

PERANCANGAN DAN PEMBUATAN MESIN UJI LELAH TIPE MOMEN BENDING KANTILEVER SKALA LABORATORIUM

Hendri Yanda¹, Dedison Gasni², Usdi Amri

¹Laboratorium Teknik Produksi, ²Laboratorium Perancangan dan Konstruksi Mesin,
Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik)

ABSTRAK

Sebagian besar kegagalan elemen mesin disebabkan oleh beban dinamik, dimana tingkat tegangan yang bekerja lebih rendah dari tegangan yield dari material dan tergantung pada jumlah pengulangan beban yang terjadi. Kegagalan ini disebut dengan gagal lelah atau fatigue. Pengujian dapat dilakukan untuk membuktikan bentuk penampang melintang patah lelah pada spesimen hasil pengujian dan membandingkan hasil perhitungan secara teoritis dengan data hasil pengujian.

Untuk membuktikan fenomena tersebut maka diperlukan perancangan suatu alat uji dimana pembuatan alat uji lelah ini akan memberikan data eksperimental mengenai kekuatan lelah pada spesimen, yang sebelumnya diperoleh dari studi literatur. Alat uji ini merupakan permodelan dari elemen mesin khususnya yang berbentuk poros dimana tidak mungkin dilakukan pengujian kekuatan lelah pada ukuran elemen mesin yang sebenarnya sehingga diperlukan alat uji yang mewakili keadaan elemen mesin tersebut dalam sebuah perangkat alat uji untuk skala laboratorium.

Spesimen diberi alur atau groove yang bertujuan untuk memberikan konsentrasi tegangan sehingga memastikan pada posisi groove tersebut akan patah. Pengujian dilakukan dengan beban yang bervariasi dimana penentuan beban pada alat uji menggunakan program SAP 2000 Non Linear. Dari hasil pengujian diperoleh bentuk penampang patah spesimen sesuai dengan bentuk penampang patah di literatur dan adanya penyimpangan antara tegangan teoritis dengan tegangan uji sekitar 2,07% - 16,5%.

1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada umumnya elemen mesin yang beroperasi dipengaruhi oleh beban dinamik, dan sebagian besar kegagalan elemen mesin disebabkan oleh beban dinamik tersebut, yang biasa disebut dengan gagal lelah atau *fatigue*. Gagal lelah berbeda dengan kegagalan akibat beban statik dimana gagal akibat beban statik terjadi apabila tegangan yang bekerja pada elemen mesin tersebut melewati tegangan *yield* dari material. Sedangkan gagal lelah terjadi pada tingkat tegangan yang bekerja lebih rendah dari tegangan *yield* dari material tersebut dan juga tergantung pada jumlah pengulangan beban yang terjadi.

Untuk membuktikan fenomena tersebut maka diperlukan suatu alat uji dimana pembuatan alat uji lelah ini akan memberikan data eksperimental mengenai kekuatan lelah pada spesimen, yang sebelumnya diperoleh dari studi literatur. Alat uji ini merupakan permodelan dari elemen mesin khususnya yang berbentuk poros dimana tidak mungkin dilakukan pengujian kekuatan lelah pada ukuran elemen mesin yang sebenarnya sehingga diperlukan alat uji yang mewakili keadaan elemen mesin tersebut dalam sebuah perangkat alat uji untuk skala laboratorium.

1.2 Tujuan dan Manfaat

Tujuan dan manfaat yang hendak dicapai dalam tugas akhir ini adalah :

1. Merancang dan membuat alat uji lelah skala laboratorium

2. Menghasilkan suatu prosedur pengujian sehingga dapat dipakai sebagai prosedur percobaan untuk keperluan praktikum.
3. Membandingkan hasil perhitungan secara teoritis dengan hasil pengujian.

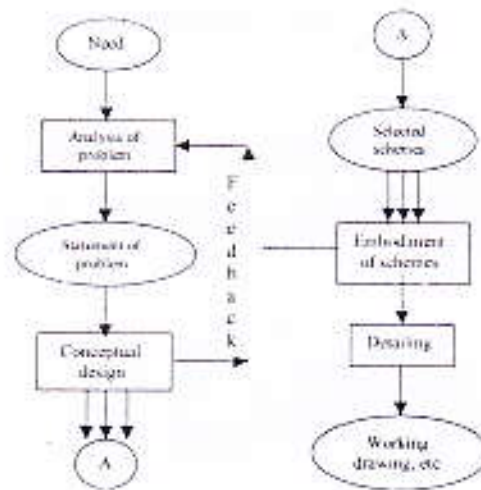
1.3 Batasan Masalah

Rancangan alat uji lelah ini dibatasi pada beberapa kondisi :

1. Alat uji ini bekerja untuk beban lentur dan tegangan yang bekerja adalah beban bending bolak-balik murni.
2. Perancangan hanya difokuskan pada perancangan komponen utama seperti spesimen uji, batang penghubung, lengan beban, blok penuntun *load bearing*, perangkat pembebanan dan transmisi putaran motor ke alat uji
3. Spesimen yang digunakan berbentuk poros dengan diameter maksimum 16 mm (0,63 inci) dengan spesifikasi yang telah ditentukan,

II. METODOLOGI PENELITIAN

Proses perancangan mengikuti metode *French's model of the design process* ^[4] dengan aktivitas dasar meliputi tahap-tahap sebagai berikut :



Gambar 1. Flow chart perancangan ^[4]

- Mengidentifikasi kebutuhan (*need*)

Penelitian ini menghasilkan data eksperimental mengenai kekuatan lelah pada sebuah spesimen. Spesimen tersebut diharapkan akan mengalami patah lelah yang sering terjadi pada elemen mesin dilapangan, dimana menurut penghitungan secara teoritik kekuatan lelah spesimen tersebut berada pada putaran 10^7 cycles dengan pemberian beban periodik yang akan membuat spesimen tersebut mengalami patah atau mengalami gagal lelah.

- Menganalisa permasalahan (*Analysis of problem*)

Dari identifikasi kebutuhan diperlukan alat uji lelah dengan kriteria sebagai berikut :

1. Diperlukan alat uji lelah dengan jenis putaran tinggi (*high cycles fatigue testing machines*).
2. Alat uji tersebut merupakan alat uji skala laboratorium sehingga ukuran alat uji tersebut tidak terlalu besar.

3. Spesimen alat uji harus terbukti dalam pengujian akan mengalami gagal lelah pada putaran 10^7 cycles.

- Konsep perancangan (*Conceptual design*)

Perancangan alat uji lelah ini mengacu pada skema alat uji yang sudah ada pada literatur yaitu jenis putaran tinggi (*laboratory high-cycle fatigue testing machines*) dengan tipe momen bending kantilever (*cantilever bending type*). Dimensi dari alat uji tergantung pada ukuran spesimen yang telah ditetapkan sebagai data awal perancangan dan dalam perancangan mempertimbangkan pengaruh gaya berat spesimen, defleksi dan frekuensi pribadi dari alat yang diperoleh dari bantuan program komputer SAP 2000.

- Perwujudan rancangan (*Embodiment of schemes*)

Tahap ini merupakan penetapan pilihan rancangan yang paling tepat, baik mengenai konstruksi maupun spesifikasi alat uji

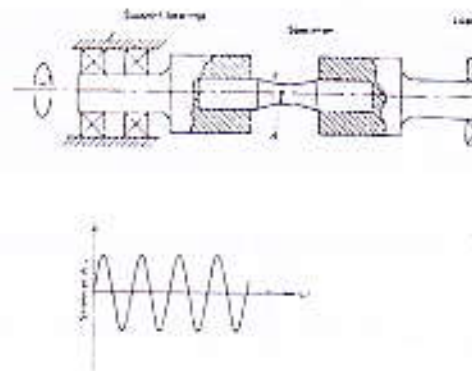
- Perincian rancangan (*Detailing design*)

Ini merupakan tahap terakhir pada metode perancangan, pada tahap ini akan ditetapkan komponen-komponen alat uji secara keseluruhan seperti : spesifikasi motor, konstruksi transmisi putaran motor ke alat uji, spesifikasi spesimen uji, dimensi atau gambar teknik alat uji, penghitung putaran (*counter cycles*) beban dan data pendukung dari keluaran program SAP 2000.

III. PERANCANGAN DAN PEMBUATAN ALAT UJI

3.1. Perancangan Alat Uji

Tipe Mesin alat uji yang mau dirancang adalah mesin uji jenis rotasi bending kantilever (*Reciprocating-bending machines*). Perancangan alat uji ini berdasarkan skema alat uji lelah putaran tinggi dengan tipe momen bending kantilever seperti pada gambar 2. Perancangan dimulai dengan penetapan data-data awal yang akan digunakan sebagai penghitungan dan perancangan dimensi dari alat uji khususnya untuk batang penghubung dan lengan beban.



Gambar 2., Mesin uji lelah momen putar tipe momen bending kantilever^[2]

Data-data awal yang ditetapkan tersebut adalah dimensi dan kekuatan lelah dari spesimen uji, dari data ini akan dilakukan langkah iterasi dalam penentuan perancangan alat uji sehingga diperoleh rancangan yang sesuai dengan yang diinginkan.

Perancangan alat uji meliputi komponen utama yaitu batang penghubung, lengan beban, blok penuntun *load bearing*, transmisi putaran motor ke alat uji dan komponen pendukung lainnya.

3.1.1. Batang Penghubung dan Lengan Behan

Diagram benda bebas dari rancangan seperti pada gambar 3.



Gambar 3. Diagram benda bebas alat uji

Kedua komponen ini merupakan komponen pokok perancangan alat uji. Prinsip dasar alat ini adalah memanfaatkan momen tak seragam disepanjang batang pada batang kantilever dengan 2 (dua) tumpuan.

Dari diagram benda bebas Gambar.3 akan dapat diketahui persamaan reaksi tumpuan dalam bentuk variabel beban yang diberikan (P), panjang keseluruhan alat uji (L) dan jarak tumpuan (y) dengan penghitungan sebagai berikut :

Dari persamaan reaksi tumpuan tersebut, perhitungan sebagai berikut :

- Pada daerah $0 < x < y$

$$M(x = y) = R_1 \cdot y$$

- Pada daerah $y < x < L$

$$M = P \cdot x - P \cdot L$$

Terlihat bahwa momen tersebut dipengaruhi oleh beban yang akan diberikan (P), panjang keseluruhan alat uji (L) dan posisi spesimen pada alat uji (x). Ketiga variabel inilah yang akan digunakan dalam proses iterasi dimensi dari alat uji khususnya pada batang penghubung dan lengan beban, dimana konstruksi dari alat uji rancang dan dianalisis momen bending yang bekerja pada alat uji dibuat dengan bantuan program SAP 2000 serta dilakukan proses iterasi untuk menentukan berapa beban yang diperlukan dalam pengujian. Namun terlebih dahulu harus ditentukan diameter penampang dan material yang digunakan sebagai masukan data pada program SAP 2000.

Data-data awal yang ditetapkan sebagai masukan data pada program SAP 2000, data tersebut adalah sebagai berikut :

- Material yang digunakan adalah ASSAB 760 dengan $\sigma_{ult} = 640$ MPa dan $\sigma_{all} = 340$ Mpa.
- Diameter bahan yang digunakan = 35 mm, dan dimensi penampang batang penghubung dan lengan beban dapat dilihat pada gambar 4.
- Data dari spesifikasi spesimen yang akan ditetapkan.

Dengan memfariasikan variabel panjang lengan beban alat uji dan beban yang diberikan, maka akan diperoleh besarnya momen bending yang bekerja pada posisi takikan atau patahan yang diinginkan sesuai dengan kekuatan leleh spesimen pada penghitungan selanjutnya. Dimana dari kekuatan leleh spesimen akan diperoleh momen bending yang bekerja dengan perhitungan sebagai berikut :

Persamaan tegangan normal :

$$\sigma_{nom} = \frac{M \cdot c}{I} = \frac{32 \cdot M}{\pi \cdot d^3}$$

Tegangan normal sama dengan tegangan atau kekuatan leleh tereduksi pada spesimen, sehingga berlaku hubungan :

$$\sigma_{nom} = \frac{32 \cdot M}{\pi \cdot d^3} = \sigma_{n \text{ tereduksi}}$$

maka besar momen yang diperlukan adalah :

$$M = \frac{\sigma_{n \text{ tereduksi}} \cdot \pi \cdot d^3}{32}$$

Jika iterasi dalam memvariasikan beban yang diberikan pada program SAP 2000 telah diperoleh momen bending yang sama dengan momen yang diinginkan pada posisi tahanan spesimen tersebut maka besar beban dan dimensi serta data lain hasil iterasi tersebut menjadi perincian rancangan (*detailed design*) khususnya untuk batang penghubung dan lengan beban. Data keluaran dari program akan juga memberikan informasi mengenai defleksi pribadi (δ_o), defleksi yang dialami alat uji pada saat pembebanan dan gaya geser yang dialami sepanjang alat uji. Namun gaya geser tersebut dalam penghitungan teoritis diabaikan karena memiliki nilai yang sangat kecil.

3.1.2. Pemilihan Bantalan

Alat uji ini terdiri dari dua buah bantalan tipe *J-bearing with housing SKF SF 25 TF* diameter 25 mm dan satu buah bantalan tipe *J-bearing SKF YAR 205 JF* yang digunakan untuk bantalan beban (*load bearing*) dimana untuk rumah *load bearing* digunakan besi plat dengan ukuran 20 x 3 mm dengan proses pengerjaan ditekuk.

3.1.3. Transmisi Putaran Motor ke Alat Uji

Untuk mentransmisikan putaran motor ke alat uji maka digunakan transmisi daya jenis *pulley*, dimana dengan menggunakan *pulley* akan dapat mengatur kecepatan yang ditransmisikan pada alat uji dengan membedakan diameter *pulley* pada alat uji dan motor. Spesifikasi motor yang digunakan adalah motor AC *single phase*, daya motor 1/2 Hp dengan putaran (n_1) 2800 rpm.

Jumlah putaran yang ditransmisikan ke alat uji dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$n_1 \cdot D_1 = n_2 \cdot D_2$$

dimana : n_1 = putaran motor, rpm

n_2 = putaran pada alat uji, rpm

D_1 = Diameter pulley pada motor, mm

D_2 = Diameter pulley pada alat uji, mm

Untuk mengurangi resiko terjadinya getaran akibat tidak seimbarnya batang penghubung, spesimen dan lengan beban baik pada saat mesin beroperasi maka dipilih diameter *pulley* pada motor (D_1) = 2 inchi dan diameter *pulley* pada alat uji (D_2) = 4 inchi.

Putaran pada alat uji (n_2) menjadi :

$$\begin{aligned}
 n_2 &= \frac{D_1}{D_2} \cdot n_1 \\
 &= \frac{2}{4} \cdot 2800 \\
 n_2 &= 1.400 \text{ rpm}
 \end{aligned}$$

sehingga diperoleh waktu yang diperlukan untuk membuat spesimen gagal lelah, sebagai berikut :

$$t = \frac{\text{putaran } (N)}{n_2}$$

Waktu patah perlu untuk diketahui agar dapat diperkirakan saat patahan terjadi sehingga tidak perlu menunggu dari awal percobaan sampai patah terjadi dan juga untuk keamanan serta efisiensi dalam pemakaian alat uji.

3.1.4. Perangkat Pembebanan

Blok penuntun *load bearing* berfungsi untuk menuntun sekaligus menahan *load bearing* dan lengan beban untuk tidak jatuh pada saat spesimen patah dan juga berfungsi sebagai peredam getaran yang ditimbulkan oleh lengan beban jika alat uji tidak seimbang. Blok penuntun *load bearing* terdiri dari dua batang berulir yang dilas tegak lurus terhadap landasan diantara lubang penahan beban.

Perangkat pembebanan terdiri dari dua bagian yaitu *pertama*, bagian yang dapat disambungkan dengan rumah *load bearing* dengan menggunakan baut dan mur. *Kedua*, batang berulir yang berfungsi sebagai pengunci piringan beban sehingga beban tidak ikut bergetar atau menghasilkan suara bising.

3.1.5. Penghitung Putaran (*Counter cycles*)

Penghitung putaran (*Counter cycles*) berfungsi untuk mencatat jumlah putaran alat uji sampai spesimen patah atau mengetahui jumlah putaran terakhir pada saat pengujian dihentikan. *Counter cycles* ini terdiri dari tiga bagian yaitu :

- **Catu Daya**

Berfungsi untuk mensuplai tegangan DC (arus searah) ke rangkaian sebesar 5 volt dalam keadaan stabil.

- **Block Sensor**

Block sensor memiliki keluaran berlogika 0 pada saat sensor (*optocoupler*) tidak diberi halangan atau rintangan pada celah sensor. Jika celah sensor dihalangi, maka keluaran block sensor akan berlogika 1. Dengan menggunakan plat tipis sebagai penghalang pada celah sensor yang ikut berputar pada lengan beban, maka akan didapatkan keluaran block sensor yang berubah dari 0 ke 1 untuk setiap kali putaran. Plat tipis ini disambungkan dengan baut M6x1,25 panjang 10 cm pada ujung lengan beban. Pada saat spesimen patah, lengan beban akan jatuh dan berhenti berputar yang menyebabkan plat tipis penghalang ikut berhenti berputar, sehingga sensor berhenti mencacah.

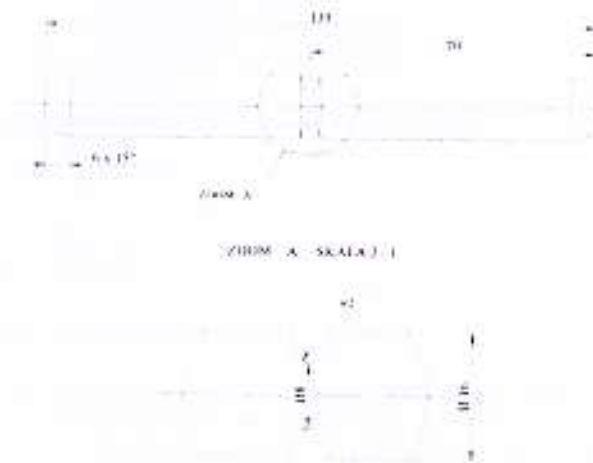
- **Block Pencacah**

Block pencacah akan menterjemahkan keluaran dari block sensor dari bilangan biner (0000, 0001, dst) ke bilangan desimal (angka 0 - 9) yang ditampilkan oleh tujuh segmen yang terdiri dari segmen satuan, puluhan sampai jutaan. Bila keluaran cacahan pada tujuh segmen sudah menjapai angka 9.999.999 maka cacahan secara otomatis akan kembali ke cacahan 0.000.000. Block pencacah memiliki saklar yang dapat me-reset kembali cacahan ke angka nol.

3.1.6. Perancangan Spesimen

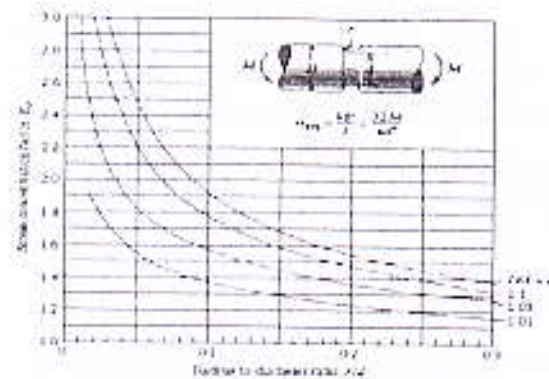
Data awal spesimen yang ditetapkan yaitu :

- Diameter kecil (d) = 8 mm (0,3 inci)
- Diameter besar (D) = 16 mm
- Jari-jari takikan (r) = 2 mm
- Panjang spesimen = 80 mm
- Panjang sambungan spesimen = 2 x 25 mm
- Material yang digunakan adalah ST 37 dengan $\sigma_{td} = 240$ Mpa, kekerasan 107 HBIN dan $\sigma_{th} = 370$ Mpa = 53,65 ksi.



Gambar 4. Dimensi spesimen uji

Dimensi dari spesimen dapat dilihat secara lengkap pada gambar 4. Penetapan diameter besar ($D = 16$ mm) dan jari-jari takikan ($r = 2$ mm) bertujuan untuk memudahkan dan mengurangi kesalahan dalam penggunaan grafik konsentrasi tegangan teoritik pada gambar 5, dimana harga $\frac{D}{d}$ ditetapkan = 2 dan $\frac{r}{d}$ ditetapkan sebesar 0,25.



Gambar 5. Pengaruh dimensi groove dan beban bending terhadap konsentrasi tegangan teoritik¹³

A. Kekuatan Lelah Spesimen

Dari data di atas akan digunakan untuk menentukan faktor-faktor yang mempengaruhi penghitungan kekuatan lelah spesimen. Kekuatan lelah spesimen (σ_N) untuk $N = 10^6$ cycles dapat di peroleh.

Pada tabel 1, dapat ditentukan harga dari :

- Faktor ukuran, $C_D = 1,0$ untuk $d \leq 0,4$ inchi
- Faktor beban, $C_L = 1,0$ untuk jenis beban bending
- Faktor kondisi permukaan, $C_S = 0,9$ untuk jenis pengerjaan *fine ground or commercialy*

Maka kekuatan lelah spesimen untuk $N = 10^6$ cycles adalah :

$$\begin{aligned}\sigma_a &= C_D \cdot C_S \cdot C_L \cdot 0,5 \cdot \sigma_{wh} \\ &= 1,0 \cdot 0,9 \cdot 1,0 \cdot 0,5 \cdot 370 \\ &= 166,5 \text{ MPa} \\ &= 24,142 \text{ ksi}\end{aligned}$$

Untuk $N = 10^3$ cycles menggunakan persamaan sebagai berikut diperoleh :

$$\begin{aligned}\sigma_a &= 0,9 \cdot \sigma_{wh} \\ &= 0,9 \cdot 370 \\ &= 333 \text{ MPa} = 48,285 \text{ ksi}\end{aligned}$$

B. Konsentrasi Tegangan Lelah Spesimen (K_t)

Sebelum didapatkan harga konsentrasi tegangan lelah, terlebih dahulu dicari harga faktor konsentrasi tegangan teoritik (K_t). Konsentrasi tegangan teoritik ditentukan dari hasil analitik dan eksperimental yang terdapat pada gambar 6, variabel yang diperlukan untuk pemakaian grafik tersebut sebagai berikut :

$$D/d = 2 \quad \text{dan} \quad r/d = 0,25.$$

Dengan memplotkan kedua harga tersebut, maka diperoleh konsentrasi tegangan teoritik yang terjadi, yaitu sekitar 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 tabel Faktor kepekaan Takik, untuk material 107 BHN dan $r = 2$ mm (0,0787 in) harga $q = 0,7$. Sehingga harga konsentrasi tegangan lelah (K_f) yaitu :

Tabel 1. Faktor yang mempengaruhi kekuatan lelah $N = 10^6$ cycles terhadap jenis beban^[1]

Faktor	Jenis Beban		
	Bending	Torsi	Aksial
Pengaruh factor beban, C_L	1,0	0,58	Eksentrisitas ($e \neq 0$) 0,6 - 0,85
			Eksentrisitas ($e = 0$) 0,9
Pengaruh factor ukuran, C_D	1,0 untuk $D \leq 0,4$ in 0,9 untuk $0,4 \leq D \leq 2$ in		1,0
Pengaruh factor kondisi permukaan, C_S	Tergantung keadaan permukaan vs σ_a atau BHN		

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

Konsentrasi tegangan lelah ini akan mereduksi kekuatan lelah dari spesimen. Kekuatan lelah spesimen tereduksi merupakan perbandingan antara kekuatan lelah spesimen (σ_a) dan konsentrasi tegangan lelah (K_f).

Sehingga:

$$\sigma_{a \text{ tereduksi}} = \frac{\sigma_a}{K_f} \\ = \frac{166}{1,329} = 125,282 \text{ MPa} \\ = 18,166 \text{ ksi}$$

Untuk konsentrasi tegangan lelah pada putaran 10^4 cycles (K_f) Untuk rancangan ini $K_f = 1$ (dari diagram K_f untuk diagram terbatas). Maka kekuatan lelah untuk putaran 10^4 cycles tidak tereduksi.

Kedua data kekuatan lelah ini akan diplotkan pada kurva $S - N$ dengan skala log - log sehingga akan diperoleh kurva $S - N$ kekuatan lelah spesimen teoritis dan akan menjadi pembanding dari data hasil percobaan nanti.

3.2. Proses Pembuatan dan Perakitan Alat Uji

Pada umumnya proses yang diperlukan untuk pembuatan alat uji ini adalah proses membalut (*turning*) untuk pembuatan spesimen, batang penghubung dan lengan beban; proses menggilas (*milling*) untuk pembuatan blok penuntun *load bearing*; proses menggardi (*drilling*) untuk pembuatan lubang; proses mengetap untuk pembuatan alir; proses tekuk untuk pembuatan rumah *load bearing* dan proses pengelasan pada blok penuntun *load bearing* dan perangkat penggantung beban serta proses pemesinan lainnya. Perakitan komponen alat uji dilakukan dengan menggunakan baut dan mur yang memungkinkan alat dapat dibongkar pasang jika ada proses modifikasi. Penggunaan baut dan mur ini juga bertujuan untuk penyetelan ketegangan *belt* transmisi yang menghubungkan antara *pulley* motor dan alat uji.

3.3. Pelaksanaan Pengujian

Ada beberapa hal yang perlu dipersiapkan secara teoritis sebelum melaksanakan pengujian yaitu :

1. Menghitung kekuatan lelah spesimen pada umur 10^6 cycles dan umur 10^7 cycles sesuai d
2. Menghitung konsentrasi tegangan lelah spesimen sehingga diperoleh kekuatan lelah tereduksi ($\sigma_{a \text{ tereduksi}}$).
3. Memplotkan kedua data tersebut pada kurva $S - N$ sehingga diperoleh kurva yang menunjukkan kekuatan lelah spesimen secara teoritis.
4. Menghitung besarnya momen bending yang akan terjadi pada daerah takikan spesimen, sesuai dengan daerah kekuatan lelah spesimen yang diperoleh dari kurva $S - N$.
5. Melakukan proses iterasi dengan menfariasikan beban yang diberikan pada program SAP 2000 sehingga jika momen bending pada program sama dengan momen yang diinginkan pada posisi takikan spesimen, maka diperoleh besar beban yang akan diberikan pada pengujian nanti.

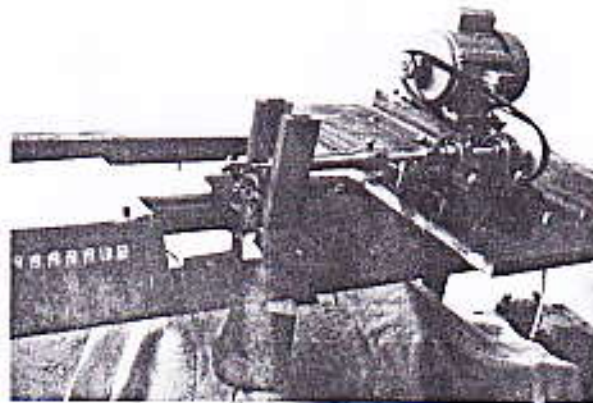
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Prosedur percobaan

Setelah dilakukan perancangan, pembuatan dan pengujian maka diperoleh prosedur percobaan yang baku yang dapat diterapkan untuk alat jika dipergunakan sebagai alat praktikum.

1. Pasangkan spesimen pada batang penghubung dan lengan beban sehingga tersambung menjadi satu bagian dengan mengencangkan baut pemegang.
2. Usahakan dalam pengencangan baut, pemasangan spesimen dan alat sesumbu sehingga akan dapat mengurangi getaran pada saat mesin berputar.
3. Pasangkan baut pemegang plat tipis penghalang celah sensor pada ujung lengan beban dan atur posisi ujung plat tipis tepat ditengah celah sensor.
4. Hidupkan *counter cycles* dan cek apakah sensor meneceah putaran dengan memutar alat secara manual.
5. Sambungkan motor dengan *Slid Regulator* untuk mengurangi torsi awal yang besar dari motor pada saat motor dibidupkan.
6. Pasangkan beban pada penggantung beban berulir dan kunci dengan baut kemudian sambungkan pada rumah *load bearing* dengan menggunakan mur.
7. Hidupkan motor dengan mengatur tegangan keluaran *Slid Regulator* perlahan-lahan sampai mencapai tegangan 220 volt.
8. Catat jumlah putaran pada *counter cycles* sampai spesimen patah atau telah dianggap mencapai umur tak hingga (*9,999,999 cycles*).
9. Lakukan percobaan berikutnya dengan tenggang waktu beberapa jam kemudian karena mempertimbangkan kondisi motor yang beroperasi cukup lama.

Pada Gambar 6 menunjukan photo alat uji secara lengkap dan akan ditentukan spesifikasi dari alat uji tersebut. Pembahasan mengenai data hasil pengujian dilakukan dengan membandingkan data hasil pengujian dengan data yang diperoleh secara teoritis, serta akan ditentukan berapa persen penyimpangan tegangan hasil uji terhadap penghitungan teoritis.



Gambar 6. Photo alat uji

4.2. Spesifikasi Alat Uji

Spesifikasi alat uji yang utama sekali adalah berapa jumlah beban maksimum yang bisa diberikan pada saat pengujian. Beban maksimum akan diperoleh pada kekuatan leleh dari alat uji itu sendiri yaitu kekuatan leleh pada batang penghubung dan lengan beban. Momen yang bekerja tidak sama disepanjang batang dan dari tampilan program SAP 2000 akan langsung dapat diketahui posisi dan besar momen maksimum seperti terlihat pada gambar 9 dibawah ini.



Gambar 7. Diagram momen lentur pada alat uji

Pada gambar 7 terlihat bahwa momen maksimum terjadi pada tumpuan kedua sehingga penghitungan kekuatan lelah alat uji berada pada batang penghubung. Kekuatan lelah pada posisi tersebut dihitung dapat dihitung, dengan data awal sebagai berikut :

- Faktor ukuran, $C_D = 0,93$ untuk $d = 25 \text{ mm} = 0,984 \text{ inci}$
- Faktor beban, $C_L = 1,0$ untuk jenis beban bending
- Faktor kondisi permukaan, $C_S = 0,76$ untuk jenis pengerjaan *machined*

maka kekuatan lelah pada $N = 10^6 \text{ cycles}$:

$$\begin{aligned} \sigma_s &= C_D \cdot C_S \cdot C_L \cdot 0,5 \cdot \sigma_{un} \\ &= 0,93 \cdot 0,76 \cdot 1,0 \cdot 0,5 \cdot 640 \\ &= 226,176 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Karena tidak ada perubahan penampang pada posisi tersebut maka konsentrasi tegangan lelah (K_t) dianggap tidak ada ($K_t = 1$), sedangkan faktor keamanan, $K_S = 5$ sehingga diperoleh tegangan yang terjadi adalah :

$$F_s = \frac{\text{Kekuatan lelah}}{\text{Tegangan yang terjadi}}$$

maka,

$$\begin{aligned} \text{Tegangan yang terjadi } (\sigma_{max}) &= \frac{\sigma_s}{F_s} \\ (\sigma_{max}) &= 45,235 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Momen yang terjadi:

$$\begin{aligned} M &= \frac{\sigma_{max} \cdot \pi \cdot d^3}{32} \\ &= 69390 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

Momen yang diperoleh menjadi masukan data pada proses iterasi program SAP 2000 untuk menentukan besarnya momen yang terjadi pada posisi alur spesimen karena pada posisi tersebut menjadi posisi pengamatan tegangan yang bekerja pada alat uji. Setelah dilakukan proses iterasi pada program dengan data momen sebesar 69390 Nmm pada posisi momen maksimum maka diperoleh data sebagai berikut :

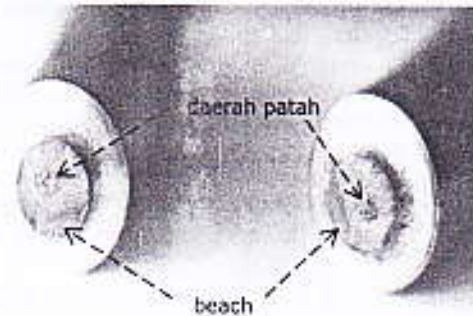
- Beban maksimum : 210 N atau sebesar 21 kg dengan asumsi percepatan gravitasi ($g = 10 \text{ m/s}^2$).
- Momen maksimum spesimen : 46200 Nmm.
- Reaksi tumpuan : $R_1 = 602,21 \text{ N}$ dan $R_2 = 812,61 \text{ N}$.
- Defleksi maksimum (δ_{maks}): 2,88 mm.

Dari data reaksi tumpuan menunjukkan bantalan yang dipilih masih mampu menahan beban yang terjadi, dimana pada spesifikasi bantalan memiliki kemampuan untuk menahan beban dinamik sebesar 10800 N.

4.3. Data Hasil Pengujian

Pengujian dilakukan pada delapan buah spesimen, dimana spesimen akan di uji dengan beban yang bervariasi dimulai dari beban terbesar ke beban terkecil sampai spesimen gagal leleh atau patah. Setelah dilakukan pengujian ternyata sebanyak dua spesimen dianggap gagal (*error sample*) karena hasil pengujian tidak sesuai dengan penghitungan teoritis yaitu spesimen tersebut patah pada umur 10^2 cycles dan bentuk penampang yang sangat berbeda dengan bentuk penampang patah leleh dari literatur dan pengujian sebelumnya.

Pada gambar 8 memperlihatkan foto penampang patahan spesimen uji yang keempat yang patah pada putaran $2,356 \cdot 10^5$ cycles. Bentuk penampang patahan kedelapan spesimen uji akan dibandingkan dengan bentuk penampang patah leleh pada literatur.



Gambar 8. Photo penampang patahan spesimen ke-4 pada $N = 2,356 \cdot 10^5$ cycles

Langkah pertama pada pengolahan data adalah membuat kurva $S - N$ teoritis dan persamaan garis linier dari data kekuatan leleh spesimen pada umur $N = 10^3$ cycles dan $N = 10^5$ cycles. Persamaan linier tersebut adalah :

$$\log y = \frac{36,09723 - \log x}{7,0663055}, \text{ dimana variabel } x = \text{jumlah putaran (cycles) dan } y = \text{tegangan (ksi),}$$

kemudian setiap beban pengujian yang diberikan terlebih dahulu ditentukan besarnya momen bending dengan melakukan iterasi pada program SAP 2000. Dari momen yang diperoleh akan dapat ditentukan tegangan teoritis yang bekerja yang bertujuan untuk dibandingkan dengan tegangan uji hasil pengujian.

Tegangan uji diperoleh dengan memasukan data jumlah putaran hasil pengujian, kecuali pada jumlah putaran yang $\geq 1 \cdot 10^6$ cycles yang berpotongan dengan garis kurva mendatar umur tak hingga yaitu pada tegangan 18,166 ksi.

Gambar 11 menunjukkan jumlah putaran hasil uji yang diplotkan ke kurva $S - N$ teoritis sehingga diperoleh gambaran secara umum hasil pengujian tersebut terletak disekitar kurva $S - N$ teoritis.

4.3. Analisis dan Pembahasan

Setelah dilakukan pengujian, analisis pertama yang langsung dapat diamati adalah bentuk penampang patah spesimen uji. Dari keenam penampang patah spesimen seluruhnya menunjukkan bentuk penampang tersebut sesuai dengan bentuk penampang yang dijelaskan pada literatur. Pada gambar 8 terlihat daerah patah leleh yang rata dan halus (*beach marks*) berada disekeliling permukaan patahan akibat tergosoknya permukaan patah dengan permukaan patah pasangannya selama berlangsungnya perambatan retak mulai dari retak mikro sampai terjadi patah tiba-tiba. Semakin lama spesimen tersebut patah maka permukaan patah yang rata dan halus semakin luas akibat permukaan patah dan pasangannya tergosok lebih lama.

Daerah patah tiba-tiba berada ditengah permukaan patah yang kasar seperti pada patah ulet. Patah pada daerah tiba-tiba terjadi akibat dilampauinya tegangan batas tarik, karena luas potongan yang belum retak tinggal kecil saja sehingga tegangan yang terjadi akibat beban melampaui tegangan batas tarik yang berarti adanya deformasi plastis seperti pada patah ulet. Sedangkan pada kedua spesimen gagal (*error sample*) menunjukkan permukaan patah kedua spesimen tersebut tidak rata dan jika dilihat dari samping berbentuk zig-

zag seperti adanya retak awal (*konsentrasi tegangan besar*) yang menyebabkan spesimen tersebut cepat patah.

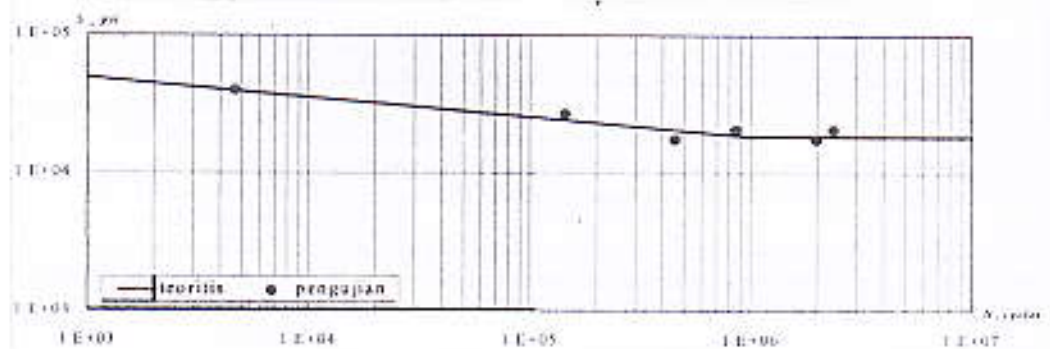
Dari hasil pengujian terjadi perbedaan yang cukup besar (sekitar 2 % - 16,48 %) antara tegangan teoritis yang diberikan dengan tegangan yang terjadi dimana spesimen patah pada tegangan yang lebih rendah dari tegangan teoritis. Data tersebut juga menunjukkan bahwa umur atau jumlah putaran sampai spesimen patah pada hasil pengujian lebih lama dibandingkan dengan jumlah putaran teoritis.

Kekuatan material spesimen menjadi kemungkinan terbesar penyebab perbedaan hasil teoritis dengan pengujian. Proses pembuatan bahan spesimen dan unsur material spesimen tidak seragam akan menghasilkan spesifikasi kekuatan material spesimen yang tidak sesuai dengan spesifikasi kekuatan material spesimen teoritis. Semakin besar kekuatan material maka kekuatan leleh spesimen akan semakin besar dan sebaliknya sehingga garis kurva $S - N$ akan berada diatas kurva spesimen teoritis begitu juga sebaliknya.

Hasil pengujian menunjukkan secara umum tegangan uji lebih rendah dari tegangan teoritis, ini menunjukkan kekuatan material lebih besar sehingga membutuhkan jumlah putaran atau umur yang lebih lama agar spesimen tersebut patah dan menghasilkan tegangan uji lebih rendah jika jumlah putaran tersebut diplotkan ke kurva $S - N$ teoritis. Berbeda dengan spesimen ke-6 yang tegangan uji lebih besar dari pada tegangan teoritis hal ini disebabkan secara teoritis spesimen ke-6 berumur tak hingga ($N = 10^7$ cycles) sehingga jika jumlah putaran hasil uji berjumlah $N = 10^6$ cycles diplotkan ke kurva $S - N$ maka otomatis tegangan uji sama dengan kekuatan leleh pada $N = 10^6$ cycles teoritis.

Penyimpangan-penyimpangan yang terjadi seperti spesimen yang dibebani sama besar menghasilkan jumlah putaran pengujian pada saat spesimen patah tidak sama (pada spesimen 3 - 4 dan 5 - 6) dan spesimen yang dibebani lebih besar lebih lama patah dibandingkan dengan spesimen yang dibebani lebih kecil (pada spesimen 4, 5 dan 6). Faktor yang menyebabkan hal tersebut adalah :

- Proses pengerjaan pada pembuatan alur atau *groove* pada spesimen. Proses pengerjaan berhubungan dengan faktor kondisi permukaan (C_s) yang mempengaruhi kekuatan leleh spesimen dimana dalam penghitungan teoritis, faktor kondisi permukaan (C_s) diambil pada kondisi proses pengerjaan *fine ground or commercially polished* namun akan cukup sulit memperoleh kondisi permukaan yang sama pada masing-masing spesimen karena proses pencapaian kondisi pengerjaan tersebut hanya dilakukan dengan pengamplasan secara manual pada *groove* setelah proses pemessinan dilakukan. Hal inilah yang menyebabkan spesimen yang dibebani sama besar menghasilkan jumlah putaran pengujian pada saat patah tidak sama, hal ini lebih jelas terjadi pada spesimen 3 - 4 dan 5 - 6.



Gambar 9. Kurva $S - N$ dan Data Hasil Pengujian

- Semakin besar faktor kondisi permukaan (C_s) (permukaan semakin halus), konsentrasi tegangan akibat retak mikro hasil pengerjaan akan semakin kecil sehingga kekuatan leleh semakin besar yang menyebabkan jumlah putaran atau umur spesimen lebih lama dan tegangan uji akan mengecil, begitu juga sebaliknya.
- Ketelitian pembuatan dimensi dari *groove* spesimen. Dimensi dari *groove* akan berpengaruh pada harga faktor kepekaan takik (q) dan konsentrasi tegangan leleh (K_f) yang pada akhirnya mempengaruhi kekuatan leleh spesimen. Jika kekuatan material (σ_{ult}) dianggap sama pada semua spesimen, maka

semakin besar jari-jari *groove* (r) menyebabkan faktor kepekaan takik (q) akan bertambah besar sehingga konsentrasi tegangan leleh (K_t) juga akan lebih besar dan

- kekuatan leleh spesimen akan menurun yang menyebabkan spesimen patah lebih cepat. Kondisi ini mungkin lebih jelas terjadi pada spesimen ke-5.
- Pemasangan spesimen dengan batang penghubung dan lengan beban tidak seumbu yang disebabkan oleh spesimen bengkok akibat proses pembuatan spesimen yang *over load* dan suaiian antara spesimen dengan lubang pemegang spesimen longgar sehingga cukup sulit untuk membuat seumbu pada saat pengencangan baut pemegang spesimen. Hal ini mengakibatkan kondisi pemasangan setiap spesimen tidak sama sehingga mempengaruhi hasil pengujian walaupun setiap pemasangan spesimen leleh diusahakan semaksimal mungkin agar tidak terjadi ketidak seumbuan tersebut.
- Ketidakesumbuan pemasangan spesimen dengan alat uji akan menghasilkan gaya sentrifugal yang cukup besar terutama pada ujung lengan beban atau tempat *load bearing* sehingga kemungkinan spesimen tidak lagi mengalami tegangan bolak-balik murni (*completely reversed stress*). Gaya sentrifugal pada ujung lengan beban akan memberikan tambahan tegangan pada posisi alur spesimen walaupun pada posisi alur tersebut spesimen tidak mengalami gaya sentrifugal sebesar gaya sentrifugal diujung lengan beban karena posisi alur spesimen lebih dekat dengan tumpuan, jadi akan lebih kaku atau seumbu dengan batang penghubung yang ditumpu oleh dua bantalan dan kemungkinan tidak terlalu besar mempengaruhi hasil pengujian.

Pada gambar 9 menunjukkan data hasil pengujian berada disekitar atau mendekati garis kurva $S - N$ teoritis, ini menunjukkan bahwa secara garis besar pengujian yang dilakukan sudah mendekati data teoritisnya. Namun terdapat dua buah spesimen yang patah tapi berada dibawah kurva $S - N$ teoritis yaitu spesimen lima dan enam yang memang tegangan yang diberikan kecil dari kekuatan leleh spesimen teoritis pada umur 10^6 cycles dan hal yang menyebabkan spesimen tersebut patah telah dijelaskan pada penjelasan sebelumnya.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan perancangan, pembuatan, pengujian, dan menganalisis serta membahas data hasil pengujian maka dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Alat uji yang dirancaang dan dibuat memiliki putaran 1400 rpm sehingga memerlukan waktu selama \pm 12 jam untuk mencapai putaran cycles dan menghasilkan penyimpangan pada tegangan hasil uji terhadap tegangan teoritis sebesar 2,07 % - 16,5 %.
2. Dari data hasil pengujian menunjukkan bahwa secara umum tegangan uji lebih rendah dari pada tegangan teoritis atau jumlah putaran uji lebih lama dibandingkan dengan jumlah putaran teoritis sampai spesimen patah. Hal ini disebabkan oleh faktor kekuatan material spesimen yang tidak sesuai dengan spesifikasi kekuatan material spesimen teoritis.
3. Jika beberapa spesimen dibebani dengan beban yang sama besar, maka jumlah putaran pada saat spesimen patah tidak sama untuk setiap spesimen. Dan ada kemungkinan spesimen yang dibebani lebih kecil menghasilkan jumlah putaran pada saat patah lebih sedikit dibandingkan dengan spesimen dengan pembebanan yang lebih besar.
4. Secara umum jika data jumlah putaran hasil pengujian diplotkan ke kurva $S - N$ maka akan terlihat hasil pengujian berada disekitar kurva $S - N$ teoritis, ini menunjukkan hasil pengujian mendekati data teoritisnya.
5. Bentuk penampang patahan hasil pengujian sesuai dengan bentuk penampang yang dijelaskan pada literatur yaitu daerah patah leleh yang rata dan halus mengelilingi daerah patah tiba-tiba yang berada ditengah seperti patah ulet.

5.2 Saran – saran

Untuk memperoleh hasil pengujian yang lebih baik, ada beberapa hal yang perlu diperhatikan yaitu :

1. Diperlukan pengujian statik untuk menentukan kekuatan material spesimen secara eksperimental sehingga perhitungan kekuatan leleh spesimen teoritis sesuai dengan keadaan sebenarnya.
2. Dimensi alur atau groove spesimen diusahakan sesuai dengan dimensi dan kondisi permukaan yang telah ditentukan.
4. Suiian antara spesimen dengan lubang pemegang spesimen pada alat uji haruslah suaiian pas atau diusahakan pada saat pengencangan baut pemegang, spesimen sesumbu dengan batang penghubung dan lengan beban.
4. Spesimen uji lebih banyak untuk mendapatkan data yang lebih baik.

DAFTAR KEPUSTAKAAN

1. Gasni, Dedison, "*Kriteria Patah Lelah Untuk Bahan Dinamik*", Jurusan Teknik Mesin, Universitas Andalas, Padang, 2002.
2. J.A. Collins, *Failure of Materials in Mechanical Design*, John Wiley & Sons, The Ohio State University, 1981.
3. Spotts, M.F, *Design of Machine Elements*, Seventh Edition, Mechanical Engineering Department, Northwestern University.
4. Cross, Nigel, *Engineering Design Methods*, Second Edition, John Wiley & Sons, Chichester, 1994.