

## STANDAR SPESIFIKASI DESAIN UNTUK ANALISIS UMUR LELEH PELAT BAJA TAHAN KARAT AKIBAT BEBAN DINAMIS AKSIAL

### *Design Specification Standard Applied to the Analysis of a Stainless Steel Plate Affected by Axial-Cyclic Loading*

Harkali Setiyono

Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur (B2TKS-BPPT)  
Kompleks PUSPIPTEK Gd. 220, Serpong, Tangerang Selatan, Banten, Indonesia  
e-mail : harkali\_setiyono@yahoo.co.id

Diterima: 18 Juni 2013, Direvisi: 10 September 2013, Disetujui: 15 September 2013

#### Abstrak

Makalah ini membahas pemanfaatan Standar Spesifikasi Desain untuk analisis umur leleh pelat baja tahan karat tanpa dan dengan lobang akibat beban dinamis aksial. Didalam Standar Desain, umur leleh ditentukan berdasarkan nilai kekuatan leleh acuan (*reference fatigue strength*) masing-masing pelat baja. Nilai acuan ini terkait dengan umur leleh sebesar  $2 \times 10^6$  cycles dan untuk masing-masing pelat baja, nilai ini ditentukan secara empiris. Berdasarkan nilai kekuatan leleh acuan, maka umur leleh masing-masing pelat pada setiap tingkat pembebanan uji dapat dihitung. Selanjutnya data umur leleh hasil perhitungan digunakan untuk menggambarkan perilaku umur leleh yang berbentuk grafik rentang tegangan terhadap siklus patah leleh. Disamping itu, umur leleh masing-masing pelat juga diukur melalui pengujian kelelahan menggunakan beban dinamis beramplitudo konstan. Data umur leleh hasil pengujian pada setiap tingkat pembebanan digunakan untuk menggambarkan grafik perilaku aktual umur leleh pelat. Hasil pengukuran umur leleh secara eksperimental juga digunakan untuk memverifikasi perilaku umur leleh yang diperoleh dari Standar Spesifikasi Desain. Didalam verifikasi, terindikasi dengan jelas bahwa korelasi data Standar Desain terhadap data eksperimental mendekati berimpit.

**Kata kunci** : umur leleh, kekuatan leleh acuan, rentang tegangan, Standar Spesifikasi Desain.

#### Abstract

*This paper discusses the application of Design Specification Standard to analyze the fatigue life of stainless steel plates of with and without hole affected by an axial-cyclic load. In the Design Standard, the fatigue life is determined according to the value of reference fatigue strength for respective steel plate. This reference value corresponds to the fatigue life of  $2 \times 10^6$  cycles and it is empirically determined for respective steel plate. Based on this value of reference fatigue strength, the fatigue life of respective steel plate at each test load level can be calculated. Subsequently, the calculated data of fatigue life is used to draw fatigue life behaviour, which is in the form of graph of stress range with respect to fatigue fracture cycles. Besides, the fatigue life of respective steel plate is also measured through fatigue tests under cyclic loading of constant amplitudes. Data of experimental fatigue life at each test load level is utilized to draw the actual fatigue life behaviour of steel plate. Results of experimentally measuring the fatigue life are also used to verify the fatigue life behaviour obtained from the Design Specification Standard. In the verification, it is clearly indicated that the data of Design Standard is very well correlated to the experimental one.*

**Keywords:** *fatigue life, reference fatigue strength, stress range, Design Specification Standard.*

## 1. PENDAHULUAN

Pelat baja tahan karat (*stainless steel plate*) banyak digunakan pada konstruksi *shells*, tangki bahan bakar untuk rudal dan bagian struktur kendaraan. Karena jenis konstruksi ini sering mengalami fluktuasi pembebanan kerja (*fluctuating - applied load*), maka perilaku kelelahan dari pelat baja tahan karat merupakan masalah yang menarik dan perlu dipertimbangkan dalam desain. Oleh karena itu dalam penelitian ini, konsentrasi kegiatan diarahkan terutama pada asesmen perilaku umur leleh pelat baja tahan karat akibat beban dinamis

aksial. Beban dinamis ini berfluktuasi dari nilai minimum ke maksimum dengan amplitudo konstan.

Kegiatan asesmen dilaksanakan dengan memanfaatkan Standar Spesifikasi Desain (*design code*) yang khusus dikembangkan untuk analisis kelelahan struktur baja. Model desain struktur baja ini diwakili oleh desain pelat baja tahan karat dengan dan tanpa lobang seperti yang dilaporkan dalam NASA *Technical Note D439*. Kedua tipe pelat baja tersebut diuji dengan beban dinamis aksial beramplitudo konstan sampai patah leleh dan data hasil uji kemudian digunakan untuk menggambarkan

perilaku kelelahan pelat yang berbentuk grafik rentang tegangan terhadap siklus patah lelah.

Disamping itu, grafik perilaku kelelahan pelat juga dibuat berdasarkan data kelelahan hasil analisis Standar Spesifikasi Desain. Perilaku kelelahan pelat hasil Standar Spesifikasi Desain selanjutnya diverifikasi menggunakan perilaku aktual yang terukur dalam pengujian. Korelasi grafik analisis terhadap grafik eksperimen merupakan kriteria untuk menentukan tingkat validasi data yang dihasilkan oleh Standar Spesifikasi Desain.

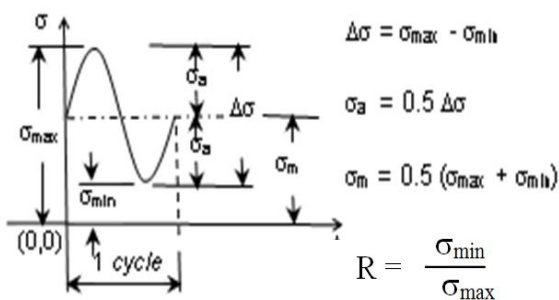
Kegiatan penelitian ini dilaksanakan dengan tujuan untuk memvalidasi pemanfaatan Standar Spesifikasi Desain kelelahan struktur baja dalam asesmen perilaku kelelahan pelat baja tahan karat akibat fluktuasi beban dinamis aksial. Tingkat validasi data analisis dan eksperimen ditentukan berdasarkan korelasi antara perilaku kelelahan pelat hasil analisis dan eksperimen.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

Kelelahan (*fatigue*) material adalah kondisi dimana material telah retak atau rusak sebagai akibat pengaruh fluktuasi tegangan yang bekerja secara terus menerus dibawah kekuatan tariknya. Tegangan kerja tersebut dapat berupa tegangan aksial, lentur (*bending*) atau puntir (*twisting*). Secara umum, fluktuasi tegangan kerja dapat dikelompokkan menjadi dua tipe utama yang meliputi fluktuasi tegangan dengan amplitudo konstan dan bervariasi (*random*).

Gambar 1 menunjukkan bentuk umum fluktuasi tegangan beramplitudo konstan yang banyak digunakan untuk uji kelelahan di laboratorium. Notasi dalam Gambar dapat diartikan sebagai berikut :

- $\sigma_{max}$  dan  $\sigma_{min}$  : tegangan kerja maksimum dan minimum
- $\Delta\sigma$  : rentang tegangan
- $\sigma_a$  : amplitudo tegangan
- $\sigma_m$  : tegangan rata-rata
- R : rasio tegangan kerja



Gambar 1 Fluktuasi tegangan beramplitudo konstan.

Gary dan Scot (2007) menyatakan bahwa jumlah siklus fluktuasi tegangan kerja yang menyebabkan patah lelah didefinisikan sebagai umur lelah. Akibat fluktuasi tegangan kerja beramplitudo konstan, umur lelah biasanya dinyatakan dalam *cycles*. Secara umum mekanisme patah lelah meliputi tahapan-tahapan sebagai berikut :

- Pembentukan awal retak (*crack initiation*)
- Perambatan retak (*crack propagation*)
- Patah tahap akhir (*final fracture*)

Berdasarkan tahapan proses kerusakan lelah, maka umur lelah ( $N_f$ ) merupakan akumulasi dari umur untuk pembentukan awal retak ( $N_i$ ) dan umur untuk perambatan retak ( $N_p$ ). Jadi secara matematis umur lelah ( $N_f$ ) dapat diformulasikan sebagai berikut :

$$N_f = N_i + N_p \quad (1)$$

Analisa umur lelah ( $N_f$ ) dapat dilaksanakan berdasarkan metode pendekatan *high cycle fatigue* (HCF), *low cycle fatigue* (LCF) dan *fracture mechanics*.

Duggan and Byrne (1979) menyatakan bahwa umur lelah dapat ditentukan menggunakan persamaan Basquin untuk HCF. Sedangkan umur lelah untuk LCF dapat dihitung berdasarkan formulasi Coffin-Manson. Akibat tegangan kerja dinamis yang masih berada dibawah *yield strength* maka umur lelah dapat mencapai lebih besar dari  $10^4$  *cycles* dan jumlah siklus ini termasuk dalam katagori HCF. Suresh (1998) merekomendasikan bahwa besarnya umur lelah katagori HCF dan LCF dapat dihitung dari persamaan (2) dan (3), yaitu :

$$\text{Basquin: } N_f = \left( \frac{c_1}{\Delta\sigma} \right)^{\frac{1}{a}} \quad (2)$$

$\Delta\sigma$  adalah rentang tegangan kerja sedangkan  $c_1$  dan  $a$  adalah konstanta  $\left( \frac{1}{15} < a < \frac{1}{8} \right)$ .

Kalau tegangan kerja dinamis berada diatas *yield strength*, maka besarnya siklus patah lelah lebih kecil dari  $10^4$  *cycles* dan termasuk katagori LCF. Berdasarkan formulasi Coffin-Manson, umur lelah katagori LCF dapat diperoleh dari :

$$\text{Coffin-Manson: } N_f = \left( \frac{c_2}{\Delta\epsilon_{pl}} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (3)$$

$\Delta\epsilon_{pl}$  adalah rentang regangan plastis sedangkan  $c_2$  dan  $b$  adalah konstanta  $(0.5 < b < 0.6)$ . Perhitungan umur lelah ( $N_f$ ) berdasarkan pendekatan *fracture mechanics* dapat dilakukan dengan mempertimbangkan tahapan proses

patah leleh seperti yang dinyatakan dalam formulasi (1). Mengacu pada laporan hasil penelitian PKPP-Ristek yang dilakukan penulis (2012), bahwa umur pembentukan retak ( $N_i$ ) dapat dilakukan melalui analisis regangan lokal didaerah kritis material dimana retak mulai terbentuk. Selanjutnya analisis dilaksanakan menggunakan modifikasi formulasi Coffin-Manson sebagai berikut :

$$N_i = \left[ \frac{\Delta \varepsilon_T - \Delta \varepsilon_a}{\varepsilon_f^1 - \varepsilon_m} \right]^{\frac{1}{\alpha_1}} \quad (4)$$

Didalam rumus (4),  $\Delta \varepsilon_T$  dan  $\Delta \varepsilon_a$  masing-masing adalah rentang total regangan didaerah kritis dan rentang regangan leleh. Sedangkan  $\varepsilon_f^1$ ,  $\varepsilon_m$  dan  $\alpha_1$  adalah *fatigue ductility coefficient*, rata-rata regangan didaerah kritis dan *fatigue ductility exponent*. Kemudian umur perambatan retak ( $N_p$ ) ditentukan dengan memanfaatkan konsep *fracture mechanics* untuk menghitung *stress intensity factor range* ( $\Delta K$ ) disekitar ujung retak yang merambat seperti pernyataan dari Hellan (1985), Ewald dan Wanhill (1986), maupun schijve (2001), yaitu:

$$\Delta K = Y \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (5)$$

$Y$ ,  $\Delta \sigma$  dan  $a$  adalah faktor koreksi bentuk, rentang tegangan kerja dan panjang retak. Rumus (5) selanjutnya digunakan bersama-sama teori empiris Paris untuk mendapatkan nilai  $N_p$  yang secara umum dapat dianalisis menggunakan persamaan berikut :

$$N_p = C^{-1} Y^{-n} (\Delta \sigma)^{-n} \pi^{-0.5n} \int_{a_0}^{a_f} (\sqrt{a})^{-n} \quad (6)$$

$a_0$  dan  $a_f$  adalah panjang awal retak dan panjang kritisnya sebelum patah leleh. Konstanta  $C$  dan  $n$  merupakan konstan Paris yang dapat ditentukan secara empiris.

Formulasi (2) – (6) dapat digunakan untuk analisis umur leleh ( $N_f$ ) kalau beban kerja berfluktuasi dengan amplitudo konstan. Kalau beban kerja berfluktuasi dengan amplitudo bervariasi maka menurut Maksimović (2005), analisis umur leleh ( $N_f$ ) dapat dilakukan berdasarkan teori Palmgren-Miner. Didalam Eurocode 3 : Part 1-9 (2005), metode analisis umur leleh akibat sistem pembebanan ini dilakukan melalui tahapan-tahapan :

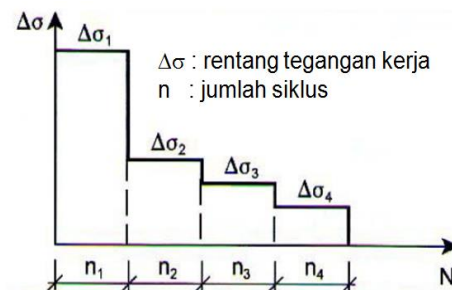
- Penentuan variasi amplitudo tegangan kerja
- Perhitungan jumlah siklus pembebanan pada setiap amplitudo tegangan menggunakan metode *rainflow*
- Penggunaan hasil metode *rainflow* untuk membuat spektrum rentang tegangan yang

menampilkan variasi rentang tegangan dan jumlah masing-masing siklusnya. Contoh spektrum dapat dilihat dalam Gambar 2.

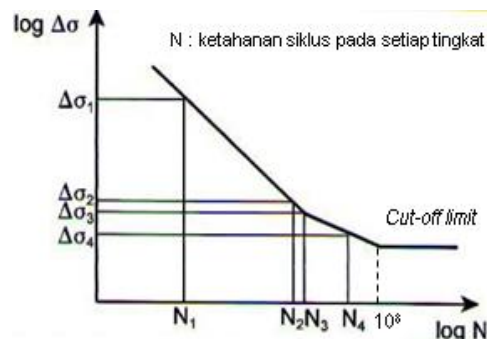
- Menganalisis jumlah siklus sampai rusak sehingga memenuhi kriteria berikut ini.

$$D_d = \sum_i^m \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} \leq 1 \quad (7)$$

$D_d$  adalah akumulasi kerusakan (*damage accumulation*) dan  $n_{Ei}$  adalah jumlah siklus yang terkait dengan rentang tegangan ke  $i$  dalam spektrum. Sedangkan  $N_{Ri}$  adalah ketahanan siklus yang diperoleh dari kurva kelelahan (*stress range-cycles curve*) seperti yang ditunjukkan dalam contoh Gambar 3.



Gambar 2 Spektrum rentang tegangan.



Gambar 3 Kurva kelelahan.

### 3. METODE PENELITIAN

Kegiatan penelitian dilaksanakan melalui pendekatan analitis dan eksperimental. Dalam pendekatan analitis, suatu Standar Spesifikasi desain (*Eurocode 3: Part 1-9, 2005*) digunakan sebagai acuan untuk menganalisis umur leleh desain pelat baja tahan karat akibat beban dinamis aksial. Data hasil pemanfaatan *Eurocode 3* ini ditampilkan dalam bentuk grafik perilaku kelelahan ( $\Delta \sigma$  vs.  $N$ ).  $\Delta \sigma$  dan  $N$  masing-masing adalah rentang tegangan kerja dinamis dan jumlah siklus patah leleh. Untuk mengetahui derajat akurasi, maka data dari *Eurocode 3* akan diverifikasi dan divalidasi menggunakan data perilaku kelelahan aktual yang diukur melalui pendekatan eksperimental.

### 3.1 Pendekatan Analitis

Berdasarkan persyaratan *Eurocode 3: Part 1-1* (1992), maka tegangan kerja nominal untuk analisis kelelahan pelat baja tahan karat seharusnya masih berada dalam batas elastis material. Oleh karena itu nilai tegangan kerja nominal maksimum tidak akan melampaui persyaratan berikut ini :

- Untuk tegangan normal maksimum ( $\sigma_{max}$ ) :

$$\sigma_{max} < 1.5\sigma_y \quad (8)$$

- Untuk tegangan geser maksimum ( $\tau_{max}$ ) :

$$\tau_{max} < \frac{1.5\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

$\sigma_y$  adalah *yield strength* material.

Analisis kelelahan dilakukan dengan mempertimbangkan besarnya nilai rentang tegangan acuan ( $\Delta\sigma_c$ ) dan batas kelelahan ( $\Delta\sigma_D$ ) untuk bahan baja tahan karat.  $\Delta\sigma_c$  dan  $\Delta\sigma_D$  adalah rentang tegangan yang terkait dengan siklus patah lelah  $N = 2 \times 10^6$  cycles dan  $N = 5 \times 10^6$  cycles. Pelat baja tahan karat yang dianalisis diwakili oleh dua tipe desain pelat tanpa dan dengan lobang ditengahnya. Didalam analisis kelelahan, kedua tipe pelat tersebut terbebani fluktuasi tegangan kerja normal dengan amplitudo konstan dan rasio antara tegangan minimum ( $\sigma_{min}$ ) terhadap tegangan maksimum ( $\sigma_{maks}$ ),  $R = -1$ .

Penentuan besarnya  $\Delta\sigma_c$  dan  $\Delta\sigma_D$  dilaksanakan berdasarkan data hasil pengujian kedua tipe pelat baja tahan karat tanpa dan dengan lobang (Gambar 4 dan 6). Melalui analisis logaritmik persamaan regresi linier dalam Gambar 4, maka besarnya nilai  $\Delta\sigma_c$  dan  $\Delta\sigma_D$  dari pelat baja tahan karat tanpa lobang dapat diperoleh dari :

$$\text{Log } \Delta\sigma = -0.1024 \text{ Log } N + \text{Log } 5041.30$$

$$\text{Log } \Delta\sigma_c = -0.1024 \text{ Log } 2 \times 10^6 + \text{Log } 5041.30$$

$$\text{Log } \Delta\sigma_c = 3.0573 ; \Delta\sigma_c = 1141.04 \text{ MPa} \approx \underline{\underline{1141 \text{ MPa}}}$$

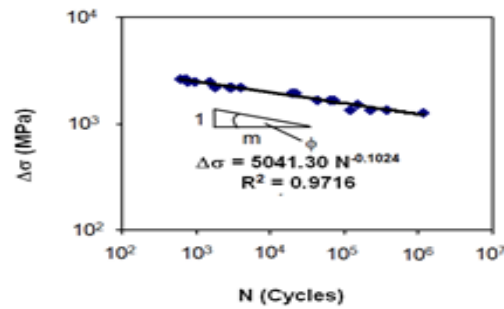
$$\text{Log } \Delta\sigma_D = -0.1024 \text{ Log } 5 \times 10^6 + \text{Log } 5041.30$$

$$\Delta\sigma_D = 1038.92 \text{ MPa} \approx \underline{\underline{1039 \text{ MPa}}}$$

Besarnya koefisien arah grafik dalam Gambar 4 adalah :

$$\phi = \frac{1}{m} = -0.1024 \quad ; \quad m = \frac{1}{-0.1024} = -9.77 \approx -10$$

Untuk kepentingan analisis, maka konstanta m ditentukan berdasarkan nilai positif  $m = 10$ .



Gambar 4 Hasil regresi linier data pengujian pelat baja tahan karat tanpa lobang.

Dalam pendekatan analisis, umur lelah pelat baja tahan karat tanpa lobang akibat fluktuasi tegangan aksial beramplitudo konstan ditentukan berdasarkan formulasi yang direkomendasikan oleh *Eurocode 3: Part 1-9* (2005), yaitu :

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_c^m \times 2 \times 10^6 \quad (10)$$

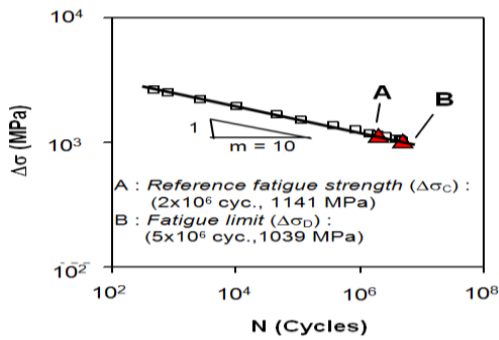
$\Delta\sigma_R$  dan  $N_R$  masing-masing adalah kekuatan lelah dan umur lelah. Sedangkan rentang tegangan acuan  $\Delta\sigma_c$  berkisar antara 36 – 160 MPa dan nilai  $m = 3$  untuk umur lelah  $N \leq 5 \times 10^6$  cycles. Karena katagori desain pelat baja tahan karat ini tidak tercakup dalam *Eurocode 3: Part 1-9* (2005), maka besarnya nilai  $\Delta\sigma_c$  dan m pelat ditentukan berdasarkan hasil eksperimen.

Didalam analisis, umur lelah pelat ( $N$ ) ditentukan berdasarkan tingkat rentang tegangan ( $\Delta\sigma$ ) yang membebani pelat. Variasi rentang tegangan kerja pada pelat berkisar antara 1039 – 2620 MPa. Jadi dengan memanfaatkan formulasi (10), untuk kekuatan lelah ( $\Delta\sigma_R$ ) yang berada pada kisaran rentang tegangan  $\Delta\sigma = 1039 - 2620$  MPa maka akan dihasilkan umur lelah pelat ( $N_R$ ) yang berada pada kisaran 491 –  $5 \times 10^6$  cycles. Data variasi kekuatan lelah ( $\Delta\sigma_R$ ) dan umur lelah pelat ( $N_R$ ) selanjutnya digunakan untuk menggambarkan grafik perilaku umur lelah (HCF) seperti yang terlihat dalam Gambar 5.

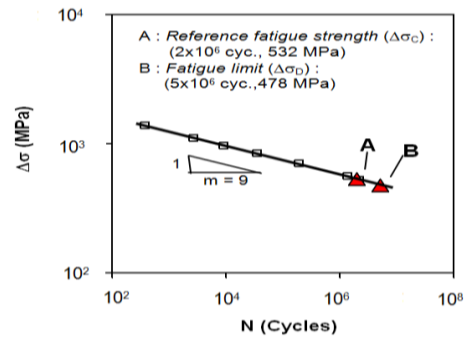
Desain tipe pelat baja tahan karat dengan lobang ditengahnya juga dianalisis dengan memanfaatkan standar metode yang sama. Nilai  $\Delta\sigma_c$  dan  $\Delta\sigma_D$  untuk tipe pelat ini ditentukan berdasarkan data hasil eksperimen dalam Gambar 6. Melalui regresi linier data dalam Gambar 6 maka nilai konstanta m dapat diperoleh dari :

$$\phi = \frac{1}{m} = -0.1168 \quad ; \quad m = \frac{1}{-0.1168} = -8.56 \approx -9$$

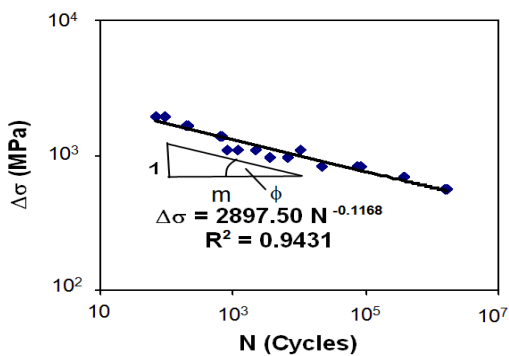
Didalam analisis, konstanta m yang digunakan juga bernilai positif.



Gambar 5 Perilaku umur lelah pelat baja tahan karat tanpa lobang hasil analisis.



Gambar 7 Perilaku umur lelah pelat baja tahan karat dengan lobang hasil analisis.



Gambar 6 Hasil regresi linier data pengujian pelat baja tahan karat dengan lobang.

Nilai  $\Delta\sigma_c$  dan  $\Delta\sigma_D$  dari pelat dengan lobang juga diperoleh dari analisis logaritmik persamaan regresi linier yang terlihat dalam Gambar 6, yaitu :

$$\text{Log } \Delta\sigma = -0.1168 \text{Log } N + \text{Log } 2897.50$$

$$\text{Log } \Delta\sigma_c = -0.1168 \text{Log } 2 \times 10^6 + \text{Log } 2897.50$$

$$\text{Log } \Delta\sigma_c = 2.7261 ; \Delta\sigma_c = 532.23 \text{ MPa} \approx \underline{\underline{532 \text{ MPa}}}$$

$$\text{Log } \Delta\sigma_D = -0.1168 \text{Log } 5 \times 10^6 + \text{Log } 2897.50$$

$$\text{Log } \Delta\sigma_D = 2.6796 ; \Delta\sigma_D = 478.19 \text{ MPa} \approx \underline{\underline{478 \text{ MPa}}}$$

Analisis selanjutnya juga dilaksanakan berdasarkan rumus (10) dengan kisaran variasi rentang tegangan kerja  $\Delta\sigma = 478 - 1654$  MPa. Estimasi umur lelah hasil analisis ( $N_R$ ) pada setiap tingkat rentang tegangan kerja ( $\Delta\sigma_R$ ) besarnya berkisar antara  $18 - 5 \times 10^6$  cycles. Prediksi analitis grafik HCF untuk pelat baja tahan karat dengan lobang dapat dilihat dalam Gambar 7.

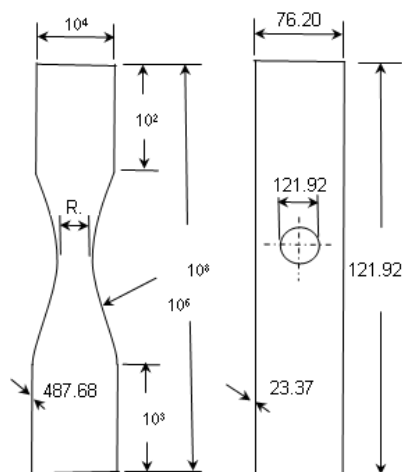
### 3.2 Pendekatan Eksperimental

Didalam pendekatan eksperimental, sifat mekanis material baja tahan karat diukur melalui pengujian standar tarik statis dengan *gauge length*,  $l_0 = 50.80$  mm dan hasilnya dapat dilihat dalam Tabel 1. Simbol  $\sigma_y$ ,  $\sigma_{ult}$ ,  $E$  dan  $\Delta l$  masing-masing adalah *yield strength*, *ultimate tensile strength*, modulus elastisitas dan total perpanjangan.

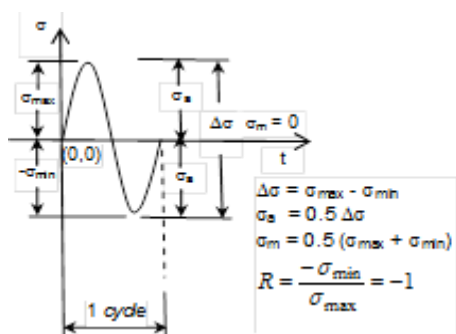
Tabel 1 Sifat mekanis baja tahan karat.

$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_{ult}$ (MPa)	$E \times 10^3$ (MPa)	$\Delta l / l_0$ (%)
1344	1414	198	5.10

Konfigurasi desain pelat baja tahan karat tanpa dan dengan lobang yang digunakan sebagai benda uji dapat dilihat dalam Gambar 8. Pengujian kedua bentuk desain pelat baja tersebut dilakukan menggunakan beban dinamis aksial beramplitudo konstan dengan rasio pembebanan  $R = -1$ . Gambar 9 menunjukkan sistem pembebanan uji dan pelaksanaannya dilakukan dengan tahapan pembebanan yang menghasilkan variasi rentang tegangan kerja  $\Delta\sigma = 1048 - 2620$  MPa pada pelat tanpa lobang. Sedangkan tahapan pembebanan pada pelat berlobang menimbulkan variasi rentang tegangan kerja  $\Delta\sigma = 524 - 1930$  MPa. Pada setiap tingkat rentang tegangan kerja  $\Delta\sigma$  diuji sebanyak 2 sampai 4 pelat tanpa atau dengan lobang sampai patah lelah.



Gambar 8 Konfigurasi desain pelat baja tahan Karat tanpa dan dengan lobang.



Gambar 9 Beban uji dinamis beramplitudo konstan.

Besarnya beban uji yang didukung oleh benda uji pada Gambar 8, diukur menggunakan *strain gauges* yang terpasang pada batang pemberat dan batang ini diletakkan berderet dengan benda uji pelat baja. Beban uji dibangkitkan melalui sistem peralatan hidraulik dan selalu dipantau serta dicatat selama pengujian. Karena beban uji berfluktuasi didaerah tarik dan tekan maka agar menghindari *buckling*, pada setiap benda uji pelat baja dipasang peralatan anti *buckling*.

Pengujian semua benda uji pelat baja dilaksanakan pada temperatur kamar sampai patah lelah. Untuk benda uji yang diharapkan patah pada siklus beban uji lebih besar dari 10000 *cycles*, pengujian dilaksanakan dengan menggunakan frekwensi *subresonance* sebesar  $f = 30$  Hz. Sedangkan untuk benda uji yang diperkirakan patah lelah lebih kecil dari 10000 *cycles*, diuji menggunakan sistem hidraulik dengan frekwensi  $f = 0.33$  Hz. Arus listrik bertegangan rendah juga dialirkan melalui masing-masing benda uji untuk menjalankan suatu *relay* yang akan menghentikan mesin uji pada saat benda uji telah patah lelah sehingga jumlah siklus patah lelahnya dapat langsung dicatat.

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mengukur akurasi penggunaan Standar Spesifikasi Desain (*Eurocode 3: Part 1-9, 2005*) dalam memprediksi perilaku umur lelah kedua tipe pelat baja (Gambar 8), maka perilaku yang terlihat pada Gambar 5 dan 7 perlu diverifikasi menggunakan perilaku aktual yang terukur dari pengujian. Rincian data umur lelah kedua tipe pelat baja (Gambar 8) dapat dilihat dalam Tabel 2 dan 3. Data ini digunakan untuk menggambarkan perilaku aktual patah lelah kedua tipe pelat baja yang selanjutnya dimanfaatkan untuk verifikasi prediksi analitis pada Gambar 5 dan 7.

Berdasarkan perilaku umur lelah (Gambar 5 dan 7), terlihat jelas bahwa kekuatan lelah acuan ( $\Delta\sigma_c$ ) dan batas lelah ( $\Delta\sigma_D$ ) kedua tipe pelat baja sangat berbeda. Hal ini disebabkan karena akibat pengaruh konsentrasi tegangan pada lobang cenderung mempercepat pembentukan inisiasi retak lelah. Sedangkan pelat baja tanpa lobang, pembebanan didominasi oleh rentang tegangan nominal dimana tegangan ini jauh lebih rendah dibanding konsentrasi tegangan disisi lobang. Jadi akibat pengaruh konsentrasi tegangan ini tentunya dapat menyebabkan tegangan nominal yang terkait dengan siklus patah lelah  $N = 2 \times 10^6$  dan  $5 \times 10^6$  *cycles* yaitu  $\Delta\sigma_c$  dan  $\Delta\sigma_D$  pada pelat tanpa lobang akan lebih tinggi dibanding nilainya pada pelat yang berlobang.

Faktor konsentrasi tegangan pelat berlobang  $K_t = 2.32$  dan pada pelat tanpa lobang, tidak ada faktor konsentrasi tegangan atau  $K_t = 1$ . Berdasarkan pada data dalam Tabel 2 dan 3 terlihat dengan jelas bahwa pengaruh konsentrasi tegangan di sisi lobang juga mengurangi jumlah siklus patah lelah pelat berlobang pada setiap tahap pembebanan dibanding siklus patah lelah pelat tanpa lobang. Hal ini juga dapat dijelaskan secara analitis menggunakan persamaan (10) dimana makin tinggi nilai  $\Delta\sigma_c$  dan konstanta  $m$  tentunya dapat meningkatkan jumlah siklus patah lelah ( $N_R$ ) pada setiap tahap rentang tegangan kerja ( $\Delta\sigma_R$ ). Simbol  $N_R$  dan  $\Delta\sigma_R$  dalam persamaan (10) juga dinamakan umur lelah dan kekuatan lelah.

Tabel 2 Data hasil pengujian dan *Euro Code* untuk pelat tanpa lobang.

No.	Eksperimen		<i>Euro Code 3</i>
	$\Delta\sigma$ (MPa)	N ( <i>cycles</i> )	Part 1-9 $N_{eu}$ ( <i>cycles</i> )
1	2620	617	491
2	2620	711	491

Eksperimen			<i>Euro Code 3 Part 1-9</i>
No.	$\Delta\sigma$ (MPa)	N (cycles)	$N_{eu}$ (cycles)
3	2482	779	843
4	2482	973	843
5	2482	1503	843
6	2206	1782	2741
7	2206	2769	2741
8	2206	3004	2741
9	2206	4025	2741
10	1930	19000	10430
11	1930	22000	10430
12	1654	42000	48813
13	1654	65000	48813
14	1654	71000	48813
15	1516	151000	116653
16	1340	122000	400717
17	1340	218000	400717
18	1340	382000	400717
19	1242	1176000	856388
20	1242	1181000	856388
21	1172	2213000	1529714
22	1138	10840000	2053353
23	1104	1749000	2780966
24	1104	37074000	2780966
25	1064	910000	4022260
26	1062	5941000	4098654
27	1048	19129000	4680299
28	1020	100173000 *)	-

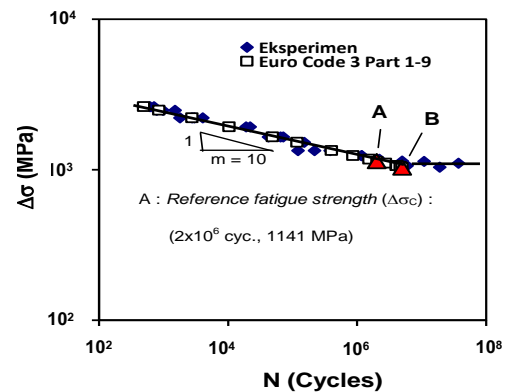
\*) Tidak patah

Tabel 3 Data hasil pengujian dan *Euro Code* untuk pelat berlobang.

Eksperimen			<i>Euro Code 3 Part 1-9</i>
No.	$\Delta\sigma$ (MPa)	N (cycles)	$N_{eu}$ (cycles)
1	1930	67	18
2	1930	91	18
3	1654	191	74
4	1654	206	74
5	1380	647	376
6	1380	692	376
7	1104	826	2802
8	1104	1209	2802
9	1104	2221	2802
10	1104	10000	2802

Eksperimen			<i>Euro Code 3 Part 1-9</i>
No.	$\Delta\sigma$ (MPa)	N (cycles)	$N_{eu}$ (cycles)
11	966	3664	9321
12	966	6670	9321
13	828	21084	37322
14	828	74610	37322
15	828	85760	37322
16	690	369600	192572
17	552	1516000	1434772
18	552	1664000	1434772
19	552	41837000	1433772
20	524	54199000	2292203
21	496	140815000 *)	-

\*) Tidak patah

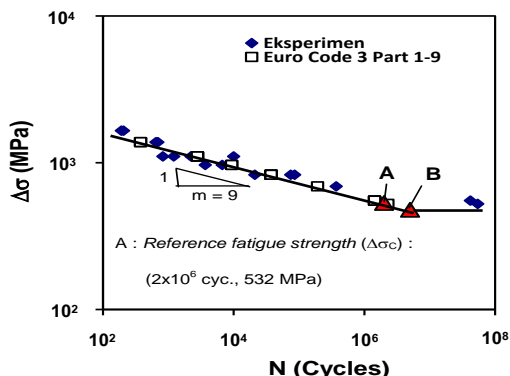


Gambar 10 Verifikasi hasil *Euro Code* untuk pelat baja tanpa lobang.

Dalam Tabel 2 dan 3 terlihat bahwa pada rentang tegangan kerja  $\Delta\sigma = 1020$  MPa dan 496 MPa, data umur lelah pelat  $N = 100173000$  cycles dan  $140815000$  cycles dianggap tidak patah. Hal ini karena menurut *Euro Code 3 Part 1-9*, umur lelah  $N \geq 10^8$  cycles sudah berada didaerah *cut-off limit* kurva kelelahan seperti yang terlihat dalam Gambar 3. Berdasarkan data umur lelah hasil eksperimen (N) dan *Euro Code 3 Part 1-9* ( $N_{eu}$ ) selanjutnya dapat dilakukan verifikasi terhadap pemanfaatan Standar Spesifikasi Desain yang mengacu pada *Euro Code 3 Part 1-9* dalam penelitian ini.

Gambar 10 dan 11 menunjukkan verifikasi perilaku umur lelah kedua tipe pelat hasil analisis menggunakan *Euro Code 3 Part 1-9* dan perilaku aktual hasil eksperimen. Korelasi data analitis sangat mendekati berimpit dengan data aktual yang terukur dalam eksperimen. Disamping itu kalau diperhatikan dengan seksama data *Euro Code* ( $N_{eu}$ ) dari kedua tipe pelat rata-rata cenderung lebih rendah dibanding data eksperimen. Jadi dalam hal ini dapat dikatakan

bahwa hasil pemanfaatan *Euro Code 3 Part 1-9* cenderung konservatif dan prediksi ini tentunya aman digunakan untuk asesmen umur lelah komponen yang berbahan dasar baja tahan karat.



Gambar 11 Verifikasi hasil *Euro Code* untuk pelat baja berlobang.

## 5. KESIMPULAN

Karya tulis ilmiah ini telah menyajikan hasil pemanfaatan Standar Spesifikasi Desain *Euro Code 3 Part 1-9* untuk menganalisis umur lelah pelat baja tahan karat akibat pembebanan dinamis. Konfigurasi desain pelat terdiri dari dua tipe yaitu pelat baja tahan karat tanpa lobang dan berlobang ditengahnya. Sistem pembebanannya merupakan beban dinamis aksial beramplitudo konstan tarik tekan dengan rasio pembebanan  $R = -1$ .

Dalam pendekatan analitis, umur lelah pelat diprediksi berdasarkan nilai kekuatan lelah acuan ( $\Delta\sigma_c$ ) masing-masing tipe pelat dimana acuan ini terkait dengan umur lelah sebesar  $2 \times 10^6 \text{ cycles}$ . Secara analitis terindikasi bahwa umur lelah pelat yang berlobang pada setiap tingkat rentang tegangan kerja cenderung lebih kecil dibanding umur lelah pelat tanpa lobang. Hal ini terutama disebabkan oleh pengaruh konsentrasi tegangan disisi lobang, dimana faktor konsentrasi tegangan lobang adalah  $K_t = 2.32$  sedangkan untuk pelat tanpa lobang tidak memiliki faktor konsentrasi tegangan atau  $K_t = 1$ .

Untuk mengukur ketelitian pemanfaatan *Euro Code 3* ini, hasil prediksinya telah diverifikasi menggunakan umur lelah aktual kedua tipe pelat. Umur lelah aktual ini diperoleh dari hasil pengujian beberapa sampel kedua tipe pelat baja tahan karat dengan desain yang identik akibat beban uji beramplitudo konstan dengan rasio pembebanan  $R = -1$  sampai patah lelah. Verifikasi menunjukkan bahwa data hasil prediksi *Euro Code 3 Part 1-9* berkorelasi mendekati berimpit dengan data aktual hasil pengujian. Disamping itu juga terindikasi bahwa

prediksi *Euro Code 3 Part 1-9* sebagian besar lebih kecil dibanding data pengujian. Jadi dapat disimpulkan bahwa *Euro Code 3 Part 1-9* cenderung menghasilkan prediksi umur lelah yang konservatif.

## DAFTAR PUSTAKA

- British Standard Institution (BSI). (2005). Eurocode 3 : Design of Steel Structures – Part 1-9 : Fatigue. December.
- Duggan, Terance V. and Byrne, James. (1979). "Fatigue as a Design Criterion", The Macmillan Press Ltd., London and Basingstoke, pp. 65-92.
- European, Committee for Standardization. (1992). Eurocode 3 : Design of Steel Structures – Part 1.1 : General Rules and Rules for Buildings. April, pp. 164.
- Ewalds, H and Wanhill, R.J.H. (1986). Fracture Mechanics. Edward Arnold (Publishers) Ltd., London-U.K., pp. 28-173.
- Gary, K. Lui and Scott D.B. Alexander. (2007). Fatigue of Steel Plate – Elastomer Composite Beams. Structural Engineering Reports No. 274, University of Alberta, December, pp. 5-7.
- Hellan, K. (1985). Introduction To Fracture Mechanics", McGraw Hill Book Co., pp. 132-154 & 243.
- Herbert, A. Leybold, "Axial-load Fatigue Tests on 17-7 PH Stainless Steel under Constant-amplitude Loading", NASA Technical Note D-439, Langley Research center – Langley Field, Va., pp. 1-17.
- Maksimović, Stevan. (2005). Fatigue Life Analysis of Aircraft Structural Components", Scientific-Technical Review, Vol.LV, No. 1, pp. 18
- Schijve, Jaap. (2001). Fatigue of Structures and Materials", Kluwer Academic Publishers, pp. 174 - 211.
- Setiyono, Harkali. (2012). Pengembangan Metode Penentuan Umur Lelah (*Fatigue Life Assessment*) Komponen *Propeller Shaft* Otomotif, Laporan Akhir, Insentif Peningkatan Kemampuan Peneliti dan Perakayasa, Kemen Ristek, 2012, pp. 6-10.
- Suresh, S. (1998). Fatigue of Materials, Cambridge University Press, 2<sup>nd</sup> Edition, ISBN 0-521-57847-7.
- Yung-Li, Lee, Jwo Pan, Richard B. Hathaway and Mark E. Barkey. (2005). Fatigue Testing and Analysis (Theory and Practice), Elsevier Butterworth-Heinemann, pp. 57-76.