

## Kaji Numerik Penerapan Metode *Random Decrement* dan *Ibrahim Time Domain* Untuk Identifikasi Struktur yang Diganggu Secara Acak

### Numerical Study of Applying Ibrahim Time Domain and Random Decrement Method on Structural Identification under Random Excitation

Mulyadi Bur, Meifal Rusli, Adriyan, dan Lovely Son

Laboratorium Dinamika Struktur, Teknik Mesin Universitas Andalas  
Kampus Unand Limau Manis, Padang, 25163  
E-mail: mulyadibur@ft.unand.ac.id

#### Abstrak

Makalah ini membahas tentang teknik identifikasi dua tingkat yang digunakan untuk identifikasi struktur yang diganggu secara acak. Metode yang diusulkan merupakan penggabungan metode *random decrement* (RD) dan Ibrahim *time domain* (ITD). Pada teknik identifikasi ini, metode RD diterapkan untuk menghasilkan fungsi RD melalui teknik *triggering* yang dalam hal ini digunakan teknik *triggering* jenis *level crossing* ( $T^L$ ) dan *positive points* ( $T^P$ ). Fungsi RD yang dihasilkan ekivalen dengan fungsi korelasi respons atau respons getaran bebas struktur.

Untuk melihat keefektifan metode yang diusulkan, disusun sebuah program simulasi dengan menggunakan bahasa pemograman MATLAB yang kelak dapat digunakan untuk mengidentifikasi struktur dengan data eksperimental atau data yang berasal dari lapangan. Dalam uji coba program dipilih model bangunan dua lantai dengan redaman modal yang bervariasi untuk setiap modusnya. Model tersebut diganggu secara acak pada tumpuannya dengan gangguan jenis *white noise*.

Berdasarkan hasil simulasi dapat dilihat bahwa semua parameter dinamik struktur dapat ditemukan kembali dengan baik. Secara rinci dapat dilihat bahwa *triggering*  $T^P$  menghasilkan kualitas hasil identifikasi dengan metode ITD yang lebih baik dibandingkan dengan *triggering*  $T^L$ . Hal ini dapat diketahui dari penyimpangan hasil identifikasi frekuensi pribadi melalui *triggering*  $T^P$  dibandingkan dengan *triggering*  $T^L$ . Penyimpangan identifikasi rasio redaman untuk *triggering*  $T^P$  berada dibawah 1%, sedangkan *triggering*  $T^L$  sekitar 5%. Demikian juga untuk identifikasi modus getar normal dengan teknik *triggering*  $T^P$  menunjukkan hasil yang lebih baik. Meskipun demikian, waktu penghitungan fungsi RD melalui *triggering*  $T^P$  bisa mencapai 10 kali lebih besar dibandingkan melalui *triggering*  $T^L$ .

**Keywords:** Identifikasi, RD, ITD, *triggering*  $T^P$  dan *triggering*  $T^L$ .

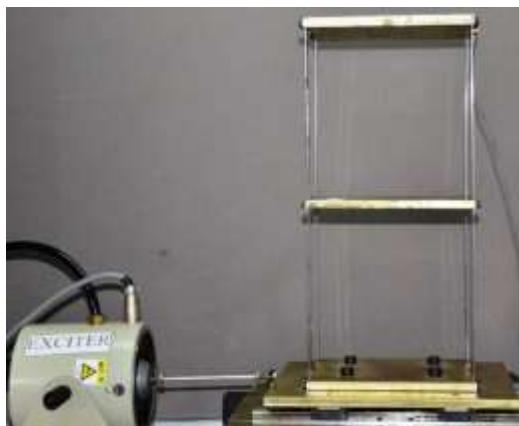
#### Pendahuluan

Metode *Ibrahim Time Domain* (ITD) awalnya ditujukan untuk identifikasi modal parameter melalui respon struktur getaran bebas. Sebuah paket program berdasarkan ITD sudah pernah dibangun untuk identifikasi struktur balok dengan 3 massa terpusat (Bur, 2006). Pada waktu itu data respon yang digunakan masih data respons getaran bebas. Dalam penelitian ini proses identifikasi struktur akan dilakukan terhadap struktur yang dieksitasi oleh beban acak. Untuk mencapai tujuan tersebut disusun sebuah paket program dengan teknik identifikasi dua tingkat; tingkat pertama digunakan metode *random decrement* atau disingkat RD (Cole, 1968) dan tingkat kedua digunakan metode Ibrahim *time domain* atau

disingkat ITD (Ibrahim, 1972). Pada teknik ini, metode RD diterapkan untuk menghasilkan fungsi RD melalui teknik *triggering* yang ekivalen dengan fungsi korelasi respons atau respons getaran bebas struktur yang kemudian diidentifikasi melalui metode ITD.

Penelitian ini ditujukan untuk pengembangan suatu paket program identifikasi struktur akibat eksitasi acak yang berbasiskan pada metode RD dan ITD. Bahasa pemograman yang dipilih adalah bahasa pemograman MATLAB R2012a (Mathworks, 2012) dengan menggunakan fitur antarmuka grafis. Perangkat lunak ini inianinya dapat digunakan oleh para insinyur di lapangan untuk kegiatan *monitoring* kondisi struktur yang sedang beroperasi.

Kemampuan paket program identifikasi yang telah dikembangkan diuji untuk berbagai kondisi melalui kajian numerik. Dalam pengujiannya dipilih model bangunan dua lantai sebagai model untuk pengujian, seperti diperlihatkan pada **Gambar 1**.



**Gambar 1** Model bangunan dua lantai.

### Metode Identifikasi Struktur Ranah Waktu

#### Metode *random decrement*

Metode RD diperkenalkan pertama kali oleh Cole diakhir dekade 1960-an yangdigunakan untuk mengubah respons getaran paksa acak menjadi fungsi RD melalui teknik *triggering*(Cole, 1968). Penerapan *triggering* dalam metode RD dilakukan dengan mencuplik respons pada rentang waktu tertentu. Awal proses *triggering* ditentukan oleh besar *Root Mean Square* (RMS) respons dan segmen waktu (*time segment*) yang dipilih. Segmen waktu ini biasanya dipilih cukup kecil dibandingkan dengan rentang pencuplikan respons dan ditetapkan sama untuk semua proses *triggering*. Fungsi RD yang diperoleh merupakan harga rata-rata respon dari semua respon dalam segmen waktu yang didefinisikan secara matematis (Asmussen, 1997),

$$D_{xx}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \left\{ x(t_i + \tau) \Big|_{T(x)} \right\}, \quad (1)$$

dimana  $D_{xx}(\tau)$  menyatakan fungsi RD langsung, sedangkan fungsi RD silang dapat dituliskan sebagai (Asmussen, 1997)

$$D_{xy}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \left\{ x(t_i + \tau) \Big|_{T(y)} \right\}, \quad (2)$$

dengan  $\tau$  merupakan segmen waktu,  $N$  adalah jumlah segmen,  $T(x)$  merupakan acuan proses *triggering* respons berdasarkan respons  $x(t)$ , dan  $T(y)$  merupakan kondisi acuan *triggering* respons berdasarkan respons lain  $y(t)$ . Fungsi

RD yang ditunjukkan oleh persamaan (1) dan (2) merupakan fungsi korelasi dari respons dan ekivalen dengan respons getaran bebas struktur.

Ada beberapa kondisi *triggering* dalam metode RD. Untuk penelitian ini digunakan kondisi *triggering* jenis *levelcrossing* ( $T^L$ ) dan *positivepoints* ( $T^P$ ). *Level crossing triggering* ( $T^L$ ) dapat dinyatakan sebagai

$$T^L(x(t)) = c \cdot \sigma_{x(t)}; \quad 0 < c \leq \infty, \quad (3)$$

yang merupakan nilai dari RMS respons dan  $c$  merupakan suatu konstanta yang bernilai besar dari nol. Nilai optimum  $T^L$  dipenuhi oleh  $c = \sqrt{2}$  (Asmussen, 1997). Selanjutnya *positive points triggering* ( $T^P$ ) merupakan kondisi *triggering* untuk seluruh titik-titik pencuplikan respons yang berada diatas garis nol (*zero value*).

#### Metode Ibrahim *time domain*

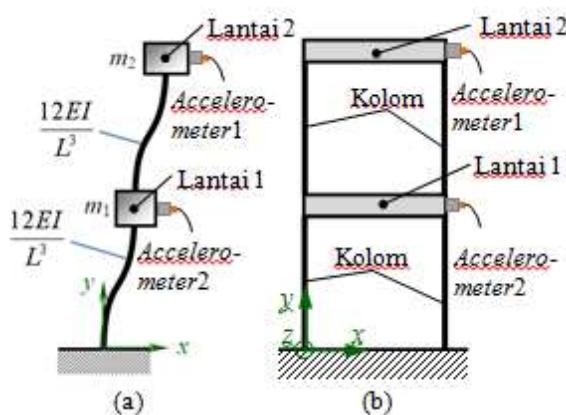
Metode ITD merupakan metode identifikasi ranah waktu berdasarkan data respons getaran bebas struktur yang diperkenalkan oleh Ibrahim (Ibrahim, 1972). Awalnya metode ini digunakan untuk identifikasi struktur melalui penggunaan data respons simpangan. Ibrahim kemudian melakukan pengembangan metodenya agar data respons kecepatan dan percepatan dapat digunakan secara langsung untuk proses identifikasi(Ibrahim, 1976 dan 1977).

Beberapa usaha untuk interpretasi modus getar kompleks hasil identifikasi ke dalam modus getar normal telah dilakukan oleh Ibrahim diantaranya dengan menerapkan teknik modus normal pendekatan. Teknik ini diterapkan dengan memberikan batasan nilai sudut fasa modus getar kompleks agar menjadi  $0^\circ$  atau  $180^\circ$  seperti halnya modus getar normal (Ibrahim, 1982). Namun Ibrahim telah mengungkapkan bahwa teknik ini menghasilkan kesalahan yang cukup tinggi dalam estimasi modus getar normal.

Untuk menghindari kesalahan dalam interpretasi modus getar kompleks telah dikembangkan paket program identifikasi berdasarkan metode Niedbal. Metode Niedbal ditujukan untuk memperoleh modus getar normal dari modus getar kompleks dengan menggunakan suatu transformasi linier kompleks (Niedbal, 1984). Jika  $\Psi$  adalah modus getar kompleks dan  $\mathbf{T}$  merupakan matriks transformasi linier kompleks, maka modus getar normal  $\Phi$  merupakan perkalian matriks transformasi linier  $\mathbf{T}$  dengan matriks modus getar kompleks  $\Psi$ . Untuk kasus ini  $\Phi$  merupakan matriks dengan bilangan ril, sedangkan  $\mathbf{T}$  dan  $\Psi$  merupakan matriks dengan bilangan kompleks

## Skema Numerik

Untuk keperluan proses identifikasi, respons struktur dihasilkan terlebih dahulu melalui penerapan analisis respons untuk eksitasi jenis *white noise* yang bekerja pada tumpuan struktur. Analisis respons dihitung berdasarkan analisis modal dan metode Wilson- $\Theta$ . Analisis modal struktur uji dilakukan dengan mengacu pada struktur bangunan dua lantai dalam **Gambar 2** yang diidealisasikan menjadi dua model. Idealisasi untuk model 1 adalah sistem massa terpusat 2 derajat kebebasan (*degree of freedom* atau DoF) dan model 2 berupa struktur rangka bidang. Model kedua didiskritasi ke dalam elemen hingga rangka bidang linier untuk 216 DoF. Hasil penghitungan bilangan pribadi kedua model (*eigenvalue problem* atau EVP) ini didaftarkan dalam **Tabel 1**. Khusus untuk model kedua hanya dihitung hingga modus keenam struktur.



**Gambar 2.** Idealisasi model bangunan dua lantai (a) model 2 DoF atau model 1 dan (b) model rangka bidang atau model 2.

**Tabel 1.** Frekuensi pribadi terendah [Hz] model 1 dan model 2.

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

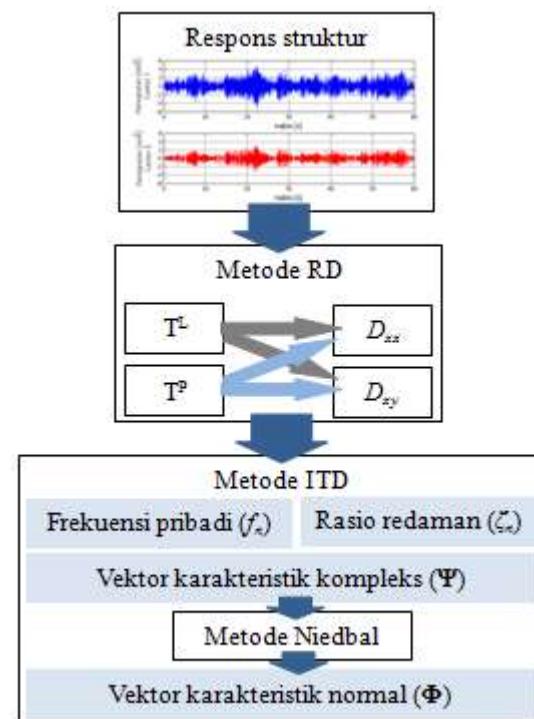
Respons struktur ditentukan dengan mengacu pada dua dan enam modus untuk masing-masing model. Keterlibatan redaman pada struktur dinyatakan dalam bentuk partisipasi redaman modal yang bervariasi pada masing-masing modusnya, seperti yang dinyatakan dalam **Tabel 2**.

Penghitungan respons kemudian dilakukan dalam koordinat modal berdasarkan metode Wilson- $\Theta$ . Selang waktu penghitungan respons ( $\Delta t$ ) dipilih berdasarkan kriteria  $1/(2f_h)$  dengan  $f_h$  adalah frekuensi pribadi tertinggi struktur (Bathe, 1975). Dengan demikian, untuk model pertama ditetapkan  $\Delta t = 8$  ms dan  $\Delta t = 4$  ms untuk model kedua. Lama gangguan yang bekerja dalam simulasi untuk kedua model berlangsung selama 60 s.

**Tabel 2.** Rasio redaman modal [%] dari model 1 dan 2 untuk menghasilkan respons struktur.

Modus	Redaman modal ( $\zeta$ [%])	
	Model 1	Model 2
1	2.3400	2.3400
2	1.0900	1.0900
3	-	1.1260
4	-	0.9450
5	-	0.8320
6	-	0.7830

Secara ringkas proses identifikasi struktur dalam penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 3**. Data yang dipakai untuk keperluan proses identifikasi merupakan data percepatan yang dicuplik di kedua lantai setiap model (Gambar 2(a) dan 2(b)).



**Gambar 3.** Skema proses identifikasi dengan metode RD dan ITD.

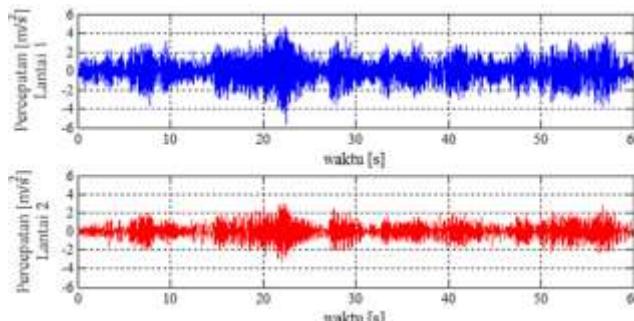
Metode RD diterapkan pada kedua respons percepatan untuk masing-masing model. Keseluruhan respons dalam rentang waktu 60 s digunakan untuk memperoleh fungsi RD melalui dua jenis *triggering*,  $T^L$  dan  $T^P$ . Khusus pada

$T^L$  dipilih nilai konstanta  $c$  sebesar  $\sqrt{2}$ . Segmenwaktu ( $\tau$ ) dipilih untuk rentang waktu 4 s. Fungsi RD yang dihasilkan melalui proses *triggering* kemudian digunakan untuk menentukan parameter modal struktur melalui metode ITD. Khusus untuk parameter modal modus getar normal diperoleh dari penerapan metode Niedbal.

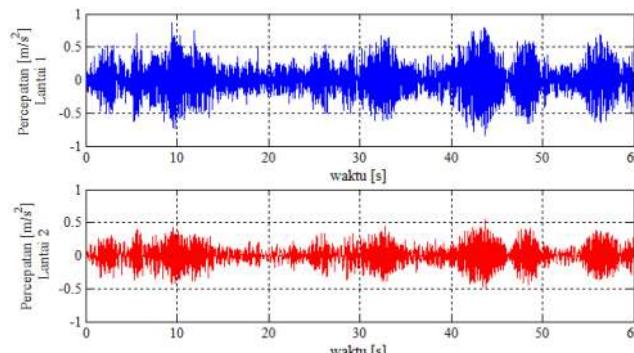
Semua kajian numerik serta proses identifikasi melalui metode RD dan ITD pada paket program yang telah dibangun disimulasikan pada PC *desktop* dengan spesifikasi prosesor Intel i7, 64 bit, RAM 8 GB dan HDD 500 GB.

## Hasil dan Pembahasan

Respons percepatan yang dicuplik pada setiap lantai untuk model pertama ditunjukkan dalam **Gambar 4**. RMS respons percepatan yang dicuplik pada setiap lantai diperoleh sebesar  $1.3639 \text{ m/s}^2$  untuk lantai pertama ( $L_1$ ) dan  $0.8639 \text{ m/s}^2$  untuk lantai kedua ( $L_2$ ). Sementara itu, pencuplikan respons percepatan model kedua ditampilkan pada **Gambar 5** dengan RMS respons bernilai  $0.2428 \text{ m/s}^2$  pada  $L_1$  dan  $0.1533 \text{ m/s}^2$  di  $L_2$ .



**Gambar 4.** Respons percepatan untuk model pertama pada masing-masing lantai akibat gangguan simpangan white noise pada tumpuan.



**Gambar 5.** Respons percepatan untuk model kedua pada masing-masing lantai akibat gangguan simpangan white noise pada tumpuan.

Acuan proses *triggering* pada  $T^L$  diterapkan untuk masing-masing respons di  $L_1$  ( $D_{11}$  dan  $D_{21}$ ) dan  $L_2$

( $D_{12}$  dan  $D_{22}$ ). Untuk menghasilkan fungsi RD melalui  $T^P$  digunakan keseluruhan nilai-nilai diskrit respons yang berada di atas nilai nol. Dengan demikian, ketika diterapkan acuan proses *triggering* fungsi RD pada  $L_2$  akan menghasilkan fungsi RD yang sama dengan acuan *triggering* pada  $L_1$  ( $D_{12} = D_{11}$  dan  $D_{22} = D_{21}$ ).

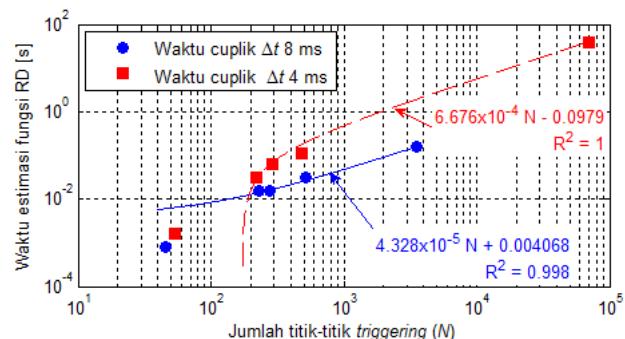
Dengan mengacu pada nilai optimum pada proses  $T^L$  dan penerapan  $T^P$  dapat ditentukan jumlah titik-titik *triggering* ( $N$ ) dari kedua respons percepatan untuk kedua model. Jumlah titik-titik *triggering* ini didaftarkan dalam **Tabel 3** dan **Tabel 4** untuk kedua model, berikut dengan waktu estimasi dalam membentuk fungsi RD. Berdasarkan **Tabel 3** dan **Tabel 4** dapat diplotkan suatu hubungan antara jumlah titik-titik *triggering* terhadap waktu estimasi. Hubungan ini diplotkan pada **Gambar 6** yang menyatakan kelinieran antara jumlah titik *triggering* ( $N$ ) dan waktu estimasi fungsi RD.

**Tabel 3.** Jumlah titik-titik *triggering* ( $N$ ) untuk model 1 berikut waktu estimasi [s] (\* merupakan acuan proses *triggering*).

Respons di	$T^L$		$T^P$
	$^*L_1$	$^*L_2$	$^*L_1$
$L_1$	279 (0.0156 s)	515 (0.0312 s)	3523 (0.1560 s)
$L_2$	46 (0.0008 s)	228 (0.0156 s)	3514 (0.1560 s)

**Tabel 4.** Jumlah titik-titik *triggering* ( $N$ ) untuk model 2 berikut waktu estimasi [s] (\* merupakan acuan proses *triggering*).

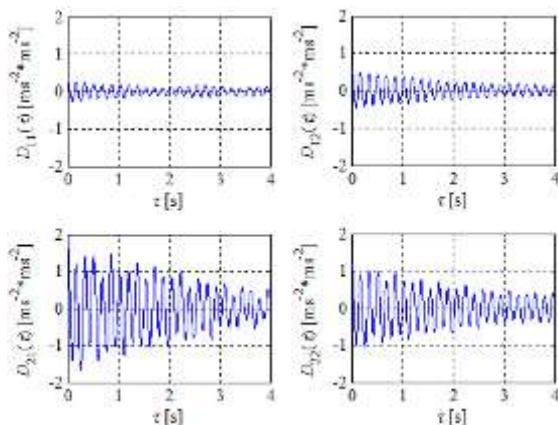
Respons di	$T^L$		$T^P$
	$^*L_1$	$^*L_2$	$^*L_1$
$L_1$	289 (0.0624 s)	487 (0.1092 s)	70647 (39.8910 s)
$L_2$	54 (0.0016 s)	218 (0.0312 s)	70102 (39.8115 s)



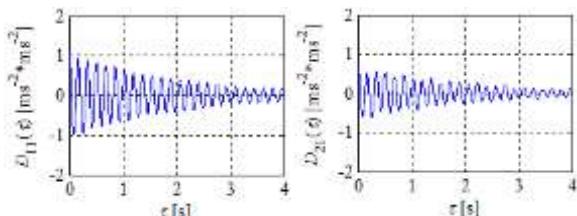
**Gambar 6.** Hubungan jumlah titik-titik *triggering* ( $N$ ) dengan waktu estimasi fungsi RD [s].

Fungsi RD model 1 yang diperoleh melalui penerapan  $T^L$  diperlihatkan dalam **Gambar 7**, sedangkan **Gambar 8** diperoleh melalui penerapan  $T^P$ . Demikian juga dengan

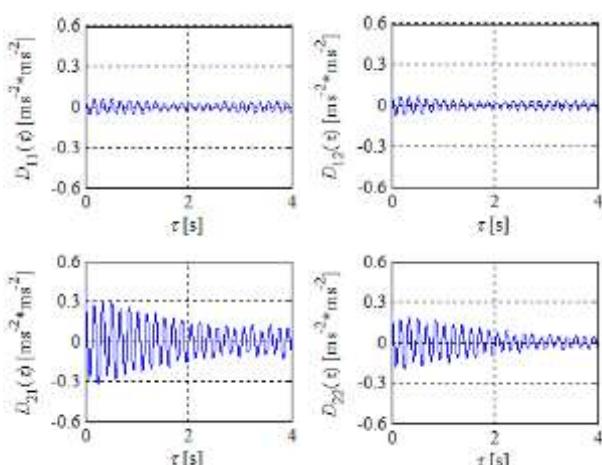
fungsi RD model 2 yang diperoleh melalui penggunaan  $T^L$  dan  $T^P$  seperti diperlihatkan pada Gambar 9 dan **Gambar 10**. Berdasarkan **Gambar 7** sampai dengan Gambar 10 dapat disimpulkan bahwa fungsi RD identik dengan respons getaran bebas teredam. Informasi yang ada dalam fungsi RD tersebut dapat diidentifikasi berdasarkan metode ITD. Informasi ini berbentuk karakteristik dinamik dan parameter modal dari struktur yang diidentifikasi.



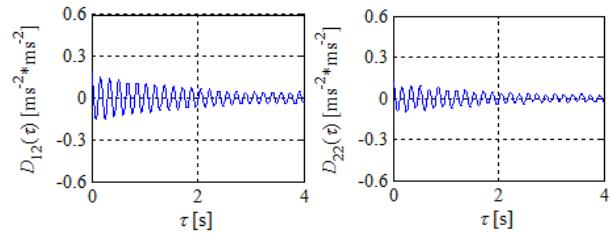
**Gambar 7** Fungsi RD respons percepatanstruktur model 1 melalui penerapan  $T^L$ .



**Gambar 8** Fungsi RD respons percepatanstruktur model 1 berdasarkan  $T^P$ .



**Gambar 9** Fungsi RD respons percepatanstruktur model 2 melalui penerapan  $T^L$ .



**Gambar 10.** Fungsi RD respons percepatanstruktur model 2 berdasarkan  $T^P$ .

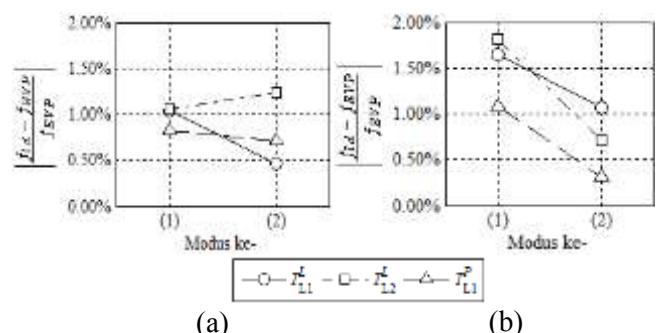
Penerapan metode ITD pada fungsi RD yang telah diperoleh dilakukan berdasarkan nilai-nilai optimum parameter numerik, yaitu  $N1=3$ ,  $N2=8$  dan  $N3=4$  (Pappa, 1981). Hasil identifikasi frekuensi pribadi melalui penerapan metode ITD ini untuk model 1 dapat dilihat pada **Tabel 5** dan untuk model 2 pada **Tabel 6**. Penyimpangan hasil identifikasi frekuensi pribadi terhadap nilai penghitungan EVP pada metode elemen hingga (**Tabel 1**) diperlihatkan pada **Gambar 11**.

**Tabel 5.** Frekuensi pribadi [Hz] hasil identifikasi dengan metode ITD berdasarkan fungsi RD untuk model 1 (EVP lihat Tabel 1 dan \* acuan *triggering*).

Modus	EVP	$T^L$			$T^P$
		$^*L_1$	$^*L_2$	$^*L_1$	$^*L_1$
1	2.2417	2.2651	2.2182	2.2234	
2	5.8689	5.8421	5.7962	5.8274	

**Tabel 6.** Frekuensi pribadi [Hz] hasil identifikasi dengan metode ITD berdasarkan fungsi RD untuk model 2 (EVP lihat Tabel 1 dan \* acuan *triggering*).

Modus	EVP	$T^L$			$T^P$
		$^*L_1$	$^*L_2$	$^*L_1$	$^*L_1$
1	2.2148	2.2512	2.2549	2.2388	
2	5.8067	5.8684	5.8477	5.8249	



**Gambar 11.** Penyimpangan hasil identifikasi frekuensi pribadi terhadap nilai penghitungan pada Tabel 1 untuk (a) model 1 dan (b) model 2.

Berdasarkan Gambar 11(a) dapat dilihat bahwa hasil identifikasi frekuensi pribadi pertama untuk  $T^L$  dengan acuan  $L_1$  memiliki kesalahan relatif lebih besar dibandingkan dengan modus keduanya. Sementara itu untuk acuan  $L_2$  justru sebaliknya. Hal ini disebabkan oleh rendahnya nilai RMS respons  $L_2$  dibandingkan dengan RMS respons  $L_1$ . Sedangkan untuk  $T^P$  relatif lebih baik

dengan penyimpangan di bawah 1 % baik untuk modus pertama maupun untuk modus kedua. Kondisi ini juga berkorelasi langsung dengan jumlah titik-titik *triggering* yang relatif lebih banyak, sehingga kualitas fungsi RD yang dihasilkan relatif lebih baik.

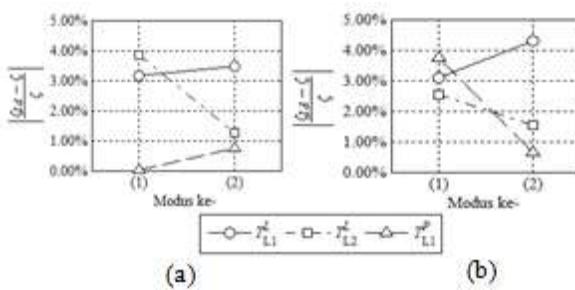
Hasil identifikasi rasio redaman dapat dilihat pada **Tabel 7** untuk model 1 dan **Tabel 8** untuk model 2. Penyimpangan hasil identifikasi rasio redaman terhadap nilai rasio redaman yang diberikan dalam Tabel 2 diplotkan pada **Gambar 12**. Berdasarkan Gambar 12 dapat disimpulkan bahwa identifikasi rasio redaman melalui  $T^L$  untuk modus getar pertama lebih sulit dibandingkan dengan modus getar ke dua. Sedangkan identifikasi berdasarkan  $T^P$  memberikan hasil yang relatif lebih baik untuk modus pertama pada model 1. Hal ini disebabkan oleh kondisi *triggering* diterapkan untuk keseluruhan data diskrit respons yang berada di atas nilai nol.

**Tabel 7.** Rasio redaman [%] hasil identifikasi dengan metode ITD berdasarkan fungsi RD untuk model 1 (\* acuan *triggering*).

Modus	$\zeta$ Tabel 2	$T^L$			$T^P$		
		$^*L_1$	$^*L_2$	$^*L_1$	$^*L_1$	$^*L_2$	$^*L_1$
1	2.3400	2.4141	2.2500	2.3398			
2	1.0900	1.0524	1.1037	1.0981			

**Tabel 8.** Rasio redaman [%] hasil identifikasi dengan metode ITD berdasarkan fungsi RD untuk model 2 (\* acuan *triggering*).

Modus	$\zeta$ Tabel 2	$T^L$			$T^P$		
		$^*L_1$	$^*L_2$	$^*L_1$	$^*L_1$	$^*L_2$	$^*L_1$
1	2.3400	2.2674	2.2804	2.4277			
2	1.0900	1.0432	1.1066	1.0971			



**Gambar 12.** Penyimpangan hasil identifikasi rasio redaman terhadap nilai pada **Tabel 2** untuk (a) model 1 dan (b) model 2.

*Overall modal confidence factor* (OMCF) digunakan sebagai suatu kriteria untuk menyatakan modus-modus yang telah diidentifikasi merupakan modus ril struktural atau bukan. Nilai OMCF di atas 90% merupakan nilai OMCF untuk modus ril

struktur dan sebaliknya. Hasil identifikasi dengan metode ITD menunjukkan OMCF kedua modus merupakan modus ril struktur, seperti yang ditunjukkan dalam **Tabel 9**.

Metode Niedbal diterapkan untuk mentransformasikan modus getar kompleks menjadi modus getar normal. Hasil identifikasi modus getar normal hasil transformasi ini ditampilkan ke dalam Tabel 10 dan 11. Posisi pencuplikan respons pada struktur uji digunakan sebagai acuan untuk visualisasi modus getar normal seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 13**.

**Tabel 9.** OMCF hasil identifikasi kedua modus untuk kedua model (\* acuan *triggering*).

Modus	Model 1			Model 2		
	$T^L$		$T^P$	$T^L$		$T^P$
	$^*L_1$	$^*L_2$	$^*L_1$	$^*L_1$	$^*L_2$	$^*L_1$
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

**Tabel 10.** Modus getar normal hasil identifikasi kedua modus untuk model 1 berikut penyimpangan terhadap nilai EVP (\* acuan *triggering*).

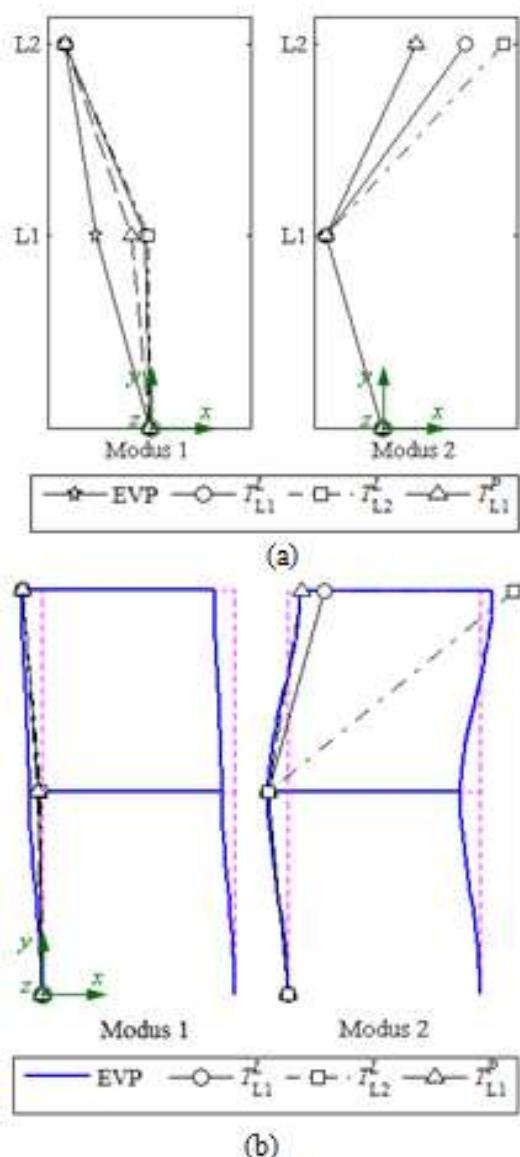
Modus	EVP	$T^L$		$T^P$
		$^*L_1$	$^*L_2$	$^*L_1$
1	-0.6180	-0.0373 (93.96%)	-0.0057 (99.08%)	-0.2091 (66.17%)
		-1.0000 (0.00%)	-1.0000 (0.00%)	-1.0000 (0.00%)
2	-1.0000 0.6180	-1.0000 (0.00%)	-1.0000 (0.00%)	-1.0000 (0.00%)
		1.4988 (142.52%)	2.1505 (247.98%)	0.6072 (1.75%)

**Tabel 11.** Modus getar normal hasil identifikasi kedua modus untuk model 2 berikut penyimpangan terhadap nilai EVP (\* acuan *triggering*).

Modus	EVP	$T^L$		$T^P$
		$^*L_1$	$^*L_2$	$^*L_1$
1	-0.6200	-0.1354 (78.16%)	-0.0469 (92.44%)	-0.2485 (59.92%)
		-1.0000 (0.00%)	-1.0000 (0.00%)	-1.0000 (0.00%)
2	-1.0000 0.6327	-1.0000 (0.00%)	-1.0000 (0.00%)	-1.0000 (0.00%)
		1.8292 (189.11%)	11.1609 (1664.01%)	0.6321 (0.09%)

Hasil identifikasi modus getar normal pada kedua model melalui penerapan  $T^P$  menunjukkan kesesuaian dengan modus getar normal penghitungan EVP terutama untuk modus kedua, seperti yang diperlihatkan dalam Tabel 10 dan 11. Penyimpangan pada modus pertama

diperlihatkan pada posisi pencuplikan respons di  $L_1$ , yaitu 66.17% untuk model 1 dan 59.92% pada model 2. Keadaan ini disebabkan terjadinya distorsi data respons sewaktu dilakukan proses penghitungan fungsi RD. Kemudian juga terlihat penyimpangan yang cukup besar untuk semua modus getar normal yang diidentifikasi melalui penerapan  $T^L$ . Acuan *triggering* pada respons di  $L_2$  memperlihatkan distorsi yang cukup besar ini dibandingkan dengan acuan *triggering* pada  $L_1$ , terutama modus kedua yang menunjukkan pergeseran modus geser pada setiap lantai dari penghitungan EVP. Distorsi modus getar normal yang diidentifikasi disebabkan oleh sedikitnya jumlah titik-titik *triggering* ketika  $T^L$  diterapkan. Secara umum,  $T^P$  menunjukkan hasil identifikasi modus getar normal yang jauh lebih baik dibandingkan  $T^L$ .



**Gambar 13.** Visualisasi modus getar normal hasil identifikasi melalui penerapan metode ITD dan Niedbal (a) mode 1 dan (b) model 2.

## Kesimpulan

Dalam penelitian ini telah disusun sebuah paket program komputasi untuk identifikasi modal parameter sebuah struktur dengan gangguan acak. Bahasa pemrograman yang dipilih adalah bahasa pemrograman MATLAB yang dapat dihubungkan langsung dengan perangkat data akusisi yang sangat berguna untuk pemakaian di lapangan. Paket program tersebut dibangun berdasarkan metode RD untuk mengubah respons getaran acak menjadi respons getaran bebas yang kemudian dengan menggunakan metode ITD dipakai untuk memperoleh modal parameter. Adapun metode RD yang dipakai dalam paket program tersebut didasari atas teknik  $T^L$  dan  $T^P$ . Berdasarkan hasil simulasi untuk model bangunan dua lantai yang sederhana dengan 2 DoF maupun dengan model yang lebih kompleks (216 DoF) secara umum metode RD yang berdasarkan  $T^P$  memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan berdasarkan  $T^L$ . Meskipun demikian waktu estimasi yang diperlukan untuk  $T^P$  jauh lebih lama dibandingkan  $T^L$ . Selanjutnya dapat dilihat bahwa kesalahan identifikasi modal parameter secara umum tidak lebih dari 5 %. Identifikasi frekuensi pribadi memberikan tingkat kesalahan yang lebih rendah (sekitar 2 %) dibandingkan dengan rasio redaman (sekitar 5 %). Sementara itu, menemukan kembali bentuk modus getar dengan cara  $T^P$  jauh lebih baik dibandingkan dengan cara  $T^L$ .

## 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.

## Nomenklatur

<b>T</b>	matriks transformasi linier kompleks
<b>D</b>	fungsi RD
<b>T</b>	<i>triggering</i> fungsi RD
<b>N</b>	jumlah titik-titik <i>triggering</i>
<b>c</b>	konstanta pengali RMS respons
<b>f</b>	frekuensi pribadi (Hz)
<b>x</b>	respons struktur, simpangan (m)
<b>y</b>	respons struktur, simpangan (m)

## Greek letters

<b><math>\Phi</math></b>	matriks modus getar normal
<b><math>\Psi</math></b>	matriks modus getar kompleks
<b><math>\Delta t</math></b>	selang waktu penghitungan respons (s)
<b><math>\tau</math></b>	segmen waktu (s)
<b><math>\sigma</math></b>	root mean square (RMS) respons

## Superscripts

**L** *level crossing triggering*

P positive points triggering

Subscripts

$xx$  fungsi RD langsung  
 $xy$  fungsi RD silang

25th Structures, Structural Dynamics and Material Conference and AIAA Dynamics Specialist Conference, Palm Springs, California, pp. 292-295.

Pappa, R. S., and Ibrahim, S. R.,(1981),*A Parametric Study of The Ibrahim Time Domain Modal Identification Algorithm*, The Shock and Vibration Bulletin, Bulletin 51, pp. 43-72.

## Daftar Pustaka

Asmussen, J. C.,(1997),*Modal Analysis Based on Random Decrement Technique – Application to Civil Engineering Structures*, Doctoral Diss. at Dept. of Building Technology and Structural Engineering, The University of Aalborg.

Bathe, K.J.,(1975),*Numerical Methods in Finite Element Analysis*, Prentice Hall, New Jersey.

Bur, M., (2006)*Research on Operational Modal Analysis*, Report of Research Activity in "Wiedereinladungsprogramm", Lehrstuhl und Institut fuer Leichtbau, RWTH-Aachen, Germany.

Cole, H. A.,(1968),*On The Line Analysis of Random Vibrations*, AIAA Paper no. 68-288.

Ibrahim, S. R. and Mikulcik, E. C.,(1973),*A Time Domain Modal Vibration Test Technique*, The Shock and Vibration Bulletin, Bulletin 43, Part 4, pp. 21-37.

Ibrahim, S. R. and Mikulcik, E. C.,(1976),*The Experimental Determination of Vibration Parameters from Time Responses*, The Shock and Vibration Bulletin, Bulletin 46, pp. 187-196.

Ibrahim, S. R. and Mikulcik, E. C.,(1977),*A Method for the Direct Identification of Vibration Parameters from the Free Responses*, The Shock and Vibration Bulletin, Bulletin 47, pp. 183-198.

Ibrahim, S. R.,(1983),*Time Domain Modal Parameter Identification and Modelling Structures*, Proceeding of the American Control Conference, San Francisco, CA, pp. 989-996.

Ibrahim, S. R.,(1982),*Computation of Normal Modes from Identified Complex Modes*, AIAA Journal, Vol. 21, No. 3, pp. 446-451.

Mathworks,(2012),*MATLAB® Programming Fundamentals R2012a*, The Mathworks Inc, Natick, MA.

Niedbal, N.,(1984),*Analytical Dtermination of Real Normal Modes from Measured Complex Responses*,