

Analisis Numerik Ragam pada Pelat Utuh dan Retak: Studi Interaksi Dinamis Struktur dengan Udara

Agung Budipriyanto
Program Diploma Teknik Sipil FTSP ITS
email: agungbp@ce.its.ac.id

ABSTRAK

Tulisan ini menyajikan hasil studi numerik dari struktur pelat utuh dan retak untuk identifikasi retak struktur. Interaksi dinamis antara struktur tersebut dengan udara di sekitarnya dimodelkan dengan metode elemen hingga dan parameter dinamis struktur diteliti dengan menggunakan pendekatan analisis ragam. Parameter dinamis yang diteliti dalam studi ini adalah frekwensi alamiah dan bentuk ragam. Perilaku struktur yang beresilasi dengan dan tanpa udara di sekelilingnya dibandingkan. Disamping itu perubahan parameter dinamis struktur dalam kondisi utuh dan retak diteliti. Dari hasil studi ini diperoleh bahwa udara berpengaruh terhadap frekwensi alamiah struktur yang diteliti. Pengaruh udara terhadap bentuk ragam struktur tersebut tidak signifikan. Sedangkan retak pada struktur mempengaruhi frekwensi alamiah dan bentuk ragam struktur yang diteliti dalam studi ini. Bentuk ragam dapat digunakan untuk mengidentifikasi retak dan lokasinya pada struktur tersebut.

Kata kunci: *Pelat Baja, Deteksi Retak pada Struktur, Interaksi Struktur dengan Udara*

1. PENDAHULUAN

Untuk menentukan apakah kerusakan pada struktur sipil mempengaruhi integritas struktur tersebut, lokasi kerusakan pada struktur perlu dideteksi sejak dini sehingga studi secara detail untuk menentukan jenis dan ukuran kerusakan dapat dilakukan. Banyak prosedur dan teknik untuk mendeteksi dan menentukan ukuran dan lokasi kerusakan tersedia saat ini, misalkan teknik *alternating current*, *eddy current* dan *ultrasonic*. Hampir pada semua teknik yang ada sensor harus terletak cukup dekat daerah kerusakan. Jika pengukuran yang dilakukan dengan sensor yang agak jauh dari lokasi kerusakan, kemungkinan besar lokasi kerusakan tidak akan terdeteksi.

Pada beberapa tahun terakhir ini, metoda analisis ragam (*modal analysis*) baik numerik maupun experimental telah banyak digunakan untuk mendeteksi kerusakan pada struktur. Dengan metode ini kerusakan pada struktur dideteksi dan dilokalisir dengan melakukan pengamatan terhadap perubahan parameter modal yaitu, frekwensi alamiah,

faktor redaman, bentuk ragam, dan fungsi response frekwensi. Berbeda dengan metode yang telah disebutkan sebelumnya, dengan metode ini sensor tidak harus diletakkan sangat dekat dengan lokasi kerusakan.

Lindholm dkk (1965) melakukan investigasi terhadap perilaku dinamis pelat di udara dan di dalam air. Perhitungan frekwensi alamiah struktur didasarkan pada kondisi vakum (tanpa adanya interaksi struktur dan udara) dengan menggunakan teori pelat tipis. Besarnya frekwensi alamiah pelat dari hasil perhitungan numerik kemudian dikoreksi untuk memperhitungkan pengaruh fluida (air dan udara) di sekitarnya. Perbedaan antara nilai yang diperoleh dari studi numerik dan eksperimen pada pelat yang mereka teliti berkisar antara 5,0% sampai dengan 6,2%. Studi serupa dilakukan oleh Muthuveerappan dkk (1979). Mereka melaporkan bahwa frekwensi alamiah mengalami penurunan dan bentuk ragam mengalami perubahan pada struktur yang bergetar pada fluida dengan berat jenis yang berbeda.

Richardson dan Mannan (1991) melakukan studi numerik terhadap pengaruh perubahan properti struktur dinamis (masa, kekakuan dan redaman) terhadap parameter ragam struktur. Perubahan nilai properti struktur dilakukan guna mensimulasikan adanya kerusakan pada struktur ataupun ketika struktur beresilasi pada fluida dengan berat jenis yang berbeda. Mereka melakukan uji terhadap sistem yang mempunyai 3(tiga) derajat kebebasan dengan berbagai variasi reduksi nilai masa, kekakuan, dan redaman. Dari hasil studi mereka, dapat disimpulkan bahwa untuk perubahan yang relatif kecil ($\leq 10\%$) nilai masa, kekakuan, dan redaman struktur dapat dihitung (tanpa ada kesalahan yang berarti) dari nilai parameter ragam struktur dalam keadaan utuh.

Pada tulisan ini dibahas hasil studi pengaruh retak pada parameter dinamis (frekwensi alamiah dan bentuk ragam) struktur pelat dengan pendekatan analisis numerik ragam. Selain itu untuk mengkonfirmasi studi investigasi dari peneliti sebelumnya, pengaruh udara di sekitar struktur terhadap parameter ragam juga diteliti. Informasi yang diperoleh penting untuk identifikasi integritas struktur yang sedang beresilasi.

2. DASAR TEORI

Fungsi respons frekwensi dengan pengukuran akselerasi/percepatan $A_{jk}(\omega)$, dan regangan $S_{jk}(\omega)$ untuk struktur dengan redaman viskus masing masing dapat dinyatakan dengan persamaan (Maia dan Silva, 1997),

$$A_{jk}(\omega) = \sum_{r=1}^n \frac{\{\phi_{jr}\}\{\phi_{kr}\}}{[\omega_r - \omega^2 + 2i\omega\xi_r\omega_r]} \dots\dots\dots(1)$$

$$S_{jk}(\omega) = \sum_{r=1}^n \frac{\{\varepsilon_{jr}\}\{\phi_{kr}\}}{[\omega_r - \omega^2 + 2i\omega\xi_r\omega_r]} \dots\dots\dots(2)$$

ϕ_{jr} dan ϕ_{kr} adalah bentuk ragam yang telah dinormalisasi dengan matriks masa (*mass normalized mode shape*) pada ragam ke r masing masing di titik j dan k , ε_{jr} adalah bentuk ragam regangan (*strain mode shape*)

untuk ragam ke r pada titik j , ω_r dan ξ_r , masing masing adalah frekwensi alamiah dan faktor redaman struktur pada ragam ke r , dan n adalah jumlah ragam yang diteliti.

Dengan menggunakan fungsi response frekwensi yang diberikan pada Persamaan (1) dan (2) maka nilai frekwensi alamiah dan informasi mengenai bentuk ragam struktur dapat diperoleh. Parameter dinamis tersebut diatas digunakan untuk mengidentifikasi pengaruh kerusakan serta pengaruh udara terhadap parameter dinamis struktur yang sedang beresilasi.

3. METODA PENGUJIAN

Pelat yang diteliti terbuat dari baja dengan panjang 652mm, lebar 204mm, dan tebal 9,5mm. Pelat tersebut terjepit pada salah satu sisi pendek (lebar) nya dan bebas pada sisi sisi yang lainnya. Struktur pelat diuji dalam posisi horizontal. Dalam studi ini retak pada pelat terletak 110 mm diukur dari penjepitan pelat. Retak pada struktur pelat tersebut dibuat simetris pada sisi permukaan atas dan bawah pelat dengan panjang retak sebesar 204mm (memanjang kearah lebar pelat). Pengaruh dua kedalaman retak terhadap perilaku dinamis struktur diteliti dalam studi ini, yaitu kedalaman retak $2 \times 0,794$ mm dan $2 \times 2,381$ mm. Program ABAQUS (2004) dipakai untuk memperoleh fungsi response frekwensi, frekwensi alamiah, dan vektor ragam (bentuk ragam). Karena lebar retak yang sebenarnya sangat kecil maka dalam analisis digunakan 3(tiga) lebar retak yaitu 1,5mm, 2,0mm, dan 2,5mm.

Karakteristik dinamis struktur dari pelat dihitung dalam keadaan vakum (tanpa ada interaksi dengan udara) dan di udara (dengan interaksi struktur dan udara). Pada studi ini pelat dimodelkan dengan elemen balok. Pemodelan dengan elemen balok mungkin cukup memadai karena hanya respons pada ragam lentur yang diteliti. Untuk memodelkan udara digunakan *plane strain fluid element* yang berinteraksi dengan elemen balok dengan perantaraan *interface element*. Gambar 1 menunjukkan model untuk pelat utuh dengan udara di sekelilingnya. Respons struktur pada 5(lima) titik seperti ditunjukkan pada Gambar 1

diperoleh dan hasilnya dilaporkan dalam tulisan ini. Model pelat utuh yang berinteraksi dengan udara dimodifikasi untuk memodelkan pelat retak di udara seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Elemen balok dan elemen udara disekitar lokasi retak dimodifikasi. *Aspect ratio* (perbandingan panjang dan lebar elemen) dari elemen pada daerah tersebut dipertahankan lebih kecil dari 6(enam) sehingga hasil analisis masih cukup akurat. Seperti disebutkan sebelumnya pada studi ini retak diidealisasikan berbentuk segi empat sehingga pada analisis retak tersebut dapat dimodelkan sebagai balok dengan penampang melintang yang tereduksi.

Ada 2(dua) syarat batas yang digunakan pada model elemen hingga pada Gambar 1 dan Gambar 2 yaitu syarat batas pada struktur dan syarat batas pada elemen udara. Struktur dijepit pada salah satu sisinya dan bebas pada sisi yang lain. Karena pada kenyataannya pelat yang diteliti beresilasi dalam udara, pada analisis dalam studi ini, udara ikut dimodelkan sehingga interaksi antara struktur dan udara tidak diabaikan. Pada Gambar 1 dan 2 elemen udara hanya digambarkan pada sisi di bawah struktur; Sedang pada sisi sebelah atas struktur digunakan elemen yang sama dengan memasang kondisi simetri untuk elemen tersebut. Agar tekanan udara tidak bergerak kembali pada struktur yang sedang bergetar, digunakan syarat batas untuk meredam pengaruh ini. Syarat batas tersebut dikenakan pada sisi kanan, kiri, dan bawah dari model pada Gambar 1 dan 2. Dengan menggunakan model tersebut, fungsi respons frekwensi untuk respons akselerasi dan regangan, frekwensi alamiah, dan vektor atau bentuk ragam untuk 5(lima) ragam lentur yang pertama diperoleh dengan bantuan program komputer ABAQUS.

4. HASIL UJI DAN DISKUSI

Dengan menggunakan model elemen hingga untuk pelat yang berinteraksi dengan udara dan tidak berinteraksi dengan udara (kondisi vakum) dalam kondisi pelat utuh dan retak, respons akselerasi dan regangan diperoleh pada investigasi ini. Gambar 3 menunjukkan hasil fungsi respons frekwensi yang diperoleh dari respons akselerasi struktur

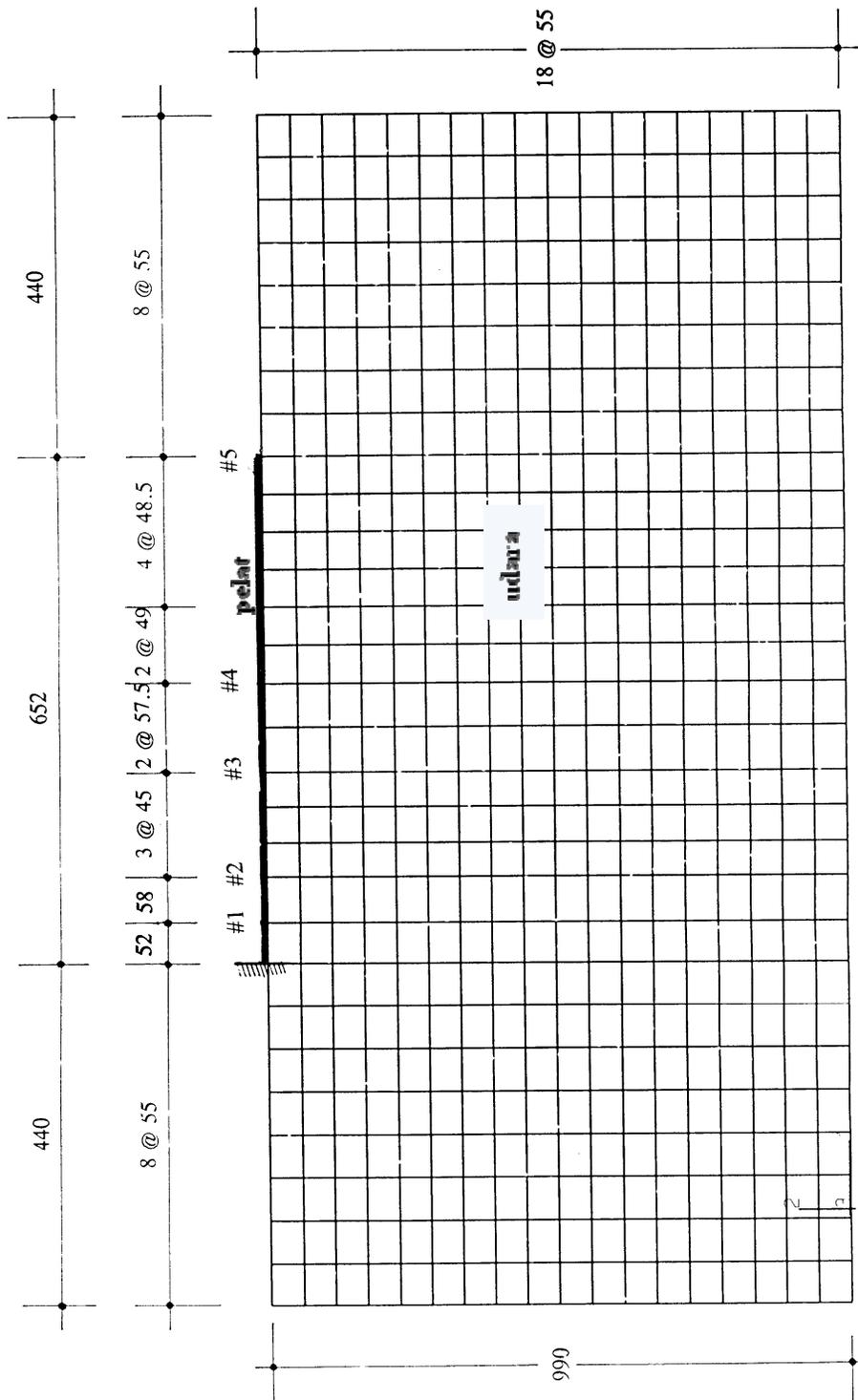
pelat utuh di titik #1 pada rentang 0 sampai dengan 1060 Hz. Pada rentang frekwensi tersebut terdapat 5(lima) ragam lentur yang pertama yaitu pada rentang frekwensi 0 - 30 Hz, 100 - 130 Hz, 310 - 330 Hz, 630 - 650 Hz, 1040 - 1060 Hz masing masing untuk ragam kesatu, kedua, ketiga, keempat, dan kelima. Fungsi respons frekwensi dari respons regangan menunjukkan hasil yang serupa dan tidak disajikan dalam tulisan ini.

Frekwensi alamiah struktur pada kondisi vakum (pengaruh udara diabaikan) dan kondisi beresilasi di udara (interaksi antara struktur dengan udara diperhitungkan) diberikan pada Tabel 1. Frekwensi alamiah struktur dalam kondisi vakum sedikit lebih tinggi dari frekwensi alamiah struktur di udara; Perbedaan maksimumnya 1,8%. Hal ini karena udara memberikan pengaruh redaman pada struktur sehingga frekwensi alamiah teredamnya lebih rendah.

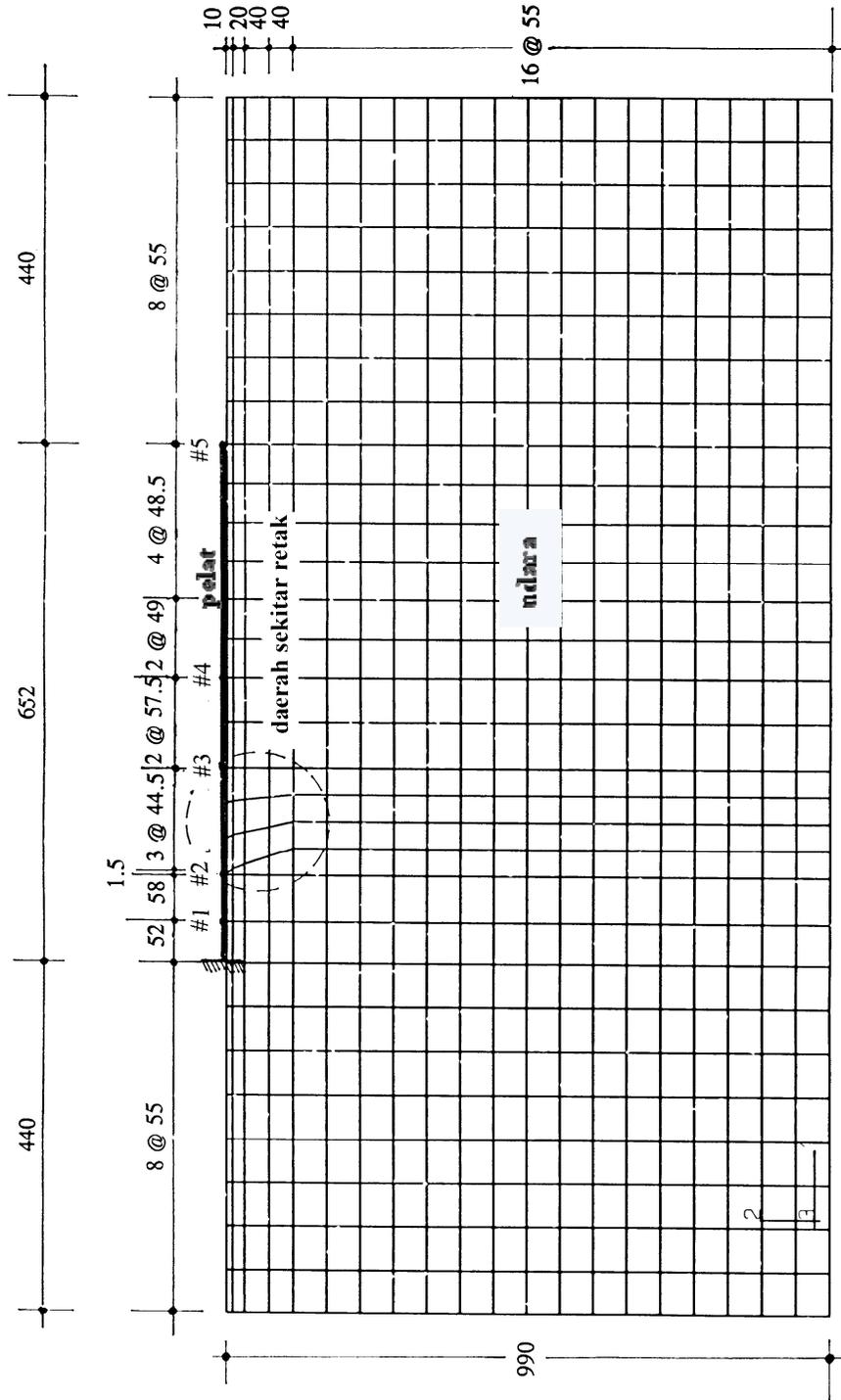
Frekwensi alamiah struktur dalam keadaan utuh dan retak diberikan pada Table 2(a). Sedangkan prosentase pengurangan frekwensi alamiah akibat retak yang diteliti disajikan dalam Tabel 2(b). Dari Tabel 2(a) dan 2(b) dapat disimpulkan retak berpengaruh terhadap frekwensi alamiah struktur yang diteliti. Dengan adanya retak frekwensi alamiah struktur secara konsisten berkurang kecuali frekwensi alamiah pada ragam kedua; Pada ragam ini frekwensi alamiah tidak berubah ketika pada struktur terdapat retak dengan kedalaman 2x0,794mm, lihat Tabel 2(b). Hal ini kemungkinan disebabkan retak dengan kedalaman tersebut tidak mempengaruhi kekakuan pelat yang bergetar pada ragam kedua. Dengan demikian perlu kehati-hatian untuk menggunakan frekwensi alamiah saja sebagai indikator kerusakan pada struktur.

Tabel 1: : Frekwensi alamiah struktur pelat pada kondisi vakum dan di udara

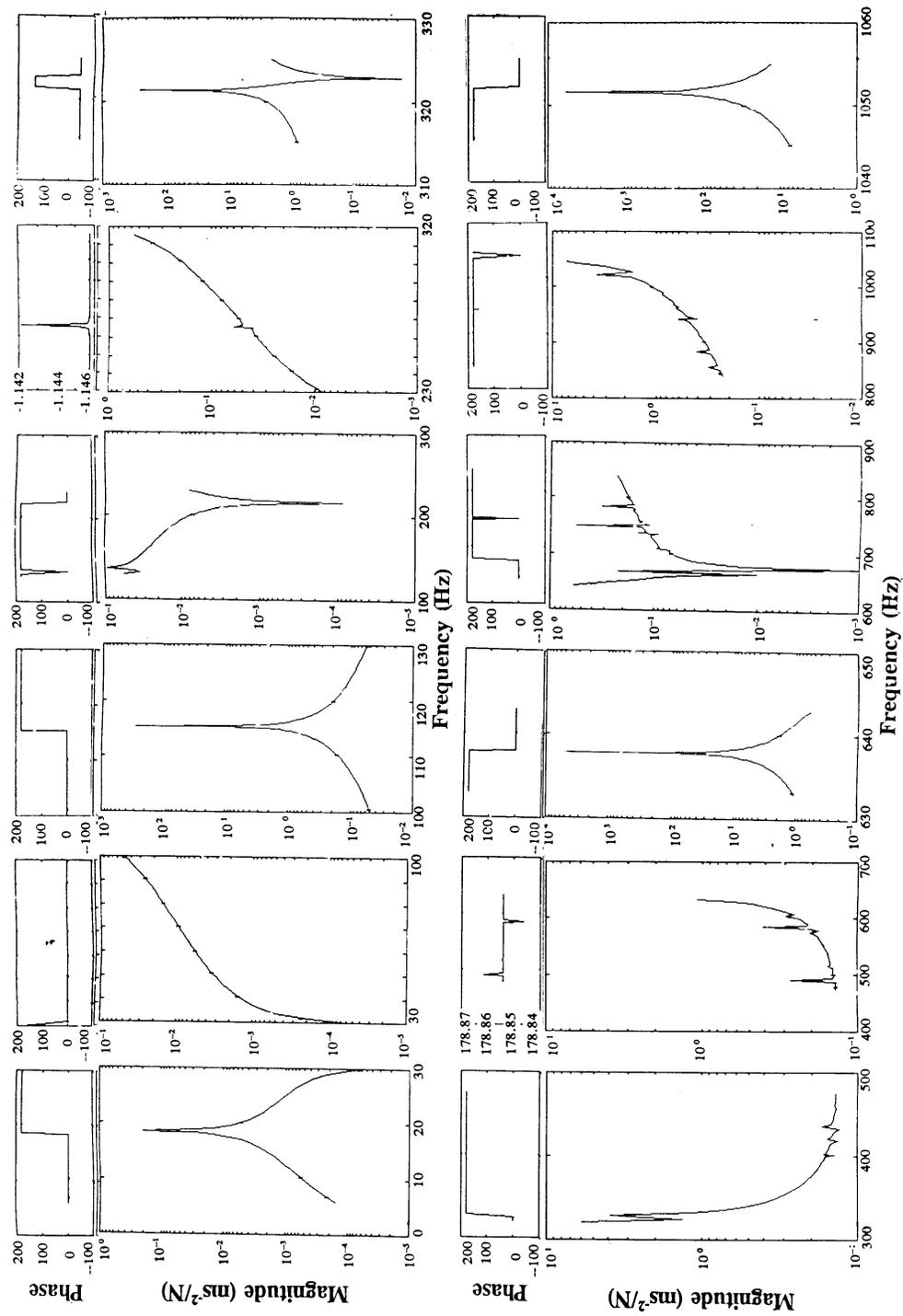
Ragam	Frekwensi (Hz)		Selisih (%)
	Vakum	di udara	
1	18,68	18,48	1,071
2	117,00	115,40	1,368
3	327,10	321,30	1,773
4	640,10	637,80	0,359
5	1057,00	1052,00	0,473



Gambar 1: Model untuk pelat utuh yang berinteraksi dengan udara di sekitarnya (dimensi dalam mm).



Gambar 2: Model untuk pelat retak yang berinteraksi dengan udara di sekitarnya (dimensi dalam mm).



Gambar 3: Fungsi respons frekwensi pada pelat utuh yang diperoleh dari respons akselerasi di titik #1.

Tabel 2: Frekwensi alamiah struktur utuh dan retak di udara dengan lebar retak 2,0mm dan prosentase perbedaannya.

(a). Frekwensi alamiah pelat pada kondisi utuh dan retak

Ragam	Frekwensi alamiah (Hz)		
	utuh	retak dengan kedalaman	
		2x0,794mm	2x2,381mm
1	18,48	18,42	18,04
2	115,4	115,4	115,2
3	321,3	319,8	319,7
4	637,8	637,3	619,7
5	1052,0	1051,0	1039,0

(b). Prosentase perbedaan frekwensi pelat retak dibandingkan dengan kondisi utuh

Ragam	Perbedaan frekwensi alamiah (%) pada pelat retak dengan kedalaman	
	2x0,794mm	2x2,381mm
1	0,325	2,381
2	0,000	0,173
3	0,467	0,498
4	0,078	1,035
5	0,095	1,236

Dibandingkan dengan dalam keadaan utuh, frekwensi alamiah pelat turun maksimum sebesar 0,5% dan 2,4% masing masing untuk pelat dengan kedalaman retak 2x0,794mm dan 2x2,381mm.

Menurut teori analisis ragam, nilai puncak pada fungsi respons percepatan (akselerasi) struktur proporsional dengan bentuk ragam. Pada studi ini, nilai puncak fungsi response frekwensi yang diperoleh dari hasil investigasi numerik ini dibandingkan dengan nilai bentuk ragam untuk memverifikasi apakah sesuai dengan teori tersebut diatas. Agar dapat dibandingkan dengan vektor ragam, nilai puncak fungsi response frekwensi akselerasi struktur dibagi dengan nilai terbesar diperoleh dari 5(lima) titik yang diteliti dan hasilnya ditampilkan pada Tabel 3. Dari perbandingan tersebut dapat disimpulkan bahwa nilai puncak dari fungsi respons frekwensi proporsional dengan nilai modulus vektor ragam lihat Tabel 3(a) dan 3(b). Dengan asumsi bahwa nilai puncak dari fungsi respons frekwensi berperilaku sama maka perubahan pada vektor ragam dapat diverifikasi dengan hanya memeriksa

Tabel 3: Perbandingan vektor ragam dengan nilai puncak fungsi respons frekwensi di 5 (lima) titik lokasi yang diteliti.

(a). Vektor ragam pada pelat dalam kondisi vakum

Ragam	Nilai vektor ragam pada titik				
	#1	#2	#3	#4	#5
1	0,0108	0,0462	0,2056	0,4018	1,0
2	0,0615	0,2301	0,6558	0,6687	1,0
3	0,1568	0,4984	0,6155	0,2608	1,0
4	0,2761	0,7014	0,1385	0,5973	1,0
5	0,4052	0,7559	0,6954	0,4789	1,0

(b). Nilai puncak dari fungsi response frekwensi yang telah dinormalisasi untuk pelat utuh dalam kondisi vakum

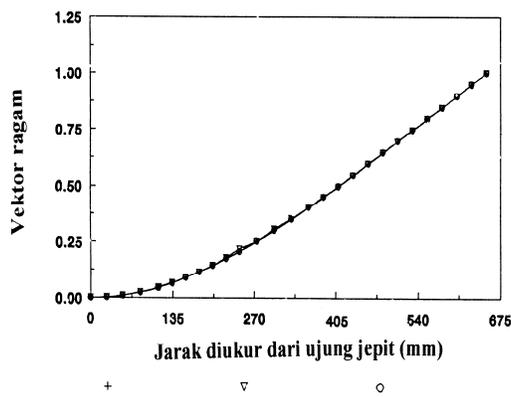
Ragam	Nilai vektor ragam pada titik				
	#1	#2	#3	#4	#5
1	0,0108	0,0462	0,2057	0,4017	1,0
2	0,0615	0,2301	0,6558	0,6687	1,0
3	0,1568	0,4984	0,6155	0,2608	1,0
4	0,2761	0,7014	0,1385	0,5973	1,0
5	0,4052	0,7559	0,6954	0,4789	1,0

(c). Nilai puncak dari fungsi response frekwensi yang telah di normalisasi untuk pelat utuh di udara

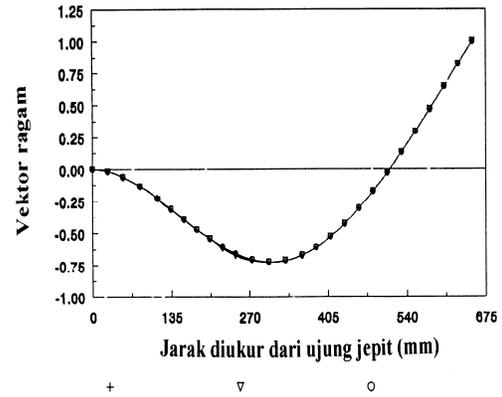
Ragam	Nilai vektor ragam pada titik				
	#1	#2	#3	#4	#5
1	0,0108	0,0463	0,2058	0,4020	1,0
2	0,0609	0,2297	0,6536	0,6695	1,0
3	0,1571	0,4973	0,6165	0,2618	1,0
4	0,2774	0,7043	0,1368	0,5972	1,0
5	0,4039	0,7544	0,6981	0,4778	1,0

perubahan pada nilai puncak fungsi tersebut.

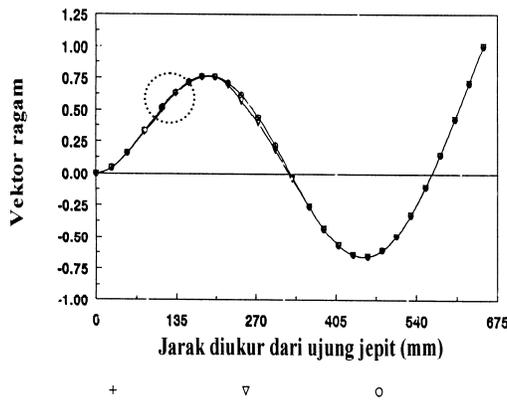
Seperti terlihat pada Tabel 3(b) dan 3(c) bentuk ragam (vektor ragam) sedikit berubah pada kondisi vakum dan kondisi pelat di udara. Namun perubahan tersebut tidak signifikan. Hasil ini mengkonfirmasi hasil studi dari peneliti terdahulu misalkan Muthuveerappan dkk (1980) serta Gounaris dan Papadopoulos (1997). Bentuk ragam juga berubah akibat adanya retak pada struktur pelat. Gambar 4(a) sampai dengan 4(e) memperlihatkan perubahan dari bentuk/vektor ragam pada kondisi pelat utuh dan retak untuk lebar retak sebesar 2.0mm untuk 5(lima) ragam lentur pertama. Hasil dari analisis dengan



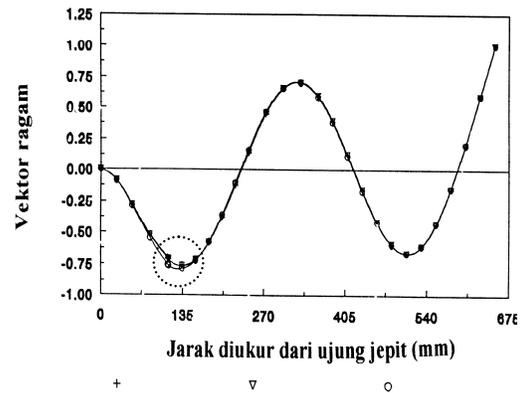
(a) Ragam pertama



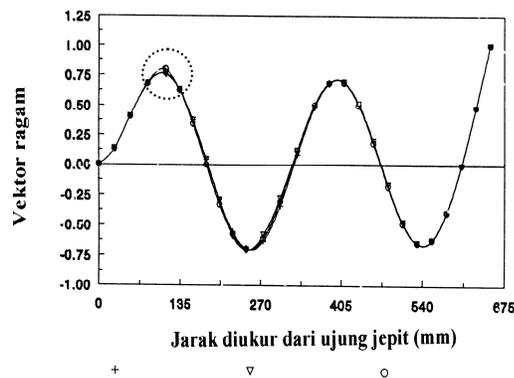
(b) Ragam kedua



(c) Ragam ketiga



(d) Ragam keempat



(e) Ragam kelima

Gambar 4: Perubahan vektor (bentuk) ragam akibat adanya retak pada pelat. +: pelat utuh
∇: pelat dengan retak 2x0,794mm, dan o: pelat dengan retak 2x2,381 mm.

lebar retak 1,5mm dan 2,5 mm menunjukkan kecenderungan yang sama, sehingga tidak ditampilkan dalam tulisan ini.

Bisa dilihat dengan jelas bahwa vektor ragam berubah dibandingkan dengan pelat pada kondisi utuh. Perubahan pada vektor ragam lebih jelas terlihat pada ragam dengan frekwensi tinggi. Perlu pula dicatat bahwa perubahan pada bentuk/vektor ragam terlihat lebih signifikan di daerah retak pada ragam ke 4 dan 5, lihat Gambar 4.

5. KESIMPULAN

Tulisan ini menyajikan hasil studi numerik pada pelat utuh dan retak yang beresilasi pada kondisi vakum dan berinteraksi dengan udara di sekitarnya. Pelat yang diteliti mempunyai dimensi (panjang, lebar, dan tebal) 652mm x 204mm x 9.5mm. Salah satu sisi pendek (lebar) pelat dijepit sedang sisi sisi yang lain dibiarkan bebas. Dalam studi ini metode analisis ragam diaplikasikan untuk meneliti perilaku dinamis struktur dan hasilnya digunakan untuk mendeteksi retak pada struktur yang diteliti. Pengaruh retak dengan kedalaman 2x0,794mm dan 2x2,381mm terhadap perilaku dinamis struktur diamati dengan seksama.

Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa ada pengaruh udara di sekitar struktur terhadap frekwensi alamiah; Pengaruh tersebut kurang lebih 2%. Pengaruh udara terhadap bentuk ragam struktur tidak signifikan. Akibat adanya retak, frekwensi alamiah struktur secara konsisten turun kecuali frekwensi alamiah pada ragam kedua; Ketika retak dengan kedalaman 2x0,794mm ada pada struktur, nilai frekwensi alamiah tetap. Dengan demikian perlu ekstra hati hati dalam menggunakan frekwensi alamiah guna mengidentifikasi retak (kerusakan) pada struktur. Prosentase penurunan frekwensi alamiah pada ragam yang diteliti maksimum adalah sebesar 2,4%.

Niai bentuk/vektor ragam proporsional dengan nilai puncak fungsi response frekwensi. Nilai vektor ragam relatif tidak berubah pada pelat kondisi vakum dan di udara. Akibat adanya retak pada struktur pelat, nilai vektor ragam mengalami perubahan. Perubahan ini terlihat cukup signifikan pada daerah terjadinya retak pada struktur terutama pada ragam dengan frekwensi tinggi.

6. DAFTAR ACUAN

- ABAQUS User Manual ver. 6.4, 2004. Hibbit, Karlson and Sorrensen, Inc
- Gounaris, G.D., dan Papadopoulos, C.A. 1997. *Analytical and Experimental Crack Identification of Beam Structures in Air or in Fluid*. Computers and Structures, Vol. 65, 633-39.
- Lindholm, U.S.Kana, D.D., Chu, W., and Abramson, H. N.,1965. *Elastic Vibration Characteristics of Cantilever Plates in Water*, Journal of Ship Research, Juni, 11-22.
- Maia, N.M.M. dan Silva, J.M.M. 1997. *Theoretical and Experimental Modal Analysis*. Research Studies Press LTD.
- Muthuveerappan, G., Ganesan, N., Veluswami, M.A. 1979. *A Note on Vibration of A Cantilever Plate Immersed in Water*. Journal of Sound and Vibration, Vol 63(3), 385-391.
- Muthuveerappan, G., Ganesan, N., Veluswami, M.A. 1980. *Influence of Fluid Added Mass on the Vibration Characteristics of Plates under Various Boundary Conditions*. Journal of Sound and Vibration, Vol 69(4), 612-615.
- Richardson, M.H., Mannan, M.A., 1991. *Determination of Modal Sensitivity Functions for Location of Structural Faults*. Proceedings of the 9th International Modal Analysis Conference, Firenze Incontra, Centro Affari, Florence, Itali, 670-676