

PERHITUNGAN PERAMBATAN RETAK PADA LAP-JOINT DENGAN METODE *FINITE ELEMENT ALTERNATING*

Dibyio Legowo, Husen Juarsa, Adirakhmantyo P.H.
Staf Divisi Penelitian dan Pengembangan Dirgantara P.T. IPTN

Utama H. Padmadinata
Direktur Teknologi Material BPPT

Djoko Suharto
Guru Besar Madya Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Bandung

Ringkasan

Metode *finite element alternating* (FEAM) merupakan salah satu metode untuk menentukan faktor intensitas tegangan pada kasus retak berganda. Metode ini merupakan gabungan dari metode *finite element* dan solusi analitis untuk kasus retak pada pelat dengan lebar tak berhingga. Penelitian yang dilakukan merupakan penelitian lanjutan yang diterapkan untuk kasus khusus yaitu sambungan susun (*lap-joint*) yang merupakan salah satu sambungan penting pada struktur pesawat terbang. Untuk itu pada penelitian ini metode *finite element alternating* dikembangkan untuk geometri pelat berlubang. Penelitian yang dilakukan meliputi pemeriksaan program FEAM pada kasus pelat dengan satu lubang, pelat dengan beberapa lubang dan sambungan susun (*lap-joint*) untuk menghitung faktor intensitas tegangan (K_I). Hasil perhitungan K_I ini kemudian digunakan untuk perhitungan perambatan retak pada sambungan susun tersebut.

Keyword : Metode *finite element alternating* (FEAM) , multi retak, *lap-joint*

1. PENDAHULUAN.

Metode *finite element alternating* (FEAM) merupakan salah satu alternatif metode perhitungan K_I untuk kasus dimana solusinya tidak tersedia pada *handbook* atau bila metode-metode praktis tidak memberikan solusi yang memadai. Metode *finite element alternating* banyak diaplikasikan untuk berbagai kasus rumit seperti kasus *multiple-site damage* pada struktur pesawat [1], kasus *multiple cracks* pada pelat dengan beban momen lentur [2], kasus retak tiga dimensi [3], serta kasus retak dengan kondisi elastis-plastis [4].

FEAM merupakan kombinasi metode *finite element* dengan solusi analitik. Metode *finite element* digunakan untuk menentukan distribusi tegangan di lokasi retak, tanpa memodelkan retak. Faktor intensitas tegangan dihitung dengan menggunakan solusi analitis dengan menganggap lebar pelat tak berhingga. Gaya-gaya residu di batas pelat dikoreksi dengan melakukan proses iterasi.

Penelitian ini merupakan lanjutan dari penelitian sebelumnya dimana telah dikembangkan perangkat lunak untuk perhitungan faktor intensitas tegangan pada kasus multi retak segaris dengan menggunakan fungsi tegangan

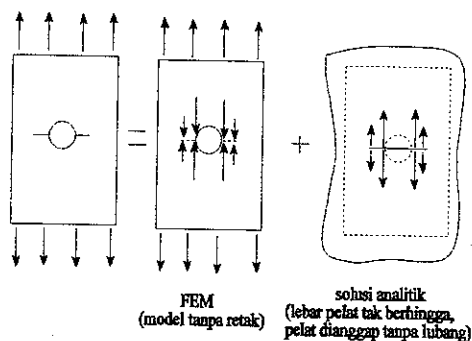
Westergard dan Muskhelishvili sebagai solusi analitis [5]. Program FEAM ini kemudian digabungkan dengan program prediksi perambatan retak sehingga dapat dilakukan analisis *damage tolerant* pada kasus *multiple-site damage* (MSD) di *fuselage* [6,7]. Pada penelitian lanjutan program FEAM dikembangkan untuk geometri pelat berlubang dimana retak terjadi di pinggir lubang. Tujuan penelitian ini adalah memeriksa ketelitian hasil FEAM untuk kasus retak pada pelat berlubang. Karena solusi analitis pada FEAM berlaku untuk pelat tanpa lubang maka pada kasus pelat berlubang dilakukan penyederhanaan. Teknik untuk menerapkan FEAM pada kasus retak pada pelat berlubang akan dibahas, selain itu juga dibahas aplikasi FEAM untuk analisis perambatan retak pada *lap-joint*. Untuk memeriksa hasil perhitungan faktor intensitas tegangan, dilakukan perbandingan dengan metode analitik, metode *energy release rate* (ERR), hasil pengukuran dan beberapa metode lain. Pemeriksaan dilakukan untuk kasus pelat dengan satu lubang, beberapa lubang serta untuk sambungan susun (*lap-joint*). Hasil perhitungan faktor intensitas tegangan pada *lap-joint* kemudian digunakan untuk perhitungan perambatan retak pada beban amplitudo konstan dengan menggunakan perangkat lunak yang telah dikembangkan [7].

2. ALGORITMA FEAM UNTUK PELAT BERLUBANG.

FEAM merupakan kombinasi dari metode elemen hingga dan metode analitik. Algoritma dan strategi pemrograman komputer FEAM pada kasus pelat tanpa lubang telah dibahas secara terperinci pada referensi [5]. Pada prinsipnya algoritma FEAM untuk pelat berlubang sama dengan untuk kasus pelat tanpa lubang. Modifikasi perlu dilakukan karena solusi analitik yang digunakan adalah untuk kasus pelat dengan lebar tak berhingga tanpa lubang. Untuk memecahkan masalah retak pada pelat berlubang dilakukan pendekatan sebagai berikut:

- Perhitungan distribusi tegangan di lokasi retak dengan menggunakan FEM dilakukan dengan membuat model pelat beserta lubangnya (tanpa retak).
- Perhitungan K_I dilakukan dengan menggunakan solusi analitik untuk kasus retak pada pelat tak berlubang (lebar pelat tak berhingga) dengan menganggap diameter lubang sebagai bagian dari retak. Untuk kasus ini digunakan fungsi tegangan Muskhelishvili karena hasilnya lebih teliti dari fungsi tegangan Westergard [8].
- Proses iterasi dilakukan untuk mengoreksi beban sisa yang bekerja pada sisi pelat.

Penyederhanaan geometri yang dilakukan untuk solusi analitik adalah menganggap pelat tanpa lubang. Teknik FEAM untuk menyelesaikan retak pada pelat berlubang ditunjukkan pada Gambar 1. Teknik yang berbeda telah dilakukan oleh peneliti lain [9] yaitu dengan melakukan koreksi beban di pinggir semua lubang di samping koreksi beban pada sisi pelat.



Gambar 1. Teknik FEAM untuk menyelesaikan retak pada pelat berlubang.

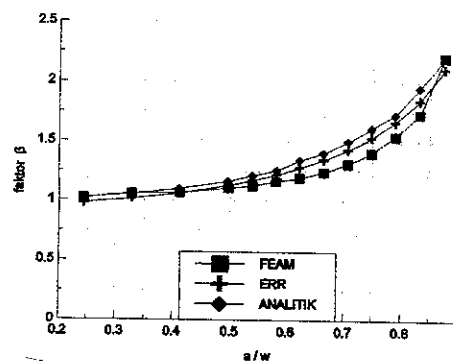
3. KASUS RETAK PADA PELAT DENGAN SATU LUBANG.

Untuk melihat pengaruh penyederhanaan terhadap ketelitian hasil, maka dilakukan pemeriksaan pada kasus sederhana yaitu retak pada pelat dengan satu lubang dengan beban merata. Perbandingan hasil perhitungan faktor β (faktor intensitas tegangan yang telah dinormalisir) antara program FEAM versi Muskhelishvili, metode *energy release rate* (ERR) dan solusi analitik K_I dari referensi [10] ditunjukkan pada Gambar 2 dan Tabel 1. Dari hasil perbandingan ini dapat dilihat bahwa perbedaan maksimum perhitungan faktor β terhadap referensi [10] sebesar 12,7%. Meskipun FEAM versi Muskhelishvili memberikan

hasil yang dekat untuk kasus pelat tanpa lubang, tetapi untuk kasus pelat berlubang memberikan beda yang cukup besar yang mungkin disebabkan adanya kontribusi dari penyederhanaan lubang sebagai retak.

Tabel 1. Perbandingan hasil perhitungan faktor β antara program FEAM versi Muskhelishvili, metode *energy release rate* (ERR) dan solusi analitik K_I dari referensi [10].

a/w	faktor β			Δ (%)	
	analitik	ERR	FEAM	ERR	FEAM
0.244	1.02	0.9779	1.021	-4.127	0.098
0.328	1.055	1.0163	1.0578	-3.668	0.2654
0.412	1.1	1.0609	1.0644	-3.555	-3.236
0.496	1.16	1.1279	1.1058	-2.767	-4.672
0.538	1.21	1.1704	1.1245	-3.273	-7.066
0.58	1.255	1.2199	1.1616	-2.797	-7.442
0.622	1.34	1.2778	1.1946	-4.642	-10.85
0.664	1.4	1.3463	1.2423	-3.836	-11.26
0.706	1.5	1.429	1.311	-4.733	-12.6
0.748	1.61	1.5316	1.4058	-4.87	-12.68
0.79	1.726	1.6637	1.5445	-3.61	-10.52
0.832	1.951	1.844	1.7268	-5.495	-11.49
0.874	2.2	2.1103	2.205	-4.077	0.2273



Gambar 2. Perbandingan hasil perhitungan faktor β antara program FEAM versi Muskhelishvili, metode *energy release rate* (ERR) dan solusi analitik K_I dari referensi [10].

4. KASUS RETAK PADA PELAT DENGAN MULTI LUBANG.

Validasi program FEAM untuk kasus pelat dengan multi lubang dilakukan pada beberapa bentuk geometri sebagai berikut:

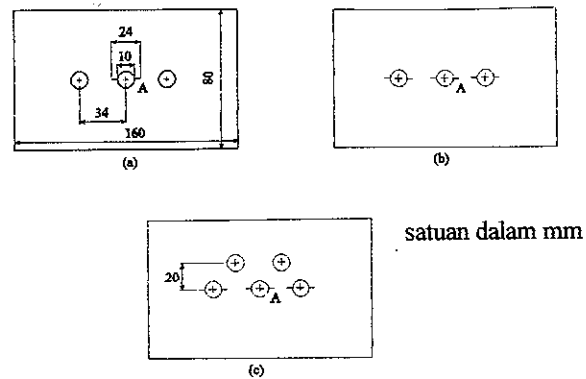
- Pelat dengan tiga lubang berderet segaris dan retak terdapat pada kedua sisi lubang yang di tengah.
- Pelat dengan tiga lubang berderet seperti kasus sebelumnya tetapi dengan retak pada tiap sisi lubang.
- Pelat dengan lima lubang.

Geometri dari ketiga kasus di atas ditunjukkan pada Gambar 3. Untuk ketiga kasus di atas geometri dipilih sedemikian rupa sehingga sama dengan geometri spesimen uji pengukuran faktor intensitas tegangan dengan menggunakan K gage yang telah dilakukan oleh peneliti

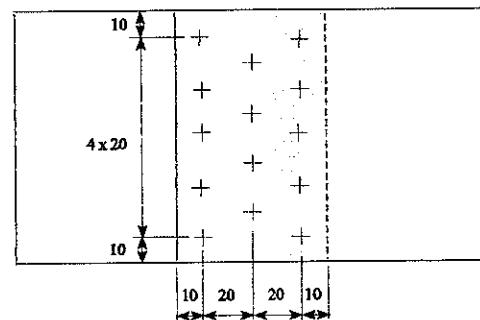
lain [11]. Material yang digunakan adalah pelat Al2024 dengan ketebalan 1,92 mm. Pengujian hanya mengukur K_I di ujung retak sebelah kanan pada retak yang ditengah (ujung retak A). Perhitungan K_I dengan program FEAM juga hanya dilakukan pada lokasi yang sama. Pada analisis dengan FEAM dianggap beban terdistribusi merata sebesar 52,08 MPa sesuai dengan beban yang diberikan pada pengujian. Hasil perhitungan K_I dengan menggunakan beberapa metode untuk ketiga kasus ditunjukkan pada Tabel 2. Dari hasil yang diperoleh terlihat beda antara FEAM versi Muskhelishvili dengan hasil pengukuran K gage berbeda-beda untuk tiap kasus, dengan beda terbesar terjadi pada kasus ke dua (pelat dengan tiga lubang dengan retak di tiap lubang) sebesar 3,8 %. Perbedaan maksimum antara FEAM versi Muskhelishvili dengan metode *energy release rate* (ERR) sebesar -11,37 % untuk kasus pelat dengan tiga lubang dengan retak hanya pada lubang tengah. Karena pada kasus ini solusi analitik tidak tersedia, maka validasi sulit dilakukan. Meskipun demikian dari perbandingan beberapa metoda ini terlihat hasil FEAM berada di dalam sebaran harga K_I .

5. KASUS MULTI RETAK PADA LAP-JOINT.

Sambungan susun (*lap-joint*) banyak digunakan di badan pesawat (*fuselage*) untuk menyambung *skin* baik dalam arah memanjang (*longitudinal*) maupun melingkar. Oleh *Industry Committee on Widespread Fatigue Damage* di Amerika Serikat lokasi ini digolongkan sebagai salah satu lokasi yang rawan terhadap kerusakan menyebar (*wide spread fatigue damage*). Retak akan muncul di pinggir lubang paku keling, dimana beban tarik yang bekerja pada pelat akan diimbangi oleh gaya-gaya reaksi yang bekerja pada paku keling. Gambar 4 menunjukkan geometri yang dianalisis, yaitu dua pelat yang disambung dengan menggunakan tiga deretan paku keling.



Gambar 3. Tiga kasus pelat dengan multi retak pada multi lubang.



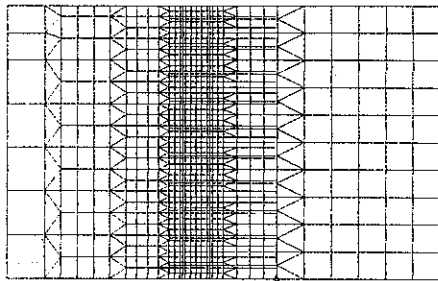
Gambar 4. Geometri *lap-Joint*

Tabel 2. Harga faktor intensitas tegangan di ujung retak A dari beberapa metode pada kasus pelat dengan multi lubang.

kasus	faktor intensitas tegangan mode I (K_I) MPa $\sqrt{m}$					perbedaan harga K_I (%)	
	K-gage (eksperimental) [11]	FEAM	ERR	compounding [11]	BEM* [11]	K-gage dgn FEAM	FEAM dgn ERR
	11.2	10.99	12.24	10.86	11.3	1.43	-11.37
	12.9	12.41	13.26	13.16	13.07	3.8	-6.84
	12.2	12.165	12.25	-	14.35	0.57	-0.69

*BEM - Boundary Element Method

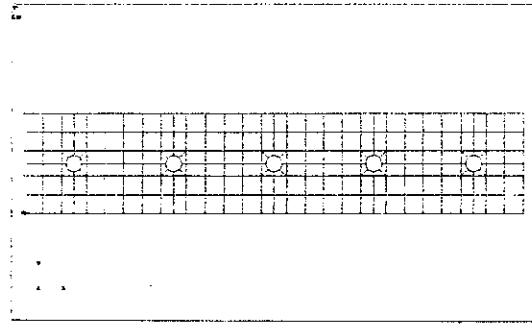
Analisis kasus multi retak pada *lap-joint* dibagi menjadi tiga tahap pemodelan, yaitu model global, *intermediate*, dan lokal [7]. Model elemen hingga untuk analisis global ditunjukkan pada Gambar 5. Pada model global, pelat dimodelkan dengan elemen pelat dua dimensi dengan dua derajat kebebasan di tiap titik nodal, dan paku keling dimodelkan dengan elemen pegas. Beban yang diterapkan pada model yaitu beban seragam sebesar 10 N/mm². Penyederhanaan yang dilakukan adalah menganggap kedua pelat yang disambung seolah-olah berada dalam satu bidang. Dengan pemodelan ini maka efek momen lentur yang terjadi tidak diperhitungkan.



Gambar 5. Model global *lap-joint*.

Geometri untuk model *intermediate* ditunjukkan pada Gambar 6. Pada tahap ini hanya dimodelkan satu pelat dengan satu deret lubang paku keling. Lokasi pada *lap-joint* dimana dilakukan pemodelan tahap *intermediate* ditunjukkan oleh daerah abu-abu pada Gambar 4. Paku keling dimodelkan dengan beberapa elemen *rod* (batang tarik-tekan) yang melingkar pada lubang paku keling sehingga menyerupai jeruji roda sepeda. Bagian jeruji yang mendapat beban tarik dihilangkan sehingga yang tersisa hanya bagian yang mendapat beban tekan saja. Pelat dimodelkan dengan elemen pelat dengan dua derajat kebebasan. Pada tepi pelat bekerja gaya yang besarnya diperoleh dari hasil analisis model global, sedangkan tumpuan diletakkan pada titik tengah paku keling. Karena pada model global paku keling mengalami perpindahan, maka tumpuan pada model *intermediate* juga diberikan beban berupa perpindahan sesuai dengan hasil analisis model global.

Model lokal untuk kasus multi retak pada *lap-joint* sama dengan model *intermediate* (Gambar 6) kecuali elemen *rod* untuk memodelkan paku keling diganti dengan gaya-gaya yang bekerja pada permukaan lubang paku keling. Validasi perhitungan faktor intensitas tegangan dilakukan dengan menggunakan metode *energy release rate* sebagai metode pembandingan. Perbandingan harga K_I antara hasil FEAM dengan *energy release rate* ditunjukkan pada Tabel 3. Kurva hasil perhitungan K_I program FEAM dan *energy release rate* untuk ujung retak A, B dan C ditunjukkan pada Gambar 7 sampai dengan Gambar 9. Dari Tabel 3 terlihat bahwa untuk retak yang panjang ($2a/d$ lebih besar dari 0,496) baik FEAM maupun metoda ERR memiliki kecenderungan yang sama yaitu faktor β terbesar di ujung retak A disusul B dan C. Dari hasil perhitungan terlihat beda maksimum sebesar 13,2 %.

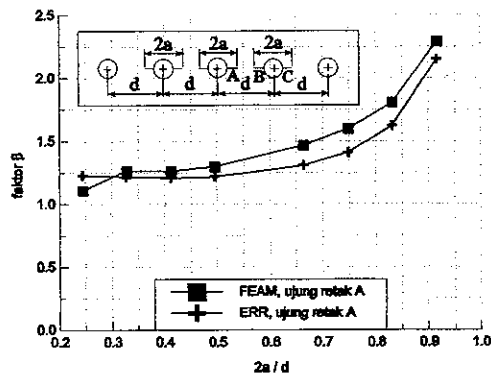


Gambar 6. Model *intermediate lap-joint*.

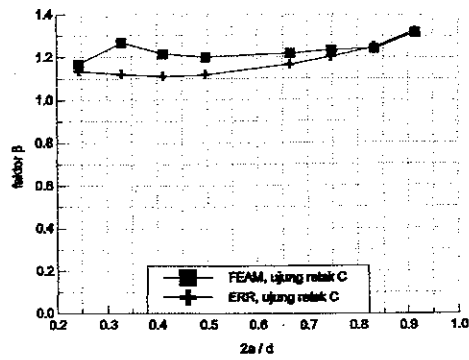
6. PERAMBATAN RETAK PADA LAP-JOINT.

Perhitungan perambatan retak pada *lap-joint* dilakukan setelah melalui tahap analisis model global dan *intermediate* seperti pembahasan di atas. Hasil perhitungan perambatan retak yang diperoleh akan dibandingkan dengan hasil eksperimen [12]. Baik ukuran maupun beban pada model global disesuaikan dengan geometri spesimen uji. Geometri dari spesimen ditunjukkan pada Gambar 10 yaitu berupa dua pelat Al 2024 T3 yang disambung dengan dua deret paku keling dengan lima paku keling tiap deret. Lebar pelat 104 mm, tebal 1,4 mm dan beban tarik diberikan sebesar 10,5 kN. Model *intermediate* diambil dari deretan paku keling dengan beban paling kritis yaitu deretan pertama seperti ditunjukkan oleh daerah gelap pada Gambar 10. Model *intermediate* untuk kasus ini sama dengan kasus validasi K_I seperti ditunjukkan pada Gambar 6 kecuali beban-beban pada batas pelat dan perpindahan pada paku keling berbeda. Teknik pemodelan lokal sama dengan *lap-joint* pada Gambar 4. Perhitungan perambatan retak dilakukan dengan menerapkan konsep Elber pada persamaan Paris [8].

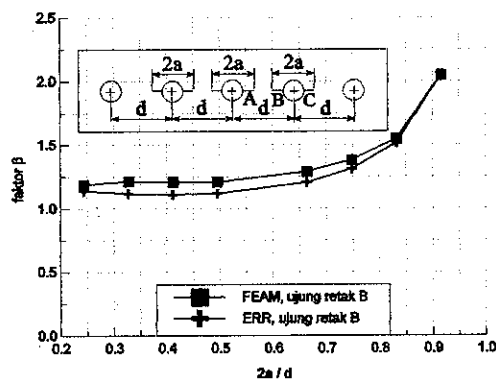
Retak dianggap mulai muncul pada tiga lubang yang ditengah dengan retak awal sepanjang 0,2 mm dari tiap sisi lubang. Hasil perhitungan perambatan retak ditunjukkan pada Gambar 11. *Link-up* terjadi pada siklus beban ke 220.000. Antara siklus beban 220.000 dan 260.000 terlihat retak telah melewati lubang paku keling yang di pinggir. Pada saat retak mencapai sisi lubang paku keling dianggap lubang paku keling sebagai retak baru. Jumlah siklus beban yang dicapai 260.000 siklus, pada siklus ini harga K_I melebihi harga K_{Ic} kritis. Hasil pengujian umur lelah pada spesimen *lap-joint* ditunjukkan pada Tabel 4. Dari tiga spesimen yang diuji terlihat bahwa spesimen memiliki umur lelah rata-rata 541.580 siklus dengan jangkauan yang sangat lebar yaitu 552.330. Jadi hasil perhitungan umur lelah dengan program FEAM (260.000 siklus) masuk dalam jangkauan hasil pengujian. Pada kenyataannya sebaran hasil pengujian umur lelah seperti terlihat pada Tabel 4 umum diperoleh karena berbagai faktor penyebab misalnya proses pengelangan dan cacat awal pada pembuatan lubang. Perhitungan teoritis tidak melibatkan faktor-faktor tersebut, oleh karena itu hasil yang diperoleh dari penelitian ini cukup baik. Sampai saat ini perhitungan teoritis selalu dipakai sebagai prediksi awal, sedangkan eksperimen diperlukan sebagai alat validasi.



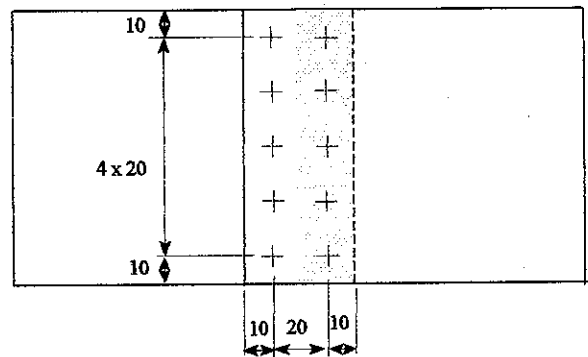
Gambar 7. Kurva hasil perhitungan K_I program FEAM dan *energy release rate* untuk ujung retak A.



Gambar 9. Kurva hasil perhitungan K_I program FEAM dan *energy release rate* untuk ujung retak C.



Gambar 8. Kurva hasil perhitungan K_I program FEAM dan *energy release rate* untuk ujung retak B.



Gambar 10. Geometri *lap-joint* untuk prediksi perambatan retak.

Tabel 3. Perbandingan faktor β untuk kasus *lap-joint* dengan tiga retak.

2a/d	FEAM			<i>energy release rate</i>			beda (%)		
	ujung A	ujung B	ujung C	ujung A	ujung B	ujung C	ujung A	ujung B	ujung C
0.244	1.107	1.187	1.168	1.227	1.138	1.135	-9.8	4.3	2.9
0.328	1.266	1.213	1.267	1.215	1.118	1.120	4.2	8.5	13.2
0.412	1.263	1.209	1.215	1.207	1.108	1.110	4.6	9.1	9.5
0.496	1.297	1.211	1.200	1.218	1.118	1.118	6.5	8.3	7.4
0.664	1.465	1.290	1.217	1.306	1.206	1.165	12.2	7.0	4.5
0.748	1.597	1.380	1.233	1.411	1.310	1.201	13.2	5.3	2.7
0.832	1.806	1.549	1.241	1.620	1.516	1.249	11.5	2.2	-0.6
0.916	2.291	2.048	1.319	2.150	2.039	1.327	6.5	0.4	-0.6

Tabel 4. Hasil pengujian umur lelah spesimen *lap-joint* dengan beban 10,5 kN [12].

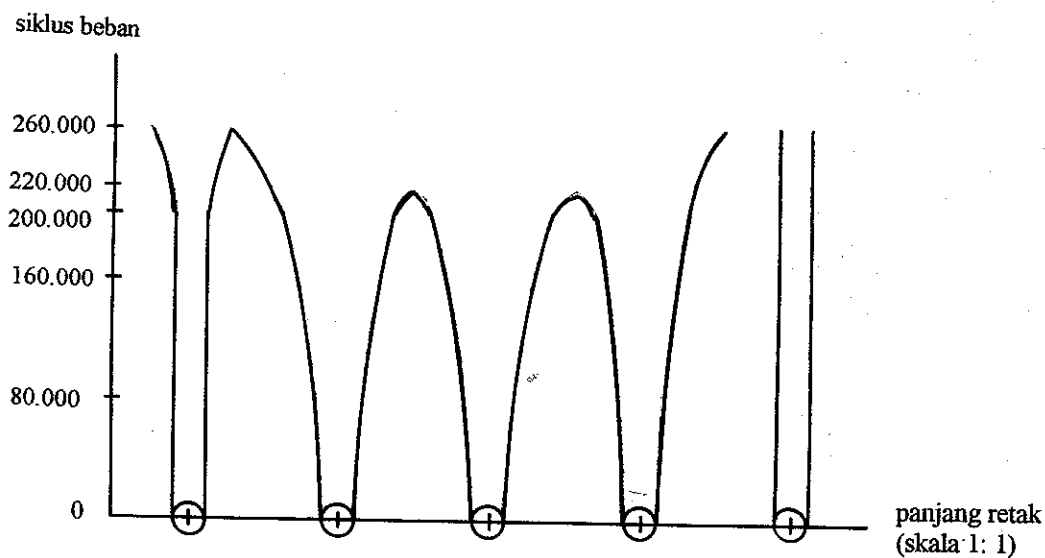
no. spesimen	umur lelah (siklus)
1	239.57
2	791.9
3	593.27
umur lelah rata-rata	541.58
jangkauan	552.33

7. KESIMPULAN.

Pada makalah ini telah ditunjukkan penggunaan metoda *finite element alternating* untuk perhitungan perambatan retak pada *lap-joint* pada kasus multi retak. Hasil prediksi dapat dinilai cukup baik mengingat bahwa hasil eksperimen

pada umumnya mempunyai sebaran dengan faktor 3 sampai 5 kali. Metoda FEAM dianjurkan untuk dipakai mengingat bahwa hasil perhitungan faktor intensitas tegangan untuk berbagai panjang retak dan perubahan distribusi beban dapat dilakukan sekaligus.

Hasil perhitungan faktor intensitas tegangan dengan FEAM dibandingkan dengan beberapa metoda lain cukup dekat, kecuali di beberapa kasus yang menunjukkan perbedaan lebih dari 10 %. Hal ini mungkin disebabkan adanya kontribusi dari penyederhanaan lubang sebagai retak. Oleh karena itu ketelitian metoda *finite element alternating* untuk menghitung K_I pada kasus pelat berlubang masih perlu diperbaiki dengan cara melakukan koreksi beban sisa pada pinggir lubang selain juga pada sisi-sisi pelat.



Gambar 11. Hasil perhitungan perambatan retak pada *lap-joint*.

Daftar Pustaka

- [1]. Singh, R., Park, J.H. and Atluri, S.N., *Residual Life and Strength Estimation of Aircraft Structural Components with MSD/MED*, FAA Center of Excellence for Computational Modelling of Aircraft Structures, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 1994.
- [2]. Chen, W.H., "A Finite Element Alternating Approach for Bending Analysis of Thin Cracked Plates", International Journal of Fracture Mechanics, vol.50, pp 93-110, 1992.
- [3]. Liao, C.Y., Atluri, S.N., "A Finite Element Alternating Method for Evaluation of Stress Intensity Factors for Part-Circular Cracks Subjected to Arbitrary Loading", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, pp 1253-1270, 1991.
- [4]. Wang, L., Brust, F.W., Atluri, S.N., *The Elastic-Plastic Finite Element Alternating Method (EPFEAM) and The Prediction of Fracture under WFD Conditions in Aircraft Structures*, FAA Center of Excellence for Computational Modelling of Aircraft Structures, Georgia Institutes of Technology, Atlanta, 1995.
- [5]. Legowo, D., Hascaryantono, A.P., Suharto, D., "Penentuan Faktor Intensitas Tegangan pada Kasus Retak Berganda dengan Menggunakan Metode Finite Element Alternating", Proceedings Experimental and Theoretical Mechanics (ETM) '97, ITB, Bandung, 1997.
- [6]. Suharto, D., Legowo, D., Juarsa, H., Hascaryantono, A.P., Nazaruddin, N., Padmadinata, U.H., Nurcahyo, A., "Penggunaan Metode Finite Element Alternating untuk Prediksi Perambatan Retak pada Kasus Multiple-Site Damage (MSD)", Proceedings Experimental and Theoretical Mechanics (ETM) '97, ITB, Bandung, 1997.
- [7]. Hascaryantono, A.P., Legowo, D., Nazaruddin, N., Juarsa, H., Padmadinata, U.H., Suharto, D., "Development of Finite Element Alternating Method for Crack Growth Calculation of MSD Cracks in Fuselage", Proceedings International Symposium on Advanced Aerospace Science and Technology in Indonesia (ISASTI) '98, Jakarta, 1998.
- [8]. Suharto, D., Legowo, D., Hascaryantono, A.P., Juarsa, H., Nazaruddin, N., Padmadinata, U.H., *Pengembangan Metoda Finite Element Alternating (FEAM) untuk Mengatasi Kerusakan Menyebar pada Struktur Pesawat Tua (Aging Aircraft)*, Laporan Riset Unggulan Terpadu (RUT), Dewan Riset Nasional, 1998.
- [9]. Park, J.H. and Atluri, S.N., "Fatigue growth of multiple-cracks near a row of fastener-holes in fuselage lap-joint", Computational Mechanics, vol. 13, pp. 189-203, 1993.
- [10]. Rooke, D.P., Cartwright, D.J., *Compendium of Stress Intensity Factors*, London Her Majesty's Stationary Offices, 1976.
- [11]. Putra, I.S., Gunawan, F.E., Dahlan, R., Purbolaksono, Y., "Numerical and Experimental Verification of Stress Intensity Factors of Multiple Cracks Starting from Open Holes", Proceedings Experimental and Theoretical Mechanics (ETM) '97, ITB, Bandung, 1997.
- [12]. Khaidir, *Test Result of N-250 Fuselage Longitudinal Lap-Joint Development Test*, Technical Document No. D554NA11015, P.T. IPTN, 1995.