

Studi Perilaku Kegagalan Sambungan Las Tipe T-Conjunctions Pada Baja Karbon Rendah Dengan Pendekatan Experimen dan Numerik

Mohammad Badaruddin

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung
Jl. Prof. Dr. Sumantri Brojonegoro No. 1, Bandar Lampung 35145
Telp. (0721)7479221, (0721)701609 ext. 221&223, Fax: (0721)702767

ABSTRACT

This research is conducted to investigate failure behavior of welding structure in T-conjunctions type. Welding joint failures were analyzed by both experimental and finite element analysis (2D) approach in terms of stress intensity factor mode I (K_I). The stress at the welding zone was strongly influenced by specimen geometries and the ratio of L/h_1 . The stress intensity factor (SIF) was increased significantly. Whereas, the minimum SIF of specimen #X₁ and #Y₃ are 58 MPa.√m and 165 MPa.√m, respectively. Failure of welding specimen was more dominated in the zone with the highest stress concentration and also affected by material discontinuity at which the stress was not generated continuously, but localized in any certain area. Specimen without welding did not yield a maximum stress. However, plastic zone formation locally decreases the stress concentration. Discontinuity in the welding specimen does not give rise to plastic stream, thus it will raise the stress concentration at the welding extension region. Discontinuity can be observed by the Von Mises stress pattern at stress welding zone for the welding specimen whereas the specimen without welding was only occurred near the extension zone.

Keywords : T-type conjunction welding, stress intensity factor (SIF), Von Misse stress

1. PENDAHULUAN

Suatu struktur komponen teknik dirancang untuk fungsi tertentu agar mampu menahan beban yang bekerja pada struktur tersebut. Sebagai contoh konstruksi jembatan harus mampu menahan beban akibat berat konstruksi itu sendiri, juga harus mampu menahan beban kendaraan yang melintasinya. Selain itu pula konstruksi harus mampu menahan gangguan yang disebabkan oleh angin, gempa, serta perubahan cuaca [1]. Gangguan dan beban yang diterima konstruksi akan menyebabkan retakan (awal terjadinya kegagalan), terutama pada bagian sambungan. Penelitian ini dilakukan untuk mempelajari dan memprediksi kegagalan yang terjadi pada struktur dengan sambungan lasan. Pada kenyataannya, suatu struktur lasan akan mengalami kegagalan setelah mengalami pembebanan statis atau pada saat siklus *fatigue* yang rendah, misalnya retak yang terjadi pada pengeboran lepas pantai,

konstruksi jembatan, dan pada struktur lainnya telah mengalami banyak siklus terutama disebabkan oleh gempa bumi [2].

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Karakteristik Sambungan Las

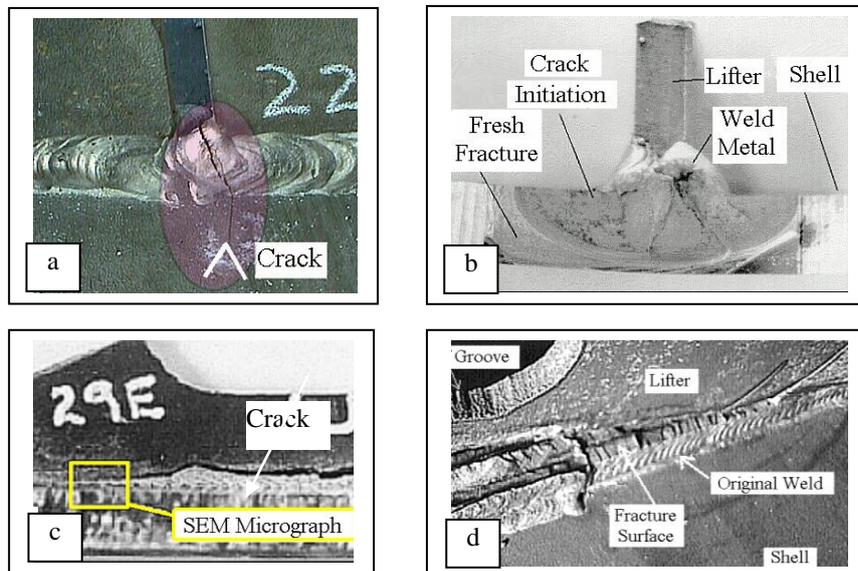
Sambungan las memiliki sifat yang lebih kuat dari pada logam dasarnya. Hal ini terjadi karena adanya perpaduan antara logam pengisi (*filler metal*) dengan logam dasar (Gambar 1a) [3–5]. Akan tetapi dalam pelaksanaannya kegagalan justru sering terjadi pada bagian sambungan lasan, bukan pada logam dasarnya. Beberapa contoh kegagalan pada sambungan lasan (Gambar 1(a–d)) [5].

Terjadinya kegagalan pada sambungan disebabkan oleh banyak hal [4] antara lain: tegangan sisa, korosi permukaan; porositi; tidak sesuainya besar arus dan elektroda yang digunakan.

2.2. Linier Elastic Fracture Mechanic (LEFM)

Material yang mengalami deformasi plastis juga akan mengalami gejala retak. Retak yang terjadi ini akibat material tidak mampu lagi menahan beban fatik yang diterima, yang mengakibatkan material tersebut patah (*fracture*). *Linier Elastic Fracture Mechanic* (LEFM) adalah suatu konsep yang digunakan dalam analisa

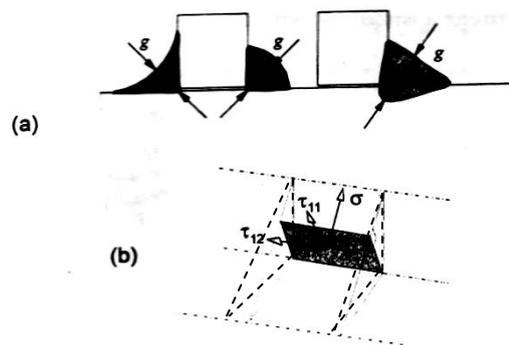
material tak stabil akibat mengalami rambatan retak [6]. Pertumbuhan retak akan menyebabkan kegagalan struktural yang dapat diprediksikan besarnya berdasarkan tegangan tarik yang terjadi pada ujung retaknya dengan menentukan nilai $K = Y\sigma\sqrt{\pi a}$, dimana σ adalah tegangan yang terjadi, a adalah setengah panjang retak, dan Y adalah konstanta geometri bukaan retak [7,8].



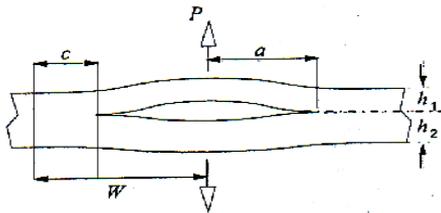
Gambar 1. Bentuk kegagalan pada sambungan las (a) retak transversal las, (b) *initial crack* pada las, (c) retak longitudinal las, dan (d) *fracture* pada HAZ sambungan [5]

2.3. Faktor Intensitas Tegangan (Stress Intensity Factor–SIF)

Logam akan semakin mengeras akibat adanya regangan plastis, tetapi hal ini tidak bisa terjadi terus menerus karena suatu material akan mengalami kegagalan setelah mengalami deformasi plastis dalam waktu tertentu. *Limit load* ditentukan untuk mengetahui batasan suatu struktur mampu menerima beban hingga mengalami deformasi plastis. *Limit load* adalah batas beban yang diijinkan untuk suatu struktur hingga struktur tersebut mengalami deformasi plastis. Desain untuk kampuh las dan distribusi tegangan geser yang terjadi ditunjukkan pada Gambar 2 [7].



Gambar 2. Desain kampuh lasan [7]



Gambar 3. Geometri model pendekatan LEFM [8]

Berdasarkan Gambar 2 dan 3 didapat rumusan semi-empiris (K_{I-SE}) untuk sambungan las [8] :

$$K_{I-SE} = \frac{\sqrt{6}}{8} P \left[\frac{4a^2(h_1^3 + h_2^3)}{(h_1 h_2)^3} + \frac{0,4 E}{h_1 G} \right]^{\frac{1}{2}} X \left\{ \frac{\tan[\pi a'/(2W)]}{\pi a'/(2W)} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

.....(1)

dengan mengumpamakan dimensi lebar W dan a' :

$$W = L + b + \left(2 - \frac{h_1}{h_2} \right) h_1, \quad a' = L + b \quad (2)$$

Gray et al. [7] mengusulkan bahwa *limit load* dapat ditentukan berdasarkan persamaan:

$$P_L = \frac{\sigma_y (h_1')^2}{2} \quad (\text{MPa.m}) \quad (3)$$

dengan $(h_1') = 0.9$ dari h_1 (m)

σ_y = tegangan luluh bahan (MPa)

3. METODELOGI PENELITIAN

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah baja karbon rendah tipe AISI 1006. Jumlah total benda uji adalah 9; enam dengan sambungan las dengan simbol #X dan #Y, sedangkan benda uji tanpa lasan (#Z) sebanyak tiga digunakan sebagai pembanding atau referensi. Ukuran dan dimensi semuanya sama untuk benda uji lasan dan tanpa lasan (Tabel 1). Bentuk dan nomenklatur benda uji uji ditunjukkan pada Gambar 4. Pembuatan alur retak pada antarmuka (*interface*) *pad*

atas dan *pad* bawah dilakukan dengan menggunakan mata pahat bor diameter (\varnothing) 1 mm pada daerah tengah benda uji T-type *conjunction* untuk benda uji tanpa lasan (Gambar 4). Sifat mekanik baja karbon rendah (*base metal*) ditentukan terlebih dahulu sebagai input data pada pendekatan numerik berdasarkan hasil uji tarik baja seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Konfigurasi benda uji (ukuran dalam mm)

No.	Kode	a	2b	L	h ₁	h ₂
1.	X ₁	40	20	30	10	10
2.	X ₂	40	20	30	8	10
3.	X ₃	40	20	30	6	10
4.	Y ₁	50	20	40	10	10
5.	Y ₂	50	20	40	8	10
6.	Y ₃	50	20	40	6	10

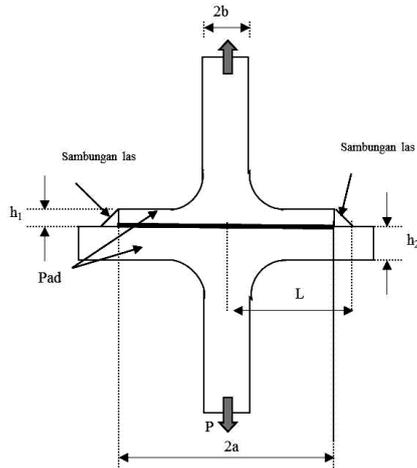
Perilaku kegagalan sambungan las dipelajari dengan melakukan pengujian uji tarik statis pada temperatur ruang dan diklarifikasi dengan menggunakan finite elemen metode. Kemudian, semua data-data yang didapat dari hasil pengujian kegagalan sambungan las dari hasil uji tarik bersama dengan hasil analisis numerik akan digunakan untuk menentukan faktor intensitas tegangan (SIF) dan menjelaskan perilaku kegagalan sambungan las tipe T-joints.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pendekatan Eksperimen

Hasil pengujian tarik pada semua benda uji ditampilkan pada Tabel 2. Grafik benda uji terhadap tegangan luluh yang dihasilkan menunjukkan penurunan kekuatan terhadap perubahan geometri dari ketebalan masing-masing benda uji. Penurunan kekuatan ini disebabkan oleh panjang *pad* ($2a$) yang berbeda untuk masing-masing benda uji. Pembebanan dihentikan ketika benda uji hampir mengalami kegagalan ketika benda uji masih mengalami kondisi elastis (masih dalam batas linier) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6. Kegagalan yang terjadi disebabkan oleh ketidak-mampuan struktur

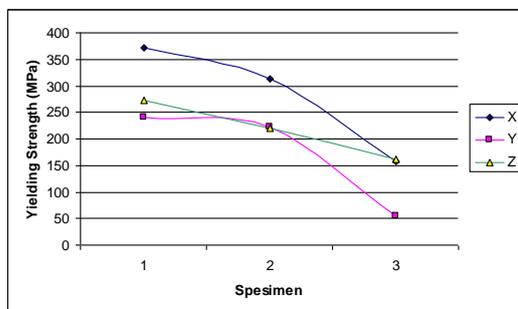
menahan beban statis yang diterima. Hal ini sesuai dengan teorema LEFM, yaitu suatu struktur akan mengalami kegagalan dalam batas elastisnya.



Gambar 4. Geometri benda uji

Tabel 2. Hasil uji tarik dari masing-masing benda uji

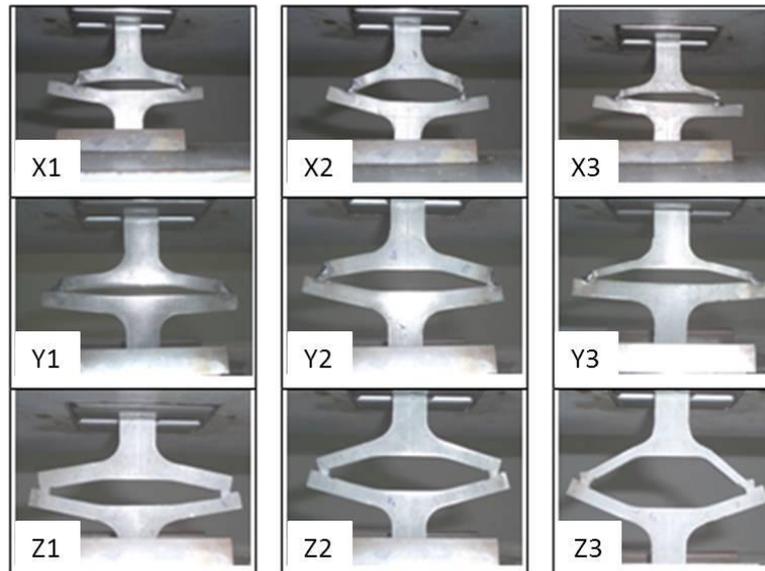
No.	Benda uji	a	2b	L	h ₁	h ₂	σ_y (MPa)
1.	X ₁	40	20	30	10	10	371.4
2.	X ₂	40	20	30	8	10	313.5
3.	X ₃	40	20	30	6	10	157.6
4.	Y ₁	50	20	40	10	10	239.7
5.	Y ₂	50	20	40	8	10	222
6.	Y ₃	50	20	40	6	10	54.8
7.	Z ₁	55	20	45	10	10	273.3
8.	Z ₂	55	20	45	8	10	220.2
9.	Z ₃	55	20	45	6	10	161.8



Gambar 6. Grafik penurunan kekuatan terhadap geometri pad

Meyers [6] menyebutkan bahwa retak (gagal) terjadi dalam kondisi bebas dan terjadi pada daerah tegangan elastis. Disebutkan juga bahwa pertumbuhan retak yang terjadi ditentukan oleh SIF (*stress intensity factor*) (K). Xu [9] menyebutkan bahwa kegagalan akibat retak (*crack failure*) sering terjadi pada konstruksi lasan ketika material sudah mengalami batas elastisnya. Hal ini disebabkan karena terjadinya konsentrasi tegangan akan terkonsentrasi pada sambungan. Tingkat perambatan retak yang terjadi pada konstruksi sambungan las dapat dievaluasi dari cakupan faktor intensitas tegangan (K). Model *fracture* yang terjadi berupa model I, yaitu model bukaan (*opening mode*). Perhitungan SIF dengan menggunakan persamaan (1) dari masing-masing benda uji dari hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 3.

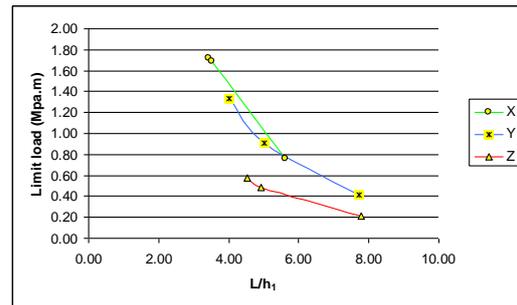
Kegagalan benda uji terjadi pada daerah sambungan las, tepatnya pada bagian yang berfusi. Emhamed et al. [10] dalam penelitiannya menjelaskan bahwa perilaku kegagalan suatu struktur lasan terjadi pada daerah sambungan. Hal ini terjadi karena sifat mekanis bahan sambungan (*weld metal*, *base metal* atau HAZ) serta bentuk geometri sambungannya. Logam akan semakin mengeras akibat adanya regangan plastis, tetapi hal ini tidak bisa terjadi terus menerus karena suatu material akan mengalami kegagalan setelah mengalami deformasi plastis dalam waktu tertentu. *Limit load* ditentukan untuk mengetahui batasan suatu struktur mampu menerima beban hingga mengalami deformasi plastis. *Limit load* adalah batas beban yang diijinkan untuk suatu struktur hingga struktur tersebut mengalami deformasi plastis yang dihitung menggunakan persamaan (2). *Limit load* pada masing-masing struktur ditunjukkan dalam Tabel 4. Gambar 8 memperlihatkan penurunan nilai *limit load* akibat peningkatan rasio L/h_1 . Hal ini berarti bahwa semakin kecil rasio L/h_1 maka struktur akan mampu menahan beban semakin besar.



Gambar 7. Perubahan kegagalan pada sambungan las hasil pengujian tarik pada benda uji lasan (#X dan #Y) dan tanpa lasan (#Z)

Tabel 3. Faktor intensitas tegangan semi-empiris

No.	Kode	K_{I-SE} (MPa. \sqrt{m})
1	X ₁	58
	X ₂	56
	X ₃	115
2	Y ₁	74
	Y ₂	89
	Y ₃	165
3	Z ₂	107
	Z ₁	105
	Z ₃	174



Gambar 8. Pengaruh geometri terhadap *limit load*

Tabel 4. Nilai *limit load* pada benda uji

Pengujian	Kode	P_{L-SE} (MPa.m)
1	X ₁	1.71
	X ₂	1.68
	X ₃	0.76
2	Y ₁	1.33
	Y ₂	0.91
	Y ₃	0.41
3	Z ₂	0.57
	Z ₁	0.49
	Z ₃	0.21

4.2. Pendekatan Numerik

Data masukan yang digunakan dalam perhitungan dengan komputasi diperoleh dari eksperimen (Tabel 6). Adapun data yang diperlukan adalah sifat mekanis dari material serta asumsi-asumsi (*poison ratio*) yang digunakan dalam menganalisa struktur (las dan non-las) (Tabel 5).

Tabel 5. Input data geometri benda uji untuk pengujian numerik struktur

No.	Benda uji	a	2b	L	h ₁	h ₂
1.	X ₁	40	20	30	10	10
2.	X ₂	40	20	30	8	10
3.	X ₃	40	20	30	6	10
4.	Y ₁	50	20	40	10	10
5.	Y ₂	50	20	40	8	10
6.	Y ₃	50	20	40	6	10
7.	Z ₁	55	20	45	10	10
8.	Z ₂	55	20	45	8	10
9.	Z ₃	55	20	45	6	10

Tabel 6. Input data sifat mekanis bahan *base metal* dan *weld metal*

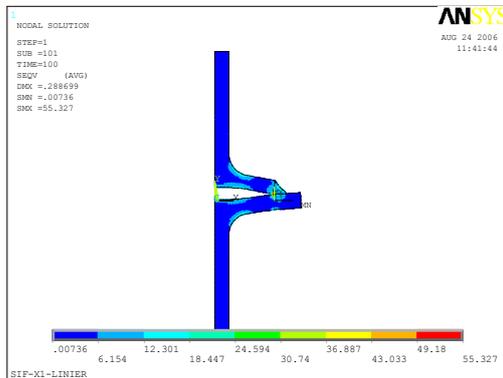
Item	Yield strength, σ_y (Mpa)	Elasticity modulus, E (GPa)	Poisson ratio, ν
Base metal	229	9,99	0,3
Weld metal	270	6,99	0,3

Tabel 7. Hasil perhitungan SIF dan *limit load*

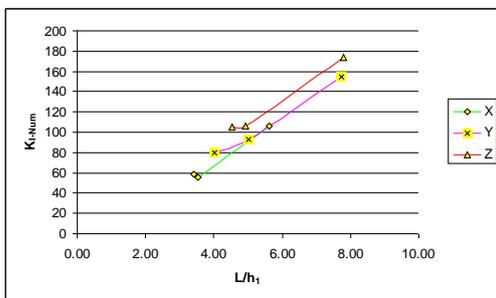
	Perhitungan	Kode benda uji								
		X ₁	X ₂	X ₂	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Z ₁	Z ₂	Z ₃
Stress Intensity Factor-SIF (MPa. \sqrt{m}).	Semi empiris	58	56	115	74	89	165	107	105	174
	Numerik	59	55.70	106	80	93.07	154.8	105.22	106.43	173.6
	Error (%)	1.73	0.04	7.88	8.04	4.82	6.24	2.07	1.59	0.04
Limit Load (MPa.m)	Semi empiris	1.71	1.68	0.76	1.33	0.91	0.41	0.57	0.49	0.21
	Numerik	1.75	1.75	0.75	1.35	0.95	0.40	0.55	0.50	0.20
	Error (%)	2.21	3.94	1.64	1.19	4.48	2.94	3.84	2.19	5.25

Hasil lengkap komputasi ditampilkan pada Tabel 7. Variasi kesalahan (*error*) yang terjadi antara K_{L-SE} vs K_{L-Num} sangat beragam, yaitu antara 0,04–8,04 % dan untuk P_{L-SE} vs P_{L-Num} antara 1,19–5,25 %. Keberagaman *error* yang dihasilkan bisa disebabkan karena berbagai hal, antara lain karena diskontinuitas struktur lasan, porositas yang terbentuk pada lasan, dan tebalnya lintasan retak yang dibuat pada benda uji tanpa lasan. Analisa hanya dilakukan pada setengah bagian karena struktur dianggap simetris, dimana separuh bagian lainnya sudah terwakili oleh bagian lainnya (Gambar 9). Pada gambar di atas terlihat bahwa konsentrasi tegangan berada di daerah lasan, yang ditunjukkan melalui perubahan warna Tegangan tertinggi ditunjukkan pada bagian yang berwarna merah. Konsentrasi tegangan yang terjadi adalah dalam arah transversal

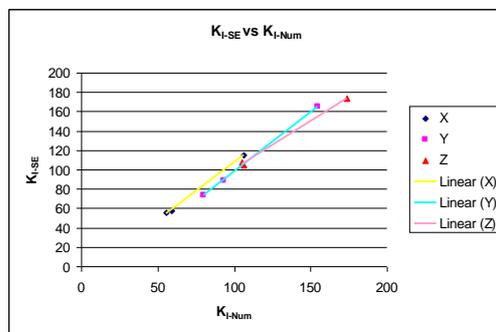
dari lasan (ditunjukkan dalam panah merah). Grafik hubungan antara rasio L/h_1 dengan factor intensitas tegangan dari hasil numerik ditunjukkan pada Gambar 10. Semakin besar nilai rasio L/h_1 , nilai faktor intensitasnya semakin meningkat. Sebagaimana tinjauan pada Gambar 11, kurva antara factor intensitas tegangan yang diperoleh dari hasil pengujian tarik dengan hasil numerik menunjukkan kecenderungan yang sama. Ini menunjukkan bahwa hasil yang diperoleh dari eksperimen dengan numerik menunjukkan tingkat keakuratan yang tinggi. Hal yang sama juga dapat diamati dari Gambar 12, dimana batas beban (*limit load*) menunjukkan korelasi yang sama dari hasil pengujian (experiment dan numeric). Ini membuktikan bahwa metode numerik bisa digunakan untuk memprediksi kegagalan dari sambungan las untuk *T-type conjunctions*.



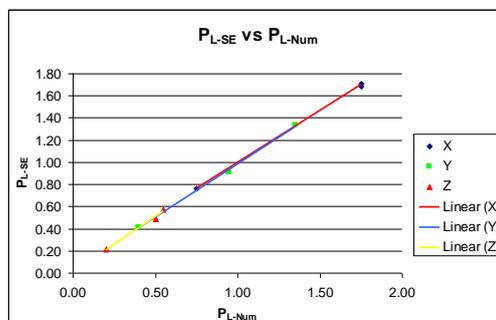
Gambar 9. Diagram von-mises pada struktur X_1



Gambar 10. Pengaruh geometri *pad* terhadap faktor intensitas tegangan-SIF



Gambar 11. Grafik K_{I-SE} vs K_{I-Num}



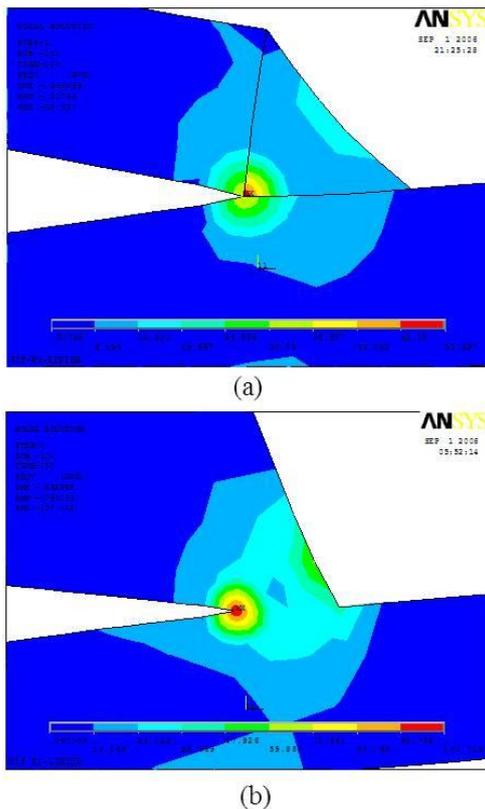
Gambar 12. Grafik P_{L-SE} vs P_{L-Num}

Dari gambar Gambar 13 dan 14 dapat dilihat bahwa terjadi perbedaan yang mendasar antara dua jenis benda uji yang berbeda. Arah kegagalan pada benda uji non lasan cenderung sejajar pada pad bagian bawah sedangkan untuk benda uji lasan kegagalan yang terjadi dalam arah transversal sambungan las. Pola tegangan von-mises yang terjadi juga berbeda, untuk benda uji non lasan memiliki pola tegangan von-mises yang melingkar dalam arah *crack opening*-nya dan berbeda untuk benda uji lasan. Untuk benda uji lasan, pola tegangan von-mises yang terjadi hanya terkumpul di bagian lasan (*crack opening side*). Pada Gambar 9 dan 13(a) terlihat jelas bahwa benda uji las (*non homogen*) memiliki pola tegangan von mises yang membentuk seperempat lingkaran. Hal ini berbeda dengan tegangan von mises pada benda uji non las (Gambar 13b) yang membentuk pola lingkaran. Pada sambungan las terjadi konsentrasi tegangan yang terpusat (tidak tersebar ke seluruh bagian) yang mendorong terjadinya kegagalan sambungan karena sifat diskontinuitas bahan. Pada sambungan homogen, tegangan Von Mises membentuk pola lingkaran karena tegangan maksimum yang terkonsentrasi akan diteruskan secara plastis ke seluruh bagian hingga mengurangi intensitas tegangan pada sambungan.

4.3. Pembahasan

Benda uji uji memperlihatkan kekuatan yang bervariasi. Kekuatan sambungan sangat dipengaruhi oleh bentuk geometri benda uji, dimana L/h_1 terkecil yang memiliki nilai intensitas tegangan (SIF) dan *limit load* yang terjadi akan semakin besar. Kondisi minimum SIF non homogen terjadi pada benda uji X_1 , yaitu $58 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ dan mempunyai nilai *limit load* maksimum benda uji yaitu $1,71 \text{ MPa}\cdot\text{m}$. Sedangkan kondisi maksimum SIF terjadi pada limit load terkecil, yaitu pada benda uji Y_3 . SIF yang terjadi sebesar $165 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ dan limit load sebesar $0,41 \text{ MPa}\cdot\text{m}$. Penyimpangan yang terjadi antara nilai-nilai empiris dengan nilai numerik tidak terlalu besar ($\text{SIF} = 0,04\text{--}8,04\%$ dan *limit load* = $1,19\text{--}5,25\%$).

Berdasarkan penjelasan di atas dapat diketahui bahwa pada benda uji non homogen (sambungan las) memiliki perilaku kegagalan yang berbeda dengan benda uji homogen (tanpa sambungan) yang signifikan ditentukan oleh nilai SIF. Benda uji lasan memiliki nilai yang lebih rendah dari pada benda uji tanpa lasan. Sedangkan berdasarkan nilai *limit load*, benda uji lasan memiliki nilai yang besar dari pada benda uji tanpa lasan. Hal ini memperlihatkan bahwa struktur yang memiliki sifat yang seragam lebih mampu bertahan dalam waktu yang cukup lama daripada struktur yang tidak seragam (untuk karakter pembebanan yang sama). Kejadian ini disebabkan oleh ketidakmampuan sambungan las dalam menerima beban akibat sifat sambungan yang cukup getas (diperlihatkan oleh SIF yang cukup rendah).

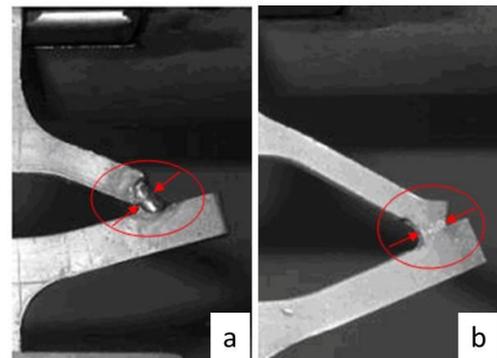


Gambar 13. Diagram Von-Misses benda uji : (a) las dan (b) tanpa las

Kegagalan terjadi pada konsentrasi

tegangan tertinggi, yaitu terjadi di daerah pemusatan tegangan (daerah sambungan). Kegagalan juga bisa disebabkan karena adanya diskontinuitas bahan, artinya tegangan yang terjadi tidak diteruskan secara merata pada seluruh bagian tetapi hanya terpusat pada satu daerah tertentu. Pada benda uji tanpa lasan (homogen), konsentrasi tegangan dapat diabaikan karena bahan di titik tegangan maksimum mengalami luluh dan aliran plastis akan terjadi yang menyebabkan pengurangan intensitas konsentrasi tegangan. Benda uji dengan sambungan las (non homogen) memiliki sifat diskontinuitas bahan yang menyebabkan aliran plastis tidak terjadi sehingga meningkatkan nilai intensitas konsentrasi tegangan pada sambungan tersebut dimana kegagalan terjadi dalam arah transversal sambungan las (Gambar 13a dan 14a).

Perilaku kegagalan dan sifat diskontinuitas dapat dilihat pada pola tegangan von mises yang terjadi, pada benda uji lasan tegangan hanya terkonsentrasi pada sambungan (Gambar 13a), sedangkan pada benda uji tanpa lasan tegangan tersebar ke seluruh bagian dekat sambungan (*pad* atas, sambungan dan *pad* bawah, lihat Gambar 13b) serta pola kegagalan yang terjadi cenderung sejajar pada *pad* bawah (Gambar 13b).



Gambar 14. Kegagalan pada sambungan : (a) lasan (b) non lasan

5. KESIMPULAN

1. Kegagalan pada benda uji dengan sambungan las terjadi dalam arah

- transversal sedangkan kegagalan pada benda uji tanpa sambungan las terjadi dalam arah yang cenderung sejajar dengan pad bawah.
2. Benda uji dengan sambungan las memiliki nilai SIF lebih kecil dari pada benda uji tanpa sambungan las dan benda uji dengan sambungan las memiliki nilai *limit load* yang besar dari pada benda uji tanpa sambungan las.
 3. Kemampuan benda uji untuk menahan beban sangat bergantung pada geometri pad struktur (L/h_1) karena besarnya SIF dan *limit load* bergantung dengan rasio L/h_1 , dimana SIF berbanding lurus dengan L/h_1 dan *limit load* berbanding terbalik dengan L/h_1 .
 4. Konsentrasi tegangan yang terjadi pada benda uji dengan sambungan las memiliki pola seperempat lingkaran karena tegangan maksimumnya tidak tersebar ke seluruh bagian dekat *crack tip*-nya melainkan hanya terpusat pada sambungan las saja. Sedangkan benda uji tanpa sambungan las memiliki pola konsentrasi tegangan yang melingkar di sekitar bagian *crack tip*.
- Behavior of Materials. Prentice Hall. New Jersey.
- [7] Gray, T.G.F. et al. 2000. Structural Integrity of Welded Attachment Junction: Analysis and Collapse Tests. Journal of Strain Analysis For Engineering Design. UK
 - [8] Fichter, W.B., 1983. The Stress Intensity Factor For The Double Cantilever Beam. International Journal Fracture, Vol. 22.
 - [9] Xu Kai., Lu Yong dan S.T. Lie, 2004. Analysis of non-loading carrying fillet welds joint using SGBEM. International Journal of Fracture 129: 149–159.
 - [10] Emhamed Argoub, 2005. Limit load solution for mismatched welded plate and pressure vessel with a surface crack. Theoret. Appl. Mech., Vol.32, No.2, pp. 97-112.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Zdravko P and Masao Toyoda, 2001, Fracture properties of high strength low alloy steels under dynamic loading, International Conference 39th, Experimental Stress Analysis, Tabor Czech Republic, pp. 46-52.
 - [2] Tateishi T and Hanjin T, 2003, Low cycle fatigue strength of steel in extremely large strain field, Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, JSCE 591, Vol.I(43), pp. 243-261.
 - [3] Wiryosumarto H, Okumura T, 1996. Teknologi Pengelasan Logam. Pradnya Paramitha. Jakarta.
 - [4] Sriwidharto, 1987. Petunjuk Kerja Las. Pradnya Paramitha. Jakarta.
 - [5] <http://www.resnapshot.com/default.htm>. Tanggal akses 5 Juni 2006.
 - [6] Meyers M. A. 1999. Mechanical
-