

PREDIKSI SIKLUS KELELAHAN SAMBUNGAN LAS *BUTT JOINT* BERBANTUAN PERANGKAT LUNAK *e-Fatigue*

Darto¹, Heris Pamuntjar²

Abstraksi

Industri modern suatu perancangan bisa dianggap memenuhi syarat jika perancangan tersebut salah satunya adalah memenuhi kriteria tingkat kelelahan yang tinggi. Artinya perancangan tersebut mempunyai tingkat kelelahan terhadap beban statis maupun dinamis yang cukup lama dalam proses kerjanya. Tingkat kelelahan suatu perancangan tersebut harus dihitung dengan cepat dan benar. Untuk melakukan hal tersebut haruslah dibantu dengan perangkat lunak sehingga akan dapat menghasilkan luaran perhitungan secara cepat dan benar. Berdasarkan latar belakang yang telah disebutkan di atas maka muncul permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini. Adapun permasalahan tersebut adalah bagaimana peneliti bisa menghitung tingkat kelelahan dari suatu sambungan las yang bertipe *butt joint* dengan bantuan perangkat lunak *e-Fatigue*. Berdasarkan hasil simulasi perhitungan kelelahan sambungan las tipe *butt joint* dengan berbantuan perangkat lunak *e-Fatigue* maka dapat disimpulkan bahwa sambungan tersebut bisa bertahan sampai dengan 12000 siklus dengan beban sebesar 400 MPa.

Kata Kunci : Kelelahan, *Butt Joint*, *e-Fatigue*

PENDAHULUAN

Dalam industri modern suatu perancangan bisa dianggap memenuhi syarat jika perancangan tersebut salah satunya adalah memenuhi kriteria tingkat kelelahan yang tinggi. Artinya perancangan tersebut mempunyai tingkat kelelahan terhadap beban statis maupun dinamis yang cukup lama dalam proses kerjanya.

Tingkat kelelahan suatu perancangan tersebut harus dihitung dengan cepat dan benar. Untuk melakukan hal tersebut haruslah dibantu dengan perangkat lunak sehingga akan dapat menghasilkan luaran perhitungan secara cepat dan benar.

Berdasarkan yang tersebut di awal paragraf maka peneliti melakukan suatu proses penelitian dengan titik tinjau bagaimana implementasi perangkat lunak dalam proses perhitungan kelelahan pada

sambungan las tipe *butt joint*. Pemilihan materi tersebut tidak terlepas dari banyaknya aplikasi sambungan las dalam berbagai aspek perancangan di bidang teknik mesin.

Berdasarkan latar belakang yang telah disebutkan di atas maka muncul permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini. Adapun permasalahan tersebut adalah bagaimana peneliti bisa menghitung tingkat kelelahan dari suatu sambungan las yang bertipe *butt joint* dengan bantuan perangkat lunak *e-Fatigue*.

KAJIAN PUSTAKA

Kelelahan atau *fatigue* adalah kerusakan struktural progresif dan lokal yang terjadi ketika material yang dikenai beban berulang. Nilai tegangan nominal maksimum kurang dari batas tegangan tarik utama, dan mungkin di bawah batas tegangan luluh bahan.

¹ Dosen Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Merdeka Malang

² Dosen Jurusan Sistem Informasi Fakultas Teknologi Informasi Universitas Merdeka Malang

Kelelahan terjadi ketika material mengalami pengulangan beban. Jika beban di atas ambang tertentu, retak mikroskopik akan mulai terbentuk pada permukaan. Akhirnya retak akan mencapai ukuran kritis, dan struktur akan tiba-tiba patah. Bentuk struktur akan secara signifikan mempengaruhi umur kelelahan; lubang persegi atau sudut tajam akan mengakibatkan peningkatan tekanan lokal dimana retak lelah dapat dimulai. Untuk itu maka bentuk lubang lingkaran dan filet itu penting untuk meningkatkan kekuatan kelelahan struktur.

Karakteristik Kelelahan

1. Logam dan paduannya, proses dimulai dengan gerakan dislokasi, akhirnya membentuk *band slip* yang kemudian mengalami *nukleasi* retak pendek.
2. Kelelahan adalah sebuah proses *stokastik*, sering terjadinya penyebaran bahkan dalam lingkungan yang dikontrolpun.
3. Semakin besar perbedaan tegangan, semakin pendek kehidupan.
4. Kelelahan cenderung meningkat selama umur kelelahan lebih lama.
5. Kerusakan akibat kelelahan adalah kumulatif dimana bahan tidak bisa kembali pada kondisi semula ketika tidak dikenakan beban.
6. Umur kelelahan dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti suhu, permukaan akhir, mikro, keberadaan bahan kimia oksidasi, tegangan sisa, dan lain-lain.
7. Beberapa bahan (misalnya, beberapa paduan baja dan titanium) menunjukkan batas kelelahan teoritis di bawah

pembebanan yang mengakibatkan kegagalan struktural.

8. Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian telah menemukan bahwa kegagalan terjadi di bawah batas lelah teoritis pada umur kelelahan yang sangat tinggi (10^9 - 10^{10} siklus). Sebuah teknik resonansi ultrasonik digunakan dalam percobaan ini dengan frekuensi sekitar 10-20 kHz.
9. Siklus kekuatan untuk bahan dengan tingkat kelelahan yang tinggi (sekitar 10^3 - 10^8 siklus) dapat dijelaskan oleh parameter berbasis tegangan. Sebuah kolom yang mempunyai beban untuk pengetesan dikontrol oleh servo-hidrolik yang biasa digunakan dalam tes ini, dengan frekuensi sekitar 20 - 50 Hz. Lain halnya dengan mesin-mesin seperti resonansi magnetik juga bisa digunakan, mencapai frekuensi sampai 250 Hz.
10. Siklus kelelahan rendah (biasanya kurang dari 10^3 siklus) dikaitkan dengan plastisitas luas dalam logam, dengan demikian, sebuah parameter regangan berbasis harus digunakan untuk prediksi umur kelelahan dalam logam dan paduan. Pengujian dilakukan dengan amplitudo regangan konstan biasanya di 0,01 - 5 Hz.

Struktur Sambungan Las

Bentuk las kompleks dan tegangan sisa kelelahan memerlukan pertimbangan khusus untuk struktur las. Panas dari proses pengelasan menyebabkan lokal tarik tegangan sisa pada kaki las, *distorsions*

geometris yang menyebabkan tegangan lentur tambahan dan perubahan sifat material menjadi elastis. Selain geometri lokal sepanjang kaki las bervariasi sepanjang panjangnya. Beberapa pendekatan telah dikembangkan untuk menganalisis struktur dilas.

Nominal Stress Sambungan Las

Pendekatan tegangan nominal didasarkan pada tes ekstensif sambungan las dan sambungan. Sambungan las diklasifikasikan berdasarkan jenis, pemuatan dan bentuk. Misalnya, *butt* melintang lasan dimuat. Diasumsikan dan dikonfirmasi oleh eksperimen yang lasan berbentuk serupa memiliki perilaku kelelahan umum yang sama sehingga desain kurva SN tunggal dapat digunakan untuk setiap kelas lasan. Perancang hanya perlu menentukan tegangan nominal dan pilih kelas lasan. Tidak perlu langsung mempertimbangkan efek konsentrasi tegangan akibat pengelasan. Tegangan nominal beberapa sistem berdasar klasifikasi yang ada dalam *e-Fatigue*.

Struktural Stress Sambungan Las

Pendekatan struktural *stress* sering disebut sebagai "metode *hot-spot*". Tegangan struktural mencakup tegangan makroskopik berkonsentrasi dampak detail lasan tetapi tidak stres puncak lokal yang disebabkan oleh takik pada kaki las. Ada berbagai metode yang digunakan untuk menentukan tegangan struktural. Mereka melibatkan ekstrapolasi yang dihitung atau diukur tegangan dari dua titik dekat lasan ke tegangan struktural pada kaki las. Metode ini

bekerja dalam situasi di mana tidak ada definisi yang jelas dari tegangan nominal.

Tegangan – Regangan Lokal Sambungan Las

Stres lokal atau pendekatan *strain* mencakup konsentrasi tegangan makroskopik karena bentuk lasan dan konsentrasi tegangan lokal pada kaki las. Untuk menerapkan metode tradisional analisis kelelahan pada lasan, nilai yang sesuai dari faktor konsentrasi tegangan dan tegangan sisa harus dipilih. Salah satu asumsi umum yang sering digunakan adalah bahwa tegangan sisa setelah pengelasan adalah sama dengan kekuatan luluh tarik material. Pengaruh besar pada konsentrasi tegangan las adalah jari-jari kaki lokal las yang bervariasi sepanjang melas. Meskipun radius terkecil menghasilkan faktor *stress* konsentrasi terbesar, efeknya kelelahan lebih kecil karena efek gradien. Akibatnya ada radius penting untuk kelelahan yang dapat digunakan untuk menghitung faktor kelelahan takik.

Crack Growth Sambungan Las

Secara rinci banyak lasan terdapat cacat fusi. Hal ini terutama berlaku pengelasan *fillet*. Dalam hal ini mekanika fraktur model untuk pertumbuhan retak teknologi kelelahan yang paling tepat.

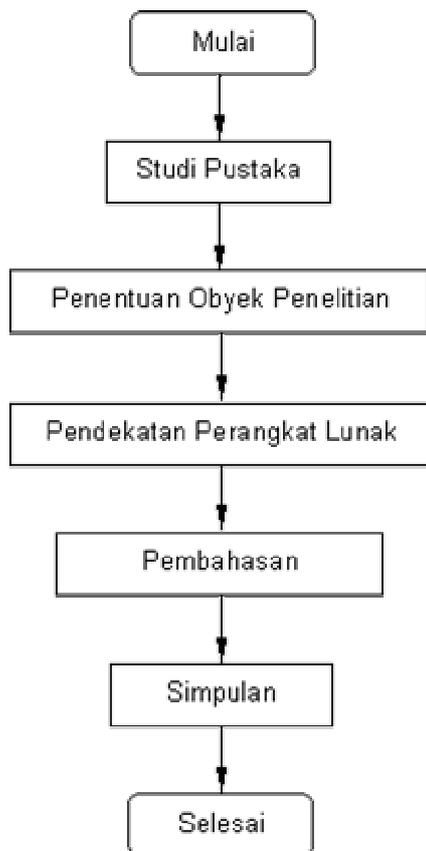
METODOLOGI

Metodologi penelitian yang dilakukan dalam melaksanakan penelitian ini adalah sesuai dengan diagram alir pada gambar 1. Berdasarkan diagram alir proses penelitian maka semua data yang dimasukkan ke dalam perangkat lunak *e-Fatigue* merupakan data

simulasi yang didasarkan pada kondisi di lapangan pada umumnya. Hal tersebut dilakukan sebagai implementasi dari berbagai macam parameter yang harus dimasukkan. Di samping itu juga data juga didasarkan pada hasil simulasi dengan menggunakan data eksternal atau standar *data base* yang ada.

Adapun parameter penelitian yang menjadi masukan bagi analisis sambungan las tipe *butt joint* adalah sebagai berikut:

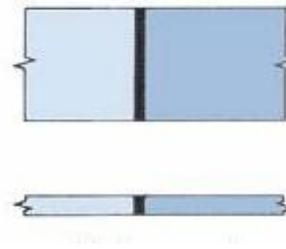
1. Tipe sambungan
2. Beban normal yang bekerja pada obyek penelitian
3. *Material properties*
4. Jumlah siklus yang dikenakan pada model yang diteliti



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

PEMBAHASAN

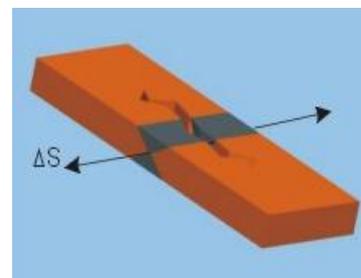
Sambungan *Butt Joint*



Gambar 2. Sambungan *Butt Joint*

Ciri-ciri tipe sambungan *butt joint* adalah sebagai berikut: *rolled* pelat baja struktural jauh dari semua pengelasan dan sambungan struktural, tepi sebagai digulung atau mesin halus, tepi api kemudian dipotong. Setiap mesin atau ditumbuk halus, *butt joint* las penetrasi penuh dan dilakukan dalam arah longitudinal.

Analisis Kelelahan Berdasarkan Tegangan Nominal



Gambar 3. Tegangan Nominal Las

Parameter yang dimasukkan dalam analisis kelelahan sambungan *butt joint* berbantuan perangkat lunak *e-Fatigue* berdasarkan tegangan nominal adalah sebagai berikut:

Beban = 200 MPa

Klasifikasi las

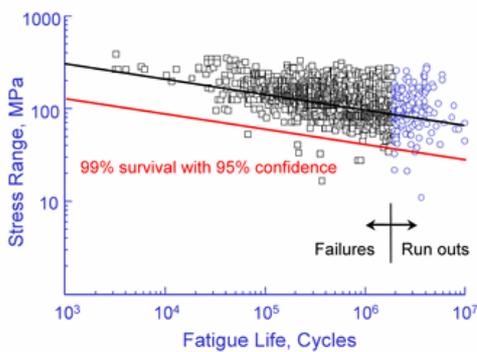
Material = *Steel*

Weld Class = B

Stress at 1 Cycle (C) = 6957 MPa

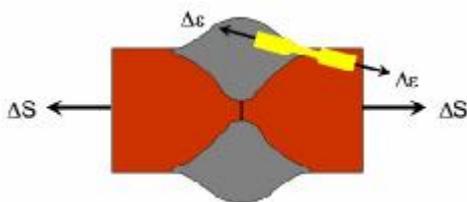
<i>Slope (m)</i>	= 4.0
<i>Standard Deviation</i>	= 0.0455
<i>Fatigue Limit</i>	
SFL	= 124 MPa
NFL	= 1E+07 Cycles
<i>Reference</i>	= BS7608
<i>Ultimate Strength (Su)</i>	= 400 MPa
<i>Elastic Modulus (E)</i>	= 200000 MPa
Jumlah std. deviasi	= 2
Tingkat kepercayaan	= 97.7%

Berdasarkan kriteria perancangan untuk menentukan siklus kelalahan dari sambungan las tipe *butt joint* yang didasarkan pada tegangan nominal yang bekerja maka di dapat siklus kelelahan (N_f) sebesar 633524 siklus. Nilai siklus kelelahan tegangan nominal tersebut di dasarkan pada gambar berikut ini.



Gambar 4. Kriteria Perancangan Kelelahan

Analisis Kelelahan Berdasarkan Umur Regangan

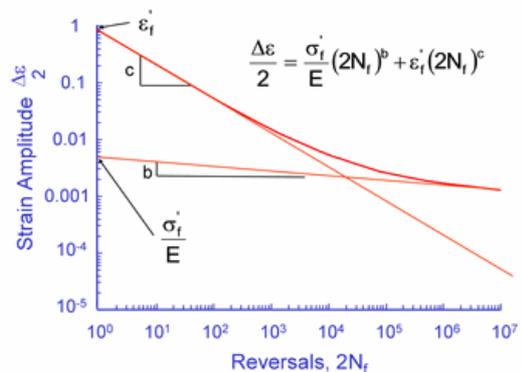


Gambar 5. Regangan Pada Sambungan Las

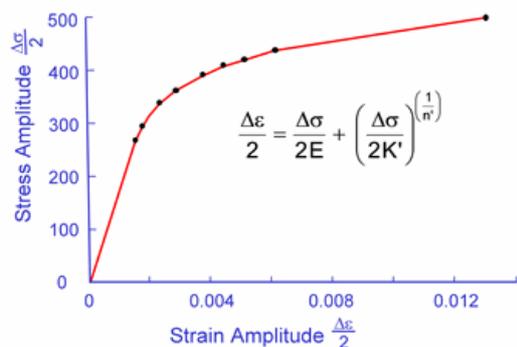
Penggunaan metode analisis umur regangan adalah terbatas pada situasi dimana retak nukleasi dan pertumbuhan *microcracks* kecil. Hal ini tidak boleh digunakan untuk retak seperti kurangnya kekurangan fusi. Parameter yang dimasukkan dalam analisis kelelahan berdasarkan umur regangan adalah :

• **Parameter beban**

Maksimum (S_{max} atau e_{max})	= 400 MPa
Minimum (S_{min} atau e_{min})	= 0 MPa



Gambar 6. Amplitudo Regangan Material



Gambar 7. Amplitudo Tegangan Material

• **Parameter material sambungan las**

Nama	= Steel 4130 BHN 259
Tipe	= Baja
Koefisien tegangan <i>fatigue</i> (σ_f')	= 1261 MPa
<i>Fatigue strength exponent</i> (b)	= -0.077
<i>Fatigue ductility coefficient</i> (ϵ_f')	= 0.985

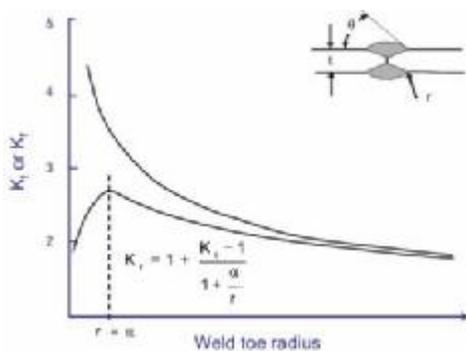
Fatigue ductility exponent (c) = -0.648
 Elastic modulus (E) = 200000 MPa
 Fatigue limit (SFL) = 124 MPa
 Fatigue limit rev. (2NFL) = 1E+07 Cycle
 Cyc. strength coefficient (K') = 1264 MPa
 Cyc. strain hardening exponent (n') = 0.119
 Ultimate strength (S_u) = 778 MPa

• **Parameter tegangan sisa**

Tegangan sisa dari proses pengelasan dapat memiliki pengaruh signifikan terhadap ketahanan kelelahan struktur las. Sebuah tegangan sisa tarik lokal diproduksi pada kaki las logam las saat membeku. Tambahan tegangan sisa akibat pengelasan *distorsions* juga dapat hadir. Sebuah asumsi umum adalah bahwa tegangan sisa dalam kondisi sebagai dilas akan sama dengan kekuatan *yield* material. Ini adalah nilai *default* di dalam *e-Fatigue* dimana besarnya tegangan sisa ($\sigma_{residual}$) = 250 MPa

• **Parameter konsentrasi tegangan**

Konsentrasi tegangan pengelasan tergantung pada sudut sisi (θ), tebal pelat (t), dan lokal radius kaki las (r).



Gambar 8. Kurva Konsentrasi Tegangan

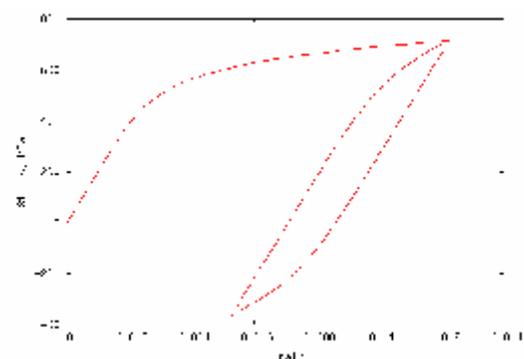
Dalam pengelasan, jari-jari kaki las adalah variabel sepanjang mengelas dan dapat memiliki nilai apapun. Tapi jari-jari

kecil kurang efektif dalam kelelahan dari yang lebih besar. Akibatnya, ada radius kritis kelelahan yang akan menghasilkan faktor takik maksimum kelelahan (K_f). Ini jari-jari kritis adalah sama dengan parameter α materi dalam persamaan Peterson.

Berdasarkan gambar 9 maka diperoleh parameter konsentrasi tegangan sebagai berikut:

Fatigue Notch Factor (K_f) = 3.06
 Flank Angle (θ) = 30°
 Thickness (t) = 10 mm

Berdasarkan analisis kelelahan umur regangan maka di dapat siklus kelelahan (N_f) sebesar 12169 siklus. Analisis kelelahan berdasarkan umur regangan tersebut dapat digambarkan sebagai berikut



Gambar 9. Kurva Analisis Tegangan-Regangan Umur Kelelahan

Analisis Kelelahan Berdasarkan Rambatan Retakan

Analisa pertumbuhan *crack* menggunakan mekanika *fraktur elastis linier* dan sifat pertumbuhan retak materi yang terkait untuk menentukan seberapa cepat retak atau cacat seperti retak-akan tumbuh. Analisis ini dapat memberikan perkiraan dari umur yang aman dari sisa struktur yang berisi

sedikit. Mekanika retak didasarkan pada konsep intensitas tegangan (K), yang menggambarkan besarnya baik bidang tegangan dan regangan di sekitar retak. Hal ini dihitung dari kisaran stres ($\Delta\sigma$), ukuran retak, dan bentuk retak ($f(a/b)$):

$$\Delta K = \Delta\sigma\sqrt{\pi a}f\left(\frac{a}{b}\right)$$

Jadi tingkat pertumbuhan retak ditentukan oleh beban, ukuran dan bentuk retak.

• **Parameter beban**

Maksimum (S_{max} atau e_{max}) = 400 MPa

Minimum (S_{min} atau e_{min}) = 0 MPa

• **Parameter material sambungan las**

Nama = Steel 4340

Tipe = Steel

Crack Growth Int. (C) = 1.68E-10 m/cycle

Crack Growth Exp (m) = 2.25

Elastic Modulus (E) = 200000 MPa

• **Parameter Intensitas Tegangan**

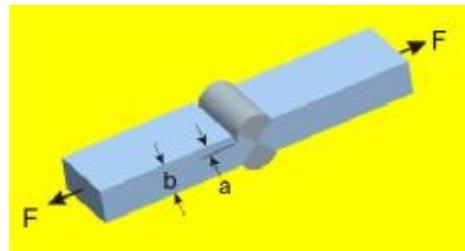
Faktor intensitas tegangan (K) menggambarkan tegangan dan regangan di sekitar ladang retak. Meskipun mereka sangat berbeda matematis, mereka digunakan dalam cara yang mirip dengan faktor stres konsentrasi dalam analisis kelelahan tradisional. Tidak seperti faktor konsentrasi tegangan, faktor intensitas tegangan secara terus menerus berubah retak tumbuh dalam struktur. Seperti faktor konsentrasi tegangan, mereka adalah fungsi dari rasio variabel geometris dan jenis loading. Sebagai contoh mereka adalah fungsi dari rasio ukuran retak dan lebar pelat. Mereka juga merupakan fungsi dari bentuk retak juga. Bentuk umum dari intensitas tegangan diberikan oleh:

$$K = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{\Phi}f\left(\frac{a}{b}\right)$$

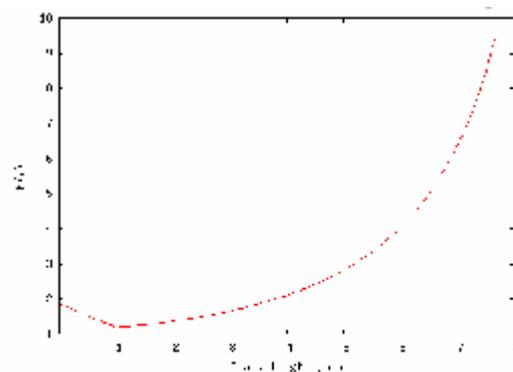
Umur kelelahan tidak sangat sensitif terhadap ukuran retak akhir. Setiap perkiraan yang wajar dapat digunakan.

$$K = \sigma\sqrt{\pi a}F(a)$$

Dalam analisis ini tebal pelat dari material yang disambung adalah setebal 10 mm. Sehingga bisa digambarkan faktor konsentrasi tegangan yang terjadi seperti pada gambar 11.



Gambar 10. Parameter Keretakan



Gambar 11. Faktor Konsentrasi Tegangan

Berdasarkan dari gambar 11 maka secara otomatis perangkat lunak *e-Fatigue* akan memunculkan besarnya retakan sebagai berikut:

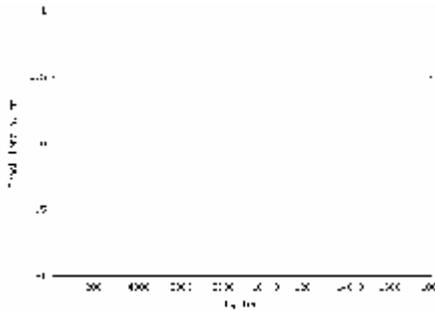
Crack type = Double Butt Weld with a Toe

Crack, Tension

Crack Size (Initial) = 0.00005 mm

Crack Size (Final) = 0.005 mm

Berdasarkan analisis kelelahan dengan metode rambatan retakan maka di dapat siklus kelelahan (N_f) sebesar 16043 siklus. Panjangnya retakan yang terjadi dari sistem sambungan las yang dianalisis adalah seperti pada gambar 12.



Gambar 12. Panjang Retakan Sambungan Las

SIMPULAN

1. Telah didapat hasil simulasi perhitungan kelelahan sambungan las tipe *butt joint* dengan berbantuan perangkat lunak *e-Fatigue*
2. Hasil perhitungan kelelahan pada sambungan las tipe *butt joint* dengan berbantuan perangkat lunak *e-Fatigue* adalah sambungan bisa bertahan sampai dengan 12000 siklus dengan beban sebesar 400 MPa dengan menggunakan metode umur kelelahan.

DAFTAR PUSTAKA

- Colangelo, VJ., Heiser, FA., 1974, *Analysis of Metallurgical Failures*, John Wiley & Son, USA
- Dieter, (alih bahasa Djaprie), 1989, *Metalurgi Mekanik*, jilid 1, Erlangga, Jakarta
- Dieter, (alih bahasa Djaprie), 1989, *Metalurgi Mekanik*, jilid 2, Erlangga, Jakarta

Erwalds, Wanhill, 2001, *Fracture Mechanic*, John Wiley & Son, London

Smallman RE, alih bahasa Djaprie Sriati, 1985, **Metalurgi Fisik Modern**, Gramedia Pustaka Utama, Jakarta,

<http://www.efatigue.com>

http://en.wikipedia.org/wiki/material_fatigue