

Kaji Eksperimental Penerapan Metode Ibrahim Time Domain Untuk Identifikasi Model Bangunan Dua Lantai Dengan Gangguan Pada Tumpuan

Mulyadi Bur^{1,a}, Meifal Rusli^{2,b}, Adriyan^{3,c} dan Lovely Son^{4,d}

¹²³⁴Jurusan Teknik Mesin, Universitas Andalas,
Jl. Kampus Limau Manis, Padang-25163, Indonesia
Email: [1mulyadibur@ft.unand.ac.id](mailto:mulyadibur@ft.unand.ac.id), [2meifal@ft.unand.ac.id](mailto:meifal@ft.unand.ac.id), [3adriyan0686@gmail.com](mailto:adriyan0686@gmail.com),
[4lovelyson@ft.unand.ac.id](mailto:lovelyson@ft.unand.ac.id)

Abstrak

Identifikasi parameter dinamik suatu struktur merupakan suatu hal yang mendasar dalam kajian perilaku struktur di bawah pembebanan dinamik. Salah satu teknik identifikasi yang dilakukan dengan hanya menggunakan respons struktur adalah prosedur *operational modal analysis* (OMA). Prosedur OMA dengan basis metode *Ibrahim Time Domain* (ITD) masih mempunyai berbagai kemungkinan untuk dikembangkan. Dalam penelitian ini metode ITD dikombinasikan dengan metode Random Decrement (RD). Penelitian yang dilakukan sebelumnya umumnya menggunakan beban kejut atau harmonik. Sedangkan dalam penelitian ini digunakan gangguan acak. Pada makalah ini digunakan metode ITD yang telah dikembangkan untuk mengidentifikasi model bangunan dua tingkat yang diganggu pada tumpuannya. Gangguan yang digunakan untuk pengekstasi struktur uji berbentuk *swept-sine*, acak (*random*), dan *pseudo random*. Hasil dari OMA melalui ITD dibandingkan dengan identifikasi melalui *Experimental Modal Analysis* (EMA) memberikan hasil yang cukup akurat dengan perbedaan di bawah 5%.

Kata kunci : *Identification, Ibrahim Time Domain, Random Decrement, OMA, EMA*

Pendahuluan

Identifikasi parameter sistem dinamik dalam skala luas dikenal dengan analisis modal (*modal analysis*) yang di dalamnya tercakup pengujian modal (*modal testing*) [1]. Analisis modal terdiri dari analisis modal eksperimental (*experimental modal analysis* atau EMA) dan analisis modal operasional (*operational modal analysis* atau OMA) [2]. Proses indentifikasi dalam prosedur EMA membutuhkan informasi data gangguan dan data respons struktur, sedang dalam prosedur OMA hanya diperlukan data respons saja. Dengan demikian, OMA menjadi lebih sederhana dan praktis. Meskipun demikian data respons yang diperlukan haruslah berbentuk data respons getaran bebas, sehingga semua data respons yang bukan berbentuk getaran bebas terlebih dahulu diubah menjadi data respons getaran bebas. Metode Ibrahim (ITD) telah berhasil digunakan untuk mengekstrak parameter modal melalui respons getaran bebas struktur akibat gangguan kejut [3-6]. Modifikasi metode ITD dengan respons akibat gangguan harmonik telah dikembangkan oleh Mohanty dan Rixen [7-9].

Pada makalah ini dikombinasikan metode ITD dengan metode *Random Decrement* (RD) untuk identifikasi bangunan dua lantai yang diganggu pada tumpuannya. Metode RD digunakan untuk mengubah respons struktur getaran paksa menjadi respons struktur getaran bebas. Gangguan yang digunakan untuk mengeksitasi struktur uji berbentuk *swept-sine*, acak (*random*), dan *pseudo random*.

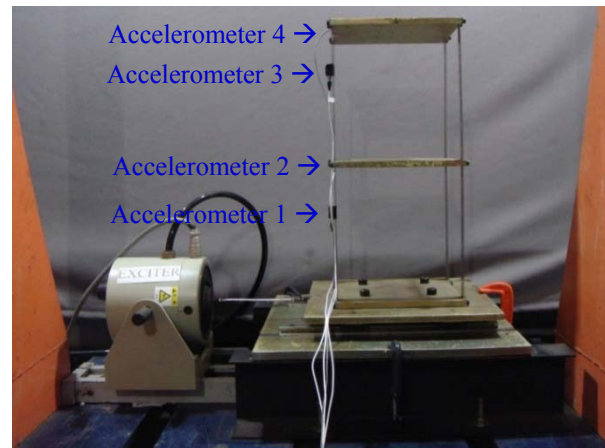
Metode Penelitian

Pada penelitian sebelumnya telah dikembangkan sebuah Paket Program Identifikasi (PPI) struktur dalam bahasa pemrograman MATLAB dengan Metode identifikasi ranah waktu ITD diterapkan sebagai algoritma identifikasi [10]. Dalam penelitian ini PPI yang telah dikembangkan tersebut akan digunakan untuk identifikasi model bangunan dua lantai seperti yang terlihat pada Gambar 1.

Untuk mengeksitasi struktur uji digunakan cara acak dan *swept-sine* (linier dan logaritmik) dengan konten frekuensi 0 – 25 Hz. Respons struktur uji dicuplik pada empat posisi kolom seperti yang ditampilkan dalam Gambar 1. Respons yang dicuplik pada keempat posisi dilakukan pada frekuensi pencuplikan 128 Hz untuk durasi waktu selama 120 s dengan menggunakan sensor *accelerometer* Delta Tron B&K 4507 dan 4508. Sinyal dari sensor-sensor ini diakusisi menggunakan Pulse Analyser B&K 3560C dan ditampilkan ke dalam grafik respons melalui perangkat lunak Pulse v7.0.

Pada penelitian ini digunakan dua jenis *triggering* yaitu *level crossing triggering* (T^L) dan

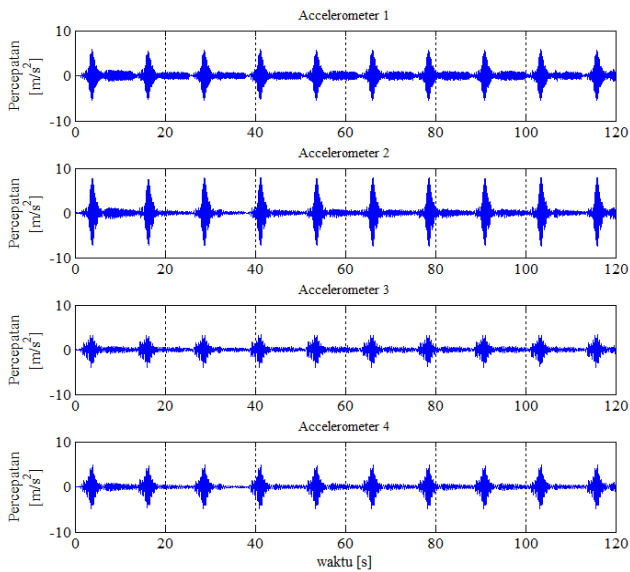
positive points triggering (T^P) untuk mendapatkan fungsi RD. Fungsi RD ini selanjutnya digunakan untuk mengekstrak parameter modal struktur uji melalui aplikasi metode ITD. Selanjutnya, modus getar normal diinterpretasikan menggunakan metode Niedbal [11]. Untuk T^L , *triggering* dilakukan pada nilai optimum yaitu RMS respons [12].



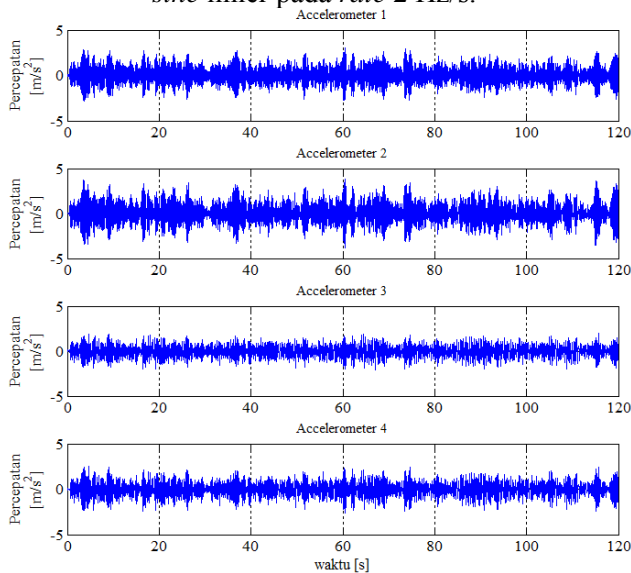
Gambar 1. Model bangunan dua lantai.

Hasil dan Pembahasan

Dalam penelitian ini, model struktur 2 lantai dieksitasi pada tumpuannya dengan empat jenis gangguan yaitu *swept-sine* linier, *swept-sine* logaritmik, acak (*random*), dan *pseudo random*. Respons getaran paksa struktur akibat jenis eksitasi *swept-sine* linier dan *random* di empat posisi pencuplikan diperlihatkan pada Gambar 2 dan Gambar 3. *Root mean square* (RMS) respons keempat jenis eksitasi ditampilkan dalam Tabel 1. Nilai *Root mean square* (RMS) respons dari keempat hasil pengujian tersebut digunakan untuk proses *triggering* dengan metode RD. Fungsi RD yang dibentuk melalui penerapan T^L dilakukan berdasarkan RMS terendah dari keempat respons. Berdasarkan Tabel 1 dapat diketahui bahwa RMS respons yang terendah terjadi ketika respons dicuplik di posisi pencuplikan ke tiga.



Gambar 2. Respons pada keempat posisi pencuplikan respons struktur akibat eksitasi *swept-sine* linier pada rate 2 Hz/s.



Gambar 3. Respons pada keempat posisi pencuplikan respons struktur akibat eksitasi *random*.

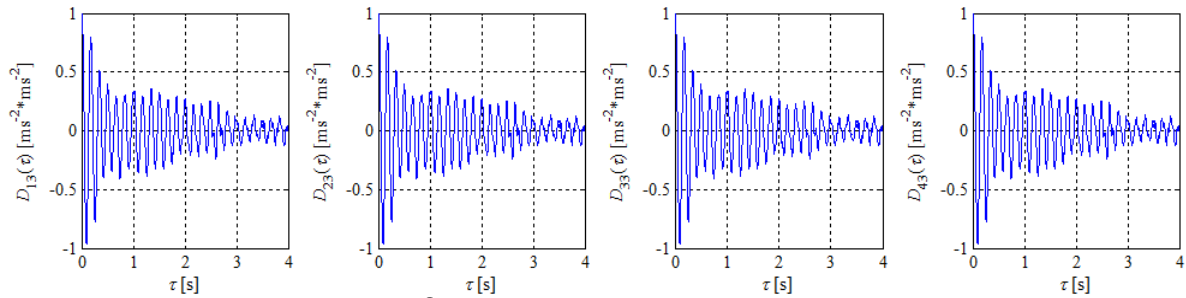
Dengan menggunakan kedua jenis *triggering* tersebut dapat ditentukan jumlah titik-titik *triggering* (N) untuk durasi pencuplikan respons, dan lama waktu estimasi yang dibutuhkan dalam membentuk fungsi RD, seperti yang ditampilkan dalam Tabel 2. Berdasarkan Tabel 2 diketahui bahwa waktu estimasi yang digunakan untuk membentuk fungsi RD berdasarkan T^P adalah sekitar 15 kali waktu estimasi pembentukan fungsi RD dengan T^L . Fungsi RD yang dibentuk dari kedua jenis *triggering* ditampilkan dalam Gambar 4 – 7. Parameter modal dari struktur uji diidentifikasi dengan menggunakan metode ITD berdasarkan fungsi RD yang diperoleh, diperlihatkan dalam Gambar 4–7.

Tabel 1. RMS respons percepatan struktur bangunan 2 tingkat akibat empat jenis sinyal gangguan di tumpuan struktur uji.

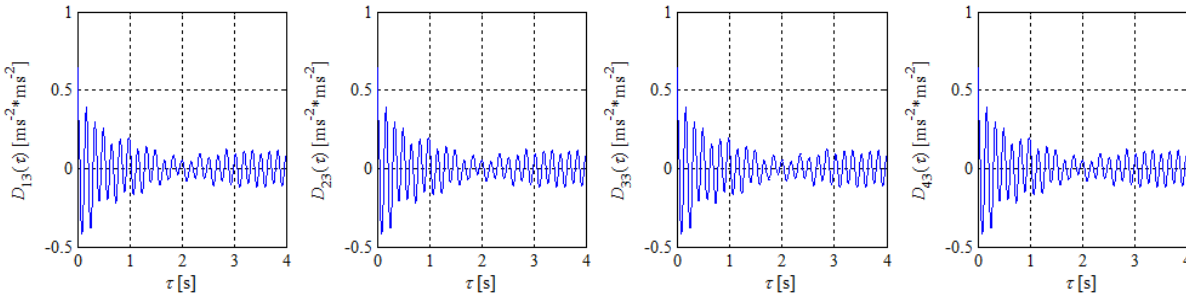
Respons	RMS [m/s ²]			
	<i>Swept-sine</i> linier	<i>Swept-sine</i> logaritmik	<i>Random</i>	<i>Pseudo</i> <i>random</i>
Accelerometer 1	1.1467	1.0030	0.8727	0.8757
Accelerometer 2	1.4687	1.2603	1.1065	1.1144
Accelerometer 3	0.7475	0.8562	0.6114	0.6686
Accelerometer 4	0.9903	0.9931	0.7799	0.8171

Tabel 2. Jumlah titik-titik *triggering* (*N*) dan waktu estimasi untuk membentuk fungsi RD

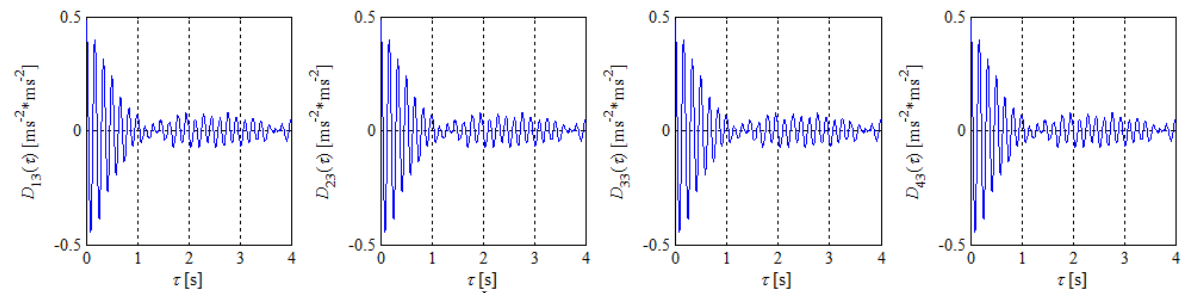
<i>Trig- gering</i>	<i>Swept-sine</i> linier		<i>Swept-sine</i> logaritmik		<i>Random</i>		<i>Pseudo random</i>	
	<i>N</i>	Waktu estimasi	<i>N</i>	Waktu estimasi	<i>N</i>	Waktu estimasi	<i>N</i>	Waktu estimasi
T ^L	341	0.0468	232	0.0312	1088	0.0624	964	0.0624
	307		266		1100		1112	
	336		238		664		768	
	288		234		664		632	
T ^P	7447	0.5772	7434	0.5928	7339	0.5772	7488	0.6396
	7427		7375		7316		7378	
	7696		7472		7555		7467	
	7624		7414		7535		7349	



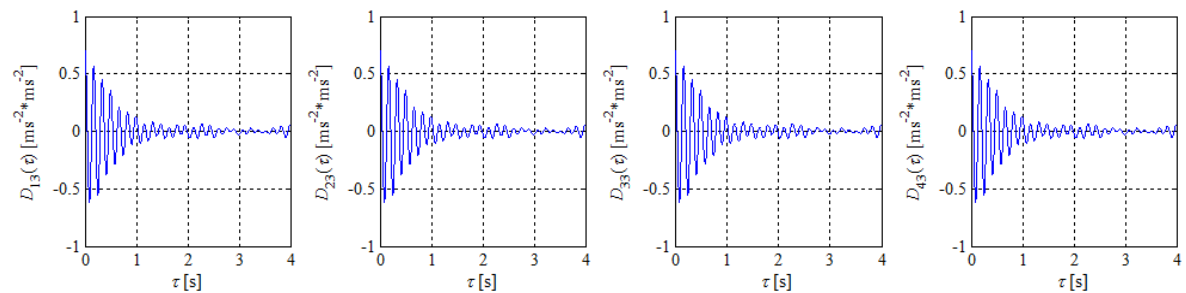
Gambar 4 Fungsi RD *triggering* T^L respons struktur bangunan 2 tingkat eksitasi *swept-sine* linier.



Gambar 5. Fungsi RD *triggering* T^P respons struktur bangunan 2 tingkat eksitasi *swept-sine* linier.



Gambar 6. Fungsi RD *triggering* T^L respons struktur bangunan 2 tingkat eksitasi *random*.



Gambar 7. Fungsi RD *triggering* T^P respons struktur bangunan 2 tingkat eksitasi *pseudo-random*.

Secara keseluruhan perbandingan hasil identifikasi parameter modal struktur dengan berbagai jenis eksitasi yang diberikan serta redaman struktur uji pada kedua modus yang teridentifikasi diperlihatkan pada Tabel 3. Pada Tabel 3 juga diperlihatkan hasil identifikasi yang dilakukan dengan menerapkan prosedur EMA. Eksitasi yang digunakan dalam prosedur EMA adalah gangguan kejut dari *hammer* yang diberikan pada masing-masing lantai. Hasil identifikasi dengan prosedur EMA sepenuhnya dilakukan pada perangkat lunak Pulse Analyser modul FFT Analyser 4 *channel*.

Berdasarkan Tabel 3 dapat diketahui bahwa frekuensi pribadi hasil identifikasi melalui prosedur EMA memberikan nilai yang cukup konsisten, yaitu pada modus 1 bernilai 2.25 Hz dan pada modus 2 sebesar 6.12 Hz. Sedangkan pada prosedur OMA memperlihatkan hasil yang bervariasi untuk setiap metode identifikasi. Penyimpangan terbesar pada modus pertama sebesar 4.9 % terjadi pada metode identifikasi RD TL + ITD (*swept-sine* linier) dan metode identifikasi RD TP + ITD (*random*), sedangkan untuk modus kedua sebesar 3.84 % terjadi pada metode identifikasi RD TP + ITD (*swept-sine* logaritmik).

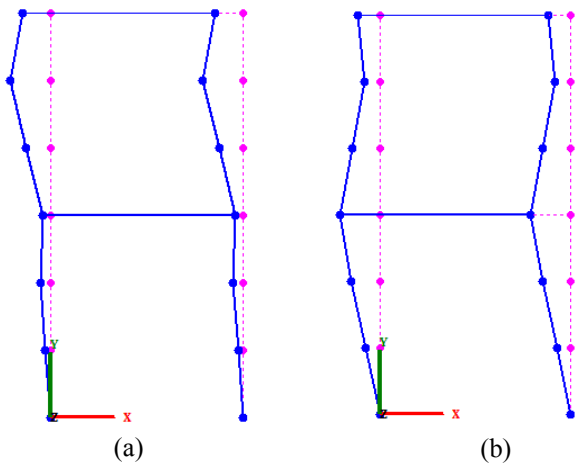
Hasil identifikasi rasio redaman baik melalui prosedur EMA maupun melalui prosedur OMA menunjukkan nilai yang bervariasi dan secara umum bernilai di bawah 4 %. Jika diperhatikan lebih teliti, identifikasi melalui prosedur EMA memberikan hasil dengan fluktuasi yang lebih kecil dibandingkan dengan prosedur OMA.

Tabel 3. Perbandingan hasil identifikasi parameter modal struktur dengan beberapa metode identifikasi pada dua prosedur analisis modal (EMA dan OMA).

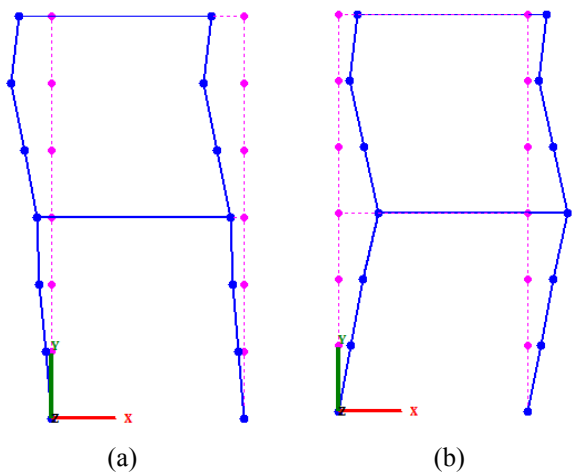
Prosedur	Metode Identifikasi	Modus 1		Modus 2	
		f (Hz)	ζ (%)	f (Hz)	ζ (%)
EMA	<i>Peak-picking</i> FRF H_{12}	2.25	2.85	6.12	1.16
	<i>Peak-picking</i> FRF H_{22}	2.25	2.82	6.12	1.22
	<i>Peak-picking</i> FRF H_{32}	2.25	2.87	6.12	1.41
	<i>Peak-picking</i> FRF H_{42}	2.25	2.92	6.12	1.27
	<i>Peak-picking</i> FRF H_{14}	2.25	2.95	6.12	1.53
	<i>Peak-picking</i> FRF H_{24}	2.25	2.96	6.12	1.51
	<i>Peak-picking</i> FRF H_{34}	2.25	2.93	6.12	1.25
	<i>Peak-picking</i> FRF H_{44}	2.25	2.93	6.12	1.32
OMA	ITD (Impuls di L_1)	2.25	0.37	6.14	0.25
	ITD (Impuls di L_2)	2.29	0.31	6.13	0.33
	RD T^L + ITD (<i>swept-sine</i> linier)	2.14	2.45	6.06	2.79
	RD T^P + ITD (<i>swept-sine</i> linier)	2.20	2.25	6.10	1.99
	RD T^L + ITD (<i>swept-sine</i> logaritmik)	2.15	2.47	6.02	1.33
	RD T^P + ITD (<i>swept-sine</i> logaritmik)	2.18	2.12	6.11	3.84
	RD T^L + ITD (<i>random</i>)	2.15	0.24	6.06	2.85
	RD T^P + ITD (<i>random</i>)	2.14	2.06	6.13	3.79
RD T^L + ITD (<i>pseudo random</i>)	2.17	1.27	5.99	1.70	
RD T^P + ITD (<i>pseudo random</i>)	2.13	0.84	6.03	3.95	

Dari hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa struktur bangunan 2 tingkat merupakan struktur dengan karakteristik redaman rendah.

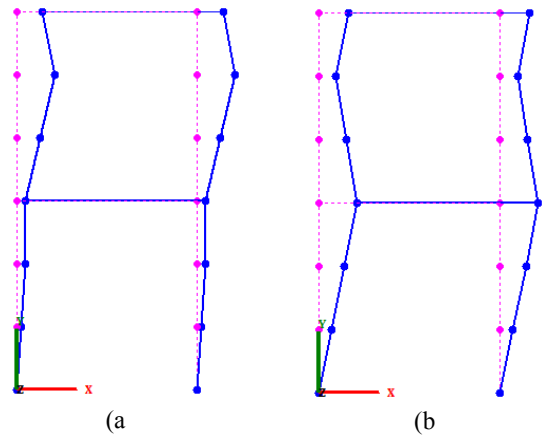
Hasil identifikasi modulus getar normal yang telah ditransformasi dari modulus getar kompleks diperlihatkan pada Gambar 8 – 15. Sementara itu, untuk modulus getar hasil identifikasi yang dilakukan dengan prosedur EMA diperlihatkan dalam Gambar 16 dan 17. Jika modulus getar normal dan hasil eksperimen dibandingkan dengan modulus getar normal yang diperoleh melalui prosedur EMA (Gambar 16 dan 17), maka hanya identifikasi respons getaran bebas dengan metode ITD saja yang hasilnya hampir sama.



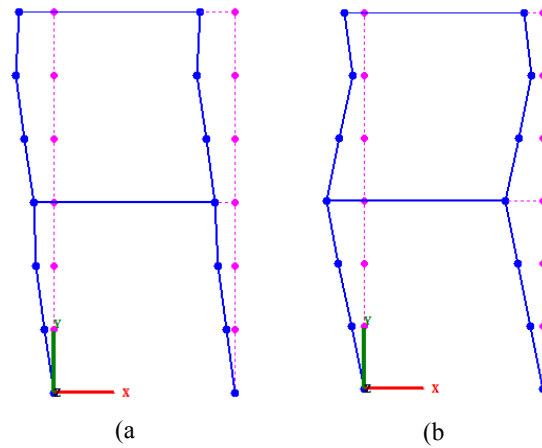
Gambar 8 Modus getar normal hasil identifikasi respons metode $RD T^L + ITD$ (eksitasi *swept-sine* linier) (a) modus 1 dan (b) modus 2.



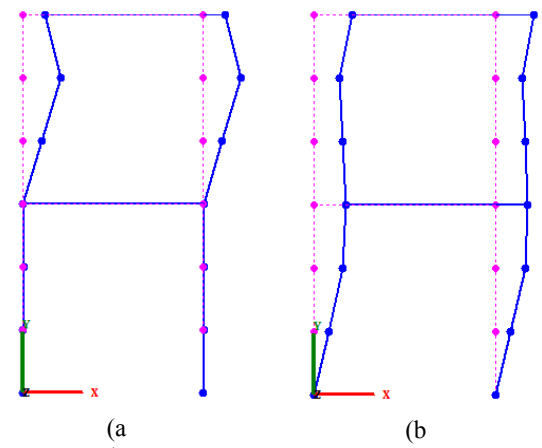
Gambar 9 Modus getar normal hasil identifikasi respons metode $RD T^P + ITD$ (eksitasi *swept-sine* linier) (a) modus 1 dan (b) modus 2.



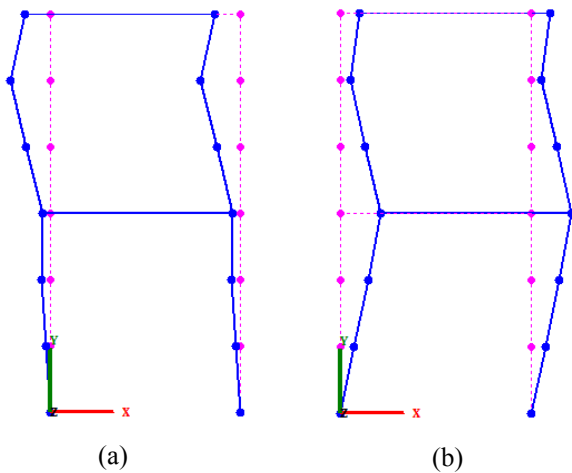
Gambar 10 Modus getar normal hasil identifikasi respons metode $RD T^L + ITD$ (eksitasi *swept-sine* logaritmik) (a) modus 1 dan (b) modus 2.



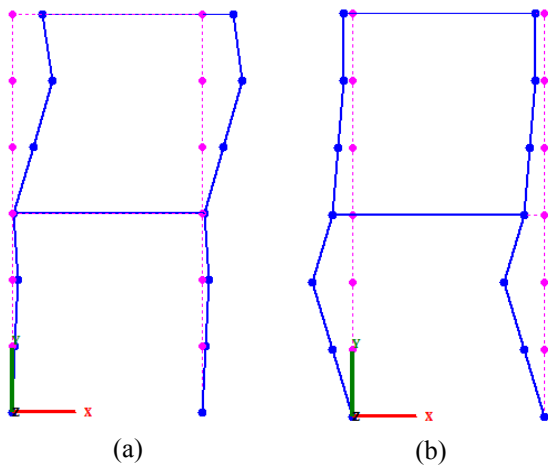
Gambar 11 Modus getar normal hasil identifikasi respons metode $RD T^P + ITD$ (eksitasi *swept-sine* logaritmik) (a) modus 1 dan (b) modus 2.



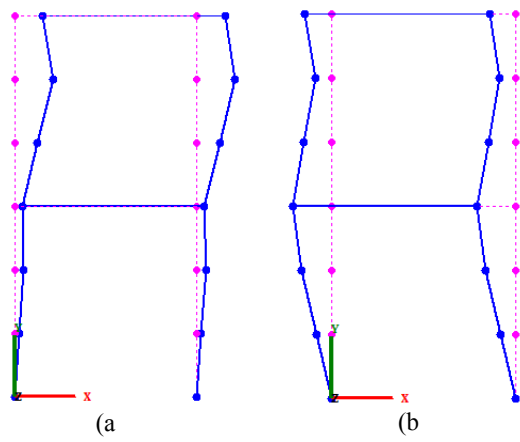
Gambar 12 Modus getar normal hasil identifikasi respons metode $RD T^L + ITD$ (eksitasi *random*) (a) modus 1 dan (b) modus 2.



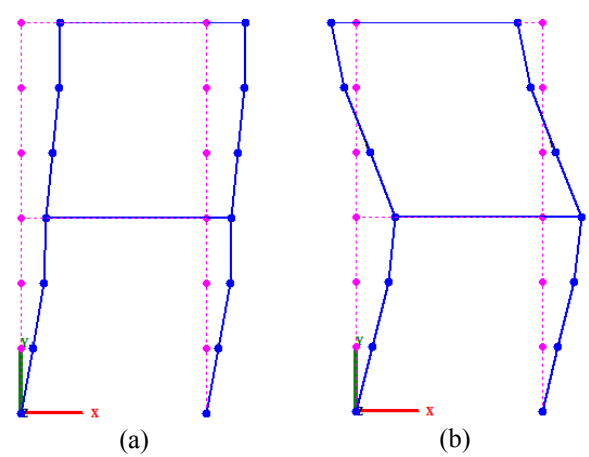
Gambar 13 Modus getar normal hasil identifikasi respons metode RD T^P + ITD (eksitasi *random*) (a) modus 1 dan (b) modus 2.



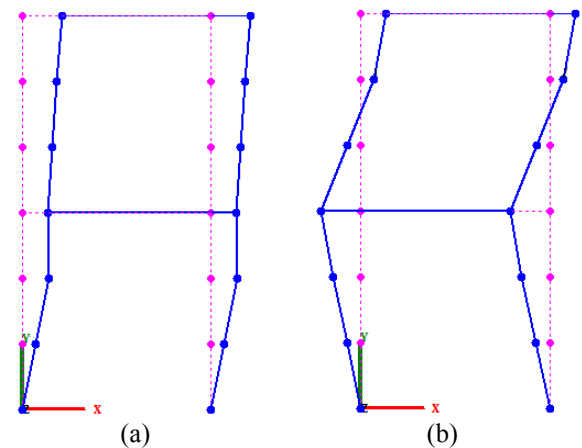
Gambar 14 Modus getar normal hasil identifikasi respons metode RD T^L + ITD (eksitasi *pseudo random*) (a) modus 1 dan (b) modus 2.



Gambar 15 Modus getar normal hasil identifikasi respons metode RD T^P + ITD (eksitasi *pseudo random*) (a) modus 1 dan (b) modus 2.



Gambar 16. Modus getar normal hasil identifikasi melalui prosedur EMA (eksitasi kejut di lantai 1, L_1) (a) modus 1 dan (b) modus 2.



Gambar 17 Modus getar normal hasil identifikasi melalui prosedur EMA (eksitasi kejut di lantai 2, L_2) (a) modus 1 dan (b) modus 2.

Modus getar normal yang diidentifikasi berdasarkan data respons akibat gangguan pada tumpuan struktur bangunan 2 tingkat memperlihatkan kesesuaian khususnya respons struktur akibat eksitasi *swept-sine*, baik jenis linier atau logaritmik. Perbedaan yang cukup signifikan diperlihatkan oleh hasil identifikasi berdasarkan data respons akibat eksitasi *random* dan *pseudo random* untuk *triggering* T^L . Kondisi ini diakibatkan oleh kualitas fungsi RD yang dihasilkan melalui *triggering* T^L lebih rendah dibandingkan T^P .

Kesimpulan

Melalui makalah ini telah dilakukan identifikasi parameter modal berdasarkan respons getaran bebas melalui metode ITD dan memperlihatkan hasil identifikasi yang hampir konsisten. Hal ini dibuktikan dengan persentase perbedaan hasil identifikasi frekuensi pribadi dengan penyelesaian EVP [10] dan EMA yang berada di bawah 5%. Hasil identifikasi rasio redaman menunjukkan bahwa struktur uji yang diidentifikasi merupakan struktur dengan redaman rendah. Hasil identifikasi rasio redaman yang cukup variatif selanjutnya diatasi dengan mengembangkan suatu algoritma baru yang dapat dengan baik memberikan hasil identifikasi yang lebih konsisten. Modus getar normal diperoleh dengan cukup baik melalui penggunaan metode Niedbal.

Secara umum diperlihatkan bahwa kualitas hasil identifikasi melalui fungsi RD dengan metoda ITD dengan *triggering* T^P jauh lebih baik dibandingkan dengan *triggering* T^L . Kondisi ini disebabkan oleh jumlah titik-titik *triggering* yang lebih banyak, sehingga dihasilkan kualitas fungsi RD yang lebih baik dalam proses identifikasi.

Ucapan Terima kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi atas bantuan dana melalui LPPM Unand dalam bentuk Hibah Fundamental dengan kontrak no.21/UN.16/PL-FD/2013.

Referensi

- [1] Ewin, D. J. 2000. Modal Testing: Theory, Practice and Application Second Edition. Research Studies Press.
- [2] Batel, M. 2002. Operational Modal Analysis – Another Way of Doing Modal Testing. Journal of Sound and Vibration. 22-27.
- [3] Ibrahim, S. R. Mikulcik, E. C., 1973. A Time Domain Modal Vibration Test Technique. The Shock and Vibration Bulletin. 43 (4): 21-37.
- [4] Ibrahim, S. R. Mikulcik, E. C. 1976. The Experimental Determination of Vibration Parameters from Time Responses. The Shock and Vibration Bulletin, 46 (5): 187-196.
- [5] Ibrahim, S. R. Mikulcik, E. C. 1977. A Method for the Direct Identification of Vibration Parameters from the Free Responses. The Shock and Vibration Bulletin. 47 (4): 183-198.
- [6] Ibrahim, S. R. 1983. Time Domain Modal Parameter Identification and Modelling Structures. Proceeding of the American Control Conference. San Fransisco, USA.

Hal. 989-996.

- [7] Mohanty, P. Rixen, R. J. 2004, A Modified Ibrahim Time Domain Algorithm for Operational Modal Analysis Including Harmonic Excitations Journal of Sound and Vibration, 275: 375-390.
- [8] Mohanty, P. Rixen, D. J. 2004. Modified SSTD Method to Account for Harmonic Excitations During Operational Modal Analysis. Journal of Mechanism and Machine Theory. 39: 1247-1255.
- [9] Mohanty, P. 2005. Operational Modal Analysis in the Presence of Harmonic Excitations. Dissertation TU-Delft, Delft.
- [10] Bur, M. Rusli, M. Adriyan. Son, L. 2013. Kaji Numerik Penerapan Metode Random Decrement dan Ibrahim Time Domain Untuk Identifikasi Struktur yang Diganggu Secara Acak. Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XII (SNTTM XII). Bandar Lampung, Indonesia. Hal. 742-749.
- [11] Niedbal, N. 1984. Analytical Determination of Real Normal Modes from Measured Complex Responses. Proceeding of 25th Structures, Structural Dynamics and Material Conference and AIAA Dynamics Specialist Conference. California, USA. Hal. 292-295.
- [12] Asmussen, J. C. 1997. Modal Analysis Based on Random Decrement Technique – Application to Civil Engineering Structures. Dissertation The University of Aalborg, Aalborg.