

Penerapan Teknik Analisis Modal Teoritik dan Eksperimental untuk Identifikasi Parameter Modal Model Struktur Bangunan Dua Lantai

Adriyan¹, Mulyadi Bur¹, Meifal Rusli¹, dan Lovely Son¹

¹Laboratorium Dinamika Struktur, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Andalas
Kampus Limau Manis, Padang, 25163
E-mail: adriyan0686@gmail.com

Abstrak

Identifikasi struktur merupakan suatu teknik yang digunakan untuk mendapatkan informasi mengenai karakteristik dinamik struktur atau parameter modal. Penelitian ini dilakukan untuk memperoleh suatu basis data identifikasi struktur dinamik. Struktur uji model bangunan dua lantai dipilih untuk proses penentuan parameter modal dengan menerapkan prosedur analisis modal teoritik dan analisis modal eksperimental. Prosedur analisis modal operasional akan diterapkan untuk proses identifikasi *real time* struktur uji dalam tahapan penelitian berikutnya untuk kasus pembebanan acak. Kajian modal teoritik dilakukan melalui idealisasi struktur uji dengan model rangka bidang dan didiskritisasi dengan metode elemen hingga. Masalah nilai dan vektor karakteristik dari struktur uji kemudian diselesaikan dengan menggunakan metode Arnoldi/Lanczos dan metode invers iterasi (teknik *sweeping* dan *deflasi*). Kajian eksperimental dilakukan berdasarkan prosedur modal eksperimental dengan teknik *single input single output* (SISO). Fungsi respons frekuensi (FRF) dicuplik dalam rentang frekuensi 0-200 Hz. Parameter modal struktur uji dapat diekstrak dari FRF tercuplik dengan menerapkan metode *half power point* (HPP) dan *rational fraction polynomials* (RFP).

Hasil penghitungan numerik menunjukkan terdapat enam modus dalam rentang 0–200 Hz. Dua modus terendah model merupakan modus simetri struktur uji (2.2005 Hz dan 5.7689 Hz). Untuk modus tertingginya (modus ketiga dan berikutnya) adalah modus yang berdekatan (*close mode*). Hasil identifikasi melalui data eksperimen dengan metode HPP dan RFP didapatkan tiga modus getar struktur uji dalam rentang 0-200 Hz, yaitu dua modus terendah dan satu modus tertinggi. Perbedaan hasil penentuan frekuensi pribadi secara numerik dan pengujian untuk dua modus terendah adalah < 4% dan > 10% untuk modus tertingginya. Ketidakmampuan dalam mengidentifikasi modus tertinggi lainnya disebabkan oleh pengukuran yang dilakukan masih menerapkan teknik SISO. Redaman modal untuk ketiga modus diidentifikasi dengan nilai 1.00%, 1.50% dan 1.50%.

Keywords: Model bangunan dua lantai, metode Arnoldi/Lanczos, metode invers iterasi, parameter modal, metode HPP dan RFP.

1. Pendahuluan

Identifikasi struktur merupakan suatu teknik yang digunakan untuk mendapatkan informasi mengenai karakteristik dinamik struktur atau parameter modal. Proses penentuan parameter modal dapat dilakukan melalui dua cara yaitu metode numerik dan prosedur pengujian yang dalam kajian dinamika struktur dikenal dengan prosedur modal. Kedua metode ini menghasilkan model modal dari struktur yang dianalisis. Prosedur modal ini diklasifikasikan atas analisis modal teoritik (*theoretical modal analysis* atau TMA), analisis modal eksperimental (*experimental modal analysis* atau EMA) dan analisis modal operasional (*operational modal analysis* atau OMA). Metode elemen hingga sebagai metode komputasi numerik struktur menjadi inti dari prosedur TMA. Metode EMA dan OMA merupakan dua prosedur dalam pengujian modal (*modal testing*) diawali ketika

metode vektor diajukan oleh Kennedy dan Pancu (Kennedy dan Pancu, 1947) untuk memperoleh data respons struktur. Kedua metode ini menjadi prosedur baku yang sekarang cukup mudah digunakan terutama pada perangkat pengolah dan analisis sinyal digital (Ewin, 2000 dan Schwarz and Richardson, 1998).

Penentuan parameter modal struktur dinamik untuk model bangunan multi lantai telah cukup banyak dilakukan, baik dari sisi numerik dan pengujian. Penelitian Gera dan Paul (Gera dan Paul, 2011) dalam proses penentuan parameter modal struktur bangunan dua dan empat lantai dengan model *shear building* dilakukan berdasarkan prosedur numerik. Ueng dkk (Ueng, dkk, 2000) melakukan penelitian untuk kajian modal struktur bangunan tujuh lantai secara numerik dengan menerapkan algoritma Ibrahim *time domain* dan *random decrement* untuk memperoleh parameter modal struktur bersangkutan akibat eksitasi alami

yang bersifat acak. Penelitian oleh Tamura dkk (Tamura, dkk, 2002) mengambil kasus pada bangunan dengan tipe kolom CFT (*concrete filled tube*) yang dianalisis dengan teknik *ambient vibration testing* dan parameter modal struktur diekstrak dengan prosedur *frequency domain decomposition* (FDD).

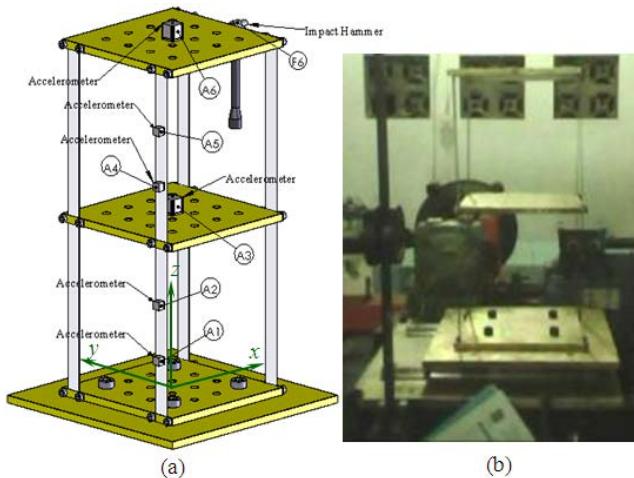
Penelitian ini dilakukan untuk memperoleh suatu basis data identifikasi struktur dinamik. Struktur uji model bangunan dua lantai dipilih untuk proses penentuan parameter modal dengan menerapkan prosedur analisis modal teoritik dan analisis modal eksperimental. Prosedur analisis modal operasional akan diterapkan untuk proses identifikasi *real time* struktur uji dalam tahapan penelitian berikutnya untuk kasus pembebaran acak. Untuk kajian TMA, model struktur uji (*structure under-test* atau SUT) disederhanakan dengan model rangka bidang dimana lantainya didekati dengan model balok Timoshenko. Pendidiskritisasi dilakukan dengan metode elemen hingga sehingga memungkinkan untuk menerapkan analisis modal dalam menemukan penyelesaian masalah nilai dan vektor karakteristik (*eigenvalue problem* atau EVP) pada perangkat lunak MATLAB v6.1.

Kajian eksperimental dilakukan berdasarkan prosedur EMA dengan jenis eksitasi impuls. Fungsi respons frekuensi (FRF) struktur uji diperoleh melalui pengukuran dan pengolahan data respons percepatan terukur dan gaya impuls terukur pada perangkat pengolah sinyal digital Brüel & Kjær. FRF struktur uji ini kemudian digunakan untuk mengidentifikasi parameter modal struktur bersangkutan (frekuensi pribadi, rasio redaman dan modus getar) pada perangkat lunak Pulse Analyzer v6.1. Selain itu, algoritma *half power point* (HPP) dan *rational fraction polynomial* (RFP) digunakan untuk mengekstrak parameter modal struktur uji berdasarkan data respons dan eksitasi tercuplik. Kedua algoritma ini ditulis dalam kode-m MATLAB v6.1.

2. Metode Eksperimen & Fasilitas Yang Digunakan

Pengujian struktur uji dilakukan sepenuhnya dengan menerapkan prosedur EMA dengan teknik SISO. Untuk mendukung proses pengujian digunakan beberapa instrumentasi pengukuran getaran, yaitu *accelerometer* B&K tipe 4507, *impact hammer* B&K 8203 seri 10130 bersama dengan *charge amplifier* Nexus B&K seri 2692, *digital signal analyzer* (DSA) B&K tipe 3065C, komputer berikut dengan perangkat lunak Pulse Analyzer v6.1 sebagai pengolah data respons dan eksitasi terukur. Sensor ditempatkan pada posisi seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 1 dan demikian juga dengan posisi pemberian eksitasi

impuls pada struktur uji.



Gambar 1. Struktur uji (a) visualisasi dimetrik bangunan dua lantai beserta dengan penempatan sensor *accelerometer* dan posisi eksitasi kejut pada struktur, (b) foto struktur uji.

DSA berikut dengan perangkat lunak Pulse Analyzer v6.1 diset untuk memperoleh data respons struktur berdasarkan parameter-parameter yang dinyatakan berikut. Pengujian modal ini dilakukan melalui pengukuran sinyal eksitasi dan respons melalui dua buah kanal (*channel*) DSA. Pengujian modal dilakukan dengan menggunakan resolusi frekuensi 0.0625 Hz atau dengan waktu pencuplikan sebesar 1/16 s. Pemilihan ini ditujukan untuk memperoleh kepresisionan data FRF. Lebar frekuensi (*frequency span*) pengukuran adalah sama dengan lebar frekuensi yang digunakan dalam analisis numerik, yaitu 0–200 Hz.

Dengan penerapan parameter-parameter pengujian modal ini diperoleh FRF struktur uji pada setiap posisi pengukuran. Berdasarkan perangkat lunak Pulse Analyzer v6.1 sendiri dapat diekstrak parameter modal struktur uji, tetapi dalam penelitian ini dilakukan dengan pemindahan algoritma HPP dan RFP pada perangkat lunak MATLAB v6.1. Algoritma HPP dan RFP ini digunakan untuk mengekstrak parameter modal berdasarkan data respons dan eksitasi struktur uji.

Metode HPP merupakan metode sederhana dan cukup praktis digunakan untuk proses identifikasi parameter modal struktur. Metode ini cukup baik diterapkan untuk mengekstrak parameter modal struktur dengan redaman rendah dan memiliki modus yang terpisah atau frekuensi pribadi tidak berdekatan (Ewin, 2000). Dengan demikian, struktur dengan banyak DoF (MDoF) dapat diperlakukan selayaknya sistem satu DoF (SDoF) disekitar frekuensi pribadinya. Dengan kata lain, struktur MDoF dapat dinyatakan sebagai

kombinasi beberapa sistem SDoF.

Berbeda dengan metode HPP, metode RFP merupakan metode analisis modal MDof berdasarkan FRF struktur uji terukur. Metode ini didasari secara matematis melalui penerapan metode kuadrat terkecil (*least square*) dalam meminimalisasi kesalahan pencocokan kurva FRF terukur. Dalam metode ini, FRF struktur uji terukur dapat dimodelkan secara matematis sebagai suatu polinom pecahan rational dengan orde tertentu (Richardson dan Formenti, 1982). Biasanya digunakan orde polinom penyebut lebih tinggi 1 orde dari orde polinom pembilang.

3. Skema Numerik

Kajian TMA model struktur bangunan dua lantai dilakukan melalui penyederhanaan struktur uji menjadi model rangka bidang, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2. Kolom struktur uji diasumsikan memenuhi hipotesa Bernoulli-Navier atau teori Euler-Bernoulli sedangkan lantainya dimodelkan memenuhi teori balok Timoshenko. Pemodelan lantai dengan balok Timoshenko didasari atas kondisi defleksi akibat tegangan geser dan energi kinetik karena pengaruh rotasi penampang menjadi faktor yang cukup penting untuk diberikan dalam proses penghitungan nilai dan vektor karakteristiknya (Petyt, 1990).

Dengan memanfaatkan metode elemen hingga dapat disusun matriks kekakuan dan massa struktur berdasarkan parameter-parameter struktur uji, seperti yang didaftarkan dalam Tabel 1. Berdasarkan matriks kekakuan dan massa struktur dapat disusun persamaan gerak getaran bebas struktur tanpa redaman, yaitu

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{0}, \quad (1)$$

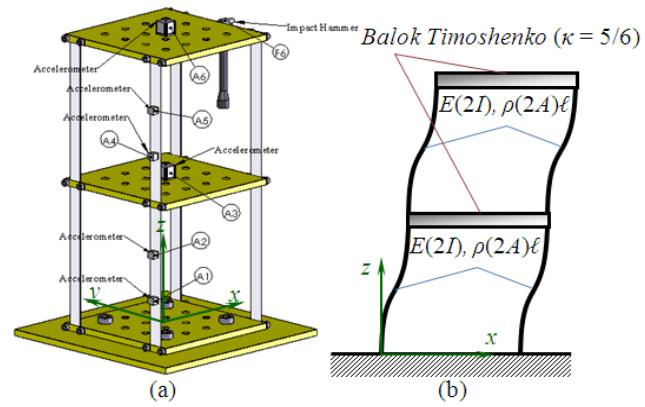
dimana penyelesaian yang memenuhi adalah

$$\mathbf{x} = \mathbf{X}e^{i\omega t}. \quad (2)$$

Substitusikan (2) ke (1) diperoleh

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\mathbf{x} = (\mathbf{K} - \lambda \mathbf{M})\mathbf{x} = \mathbf{0}; \quad \lambda = \omega^2. \quad (3)$$

Persamaan (3) merupakan permasalahan umum nilai dan vektor karakteristik (*generalized EVP*) struktur yang akan dihitung. Untuk penyelesaian EVP struktur uji, dalam penelitian ini dipilih algoritma Arnoldi/Lanczos, invers iterasi dengan teknik *sweeping* dan *deflasi*.



Gambar 2. Struktur uji (a) visualisasi dimetrik, (b) idealisasi struktur uji dengan model rangka bidang.

Tabel 1. Data numerik struktur uji model bangunan dua lantai.

Parameter		Nilai
Kolom	Dimensi	210 mm × 20 mm × 1 mm
	Material	Stainless Steel: $E = 190 \text{ GPa}$, $\rho = 7700 \text{ kg/m}^3$, $\nu = 0.26$
Lantai	Dimensi	200 mm × 200 mm × 10 mm
	Material	AISI 1020: $E = 200 \text{ GPa}$, $\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$, $\nu = 0.29$

Metode Arnoldi/Lanczos merupakan fungsi yang *built-in* (fungsi *eigs*) pada perangkat lunak MATLAB v6.1 cukup mumpuni untuk penghitungan EVP suatu matriks dengan orde skala besar (Petyt, 1990 and Mathworks, 2012). Untuk metode invers iterasi dengan teknik *deflasi* dan *sweeping* dapat digunakan untuk penghitungan EVP untuk sistem dengan DoF yang tidak terlalu besar (< 250) (Petyt, 1990). Untuk teknik *sweeping* sendiri digunakan ortogonalisasi Gram-Schmidt (Bathe, 1976). Algoritma metode invers iterasi yang telah ada ada ditransfer kedalam kode-m MATLAB v6.1. Kemudian, proses simulasi numerik dilakukan dengan menggunakan data numerik struktur uji seperti yang didaftarkan dalam Tabel 1 dan untuk penghitungan EVP diambil modus-modus dengan frekuensi pribadi yang berada dibawah 200 Hz.

4. Hasil dan Pembahasan

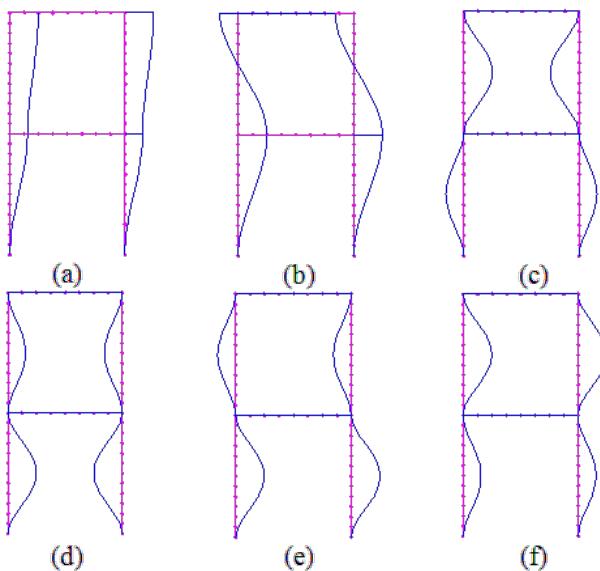
4.1 Simulasi Numerik

Dalam penelitian ini, rangka bidang didiskritasi sebanyak 64 jumlah elemen dengan 186 DoF. Melalui simulasi numerik analisis modal struktur rangka bidang dengan menerapkan metode invers iterasi dan Arnoldi/Lanczos diperoleh enam frekuensi pribadi terendah struktur dalam rentang frekuensi 0–200 Hz, seperti yang ditampilkan dalam Tabel 2. Kedua

prosedur numerik memberikan hasil penghitungan EVP yang cukup mendekati. Ditinjau dari lama proses komputasi diketahui bahwa metode invers iterasi memakan waktu penghitungan 2 kali lebih lama dibandingkan dengan waktu komputasi metode Arnoldi/Lanczos.

Tabel 2. Hasil komputasi EVP enam frekuensi pribadi terendah model bangunan dua lantai dengan model rangka bidang dalam rentang frekuensi 0–200 Hz beserta waktu komputasi (*computational time* atau CT) yang dibutuhkan.

Modus	Frekuensi pribadi (Hz)		
	Arnoldi /Lanczos	Invers Iterasi	
		Deflasi	Sweeping
1	2.200452	2.200454	2.200454
2	5.768876	5.768877	5.768877
3	115.711943	115.711980	115.711980
4	115.760221	115.760221	115.760221
5	115.903876	115.903744	115.903744
6	116.800354	116.800354	116.800354
CT (s)	0.312002	0.624004	0.624004



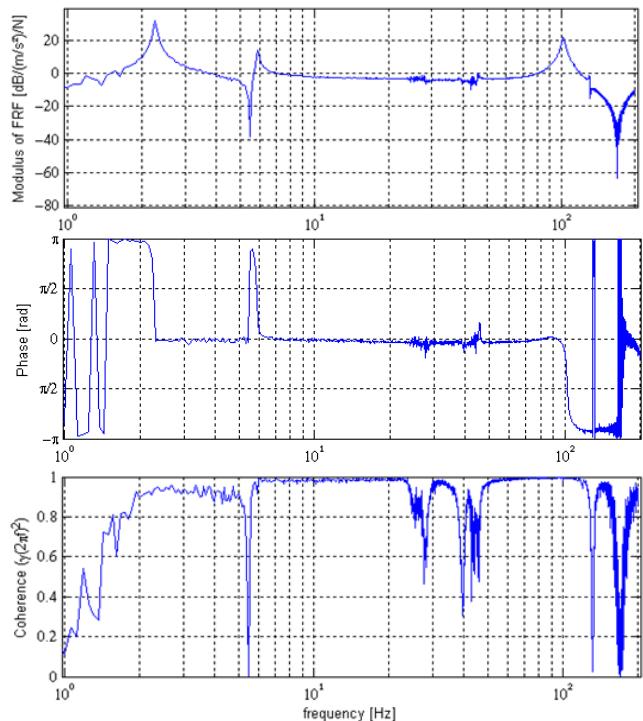
Gambar 3. Modus getar rangka bidang melalui penghitungan numerik (a) modus 1 (2.20 Hz), (b) modus 2 (5.77 Hz), (c) modus 3 (115.71 Hz), (d) modus 4 (115.76 Hz), (e) modus 5 (115.90 Hz) dan (f) modus 6 (116.80 Hz).

Keenam modus getar terendah struktur rangka bidang diperlihatkan oleh Gambar 3. Dua modus getar terendah menunjukkan modus antimetri struktur rangka bidang. Untuk modus tinggi (modus ketiga dan berikutnya) diketahui bahwa bagian kolom struktur uji yang bergetar. Kondisi ini disebabkan oleh elastisitas kolom yang lebih rendah dibandingkan dengan elastisitas lantai. Modus ketiga dan keempat

memperlihatkan kesimetri modus struktur sedangkan sisanya merupakan modus antimetri struktur yang dianalisis. Keempat modus yang dikenali sebagai modus tinggi struktur uji merupakan modus-modus yang berdekatan (*close modes*).

4.2 Eksperimental

Pengujian modal struktur uji dilakukan sesuai dengan posisi eksitasi berikut dengan posisi pecuplikan respons percepatan struktur uji dalam rentang 0–200 Hz, seperti yang dinyatakan dalam Gambar 1. Berdasarkan kurva FRF hasil pengujian ditemukan hanya tiga modus struktur uji ketika sensor *accelerometer* ditempatkan di kolom struktur uji. Dari hasil ini ditemukan dua modus terendah dan satu modus tertinggi (Gambar 4). Untuk posisi *accelerometer* di lantai struktur uji diidentifikasi hanya dua modus. Kedua modus ini adalah dua modus terendah struktur uji, sedangkan modus tertinggi (modus ketiga dst) tidak dapat diidentifikasi (Gambar 5). Kondisi ini bersesuaian dengan simulasi numerik yang telah dilakukan sebelumnya. Dengan teridentifikasinya setiap modus berdasarkan posisi pencuplikan respons dapat diketahui bahwa modus-modus tersebut merupakan modus otentik.



Gambar 4. FRF struktur uji H₅₆ (magnitudo, fasa, dan koherensi).

Melalui keontetikan modus yang teridentifikasi, kemudian dapat ditentukan dua parameter global struktur uji, yaitu frekuensi pribadi dan rasio redaman. Karena sifat global yang dimiliki oleh kedua parameter modal ini mengharuskan nilainya unik.

Nilai unik yang dimaksud adalah nilai tersebut sama untuk setiap posisi pengukuran respons atau posisi pengeksitasian di setiap frekuensi pribadi struktur. Sedangkan parameter modal yang terakhir (modus getar) merupakan sifat lokal dari struktur dan memiliki nilai yang unik juga. Keunikan nilainya adalah berbeda untuk setiap posisi pengukuran pada setiap frekuensi pribadi struktur. Karena, modus getar menggambarkan perpindahan setiap titik pada struktur dan berbeda nilainya pada setiap frekuensi pribadi struktur.

Identifikasi parameter modal (frekuensi pribadi dan rasio redaman)

FRF struktur uji dicuplik dalam rentang frekuensi yang terbatas (0-200 Hz) sehingga proses identifikasi parameter modal dilakukan pada posisi resonansinya (metode HPP) dan dengan membatasi rentang frekuensi disekitar puncak-puncak resonansnya ketika menerapkan metode *curve fitting*. Tujuan penerapan rentang frekuensi tertentu disekitar resonans dengan metode *curve fitting* adalah untuk meminimumkan kesalahan dalam penyesuaian kurva dengan kurva FRF tercuplik. Metode *curve fitting* RFP yang diterapkan dilakukan dengan dua cara, yaitu *curve fitting* SDof dan *curve fitting* MDof.

Penentuan parameter modal struktur uji melalui metode RFP dilakukan dengan memilih orde polinom penyebutnya. Sebagaimana diketahui dalam penerapan *curve fitting* SDof bahwa orde polinom penyebut yang minimal dipilih adalah orde 2. Pemilihan orde yang lebih besar dari 2 juga menjadi pertimbangan karena akan dicari kurva pada rentang frekuensi tertentu yang bersesuaian dengan FRF struktur uji. Setelah melakukan beberapa kali uji-coba, kemudian diperoleh orde polinom penyebut yang cocok untuk melakukan *curve-fitting* SDof, seperti yang didaftarkan pada Tabel 3. Orde polinom penyebut yang cocok lebih besar dari 2 digunakan karena sisanya harus mengkompensasi resonans-resonans yang berada di luar frekuensi *curve-fitting*. Penggunaan orde ini juga diharapkan menghasilkan pencocokan kurva yang bersesuaian dengan kurva FRF yang diperoleh dalam pengujian untuk rentang frekuensi pencocokan kurva.

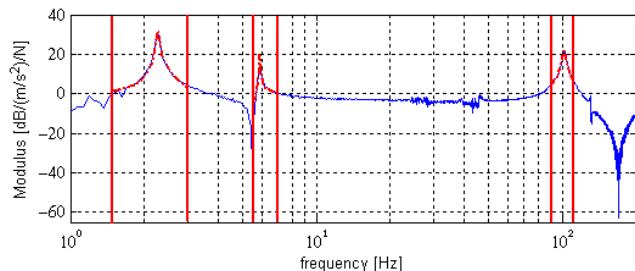
Untuk *curve-fitting* MDof^{*} dilakukan pencocokan kurva untuk dua rentang frekuensi, yaitu disekitar dua modus terendah dan modus tingginya masih dianggap sebagai sistem SDof. Untuk kasus *curve-fitting* MDof dilakukan di ketiga modus FRF struktur uji tercuplik. Pemilihan orde polinom penyebut juga didasari pada mekanisme uji-coba orde polinom yang sesuai dengan kurva FRF tercuplik. Orde polinom penyebut yang digunakan untuk pencocokan kurva pada kasus MDof^{*} dan MDof seperti yang diberikan dalam Tabel 3. Penggunaan orde polinom yang lebih tinggi dari orde

polinom minimal yang dibutuhkan juga digunakan untuk mengkompensasi resonans-resonans di luar frekuensi pencocokan kurva. Kemudian pengaruh keikutsertaan *noise* dalam data FRF terukur juga mempengaruhi pemilihan orde polinom yang digunakan.

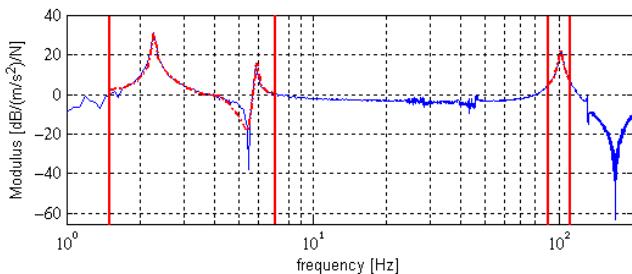
Tabel 3. Orde polinom penyebut fungsi transfer untuk pencocokan kurva FRF struktur uji terukur (orde polinom pembilang $k = m - 1$).

RFP	Modus 1	Modus 2	Modus 3
SDof	1.5-3.0 Hz ($m = 4$)	5.5-7.0 Hz ($m = 4$)	90.0-110.0 Hz ($m = 4$)
MDof [*]		1.5-7.0 Hz ($m = 12$)	90.0-110.0 Hz ($m = 4$)
MDof			1.5-110.0 Hz ($m = 80$)

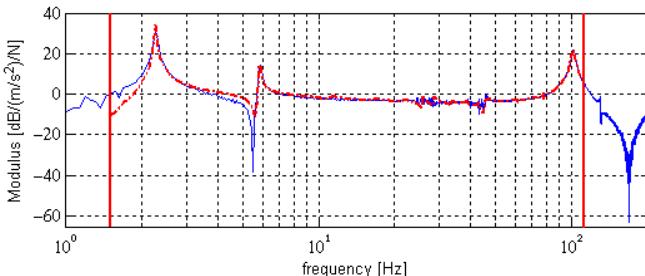
Pencocokan kurva yang dilakukan dengan menggunakan orde polinom penyebut beserta rentang frekuensi disekitar resonans seperti yang diberikan pada Tabel 3 diplotkan pada Gambar 5-7. Pencocokan kurva SDof yang dilakukan menunjukkan kesesuaian kurva hasil *curve-fitting* dengan kurva FRF terukur. Sementara itu untuk pencocokan kurva MDof^{*} dan MDof hampir merepresentasikan kurva FRF struktur uji hasil pengujian. Untuk di daerah disekitar antiresonans pencocokan kurva yang dilakukan gagal untuk mendekati fungsi sesungguhnya dari FRF terukur. Kemungkinan penyebabnya adalah daerah antiresonans memiliki nilai koherensi yang rendah ($\gamma^2 < 0.6$). Karena di daerah bersangkutan menunjukkan ketidak-adaan relasi data FRF. Selain itu kehadiran *noise* di data FRF juga mempersulit pencocokan kurva untuk dilakukan.



Gambar 5. *Curve-fitting* SDof FRF struktur uji untuk rentang frekuensi yang bersesuaian dengan yang diberikan pada Tabel 3.



Gambar 6. Curve-fitting MDoF^{*} FRF struktur uji untuk rentang frekuensi yang bersesuaian dengan yang diberikan pada Tabel 3.



Gambar 7. Curve-fitting MDoF FRF struktur uji untuk rentang frekuensi yang bersesuaian dengan yang diberikan pada Tabel 3.

Berdasarkan pencocokan kurva yang telah dilakukan diperoleh hasil identifikasi parameter modal dengan algoritma *curve-fitting* RFP seperti yang didaftarkan dalam Tabel 4. Demikian halnya dengan hasil identifikasi yang dilakukan dengan menerapkan metode HPP juga diberikan dalam Tabel 4. Kedua metode baik HPP maupun RFP (untuk ketiga teknik *curve-fitting*) memberikan hasil identifikasi frekuensi pribadi yang hampir sama. Jika metode RFP dibandingkan dengan metode HPP untuk frekuensi pribadi maka perbedaan terbesar diberikan oleh MDoF^{*} RFP sebesar 0.96% di modus 1, 0.58% di modus 2 oleh MDoF^{*} RFP dan 1.5% di modus 3 oleh MDoF RFP. Hasil identifikasi rasio redaman struktur uji terdapat penyimpangan yang beragam diantara kedua metode tersebut.

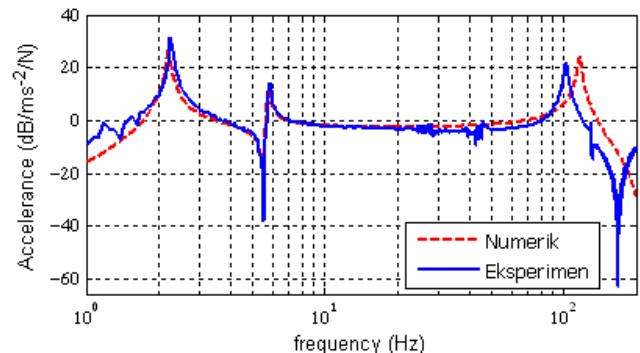
Tabel 4. Hasil identifikasi FRF struktur uji dengan metode HPP dan RFP (f dalam Hz, ζ dalam %).

Modus	HPP	RFP		
		SDoF	MDoF [*]	MDoF
1	f_1	2.2500	2.2706	2.2715
	ζ_1	1.2762	0.3581	0.3328
2	f_2	5.8750	5.8776	5.9091
	ζ_2	1.0939	0.4094	0.9175
3	f_3	102.2500	102.1367	102.1367
	ζ_3	1.4862	1.3564	1.3564
				2.2050

Metode Arnoldi/Lanczos digunakan sebagai acuan untuk melihat perbedaan hasil frekuensi pribadi pengujian dengan simulasi numerik. Persentase perbedaan nilai numerik dengan hasil identifikasi pengujian didaftarkan dalam Tabel 5. Melalui Tabel 5 dapat diketahui bahwa penyimpangan hasil identifikasi dengan hasil penghitungan numerik cukup kecil untuk dua modus terendah model bangunan dua lantai dan penyimpangan terbesar terjadi di modus tingginya.

Tabel 5. Penyimpangan hasil identifikasi frekuensi pribadi struktur uji terhadap hasil numerik (metode Arnoldi/Lanczos).

Modus	HPP	RFP		
		SDoF	MDoF [*]	MDoF
1	2.25%	3.19%	3.23%	2.84%
2	1.84%	1.88%	2.43%	1.23%
3	11.63%	11.73%	11.73%	10.33%



Gambar 8. Perbandingan FRF struktur uji hasil simulasi numerik dan hasil eksperimen.

FRF teoritik dapat disimulasikan ulang dengan melibatkan nilai rasio redaman hasil identifikasi FRF pengujian. Jika FRF teoritik dengan rasio redaman modal hasil identifikasi diplotkan bersamaan dengan FRF hasil pengujian, maka diperoleh perbandingan hasil teoritik dan eksperimental seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 8. Berdasarkan Gambar 8 diketahui bahwa terdapat kesamaan antara hasil pengujian dengan simulasi numerik. Perbedaan yang ditunjukkan oleh modus tinggi disebabkan secara ril struktur uji memiliki massa modal yang cukup tinggi dibandingkan dengan massa modal yang dihitung dengan metode elemen hingga.

Identifikasi modus getar struktur uji

Melalui penghitungan numerik identifikasi struktur dengan kedua metode yang dibahas juga diperoleh residu dan fasa. Residu dan fasa dapat digunakan untuk mensintesis modus getar dari struktur uji berdasarkan keenam titik pengukuran respons. Karena dalam pengujian digunakan teknik SISO sehingga

modus getar yang akan teridentifikasi tidak akan konsisten dalam hal merepresentasikan perpindahan relatif di masing-masing titik pengukuran respons.

5. Kesimpulan

Mereferensi kepada diskusi yang telah disajikan pada bagian sebelumnya, ada beberapa kesimpulan yang dapat ditarik berdasarkan hasil simulasi numerik berikut dengan hasil identifikasi pengujian modal. Hasil simulasi menunjukkan dua modus antimetri struktur uji di dua frekuensi pribadi terendahnya dan kondisi ini divalidasi oleh hasil identifikasi pengujian. Dua frekuensi pribadi terendah struktur uji diidentifikasi dengan hasil yang cukup berdekatan dari kedua sisi, dengan besar penyimpangan $< 4\%$. Frekuensi pribadi modus tinggi struktur uji memiliki penyimpangan yang cukup besar yaitu $> 10\%$. Pergeseran frekuensi pribadi struktur uji di modus tinggi menunjukkan kondisi bahwa ril struktur uji memiliki massa modal yang cukup besar dibandingkan hasil penghitungan numerik. Frekuensi pribadi pengujian mengalami pergeseran ke sisi frekuensi yang lebih rendah dari hasil numerik.

Identifikasi rasio redaman struktur uji secara umum menunjukkan bahwa struktur memiliki redaman rendah, yang dibuktikan dengan nilainya yang berada dibawah 3%. Sementara itu, modus getar struktur uji, cukup sulit ditafsirkan nantinya, karena dalam pengujian ini diterapkan prosedur EMA dengan teknik SISO.

6. Nomenklatur

K	matriks kekakuan struktur
M	matriks massa struktur
x	vektor perpindahan struktur
ẍ	vektor percepatan struktur
f	frekuensi pribadi teredam (Hz)

Greek letters

ω	Frekuensi pribadi circular (rad/s)
λ	Kuadrat frekuensi pribadi circular (rad^2/s^2)
ζ	ratio redaman (%)

Referensi

Bathe, K. J., and Wilson, E. L., 1976, *Numerical Methods in Finite Element Analysis*, Englewood Cliffs, Prentice Hall, New Jersey.

Ewin, D. J., 2000, *Modal Testing: Theory, Practice and Application Second Edition*, Research Studies Press.

Gera, P., and Paul. N., 2011, *Modal Analysis of Plane Frames*, B. Tech. Project Report of Civil Engineering Dept., NIT Rourkela.

Kennedy, C. C., and Pancu, C. D. P., 1947, *Use of Vectors in Vibration Measurement and Analysis*, Journal of the Aeronautical Sciences, 14(11), pp. 603-625.

Mathworks, 2012, *MATLAB® Mathematics R2012a*, The Mathworks Inc, Natick, MA. Diunduh dari http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/MATLAB/math.pdf, pada hari Rabu, 2 Mai 2012, waktu 17:53:12.

Petyt, M., 1990, *Introduction to Finite Element Vibration Analysis*, Cambridge University Press.

Richardson, M. A., and Formenti, D. L., 1982, *Parameter Estimation from Frequency Response Measurements Using Rational Fraction Polynomials*, Proceeding of 1st IMAC Conference, Orlando, FL, pp. 1-15.

Schwarz, B. J., and Richardson, M. H., 1999, *Experimental Modal Analysis*, CSI Reliability Week, Orlando, FL.

Tamura, Y., Zhang, L, Yoshida, A., Cho, K., Nakata, S., and Naito, S., 2002, *Ambient Vibration Testing and Modal Identification of an Office Building*, Proceeding of IMAC-XX, p.141-146.

Ueng, J-M., Lin, C-C, and Lin, P. L., (2000), *System Identification of Torsionally Coupled Buildings*, Journal of Computers and Structures 74. p.667-686.