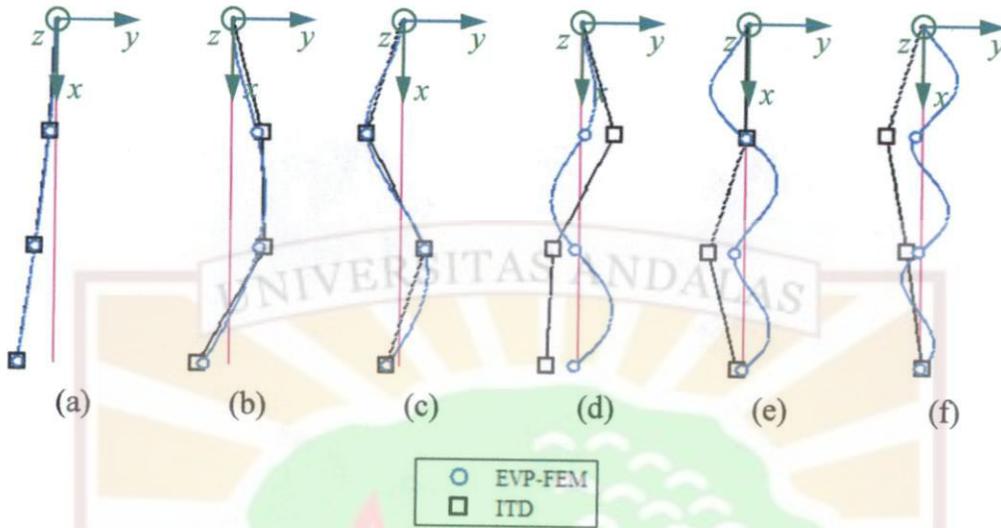
Gambar 4.5 Diagram kestabilan (*stabilization diagram*) hasil identifikasi data simulasi respons percepatan kontribusi 6 modus terendah.

Untuk data respons dengan partisipasi *white-noise* yang besar ($NSR > 0.10\%$) diperoleh diagram kestabilan yang terpotong di dekat frekuensi pribadinya. Kondisi ini terutama terjadi pada modus keenam dari struktur. Kondisi terpotongnya hasil identifikasi pada diagram kestabilan pada modus keenam tidak dapat dijadikan acuan bahwa modus bersangkutan bukanlah modus riil struktur. Hal ini dibuktikan dengan stabilnya hasil identifikasi dalam rentang tertentu. Untuk rentang NDoF lainnya yang tidak dapat menggambarkan kestabilan hasil identifikasi disebabkan oleh nilai OAMCF yang kecil dari 90% atau rasio redaman yang cukup besar ($> 5\%$).

Seperti pada pengujian *modal* berbasis EMA, hasil identifikasi modus getar struktur sangat tergantung dari penempatan dan jumlah sensor yang digunakan untuk pencuplikan data respons. Agar didapatkan data yang konsisten diperlukan pencuplikan respons secara serempak sesuai dengan posisi penempatan dan jumlah sensor yang digunakan. Identifikasi modus getar struktur dilakukan dengan menggunakan data respons percepatan tanpa *noise* (0.00% NSR). Hasil identifikasi modus getar melalui metode ITD merupakan modus getar kompleks, sehingga dilakukan transformasi modus getar kompleks menjadi modus getar normal dengan menggunakan metode Niedbal. Informasi spasial untuk visualisasi modus getar normal ditentukan berdasarkan posisi penempatan sensor (pada ketiga massa tambahan). Keadaan ini menunjukkan bahwa hanya lokasi titik tempat pengukuran respons yang digunakan untuk menggambarkan modus getar normal pendekatan, sedangkan penambahan titik pengukuran yang diperoleh melalui teknik *pseudo* tidak digunakan dalam penggambaran modus getar.

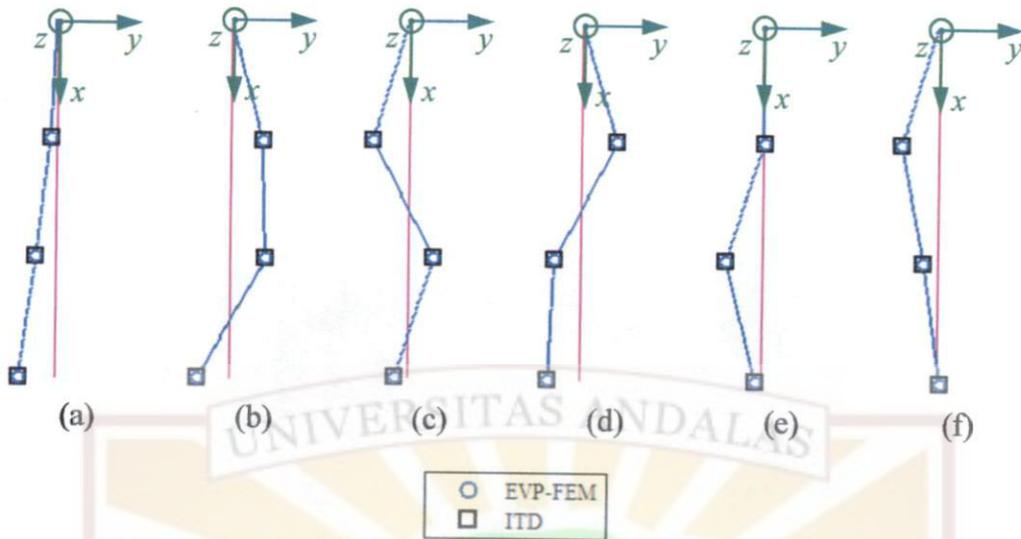
Visualisasi modus getar normal yang telah ditransformasi secara linier dari modus getar kompleks beserta informasi spasial yang dimiliki ditampilkan dalam Gambar 4.6. Keenam modus normal pendekatan yang ditampilkan merupakan modus yang telah dinormalisasi terhadap nilai maksimum masing-masing modusnya. Perbandingan modus getar normal hasil identifikasi ini dengan modus normal hasil penghitungan EVP juga ditampilkan pada Gambar 4.6. Mengacu pada hasil yang diperoleh pada Gambar 4.6 terdapat kesesuaian antara modus getar normal

hasil identifikasi dengan hasil numerik penghitungan EVP, terutama untuk tiga modus terendah.



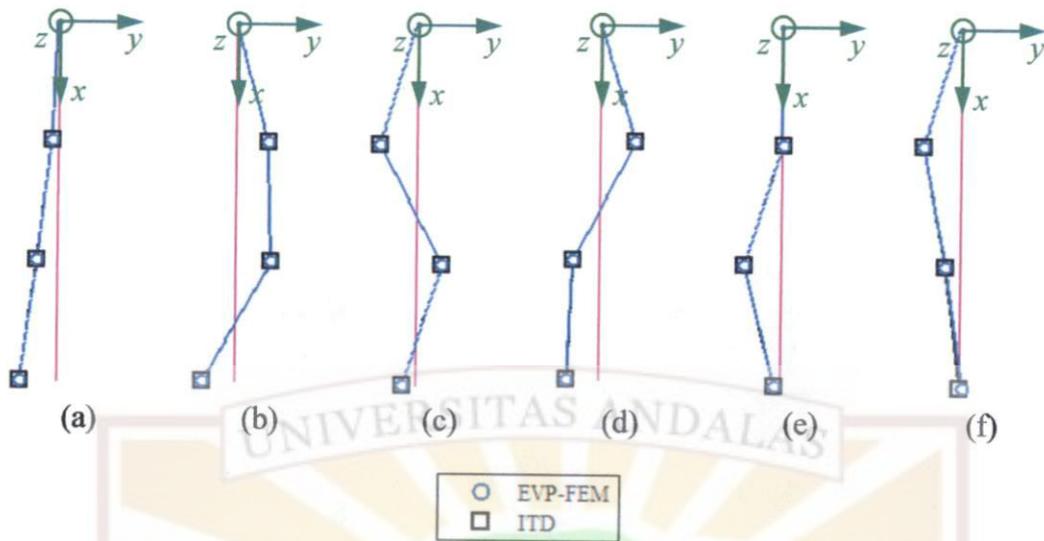
Gambar 4.6 Enam modus getar normal terendah balok uji berdasarkan penghitungan masalah bilangan pribadi dan hasil identifikasi respons dengan metode ITD untuk data respons dengan 0.00% NSR, keenam modus dinormalisasi terhadap nilai maksimum pada setiap modulusnya, (a) modus pertama, (b) modus kedua, (c) modus ketiga, (d) modus keempat, (e) modus kelima, dan (f) modus keenam.

Sedangkan untuk ketiga modus getar normal yang tertinggi (modus 4, 5, dan 6) terdapat perbedaan nilai yang cukup mencolok dibandingkan hasil penghitungan EVP. Hal ini disebabkan karena interpretasi hasil identifikasi hanya dilakukan berdasarkan ketiga posisi penempatan sensor, sehingga terdapat kekurangan informasi *spatial* untuk menggambarkan modus getar yang lebih tinggi. Secara umum dapat dilihat bahwa modus getar normal hasil penghitungan EVP balok pada ketiga massa tambahan memiliki pola yang hampir sama dengan modus getar hasil identifikasi. Perbandingan modus getar pada ketiga posisi penempatan sensor diperlihatkan pada Gambar 4.7. Hasil pada Gambar 4.7 ini menunjukkan kesesuaian antara modus getar hasil identifikasi dengan modus getar hasil penghitungan EVP pada setiap posisi pencuplikan respons.

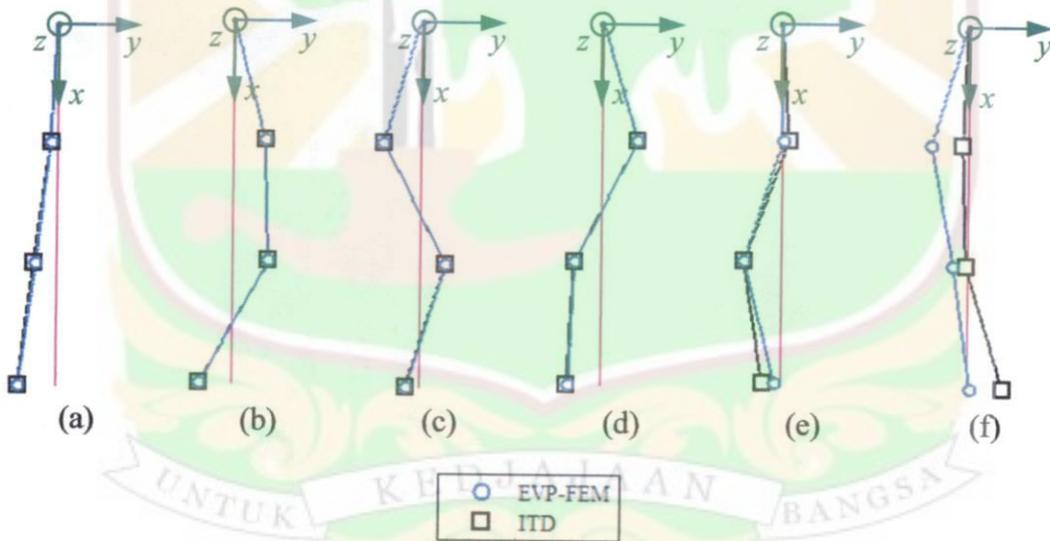


Gambar 4.7 Enam modus getar normal terendah balok uji berdasarkan penghitungan masalah bilangan pribadi dan hasil identifikasi respons dengan metode ITD untuk data respons dengan 0.00% NSR, keenam modus dinormalisasi terhadap nilai maksimum pada setiap modulusnya dengan data modus getar pada setiap massa tambahan, (a) modus pertama, (b) modus kedua, (c) modus ketiga, (d) modus keempat, (e) modus kelima, dan (f) modus keenam.

Metode Nidbal digunakan kembali untuk mentransformasikan modus getar kompleks hasil identifikasi respons percepatan menjadi modus getar normal untuk NSR 10.00% dan 100.00%. Gambar 4.8 dan 4.9 menunjukkan modus getar normal hasil identifikasi untuk kondisi NSR 10.00% dan 100.00%. Penambahan kandungan *noise* dalam data respons secara umum tidak mengubah karakteristik pola getar struktur yang diidentifikasi. Akan tetapi, khusus untuk modus getar keenam dari struktur yang diidentifikasi berdasarkan respons dengan NSR sebesar 100.00% diperoleh hasil yang menyimpang akibat kehadiran *noise*. Kehadiran *noise* tersebut mempengaruhi kekuatan *modal* (*modal strength*) pada modus yang bersangkutan.



Gambar 4.8 Enam modus getar normal terendah balok uji berdasarkan penghitungan masalah bilangan pribadi dan hasil identifikasi respons dengan metode ITD untuk data respons dengan 10.00% NSR, keenam modus dinormalisasi terhadap nilai maksimum pada setiap modusnya, (a) modus pertama, (b) modus kedua, (c) modus ketiga, (d) modus keempat, (e) modus kelima, dan (f) modus keenam.



Gambar 4.9 Enam modus getar normal terendah balok uji berdasarkan penghitungan masalah bilangan pribadi dan hasil identifikasi respons dengan metode ITD untuk data respons dengan 100.00% NSR, keenam modus dinormalisasi terhadap nilai maksimum pada setiap modusnya, (a) modus pertama, (b) modus kedua, (c) modus ketiga, (d) modus keempat, (e) modus kelima, dan (f) modus keenam.

4.1.2 Kasus 2: Identifikasi berdasarkan kontribusi 12 modus getar terendah

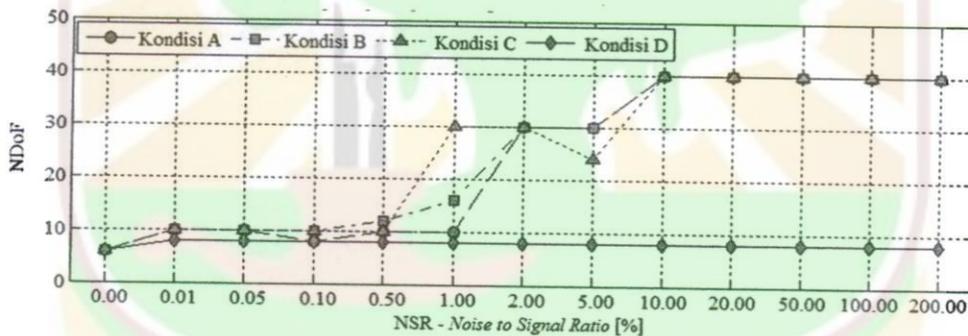
Pada kasus 2, respons percepatan balok yang dihitung menggunakan kontribusi 12 modus getar terendah digunakan dalam proses identifikasi dengan metode ITD. Kasus 2 ini digunakan untuk mensimulasikan kondisi pengukuran aktual dari struktur. Maksud dari pengukuran aktual adalah respons dicuplik pada rentang frekuensi yang cukup panjang sehingga modus struktur yang berorde tinggi (dalam kasus ini yaitu modus ketujuh hingga modus keduabelas) juga tercuplik dan berkontribusi dalam data respons. Dalam pengujian, kondisi ini diperoleh dengan penerapan *filter* jenis LPF yang memiliki frekuensi *cut-off* (f_c) yang lebih besar dibandingkan dengan frekuensi pribadi untuk modus keduabelas struktur, misalnya $f_c = 1600$ Hz.

Identifikasi tetap dilakukan untuk 6 modus getar terendah atau modus-modus dengan frekuensi di bawah 400 Hz. Dengan mengacu pada frekuensi maksimum untuk proses identifikasi dapat diketahui harga minimum dari parameter N_4 yaitu 40. Nilai N_4 yang digunakan dalam simulasi dapat dipilih lebih besar seperti yang dinyatakan dalam Tabel 4.3. Nilai N_4 pada Tabel 4.3 beserta jumlah NDoF yang digunakan dalam pemodelan struktur pada Gambar 4.10 merupakan nilai optimum yang digunakan dalam proses identifikasi.

Efek dari jumlah pencuplikan data pada posisi tertentu dari struktur juga memiliki peran penting dalam memberikan kualitas hasil identifikasi. Penggunaan 12 modus terendah untuk menghasilkan data respons yang digunakan dalam proses identifikasi membutuhkan jumlah NDoF (N) yang cukup besar jika dibandingkan dengan kasus 1. Adanya peningkatan jumlah NDoF yang diperlukan untuk proses identifikasi disebabkan karena bertambahnya kandungan *noise* dalam data respons. Dalam hal ini, respons yang dihasilkan oleh 6 modus tertinggi dianggap sebagai *noise* karena berada di luar frekuensi yang digunakan untuk identifikasi, yaitu 0 – 400 Hz.

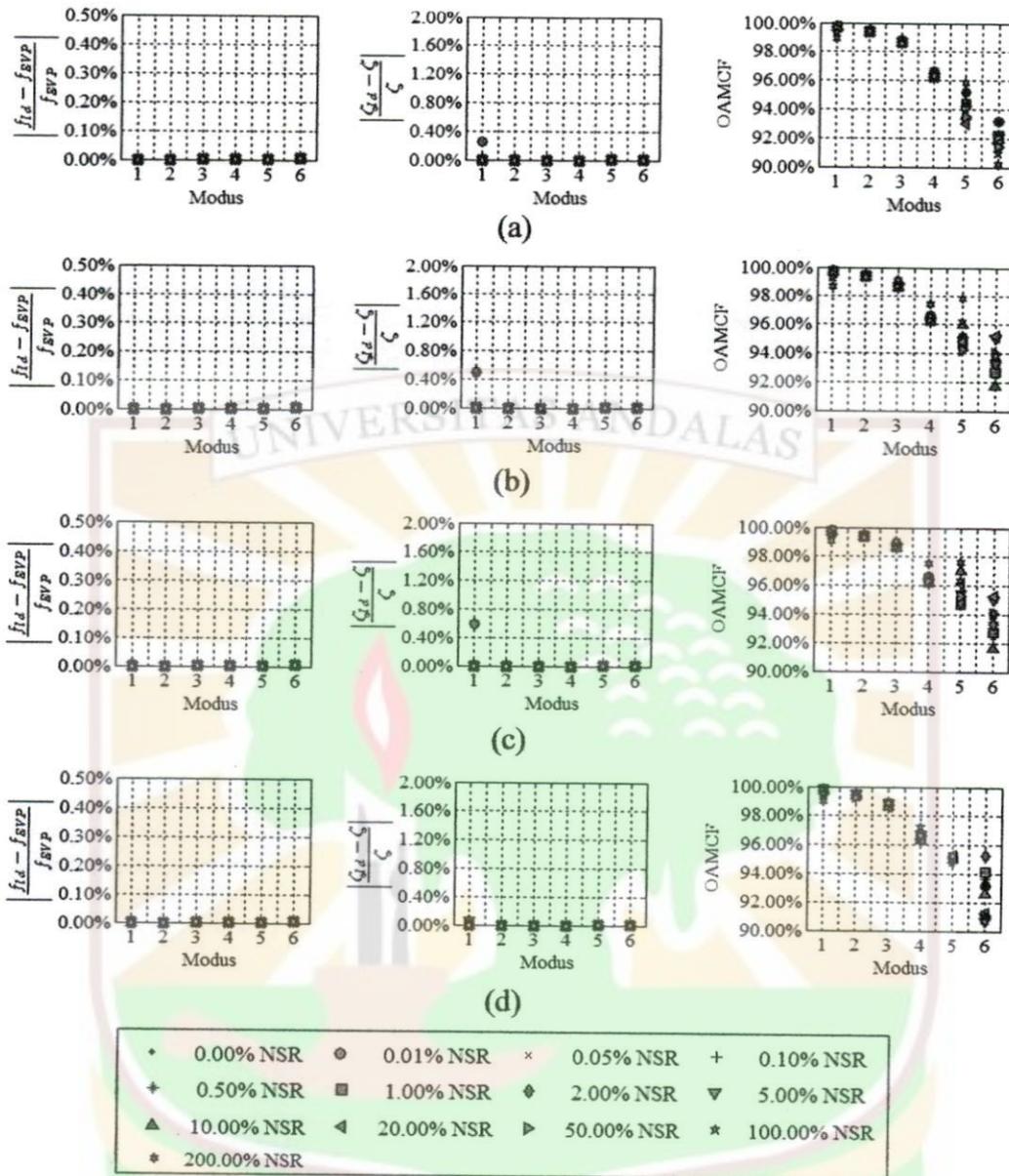
Tabel 4.3 Parameter N_4 yang digunakan dalam proses identifikasi dengan metode ITD untuk keempat kondisi posisi pengukuran respons (kontribusi 12 modus getar terendah).

NSR [%]	Kondisi A	Kondisi B	Kondisi C	Kondisi D
0.00	40	40	40	40
0.01	40	40	40	40
0.05	40	40	40	40
0.10	40	40	40	40
0.50	46	46	46	40
1.00	46	46	46	40
2.00	46	46	46	40
5.00	46	46	46	40
10.00	46	45	45	46
20.00	46	45	45	46
50.00	46	45	45	46
100.00	46	45	45	46
200.00	46	45	45	46



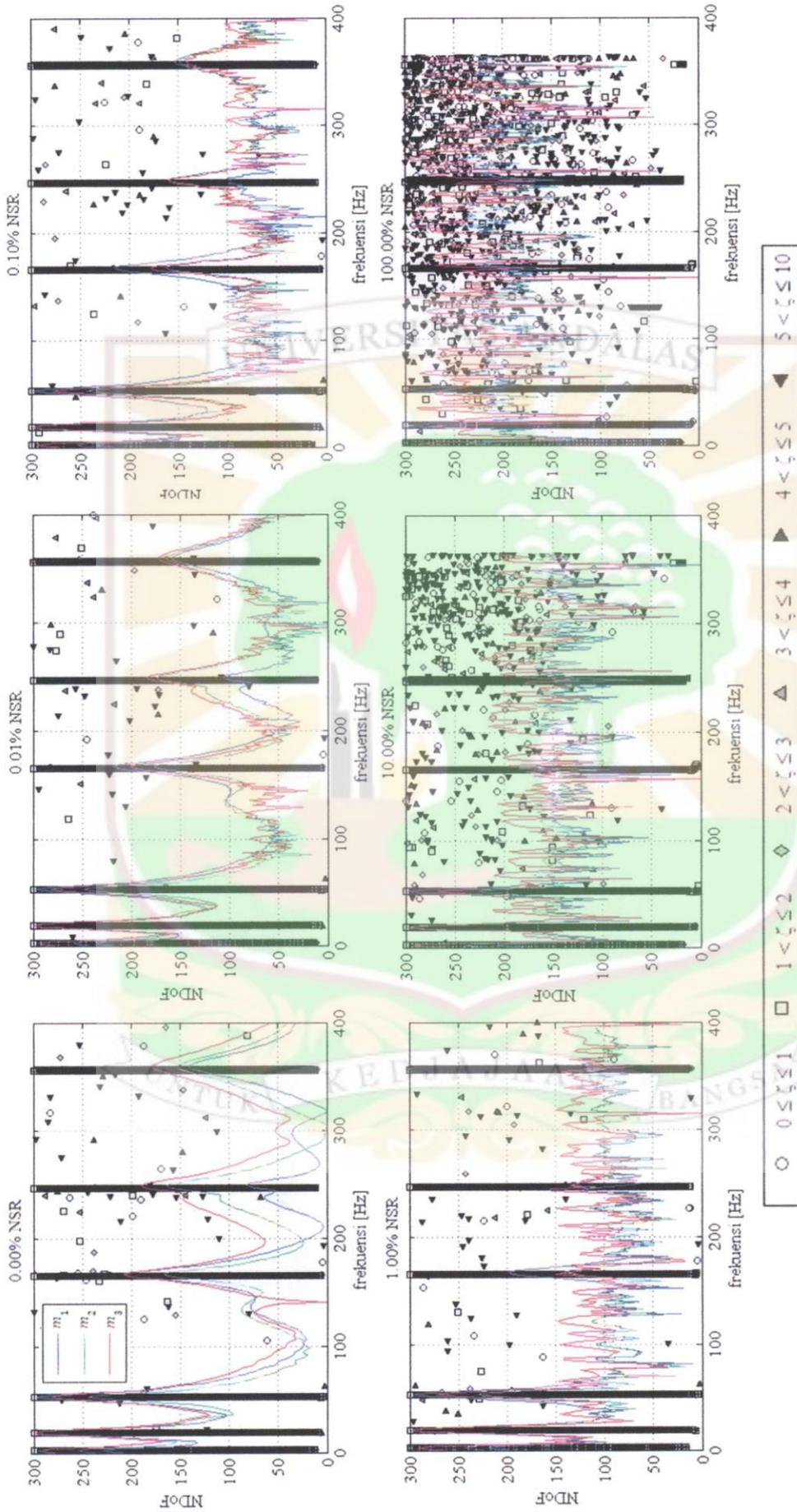
Gambar 4.10 Variasi NDoF (N) yang digunakan dalam proses identifikasi dengan metode ITD berdasarkan kontribusi 12 modus terendah pada data respons percepatan untuk variasi NSR di 4 kondisi penempatan sensor.

Kualitas hasil identifikasi ditunjukkan oleh persentase perbedaan frekuensi pribadi dan rasio redaman hasil identifikasi terhadap hasil komputasi EVP pada Tabel 4.1 seperti diperlihatkan pada Gambar 4.11. Berdasarkan hasil pada Gambar 4.11 terlihat bahwa perbedaan frekuensi pribadi dan rasio redaman berada di bawah 0.01% dan 0.50%. Justifikasi hasil identifikasi dari nilai OAMCF menunjukkan keseluruhan hasil identifikasi merupakan modus riil struktur. Harga penyimpangan ini juga jauh lebih rendah dari yang telah dilaporkan oleh Bur [24] untuk kondisi respons tanpa *noise*.



Gambar 4.11 Hasil identifikasi 6 modus terendah model balok berdasarkan respons percepatan kontribusi 12 modus terendah dengan metode ITD untuk 4 kondisi penempatan sensor dan variasi NSR.

Penerapan diagram kestabilan untuk mencermati hasil identifikasi pada setiap modus yang berhasil diidentifikasi juga diterapkan untuk kasus ini (Gambar 4.12). Identifikasi parameter *modal* menggunakan diagram kestabilan mengacu pada parameter-parameter numerik yang telah digunakan sebelumnya. Parameter yang didaftarkan pada Tabel 4.4 dan yang diperlihatkan dalam Gambar 4.10 digunakan untuk proses identifikasi. Dengan mengacu pada jumlah NDoF pada Gambar 4.10 maka untuk penggambaran diagram kestabilan digunakan NDoF sebesar 300.



Gambar 4.12 Diagram kestabilan (*stabilization diagram*) hasil identifikasi data simulasi respons percepatan kontribusi 12 modus terendah untuk nilai parameter N_4 seperti yang diberikan dalam Tabel 4.4.

Kandungan *noise* dalam data respons percepatan (NSR) divariasikan sebesar 0.00%, 0.01%, 0.10%, 1.00%, 10.00%, dan 100%. Diagram kestabilan ini kemudian dikombinasikan dengan PSD dari data respons pada setiap posisi pencuplikan respons. Melalui PSD dapat diketahui posisi puncak-puncak frekuensi, sehingga dapat membantu menjustifikasi secara tidak langsung parameter *modal* hasil identifikasi.

Diagram kestabilan proses identifikasi untuk kasus 2 diperlihatkan pada Gambar 4.12. Berdasarkan hasil pada diagram kestabilan dapat diketahui bahwa tiga modus terendah menunjukkan kestabilan selama proses identifikasi. Modus keenam cukup sulit untuk ditentukan berdasarkan diagram kestabilannya. Hal ini disebabkan karena parameter *modal* tidak teridentifikasi pada beberapa harga NDoF. Kondisi ini disebabkan oleh kekuatan modus yang cukup rendah atau rendahnya nilai OAMCF dari modus yang diidentifikasi. Hasil identifikasi yang tersebar (tidak membentuk suatu garis vertikal pada frekuensi pribadi struktur) dinyatakan sebagai modus *noise* dan *false modes*.

Fenomena menarik yang hanya ditemui pada kasus 2 dan tidak ditemui pada kasus 1 adalah munculnya modus lain di frekuensi yang bukan merupakan 6 frekuensi terendah struktur. Melalui simulasi numerik fenomena ini mudah untuk dibuktikan, tetapi ketika menggunakan data pengukuran respons struktur dalam kondisi *ambient* hal ini akan membawa ke penafsiran modus yang keliru. Dalam konteks identifikasi dari data respons yang terukur pengetahuan mengenai konsep pengolahan sinyal diperlukan secara mendalam. Fenomena kemunculan modus yang bukan modus struktur ini dapat dijawab melalui pengetahuan dalam ranah pengolahan sinyal.

Penerapan persamaan (2.44) terhadap parameter-parameter numerik N_1 , N_4 , dan Δt yang diberikan dalam Tabel 4.3 dapat digunakan untuk menjelaskan fenomena ini. Frekuensi maksimum yang dapat diidentifikasi ($f_{id\ max}$) bergantung pada harga ketiga parameter numerik tersebut. Ketiga parameter ini bertindak sebagai suatu variable yang menentukan harga frekuensi *cut-off* pada sinyal respons. Penerapan $f_{id\ max}$ menghasilkan *aliasing frequency* untuk modus dengan frekuensi tinggi seperti yang dikenal dalam pengolahan sinyal. Dengan meminjam sebutan ini

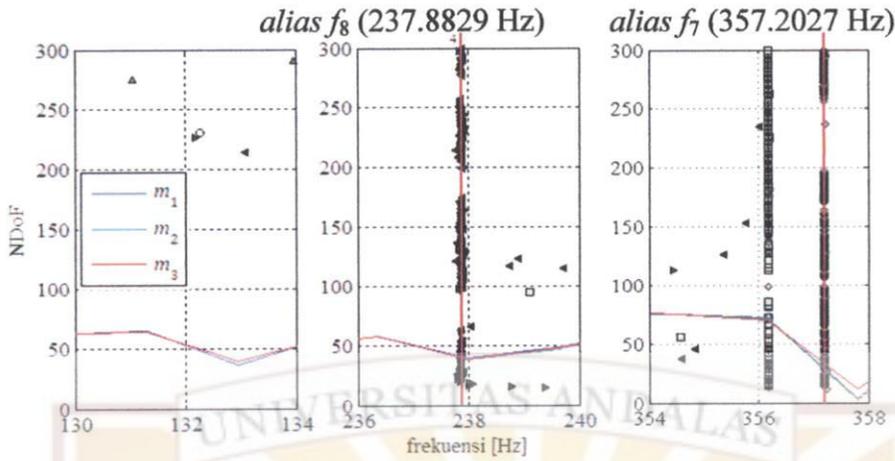
maka munculnya modus yang keliru dalam identifikasi dapat dinyatakan sebagai modus *alias*.

Modus *alias* yang muncul dalam hasil identifikasi dan stabil pada frekuensi bersangkutan ketika nilai kenaikan NDoF yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.4. Berdasarkan Tabel 4.4 diketahui terdapat 3 frekuensi *alias* dalam rentang frekuensi 0-400 Hz, yaitu modus 7, 8 dan 9. Modus 10, 11 dan 12 tidak memiliki *alias* dalam rentang frekuensi yang menjadi kajian identifikasi dengan frekuensi *alias* dibawah 0 Hz. Frekuensi *alias* yang dominan muncul dalam proses identifikasi yaitu modus ketujuh dan kedelapan, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.13 – 4.16.

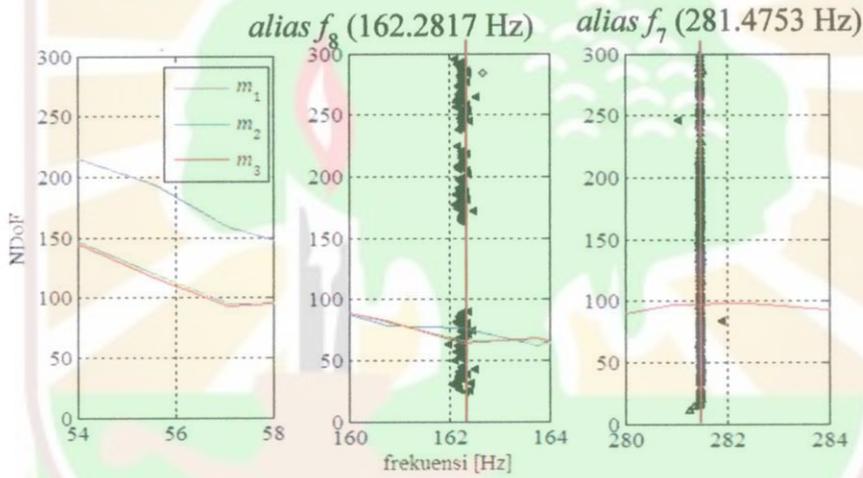
Tabel 4.4 Modus *alias* teoritik dalam rentang 0-400 Hz dari penerapan $f_{id\ max}$ yang sesuai dengan N_4 pada Tabel 4.3 dan $\Delta t = 10^{-5}$ s (* frekuensi balok gantung hasil penghitungan EVP, ** frekuensi *alias* yang memiliki kesimetrian posisi frekuensi terhadap nilai $f_{id\ max}$).

Modus ke-	N_4	40	44	45	46
	$f_{id\ max}$ [Hz]	416.6667	378.7879	370.3704	362.3188
	f_n [Hz]*	f_{alias} [Hz]**	f_{alias} [Hz]**	f_{alias} [Hz]**	f_{alias} [Hz]**
7	476.3872	356.9461	281.1886	264.3535	248.2505
8	595.9389	237.3944	161.6368	144.8018	128.6988
9	701.0229	132.3104	56.5529	39.7178	23.6148
10	1132.2211	-298.8878	-374.6454	-391.4804	-407.5835
11	1188.3678	-355.0344	-430.7920	-447.6270	-463.7301
12	1246.9751	-413.6418	-489.3994	-506.2344	-522.3374

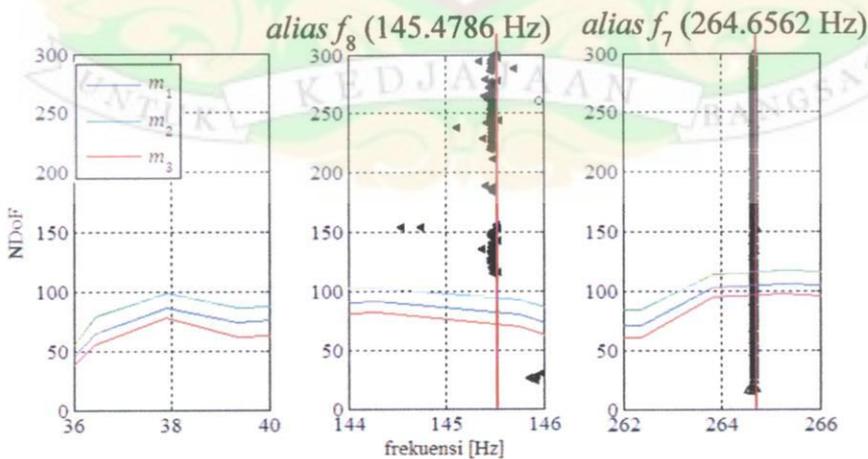
Untuk menghindari *aliasing* dalam rentang frekuensi pengamatan (0-400 Hz) dapat ditempuh dengan dua cara. Cara pertama adalah dengan menggandakan nilai $f_{id\ max}$ menjadi dua kali harga $f_{id\ max}$ yang dihitung sebelumnya, atau ($N_4 = 20$). Tabel 4.5 menyajikan frekuensi *alias* yang diperoleh dengan menggandakan nilai $f_{id\ max}$ yang digunakan sebelumnya dimana keenam modus tertinggi tidak memiliki frekuensi *alias* dalam rentang frekuensi pengamatan. Diagram kestabilan hasil identifikasi berdasarkan cara pertama ini ditampilkan dalam Gambar 4.17. Metode yang pertama ini tidak cukup efektif digunakan ketika berhadapan dengan data respons yang dicuplik menggunakan pengujian *modal* atau dalam kondisi *ambient*.



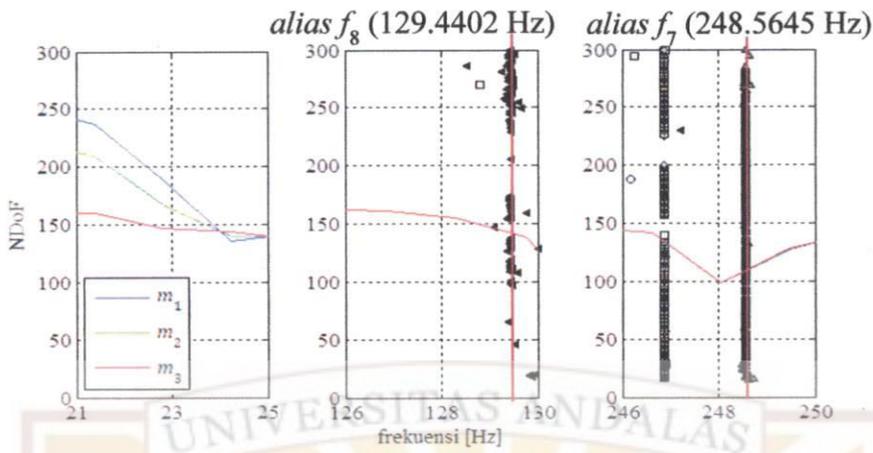
Gambar 4.13 Frekuensi alias dalam identifikasi dengan metode ITD untuk $N_4 = 40$ atau $f_{id\ max} = 416.6667$ Hz.



Gambar 4.14 Frekuensi alias dalam identifikasi dengan metode ITD untuk $N_4 = 44$ atau $f_{id\ max} = 378.7879$ Hz.



Gambar 4.15 Frekuensi alias dalam identifikasi dengan metode ITD untuk $N_4 = 45$ atau $f_{id\ max} = 370.3704$ Hz.

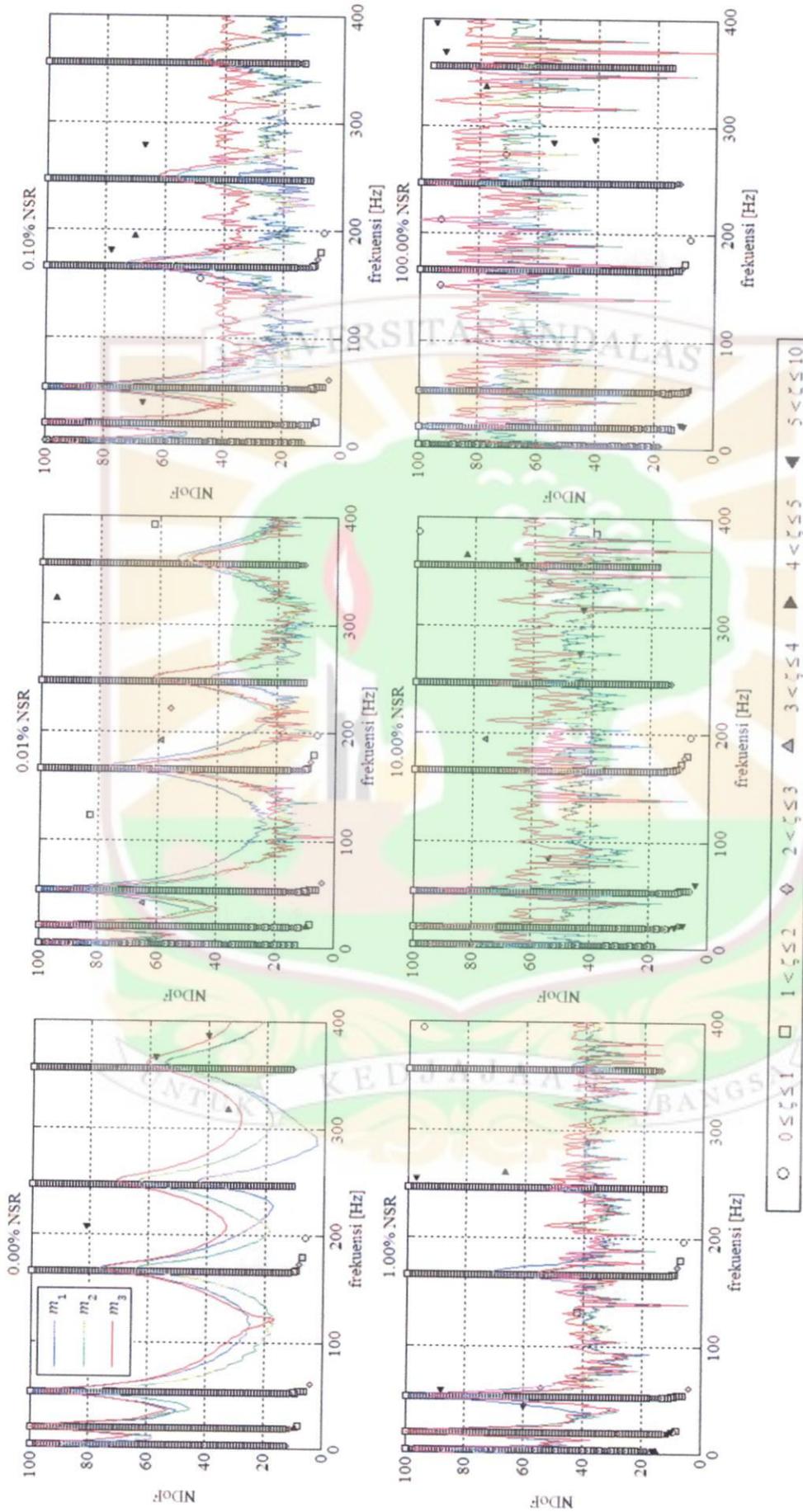


Gambar 4. 16 Frekuensi alias dalam identifikasi dengan metode ITD untuk $N_4 = 46$ atau $f_{id\ max} = 362.3188$ Hz.

Tabel 4.5 Modus *alias* teoritik dalam rentang 0-400 Hz dari penerapan $f_{id\ max}$ untuk nilai-nilai parameter numerik $N_4 = 20$ dan $\Delta t = 10^{-5}$ s (* frekuensi balok gantung hasil penghitungan EVP, ** frekuensi *alias* yang memiliki kesimetrian posisi frekuensi terhadap nilai $f_{id\ max}$).

Modus ke-	N_4	20
	$f_{id\ max}$ [Hz]	833.3333
	f_n [Hz]	f_{alias} [Hz]
7	476.3872	-
8	595.9389	-
9	701.0229	-
10	1132.2211	534.4455
11	1188.3678	478.2989
12	1246.9751	419.6915

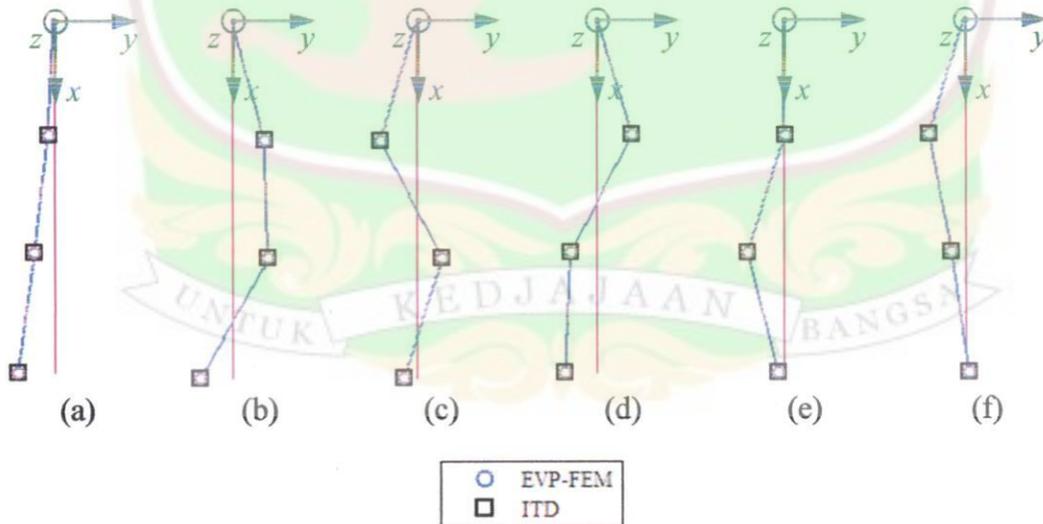
Cara berikutnya dilakukan dengan menggunakan *analog low-pass filter* (ALPF) yang berbasis perangkat keras (*hardware based*). Frekuensi *cut-off filter* ditentukan berdasarkan frekuensi maksimum dari rentang frekuensi yang menjadi kajian untuk proses identifikasi. ALPF ini berada setelah sensor dan sebelum sinyal respons masuk ke *signal analyzer*. Dengan tersedianya perangkat lunak yang dapat mengolah sinyal pada tingkat *post-processing* maka kebutuhan perangkat keras ALPF dapat ditiadakan. Penerapan LPF berbasis perangkat lunak merupakan salah satu alternatif untuk menghindari munculnya modus *alias*.



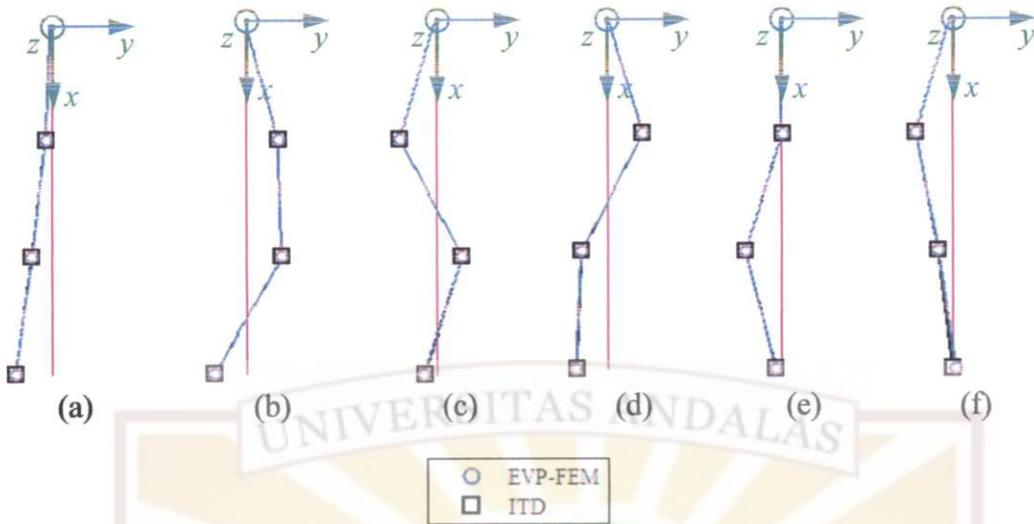
Gambar 4.17 Diagram kestabilan (*stabilization diagram*) hasil identifikasi data simulasi respons percepatan kontribusi 12 modus terendah untuk nilai parameter N_4 sebesar 20.

Dalam proses identifikasi, keenam modal terendah yang berada dalam rentang frekuensi 0–400 Hz sukses diidentifikasi untuk NDoF yang lebih sedikit dari simulasi sebelumnya. Kondisi ini seperti yang diperlihatkan dalam diagram kestabilan hasil identifikasi pada gambar 4.17. Tingkat ketersebaran hasil identifikasi pada diagram kestabilan menjadi berkurang dibandingkan hasil identifikasi yang diperoleh menggunakan $f_{id\ max}$ pada Tabel 4.4.

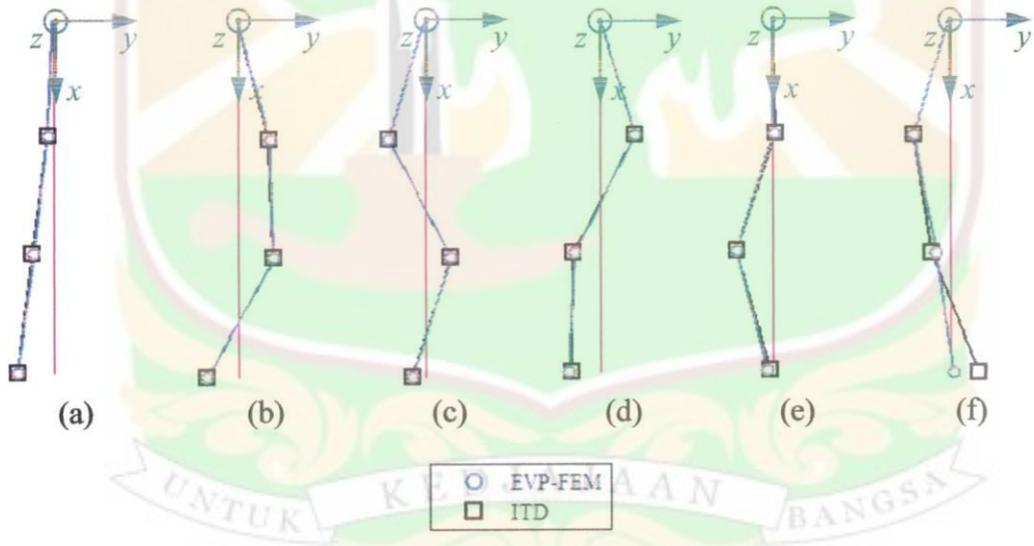
Transformasi modal getar normal dari modal getar kompleks hasil identifikasi untuk harga NSR sebesar 0.00%, 10.00%, dan 100.00% dilakukan melalui metode Niedbal diperlihatkan dalam Gambar 4.18, 4.19, dan 4.20. Informasi spasial berupa penempatan sensor pada struktur uji diperlukan untuk visualisasi modal getar normal yang telah ditransformasikan dari modal getar kompleks. Perbandingan modal getar normal hasil identifikasi dengan modal getar yang diperoleh dari penghitungan EVP menyatakan kesesuaian hasil yang diperoleh. Meskipun demikian, pada modal keenam untuk data respons 100.00% NSR diperoleh penyimpangan modal getar pada m_3 dibandingkan hasil penghitungan EVP. Hal ini disebabkan oleh pengaruh *noise* yang mengubah kekuatan *modal* (*modal strength*) pada modal dan titik pencuplikan respons bersangkutan.



Gambar 4.18 Enam modal getar normal terendah balok uji berdasarkan penghitungan masalah bilangan pribadi dan hasil identifikasi respons dengan metode ITD untuk data respons dengan 0.00% NSR, keenam modal dinormalisasi terhadap nilai maksimum pada setiap modusnya, (a) modal pertama, (b) modal kedua, (c) modal ketiga, (d) modal keempat, (e) modal kelima, dan (f) modal keenam.



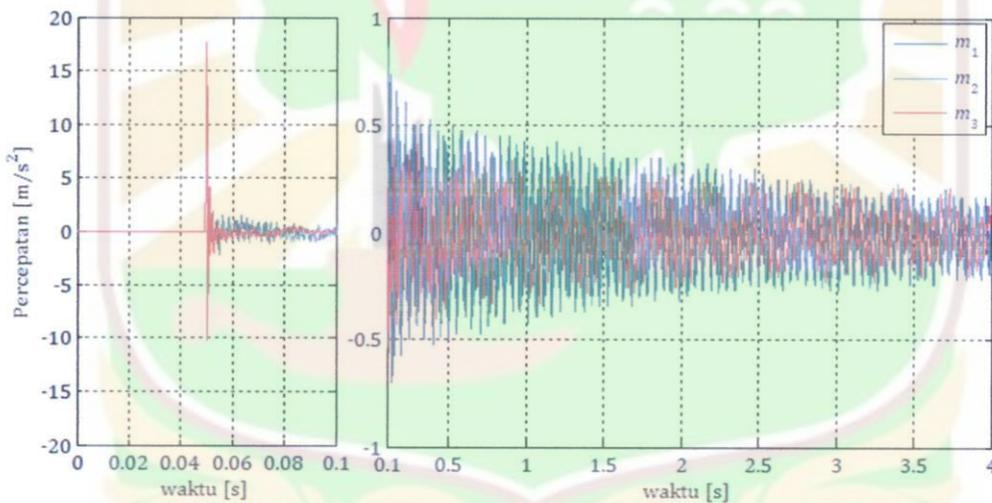
Gambar 4.19 Enam modus getar normal terendah balok uji berdasarkan penghitungan masalah bilangan pribadi dan hasil identifikasi respons dengan metode ITD untuk data respons dengan 10.00% NSR, keenam modus dinormalisasi terhadap nilai maksimum pada setiap modusnya, (a) modus pertama, (b) modus kedua, (c) modus ketiga, (d) modus keempat, (e) modus kelima, dan (f) modus keenam.



Gambar 4.20 Enam modus getar normal terendah balok uji berdasarkan penghitungan masalah bilangan pribadi dan hasil identifikasi respons dengan metode ITD untuk data respons dengan 100.00% NSR, keenam modus dinormalisasi terhadap nilai maksimum pada setiap modusnya, (a) modus pertama, (b) modus kedua, (c) modus ketiga, (d) modus keempat, (e) modus kelima, dan (f) modus keenam.

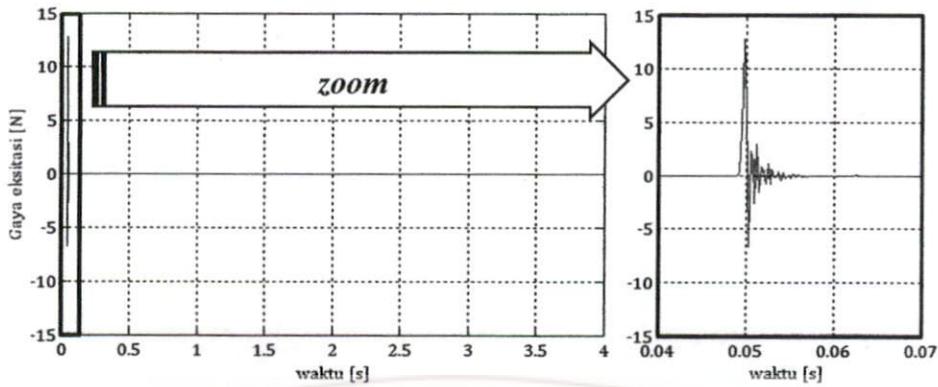
4.2 Identifikasi Parameter *Modal* Struktur Melalui Metode ITD dengan Menggunakan Data Respons Hasil Pengujian

Pengujian dilakukan dengan pemberian gaya eksitasi impuls pada m_3 balok uji dengan menggunakan *impact hammer* Brüel & Kjær 8203. Respons percepatan struktur dicuplik secara bersamaan di ketiga posisi massa tambahan dalam arah transversal balok dengan *accelerometer* DeltaTron Brüel & Kjær 4507 dan 4508. Ketiga respons yang dicuplik ditunjukkan dalam Gambar 4.21. Data sinyal gangguan dari *hammer* juga dicuplik meskipun tidak digunakan dalam proses identifikasi melalui metode ITD. Keseluruhan sinyal keluaran dari sensor dicuplik dengan menggunakan data akuisisi DSA Brüel & Kjær 3560C pada frekuensi pencuplikan 4096 Hz. Sementara itu, foto dan susunan instrumentasi untuk pengujian ditampilkan pada Gambar 3.6.



Gambar 4.21 Respons percepatan hasil pengujian *modal* balok gantung dengan tiga massa tambahan yang dicuplik pada ketiga massa tambahan dimana eksitasi impuls diberikan pada m_3 .

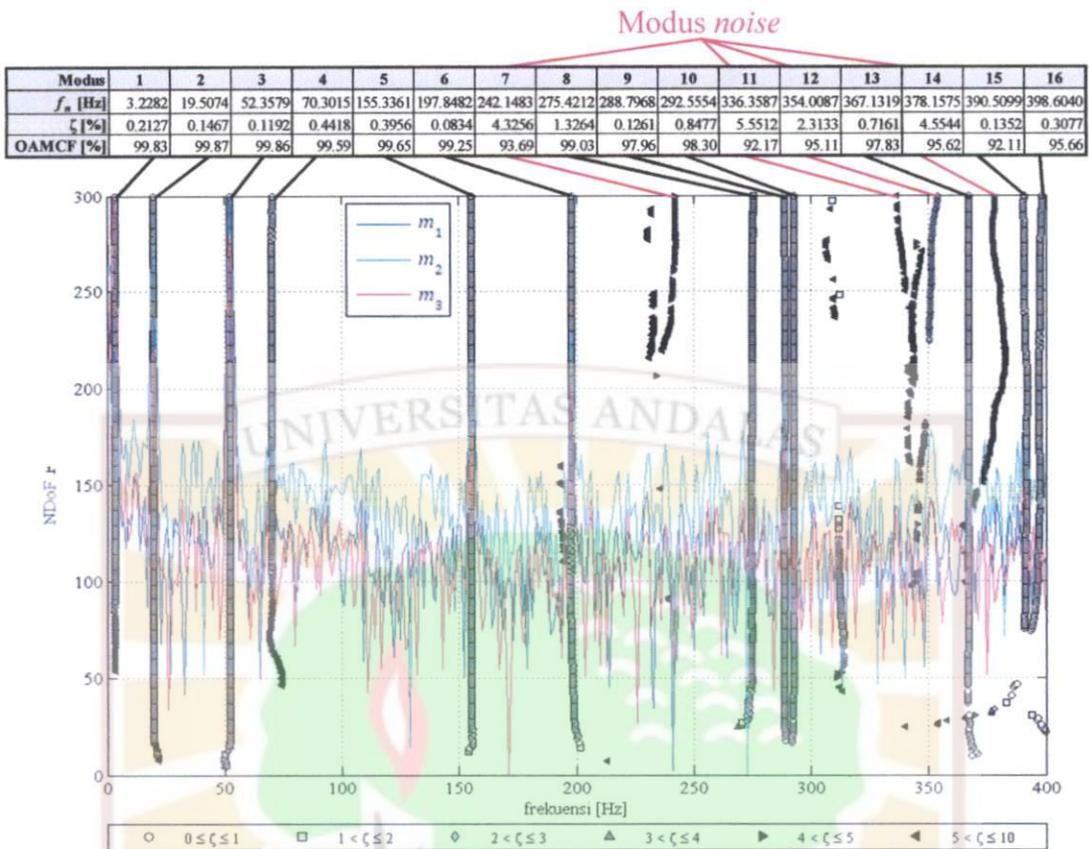
Proses identifikasi dilakukan pada respons struktur yang dicuplik akibat eksitasi kejut untuk bagian respons getaran bebasnya. Pada penelitian ini, data pengujian respons getaran bebas diasumsikan dimulai pada 0.1000 s. Alasan pemilihan ini disebabkan karena setelah 0.1000 s tidak ada lagi gaya luar yang bekerja pada balok uji. Hal ini didukung oleh grafik gaya eksitasi yang diberikan pada m_3 seperti yang ditampilkan dalam Gambar 4.22.



Gambar 4.22 Eksitasi kejut yang diberikan dengan *impact hammer* pada posisi m_3 dalam pengujian getaran balok gantung dengan tiga massa tambahan.

Harga optimum parameter numerik N_1 , N_2 dan N_3 seperti yang ditampilkan dalam Gambar 2.2 digunakan dalam proses identifikasi dengan metode ITD. Nilai parameter N_4 yang digunakan sebesar 1, sehingga tidak ada pergeseran data diskrit respons atau jarak antar data sama besar dengan waktu cuplik. Jumlah kolom matriks respons untuk identifikasi ditentukan berdasarkan rentang waktu tertentu yang dalam kajian ini dipilih 1.0000 s. Dengan menggunakan persamaan (2.44) diperoleh nilai maksimum frekuensi yang dapat diidentifikasi yaitu 682.6667 Hz. Rentang frekuensi untuk proses identifikasi data respons hasil pengujian dipilih sama dengan yang digunakan pada identifikasi data respons hasil simulasi, yaitu 0-400 Hz.

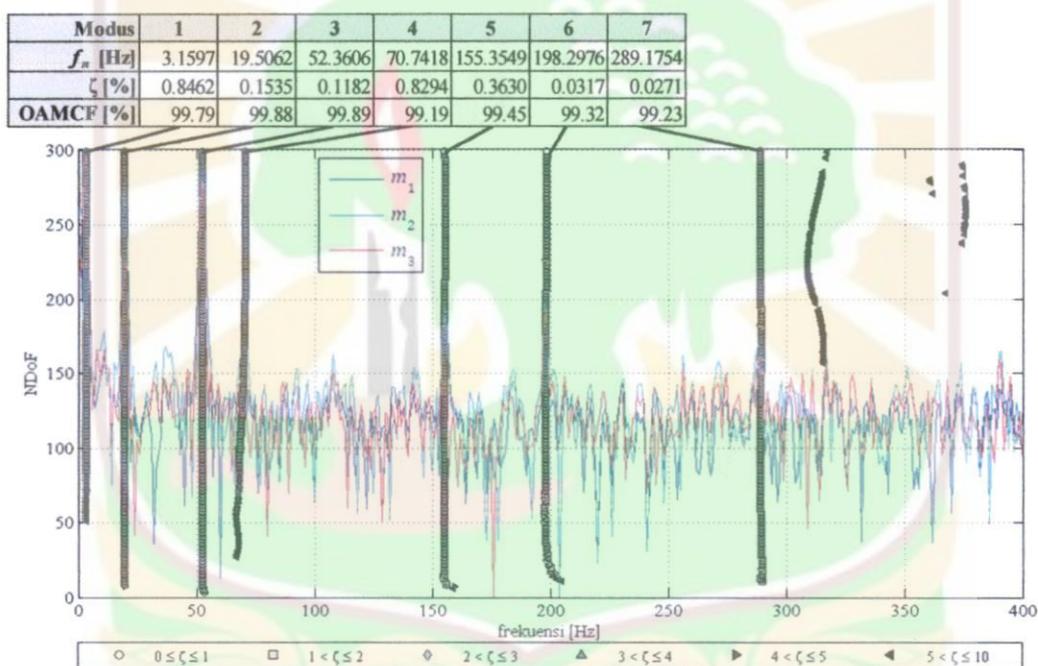
Proses identifikasi juga dilakukan dengan penerapan diagram kestabilan untuk jumlah NDoF sebesar 300. Pemilihan harga NDoF dengan besar 300 didasari pada suatu kondisi bahwa identifikasi dilakukan melalui pemodelan modus struktur uji ditambah dengan modus *noise*. Nilai parameter *modal* frekuensi pribadi dan rasio redaman serta OAMCF hasil identifikasi dapat diketahui dari diagram kestabilan seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 4.23. Berdasarkan Gambar 4.23 terlihat bahwa ada 15 modus yang memenuhi persyaratan redaman *modal*, yaitu di bawah 5%. Kemudian, PSD dari ketiga respons percepatan hasil pengujian juga ditampilkan secara bersama dengan hasil proses identifikasi dalam diagram kestabilan.



Gambar 4.23 Diagram kestabilan identifikasi hasil pengujian *modal* balok uji berdasarkan data respons percepatan yang dicuplik pada ketiga massa tambahan untuk waktu awal identifikasi 0.1000 s.

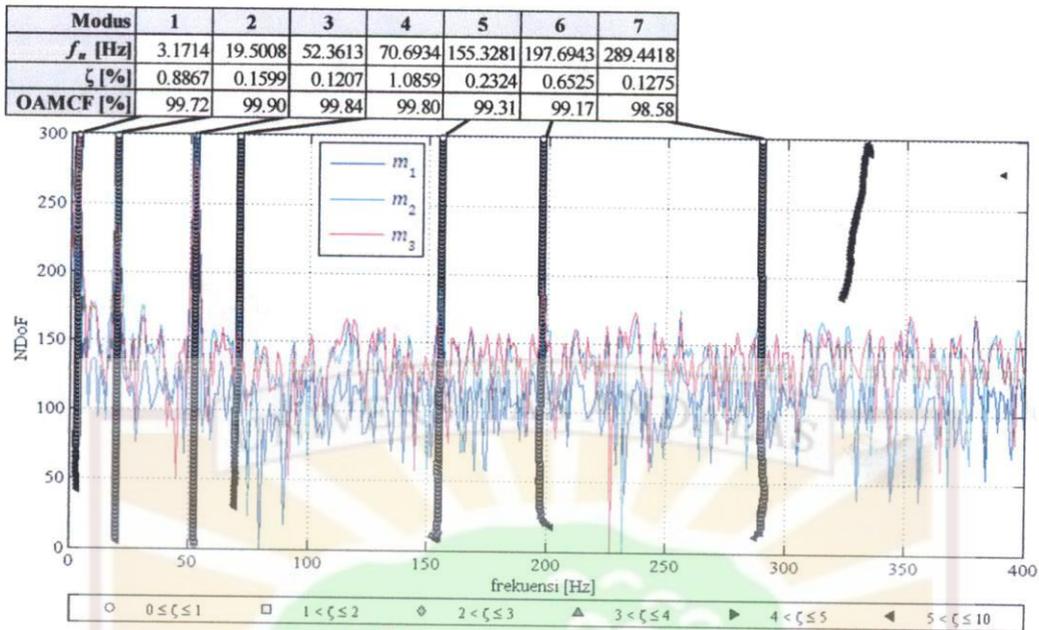
Dengan mengacu pada diagram kestabilan yang telah diperoleh diketahui terdapat 12 modus yang memenuhi kriteria kestabilan pada rentang frekuensi yang diberikan. Keduabelas modus dari 16 modus yang teridentifikasi pada tabel dalam Gambar 4.23 yaitu modus 1-6, 8-10, 13, 15 dan 16. Modus 7, 11, 12, dan 14 tidak memenuhi kriteria kestabilan hasil identifikasi pada frekuensi yang bersangkutan. Diagram kestabilan pada Gambar 4.23 menunjukkan ada beberapa modus yang tidak berada pada puncak frekuensi resonans di luar modus *noise* yang telah teridentifikasi. Modus-modus ini merupakan modus 8 (275.4212 Hz), 10 (292.5554 Hz), 13 (367.1319 Hz), 15 (390.5099 Hz), dan 16 (398.6040 Hz). Untuk dapat membuktikan keenam modus tersebut bukan merupakan modus riil struktur maka dapat dilakukan pergeseran waktu awal identifikasi.

Identifikasi dilakukan kembali dengan menggeser waktu awal proses identifikasi. Sepuluh variasi waktu awal digunakan untuk identifikasi parameter *modal* dimulai dari 0.1000 s hingga 0.4375 s dengan rentang pergeseran waktu awal antara dua proses identifikasi berurutan sebesar 0.0375 s. Keempat parameter numerik N_1 - N_4 dan Δt serta jumlah NDoF dan jumlah kolom data respons dipertahankan konstan selama proses identifikasi dilakukan untuk sepuluh variasi waktu awal tersebut. Diagram kestabilan hasil identifikasi untuk waktu awal identifikasi 0.2500 s dan 0.4000 s masing-masing ditampilkan dalam Gambar 4.24 dan 4.25. Hasil identifikasi parameter *modal* untuk sepuluh variasi waktu awal yang berbeda ditunjukkan masing-masingnya dalam Tabel 4.6 dan 4.7 serta Gambar 4.26.



Gambar 4.24 Diagram kestabilan identifikasi hasil pengujian *modal* balok gantung dengan tiga massa tambahan berdasarkan data respons percepatan yang dicuplik pada ketiga massa tambahan untuk waktu awal identifikasi 0.2500.

Frekuensi pribadi merupakan parameter *modal* yang bersifat unik. Sifat unik dapat dipenuhi oleh hasil identifikasi yang menghasilkan frekuensi pribadi yang sama untuk setiap pengukuran yang dilakukan. Berdasarkan hasil identifikasi dalam rentang frekuensi pengamatan dapat diketahui bahwa sifat unik global ini terpenuhi (Tabel 4.6). Nilai rata-rata parameter *modal* dari 10 kali proses identifikasi digunakan sebagai hasil identifikasi dan kemudian dibandingkan dengan hasil penghitungan EVP-FEM.



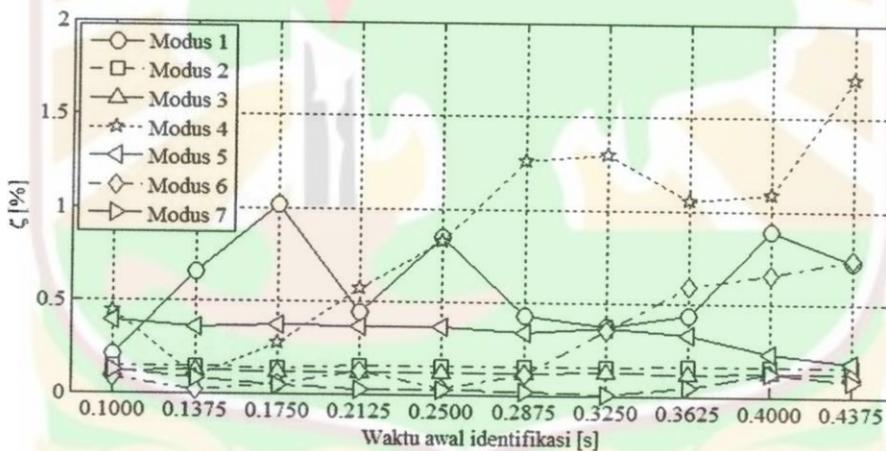
Gambar 4.25 Diagram kestabilan identifikasi hasil pengujian *modal* balok gantung dengan tiga massa tambahan berdasarkan data respons percepatan yang dicuplik pada ketiga massa tambahan untuk waktu awal identifikasi 0.4000 s.

Tabel 4.6 Hasil identifikasi frekuensi pribadi hasil pengujian *modal* balok gantung (Gambar 3.1) berdasarkan data respons percepatan ketiga massa tambahan akibat eksitasi impuls pada posisi m_3 untuk 10 variasi waktu awal identifikasi.

Waktu awal	Modus 1	Modus 2	Modus 3	Modus 4	Modus 5	Modus 6	Modus 7
0.1000 s	3.2282	19.5074	52.3579	70.3015	155.3361	197.8482	288.7968
0.1375 s	3.2240	19.5055	52.3587	70.3673	155.3332	197.9882	288.8622
0.1750 s	3.1981	19.5069	52.3591	70.5031	155.3087	197.9309	288.9128
0.2125 s	3.1673	19.5034	52.3609	70.7048	155.2787	198.1632	289.0780
0.2500 s	3.1597	19.5062	52.3606	70.7418	155.3549	198.2976	289.1754
0.2875 s	3.1752	19.5032	52.3611	70.8473	155.3705	198.6315	289.1519
0.3250 s	3.1768	19.5031	52.3603	70.7540	155.4511	198.6251	289.1292
0.3625 s	3.1697	19.5019	52.3606	70.7979	155.3175	197.9765	289.1904
0.4000 s	3.1714	19.5008	52.3613	70.6934	155.3281	197.6943	289.4418
0.4375 s	3.1981	19.5039	52.3638	70.6927	155.0244	196.8865	289.2072
Rata-rata	3.1869	19.5042	52.3604	70.6404	155.3103	198.0042	289.0946

Tabel 4.7 Hasil identifikasi rasio redaman hasil pengujian *modal* balok gantung (Gambar 3.1) berdasarkan data respons percepatan ketiga massa tambahan akibat eksitasi impuls pada posisi m_3 untuk 10 variasi waktu awal identifikasi.

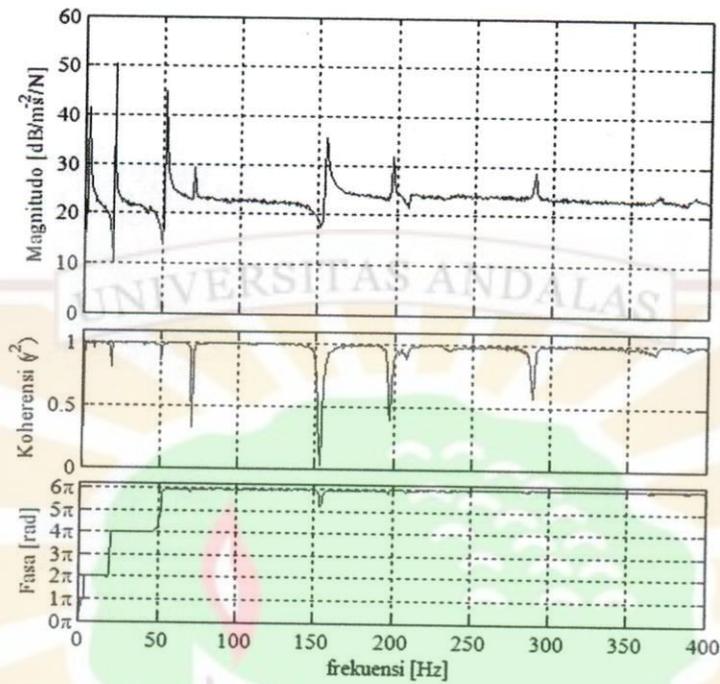
Waktu awal	Modus 1	Modus 2	Modus 3	Modus 4	Modus 5	Modus 6	Modus 7
0.1000 s	0.2127	0.1467	0.1192	0.4418	0.3956	0.0834	0.1261
0.1375 s	0.6538	0.1481	0.1208	0.0921	0.3595	0.0207	0.0808
0.1750 s	1.0173	0.1385	0.1176	0.2725	0.3710	0.0509	0.0450
0.2125 s	0.4428	0.1504	0.1183	0.5736	0.3660	0.1271	0.0250
0.2500 s	0.8462	0.1535	0.1182	0.8294	0.3630	0.0317	0.0271
0.2875 s	0.4257	0.1544	0.1176	1.2613	0.3375	0.1128	0.0200
0.3250 s	0.3698	0.1554	0.1230	1.2913	0.3627	0.3494	0.0007
0.3625 s	0.4390	0.1565	0.1184	1.0497	0.3331	0.5953	0.0442
0.4000 s	0.8867	0.1599	0.1207	1.0859	0.2324	0.6525	0.1275
0.4375 s	0.7304	0.1595	0.1255	1.7022	0.1802	0.7395	0.0815
Rata-rata	0.6024	0.1523	0.1199	0.8600	0.3301	0.2763	0.0578



Gambar 4.26 Hasil identifikasi rasio redaman hasil pengujian *modal* balok gantung (Gambar 3.1) berdasarkan data respons percepatan ketiga massa tambahan untuk 10 variasi waktu awal identifikasi.

Data gangguan juga dicuplik dalam pengujian, sehingga FRF dari struktur uji dapat dibentuk. FRF, koherensi dan fasa *non-minimum* yang ditampilkan dalam Gambar 4.27 ($H_{33}(f)$) dihitung dengan menggunakan estimator $H_v(f)$. FRF $H_{33}(f)$ menunjukkan adanya 7 puncak frekuensi pribadi struktur. Ketujuh frekuensi pribadi yang diperoleh dari kurva FRF $H_{33}(f)$ mendukung hasil identifikasi yang telah diperoleh dengan menggunakan metode ITD. Perbandingan frekuensi

pribadi balok uji hasil komputasi EVP-FEM, identifikasi dengan metode ITD, dan metode *half power point* (HPP) pada kurva FRF didaftarkan dalam Tabel 4.8.



Gambar 4.27 FRF $H_{33}(f)$ melalui penerapan *estimator* $H_v(f)$ beserta koherensi ($\gamma^2(f)$) dan fasa yang ditentukan dengan *estimator* $H_1(f)$ hasil pengujian *modal* EMA yang mengindikasikan 7 resonans pada kurva FRF.

Tabel 4.8 Perbandingan frekuensi pribadi balok gantung (Gambar 3.1) hasil penghitungan EVP-FEM model balok Euler-Bernoulli dan hasil identifikasi melalui metode ITD dan metode HPP pada kurva FRF berdasarkan data pengujian *modal* dalam rentang frekuensi 0-400 Hz (¹ Tabel 4.2, ² nilai rata-rata pada Tabel 4.7, dan ³ Gambar 4.27).

Modus	EVP-FEM ¹ [Hz]	ITD ² [Hz]	FRF-HPP ³ [Hz]
1	3.1037	3.1869	3.1875
2	19.5281	19.5042	19.5000
3	52.5920	52.3604	52.3750
4	165.8033	70.6404	70.5625
5	246.8868	155.3103	155.3750
6	356.2033	198.0042	197.9375
7	-	289.0946	288.7500

Berdasarkan hasil yang diperoleh pada dua metode identifikasi (ITD dan FRF-HPP) diperoleh 7 modus struktur dalam rentang frekuensi pengamatan. Sementara itu, hasil penghitungan EVP-FEM menunjukkan adanya 6 modus dalam rentang frekuensi tersebut. Melalui hasil yang didapatkan berdasarkan ketiga metode ini diketahui terdapat 3 modus terendah yang menunjukkan nilai yang hampir berdekatan. Persentase perbedaan harga frekuensi pribadi dari ketiga modus terendah dari hasil identifikasi terhadap hasil komputasi EVP-FEM masing-masing adalah sebesar 2.68% dan 2.70% untuk modus pertama, 0.12% dan 0.14% untuk modus kedua, dan 0.44% dan 0.41% untuk modus ketiga.

Frekuensi pribadi pada modus berikutnya (modus keempat dan seterusnya) memperlihatkan perbedaan yang cukup signifikan. Perbedaan nilai frekuensi pribadi untuk modus keempat dan seterusnya dari hasil identifikasi dengan hasil komputasi EVP-FEM dapat disebabkan oleh kemampuan sensor dalam mendeteksi arah getar dari struktur uji. Pemodelan matematis struktur uji yang sebelumnya dihitung secara numerik (EVP-FEM) dilakukan untuk perpindahan dalam arah transversal balok (translasi y) dan lenturan (*bending*) terhadap sumbu z (rotasi z) pada bidang xy , seperti terlihat pada Gambar 3.1. Ketika pengukuran dilaksanakan getaran balok dapat terjadi dalam arah aksial (translasi x), dua arah transversal balok (translasi y dan z), satu puntiran (*twisting*) terhadap sumbu x (rotasi x), dan dua lenturan pada terhadap sumbu y dan z (rotasi y dan z).

Kemunculan modus di luar pemodelan arah getar struktur uji disebabkan ketika eksitasi yang diberikan tidak tepat pada bidang netral balok. Kondisi ini akan mengeksitasi modus getar balok yang tidak dimodelkan dalam simulasi. Akibatnya *accelerometer* akan merekam data percepatan dalam arah getar yang tidak dimodelkan tersebut. Hal ini juga didukung oleh adanya *cross-axis sensitivity accelerometer* meskipun *accelerometer* yang digunakan adalah jenis satu arah (*uniaxial*). *Cross-axis sensitivity* ketiga *accelerometer* yang digunakan dalam pencuplikan respons memiliki nilai sensitifitas sebesar 5% dari nilai *reference sensitivity* (10 mV/ms^{-2}).

Dengan memperluas pemodelan numerik menjadi model balok tiga dimensi (3D), selanjutnya dapat ditentukan kesesuaian antara frekuensi pribadi balok hasil identifikasi melalui data pengujian dan model numerik. Perluasan model balok menjadi balok 3D menghasilkan penghitungan frekuensi pribadi balok seperti yang didaftarkan dalam Tabel 4.9. Proses komputasi model balok 3D juga melibatkan penghitungan *modal participation* yang merupakan kontribusi nilai vektor karakteristik pada keenam arah getar balok.

Tabel 4.9 Frekuensi pribadi balok gantung (Gambar 3.1) hasil penghitungan EVP-FEM model balok 3D dalam rentang frekuensi 0-400 Hz beserta *modal participation* (%) pada keenam arah getar balok, Tx, Ty, Tz, Rx, Ry, dan Rz masing-masingnya merupakan arah getar translasi terhadap sumbu x , y , dan z serta rotasi terhadap sumbu x , y dan z .

Modus	f [Hz]	<i>Modal participation</i> [%]					
		Tx	Ty	Tz	Rx	Ry	Rz
1	3.1037	0.00	68.07	0.00	0.00	0.00	10.74
2	19.5281	0.00	20.72	0.00	0.00	0.00	51.31
3	19.7087	0.00	0.00	68.04	29.79	10.69	0.00
4	52.5920	0.00	6.18	0.00	0.00	0.00	18.77
5	72.7590	0.00	0.00	0.00	50.96	0.00	0.00
6	129.2200	0.00	0.00	20.76	8.99	51.49	0.00
7	165.8033	0.00	0.52	0.00	0.00	0.00	1.76
8	205.4200	0.00	0.00	0.00	4.24	0.00	0.00
9	246.8868	0.00	0.85	0.00	0.00	0.00	2.97
10	300.0400	0.00	0.00	0.01	0.77	0.03	0.00
11	356.2033	0.02	0.48	0.00	0.00	0.00	1.74
12	356.6200	0.00	0.00	6.14	2.53	18.71	0.00
Total		0.02	96.82	94.95	97.28	80.92	87.29

Dengan mengacu pada Tabel 4.9 dapat diketahui arah getar keempat modus tertinggi dari 7 modus yang diidentifikasi. Modus keempat hasil identifikasi merupakan modus puntir (rotasi terhadap sumbu x). Modus kelima dapat dinyatakan sebagai modus keempat dari model balok 2D yang dibangun. Modus keenam merupakan modus puntir (rotasi terhadap sumbu x) dan lenturan terhadap sumbu y . Sementara itu, modus ketujuh dinyatakan sebagai modus kombinasi dari arah getar rotasi terhadap sumbu x (puntir), translasi terhadap sumbu z , dan lenturan terhadap sumbu y . Persentase perbandingan hasil identifikasi frekuensi

pribadi (ITD dan FRF-HPP) terhadap hasil penghitungan EVP-FEM ditunjukkan dalam Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Perbandingan frekuensi pribadi balok gantung (Gambar 3.1) hasil penghitungan EVP-FEM model balok 3D dan hasil identifikasi melalui metode ITD dan metode HPP pada kurva FRF berdasarkan data pengujian *modal* berikut persentase terhadap EVP-FEM (ε_f [%]) dalam rentang frekuensi 0–400 Hz (¹ Tabel 4.10, ² nilai rata-rata pada Tabel 4.7, dan ³ Gambar 4.27).

Modus	EVP-FEM ¹ [Hz]	ITD ²		FRF-HPP ³	
		f [Hz]	ε_f [%]	f [Hz]	ε_f [%]
1	3.1037	3.1869	2.68	3.1875	2.70
2	19.5281	19.5042	0.12	19.5000	0.14
3	52.5920	52.3604	0.44	52.3750	0.41
4	72.7590	70.6404	2.91	70.5625	3.02
5	165.8033	155.3103	6.33	155.3750	6.29
6	205.4200	198.0042	3.61	197.9375	3.64
7	300.0400	289.0946	3.65	288.7500	3.76

Berdasarkan hasil yang ditunjukkan oleh Tabel 4.9 dan 4.10 diketahui bahwa hanya empat modus riil struktur balok uji yang dapat diidentifikasi untuk model balok 2D. Keempat modus dalam arah getar yang dikaji kemudian dapat digunakan untuk mengoreksi model FEM yang telah dibangun atau dikenal dengan *finite element (FE) updating*. Dalam hal ini, informasi mengenai modus getar normal juga dibutuhkan agar *FE updating* dapat dilakukan dengan sukses.

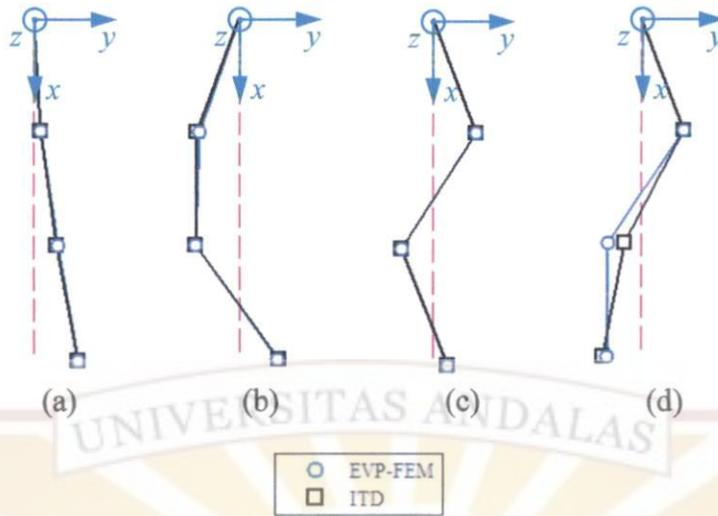
Rasio redaman struktur juga memiliki sifat unik seperti halnya frekuensi pribadi struktur. Berdasarkan hasil yang diperoleh dari 10 kali proses identifikasi didapatkan bahwa sifat unik ini hanya dipenuhi oleh beberapa modus saja, terutama modus 2 dan 3, seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 4.7 dan Gambar 4.27. Kelima modus lainnya menunjukkan fluktuasi nilai rasio redaman dari 10 kali proses identifikasi. Kondisi ini menunjukkan kesensitifan metode ITD dalam memberikan hasil identifikasi rasio redaman struktur akibat pergeseran waktu awal identifikasi. Dengan mengacu pada keseluruhan nilai rasio redaman yang diidentifikasi dapat dinyatakan bahwa struktur memiliki nilai rasio redaman yang rendah (*light damping*).

Perbandingan rasio redaman yang diidentifikasi melalui metode ITD dengan hasil yang diperoleh melalui metode HPP pada kurva FRF diberikan dalam Tabel 4.11. Identifikasi rasio redaman dengan metode HPP pada kurva FRF dilakukan dengan mengambil asumsi bahwa setiap puncak frekuensi masing-masing modus diperlakukan sebagai sistem 1 DoF. Rasio redaman dihitung dengan menentukan beda frekuensi pada kedua sisi kurva FRF setelah penurunan nilai magnitudo FRF 3 dB dari titik resonansi. Mengacu pada Tabel 4.11 diketahui bahwa identifikasi rasio redaman dengan metode HPP menunjukkan nilai yang secara umum lebih tinggi dari hasil identifikasi dengan metode ITD dan masih tergolong sebagai redaman rendah, di bawah 5%.

Tabel 4.11 Perbandingan rasio redaman balok gantung (Gambar 3.1) hasil identifikasi melalui metode ITD dan metode HPP pada kurva FRF berdasarkan data pengujian *modal* dalam rentang frekuensi 0-400 Hz [%] (¹ nilai rata-rata pada Tabel 4.8, dan ² Gambar 4.27).

Modus	ITD ¹	FRF-HPP ²
1	0.6024	2.2894
2	0.1523	0.3180
3	0.1199	0.3749
4	0.8600	0.3469
5	0.3301	0.4953
6	0.2763	0.2977
7	0.0578	0.3950

Modus getar normal hasil identifikasi dari data pengujian yang telah ditransformasi melalui penerapan metode Nidbal ditampilkan dalam Gambar 4.28. Tiga modus getar normal pertama dan modus getar normal kelima hasil identifikasi menunjukkan kesesuaian dengan 4 modus getar normal terendah hasil penghitungan EVP (seperti pada Gambar 4.1). Modus getar normal keempat, keenam, dan ketujuh hasil identifikasi tidak dapat ditampilkan karena tidak cukupnya informasi spasial mengenai penempatan posisi sensor. Hasil identifikasi yang ada hanya merupakan pengaruh dari *cross-axis sensitivity accelerometer* yang digunakan untuk mencuplik respons.



Gambar 4.28 Tujuh modus getar normal terendah balok uji berdasarkan hasil identifikasi respons percepatan dengan metode ITD, ketujuh modus dinormalisasi terhadap nilai maksimum pada setiap modusnya, (a) modus pertama (3.1869 Hz), (b) modus kedua (19.5042 Hz), (c) modus ketiga (52.3604 Hz), (d) modus kelima (155.3103 Hz).

5 IDENTIFIKASI PARAMETER *MODAL* MELALUI METODE *RANDOM DECREMENT* DAN IBRAHIM *TIME DOMAIN*

Bagian ini menyajikan hasil dan pembahasan dari penggunaan metode RD untuk mengubah respons getaran paksa akibat gangguan acak menjadi respons getaran bebas. Dalam hal ini, teknik *triggering* diterapkan untuk memperoleh respons getaran bebas atau fungsi RD. Parameter *modal* struktur kemudian diekstraksi dari fungsi RD yang diperoleh menggunakan metode ITD. Identifikasi dengan metode RD dan ITD diterapkan pada model struktur bangunan dua lantai seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3.2. Struktur uji dieksitasi dalam bentuk gangguan acak yang diberikan secara buatan pada tumpuan.

5.1 Penerapan Metode RD dan ITD Untuk Identifikasi Parameter *Modal* Struktur Menggunakan Data Respons Hasil Komputasi Numerik

Pemodelan struktur pada Gambar 3.2 dilakukan dengan dua pendekatan. Pendekatan pertama menggunakan model bangunan penahan geser atau idealisasi model sistem 2 DoF dengan massa terpusat. Pendekatan kedua dari struktur uji dilakukan dengan menggunakan model struktur rangka bidang. Nilai numerik dari sifat-sifat fisik struktur uji yang ditunjukkan dalam Gambar 3.2 didaftarkan dalam Tabel 3.2. Nilai numerik sifat-sifat fisik ini digunakan untuk penyelesaian masalah bilangan pribadi (EVP) serta penghitungan respons kedua model.

Model struktur rangka bidang pada pendekatan kedua didiskritisasi dengan menggunakan elemen yang memiliki karakteristik linier (*linear isoparametric element*). Penyelesaian EVP dari kedua model dilakukan dengan menerapkan metode Arnoldi/Lanczos [27] pada submodul FEM – *Modal Analysis* dalam

modul EAPack. Frekuensi pribadi yang telah dihitung menggunakan metode Arnoldi/Lanczos untuk kedua model struktur uji didaftarkan dalam Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Frekuensi pribadi terendah [Hz] model bangunan dua lantai yang dimodelkan sebagai sistem terpusat 2 DoF dan model rangka bidang yang didiskritisasi melalui penerapan FEM.

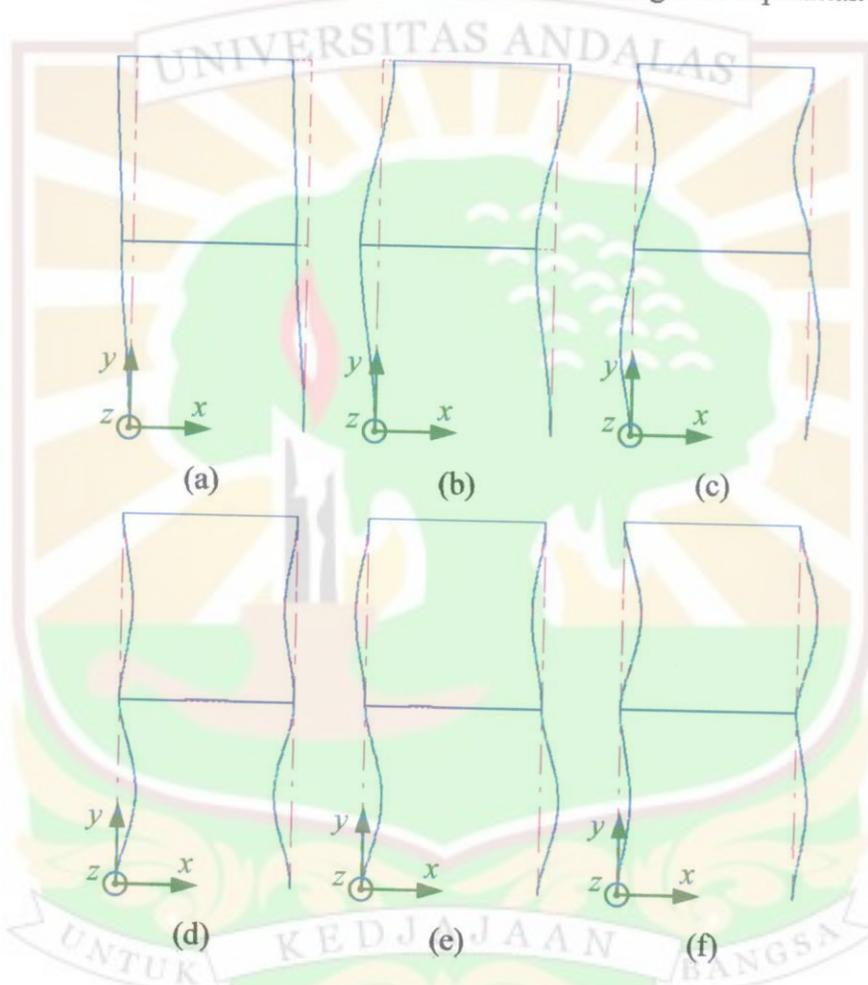
Modus	Frekuensi pribadi (f [Hz])	
	Model 2DoF	Rangka bidang
1	2.2417	2.2148
2	5.8689	5.8067
3	-	115.7288
4	-	115.7771
5	-	115.9228
6	-	116.8309

Parameter *modal* dari model bangunan dua lantai diidentifikasi dalam rentang frekuensi 0-20 Hz. Rentang frekuensi ini digunakan untuk proses identifikasi data yang diperoleh dari simulasi numerik maupun pengujian. Penyelesaian EVP struktur uji dalam rentang frekuensi 0-200 Hz menunjukkan enam modus getar terendah, seperti ditampilkan dalam Tabel 5.1. Visualisasi modus getar struktur diperlihatkan dalam Gambar 5.1. Empat modus tertinggi dari enam modus yang diperoleh dengan simulasi numerik EVP menunjukkan bahwa modus tersebut didominasi oleh perpindahan pada kolom struktur. Kondisi ini disebabkan oleh rendahnya kekakuan kolom dibandingkan dengan kekakuan lantai struktur.

Jika dicermati lebih teliti, maka dapat diketahui bahwa keempat frekuensi pribadi tertinggi dari enam modus terendah memiliki nilai yang berdekatan atau dikenal dengan istilah *closed modes*. Keempat modus ini mudah diidentifikasi secara numerik. Akan tetapi, dalam kaji eksperimental sangat sulit untuk membedakan keempat modus tersebut. Hal ini disebabkan karena kondisi redaman pada struktur menyebabkan modus ketiga hingga keenam akan teridentifikasi sebagai satu modus.

Respons model bangunan dua lantai dengan idealisasi sistem massa terpusat 2 DoF disimulasikan dengan selang waktu $\Delta t = 8$ ms. Hasil penghitungan numerik respons percepatan pada masing-masing lantai akibat eksitasi yang diberikan pada

tumpuan ditunjukkan dalam Gambar 5.2. Sinyal gangguan ini di-filter dengan *digital low-pass filter* dalam rentang frekuensi 0-20 Hz. Model rangka bidang dengan partisipasi 6 modus terendah (0-200 Hz) diselesaikan secara numerik dengan selang waktu simulasi 4 ms. *Digital low-pass filter* juga digunakan untuk menyaring frekuensi diatas 20 Hz yang terdapat pada sinyal respons. Respons percepatan hasil komputasi numerik untuk kasus kedua ini ditunjukkan pada Gambar 5.3. Respons percepatan dihitung pada titik tengah setiap lantai.



Gambar 5.1 Enam modus getar terendah model bangunan dua lantai melalui pendekatan rangka bidang (a) modus pertama ($f_1 = 2.2148$ Hz), (b) modus kedua ($f_2 = 5.8067$ Hz), (c) modus ketiga ($f_3 = 115.7282$), (d) modus keempat ($f_4 = 115.9221$ Hz), (e) modus kelima ($f_5 = 115.9221$ Hz), dan (f) modus keenam ($f_6 = 116.8303$ Hz).

Respons model bangunan dua lantai menggunakan pendekatan sistem getaran 2 DoF dihitung berdasarkan hasil EVP yang telah diperoleh, yaitu frekuensi pribadi dan modus getar. Hal yang sama juga dilakukan dalam penghitungan respons struktur untuk pendekatan model rangka bidang, di mana respons dihitung

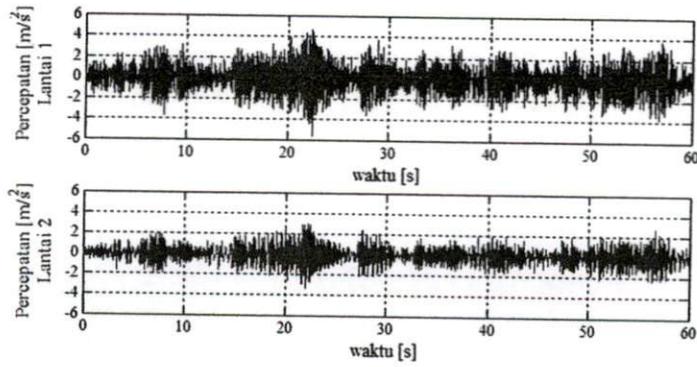
berdasarkan kontribusi 6 modus terendah struktur yang berada dalam rentang frekuensi 0-200 Hz. Eksitasi dalam bentuk simpangan diberikan pada tumpuan model struktur bangunan dua lantai. Jenis gangguan yang diberikan pada kedua model idealisasi adalah eksitasi acak yang memenuhi distribusi normal Gauss atau *white noise*.

Amplitudo simpangan sinyal gangguan pada tumpuan struktur adalah sebesar 10 mm *peak to peak*. Gangguan ini diberikan dalam durasi waktu 60 s. Agar simulasi yang dilakukan mendekati kondisi riil, nilai rasio redaman diberikan dalam nilai yang bervariasi pada setiap modusnya. Variasi nilai rasio redaman untuk setiap modus didaftarkan dalam Tabel 5.2. Respons struktur dihitung melalui metode integrasi numerik Newmark- β dalam ranah *modal*.

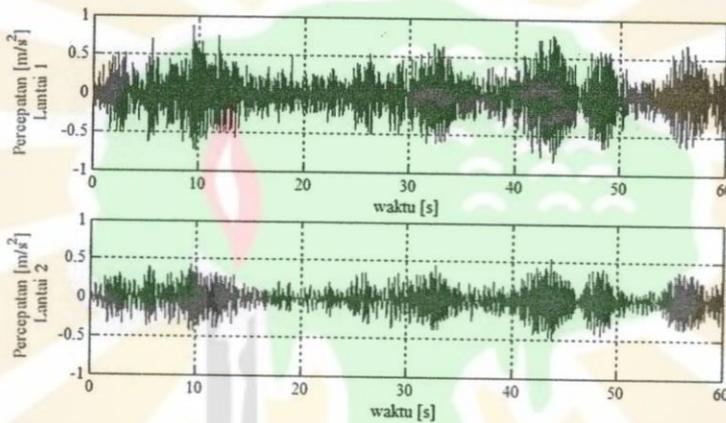
Tabel 5.2 Persentase rasio redaman *modal* [%] dari model bangunan dua lantai yang digunakan untuk menghasilkan respons.

Modus	Redaman modal (ζ [%])	
	Model 2 DoF	Rangka bidang
1	2.3400	2.3400
2	1.0900	1.0900
3	-	1.1260
4	-	0.9450
5	-	0.8320
6	-	0.7830

Jenis *triggering* yang digunakan untuk proses identifikasi adalah *level crossing* (T_x^L) dan *positive points* (T_x^P). Untuk kesederhanaan digunakan *level crossing triggering* sebesar $\sqrt{2}\sigma_x$, dengan σ_x merupakan RMS dari respons yang digunakan untuk proses *triggering*. Pemilihan nilai ini ditujukan untuk meminimumkan varians dari fungsi RD yang dihitung [18]. Untuk kondisi *positive point triggering* dipilih titik-titik *triggering* dalam rentang 0- ∞ dari nilai σ_x respons. Pemilihan ini bertujuan untuk memaksimalkan jumlah titik *triggering*.



Gambar 5.2 Respons percepatan masing-masing lantai bangunan (idealisasi sistem massa terpusat 2 DoF) akibat eksitasi *white noise* berupa simpangan yang diterapkan pada tumpuan.



Gambar 5.3 Respons percepatan pada setiap lantai (idealisasi struktur rangka bidang dengan kontribusi 6 modus terendah) akibat eksitasi *white noise* berupa simpangan yang diterapkan pada tumpuan.

Fungsi RD diperoleh melalui proses *triggering* menggunakan salah satu respons yang telah dicuplik sebagai acuan. Jika respons pada lantai 1 (L_1) digunakan sebagai acuan proses *triggering*, maka akan diperoleh dua fungsi RD yaitu korelasi langsung fungsi RD, $D_{x_1x_1}(\tau)$, serta korelasi silang fungsi RD, $D_{x_2x_1}(\tau)$. Demikian juga diperoleh dua fungsi RD ketika respons pada lantai 2 (L_2) dijadikan sebagai acuan proses *triggering*. *Time lag* atau segmen waktu (τ) merupakan pergeseran waktu yang digunakan untuk memperoleh fungsi RD. Dalam proses simulasi identifikasi digunakan segmen waktu sebesar 4 s.

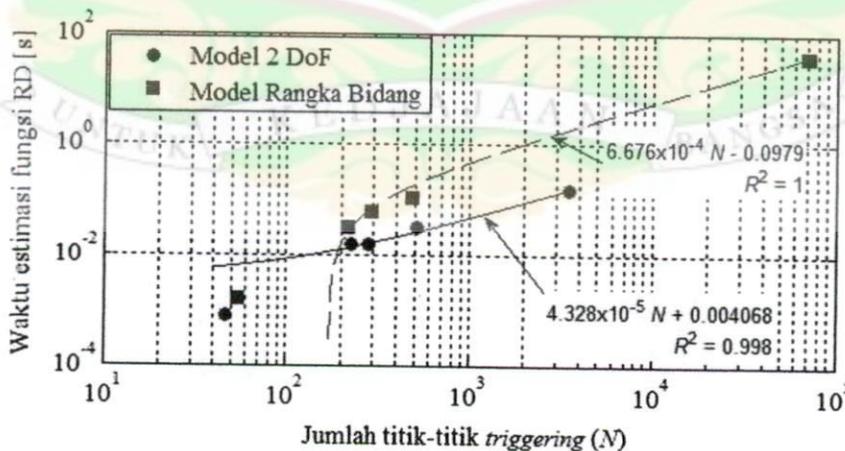
Jumlah titik *triggering* (N) yang dihasilkan dari penerapan *level crossing triggering* dan *positive point triggering* untuk memperoleh fungsi RD sangat tergantung pada respons yang menjadi acuan. Dalam hal ini, jumlah titik

triggering yang dihasilkan dari kedua kondisi *triggering* dapat diurutkan dari nilai maksimum ke minimum yaitu *positive point triggering* dan *level crossing triggering*. Jumlah titik *triggering* yang diperoleh dari respons struktur pada kedua kondisi *triggering* akibat eksitasi *white noise* ditampilkan dalam Tabel 5.3.

Tabel 5.3 Jumlah titik *triggering* berdasarkan penerapan dua kondisi *triggering* terhadap data respons percepatan akibat eksitasi *white noise* (berikut waktu estimasi fungsi RD [s]) di mana L_i menyatakan lantai ke- i ; $i = 1, 2$; dan * digunakan sebagai acuan untuk proses *triggering*.

Respons Di	Model 2 DoF			Model Rangka Bidang		
	T_x^L		T_x^P	T_x^L		T_x^P
	*L ₁	*L ₂	*L ₁	*L ₁	*L ₂	*L ₁
L ₁	279 (0.0156)	515 (0.0312)	3523 (0.1560)	289 (0.0624)	487 (0.1092)	70647 (39.8910)
L ₂	46 (0.0008)	228 (0.0156)	3514 (0.1560)	54 (0.0016)	218 (0.0312)	70102 (39.8115)

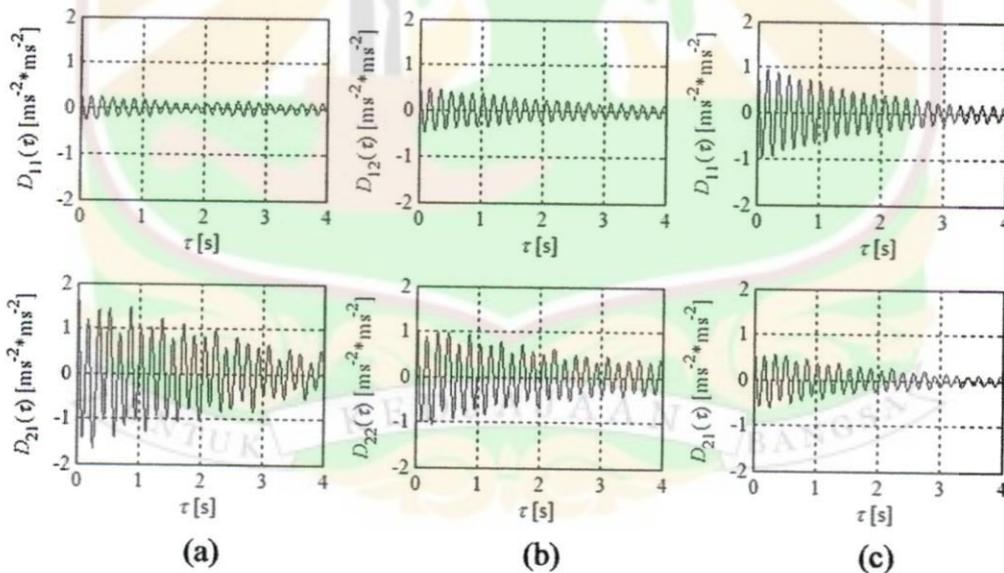
Melalui Tabel 5.3 juga ditampilkan besar waktu estimasi untuk membentuk fungsi RD berdasarkan jumlah titik *triggering* ini. Selanjutnya, hubungan antara jumlah titik *triggering* dan waktu estimasi fungsi RD dapat diprediksi seperti yang ditampilkan oleh Gambar 5.4. Hubungan jumlah titik *triggering* dan waktu estimasi yang dibutuhkan membentuk fungsi RD hubungan yang linier. Melalui kondisi ini dapat dinyatakan bahwa waktu estimasi untuk membentuk fungsi RD memiliki kenaikan yang proporsional dengan pertambahan jumlah titik *triggering*.



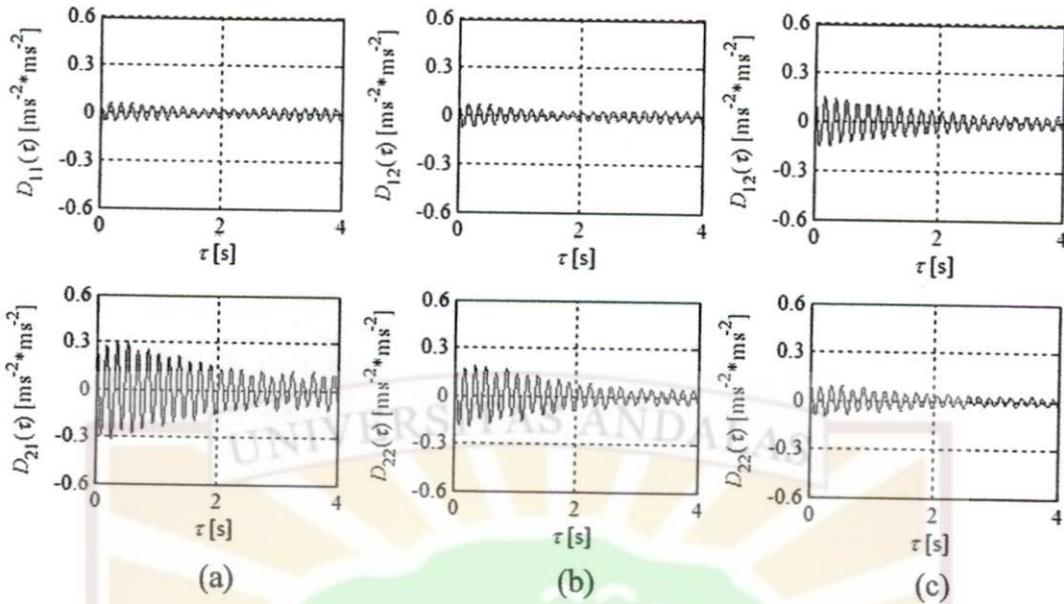
Gambar 5.4 Hubungan jumlah titik *triggering* dengan besar waktu estimasi untuk membentuk fungsi RD.

Keempat fungsi RD yang dihasilkan dari kedua kondisi *triggering* menggunakan data respons untuk kedua model struktur uji ditampilkan pada Gambar 5.5 dan 5.6. RMS respons yang dicuplik pada lantai 1 (L_1) dan lantai 2 (L_2) masing-masing memiliki harga sebesar 1.3639 m/s^2 dan 0.8639 m/s^2 untuk model 2 DoF. Sementara itu, RMS respons percepatan model rangka bidang setiap respons yang dicuplik adalah sebesar 0.2428 m/s^2 dan 0.1533 m/s^2 .

Fungsi RD respons kedua model yang di-*trigger* dengan *level crossing triggering* pada $\sqrt{2}\sigma_x$ ditunjukkan oleh Gambar 5.5 (a), 5.5 (b), 5.6 (a), dan 5.6 (b). Selanjutnya, fungsi RD respons percepatan menggunakan *positive point triggering* ditampilkan dalam Gambar 5.5 (c) dan 5.7 (c). Satu hal harus diperhatikan bahwa secara umum fungsi korelasi silang $D_{12}(\tau)$ dan $D_{21}(\tau)$ tidak sama. Khusus untuk *positive points triggering*, fungsi RD yang dihasilkan oleh setiap respons yang menjadi acuan *triggering* adalah sama. Oleh karena itu, fungsi RD yang dibentuk melalui penerapan *positive points* ditentukan berdasarkan salah satu respons acuan saja.



Gambar 5.5 Fungsi RD respons percepatan struktur model 2 DoF akibat eksitasi *white noise* berdasarkan (a) *level crossing triggering* acuan L_1 , (b) *level crossing triggering* acuan L_2 , dan (c) *positive point triggering* acuan L_1 .



Gambar 5.6 Fungsi RD respons percepatan struktur model rangka bidang akibat eksitasi *white noise* berdasarkan (a) *level crossing triggering* acuan L_1 , (b) *level crossing triggering* acuan L_2 , dan (c) *positive point triggering* acuan L_1 .

Dengan mengacu pada keempat fungsi RD yang diperoleh untuk masing-masing kondisi *triggering* maka parameter *modal* dari model pertama dapat diekstraksi dengan metode ITD. Parameter-parameter numerik metode ITD (N_1 , N_2 , dan N_3) digunakan sesuai dengan nilai-nilai yang optimum digunakan untuk proses identifikasi, Gambar 2.2. Sementara itu parameter N_4 dan rentang T_{span} untuk menentukan jumlah kolom seperti pada persamaan (2.45) juga dipilih untuk memperoleh hasil identifikasi yang optimum. Hasil identifikasi parameter *modal* melalui penerapan metode RD untuk kedua kondisi *triggering* beserta acuan *triggering* dan metode ITD ditampilkan dalam Tabel 5.4, 5.5 dan 5.6.

Tabel 5.4 Frekuensi pribadi [Hz] hasil identifikasi dengan metode ITD berdasarkan fungsi RD yang diperoleh melalui kedua kondisi *triggering* terhadap data respons percepatan akibat eksitasi *white noise* dengan L_i menyatakan lantai ke- i ; $i = 1, 2$; dan sebagai acuan untuk proses *triggering*.

Modus	Model 2 DoF				Model Rangka Bidang			
	EVP	$T_{x(t)}^L$		$T_{x(t)}^P$	EVP	$T_{x(t)}^L$		$T_{x(t)}^P$
		L_1	L_2	L_1		L_1	L_2	L_1
1	2.2417	2.2651	2.2182	2.2234	2.2148	2.2512	2.2549	2.2388
2	5.8689	5.8421	5.7962	5.8274	5.8067	5.8684	5.8477	5.8249

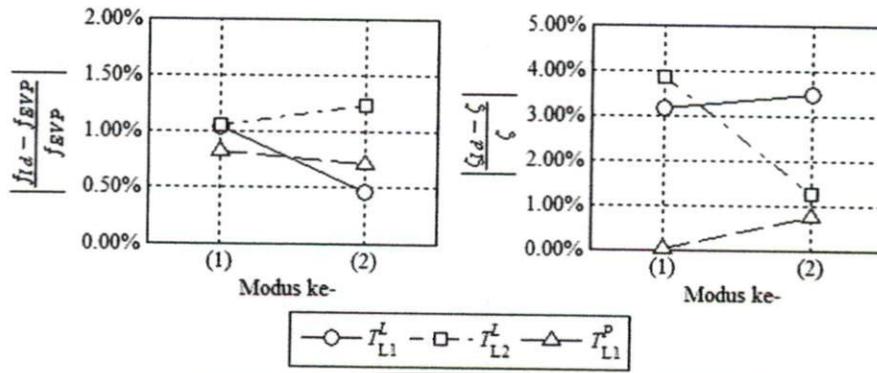
Tabel 5.5 Rasio redaman [%] hasil identifikasi dengan metode ITD berdasarkan fungsi RD yang diperoleh melalui kedua kondisi *triggering* terhadap data respons percepatan akibat eksitasi *white noise* dengan L_i menyatakan lantai ke- i ; $i = 1, 2$; dan sebagai acuan untuk proses *triggering*.

Modus	ζ (Tabel 5.3)	Model 2 DoF			Model Rangka Bidang		
		$T_{x(i)}^L$		$T_{x(i)}^P$	$T_{x(i)}^L$		$T_{x(i)}^P$
		L_1	L_2	L_1	L_1	L_2	L_1
1	2.3400	2.4141	2.2500	2.3398	2.2674	2.2804	2.4277
2	1.0900	1.0524	1.1037	1.0981	1.0432	1.1066	1.0971

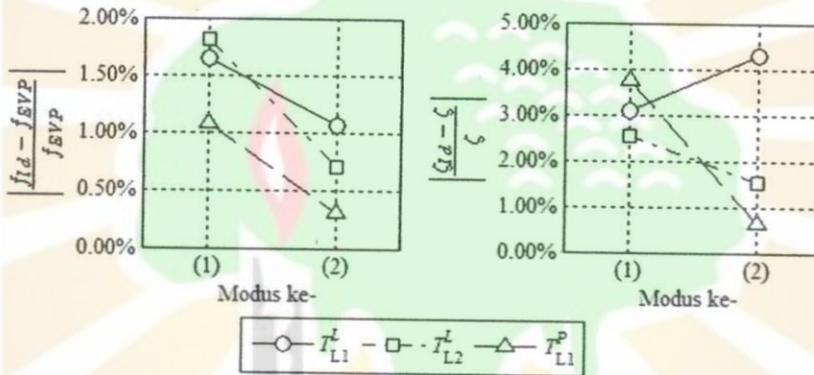
Tabel 5.6 OAMCF [%] hasil identifikasi dengan metode ITD berdasarkan fungsi RD yang diperoleh melalui kedua kondisi *triggering* terhadap data respons percepatan akibat eksitasi *white noise* dengan L_i menyatakan lantai ke- i ; $i = 1, 2$; dan sebagai acuan untuk proses *triggering*.

Modus	Model 2 DoF			Model Rangka Bidang		
	$T_{x(i)}^L$		$T_{x(i)}^P$	$T_{x(i)}^L$		$T_{x(i)}^P$
	L_1	L_2	L_1	L_1	L_2	L_1
1	96.54	93.15	97.15	99.58	99.79	99.79
2	96.81	96.42	96.35	99.56	99.78	99.78

Persentase kesalahan hasil identifikasi frekuensi pribadi dibandingkan terhadap hasil penghitungan EVP (Tabel 5.1) untuk kedua model pendekatan struktur uji. Sementara itu, rasio redaman dikomprasi dengan nilai yang diberikan dalam Tabel 5.2. Persentase kesalahan hasil identifikasi frekuensi pribadi dan rasio redaman untuk kedua model ditampilkan masing-masingnya dalam Gambar 5.7 dan 5.8. Hasil identifikasi frekuensi pribadi menunjukkan bahwa tingkat kesalahan terbesar diperoleh pada modus pertama melalui kondisi *level crossing triggering*. Secara umum diperoleh tingkat kesalahan frekuensi pribadi dan rasio redaman model 2 DoF masing-masing berada di bawah 1.5 % dan 4.0 % seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.7. Sedangkan pada model rangka bidang didapatkan tingkat kesalahan di bawah 2.0 % untuk frekuensi pribadi dan 5.0 % untuk rasio redaman, seperti yang diperlihatkan oleh Gambar 5.8.



Gambar 5.7 Persentase kesalahan hasil identifikasi frekuensi pribadi dan rasio redaman [%] model 2 DoF untuk kedua kondisi *triggering* pada setiap respons referensi *triggering*.



Gambar 5.8 Persentase kesalahan hasil identifikasi frekuensi pribadi dan rasio redaman [%] model rangka bidang untuk kedua kondisi *triggering* pada setiap respons referensi *triggering*.

Untuk *level crossing triggering* menggunakan referensi L_2 diperoleh persentase penyimpangan yang lebih kecil dari penggunaan referensi L_1 . Hal ini disebabkan oleh rendahnya nilai RMS respons L_2 dibandingkan dengan RMS respons L_1 . Kondisi ini juga berhubungan langsung dengan jumlah titik *triggering* yang banyak sehingga kualitas fungsi RD yang dihasilkan jauh lebih baik. Penerapan *positive point triggering* menghasilkan persentase kesalahan penghitungan frekuensi pribadi yang sama untuk setiap referensi *triggering* yang digunakan.

Kesalahan rata-rata hasil identifikasi frekuensi pribadi dan rasio redaman diperoleh melalui penggunaan *positive point triggering* lebih rendah dibandingkan kesalahan yang didapatkan melalui *level crossing triggering*. Kondisi ini disebabkan oleh kondisi *triggering* diterapkan untuk keseluruhan data diskrit respons yang berada dalam interval $0-\infty$ dari nilai RMS-nya. Kualitas

optimum fungsi RD karena banyaknya jumlah titik *triggering* yang digunakan akan memberikan kualitas hasil identifikasi menjadi lebih baik. Dengan demikian, penerapan *positive point triggering* dalam menghasilkan fungsi RD untuk proses identifikasi dengan metode ITD akan memberikan kualitas hasil identifikasi yang lebih baik dibandingkan dengan *level crossing triggering*. Di samping itu, hal ini dibuktikan dengan dengan nilai OAMCF modus-modus yang diidentifikasi berada di atas 90%.

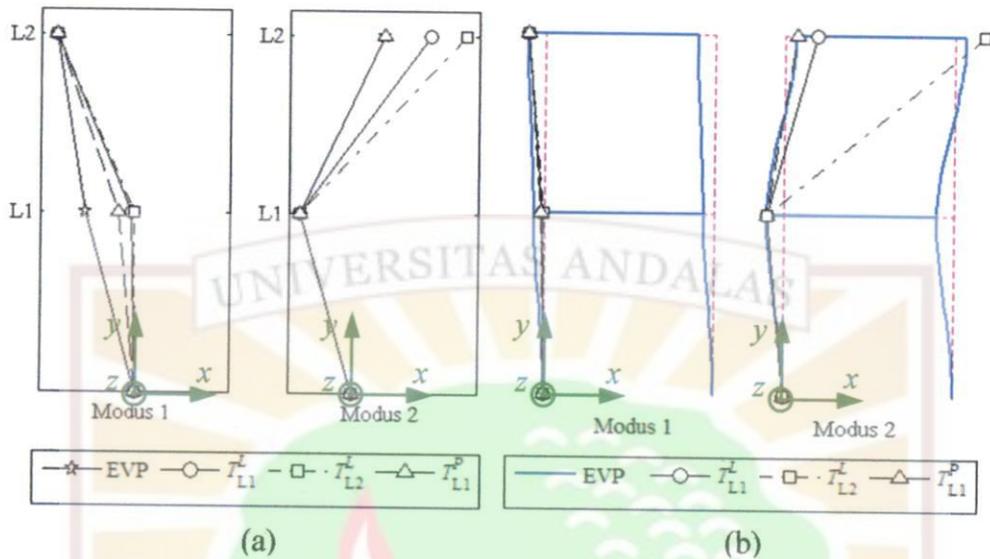
Penentuan modus getar normal dari modus getar kompleks hasil identifikasi menggunakan metode ITD kembali dilakukan dengan menerapkan metode Niedbal. Posisi pencuplikan respons percepatan pada struktur uji digunakan sebagai informasi spasial untuk visualisasi modus getar normal yang telah ditransformasi dari modus getar kompleks. Modus getar normal hasil identifikasi untuk kedua model simulasi yang digunakan ditampilkan dalam Tabel 5.7 dan Gambar 5.9.

Tabel 5.7 Modus getar normal hasil identifikasi berdasarkan fungsi RD yang dibentuk melalui penerapan kedua kondisi *triggering* terhadap data respons percepatan akibat eksitasi *white noise* yang telah dinormalisasi dengan *L_i menyatakan lantai ke- i ; $i = 1, 2$; sebagai acuan untuk proses *triggering*.

Modus	Model 2 DoF				Model Rangka Bidang			
	EVP	$T_{x(t)}^L$		$T_{x(t)}^P$	EVP	$T_{x(t)}^L$		$T_{x(t)}^P$
		*L_1	*L_2	$^*L_1/^*L_2$		*L_1	*L_2	$^*L_1/^*L_2$
1	-0.6180	-0.0373	-0.0057	-0.2091	-0.6200	-0.1354	-0.0469	-0.2485
	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000
2	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000
	0.6180	1.4988	2.1505	0.6072	0.6327	1.8292	11.1609	0.6321

Hasil identifikasi modus getar normal pada kedua model simulasi menggunakan *positive point triggering* menunjukkan adanya kesesuaian dengan modus getar normal hasil penghitungan EVP terutama untuk modus kedua. Penyimpangan cukup besar pada modus pertama diperlihatkan pada posisi pencuplikan respons percepatan di L_1 . Hal ini disebabkan oleh distorsi data respons selama dilakukannya proses penghitungan fungsi RD. Penyebab berikutnya berasal dari

rendahnya faktor partisipasi *modal* ketika eksitasi acak diberikan pada kedua model.



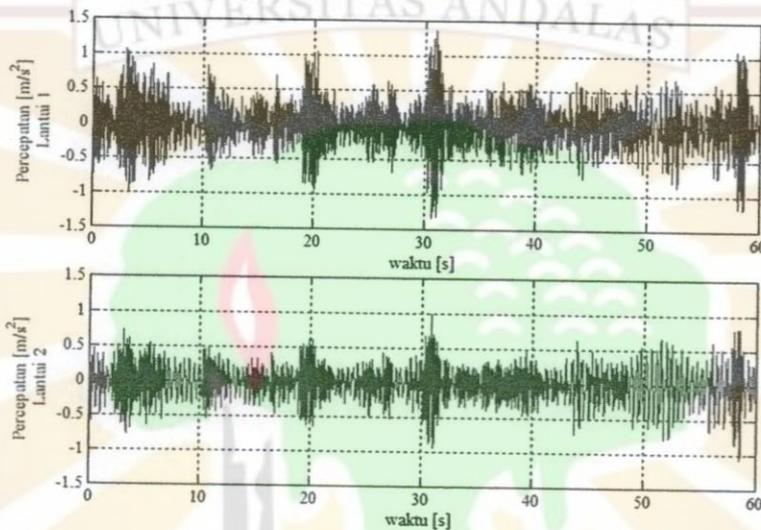
Gambar 5.9 Visualisasi modus getar normal hasil identifikasi berdasarkan fungsi RD dengan penerapan kedua kondisi *triggering* terhadap data respons percepatan akibat eksitasi *white noise* yang telah dinormalisasi (a) model 2 DoF dan (b) model rangka bidang.

Penyimpangan hasil identifikasi modus getar normal menggunakan *level crossing triggering* memiliki nilai yang cukup besar. Adanya distorsi modus getar normal yang diidentifikasi disebabkan oleh sedikitnya jumlah titik *triggering* ketika penggunaan *level crossing*. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa sedikitnya jumlah titik *triggering* pada *level crossing triggering* ini menghasilkan kualitas hasil identifikasi yang lebih rendah dibandingkan dengan penerapan *positive points triggering*.

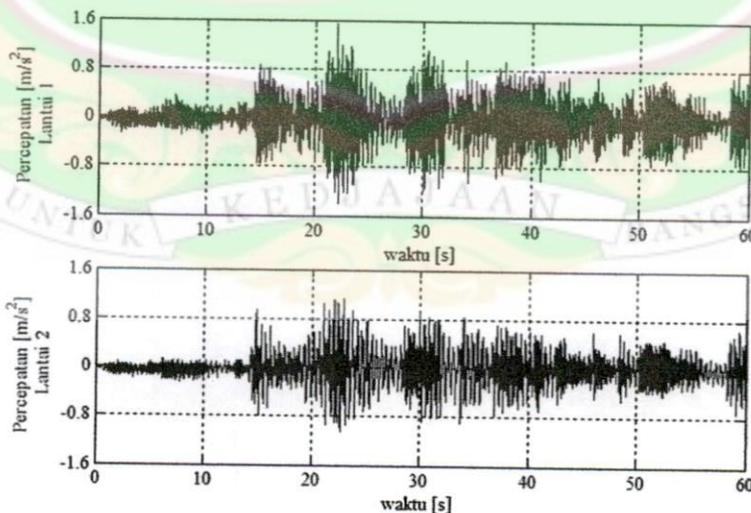
5.2 Penerapan Metode RD dan ITD Untuk Identifikasi Parameter *Modal* Struktur Menggunakan Data Respons Hasil Pengujian

Pengujian *modal* dilakukan pada struktur uji (Gambar 3.2) dengan cara memberikan gangguan berupa eksitasi *white noise* dan *pseudorandom* pada tumpuan struktur uji. Kedua jenis eksitasi ini digunakan untuk mengeksitasi struktur uji dalam rentang frekuensi 0-25 Hz. Dengan kondisi ini, gangguan pada struktur uji dapat diasumsikan berperilaku *ambient*. Dua data percepatan dalam

arah transversal x dicuplik dengan menggunakan *accelerometer* DeltaTron Brüel & Kjær 4508 dan 4507 pada setiap lantai struktur uji. Sinyal dari kedua sensor diakusisi dengan DSA Brüel & Kjær 3560C pada frekuensi pencuplikan sebesar 512 Hz menggunakan perangkat lunak Pulse 7.0. Foto dan *setup* pengujian *modal* ini ditunjukkan dalam Gambar 3.7. Respons pada masing-masing lantai akibat eksitasi *random white noise* dan *pseudorandom* ditampilkan dalam Gambar 5.10 dan 5.11.



Gambar 5.10 Respons percepatan pada setiap lantai bangunan hasil pengujian akibat eksitasi *white noise* dalam rentang frekuensi 0-25 Hz berupa simpangan yang diterapkan pada tumpuan.



Gambar 5.11 Respons percepatan pada setiap lantai bangunan hasil pengujian akibat eksitasi *pseudorandom* dengan lebar frekuensi (*bandwidth*) 0-25 Hz berupa simpangan yang diterapkan pada tumpuan.

Fungsi RD yang dihasilkan dari kedua data percepatan menggunakan *time lag* (τ) sebesar 4 s. RMS dari kedua respons percepatan pada kedua lantai yang diganggu oleh *white noise* memiliki besar 0.3325 m/s^2 dan 0.2518 m/s^2 . Sementara itu, RMS kedua respons percepatan akibat eksitasi *pseudorandom* setiap lantai adalah 0.3454 m/s^2 dan 0.2707 m/s^2 . Mengacu pada harga *time lag*, nilai RMS respons percepatan dan kedua kondisi *triggering* (beserta nilai ambangnya) dapat ditentukan jumlah titik *triggering* (N) seperti yang diperlihatkan dalam Tabel 5.8.

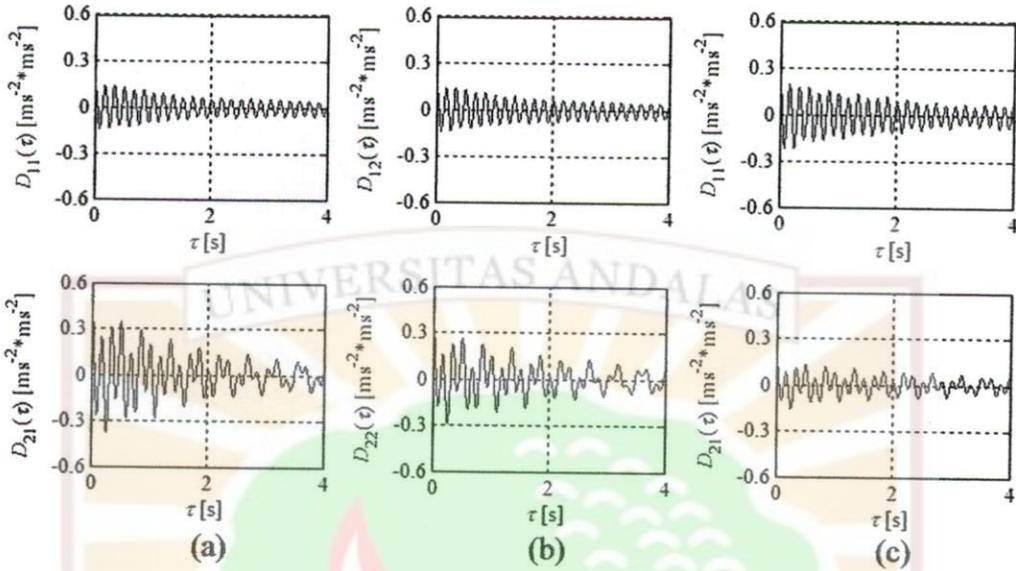
Tabel 5.8 Jumlah titik *triggering* berdasarkan penerapan dua kondisi *triggering* terhadap data respons percepatan akibat eksitasi *white noise* dan *pseudorandom* dalam rentang frekuensi eksitasi 0-25 Hz dengan L_i menyatakan lantai ke- i ; $i = 1, 2$; dan * digunakan sebagai acuan untuk proses *triggering*.

Respons Di	Eksitasi <i>white noise</i>		Eksitasi <i>pseudorandom</i>			
	T_x^L		T_x^P	T_x^L		T_x^P
	* L_1	* L_2	* L_1	* L_1	* L_2	* L_1
L_1	188	294	3713	224	306	3602
L_2	66	141	3850	106	200	3240

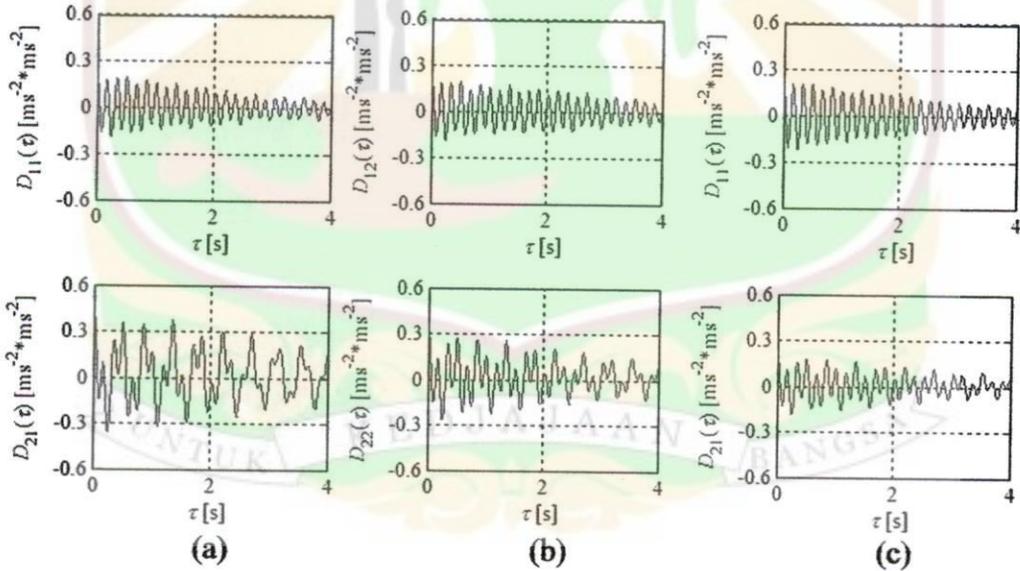
Dengan menggunakan seluruh informasi untuk menghasilkan fungsi RD, respons peluruhan bebas dapat ditentukan seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 5.12 dan 5.13. Gambar 5.12 merupakan fungsi RD respons struktur uji akibat eksitasi *white noise*. Sementara itu, Gambar 5.13 menyatakan fungsi RD respons akibat eksitasi *pseudorandom*. Khusus untuk kondisi *positive points triggering* dalam rentang $0-\infty$ hanya fungsi RD dari salah satu respons acuan saja yang digunakan karena masing-masing respons acuan menghasilkan fungsi RD yang sama.

Informasi parameter modal struktur uji diekstrak dengan metode ITD berdasarkan fungsi-fungsi RD yang telah diperoleh untuk masing-masing kondisi *triggering*. Parameter-parameter numerik N_1 , N_2 , dan N_3 digunakan sesuai dengan nilai optimum untuk proses identifikasi [13]. Parameter N_4 dipilih sama dengan 1 dalam proses identifikasi. Jumlah kolom ditentukan berdasarkan (2.45) dengan T_{span} selama 1.6 s. Hasil identifikasi juga digambarkan dalam diagram kestabilan untuk 30 NDoF. Pada kondisi ini *theory of oversized model* digunakan untuk memodelkan respons struktur yang diidentifikasi dan tentunya dengan kehadiran

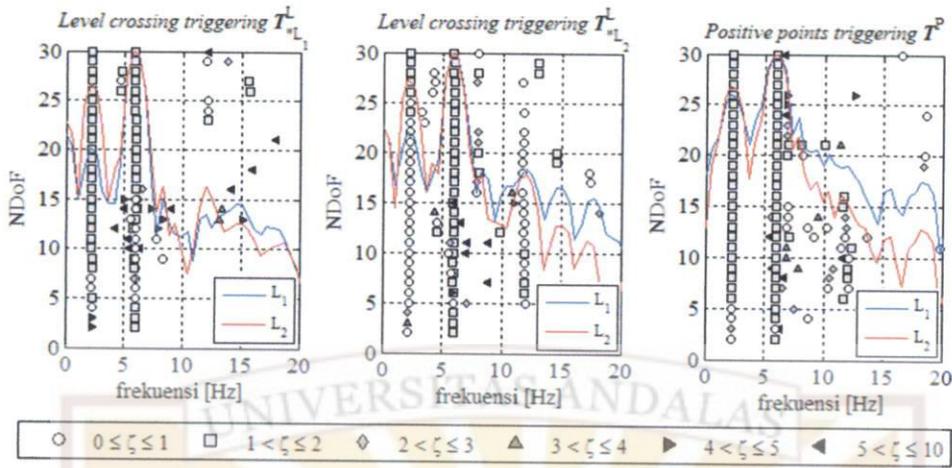
noise. Diagram kestabilan hasil identifikasi parameter modal ditunjukkan dalam Gambar 5.14 dan 5.15 untuk masing-masing kondisi *triggering* yang diterapkan.



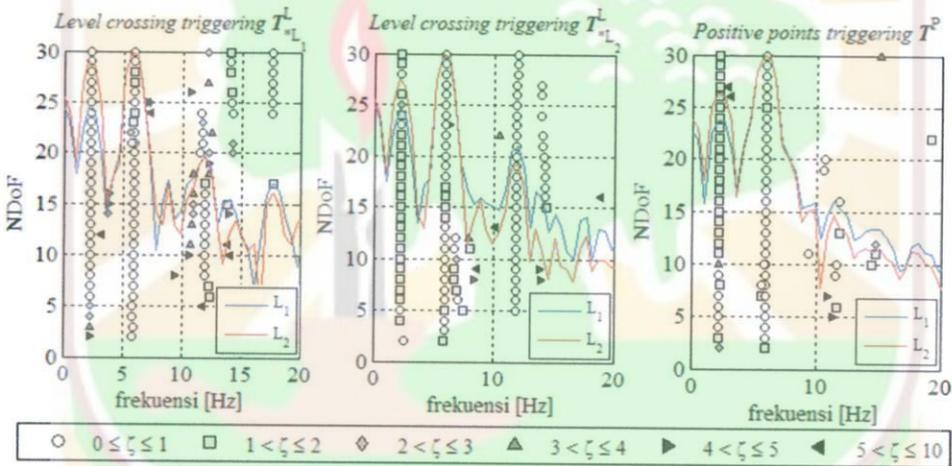
Gambar 5.12 Fungsi RD respons percepatan struktur akibat eksitasi *white noise* berdasarkan (a) *level crossing triggering* acuan L_1 , (b) *level crossing triggering* acuan L_2 , dan (c) *positive point triggering* acuan L_1 .



Gambar 5.13 Fungsi RD respons percepatan struktur akibat eksitasi *pseudorandom* berdasarkan (a) *level crossing triggering* acuan L_1 , (b) *level crossing triggering* acuan L_2 , dan (c) *positive point triggering* acuan L_1 .



Gambar 5.14 Diagram kestabilan hasil identifikasi dengan metode ITD dari kedua kondisi *triggering* untuk membentuk fungsi RD berdasarkan respons percepatan struktur akibat eksitasi *white noise* pada tumpuan.



Gambar 5.15 Diagram kestabilan hasil identifikasi dengan metode ITD dari kedua kondisi *triggering* untuk membentuk fungsi RD berdasarkan respons percepatan struktur akibat eksitasi *pseudorandom* pada tumpuan.

Hasil identifikasi parameter *modal* melalui penerapan fungsi RD pada metode ITD untuk kedua kondisi *triggering* ditampilkan dalam Tabel 5.9-5.11. Harga parameter *modal* dan OAMCF berdasarkan Tabel 5.9-5.11 merupakan hasil identifikasi dengan menggunakan 30 NDoF. Berdasarkan hasil yang diperoleh melalui diagram kestabilan diketahui bahwa hanya dua modus yang stabil dan bersesuaian dengan frekuensi pribadi struktur uji. Hasil identifikasi frekuensi pribadi ini tidak jauh berbeda dengan yang telah dilaporkan oleh Adriyan, dkk [42] dengan menggunakan metode identifikasi *curve fitting - rational fraction polynomials* (RFP) dan oleh Hafizah [43].

Tabel 5.9 Frekuensi pribadi [Hz] hasil identifikasi dengan metode ITD berdasarkan fungsi RD dengan penerapan kedua kondisi *triggering* terhadap data respons percepatan akibat eksitasi *white noise* dan *pseudorandom* dengan *L_i menyatakan lantai ke- i ; $i = 1, 2$; dan * sebagai acuan untuk proses *triggering*.

Modus	EVP Model Rangka Bidang	Eksitasi <i>white noise</i>			Eksitasi <i>pseudorandom</i>		
		T_x^L		T_x^P	T_x^L		T_x^P
		*L_1	*L_2	*L_1	*L_1	*L_2	*L_1
1	2.2148	2.2186	2.2129	2.2230	2.2412	2.2606	2.2425
2	5.8067	5.9179	5.9340	5.9559	5.8968	5.9344	5.9337

Tabel 5.10 Rasio redaman [%] hasil identifikasi dengan metode ITD berdasarkan fungsi RD dengan penerapan kedua kondisi *triggering* terhadap data respons percepatan akibat eksitasi *white noise* dan *pseudorandom* dengan L_i menyatakan lantai ke- i ; $i = 1, 2$; dan * sebagai acuan untuk proses *triggering*.

Modus	Eksitasi <i>white noise</i>			Eksitasi <i>pseudorandom</i>		
	T_x^L		T_x^P	T_x^L		T_x^P
	*L_1	*L_2	*L_1	*L_1	*L_2	*L_1
1	1.2559	1.5130	1.3111	0.2497	1.2408	1.3607
2	1.1275	1.5145	1.1819	0.8276	0.8642	0.8644

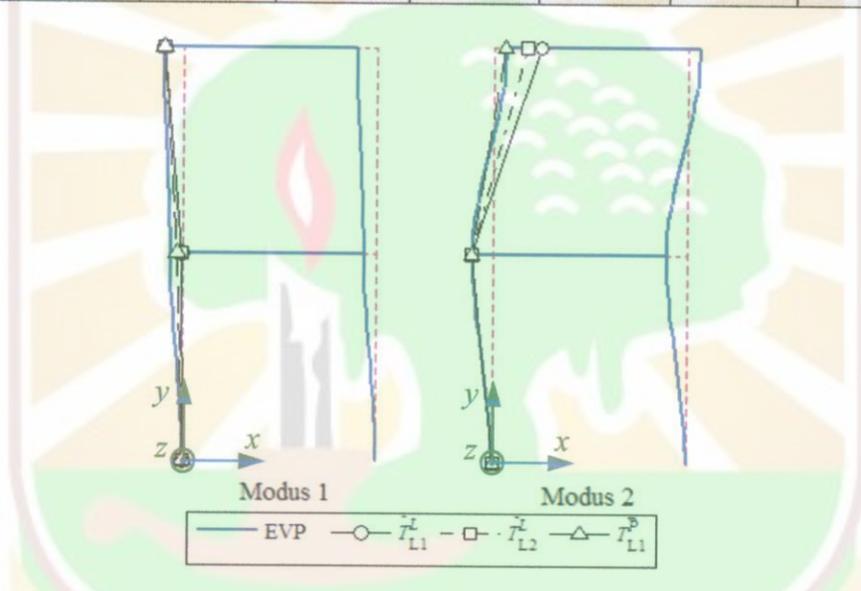
Tabel 5.11 OAMCF [%] hasil identifikasi dengan metode ITD berdasarkan fungsi RD dengan penerapan kedua kondisi *triggering* terhadap data respons percepatan akibat eksitasi *white noise* dan *pseudorandom* dengan L_i menyatakan lantai ke- i ; $i = 1, 2$; dan * sebagai acuan untuk proses *triggering*.

Modus	Eksitasi <i>white noise</i>			Eksitasi <i>pseudorandom</i>		
	T_x^L		T_x^P	T_x^L		T_x^P
	*L_1	*L_2	*L_1	*L_1	*L_2	*L_1
1	95.17	92.46	96.91	98.54	92.70	93.03
2	98.44	97.53	96.70	95.32	92.80	97.66

Metode Niedbal digunakan untuk mengubah modus getar kompleks menjadi modus getar normal. Modus getar normal hasil konversi ini dinormalisasi terhadap nilai terbesar nilai vektor karakteristik untuk masing-masing modulusnya. Tabel 5.12 menunjukkan nilai modus getar normal yang dinormalisasi untuk kedua jenis eksitasi dan dua jenis teknik *triggering* beserta perbandingannya dengan hasil penghitungan numerik. Visualisasi modus getar normal yang didaftarkan pada Tabel 5.12 diperlihatkan dalam Gambar 5.16 dan 5.17.

Tabel 5.12 Modus getar normal hasil identifikasi berdasarkan fungsi RD dengan penerapan kedua kondisi *triggering* terhadap data respons percepatan akibat eksitasi *white noise* dan *pseudorandom* yang telah dinormalisasi dengan *L_i menyatakan lantai ke- i ; $i = 1, 2$; dan sebagai acuan untuk proses *triggering*.

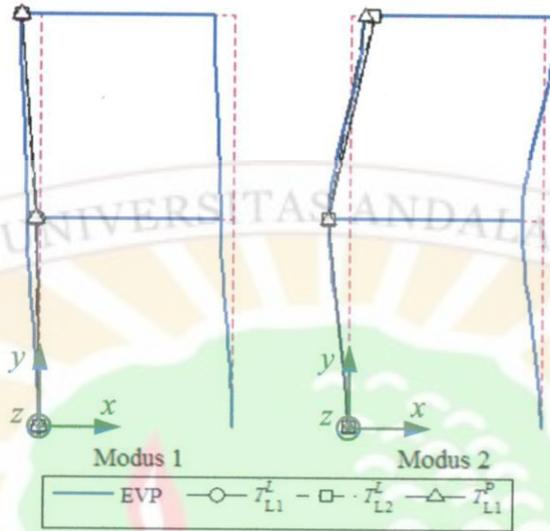
Modus	EVP Model Rangka Bidang	Eksitasi <i>white noise</i>			Eksitasi <i>pseudorandom</i>		
		T_x^L		T_x^P	T_x^L		T_x^P
		*L_1	*L_2	*L_1	*L_1	*L_2	*L_1
1	-0.6200	-0.0825	-0.0655	-0.3144	-0.1528	-0.2180	-0.2568
	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000
2	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000
	0.6327	2.3436	1.6790	0.6068	1.2022	1.1001	0.7095



Gambar 5.16 Visualisasi modus getar normal hasil identifikasi berdasarkan fungsi RD dengan penerapan kedua kondisi *triggering* terhadap data respons percepatan akibat eksitasi *white noise* yang telah dinormalisasi.

Berdasarkan hasil identifikasi pada Tabel 5.12 dan Gambar 5.16 dan 5.17 menggunakan data respons hasil pengujian dapat dilihat bahwa bahwa modus getar normal hasil identifikasi menunjukkan kesesuaian dengan modus getar normal hasil penghitungan EVP. Kesesuaian ini dihasilkan melalui proses identifikasi dengan penerapan *positive point triggering* pada modus kedua. Sementara itu, penyimpangan terjadi pada modus pertama karena rendahnya nilai partisipasi modus getar untuk posisi pencuplikan respons di lantai pertama. Kondisi ini juga ditunjukkan oleh hasil identifikasi melalui penerapan *level crossing triggering* untuk masing-masing acuan *triggering* terutama untuk modus

pertama. Pada modus pertama ini, nilai partisipasi modus getar di posisi pencuplikan respons di lantai 1 menunjukkan nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan *positive point triggering*.



Gambar 5.17 Visualisasi modus getar normal hasil identifikasi berdasarkan fungsi RD dengan penerapan kedua kondisi *triggering* terhadap data respons percepatan akibat eksitasi *pseudorandom* yang telah dinormalisasi.

Hal berbeda ditemui pada modus kedua untuk kondisi *level crossing triggering*. Partisipasi modus getar yang tertinggi dimiliki oleh posisi pencuplikan respons di lantai 2. Keadaan ini diakibatkan oleh jumlah titik-titik *triggering* pada jenis *level crossing* yang lebih rendah dari *positive point* sehingga memberikan penurunan kualitas hasil identifikasi modus getar. Sementara itu, modus getar normal hasil identifikasi melalui penerapan *positive point triggering* menunjukkan kesesuaian dengan modus getar normal hasil penghitungan EVP.

6 PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Melalui penelitian ini telah disusun sebuah paket program identifikasi (PPI) yang berdasarkan metode RD dan ITD dengan menggunakan bahasa pemrograman MATLAB versi R2013a. Investigasi numerik dan eksperimental proses identifikasi pada dua struktur uji skala laboratorium memperlihatkan bahwa PPI yang dibangun cukup efektif dan handal digunakan untuk proses identifikasi. Kondisi ini didukung oleh hasil-hasil yang telah diperoleh dalam kaji numerik dan eksperimental, diantaranya adalah

1. Identifikasi dapat dilakukan dengan menggunakan jumlah data respons yang terbatas meskipun kondisi ini dibutuhkan pemodelan sistem dengan jumlah NDoF yang lebih banyak terutama ketika ada kontribusi *noise* dalam data respons.
2. Penyimpangan hasil identifikasi parameter *modal* terhadap hasil penghitungan masalah bilangan pribadi cukup rendah. Penyimpangan frekuensi pribadi secara umum berada di bawah 2% dan penyimpangan rasio redaman di bawah 5%.
3. Penerapan metode Niedbal untuk mentransformasikan modus getar kompleks menjadi modus getar normal memberikan hasil yang cukup memuaskan.
4. Modus *alias* (dipinjam dari istilah *aliasing* dalam pengolahan sinyal) dapat terjadi akibat penerapan persamaan (2.44) meskipun respons dicuplik pada frekuensi cuplik yang lebih tinggi dari frekuensi tertinggi struktur yang akan diidentifikasi. Kondisi ini dapat dihindari melalui pemilihan parameter numerik metode ITD yang sesuai, terutama parameter N_4 .

5. Penerapan diagram kestabilan dapat mempermudah proses penentuan modus riil struktur. Dalam hal ini, modus riil struktur ditunjukkan oleh kestabilan hasil identifikasi untuk setiap modus struktur yang dapat diidentifikasi dan sebaliknya untuk modus *noise*.
6. Pemilihan waktu awal respons dalam metode ITD sangat menentukan kualitas hasil identifikasi.
7. Kualitas fungsi RD untuk proses identifikasi ditentukan oleh jenis dan level *triggering* yang diterapkan. Hal ini disebabkan karena kedua parameter ini berkorelasi langsung dengan jumlah titik-titik *triggering* (N) yang digunakan untuk membentuk fungsi RD.
8. Penggunaan *positive point triggering* untuk membentuk fungsi RD memberikan kualitas hasil identifikasi frekuensi pribadi, rasio redaman dan modus getar yang lebih baik dibandingkan dengan penggunaan *level crossing triggering*.

6.2 Saran Untuk Penelitian Mendatang

Fungsi RD yang dihasilkan dengan menggunakan *positive point triggering* membutuhkan waktu komputasi yang cukup lama, sehingga tidak praktis diterapkan untuk keperluan identifikasi menggunakan data respons operasional. Teknik *vector triggering* RD dapat diterapkan untuk mengatasi permasalahan ini. Paket program identifikasi masih dapat dikembangkan untuk metode-metode identifikasi lainnya seperti ERA, SSI, dan FDD, serta metode ITD dalam masalah getaran harmonik. Hal ini didukung oleh modularisasi kode dari paket program yang telah dibangun dan fitur grafis yang telah tersedia untuk penambahan tersebut.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian dalam tesis ini didanai oleh Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi melalui LPPM Unand dalam bentuk Hibah Fundamental dengan kontrak no. 21/UN.16/PL.-FD/2013 atas nama Prof. Dr.-Ing. Mulyadi Bur dan Dr. Eng. Meifal Rusli dan terintegrasi ke dalam penelitian "**Identifikasi Parameter Dinamik Struktur pada Kondisi Beroperasi**".



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ewin, D. J., *Modal Testing: Theory, Practice and Application Second Edition*, Research Studies Press, 2000.
- [2] Richardson, M. A., and Formenti, D. L., *Parameter Estimation from Frequency Response Measurements Using Rational Fraction Polynomials*, Proceeding of 1st International Modal Analysis Conference (IMAC) Conference, Orlando, FL, pp. 1-15, November 1982.
- [3] Schwarz, B. J., and Richardson, M. H., *Experimental Modal Analysis*, CSI Reliability Week, Orlando, FL, October 1999.
- [4] Brincker, R., Ventura, C. E., and Andersen, P., *Why Output-Only Modal Analysis is a Desirable Tool for a Wide Range of Practical Applications*, Proceeding of 20th IMAC, Los Angeles, California, 2002.
- [5] Bur, M., *Dynamische Analyse Linearer und Nichtlinearer Strukturen Anhand Theoretischer und Versuchstechnischer Untersuchungen*, Dissertation, Institut für Leichtbau, RWTH Aachen, 1994.
- [6] Aenelle, M. A., Brincker, R., and Canteli, A. F., *Load Estimation from Natural Input Modal Analysis*, Proceeding of 23rd IMAC, Orlando, Florida, 2005.
- [7] Hjelm, H. P., Brincker, R., Graugaard-Jensen, J., and Munch, K., *Determination of Stress Histories in Structures by Natural Input Modal Analysis*, Proceeding of 23rd IMAC, Orlando, Florida, 2005.
- [8] Ibrahim, S. R. and Mikulcik, E. C., *A Time Domain Modal Vibration Test Technique*, The Shock and Vibration Bulletin, Bulletin 43, Part 4, pp. 21-37, June 1973.

- [9] Ibrahim, S. R. and Mikulcik, E. C., *The Experimental Determination of Vibration Parameters from Time Responses*, The Shock and Vibration Bulletin, Bulletin 46, pp. 187-196, August 1976.
- [10] Ibrahim, S. R. and Mikulcik, E. C., *A Method for the Direct Identification of Vibration Parameters from the Free Responses*, The Shock and Vibration Bulletin, Bulletin 47, pp. 183-198, September 1977.
- [11] Ibrahim, S. R., and Pappa, R. S., *Large Modal Survey Testing Using Ibrahim Time Domain Identification Technique*, Journal of Spacecraft, Vo. 19, No. 5, pp. 459-465, 1982.
- [12] Ibrahim, S. R., *Time Domain Modal Parameter Identification and Modelling Structures*, Proceeding of the American Control Conference, San Francisco, CA, pp. 989-996, June 1983.
- [13] Pappa, R. S., and Ibrahim, S. R., *A Parametric Study of the Ibrahim Time Domain Modal Identification Algorithm*, The Shock and Vibration Bulletin, Bulletin 51, Part 3, pp. 43-72, May 1981.
- [14] Cole, H. A., *On The Line Analysis of Random Vibrations*, AIAA Paper no. 68-288, 1968.
- [15] Ibrahim, S. R., *Random Decrement Technique for Modal Identification of Structures*, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 14, No. 11, pp. 696-700, November 1977.
- [16] Ibrahim, S. R., *Application of Random Time Domain Analysis to Dynamic Flight Measurements*, The Shock and Vibration Bulletin, Bulletin 49, Part 2, pp. 165-170, September 1979.
- [17] Vandiver, J. K., Dunwoody, A. B., Campbell, R. B., and Cook, M. F., *A Mathematical Basis for the Random Decrement Vibration Signature Analysis Technique*, Journal of Mechanical Design, Vol. 104, pp. 307-313, April 1982.

- [18] Asmussen, J. C., *Modal Analysis Based on Random Decrement Technique – Application to Civil Engineering Structures*, Doctoral Dissertation at Department of Building Technology and Structural Engineering, The University of Aalborg, 1997.
- [19] Asmussen, J. C., Ibrahim, S. R., and Brincker, R., *Random Decrement: Identification of Structures Subjected to Ambient Excitation*, Proceedings of the 16th IMAC, Santa Barbara, California, pp. 914-921, 1998.
- [20] Schenk, A., *Die Modale Identifikation bei Unbekannter Stationärer Zufallserregung*, Zeitschrift für Flugwissenschaften und Weltraumforschung 15, 300-310, 1991.
- [21] Rodrigues, J., and Brincker, R., *Application of the Random Decrement Technique in Operational Modal Analysis*, Proceeding of 1st International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC), Copenhagen, 2005.
- [22] http://www.svibs.com/products/ARTEMIS_Modal.aspx, Structural Vibration Solution Inc., Aalborg, Denmark, diakses pada 15 Maret 2013, pukul 9.10.15 WIB.
- [23] <http://www.bksv.com/Products/analysis-software/vibration/structural-dynamics/operational-modal-analysis/operational-modal-analysis-760.aspx>, Brüel & Kjær, Nærum, Denmark, diakses pada 15 Maret 2013, pukul 9.12.43 WIB.
- [24] Bur, M., *Research on Operational Modal Analysis*, Report of research activity in “Wiedereinladungsprogramm”, Lehrstuhl und Institut für Leichtbau, RWTH-Aachen, Germany, 2006.
- [25] Ibrahim, S. R., *Computation of Normal Modes from Identified Complex Modes*, AIAA Journal, Vol. 21, No. 3, pp. 446-451, 1982.
- [26] The Mathworks Inc., *MATLAB® Primer R2012a*, the Mathworks Inc., Nattick, 2012. Diunduh dari http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/MATLAB/getstart.pdf pada 2 Mei 2012 pukul 17.52 WIB.

- [27] The Mathworks Inc., *MATLAB[®] Mathematics R2012a*, the Mathworks Inc., Nattick, 2012. Diunduh dari http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/MATLAB/math.pdf pada 2 Mei 2012 pukul 17.53 WIB.
- [28] The Mathworks Inc., *MATLAB[®] Data Analysis R2012a*, the Mathworks Inc., Nattick, 2012. Diunduh dari http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/MATLAB/data_analysis.pdf pada 2 Mei 2012 pukul 18.01 WIB.
- [29] The Mathworks Inc., *MATLAB[®] Programming Fundamentals R2012a*, the Mathworks Inc., Nattick, 2012. Diunduh dari http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/MATLAB/matlab_prog.pdf pada 2 Mei 2012 pukul 17.53 WIB.
- [30] The Mathworks Inc., *MATLAB[®] Programming Tips R2012a*, the Mathworks Inc., Nattick, 2012. Diunduh dari http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/MATLAB/programming_tips.pdf pada 2 Mei 2012 pukul 17.53 WIB.
- [31] The Mathworks Inc., *MATLAB[®] Graphics R2012a*, the Mathworks Inc., Nattick, 2012. Diunduh dari http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/MATLAB/graphg.pdf pada 10 September 2012 pukul 7.05 WIB.
- [32] The Mathworks Inc., *MATLAB[®] MAT-File Format R2012a*, the Mathworks Inc., Nattick, 2012. Diunduh dari http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/MATLAB/matfile_format.pdf pada 2 Mei 2012 pukul 18.03 WIB.
- [33] Niedbal, N., *Analytical Determination of Real Normal Modes from Measured Complex Responses*, 25th Structures, Structural Dynamics and Material Conference and AIAA Dynamics Specialist Conference, Palm Springs, California, pp. 292-295, 1984.
- [34] Maia, N. M. M., *Extraction of Valid Modal Properties form Measured Data in Structural Vibration*, Doctoral Thesis at Dept. of Mechanical Engineering, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, 1988.
- [35] Meirovitch, L., *Elements of Vibration Analysis 2nd edition*, McGraw-Hill, 1986.

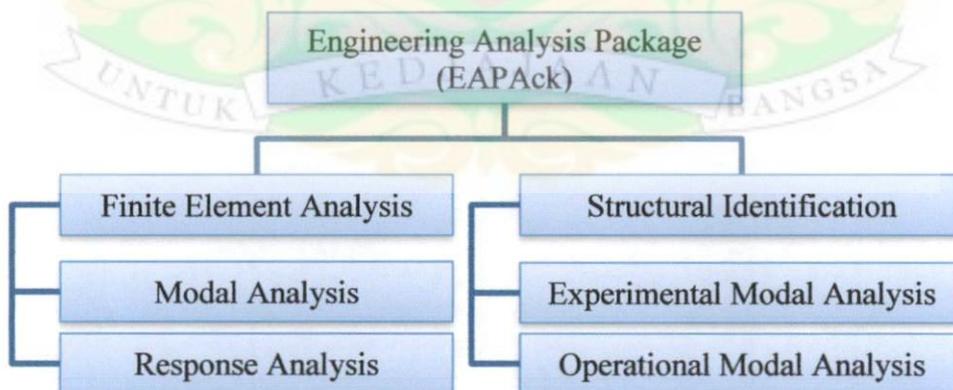
- [36] Thomson, W. T., *Theory of Vibration with Application 4th edition*, Prentice Hall, 1993.
- [37] Imregun, M., and Ewin, D. J., *Complex Modes – Origins and Limits*, Proceeding of 13th International Modal Analysis Conference (IMAC), 1995.
- [38] Imregun, M., and Ewin, D. J., *Realisation of Complex Mode Shapes*, Proceeding of 11th International Modal Analysis Conference (IMAC), 1993.
- [39] Füllekrug, U., *Computation of Real Normal Modes from Complex Eigenvectors*, Proceeding of 13th International Congress on Sound and Vibration (ICSV), Vienna, Austria, 2006.
- [40] Ibrahim, S. R., *Modal Confidence Factor in Vibration Testing*, *Journal of Spacecraft*, Vol. 15, No. 15, pp. 313-316, September-October 1978.
- [41] Bathe, K. J., *Numerical Methods in Finite Element Analysis*, Prentice Hall, New Jersey, 1975.
- [42] Adriyan, Bur, M., Rusli, M., dan Son, L., *Penerapan Teknik Analisis Modal Teoritik dan Eksperimental untuk Identifikasi Parameter Modal Model Struktur Bangunan Dua Lantai*, Prosiding Seminar Tahunan Teknik Mesin XI, hal. 2188-2194, Yogyakarta, 2012.
- [43] Hafizah, *Kaji Numerik dan Eksperimental Peredam Dinamik untuk Mengurangi Getaran pada Dua Modus Terendah Struktur*, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Andalas, 2013.

LAMPIRAN A

Engineering Analysis Package (EAPack)

Engineering Analysis Package (EAPack) merupakan paket program yang dibangun dengan menggunakan bahasa pemrograman MATLAB pada perangkat lunak MATLAB R2013a. EAPack ditujukan untuk analisis dinamik struktur dengan FEA dan proses identifikasi struktur berdasarkan data respons saja (OMA). Dengan demikian ada dua modul yang dapat digunakan dalam EAPack ini yaitu: *finite element analysis for structural dynamics* dan *structural identification*. Paket program ini dirancang dengan konsep modularisasi sehingga untuk penambahan analisis atau metode numerik lainnya masih dapat dilakukan kedepannya.

Hirarki untuk bagian *top level* dari paket program EAPack yang telah dibangun dan masih dapat dikembangkan untuk kedepannya diperlihatkan oleh diagram pohon (*tree diagram*) pada Gambar A.1.

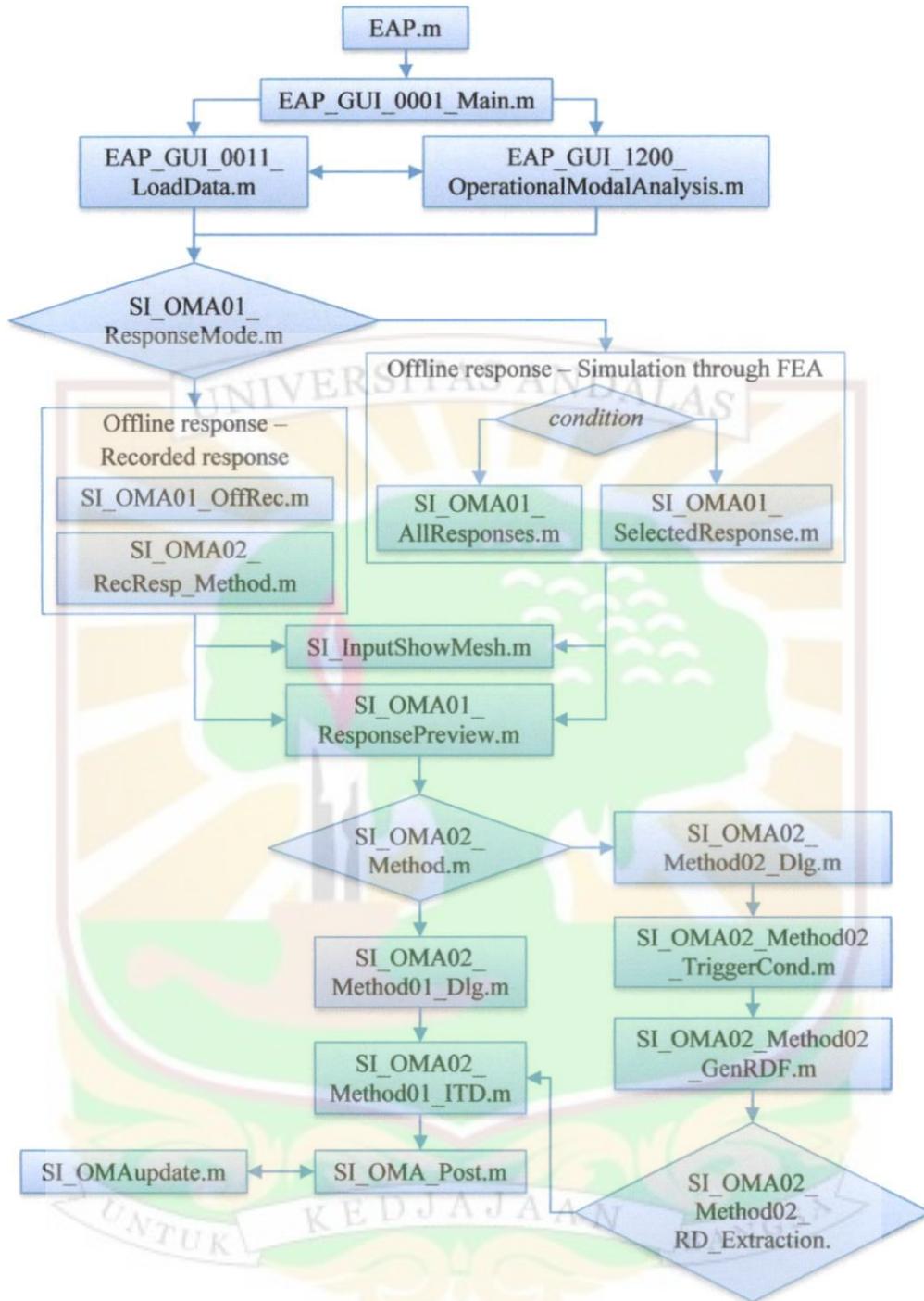


Gambar A.1 Hirarki *top-level* EAPack.

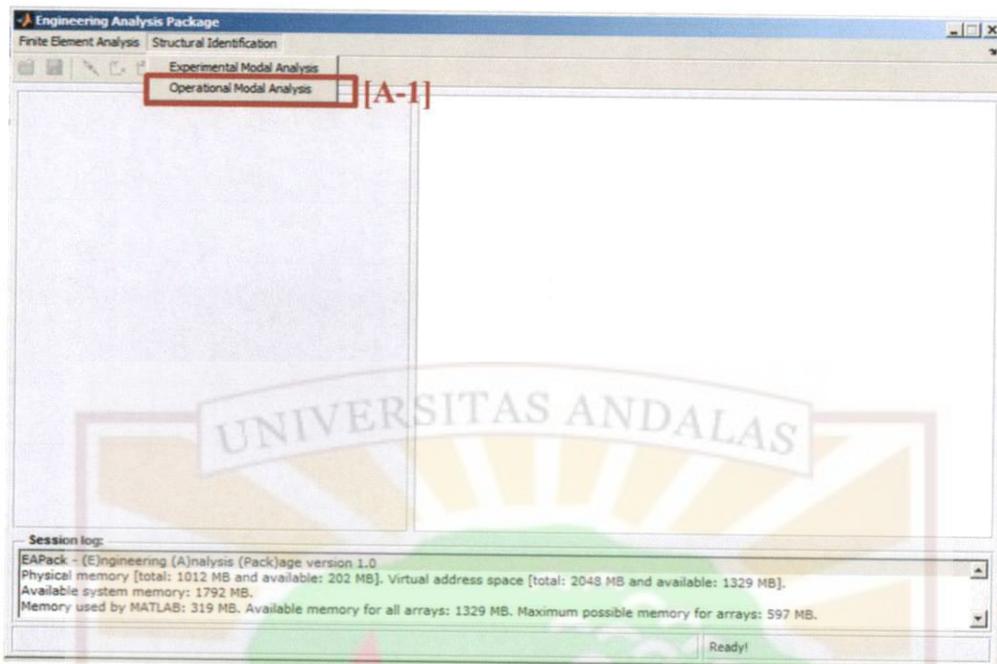
EAPack untuk modul FEA dapat digunakan untuk komputasi *modal analysis* dan *response analysis*. Jenis elemen yang digunakan dalam modul FEA masih merupakan elemen linier isoparametrik 1D, yaitu *truss* bidang, *truss* ruang, balok, rangka bidang, dan rangka ruang. *Solver* untuk *modal analysis* yang tersedia dalam EAPack ini adalah **MATLAB eigs function (metode Arnoldi/Lanczos)**, **MATLAB eig function (LINSPACK)**, metode matriks iterasi: *sweping* dan deflasi. Sedangkan untuk *response analysis* tersedia jenis gangguan yang dibutuhkan untuk mengeksitasi struktur baik berupa gangguan di tumpuan dan gangguan di nodal. Jenis redaman yang digunakan masih berupa redaman *modal*. Kondisi awal dapat dimasukkan berupa kecepatan awal dan simpangan awal pada setiap nodal struktur. Integrasi numerik untuk penghitungan respons dilakukan dalam ranah *modal* dengan menggunakan metode integrasi Newmark- β . Untuk modul FEA ini masih dapat dikembangkan lebih lanjut dan hirarki modul FEA ini tidak akan diberikan di sini.

Modul Structural Identification dapat digunakan untuk proses identifikasi struktur berdasarkan informasi data masukan dan data keluaran (EMA) atau hanya menggunakan informasi data keluaran saja (OMA). Dalam penelitian ini hanya OMA saja yang akan dibahas, baik hirarki penyusunan program atau prosedur untuk menjalankan EAPack ini. Hirarki Structural Identification – OMA ditunjukkan dalam Gambar A.2. Untuk menjalankan paket program ini dapat ditempuh melalui langkah-langkah berikut:

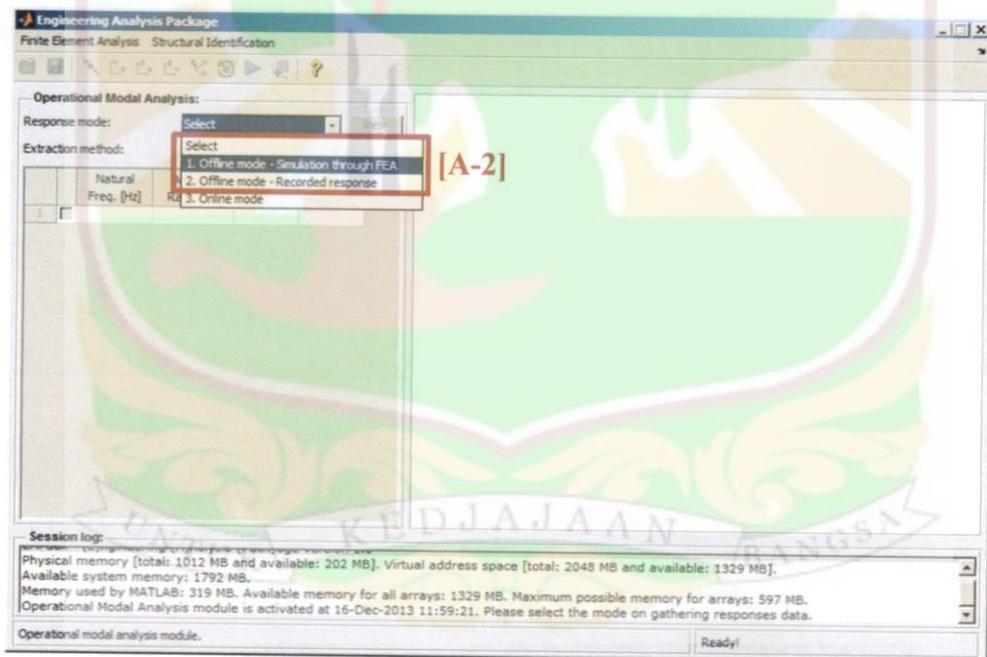
1. *Start-up* paket program dengan menjalankan perangkat lunak MATLAB R2013a.
2. Buka file **EAPack.m** dan tekan **F5** atau pilih menu **Run** untuk menjalankan aplikasi ini. Alternatif lainnya dengan melakukan *browse directory* ke folder EAP dan ketikkan EAP di *command window*. Dengan demikian akan ditampilkan jendela EAPack di *desktop* anda, seperti yang diperlihatkan oleh Gambar A.3.
3. Melalui menu **Structural Identification** pilih submenu **Operational Modal Analysis [A-1]** dan kemudian jendela EAPack akan berubah seperti yang ditampilkan oleh Gambar A.4.



Gambar A.2 Hirarki modul Structural Identification – OMA untuk metode identifikasi ITD dan RD.



Gambar A.3 Tampilan antarmuka PPI EAPack.



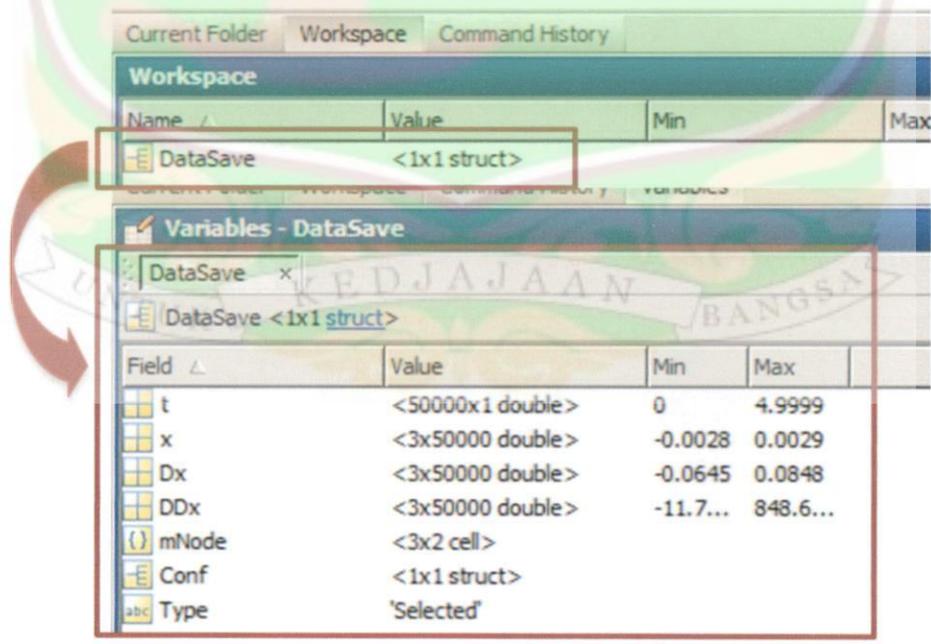
Gambar A.4 Tampilan antarmuka PPI EAPack untuk modul *operational modal analysis* (OMA).

4. Berdasarkan Gambar A.4 pilih jenis respons “**Response mode:**” melalui *drop-down box* atau *pop-up menu* [A-2], yang terdiri atas pilihan: **1. Offline**

mode – Simulation through FEA, dan 2. Offline mode – Recorded response.

a. 1. Offline mode – Simulation through FEA

Proses identifikasi dilakukan berdasarkan respons struktur yang dihasilkan melalui analisis dinamik respons pada modul *finite element analysis*. Ekstensi file untuk kasus ini adalah *.mat. Melalui Gambar A.5 ditampilkan struktur dari file *.mat ini, sebagai contoh: **Sel Response CB3AM EBbeam 120els 6modes Nbeta.mat** dengan kapasitas data 3.53 MB dan memiliki sebuah variabel *structure* dengan nama **DataSave**. Ada dua jenis nilai variabel **DataSave.Type**, yaitu **Selected** dan **All**. **Selected** berarti beberapa respons pada nodal struktur yang disimpan dan **All** berarti semua respons di setiap nodal. Khusus untuk **Selected**, ada variabel *cell* **DataSave.mNode** yang berisi nomor nodal dan arah getar respons (baik translasi-x Tx, translasi-y Ty, translasi-z Tz, rotasi-x Rx, rotasi-y Ry, dan rotasi-z Rz) di nodal untuk setiap nodal yang disimpan (Gambar A.6). Sementara itu variabel *structure* **DataSave.Conf** berisi konfigurasi dari struktur yang berasal dari model elemen hingga (Gambar A.7).



Gambar A.5 Salah satu format data respons yang telah dihitung dengan analisis dinamik respons pada modul FEA.

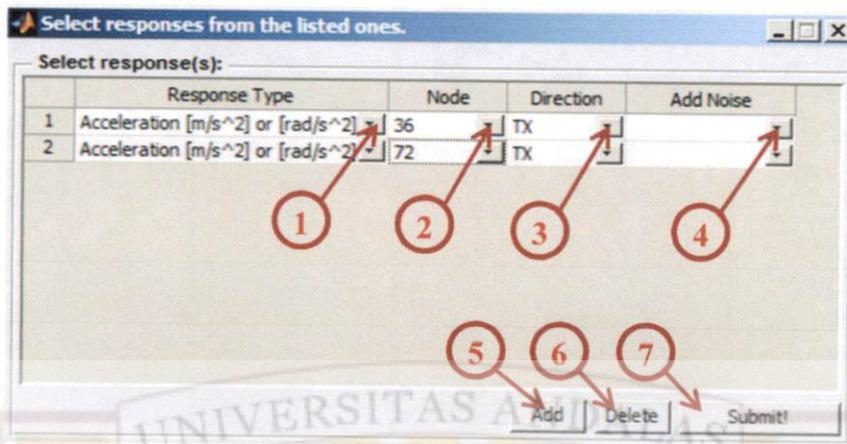
	1	2	3
1	41	TY	
2	81	TY	
3	121	TY	

Gambar A.6 Format variabel *cell* **DataSave.mNode** untuk data respons yang disimpan pada nomor-nomor nodal tertentu.

Field	Value	Min	Max
NoAM	3	3	3
NoAS	[]		
AnType	'MODAL'		
Units	'SI'		
MasterDoF	[0;1;0;0;1]	0	1
NoNode	121	121	121
Node	<121x4 double>	0	121
NoMatType	1	1	1
MatType	<1x1 cell>		
NoElTypeDim	1	1	1
ElTypeProp	<1x1 cell>		
NoEl	120	120	120
Element	<120x1 cell>		
NoBC	1	1	1
BoundCond	[1,0,1,0,0,0,1]	0	1
AddMass	<3x7 double>	0	121
StructDoF	<1x1 struct>		
StructMat	<1x1 struct>		
TMA	<1x1 struct>		
EVPSolver	'ARNOLDI/LANCZOS'		

Gambar A.7 Format variabel *structure* **DataSave.Conf**.

Setelah membaca data dari *file* respons dengan format *.mat maka akan ditampilkan kotak dialog **Select responses from the listed ones**, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar A.8. Fungsi dari setiap tombol-tombol *user interface* juga diberikan dalam keterangan pada Gambar A.8.



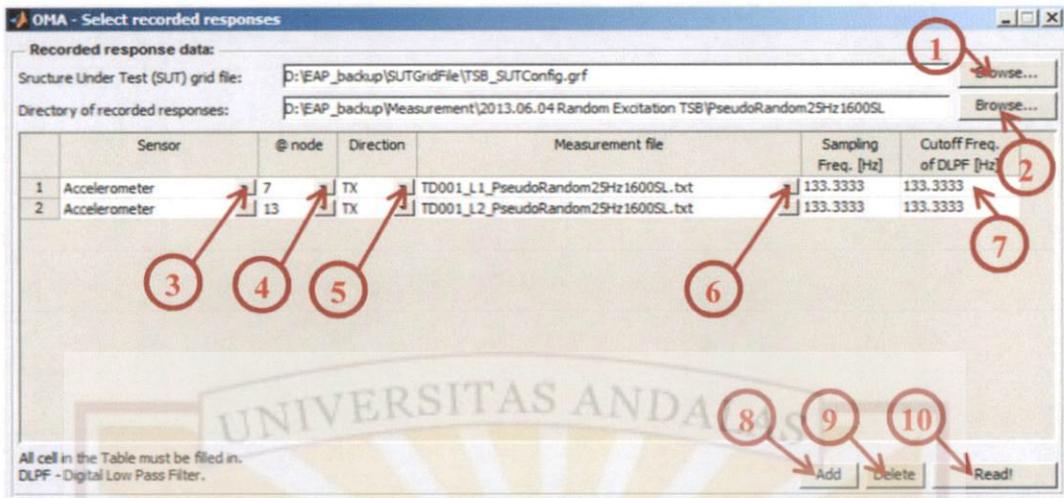
Keterangan

- (1) Klik *down triangle* untuk memilih jenis respons
- (2) Klik *down triangle* untuk memilih posisi respons di nodal
- (3) Klik *down triangle* untuk memilih arah pencuplikan respons di nodal
- (4) Klik *down triangle* untuk memilih penambahan *noise* (kosong untuk 0.00% *noise to signal ratio* NSR)
- (5) Klik untuk menambah 1 baris pada tabel
- (6) Klik untuk menghapus 1 baris terakhir pada tabel
- (7) Klik untuk membaca keseluruhan respons

Gambar A.8 Dialog box Select responses from the listed ones.

b. 2. Offline mode – Recorded response

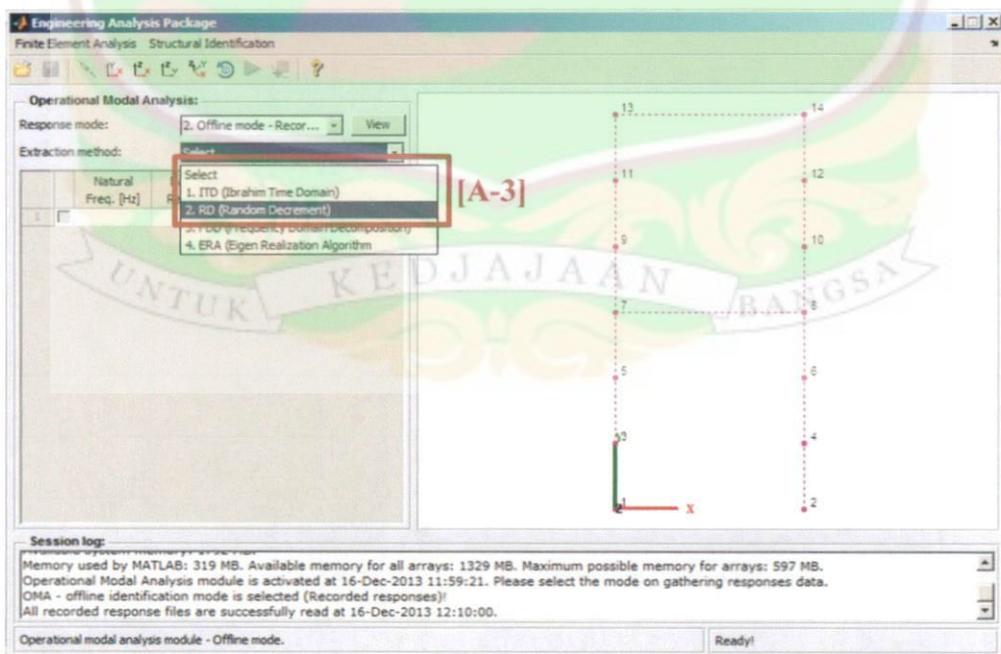
Proses identifikasi dilakukan berdasarkan respons struktur yang dicuplik melalui data akusisi DSA Brüel & Kjær berikut perangkat lunak Pulse v7.0 dan telah disimpan ke dalam tipe file **Pulse ASCII** dengan ekstensi ***.txt**. Ketika menekan tombol  maka akan ditampilkan sebuah **dialog box OMA – Select recorded responses** seperti yang ditunjukkan oleh Gambar A.9. Kegunaan dari setiap tombol user interface diperlihatkan pada keterangan Gambar A.9. Setelah selesai memilih *file grid structure under test* (SUT) dengan format ***.grf** melalui *browse the grid file of structure under test* maka secara otomatis program akan menampilkan bentuk dari SUT, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar A.10. Sedangkan format dari file grid SUT ditunjukkan oleh Gambar A.11.



Keterangan (Semua cell pada tabel harus diisi kecuali kolom *Sampling freq*):

- (1) Klik untuk *browse the grid file of structure under test* (SUT) format *.grf
- (2) Klik untuk *browse the directory of measused responses*
- (3) Klik *down triangle* untuk memilih jenis sensor
- (4) Klik *down triangle* untuk memilih posisi sensor di SUT
- (5) Klik *down triangle* untuk memilih arah pencuplikan sensor di SUT
- (6) Klik *down triangle* untuk memilih *file* respons (1 *file* untuk 1 respons)
- (7) Set nilai sebesar mungkin untuk kondisi tanpa *filter* (filter digital IIR)
- (8) Klik untuk menambah 1 baris pada tabel
- (9) Klik untuk menghapus 1 baris terakhir pada tabel
- (10) Klik untuk membaca keseluruhan *file* respons

Gambar A.9 Dialog box OMA – Select recorded responses.



Gambar A.10 Visualisasi SUT setelah membaca *file grid* SUT (*.grf).

```

TSB_SUTConfig - Notepad
File Edit Format View Help

-----
CONFIGURATION OF A TEST STRUCTURE

This configuration file has a capability to model a test structure under
identification through Experimental or Operational Modal Analysis.

The capability of this file is just to model a test structure like:
GT22. Planar Trusses with 2 Node (2 DoF per Node) per segment
GT23. Space Trusses with 2 Node (3 DoF per Node) per segment
GB22. Planar Beam with 2 Node (2 DoF per Node) per segment
GF23. Planar Frame with 2 Node (3 DoF per Node) per segment
GF26. Space Frame with 2 Node (6 DoF per Node) per segment
GP32. Inplane Plate with 3 Node (2 DoF per Node) per segment
GP33. Outplane Plate with 3 Node (3 DoF per Node) per segment
GP35. Outplane Plate with 3 Node (5 DoF per Node) per segment
GP42. Inplane Plate with 4 Node (2 DoF per Node) per segment
GP43. Outplane Plate with 4 Node (3 DoF per Node) per segment
GP45. Outplane Plate with 4 Node (5 DoF per Node) per segment

UNITS: SI
-----
% Tx Ty Tz Rx Ry Rz
MDOF: 1 1 0 0 0 1
-----
NONODE: 14
% NODE X Y Z
NODELIST:
1 0 0 0
2 0.2 0 0
3 0 0 0.07
4 0.2 0.07 0
5 0 0 0.14
6 0.2 0.14 0
7 0 0 0.21
8 0.2 0.21 0
9 0 0 0.28
10 0.2 0.28 0
11 0 0 0.35
12 0.2 0.35 0
13 0 0 0.42
14 0.2 0.42 0
-----
NOEL: 14
% EL EL.Type Ni Nj Nk Nl
ELLIST:
1 GF23 1 3
2 GF23 2 4
3 GF23 3 5
4 GF23 4 6
5 GF23 5 7
6 GF23 6 8
7 GF23 7 8
8 GF23 7 9
9 GF23 8 10
10 GF23 9 11
11 GF23 10 12
12 GF23 11 13
13 GF23 12 14
14 GF23 13 14
-----
SUT BOUNDARY CONDITION
%
Boundary Conditions: [Tx Ty Tz Rx Ry Rz]
0: No constraint
1: constraint
%
% Node BC. [Tx Ty Tz Rx Ry Rz]
NBCs: 2
BCLIST:
1 1 1 0 0 0 1
2 1 1 0 0 0 1
-----

```

→ Master degree of freedom

→ Koordinat dari nodal SUT, untuk posisi penempatan sensor

→ Elemen yang menghubungkan nodal ke nodal SUT

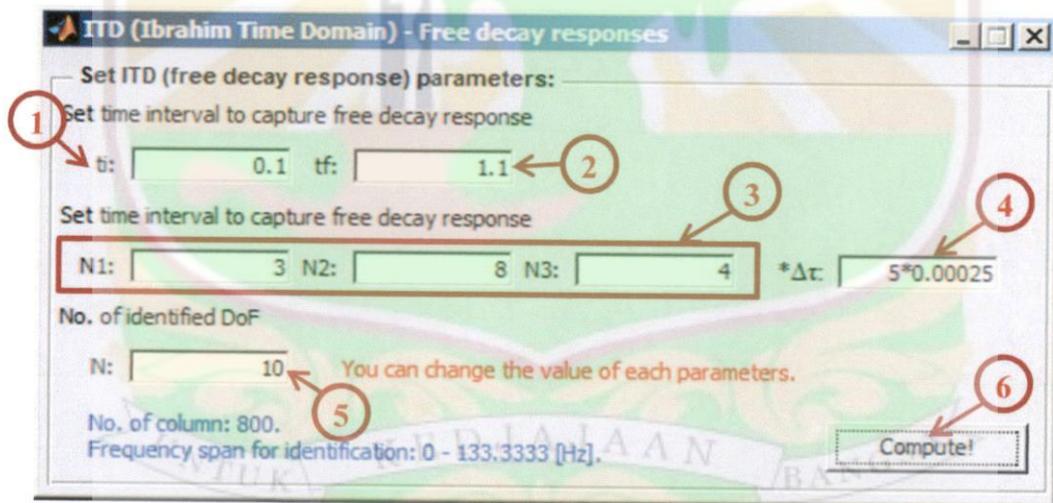
→ Constraint atau kondisi batas dari SUT

Gambar A.11 Susunan file *.grf, contoh untuk model bangunan dua lantai.

5. Melalui Gambar A.10 dapat dipilih metode-metode identifikasi untuk mengekstraksi parameter modal berdasarkan respons struktur uji [A-3]. Metode identifikasi tersebut adalah **1. (ITD) Ibrahim Time Domain** dan **2. (RD) Random Decrement**.

a. Identifikasi dengan **1. (ITD) Ibrahim Time Domain**

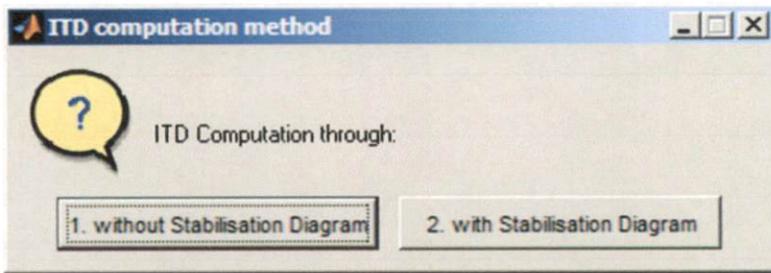
Setelah memilih metode identifikasi ITD ini maka akan muncul kotak dialog **ITD (Ibrahim Time Domain) – Free decay responses**, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar A.12. Untuk menukur parameter-parameter untuk identifikasi dengan metode ITD dapat dilakukan dengan mengacu pada keterangan yang diberikan dalam Gambar A.12. Ketika tombol **Compute** ditekan maka akan ditampilkan pilihan proses identifikasi melalui tanpa atau dengan diagram kestabilan (Gambar A.13). Jika identifikasi dilakukan dengan diagram kestabilan, maka diagram kestabilan seperti diperlihatkan dalam Gambar A.14.



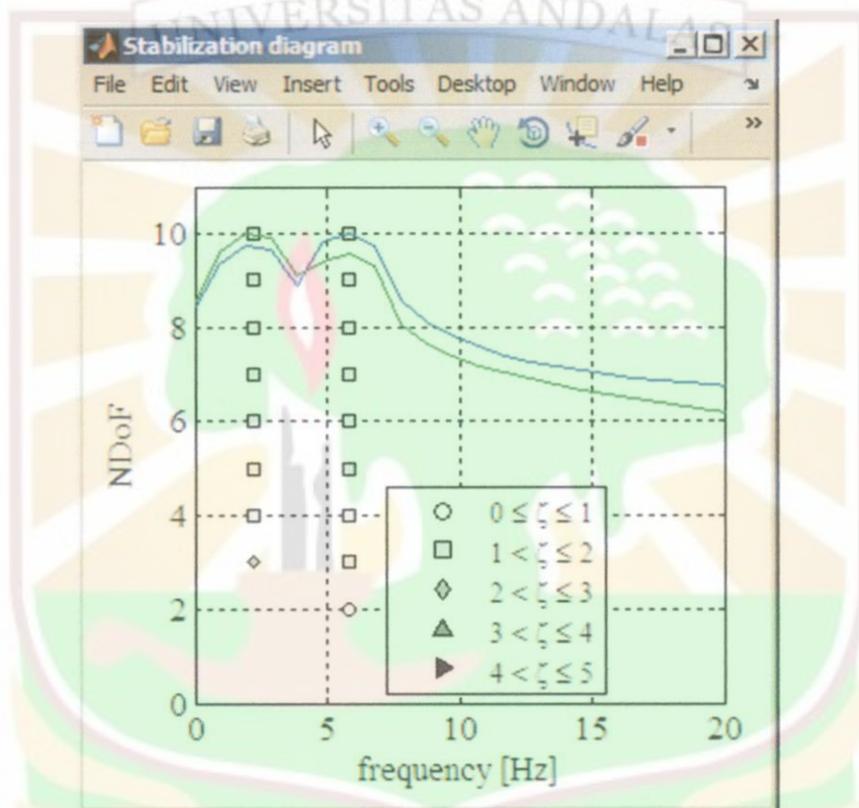
Keterangan:

- (1) Set waktu awal dari respons yang dicuplik untuk proses identifikasi
- (2) Set waktu akhir dari respons yang dicuplik untuk proses identifikasi
- (3) Nilai parameter optimum metode ITD [13]
- (4) Waktu sampling (0.00025 s), 5 merupakan N_4 (Gambar 2.2).
- (5) Jumlah NDoF untuk proses identifikasi
- (6) Untuk menentukan parameter modal berdasarkan informasi data respons

Gambar A.12 Parameter-parameter untuk identifikasi dengan metode ITD.



Gambar A.13 Kotak dialog identifikasi dengan metode ITD melalui tanpa atau dengan diagram kestabilan.

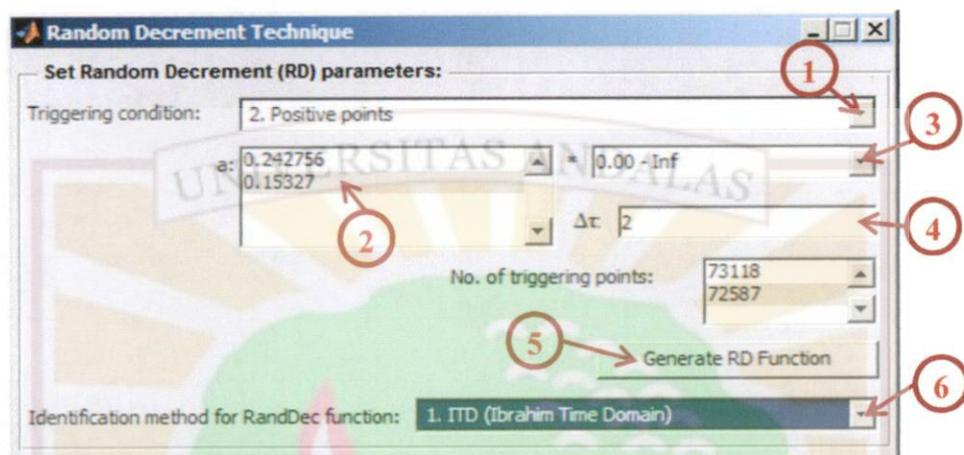


Gambar A.14 Diagram kestabilan hasil identifikasi.

b. Identifikasi dengan 2. (RD) Random Decrement

Untuk data respons getaran pakasa acak metode RD merupakan metode untuk mengubah respons tersebut menjadi fungsi korelasi respons yang ekuivalen dengan respons getaran bebas. Kotak dialog **Random Decrement Technique** diperlihatkan dalam Gambar A.15. Parameter-parameter untuk membentuk fungsi RD dapat dipilih melalui kotak dialog ini dengan keterangan untuk setiap tombol *user interface* diberikan oleh Gambar A.15 ini. Ketika tombol **Generate**

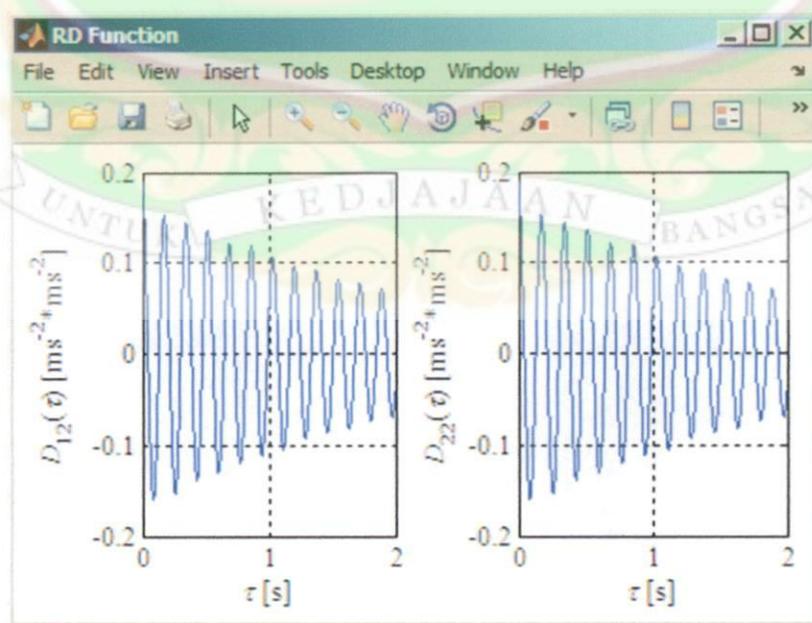
RD Function ditekan maka fungsi RD akan dihitung dan bentuk fungsi RD setelah proses estimasi selesai ditunjukkan oleh Gambar A.16. Untuk ekstraksi parameter modal dengan metode ITD seperti yang telah dijelaskan pada langkah 5.a.



Keterangan:

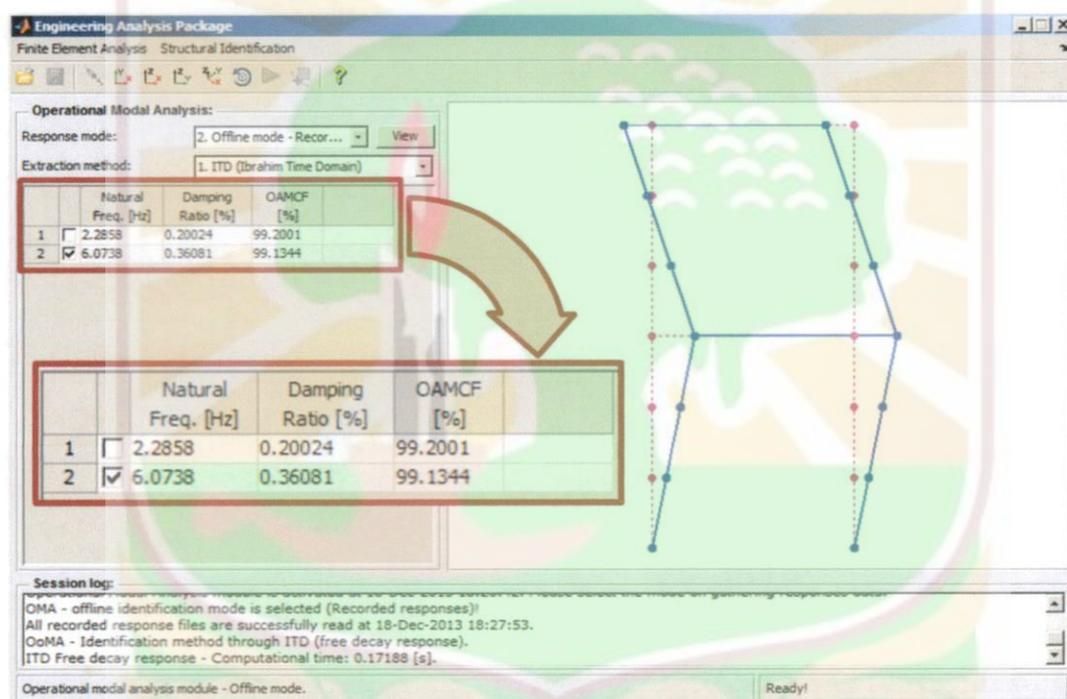
- (1) Klik untuk *browse the grid file of structure under test (SUT)* format *.grf
- (2) Klik untuk *browse the directory of measused responses*
- (3) Klik *down triangle* untuk memilih jenis sensor
- (4) Klik *down triangle* untuk memilih posisi sensor di SUT
- (5) Klik *down triangle* untuk memilih arah pencuplikan sensor di SUT
- (6) Klik *down triangle* untuk memilih *file respons* (1 *file* untuk 1 *respons*)

Gambar A.15 Parameter-parameter dalam metode RD.



Gambar A.16 Fungsi RD setelah proses estimasi selesai.

6. Setelah proses ekstraksi parameter *modal* selesai, selanjutnya melalui jendela utama Engineering Analysis Package (EAPack), seperti yang diperlihatkan oleh Gambar A.17, dapat diketahui hasil identifikasi parameter *modal* struktur uji. Parameter *modal* hasil identifikasi terdiri atas frekuensi pribadi dan rasio redaman, berikutnya juga ditampilkan nilai OAMCF setiap modus. Dengan memberikan tik pada salah satu *check box* pada kolom pertama (sebelah kiri kolom **Natural Freq. [Hz]**), kemudian akan ditampilkan modus getar normal pada frekuensi pribadi struktur uji tersebut di *panel* kanan jendela EAPack.



Gambar A.17 Hasil identifikasi parameter modal struktur uji.