

KAJI EKSPERIMEN PENINGKATAN UMUR LELAH POROS BERALUR DENGAN PENAMBAHAN ALUR BANTU

Devi Chandra

Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Andalas

ABSTRAK

Poros merupakan elemen mesin yang berfungsi untuk meneruskan daya dan putaran. Dalam aplikasinya poros lebih cenderung mengalami gagal fatigue (lelah) karena adanya beban dinamik seperti beban yang berulang dan beban berfluktuasi. Kegagalan poros akan lebih cepat terjadi bila terdapat diskontinuitas pada penampang poros seperti adanya poros bertingkat, adanya alur untuk snap ring dan O-ring serta adanya alur pasak dan lubang. Perubahan geometri yang terjadi pada poros ini akan menyebabkan terjadinya pemusatan tegangan (konsentrasi tegangan) yang akan mengakibatkan tegangan pada perubahan geometri tersebut akan tinggi, sehingga umur atau kekuatan poros akan berkurang. Untuk mengurangi besarnya konsentrasi tegangan pada daerah perubahan geometri tersebut, maka dilakukan penambahan geometri baru pada poros berupa alur bantu. Untuk mengetahui berapa besarnya pengaruh penambahan alur bantu terhadap penurunan konsentrasi tegangan dan terhadap peningkatan umur lelah poros, maka dilakukan pengujian fatiq terhadap poros tanpa alur bantu dan terhadap poros dengan alur bantu. Hasil pengujian menunjukkan bahwa terjadi peningkatan umur poros sebesar 27,79

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Poros dalam penggunaannya seringkali mengalami pembebanan dinamik dan akan gagal oleh beban dinamik tersebut yang dikenal dengan gagal lelah (fatigue). Gagal lelah berbeda dengan kegagalan akibat beban statik, dimana gagal lelah dapat terjadi pada tingkat tegangan yang bekerja lebih rendah dari tegangan yield material dan tergantung pada jumlah pengulangan beban yang terjadi. Poros merupakan elemen mesin yang banyak digunakan untuk meneruskan daya dan putaran. Umumnya konstruksi dari poros mengalami perubahan dimensi dengan tiba-tiba (poros bertingkat), mempunyai alur untuk snap ring dan O-ring, dan mempunyai alur pasak dan lubang untuk memasang elemen mesin yang lain. Dalam perancangannya, perubahan bentuk geometri seperti itu tidak dapat dihindari karena mempunyai tujuan untuk pemasangan bantalan, tempat saluran pelumas, pemasangan roda gigi dan lain-lain. Perubahan geometri akan menyebabkan terjadinya pemusatan tegangan (konsentrasi tegangan) yang akan mengakibatkan tegangan pada geometri tersebut akan tinggi, sehingga umur atau kekuatan poros akan berkurang. Kegagalan elemen mesin akibat beban dinamik dan statik pada umumnya terjadi pada titik-titik dimana terdapat konsentrasi tegangan. Harga konsentrasi tegangan (K_t) untuk beberapa bentuk perubahan geometri sudah banyak diteliti dan beberapa buku sudah memuat grafik harga konsentrasi tegangan untuk berbagai macam bentuk perubahan geometri.

Pada penelitian ini akan dilakukan reduksi tegangan yang terjadi pada poros yang mengalami perubahan geometri berupa adanya alur yang mengalami pembebanan bending rotasi bolak-balik dengan cara penambahan geometri baru berupa alur bantu. Dengan adanya alur baru (seterusnya disebut sebagai alur bantu) ini diharapkan konsentrasi tegangan akan terbagi, sehingga konsentrasi tegangan pada alur utama akan turun.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan cara yang terbaik untuk mereduksi konsentrasi tegangan pada poros beralur akibat beban bending bolak-balik tanpa mengganggu fungsi dari poros. Disamping itu juga untuk memperoleh data-data empiris peningkatan umur lelah pada poros beralur akibat momen bending bolak-balik dengan penambahan alur bantu.

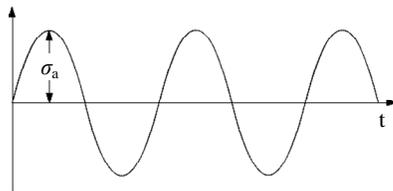
1.3 Batasan Masalah

- Penelitian ini dibatasi pada beberapa kondisi :
- a. Alat uji yang digunakan bekerja untuk beban lentur dan tegangan yang bekerja adalah bending bolak-balik murni.
 - b. Spesimen yang diuji berbentuk poros dengan diameter 16 mm (0.63 in) dan materialnya Baja St 37 dengan spesifikasi yang telah ditentukan.
 - c. Beban yang diberikan sebesar 4,3 kg (43 N) pada ujung masing-masing spesimen untuk setiap pengujian.
 - d. Jarak alur utama dengan alur bantu sejauh 2 mm dari alur utama.

2. DASAR TEORI

Pendahuluan

Hingga saat ini perancang dituntut untuk menghasilkan suatu produk dengan kriteria yang baik, kondisi kerja dengan kecepatan dan temperatur yang tinggi, beban yang besar, waktu pengoperasian yang lebih lama serta biaya yang relatif murah. Untuk mencapai hal tersebut, perancang harus jeli dalam menghindari kegagalan akibat patah lelah. Sebagian besar kegagalan pada komponen mesin atau elemen mesin adalah patah lelah yang disebabkan oleh beban dinamik. Jenis kegagalan itu terjadi pada tingkat yang lebih rendah dari tegangan yield material. Patah lelah timbul karena tegangan tersebut berfluktuasi secara periodik. Jika spesimen berputar, bagian atas selalu mengalami beban tekan dan bagian bawah akan mengalami bagian tarik dengan besar yang sama, sehingga setiap titik pada permukaan spesimen mengalami tegangan bolak balik yang menyerupai garis sinusoidal seperti gambar 1 di bawah ini :



Gambar -1 Kurva tegangan lentur bolak-balik

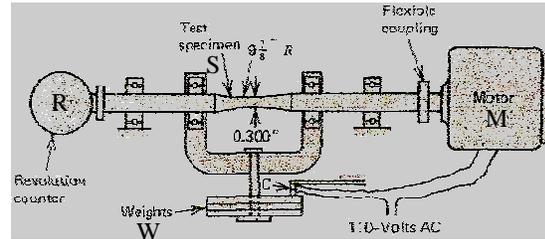
Agar elemen mesin tidak gagal akibat patah lelah, maka elemen tersebut haruslah dirancang berdasarkan kriteria patah lelah. Perancangan elemen mesin berdasarkan berdasarkan kriteria patah lelah dapat mencegah terjadinya patah lelah atau jika patah lelah tidak dapat dihindari, maka metode perancangan ini dapat memberikan kisaran umur elemen mesin dalam jumlah jam operasi. Dengan diketahuinya perkiraan umur elemen mesin, maka dapat diambil tindakan untuk mencegah kerusakan elemen mesin dengan jalan mengganti elemen mesin dengan yang baru.

2.2 Kekuatan Lelah Beban Lentur Berputar

A. Wöhler seorang insinyur kereta api di Jerman membuat mesin uji lelah yang dapat memberikan beban yang diulang-ulang. Wöhler menemukan beberapa fakta penting tentang fenomena patah lelah, yaitu :

1. Faktor utama yang mempengaruhi patah lelah adalah pengulangan beban yang terjadi selama pengujian dan bukan waktu pengujian.
2. Besi dan baja dapat menahan beban yang diulang-ulang beberapa kalipun tanpa mengalami patah lelah, asal tegangan yang terjadi dalam besi dan baja tersebut tidak melebihi suatu harga tertentu. Untuk beban yang menimbulkan tegangan bolak balik yang diulang-ulang, tegangan batas yang tidak menimbulkan patah lelah tersebut kemudian dinamakan kekuatan lelah.

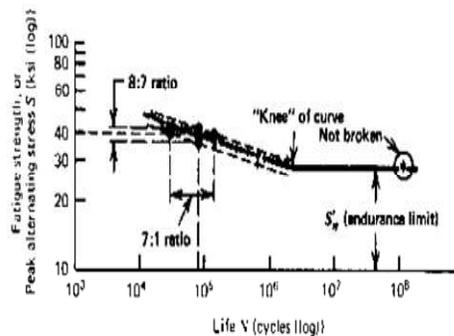
Kemudian R.R Moore membuat mesin uji lelah dengan beban lentur bolak balik seperti Gambar 2 berikut :



Gambar -2 Mesin uji lelah R. R Moore

2.3 Kurva S – N

Kurva S – N merupakan kurva eksperimental hasil percobaan uji lelah, dengan memberikan beban yang berbeda-beda pada spesimen yang sama untuk memberikan tegangan yang berbeda pada daerah di atas dan tepat di bawah batas kekuatan lelah. Suatu cara umum untuk membuat kurva S – N adalah dengan memasang spesimen-spesimen yang sama pada mesin uji lelah R.R Moore, dengan memberikan beban yang berbeda-beda untuk memberikan tegangan yang berada pada daerah di atas dan tepat di bawah batas ketahanan lelah. Data pengujian yang diperoleh diplot pada koordinat log-log seperti yang ditunjukkan oleh kurva S – N mewakili data pengujian lelah baja 120 BHN pada gambar 3 di bawah ini :

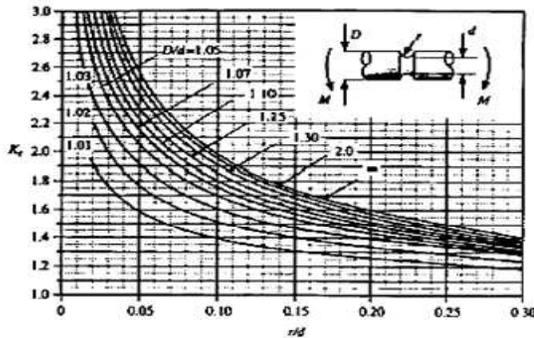


Gambar -3 Hasil uji lelah pada diagram log-log Untuk baja 120 BHN

2.4 Konsentrasi Tegangan

2.4.1 Faktor Konsentrasi Tegangan Teoritik, K_t

Konsentrasi tegangan merupakan hal yang sangat penting dipahami karena sebenarnya kegagalan lelah terjadi pada titik di mana terdapat konsentrasi tegangan yang tinggi pada elemen mesin seperti pada alur, takik, lubang, ulir, alur pasak, dan sebagainya. Artinya tegangan yang terjadi pada potongan yang melalui tempat konsentrasi tegangan, mempunyai harga yang melebihi harga tegangan nominal teoritik. Beberapa literatur telah menampilkan harga faktor konsentrasi tegangan untuk berbagai jenis pembebanan. Gambar 4 dibawah adalah grafik harga faktor konsentrasi tegangan teoritik untuk poros beralur yang mendapat beban bending.

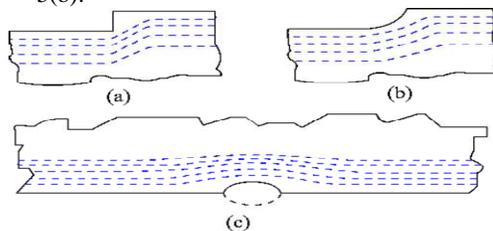


Gambar -4 Grafik Faktor Konsentrasi Tegangan Poros beralur beban bending

2.4.2 Penurunan Konsentrasi Tegangan

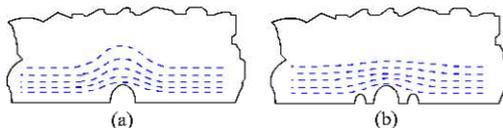
Fenomena peningkatan konsentrasi tegangan akibat perubahan geometri secara tiba-tiba dapat dilihat pada gambar 5(a). Garis putus-putus menggambarkan aliran konsentrasi tegangan. Dari gambar tersebut terlihat bahwa tegangan terkonsentrasi pada daerah sekitar perubahan penampang. Beberapa cara yang dapat dilakukan untuk mengurangi tegangan yang bekerja yaitu :

1. Merubah bentuk geometri dari alur itu sendiri.
Bentuk alur yang semula berbentuk lingkaran menjadi bentuk ellips, seperti yang terlihat pada gambar 5(c) dan bentuk siku menjadi bentuk *fillet*, seperti yang terlihat pada gambar 5(b).



Gambar 2.5 Penurunan tegangan dengan perubahan geometri alur

2. Pembuatan alur baru dengan diameter alur yang lebih kecil dari alur utama tanpa merubah dimensi dan bentuk geometri dari alur utama.
Pada gambar 6(a) tegangan terkonsentrasi pada daerah sekitar alur. Hal ini dapat diatasi dengan cara penambahan alur baru. Sehingga visualisasi aliran tegangannya dapat kita lihat pada gambar 6(b).

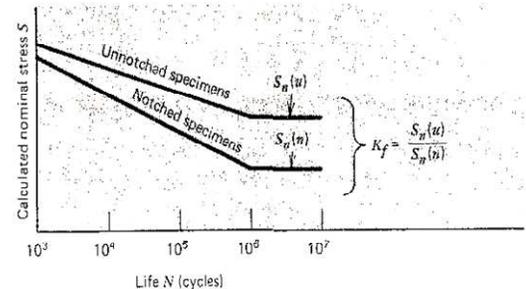
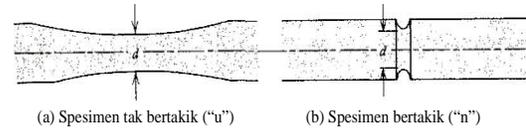


Gambar -6 Penurunan konsentrasi tegangan dengan penambahan alur baru

2.4.3 Faktor Konsentrasi Tegangan Lelah, K_f

Gambar 7 menunjukkan kurva $S - N$ untuk (1) spesimen tak bertakik (tanpa alur) dan (2) spesimen

bertakik (beralur). Tidak seperti kurva $S - N$ lainnya, tegangan yang dimasukkan adalah tegangan nominal yang mana konsentrasi tegangan tidak dimasukkan dalam perhitungan. Dimensi spesimen pada daerah terjadinya patah lelah adalah sama untuk kedua gambar 7 (a) dan (b). Oleh karena itu, berapa saja beban yang diberikan menyebabkan perhitungan tegangan yang sama untuk kedua kasus. Pada gambar 7, perbandingan kekuatan lelah spesimen tak bertakik dengan spesimen bertakik disebut sebagai faktor konsentrasi tegangan, K_f .



(c) Ilustrasi factor konsentrasi tegangan lelah, K_f

Gambar -7 Kurva S-N spesimen tak bertakik dengan spesimen bertakik

Harga K_f yang paling teliti adalah harga K_f yang diperoleh dari uji lelah. Rumus empiris untuk menentukan faktor konsentrasi tegangan lelah diberikan oleh Peterson yang memperbaiki rumus Neuber dan Kuhn, dimana faktor konsentrasi tegangan Peterson tersebut kini diterima oleh kalangan luas dan akan dipakai pada perhitungan harga konsentrasi tegangan lelah dalam penelitian ini. Rumus Peterson :

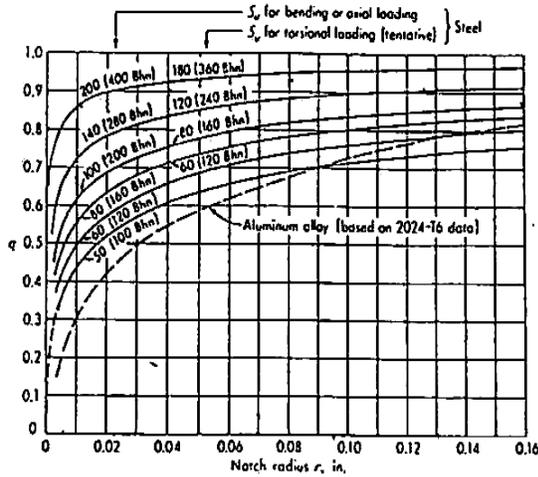
$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \sqrt{a/r}} \tag{2.1}$$

Rumus tersebut dapat ditulis dengan cara lain yaitu

$$K_f = 1 + (K_t - 1) \cdot q \tag{2.2}$$

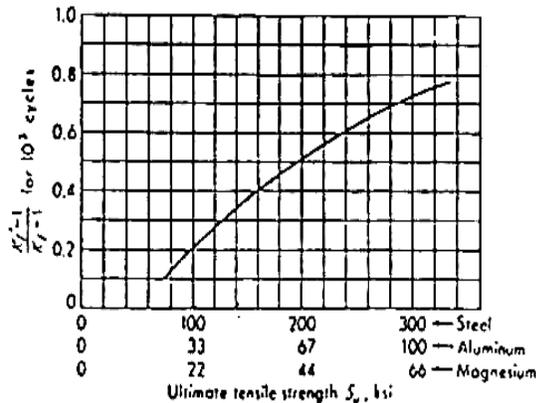
$$q = \frac{1}{1 + \sqrt{a/r}} \tag{2.3}$$

dimana q = faktor kepekaan takik



Gambar -8 Faktor kepeakan takik

Diagram untuk memperoleh harga q dapat dilihat pada Gambar 8 di atas yang merupakan fungsi dari jari-jari takik dan tegangan batas kekuatan tarik untuk beban puntir dan lentur. Secara empiris ditemukan bahwa kekuatan lelah pada putaran 10^3 dipengaruhi oleh adanya takik pada spesimen atau elemen mesin, tapi pengaruh takik pada kekuatan lelah pada putaran 10^3 tersebut tidak sebesar pengaruh pada kekuatan lelah pada putaran 10^6 . Artinya, harga faktor konsentrasi tegangan lelah $N = 10^3$ atau K_f' , lebih kecil dari harga faktor konsentrasi tegangan lelah, K_f . Harga konsentrasi tegangan lelah untuk $N = 10^3$, K_f' , dapat diperoleh dari gambar 9.



Gambar -9 Diagram K_f' untuk umur terbatas

Dari diagram di atas dapat disimpulkan bahwa : $1 \leq K_f' \leq K_f$. Faktor konsentrasi tegangan lelah K_f dapat dipakai sebagai pereduksi kekuatan lelah untuk mendapatkan kekuatan lelah menurut persamaan :

$$\sigma_n = \frac{C_L \cdot C_D \cdot C_S \cdot 0,5 \cdot \sigma_{ult}}{K_f} \quad (2.4)$$

Dimana C_L , C_D dan C_S berturut-turut adalah faktor beban, faktor ukuran dan faktor kondisi permukaan specimen.

3. METODOLOGI

3.1 Flowchart Penelitian

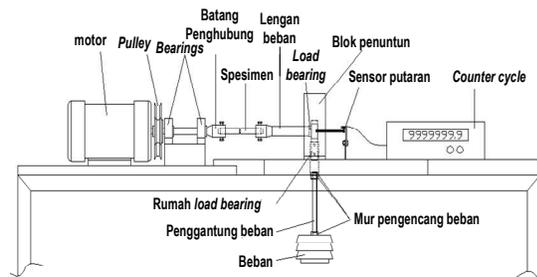
Penelitian ini dilakukan dengan tahapan seperti gambar 10 di bawah ini.



Gambar -10 Flowchart penelitian

3.2 Alat Uji Lelah

Alat uji yang digunakan pada pengujian ini yaitu Alat Uji Lelah Putaran Tinggi Tipe Momen Bending Kantilever. Prinsip kerja dari alat ini cukup sederhana. Poros yang akan diuji, dijepit oleh dua buah batang. Salah satu dari ujung batang diberi beban (lengan beban) dan batang yang lain (batang penghubung) dihubungkan dengan penggerak (motor). Dengan cara ini, maka momen bending akan bervariasi disepanjang spesimen. Spesimen ini diputar sampai mengalami kegagalan (patah lelah). Jumlah putaran selama alat uji bekerja dicatat oleh *counter cycle* yang dihubungkan ke lengan beban secara mekanik. Skema dari alat uji ini dapat dilihat pada gambar 11 di bawah ini.

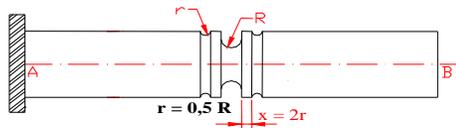


Gambar -11 Skema alat uji

(2.19)

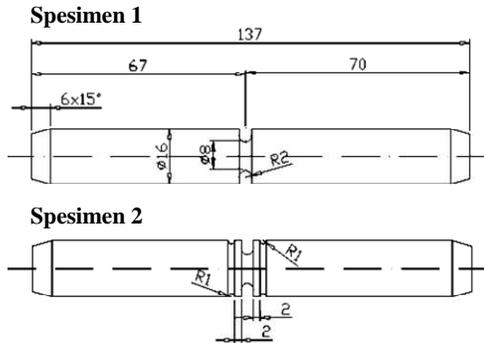
Jarak alur bantu adalah 2 mm (baik alur bantu di sebelah tumpuan maupun sebelah beban) dengan

radius alur bantu (r) sebesar 0,5 x radius utama. Bentuknya dapat dilihat pada gambar 12.



Gambar -12 Jarak dan radius alur bantu

Spesimen yang digunakan ada 2 (dua) jenis yang terdiri dari spesimen 1 (tanpa alur bantu) dan spesimen 2 (dua alur bantu). Karakteristik dari ke dua spesimen dapat dilihat pada gambar 13.



Gambar -13 Spesimen-spesimen uji lelah

Data spesimen yang digunakan adalah :

- Diameter besar (D) = 16 mm
- Diameter kecil (d) = 8 mm
- Jari-jari alur utama (R) = 2 mm
- Jari-jari alur bantu (r) = 1 mm
- Material yang digunakan adalah St 37 dengan $\sigma_y = 240$ MPa, kekerasan 107 BHN dan $\sigma_u = 370$ MPa.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian

Pengujian dilakukan pada 2 jenis spesimen, dengan jumlah spesimen sebanyak 3 buah. Pengujian pertama dilakukan pada spesimen 1 (tanpa alur bantu) dimana dari tiga kali pengujian spesimen patah berturut-turut pada putaran 441600 cycles, 319895 cycles dan 325017 cycles. Selanjutnya pada spesimen 2, dimana spesimen patah berturut-turut 425407 cycles, 579631 cycles dan 383378 cycles. Hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 4.1

Tabel 4.1 Hasil Pengujian

JENIS SPESIMEN	BEBAN, [P] (Kg)	MOMEN, [M] (Nmm)	UMUR LELAH, [N] (cycles)	RATA-RATA
1	4.3	9460	441600	362171
	4.3	9460	319895	
	4.3	9460	325017	
2	4.3	9460	425407	462805
	4.3	9460	579631	
	4.3	9460	383378	

4.2 Konsentrasi Tegangan Lelah Spesimen, K_f

Sebelum mendapatkan nilai K_f terlebih dahulu dicari harga faktor konsentrasi tegangan teoritik (K_t). Konsentrasi tegangan teoritik ditentukan dari hasil analitik dan eksperimen yang terdapat pada gambar 4. Dengan nilai $D/d = 2$ dan $r/d = 0,25$ maka diperoleh konsentrasi tegangan teoritik yaitu $K_t = 1,47$. Dari harga konsentrasi tegangan teoritik tersebut dapat ditentukan nilai konsentrasi tegangan lelah (K_f) dimana q adalah faktor kepekaan takik yang diperoleh dari gambar 8 dengan material 107 BHN dan $R=2$ mm maka harga $q = 0,7$.

Sehingga harga konsentrasi tegangan lelah (K_f) yaitu

$$K_f = 1 + (1,47 - 1) \cdot 0,7 = 1,329$$

Konsentrasi tegangan lelah ini akan mereduksi kekuatan lelah dari spesimen. Kekuatan lelah spesimen tereduksi merupakan perbandingan antara kekuatan lelah spesimen (σ_n) dan konsentrasi tegangan lelah (K_f). Konsentrasi tegangan lelah pada $N = 10^6$ adalah sebagai berikut ini :

$$\sigma_n \text{ tereduksi} = \frac{166,5 \text{ MPa}}{1,329} = 125,28 \text{ MPa (18170,92 Psi)}$$

Untuk konsentrasi tegangan lelah (K_f') pada $N = 10^3$ cycles berdasarkan gambar 9 diperoleh :

$$\frac{K_f' - 1}{K_f - 1} = 0,1$$

$$\frac{K_f' - 1}{1,329 - 1} = 0,1$$

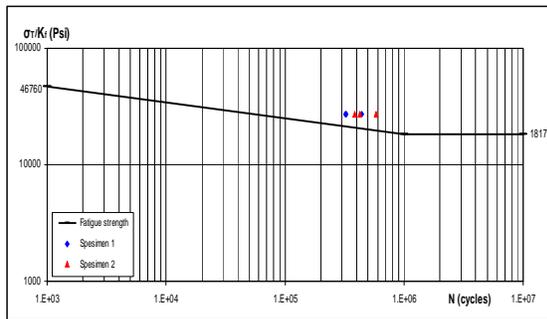
$$K_f' = 1,0329$$

Dengan menggunakan cara yang sama diperoleh konsentrasi tegangan lelah pada $N = 10^3$ adalah sebagai berikut ini :

$$\sigma'_n \text{ tereduksi} = \frac{\sigma_n}{K_f'}$$

$$\sigma'_n \text{ tereduksi} = \frac{333 \text{ MPa}}{1,0329} = 322,39 \text{ MPa (46759,92 Psi)}$$

Kekuatan lelah (untuk $N = 10^6$ dan $N = 10^3$) ini akan diplotkan pada kurva $S - N$ dengan skala log - log sehingga akan diperoleh kurva $S - N$ kekuatan lelah teoritis dan data hasil pengujian pada tabel 4.1 juga diplotkan pada grafik tersebut. Dimana data pengujian tersebut akan menjadi pembanding dari dari kurva $S - N$ teoritis seperti yang terlihat pada gambar 14 di bawah ini.



Gambar -14 Kurva S-N Hasil Pengujian

4.3 Analisa dan Pembahasan

Pada tabel 4.1 dapat dilihat dari tiga kali pengujian masing-masing spesimen didapat umur lelah yang berbeda-beda walaupun beban yang diberikan sama besar dan kondisi pengujian yang hampir sama. Selain itu, dari gambar 14 kurva $S-N$ dapat dilihat bahwa tegangan yang diberikan jauh dibawah kekuatan tarik (σ_u) material, tetapi poros tetap gagal pada putaran 319895 cycles (spesimen 1) dan 383378 cycles (spesimen 2). Kedua hal diatas disebabkan oleh beberapa faktor yang mempengaruhi perbedaan umur lelah spesimen tersebut, diantaranya :

- Proses pengerjaan pada pembuatan alur atau *groove* pada spesimen dimana untuk mendapatkan kondisi permukaan yang sama untuk masing-masing spesimen cukup sulit.
- Ketelitian dimensi *groove* spesimen. Dimensi *groove* berpengaruh pada faktor kepekaan takik (q) dan konsentrasi tegangan lelah (K_f). Jika kekuatan material dianggap sama pada semua spesimen, maka semakin besar jari-jari *groove* menyebabkan faktor kepekaan takik (q) semakin besar sehingga konsentrasi tegangan lelah (K_f) juga meningkat sehingga kekuatan lelah menurun menyebabkan spesimen patah lebih cepat.
- Ketelitian jarak dimensi alur bantu terhadap alur utama. Jarak alur bantu yang dapat menurunkan konsentrasi tegangan optimum pada alur utama adalah 2 mm ($r = 0,5R$). Bila melewati atau kurang dari 2 mm maka penurunan konsentrasi tegangannya tidak optimum atau malah menaikkan konsentrasi tegangan di alur utama.
- Sifat material. Sulit memastikan material masing-masing spesimen mempunyai sifat yang sama (homogen).

Bila dilihat secara keseluruhan umur rata-rata spesimen spesimen tanpa alur adalah sebesar 362171 cycles dan spesimen dengan dua alur bantu sebesar 462805 cycles. Terdapat perbedaan sebesar 100634 cycles atau sekitar 27,79 %. Hal ini menandakan bahwa penambahan dua alur bantu poros beralur (spesimen 2) dapat meningkatkan umur poros sebesar 27,79%.

5. KESIMPULAN

Setelah melakukan analisis terhadap hasil pengujian, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

- Besarnya tegangan yang bekerja pada poros beralur dapat dikurangi dengan cara penambahan 2 alur bantu pada poros yaitu 1 alur searah posisi beban dan 1 alur searah posisi tumpuan masing-masing sejauh 2 mm dari alur utama.
- Dari umur rata-rata spesimen ($N_{rata-rata}$), penambahan 2 alur bantu dapat meningkatkan umur poros sebesar 100634 cycles atau sekitar 27,79%.

DAFTAR PUSTAKA

- Amri. Usdi, "Alat Uji Lelah Putaran Tinggi Tipe Momen Bending Kantilever"
- Tugas Akhir Bidang Perancangan dan Konstruksi Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Andalas., 2004.
- Gasni. Dedison, "Kriteria Patah Lelah Untuk Beban Dinamik", Jurusan Teknik Mesin, Universitas Andalas, Padang, 2002.
- J.A. Collins, "Failure of Materials in Mechanical Design", John Wiley & Sons, The Ohio State University, 1981.
- Juvinall. C. Robert, *Fundamental of Machine Component Design*, Jhon Whiley & Sons, Inc., 1983.
- Spotts. M.F, "Design of Machine Elements", Seventh Edition, Mechanical Engineering Department, Northwestern University