Terbit *online* pada laman web jurnal : http://inomet.ft.unand.ac.id

INoMeT: Jurnal Inovasi Rekayasa Mekanikal dan Termal

ISSN (Online) 3025-2598

Penyusunan Program Komputasi Pengidentifikasi Parameter Dinamik Balok Ditumpu Jepit-Bebas

Mulyadi Bur[a], *Rika Ampuh Hadiguna*[b]

[a]*Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Andalas, Kampus Universitas Andalas Limau Manis, Padang, 25166, Indonesia*

[b] *Departemen Teknik Industri, Fakultas Teknik Universitas Andalas, Kampus Universitas Andalas Limau Manis, Padang, 25166, Indonesia*

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:
Diterima Redaksi: 04 Desember 2023
Revisi Akhir: 18 Desember 2023
Diterbitkan *Online*: 29 Desember 2023

KATA KUNCI

ibrahim time domain

frekuensi pribadi

redaman struktur

modus normal

KORESPONDENSI

E-mail: mulyadibur@eng.unand.ac.id

A B S T R A C T

Operational Modal Analysis (OMA) is a new procedure to identify a structural vibrating system. In this paper, the operational modal analysis based on Ibrahim Time Domain Method. This method requires some displacement data from free vibration response of structure model. Here, a beam with clamped-free condition is used as a test model. Based on Finite Element Method, this beam is divided into tiga elements that consist of 6 degree of freedoms for each element (3 translations and 3 rotations). In this case, a fixed lumped mass is added to each translation node. The beam is excited in its clamped support by sinusoidal displacement during 0.1 s. After 0.1 s, the excitation is stopped and then the displacement data is recorded. Therefore, this condition could be assumed that recorded data represents free vibration response. For this purpose, some computation program was developed to predict the response of free vibration system. First, we make a program SINUS.FOR to produce a sinus displacement function. This function as a support motion is used as an input for program BALKEN.FOR that consist of various program, like Guyan Condensation, Cholesky Decomposition, Jacobi Method, Matrix Iteration Method, Phase Plane Method, Finite Difference Method, Houbolt Method, etc. This entire program is compiled by FORTRAN programming language. Next, the output of BALKEN.FOR that called matrix [A] become an input of program EIGENWERT-ITD.MW which is written in MAPLE programming languages. In this research, it is assumed that only the displacement of x1(t), x2(t) and x3(t) is known. It is known that to identify a system with 6 degrees of freedom, The Ibrahim Time Domain Method requires 2×6 displacement responses. To fulfill this condition, we need 9 pseudo measurement stations. It means that each station with known displacement response has to be manipulated in such way so that it can produce 3 pseudo displacement response groups. The Result shows that the common error is below 5 %. Except, the damping ratio of mode number 5 is more than 10 %. While the other result can be identified better, especially for the natural frequency is identified very well.

1. PENDAHULUAN

Pada penelitian ini akan dilakukan identifikasi parameter dinamik struktur secara simulasi dengan model uji balok jepit-bebas yang mengandung tiga massa tambahan. Teknik identifikasi yang dilakukan berdasarkan pada Metode Ibrahim Selang Waktu dengan menggunakan prosedur *Operational Modal Analysis*. *Ibrahim Time Domain* pertama kali

https://doi.org/10.25077/xxxxx

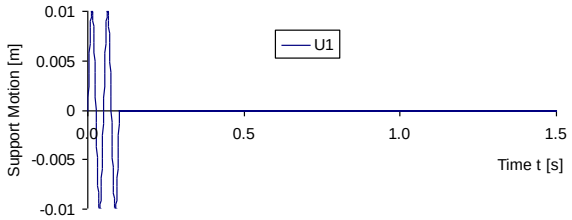
Attribution-NonCommercial 4.0 International. Some rights reserved

dipublikasikan oleh Ibrahim (Ibrahim, 1973) kemudian dilanjutkan dengan beberapa publikasi berikutnya (Ibrahim, 1976), (Ibrahim, 1977) dan (Ibrahim, 1983).Sementara itu *OMA* merupakan pengembangan *Modal Analysis* yang sudah ada sejak tahun 80-an. Beberapa peneliti *Modal Analysis* yang dirujuk karyanya untuk penelitian ini dapat disebutkan seperti (Zaghlool, 1980), (Schenk, 1989), (Schenk, 1989), sedangkan hasil penelitian *OMA* dirujuk dari (Batel, 2002).

Berdasarkan teori yang telah dikembangkan oleh para peneliti tersebut disusun beberapa program komputasi untuk pengidentifikasian parameter dinamik dengan struktur model balok jepit-bebas dengan jumlah data input lebih sedikit dari jumlah derajat kebebasan model uji. Laporan penelitian ini merupakan langkah awal dari penelitian selanjutnya, dan difokuskan untuk mengembangkan program komputasi yang kemudian diimplementasikan pada kondisi sesungguhnya (*existing condition*).

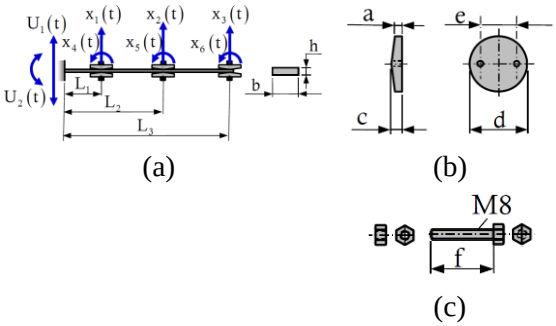
2. METODOLOGI

Penelitian ini dimulai dari studi literatur serta mereview kembali koleksi program komputasi yang pernah disusun. Kemudian secara bertahap disusun dan dirakit program komputasi yang dibutuhkan untuk penelitian ini. Mulai dari program komputasi SINUS untuk membuat data perpindahan translasi tumpuan $u_1(t)$, sedangkan perpindahan rotasi tumpuan $u_2(t)$ tidak ada. Bentuk perpindahan translasinya dihasilkan oleh persamaan $u_1(t)=A\cdot\sin(\Omega\cdot t)$, dimana A menyatakan amplitudo dan dipilih sebesar 10 mm, sedangkan $\Omega=2\cdot\pi\cdot f$. Fungsi gangguan $u_1(t)=A\cdot\sin(\Omega\cdot t)$ berlangsung selama 0.1 detik, sisa waktunya sampai dengan 1.5 detik, tidak ada gangguan atau dengan kata lain mulai dari t=0.1 detik sampai 1.5 detik, amplitudo A dibuat nol. Secara ringkas luaran program SINUS dapat dilihat pada Gambar 1. Luaran program SINUS tidak saja dalam bentuk grafik tetapi juga dalam bentuk data diskrit yang nantinya digunakan sebagai data input pada program BALOK.



Gambar 1. Gangguan Simpangan u_1 Dalam Satuan m Pada Tumpuan Dalam Selang Waktu [s]

Program BALOK disusun atas beberapa program komputasi yang dapat menghasilkan data respon (simpangan, kecepatan, dan percepatan dari balok uji. Balok uji yang dimaksud adalah balok yang ditumpu jepit-bebas, seperti terlihat pada Gambar 2. Rancangan data fisik balok ditetapkan sebagai berikut; L_1=199 mm, L_2 = 406 mm, L_3 = 594 mm, sedangkan penampang balok dipilih dengan dimensi b=20 mm dan h=6 m.



(a) (b) (c)

Gambar 2. (a) Balok Uji Dengan Massa Tambahan (b) Massa Tambahan (c) Baut dan Mur Pengikat

Material balok dipilih material baja dengan modulus elastisitas E=210 GPa dan massa jenis ρ=7850 kg/m^3. Input gangguan yang diberikan pada program BALOK merupakan output dari program SINUS. Untuk penyederhanaan gangguan yang diberikan hanya dalam bentuk simpangan $u_1(t)$, sedangkan simpangan dalam bentuk rotasi $u_2(t)$ tidak diberikan yang secara matematis dibuat $u_2(t)=0$. Pada program BALOK telah disiapkan Metode Elemen Hingga sederhana untuk membagi balok menjadi tiga elemen yang berarti memiliki 6 derajat kebebasan yaitu $x_1(t)$ s.d. $x_6(t)$. Melalui metode ini disusun matriks massa dan matriks kekakuan elemen. Selanjutnya ditambahkan massa terpusat seperti diperlihatkan pada Gambar 2b dan baut serta mur (Gambar 2c). Selanjutnya disusun

 https://doi.org/10.25077/xxxxx

matriks kekakuan elemen. Dalam kasus balok, sumbu elemen dan sumbu struktur berimpit, sehingga tidak diperlukan matriks transformasi. Dalam beberapa kasus baik matriks massa maupun matriks kekakuan tidak selalu simetri. Oleh karena itu perlu dilakukan upaya agar kedua matriks tersebut dipastikan simetri. Untuk itu penyusunan matriks massa dan matriks kekakuan dilakukan melalui cara penguraian Cholesky (*Cholesky Decomposition*). Teknik ini menggunakan cara penguraian melalui matriks segitiga atas dan matriks segitiga bawah. Melalui cara ini dapat dijamin bahwa matriks massa dan matriks kekakuan merupakan matriks simetri yang menjadi syarat dalam analisis Modal.

Dengan menggunakan *subroutine* MODAL yang ada di dalam program BALOK, dapat diperoleh parameter dinamik seperti frekuensi pribadi, rasio redaman dan modus getar. Luaran dalam bentuk parameter dinamik ini yang nantinya sebagai acuan dengan parameter dinamik yang dihasilkan melalui program Ibrahim dalam selang waktu (*Ibrahim Time Domain*). Kadang kala, dalam praktek tidak semua derajat kebebasan dapat didefinisikan dengan baik atau bisa juga karena alasan tidak terlalu *significant*-nya pengaruh dari sejumlah derajat kebebasan dalam menentukan respon struktur. Dalam hal ini, derajat kebebasan yang tidak terlalu berpengaruh tersebut dapat dikondensasi. Salah satu metode kondensasi yang cukup dikenal adalah teknik kondensasi Guyan (*Guyan Condensation*). Cara kondensasi tersebut juga sudah dilengkapi dalam bentuk *subroutine* dalam program BALOK. Selanjutnya di dalam program BALOK juga telah tersedia sejumlah *subroutine* untuk menghitung respon struktur, seperti Metode Beda Hingga, Metode Houbolt, Metode Newmark-β, Metode Wilson-θ, Metode Runge-Kutta, dan Metode Bidang Fasa. Khusus Metode Bidang Fasa untuk sistem dengan banyak derajat kebebasan harus melalui analisis modal, sedangkan metode lainnya dapat melalui analisis modal atau melalui metode integrasi langsung. Peneliti dapat memilih salah satu dari metode yang ditawarkan, tetapi perlu diingat, masing-masing metode memiliki kelebihan dan keterbatasannya, seperti Metode Beda Hingga dan Metode Houbolt merupakan metode yang stabil bersyarat, sedangkan Metode Newmark-β tergantung kepada pemilihan konstanta α dan β, demikian juga dengan Metode Wilson-θ yang tergantung kepada besar konstanta θ yang dipilih. Selanjutnya Metode Runge-Kutta membutuhkan waktu yang lebih lama karena setiap selang waktu Δt memerlukan empat langkah penghitungan, meskipun metode ini dapat memilih selang waktu yang optimal secara otomatis. Seperti disebutkan sebelumnya bahwa Metode Bidang Fasa hanya bisa untuk sistem satu derajat kebebasan, maka untuk sistem banyak derajat kebebasan dapat dilakukan melalui modal analisis.

Melalui input gangguan seperti terlihat pada Gambar 1, maka respon semua derajat kebebasan dapat dihitung dengan menggunakan salah satu dari berbagai program yang tersedia di program BALOK, dalam hal ini dipakai Metode Bidang Fasa. Respon simpangan dari 3 koordinat yang akan menjadi input program IBRAHIM-ITD diperlihatkan pada Gambar 2. Perlu dicatat bahwa data gangguan yang menjadi input program IBRAHIM tidaklah respon seluruh selang waktu melainkan respon mulai dari saat gangguan hilang yaitu respon setelah 0.1 detik sampai dengan 1.5 detik. Hal ini menunjukan bahwa program IBRAHIM-ITD menggunakan respon getaran bebas. Jika diasumsikan terdapat 500 data dalam kurun waktu 0.1 sampai dengan 1,5 maka diperkirakan besar selang waktu pencuplikan sebesar 1.4/500 sama dengan 0.0028 detik. Selanjutnya diasumsikan bahwa hanya 3 respon translasi yang diketahui (pada kondisi lapangan hanya tiga rekaman data yang dimiliki) yaitu $x_1(t)$, $x_2(t)$ dan $x_3(t)$, sedangkan 3 respon rotasi $x_4(t)$, $x_5(t)$, dan $x_6(t)$ tidak diketahui (pada kondisi lapangan bisa jadi karena kesulitan perekaman data). Sesuai dengan uraian pada Bab II, ketiga respon perpindahan $x_1(t)$, $x_2(t)$ dan $x_3(t)$ merupakan input pada program IBRAHIM-ITD, sedangkan outputnya berupa matrik [A].

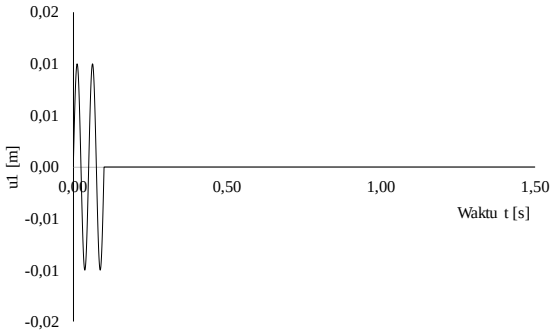
Ketiga program beserta *subroutine* yang telah dijelaskan sebelumnya disusun dengan menggunakan bahasa pemrograman FORTRAN. Selanjutnya satu program lagi yang akan digunakan untuk membaca matriks [A] dan akan memberikan

luaran dalam bentuk besaran parameter dinamik dari struktur. Program terakhir ini yang bernama program EIGENVALUE disusun dengan menggunakan bahasa pemrograman MAPLE. Parameter dinamik luaran program EIGENVALUE akan dibandingkan dengan parameter dinamik yang dihasilkan oleh *subroutine* MODAL yang terdapat di dalam program BALOK.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

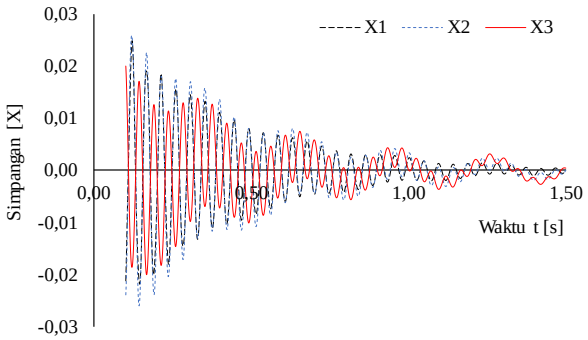
Simulasi numerik dilakukan untuk menguji dan mengukur ketelitian metode ITD dalam menentukan parameter dinamik balok uji. Balok uji yang dimaksud adalah balok yang ditumpu jepit-bebas, seperti terlihat pada Gambar 2a. Rancangan data fisik balok ditetapkan sebagai berikut; L1=199 mm, L2 = 406 mm, L3 = 594 mm, sedangkan penampang balok dipilih dengan dimensi b=20 mm dan h=6 m. Material balok dipilih material baja dengan modulus elastisitas E=210 GPa dan massa jenis ρ=7850 kg/m^3. Input gangguan yang diberikan pada program BALOK merupakan output dari program SINUS. Untuk penyederhanaan gangguan yang diberikan hanya dalam bentuk simpangan $u_1(t)$, sedangkan simpangan dalam bentuk rotasi $u_2(t)$ tidak diberikan yang secara matematis di dalam program SINUS dibuat $u_2(t)=0$.

Untuk penyederhanaan, eksitasi dipilih hanya dalam bentuk perpindahan sinusoidal. Eksitasi dilakukan dalam 0,1 detik dan kemudian dihentikan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Selanjutnya, frekuensi eksitasi adalah 20 Hz yang mendekati frekuensi natural kedua struktur (21,5 Hz), dan rasio redaman diasumsikan sama untuk semua mode bentuk, yaitu 2,0%.



Gambar 3. Gangguan Translasi pada Tumpuan $u_1(t)$

Melalui input gangguan seperti terlihat pada Gambar 1, maka respon semua derajat kebebasan yang diperlihatkan pada Gambar 2a dapat dihitung. Luaran ini akan menjadi input untuk program IBRAHIM-ITD. Perlu dicatat bahwa data gangguan yang menjadi input program IBRAHIM tidaklah respon seluruh selang waktu melainkan respon mulai dari saat gangguan hilang yaitu respon setelah 0.1 detik sampai dengan 1.5 detik. Hal ini menunjukan bahwa program IBRAHIM-ITD menggunakan respon getaran bebas. Jika diasumsikan terdapat 500 data dalam kurun waktu 0.1 sampai dengan 1,5 maka diperkirakan besar selang waktu pencuplikan sebesar 1.4/500 sama dengan 0.0028 detik. Selanjutnya diasumsikan bahwa hanya 3 respon translasi yang diketahui, dimana (pada kondisi lapangan hanya 3 rekaman data yang dimiliki) yaitu $x_1(t)$, $x_2(t)$ dan $x_3(t)$, seperti terlihat pada Gambar 4. Sementara itu 3 respon rotasi $x_4(t)$, $x_5(t)$, dan $x_6(t)$ tidak diketahui, karena kesulitan perekaman data saat di lapangan. Sesuai dengan uraian pada Bab II, ketiga respon perpindahan $x_1(t)$, $x_2(t)$ dan $x_3(t)$ merupakan input pada program IBRAHIM-ITD, sedangkan outputnya berupa matrik [A].



Gambar 4. Respon Simpangan dalam Selang Waktu pada Koordinat 1, 2 dan 3 (X1, X2, X3)

Untuk menentukan parameter dinamik dari model uji, diperlukan program berikutnya yang akan digunakan untuk membaca matriks [A] dan memberikan luaran dalam bentuk besaran parameter dinamik dari struktur. Program terakhir dalam simulasi ini adalah program EIGENVALUE yang disusun dengan menggunakan bahasa pemrograman MAPLE. Parameter dinamik luaran program EIGENVALUE akan dibandingkan

 https://doi.org/10.25077/xxxxx

dengan parameter dinamik yang dihasilkan oleh *subroutine* MODAL yang merupakan *subroutine* di dalam program BALOK.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Pada penelitian ini telah disusun sebuah program komputasi untuk mengidentifikasi model struktur dengan menggunakan analisis modal operasional. Program tersebut menggunakan empat program utama dan beberapa kelompok *subroutine*. Program utama terdiri dari program SINUS untuk menghasilkan gaya eksitasi, program BALOK untuk menghitung respon struktur termasuk analisis modal, program IBRAHIM-ITD untuk menghasilkan matriks [A], program EIGENVALUE untuk menyelesaikan masalah nilai eigen yang kompleks dari matriks [A]. Dari hasil output simulasi, disimpulkan bahwa;

1. Secara umum, program komputasi yang telah disusun memiliki hasil yang baik, ini terlihat dari kesalahan yang diperoleh sebagian besar di bawah 5%, meskipun dalam beberapa kasus lebih besar dari 10%.
2. Jumlah derajat kebebasan yang dapat diidentifikasi adalah setengah dari jumlah total data perpindahan yang ada termasuk data semu dan stasiun semu tidak memiliki pengaruh dalam menentukan jumlah komponen modus normal.
3. Redaman modal sangat sensitif untuk diidentifikasi dibandingkan dengan frekuensi natural, khususnya untuk bentuk modus nomor 5 (*Mode Shape 5*).

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Dekan Fakultas Teknik Universitas Andalas yang telah memberikan bantuan beasiswa untuk dapat mengikuti pendidikan di PS PPI Unand..

DAFTAR PUSTAKA

[1] Batel, M.,"Operational Modal Analysis-Another Way of Doing Modal Testing", *Sound and Vibration*, 2002, pp. 22-27.

[2] Ibrahim, S.R. and Mikulcik, E.C., "A Time Domain Modal Vibration Test Technique", *Shock and Vibration Bulletin*, Bulletin 43, Part 4, June 1973.

[3] Ibrahim, S.R. and Mikulcik, E.C., "The Experimental Determination of Vibration Parameters from Time Responses", *Shock and Vibration Bulletin*, Bulletin 46, Part 5, August 1976.

[4] Ibrahim, S.R. and Mikulcik, E.C., "A Method for Direct Identification of Vibration Parameters from The Free Response", *Shock and Vibration Bulletin*, Bulletin 47, Part 4, September 1977.

[5] Ibrahim, S.R., "Computation of Normal Modes from Identified Complex Mode", *AIAA Journal*, Vol. 21, No. 3, March 1983, pp. 446-451.

[6] Maia, N.M.M. et all, "Theoretical and Experimental Modal Analysis", *Research Studies Press LTD.*, Baldock, 1998.

[7] Mohanty, P. and Rixen, R.J., "Modified SSTD Method to Account for Harmonic Excitations During Operational Modal Analysis, *Mechanism and Machine Theory* 39, 2004, pp. 1247-1255.

[8] Mohanty, P. and Rixen, D.J., "A Modified Ibrahim Time Domain Algorithm for Operational Modal Analysis Including Harmonic Excitation", *Journal of Sound and Vibration* 275, 2004, pp. 375-390.

[9] Mohanty, P., "Operational Modal Analysis in The Presence of Harmonic Excitations", *Dissertation*, TU-Delft, 2005.

[10] Schenk, A., "Die modale Identifikation bei unbekannter stationärer Zufallserregung", *Z. Flugwiss. Weltraumforsch.*, No. 15, 1991, pp. 300-310.

[11] Schenk, A., "Durchführbarkeitsstudie über den kombinierten Einsatz der Random-Decrement-Methode mit dem Zeitbereichsverfahren bei Flugschwingversuchen mit Luftturbulenzerregung, *MBB-Bericht*, 11. Juli 1989.

[12] Zaghlool, S.A., "Single-Station Time Domain (SSTD) Vibration Testing Technique: Theory and Application", *Journal of Sound and Vibration* 72, 1980, pp. 205-234.

Terbit *online* pada laman web jurnal : http://inomet.ft.unand.ac.id

INoMeT: Jurnal Inovasi Rekayasa Mekanikal dan Termal

ISSN (Online) 3025-2598

NOMENKLATUR

x(t)	simpangan
u(t)	gangguan simpangan
λ	eigen value
$\omega_{n,j}$	frekuensi pribadi tanpa redaman
$\omega_{d,j}$	frekuensi pribadi dengan redaman
ζ_j	rasio redaman
$[A]$	matriks eigen value problem
$[m]$	matriks massa
$[k]$	matriks kekakuan
$[\Lambda]$	matriks eigen value
$[U]$	matriks respon simpangan
$[\phi]$	eigen vector

https://doi.org/10.25077/xxxxx
Attribution-NonCommercial 4.0 International. Some rights reserved

Terbit *online* pada laman web jurnal : http://inomet.ft.unand.ac.id

INoMeT: Jurnal Inovasi Rekayasa Mekanikal dan Termal

ISSN (Online) 3025-2598

LAMPIRAN

Tabel Penyimpangan hasil identifikasi (% error)

	Original Data	Ibrahim Time Domain Identification		Error (%)
Mode Shape: 1				
$f_{n,1}$	3.29 Hz	3.315938298 Hz		0.8
ζ_1	2.0 %	2.090146847 %		4.5
	Normal Mode	Normal Mode	Normal Mode	
Φ_1	0.099 0.347 0.627 0.919 1.406 1.524	0.099 0.345 0.630	-7.124614011 -24.80202473 -45.34383612	0.0 0.6 0.5
Mode Shape: 2				
$f_{n,2}$	21.53 Hz	21.47579931 Hz		0.2
ζ_2	2.0 %	2.012497483 %		0.6
	Normal Mode	Normal Mode	Normal Mode	
Φ_2	-0.409 -0.460 0.338 -2.356 2.370 5.241	-0.409 -0.459 0.338	32.18492481 36.13796347 -26.56194788	0.0 0.2 0.0
Mode Shape: 3				
$f_{n,3}$	55.87 Hz	55.68557873 Hz		0.3
ζ_3	2.0 %	2.319858795 %		16.0
	Normal Mode	Normal Mode	Normal Mode	
Φ_3	0.569 -0.390 0.136 -0.592 -2.713 6.082	0.569 -0.391 0.137	-35.49926703 24.40606783 -8.554424171	0.0 0.2 0.7

https://doi.org/10.25077/xxxxx
Attribution-NonCommercial 4.0 International. Some rights reserved

Tabel Penyimpangan hasil identifikasi (% error) (*lanjutan*)

Mode Shape: 4				
$f_{n,4}$	166.10 Hz	176.9748221 Hz		6.5
ζ_4	2.0 %	2.105217077 %		5.2
	Normal Mode	Normal Mode	Normal Mode	
Φ_4	-0.102 0.119 -0.041 7.462 -14.297 23.622	-0.102 0.131 -0.045	-.6329126665 0.8129451385 -.2787747047	0.0 10.1 9.8
Mode Shape: 5				
$f_{n,5}$	239.54 Hz	238.8173533 Hz		0.3
ζ_5	2.0 %	4.131640854 %		106.5
	Normal Mode	Normal Mode	Normal Mode	
Φ_5	0.035 0.135 -0.076 -22.568 10.432 14.345	0.035 0.148 -0.079	0.2444761782 1.032743886 -.5535811420	0.0 9.6 3.9
Mode Shape: 6				
$f_{n,6}$	303.82 Hz	300.3638848 Hz		1.1
ζ_6	2.0 %	1.957096242 %		2.1
	Normal Mode	Normal Mode	Normal Mode	
Φ_6	-0.048 0.001 0.067 -16.788 -23.136 -9.727	-0.048 -0.003 0.068	-.5162595629 -0.02740516972 0.7348450694	0.0 200* 1.5

 https://doi.org/10.25077/xxxxx