

MODEL SIMULASI UNTUK MENGAMATI PENGARUH TEGANGAN TARIK-SISA SILINDER *AUTOFRETTAGE* LARAS SENAPAN

Sahlan
PAT - BPPT

Abstract

The analysis of autofrettage on fatigue-crack propagation of crack are well documented, that is experimental work shows the effects of positive stress ratio or tensile-minimum stress during the fatigue cycles on the fatigue-crack initiation from holes. This simulates model the effect of the residual-tensile stresses at the outside surface of autofrettage cylinders. S-N curves and modified Goodman diagrams are shown for fatigue-crack initiation. This allows a tremendous advantage in retarding crack initiation and propagation in the early stages of crack growth, which accounts for the dramatic increases in useful service life for an autofrettage cylinder compared to a nonautofrettaged cylinder.

Abstrak

Analisis autofrettage pada retak-lelah rambatan yang sudah dilakukan, merupakan hasil eksperimental yang menampilkan pengaruh ratio tegangan positif atau tegangan tarik-minimum selama terjadi proses siklis kelelahan pada retak-lelah awal yang dimulai dari lubang-lubang yang sengaja dibuat pada sampel. Disini mensimulasikan pengaruh tegangan sisa uji tarik pada permukaan sisi luar sampel benda uji silinder. Kurva S-N dan rekayasa diagram Goodman diperlihatkan adanya permulaan retak-lelah. Disini pula ditampilkan hal yang menarik didalam perlambatan retak awal dan adanya perambatan didalam keadaan dini pertumbuhan retak, yang mana dapat meningkatkan umur pakai untuk bagi silinder berpermukaan tidak merata ke silinder berpermukaan merata.

1. Pendahuluan

Bila suatu tabung (*tube*) atau bejana (*vessel*) baja silindris mengalami tekanan lebih (*overpressurization*) maka akan terjadi deformasi plastis dan menyimpan tegangan sisa (*residual stress*) pada sisi dalamnya, yang dimulai dari diameter sisi luarnya. Dan selanjutnya, akibat dari tekanan kerja berlebih yang begitu besar maka terjadi retak lelah (*fatigue crack*). Permulaan awalnya terjadi perambatan retak dan kemudian diikuti perlambatan retak dari akibat adanya pertumbuhan retak. Didalam simulasi, dilakukan perhitungan untuk baja silindris *autofrettage* yang dapat memprediksi umur pakai (*useful service life*). Dimana dalam hal ini umur pakai baja *silindris autofrettage* lebih panjang bila dibandingkan dengan baja silindris yang tidak dilakukan *autofrettage*.

Walau begitu, berdasarkan teori keseimbangan, tegangan sisa yang ada pada permukaan diameter luar tabung secara alamiah merupakan tegangan tarik dan sisi

dalamnya merupakan tegangan tekan. Dan bilamana terjadi kemungkinan ada cacat pada sisi diameter luar, seperti cacat lubang, cacat alur pasak, dan cacat takikan saat proses permesinan pada sisi permukaan luarnya maka ini akan menjadi penyebab terjadinya permulaan retak awal (*initial crack*). Dan ini tentunya menjadi pertimbangan untuk desain *engineeringnya*, dan ini bila terjadi tegangan tarik pada permukaan sisi luar dari tekanan internal akibat adanya cacat bawaan (*coherent*). Juga dalam model simulasi ini, tentu bergantung pada adanya pengaruh konsentrasi tegangan (*stress-concentration*) dan faktor reduksi kekuatan lelahnya. Artinya, bahwa situasi keadaan tegangan pada sisi permukaan dinding luar merupakan ilustrasi untuk menganalisis perkiraan usia pakai baja silindris. Lebih jauh, pada simulasi ini untuk mengkaji pengaruh adanya (cacat) lubang beralur pada sisi permukaan luarnya yang umumnya merupakan cacat bawaan yang dialami oleh bejana atau tabung.

2. Studi Pustaka

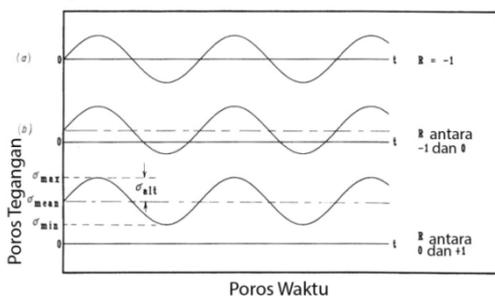
Autofrettage adalah suatu teknologi proses untuk produksi pembuatan tabung atau bejana baja. Tube atau bejana bekerja pada kompresi yang sangat tinggi sampai tekanan kritisnya. Bejana yang bekerja pada kompresi yang sangat tinggi, rentan mengalami deformasi plastis, dan menghasilkan tegangan sisa-dalam (*internal-residual stress*) pada bagian dalamnya. Bejana yang bekerja pada kompresi dinamis (tekanan yang berubah-ubah) sangat tinggi maka tegangan sisa-dalam yang timbul akan sangat bervariasi dan besarnya bergantung pada variasi besaran tekanan kritis yang dialaminya. Tujuan dari *autofrettage* itu sendiri adalah untuk meningkatkan daya tahan produk akhir. *Autofrettage* juga dapat meningkatkan ketahanan terhadap korosi pada daerah retak tegang akibat deformasi plastis atau yang disebabkan retak lelah yang diakibatkan oleh tegangan sisa yang timbul yang dalam waktu tertentu terjadi korosi retak-tegangan. Korosi retak-tegangan yaitu retak tegangan non-mekanis atau retak tegangan yang disebabkan oleh proses kerusakan kimis, dan bekerja pada tekanan sangat tinggi yang kemudian terjadi kerusakan retakan. Korosi retak-tegangan akan terjadi ketika bahan bekerja dalam lingkungan korosif yang kemudian mengalami deformasi plastis akibat tegangan tarik. Teknik *auto-frettage* biasanya digunakan untuk pembuatan silinder bertekanan tinggi, seperti pompa hidrolis, laras senjata (senapan atau meriam), saluran sistem injeksi bahan bakar untuk mesin Diesel, dan lain-lain. Sementara itu dengan proses *autofrettage* akan mendorong membantu meningkatkan penguatan kekerasan (*hardness*) pada logam dan inimerupakan salah satu metoda mekanisme untuk penguatan atau meningkatkan performa kekuatan logam.

Gambar 1 menunjukkan hubungan antara tegangan minimum dan tegangan maksimum yang disebut dengan ratio tegangan (*the stress ratio*), atau ratio-R. Didalam keadaan beban terbalik penuh, Gambar 1(a), $R = -1$, ini seperti yang diperlihatkan oleh garis karakteristik amplitudu beban terbalik. Tegangan bengkok (*bending stresses*) didalam sumbu putar merupakan petunjuk indikasi adanya beban terbalik, dan tegangan utamanya dalam hal ini adalah nol. Bila disana ada kombinasi beban konstan dan beban alternatif lainnya maka tegangan utamanya adalah tidak nol, serta nilai R menjadi meningkat dari -1 ke nol [Gambar 1(b)], sehingga σ_{min} sampai mencapai nol. Atau sebaliknya, juga R bisa meningkat dari nol ke 1, artinya untuk σ_{min} bisa menjadi bertambah besar pada tegangan tariknya [Gambar 1(c)]. Ini merupakan teori kombinasi beban yang berhubungan dengan kondisi beban pada sisi permukaan luar dari silinder *autofrettage* yang disebabkan oleh tegangan sisa tarik dan tekanan. Tiga hal inilah yang akan disimulasikan.

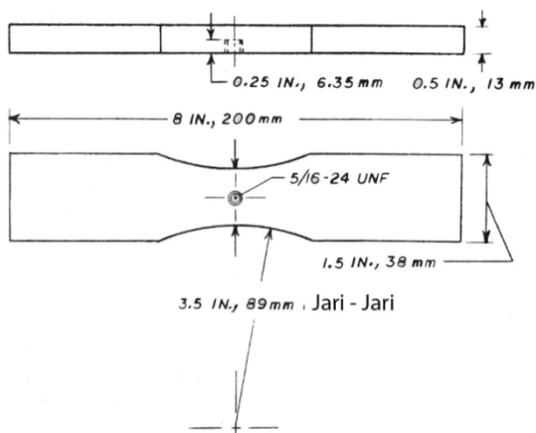
Gambar 2(a) menunjukkan fenomena pemanjangan (*elongation*) $s's_1$ pada jarak y dari permukaan netral yang dijadikan garis netral n_1s_1 ke mm . Oleh r merupakan jari-jari kurva sumbu lendutan gelagar, dengan menggunakan cara yang sama segitiga non_1 dan s_1n_1s' , pemanjangan ss' mengakibatkan peregangan arah sumbu x , ϵ_x , yaitu:

$$\epsilon_x = \frac{s's_1}{nn_1} = \frac{y}{r} \dots \dots \dots (1)$$

Hubungan Umum antara Tegangan Minimum dan Maksimum



Gambar 1: Hubungan antara tegangan minimum dan maksimum pada *autofrettage*



Gambar 2: Gambar ukuran spesimen uji bengkok

Untuk arah *longitudinal* didalam batang, akibat dari adanya perilaku tarikan dan tekanan, akan menghasilkan bentuk kurva lengkungan, R . Seperti pada Gambar 2(b), jari-jari lengkungan, R , harganya akan lebih besar dari pada r pada keadaan yang sama, dimana ϵ_x merupakan bilangan yang lebih besar dari pada ϵ_z dan menjadi:

$$R = \frac{1}{\mu} r \dots\dots\dots (2)$$

Dari regangan batang longitudinal, substitusi antara tegangan dan hukum Hooke, diperoleh persamaan:

$$\sigma_x = \frac{Ey}{r} \dots\dots\dots (3)$$

Untuk menghitung nilai akhir dari tegangan yang disebabkan oleh kombinasi tegangan sisa eksternal dan tegangan lingkaran-Lame yang disebabkan oleh penekanan internalnya, maka persamaan ini dapat dipergunakan.

Kombinasi antara tegangan sisa eksternal (σ_γ) dan tegangan lingkaran-Lame (σ_{IR}), pada tegangan sisa tarik eksternal untuk kondisi 100% regangan lebih, adalah:

$$\frac{\sigma_{IR}}{\sigma_\gamma} = \frac{-\ln W}{W^2 - 1} \left(1 + \frac{b^2}{r^2}\right) + \left(1 - \ln \frac{b}{r}\right) \dots\dots\dots (4)$$

dimana: $r = b$:

$$\frac{\sigma_{IR}}{\sigma_\gamma} = \frac{-2\ln W}{W^2 - 1} + 1 \dots\dots\dots (5)$$

tegangan tekan (σ_{tp}):

$$\sigma_{tp} = \frac{a^2 p}{(b^2 - a^2)} \left(1 + \frac{b^2}{r^2}\right) \dots\dots\dots (6)$$

dimana: $r = b$:

$$\sigma_{tp} = \frac{2p}{W^2 - 1} \dots\dots\dots (7)$$

Substitusi dari persamaan (2) dan (3) menghasilkan tegangan maksimum pada permukaan sisi luar spesimen uji 100% regangan lebih pada silinder, sepanjang tegangan maksimumnya sama dengan jumlah tegangan sisa yang disebabkan oleh *autofrettage*, dan tegangan yang disebabkan oleh tekanan internal. Dalam hal ini, tegangan utama merupakan nilai utama antara tegangan maksimum dan sisa tegangan.

Faktor konsentrasi-tegangan untuk uji tekuk sederhana pada lembaran plat yang lebarnya terbatas, dan dengan lubang yang dibuat sangat ditentukan oleh K_t , yang besarnya bergantung besar/kecilnya ukuran lubang dalam areal tekukan platnya.

Untuk $(a)/h \rightarrow \infty$:

$$K_{t\infty} = \frac{5 + 3\nu}{3 + \gamma} \dots\dots\dots (8)$$

Untuk baja, $\nu = 0,3$ maka:

$$K_{t\infty} = 1,788$$

Untuk lubang beralur (5/16inchi.- 24 UNF), nilai prakiraan untuk ukuran lubang (a) dipakai 0,3 inchi (7,62 mm). Demikian pula $(a)/h = 0,6$, nilai $K_{t\infty}$ nya adalah:

$$K_t = 2,45 \text{ (lubang besar)}$$

Untuk lubang beralur sempit (6-32 UNC), nilai perkiraannya adalah $(a) = 0,1278 \text{ inchi}$ (3,246 mm) yang digunakannya. Maka untuk $(a)/h = 0,2556$, nilai $K_{t\infty}$ nya adalah:

$$K_{t\infty} = 2,72 \text{ (untuk lubang sempit)}$$

Dengan menggunakan nilai $K_{t\infty}$ dan $(a)/h$, dari persamaan Peterson, nilai K_t untuk lembaran plat dengan lebar tak terhingga akan diperoleh:

$$K_t = 1,9 \text{ (lubang besar)}$$

$$K_t = 2,4 \text{ (lubang sempit)}$$

Ini dapat diperhatikan bahwa faktor konsentrasi tegangan untuk lubang sempit akan lebih besar bila dibandingkan dengan lubang yang besar, atau dapat dikatakan bahwa untuk konsentrasi tegangan yang lebih

besar nilainya akan menjadi menurun untuk diameter lubang yang sempit. Oleh karena itu, dalam hal yang istimewa akan terjadi $K_t = 3$ untuk lubang tekuk yang searah sumbu plat.

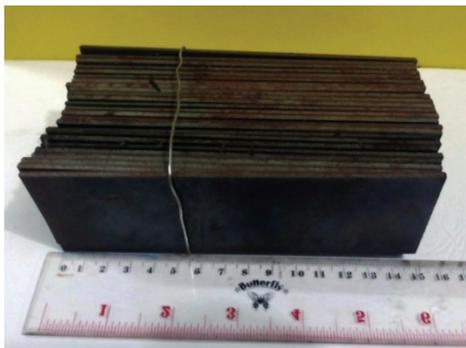
Lipson dan Sheth menunjukkan hubungan antara faktor takikan-lelah dan faktor konsentrasi tegangan untuk baja dan besi cor. Dari hubungan ini nilai untuk dua ukuran lubang tersebut diatas dapat dihitung.

$$K_f = 1,85 \text{ (lubang besar)}$$

$$K_f = 2,27 \text{ (lubang sempit)}$$

3. Metodologi Penelitian

Dalam menentukan spesimen uji, pertama-tama yang dipilih untuk dianalisis karakteristiknya adalah tegangan tarik pada dinding sisi luar silinder. Spesimen uji dibuat dalam bentuk plat tekuk dengan tebal 13 mm dan lebar gagangnya 38 mm, seperti yang terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3 (Foto): Sampel untuk uji tekuk

Diperkirakan dalam penelitian ini dibutuhkan sebanyak 90 spesimen uji dari baja untuk bahan laras senapan yaitu merupakan modifikasi ekuivalensi standar baja 4330 (4330 gun steel) yang diambil dari diameter silinder 155 mm. Dari spesifikasi mekanis material untuk standar 4330 mm gun steel adalah tegangan luluh atas 0,1%, kekuatan tegangan tariknya adalah 160 Ksi (1100 Mpa), Kekuatan tegangan tarik atas/puncak adalah 195 Ksi atau 1345 Mpa, prosentase panjangnya adalah 16% dan reduksi permukaannya adalah 50%.

Setengah dari bahan untuk spesimen uji dari produksi pabrik sebenarnya berukuran 5/16 inci, dan lubang ulir standar 24 UNF dan setengahnya lagi diambil dari bahan produk pabrik lain dengan lubang ulir 6-32 UNC. Seluruh lubang yang ujungnya ada ditengah-tengah laras atau disebut juga sumbu netral

(*neutral axis*) dipergunakan sebagai model spesimen uji. Kemudian tegangan-tegangan yang terjadi dihitung dengan menggunakan persamaan gelagar tekuk sederhana (*the simple beam*) dengan teori kombinasi pendekatan terhadap potongan melintang pada setiap pengujian spesimen uji tekuk yang kemudian pendekatannya dengan bentuk potongan melintang pada spesimen uji.

Seluruh spesimen diuji didalam mesin uji lelah (tarik) merek Sonntag seri SF1U dengan ukuran penjepit grib panjang lengan batang 9 inci (22,96 cm) dan panjang batang kritisnya 3 inci (7,69 cm). Seluruh sampel benda uji diuji sampai mencapai kondisi lelah pada batang kritisnya atau pada daerah retak lelahnya yaitu dikisaran 0,05 inci (1,27 mm). Dan pada permukaan tarik teramati adanya banyaknya (garis-garis) siklus N_f yang terekam. Ini tentunya akan menjadi pertimbangan untuk menentukan mana batas atas yang dapat diterima untuk ukuran retak lelah sebagai permulaannya. Sebab retak-retak yang timbul pada ukuran ini masih dalam ukuran yang sangat kecil untuk dideteksi dini oleh pengamat optik. Dalam masalah ini, memang tidak teramati adanya retak yang terdeteksi untuk ukuran yang lebih besar beberapa juta siklus. Keadaan spasimen uji seperti ini selanjutnya dipertimbangkan untuk dapat diabaikan. Pemberian beban kombinasi saat permulaan statis dan beban alternatif dinamis yang diijinkan untuk suatu variasi acak pada nilai yang dipergunakan, untuk dievaluasi keadaan tegangan yang terlihat pada permukaan sisi luar benda silinder autofrettage yang mengalami penekanan dari dalam.

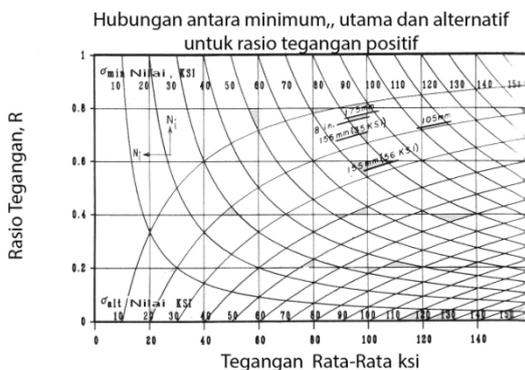
Hasil dan Pembahasan

Pertama kali dilakukan uji tarik dinamis dan seluruh spesimen uji diuji sampai tercapai deformasi plastis atau lelah (tarik). Gambar 4 menunjukkan beberapa tingkat tegangan permukaan sisi luar dimana untuk tipikal silinder 100% memperlihatkan keadaan regangan lebih (*overstrained*). Disini diperlihatkan pula tegangan sisa tarik dari sekitar 70 Ksi (483 Mpa) sampai sekitar 105 Ksi (724 Mpa), dan tingkat tegangan yang disebabkan oleh penekanan dari 28 Ksi (193 Mpa) sampai dengan sekitar 60 Ksi (414 Mpa). Pada gambar tegangan, Gambar 3 adalah merupakan data pencitraan nilai tekanan internalnya.



Gambar 4: Daerah tegangan pada Permukaan luar silinder

Adapun pada Gambar 5 memperlihatkan hubungan antara tegangan minimum, tegangan utama, dan tegangan alternatif untuk seluruh tingkatan ratio-R positif yang menjadi acuannya, dan

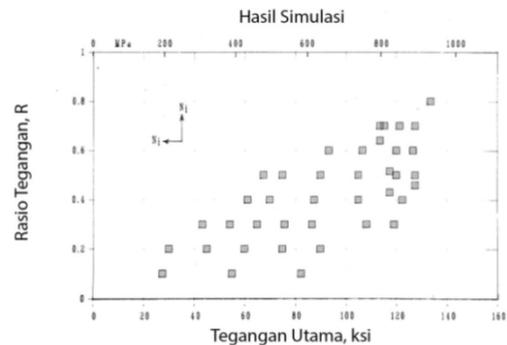


Gambar 5: Hubungan antara tegangan minimum, tegangan utama, dan tegangan alternatif

Tegangan sisa tarik pada sisi luar silinder ditunjukkan oleh besarnya σ_{min} . Tegangan Lamé yang disebabkan oleh penekanan kompresi, σ_{min} , untuk beberapa ratio tegangan istimewa, perkiraan nilai σ_{min} , σ_{alt} , dan σ_{utama} dapat dihitung dengan mengacu pada parameter grafik.

Pengujian untuk mengetahui hubungan antara tegangan minimum, tegangan utama dan tegangan alternatif terhadap ratio tegangan positif diperoleh data karakteristik seperti Gambar 5, caranya adalah dengan memvariasikan tingkat ratio-tegangan dengan keadaan tegangan seperti yang sudah ditunjukkan pada Gambar 5, atau dengan merencanakan keadaan didalam urutan sehingga menjadi area tegangannya menjadi lebih lebar dari pada keadaan siklus awal retak-lelahnya. Gambar 6 menunjukkan matrik

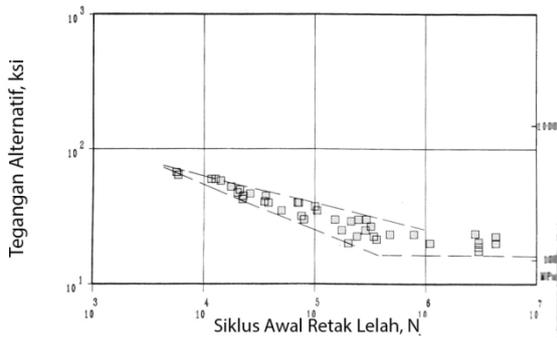
hasil uji yang telah dilakukan. Baris ditandai dengan N_i , artinya menunjukkan dimana keadaan N_i meningkat.



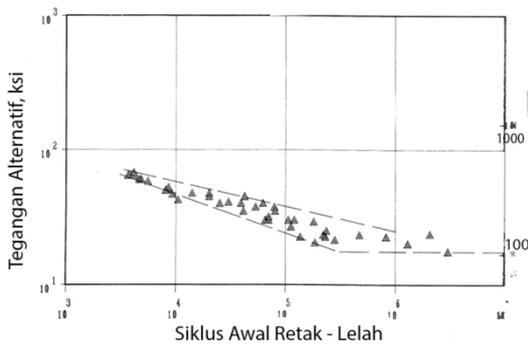
Gambar 6: Matrik uji yang dipergunakan dalam program R-ratio positif

Pada Gambar 7 dan 8 menunjukkan kurva S-N yang merupakan karakteristik hubungan timbal balik antara tegangan alternatif terhadap jumlah siklus awal terjadinya retak, pengaruh faktor konsentrasi tegangan, dan faktor takikan leleh. Kedua faktor ini merupakan karakteristik batas ketahanan yang riil atau nyata untuk tingkat tegangan dibawah 20 Ksi (138 Mpa). Perlu diingat disini, agar spesimen uji lubang lebar dapat runtut bisa mengikuti awal retak-lelah sehingga dapat bisa berdampak lebih besar dan berpengaruh terhadap kedua siklusnya maka awal retak-lelah dimulai dari lubang sempit dibawahnya, dan besarnya harus sama atau ekuivalen dengan tingkat tegangan alternatifnya. Gambar 7 dan 8, kedua gambar ini menunjukkan karakteristik data penyebaran dalam retak awal leleh dalam bentuk garis kerucut. Lebih jauh, menunjukkan disini pengaruh terjadinya penyebaran karena adanya perubahan dalam ratio tegangan.

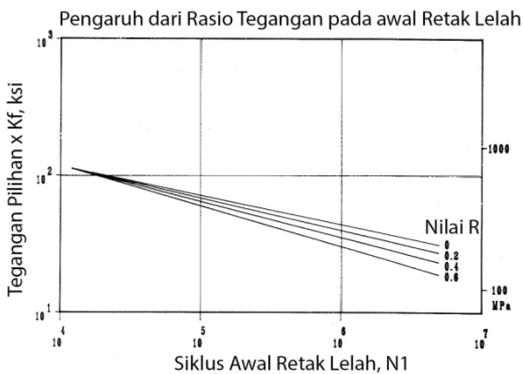
Gambar 9 menunjukkan pengaruh ratio-tegangan R pada retak leleh awal, yaitu dengan menggunakan faktor kelipatan tegangan seperti pada diskusi sebelumnya. Untuk menormalisasikan pengaruh ukuran lubang pada ratio-R dan retak leleh awal, Gambar 9 menunjukkan pengaruh hubungan ratio-R pada tegangan alternatif dengan banyaknya siklus untuk retak leleh awal untuk kedua macam ukuran lubang tersebut. Kombinasi pengaruh penyebaran yang terlihat pada Gambar 7 dan 8 masuk dalam satu perlakuan yang serasi dan seragam. Adapun lereng yang terlihat pada garis menyebar akan bertambah meningkat dengan meningkatnya nilai R.



Gambar 7: Diagram S-N untuk lubang besar pada spesimen bengkok



Gambar 8: Diagram S-N untuk lubang kecil pada spesimen bengkok



Gambar 9: Pengaruh ratio tegangan pada awal retak leleh

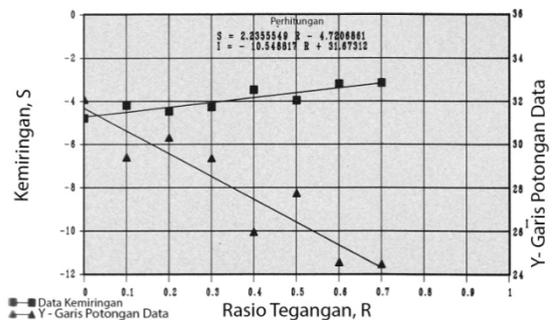
$\bar{\sigma}_{alt}$ adalah merupakan nilai tegangan alternatif dengan K_f yang disubstitusikan atau dimasukkan kedalamnya. Dengan mengkalikan tegangan alternatif nominalnya dengan K_f akan diperoleh satu harga rata-rata awal retak leleh yang nyata dari grafik ini. Perlu jadi catatan disini, bahwa untuk tegangan alternatif yang lebih dari pada 12.000 siklis, grafik menunjukkan ratio

tegangannya meningkat sampai $\bar{\sigma}_{alt}$ menjadi konstan, dan banyaknya siklis kembali keadaan mula-mula maka akibatnya retak leleh menjadi menurun. Ini mengindikasikan pengaruh menekan dapat meningkatkan ratio-R. Konvergasi data yang terjadi pada sekitar 12.000 siklis, menunjukkan ratio-R berpengaruh secara signifikan akan mengurangi pengaruh pada permulaan retak, dan kemudian terjadi perubahan didalam tegangan alternatifnya didalam daerah antar tingkat siklisnya. Pengaruh ratio-R menjadi bertambah dominan didalam daerah siklis yang tinggi. Data ini sebenarnya belum mencukupi untuk menggenarasikan didalam siklis tingkat rendah untuk menentukan mana yang mempunyai pengaruh dominan, namun ini untuk dijadikan sebagai acuan sebagai tegangan alternatif dari tren data.

Untuk menjelaskan secara lengkap pengaruh ratio tegangan pada awal retak-leleh untuk kedua ukuran lubang yang diuji, Gambar 10 menunjukkan perubahan didalam lereng (*slope*) nya dan pemotong garis y pada grafik log-log dari pada kurva S-N seperti didalam Gambar 9 yang disebabkan oleh adanya perubahan didalam ratio tegangan. Garis-garis ini mempunyai slope, S, yang

mana menunjukkan kekuatan akhir dari $\bar{\sigma}_{alt}$ dan pemotong-y, I_y , yang mana menunjukkan koefisien $\bar{\sigma}_{alt}$ dan dapat ditulis dalam persamaan:

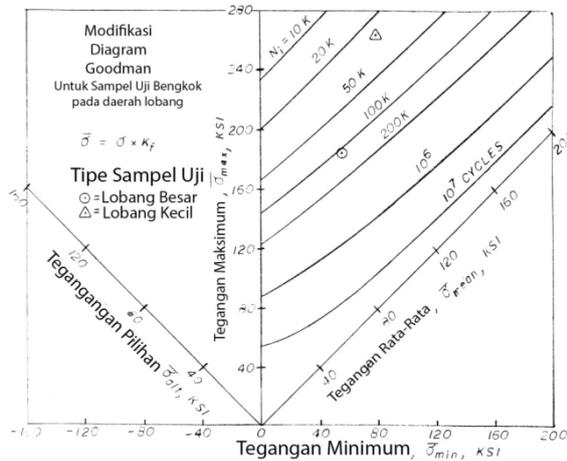
$$\ln N_i = S \ln \bar{\sigma}_{alt} + I \dots\dots\dots (6)$$



Gambar 10 (fig 9 hal 127): Variasi kemiringan dan perpotongan y terhadap ratio tegangan

Seperti yang bisa dilihat dalam Gambar 10, lereng (*slope*) meningkat dari -4,72 pada R = 0 menjadi -3,15 pada R = 0,7, dan nilai I

menurun dari 31,7 pada $R = 0$ menjadi 24,3 pada $R = 0,7$. Pada koordinat tegangan, permulaan retak-lelah dalam kejadian ini menjadikan dua parameter ukur tegangan seperti pada Gambar 11.



Gambar 11: Modifikasi diagram Goodman untuk spesimen bengkak

Hubungan tegangan dapat didefinisikan dalam empat cara, yaitu tegangan minimum, tegangan maksimum, tegangan utama dan tegangan alternatif. Kombinasi yang paling sederhana dari pada tegangan, ratio tegangan, atau ratio-R, didefinisikan oleh antara tegangan maksimum dan minimum. Oleh karena itu definisi hubungan tegangan pada koordinat x dan y dapat diungkapkan seperti pada Gambar 11. Sebagai alternatifnya, tegangan utama dan tegangan alternatif seperti namoak pada gambar dua koordinat yang miring 45 derajat dari sumbu x dan y, juga dapat didefinisikan terhadap cakupan hubungan diantara tegangan, yang mana ini merupakan ouncaak atas untuk perkiraan kejasaan permulaan lelah.

Sebagai jawapan dari persamaan (6)

untuk $\bar{\sigma}_{alt}$ dengan pemakaian persamaan akar, dapat dipetakan model diagram Goodman seperti yang terlihat pada Gambar 11 dengan parameter siklis awal lelah yang konstan. Kemudian lebih jauh, diagram ini dapat dipakai untuk menentukan keadaan awal lelah rata-ratanya untuk keadaan tegangan yang ratio tegangannya positif kedalam perhitungan faktor reduksi tegangan lelahnya yang ada pada lubang sisi luarnya.

Dua contoh data uji seperti yang terlihat pada Gambar 11, pertama dijelaskan oleh adanya titik siklis pada spesimen uji lubang

besar. Nilai σ_{min} sebesar 30 Ksi (207 Mpa), σ_{maks} sebesar 100 Ksi (690 Mpa), dan banyaknya siklis permulaan retak lelah adalah $N_i = 105.000$ siklis. Dengan mengkalikan dengan faktor $K_f = 1,85$ untuk spesimen lubang besar seperti yang dijelaskan sebelumnya. Nilai transformasi σ_{min} dan σ_{maks} menjadi masing-masing 5,55 Ksi (383 Mpa) dan 185 Ksi (1276 Mpa). Sebagai catatan disini bahwa titik jatuh sangat mendekati terhadap perhitungan garis parameter 100.000 siklis.

Titik kedua, terlihat sebagai segitiga yang menampilkan spesimen uji lubang kecil untuk nilai uji σ_{min} dan σ_{maks} masing-masing adalah 35 Ksi (241 Mpa) dan 117 Ksi (805 Mpa). Dengan mengkalikan faktor $K_t = 1,85$ untuk spesimen uji lubang kecil, seperti halnya pada spesimen lubang besar, nilai transformasi σ_{min} dan σ_{maks} masing-masing menjadi 79,5 Ksi (548 Mpa) dan 265 Ksi (1827 Mpa). Banyaknya siklis untuk memulai retak lelah adalah $N_i = 30.000$ siklis. Sperti terlihat didalam Gambar 11, titik ini diperkirakan parameter terjadi diantara 20.000 siklis dan 50.000 siklis.

Dengan menggunakan diagram ini dapat diprediksi rata-rata yang dipakai untuk memastikan permulaan untuk menentukan ratio tegangan postif bila nilai K_f nya diketahui untuk dipergunakan pada menentukan lubang spesimen uji lubang.

Kesimpulan

Model simulasi yang sudah dilakukan untuk mengkaji pengaruh tegangan tarik-sisa pada permukaan luar silinder autofrettage, yaitu dengan cara membuat model spesimen uji dengan alur ukuran lubang lebar dan alur ukuran lubang sempit pada permukaan silindernya, diperoleh hasil:

- (1). Pengaruh ukuran lubang didalam permulaan retak lelah adalah berbanding langsung terhadap faktor titik lelah. Diameter lubang yang lebih kecil menunjukkan bahwa banyaknya siklis yang dibutuhkan untuk memulai retak lelah pada lubang.
- (2). Nilai positif untuk ratio-R tegangannya meningkat, namun akan menurun untuk jumlah siklis yang tinggi (>20.000 siklis) dan mulai terjadi retak lelah awal, serta

- tegangan alternatif tetap terjaga tetap konstan.
- (3). Dengan melakukan perhitungan terhadap faktor titik leleh, satu hal yang dapat diprediksi kejadian permulaan rata-ratanya untuk tingkat ukuran lubang dibawah keadaan ratio-tegangan positif oleh pemakaian diagram Goodman yang direkayasa sudah sesuai untuk bahan yang dipergunakan.
5. Khurmi, R.S. Machine Design, Text Book, Eurasia Ltd, New Delhi, 2010
 6. Burk, J.D dan Lawrence, F.V., The Effect of Residual Stresses on Weld Fatigue Life, McGraw Hill Book Company Inc, New York, 2010
 7. Peterson, R.E., Stress Concentration Factor, John wiley and Sons, New York, 2009

DAFTAR PUSTAKA

1. Dieter, G.E. Mechanical Metallurgy, SI Metric Edition, Mc Graw Hill Book Co., 2008
2. Pollack, H.W. Material Science and Metallurgy, Reston Publishing Company Inc, Virginia, 2008
3. Holman, J.P. Holman, Experimental Method for Engineers, Fourth edition, McGraw-Hill Book Company Inc, Tokyo, 2012
4. Nielsen, Jack N, Missile Aerodynamic, McGraw Hill Book Company Inc, New York, 2010