38667/H/10

MILIK PERPUSTAKAAN ITS

RSM
620.112 6
Nur
S-1
2009

ITS Institut Teknologi Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR (*Metalurgi*) - RM1582

# STUDI EKSPERIMEN PENGARUH TEMPERATUR TERHADAP BATAS LELAH (*FATIGUE LIMIT*) DAN POLA PATAHAN BAJA POROS AISI 1045 DENGAN PENGUJIAN LENTUR PUTAR *(ROTATING BENDING)*

RANI KARTIKA NURI
NRP. 2104100146

Dosen Pembimbing,
Dr.Ir. Soeharto, DEA.

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2009

PERPUSTAKAAN ITS

| | |
|---|---|
| Tgl. Terima | 11-8-2009 |
| Terima Dari | H |
| No. Agenda Prp. | 54 |

ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT (*Metallurgy*) - RM1582

# EXPERIMENTAL STUDY THE INFLUENCE OF TEMPERATURE TO FATIGUE LIMIT AND FRACTURE STRUCTURE OF AISI 1045 SHAFT STEEL WITH ROTATING BENDING TEST

RANI KARTIKA NURI
NRP. 2104100146

Counselor Lecturer
Dr. Ir. Soeharto, DEA.

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2009

# STUDI EKSPERIMEN PENGARUH TEMPERATUR TERHADAP BATAS LELAH (*FATIGUE LIMIT*) DAN POLA PATAHAN BAJA POROS AISI 1045 DENGAN PENGUJIAN LENTUR PUTAR (*ROTATING BENDING*)

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember


Oleh :

**RANI KARTIKA NURI**

**Nrp. 2104100146**


Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1.Dr. Ir. Soeharto, DEA. .....(Pembimbing)

2.Ir. Suprapti .....(Penguji I)

3.Ir. Hari Subiyanto, MSc. .....(Penguji II)

4.Fahmi Mubarok, St, MSc. ..... (Penguji III)

SURABAYA

Agustus, 2009

# STUDI EKSPERIMEN PENGARUH TEMPERATUR TERHADAP BATAS LELAH (*FATIGUE LIMIT*) DAN POLA PATAHAN BAJA POROS AISI 1045 DENGAN PENGUJIANLENTUR PUTAR (*ROTATING BENDING*)


| | |
|---|---|
| **Nama Mahasiswa** | **: RANI KARTIKA NURI** |
| **NRP** | **: 2104 100 146** |
| **Jurusan** | **: Teknik Mesin FTI - ITS** |
| **Dosen Pembimbing** | **: Dr. Ir. SOEHARTO, DEA.** |



**Abstrak**

*Pada peralatan industri seringkali menggunakan poros sebagai komponen utama untuk transfer daya. Salah satu faktor yang mendukung panjangnya umur pakai poros adalah kondisi temperatur kerja poros. Temperatur kerja poros mengalami kenaikan seiring dengan kenaikan putaran poros. Kenaikan temperatur tersebut tidak sampai merubah sifat mekanik material poros, namun mempengaruhi umur pakai poros dan ketahanan poros dalam menerima tegangan berulang.*

*Dalam penelitian ini dilakukan pengujian kelelahan terhadap baja poros AISI 1045, dikondisikan pada dua temperatur uji yaitu 30°C (suhu kamar) dan 150°C. Pengaturan temperatur dilakukan melalui oven pada alat uji lentur putar. Pengujian dilakukan pada tingkat tegangan yaitu 668.232 MPa (0.62σu), 556.86 MPa (0.52σu), 515.86 MPa (0.48σu), 455.46 MPa (0.41σu) dan 389.80 MPa (0.36σu), pada setiap tingkat tegangan diuji 3 buah spesimen uji. Fraktografi permukaan pola patahan (patah statik dan patah lelah) mengunakan metode visual, mikroskop optis dan SEM (Scanning Electron Microscope).*

*Hasil yang didapat setelah material di uji lentur putar adalah didapatkan nilai batas lelah (fatigue limit) pada temperatur 30°C dan temperatur 150°C yang berada pada daerah tegangan sekitar 455.46 MPa (0.42σu). Foto makro patahan menunjukkan bahwa prosentase luas permukaan daerah patah statik (dengan beban yang sama) pada temperatur 150°C lebih besar dari temperatur 30°C, namun perbedaan tersebut tidak signifikan. Luas daerah patah lelah dan patah statik tergantung pada tingkat tegangan, semakin besar beban tegangan yang*

*diberikan terhadap benda uji maka semakin kecil luas daerah perpatahan lelahnya. Penampang patahan pada temperatur 150°C menunjukkan patahan yang lebih ulet daripada temperatur 30°C.*

***Kata kunci : Fatigue, Fatigue limit, Temperatur, Lentur Putar, Umur lelah, Patah lelah, Patah statik***

# EXPERIMENTAL STUDY THE INFLUENCE OF TEMPERATURE TO FATIGUE LIMIT AND FRACTURE STRUCTURE OF AISI 1045 SHAFT STEEL WITH ROTATING BENDING TEST


| | |
|---|---|
| **Name** | **: RANI KARTIKA NURI** |
| **NRP** | **: 2104 100 146** |
| **Department** | **: Mechanical Engineering - ITS** |
| **Conselour Lecturer** | **: Dr. Ir. SOEHARTO, DEA.** |


## Abstract


*At the industry machines often using shaft as a power transmission. One of the factor that support the life age of shaft is the operation temperature. The Operation temperature of shaft can increase within the increasing of rotating cyclic. The increasing of temperature affect the life age and the resistance of shaft to receive a cyclic stress.*

*In this research the fatigue test of AISI 1045 shaft steel is managed at temperature 30°C and temperature 150°C. Setting of temperature through the oven of rotating bending machine. The level of test stress are 668.232 MPa (0.62σu), 556.86 MPa (0.52σu), 515.86 MPa (0.48σu), 455.46 MPa (0.41σu) and 389.80 MPa (0.36σu), there are 3 piece of specimen at eact test. Fractography of fracture surface (static and fatigue fracture) with visual, optical microscope and SEM (Scanning Electron Microscope) method.*

*The result of this research are the value of fatigue limit between temperature 30°C and temperature 150°C not too different, about 455.46 MPa (0.42σu). Macro photo of the fracture surface showing that the wide of static surface area (with the same stress) at temperature 150°C bigger than at temperature 30°C, but the difference of that not significant. The size of fatigue and static surface area depend on stress value, increasing of the stress minimize the fatigue surface area. The fracture surface character at temperature 150°C is more ductile than the fracture surface at temperature 150°C.*

***Keywords: Fatigue, Fatigue Limit, Temperature, Rotating Bending, Fatigue Life, Fatigue Fracture, Static Fracture***

# KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirrabbil'alamin.

Segala syukur dan memuji hanya kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini sebagai persyaratan akademis untuk mendapat gelar Sarjana Teknik, pada bidang studi Metalurgi, jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Tugas akhir ini tidak mungkin terlaksana dengan baik tanpa adanya bantuan dan kerjasama semua pihak, untuk itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Dr. Ir. Soeharto, DEA selaku pembimbing Tugas Akhir yang banyak memberikan bimbingan dan saran. Mohon maaf atas keterlambatan pengerjaan Tugas akhir ini. Semua memberi hikmah, *alhamdulillah*.
2. Bapak Dr. Ing. Herman Sasongko selaku Ketua Jurusan dan seluruh dosen serta karyawan Teknik Mesin yang telah memberikan ilmu, semangat dan 'senyuman'.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Djoko Sungkono, Meng (130532033) selaku dosen wali yang telah memberikan dorongan moril 'mendasar'.
4. Bapak dan Ibu, semua saudaraku, 'you are the Great things that I ever had.'
5. Karyawan lab Metalurgi yang telah membantu dalam penggunaan fasilitas, terutama buat Pak Budi, Pak Ndang, Pak Gathot, dan Pak Mantri.
6. Untuk 'teman istimewa', diantaranya yang sedang menempuh S2 di Taiwan (Farida Rahmawati Purnadiana, ST-2104 100 015), "Ukhuwah ini akan terbawa selamanya" & "1928" ☺
7. Teman satu tim dalam pengerjaan Tugas Akhir yaitu Joseph Ang Ardi, ST dan Eka Sulistiyowati, terimakasih atas kerjasama dan semangatnya.
8. Untuk semua Klub dan lembaga di KMM, khususnya Ash-shaff + DKM (06 : Fitri, Dian, Yeni, Riris, Ariska, Linda, 07 : (Luluk, Niswa, Nanda, Vika, Angga, Nurul), 08 : Sona,

Fungky, Lohdy, Yusufa, Nina, Goldie, Retno dkk "Do your Best in everything".

9. Rekan-rekan seperjuangan M47 dan rekan-rekan Lab Metalurgi yang selalu memberikan ruang 'belajar' untukku.
10. *Asy-syifa'ers*, "*Ririn, Zia, Fadiyah, Pipit.* "*Kita adalah suatu* tim yang hebat! ☺ also for : Nadia, 'Welcome to your second home'
11. Semua pihak yang telah terlibat dalam penyelesaian Tugas Akhir ini yang tidak mungkin disebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Untuk itu, penulis mengharapkan adanya penyempurnaan lebih lanjut oleh pihak yang berkepentingan agar Tugas Akhir ini bisa lebih dikembangkan.

Surabaya, 17 Agustus 2009

Penulis

# DAFTAR ISI

Judul.....
Abstrak .....
*Lembar Pengesahan*.....
Kata Pengantar ..... i
Daftar Isi ..... iii
Daftar Gambar ..... vii
Daftar Tabel ..... xi
BAB 1 PENDAHULUAN..... 1
1.1 Latar Belakang..... 1
1.2 Perumusan Masalah..... 1
1.3 Tujuan Penelitian..... 2
1.4 Batasan Masalah..... 2
1.5 Manfaat Penelitian..... 2
1.6 Metodologi Penelitian..... 3
1.7 Sistematika Laporan..... 3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA..... 5
2.1 Mekanisme Patah Lelah..... 5
2.1.1 Perambatan Lelah pada Tegangan Amplitudo Konstan..... 6
2.2 Perkiraan Umur Lelah..... 9
2.2.1 Jenis Tegangan Uji Lelah..... 10
2.2.2 Persamaan Marine ..... 12
2.3 Pengaruh Temperatur terhadap Sifat Mekanik Baja.. 16
2.3.1 Pengaruh Temperatur terhadap Kekuatan Tarik dan Yield Baja..... 16
2.3.2 Pengaruh Temperatur terhadap Kekuatan Lelah Baja..... 18
2.3.3 Hubungan antara Kekuatan Tarik dengan Kekuatan Lelah pada Baja..... 19
2.4 Fraktografi Permukaan Patah Lelah..... 21
2.4.1 Fraktografi Makro..... 21
2.4.2 Fraktografi Mikro..... 23
BAB 3 METODOLOGI PERCOBAAN..... 27
3.1 *Flowchart* Penelitian..... 27

3.2 Penjelasan *Flowchart* Penelitian ..... 28
3.2.1 Pemilihan Material ..... 28
3.2.2 Langkah-langkah Percobaan ..... 29
3.2.2.1 Pembentukan Spesimen Uji Tarik dan Uji Lelah ..... 29
3.2.2.2 Pengukuran Kekasaran Permukaan ..... 30
3.2.2.3 Uji Tarik ..... 30
3.2.2.4 Uji Lentur Putar ..... 30
3.2.2.5 Pengamatan Pola Patahan ..... 32
BAB 4 DATA HASIL PENGUJIAN ..... 33
4.1 Hasil Uji Tarik ..... 33
4.2 Hasil Uji Kelelahan ..... 33
4.3 Kurva S-N Hasil Eksperimen Uji lelah ..... 40
4.4 Fraktografi ..... 41
4.4.1 Pengamatan Visual ..... 41
4.4.2 Pengamatan Makroskopik ..... 42
4.4.3 Pengamatan Mikroskopis Spesimen uji Lelah (Metalografi dan SEM) ..... 44
4.4.3.1 Pengamatan Metalografi Material Spesimen Uji Lelah (Baja AISI 1045) ..... 44
4.4.3.2 Pengamatan Spesimen Uji Lelah dengan SEM Material ..... 45
4.5 Perbandingan Prosentase Luas Daerah Patah Statik terhadap tegangan pada spesimen T=30°C dan T=150°C.. 47
4.6 Hubungan antara prosentase luas daerah patah statik terhadap jumlah siklus patah (umur lelah) pada spesimen T= 30°C dan T= 150°C ..... 47
BAB 5 ANALISA DATA dan PEMBAHASAN ..... 49
5.1 Analisa Data ..... 49
5.1.1 Validasi Data Uji Lentur Putar ..... 49
5.1. 2 Analisa Fraktografi Makro dan Mikro ..... 51
5.1. 2.1 Analisa Fraktografi Makro ..... 51
5.1.2.2 Analisa Fraktografi Mikro ..... 51
5.2 Pembahasan ..... 52
5.2.1 Pengaruh Temperatur terhadap Batas Lelah (*Fatigue Limit/Endurance Limit*) ..... 52

5.2.2 Pengaruh tegangan terhadap Luasan Daerah Patah Statik..... 53
5.2.3 Pengaruh Umur Lelah terhadap Prosentase Luasan Daerah Patah Statik..... 54
5.2.4 *Pengaruh Temperatur terhadap Luasan Daerah* Patah Statik..... 55
5.2.5 Pembahasan Fraktografi..... 56
5.2.5.1 Fraktografi Makro..... 56
5.2.5.2 Fraktografi Mikro..... 57
BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN..... 59
6.1 Kesimpulan..... 59
6.2 Saran..... 60
Daftar Pustaka..... 61
Lampiran A..... 64
Lampiran B..... 65
Lampiran C..... 66

**HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN**

# DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Mekanisme kelelahan logam [6]..... 4
Gambar 2.2 Permukaan Berbentuk Cekung yang menjadi *sumber tegangan* [22]..... 4
Gambar 2.3 Pembentukan retakan di permukaan karena adanya slip (a)Terbentuk intrusi, dan (b)Terbentuk ekstrusi akibat beban kelelahan [13]..... 5
Gambar 2.4 Hubungan antara laju perambatan retak (da/dN) dengan Faktor Intensitas Tegangan ( $\Delta\sigma$ ) [14]..... 6
Gambar 2.5 Penggambaran skematik perambatan retak tahap I dan tahap II dari retak lelah [16]..... 7
Gambar 2.6 Pengaruh Temperatur terhadap Laju perambatan retak Lelah pada pressure vessel steel [26]..... 8
Gambar 2.7 Notasi untuk beban siklus amplitudo konstan (R=-1) [21]..... 9
Gambar 2.8 Mesin uji lelah lentur putar [26]..... 10
Gambar 2.9 Kurva S-N pada Baja AISI 1045 dan Aluminium [25]..... 10
Gambar 2.10 Kurva S-N untuk baja [8]..... 11
Gambar 2.11 Pengaruh Takikan pada Batas Lelah Material [10] 15
Gambar 2.12 Pengaruh Temperatur pada sifat mekanik baja [5]. 16
Gambar 2.13 Kurva Tegangan-Regangan untuk baja konstruksi pada berbagai temperatur [3]..... 16
Gambar 2.14 Pengaruh temperatur terhadap kekuatan lelah pada pembebanan bending [4] ..... 17
Gambar 2.15 Kurva tegangan terhadap umur lelah Aluminium pada berbagai temperatur [9]..... 18
Gambar 2.16 Grafik Batas ketahanan lelah terhadap kekuatan tarik dari hasil percobaan untuk besi tempa dan baja dalam jumlah besar [5]..... 19
Gambar 2.17 Hubungan kekuatan yield dengan ketangguhan patah [10]..... 19
Gambar 2.18 Skema patah lelah untuk beban aksial dan bending spesimen silinder [13]..... 21
Gambar 2.19 Bentuk permukaan patahan lelah dan statik [12]. 22

Gambar 2.20 Beachmarks [24]. ..... 22
Gambar 2.21 Pengaruh besar tegangan terhadap spasi striasi pada pengujian lelah baja pada temperatur kamar [14]..... 23
Gambar 2.22 Garis striasi yang sulit ditemukan pada spesimen baja karbon yang diuji lentur putar [13]..... 24
Gambar 3.1 Flowchart Penelitian..... 26
Gambar 3.2 Spesimen uji tarik (JIS 2210 No 10) [19]..... 27
Gambar 3.3 Spesimen uji lelah [15]..... 27
Gambar 3.4 Surface roughness tester MITUTOYO [18]..... 28
Gambar 3.5 Skema Alat Uji Lentur Putar [18]. ..... 28
Gambar 3.6 Alat Uji Lentur Putar HT-8120 [18]. ..... 29
Gambar 4.1 Gambar konstruksi dan Diagram Bidang Momen dari Uji Lentur Putar..... 37
Gambar 4.2. Kurva S-N Hasil Eksperimen Uji lelah pada temperatur 30°C..... 38
Gambar 4.3 Kurva S-N Hasil Eksperimen Uji lelah pada temperatur 150°C..... 38
Gambar 4.4 Kurva S-N Hasil Eksperimen Uji Lelah pada temperatur 30°C dan 150°C..... 39
Gambar 4.5 Letak Patahan Spesimen pada (a). T= 30°C dan (b). T = 150°C..... 39
Gambar 4.6 Metalografi Material Spesimen uji lelah dengan perbesaran : (a). 200 x dan (b). 400 x..... 42
Gambar 4.7 Pengamatan permukaan patahan spesimen uji lelah dengan SEM, Temperatur 30°C pada tegangan (a). 455.46 MPa (0.42σu) , (b). 515.86 MPa (0.48σu) 43
.....
Gambar 4.8 Pengamatan permukaan patahan spesimen uji lelah dengan SEM, Temperatur 150°C pada tegangan (a). 455.46 MPa (0.42σu) , (b). 515.86 MPa (0.48σu)..... 44
Gambar 4.9 Hubungan Luas Daerah Patah Statik terhadap tegangan..... 45
Gambar 4.10 Hubungan Luas Daerah Patah Statik terhadap jumlah siklus patah (Umur lelah)..... 46
Gambar 4.11 Hubungan antara temperatur dengan Umur Lelah 46
Gambar 5.1 Perbedaan penampang baja AISI 1045 kekasaran

permukaan medium pada temperatur 30°C dengan tegangan (a) 455.46 MPa (0.42 σu) dan (b). 515.86 Mpa (0.48 σu) ..... 51
Gambar 5.2 Perbedaan penampang baja AISI 1045 kekasaran permukaan medium pada temperatur 150°C dengan tegangan (a). 455.46 MPa (0.42 σu) dan (b) 515.86 Mpa (0.48 σu) ..... 52
Gambar 5.3 Perbedaan penampang baja AISI 1045 pada 'tegangan 515.86 Mpa (0.48 σu) (a) Temperatur 30°C dan (b) Temperatur 150°C ..... 53
Gambar 5.4 Arah perambatan retak lelah menuju daerah patah statik. ..... 56
Gambar B.1 Patahan pada spesimen KG500-3b..... 62

**HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN**

# DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Koefisien a dan eksponen b sebagai penentu tingkat kekasaran [7] ..... 12
Tabel 2.2 Faktor Temperatur (Kd) [7] ..... 13
Tabel 3.1 Standarisasi Bahan Spesimen [15] ..... 28
Tabel 3.2 Komposisi kimia AISI 1045 ..... 29
Tabel 4.1 Hasil uji tarik ..... 33
Tabel 4.2 Tabel hasil pengujian lentur ..... 34
Tabel 4.3 Permukaan makro fungsi jumlah siklus pembebanan pada temperatur 30°C ..... 42
Tabel 4.4 Permukaan makro fungsi jumlah siklus pembebanan pada temperatur 150°C ..... 43
Tabel 4.5 Hubungan presentase luas daerah patah statik dengan umur lelah ..... 47
Tabel 5.1. Perbandingan Umur Lelah Spesimen Uji lentur putar pada tegangan $0.48\sigma_u$ ..... 50
Tabel A.1 Tegangan pada pengujian lentur putar ..... 64

**HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN**

# BAB 1
# PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Pada peralatan Industri seringkali menggunakan poros sebagai komponen utama untuk transfer daya. Salah satu faktor yang mendukung panjangnya umur pakai poros adalah kondisi temperatur kerja poros. Temperatur kerja poros mengalami kenaikan seiring dengan kenaikan putaran poros. Kenaikan temperatur tersebut tidak sampai merubah sifat mekanik material poros, namun mempengaruhi umur pakai poros dan ketahanan poros dalam menerima tegangan berulang.

Tegangan berulang pada poros menyebabkan poros dapat mengalami patah lelah (*fatigue failure*) pada periode kerja tertentu. Kegagalan yang disebabkan oleh kelelahan lebih *berbahaya daripada kegagalan statis dikarenakan kegagalan* tersebut terjadi tanpa peringatan terlebih dahulu, secara tiba-tiba dan menyeluruh. Lebih dari 90% penyebab kegagalan mekanik disebabkan oleh kegagalan lelah [5].

Uji kelelahan dan pengamatan bentuk patahan sangat diperlukan untuk material logam yang dikenai beban berulang dan berguna sebagai referensi bagi logam tersebut dalam aplikasinya. Uji Lelah yang digunakan dalam penelitian ini adalah uji lentur putar yang hasilnya adalah umur lelah dan besar tegangan yang diberikan serta perkiraan tegangan batas lelah. Banyak faktor yang mempengaruhi besarnya umur lelah (*fatigue life*) suatu komponen mesin, salah satunya adalah faktor temperatur kerja. Kenaikan temperatur kerja pada poros dapat mempengaruhi umur pakai/kerja poros.

## 1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang menjadi pokok kajian pada penelitian ini adalah mengetahui pengaruh temperatur terhadap batas lelah (*endurance limit/fatigue limit*) dan pola patahan baja AISI 1045



MILIK PERPUSTAKAAN ITS

yang mengalami pembebanan lentur putar dengan amplitudo konstan.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini antara lain :

1. Mengetahui pengaruh temperatur terhadap batas lelah material (*endurance limit/fatigue limit*).
2. Mengetahui pola patahan yang terjadi pada material akibat pembebanan lentur putar pada temperatur yang berbeda.

## 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang dipakai dalam penelitian ini antara lain:

- Material yang digunakan adalah baja AISI 1045 dan komposisinya dianggap homogen.
- Pengaruh lingkungan (kelembaban dan temperatur) dianggap tidak signifikan.
- Dimensi dari semua spesimen uji dianggap sama.
- Temperatur dianggap konstan pada setiap iterasi eksperimen.
- Kecepatan perputaran spesimen dianggap konstan pada setiap pengamatan.
- Tingkat kekasaran permukaan spesimen uji dianggap sama.
- Pemasangan poros diasumsikan *centre* dan silindris.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini antara lain :

1. Analisa ini diharapkan dapat dijadikan acuan atau pertimbangan dalam pencegahan dan perawatan untuk menghindari kegagalan lelah pada suatu poros.

2. Dapat mengaplikasikan teori kegagalan lelah di perkuliahan untuk menganalisa kasus atau kerusakan akibat kelelahan pada dunia industri.

## 1.6 Metodologi Penelitian

Metodologi yang digunakan untuk menyelesaikan penelitian ini adalah studi literatur, pengumpulan data, analisa dan pembahasan.

## 1.7 Sistematika Laporan

Laporan penelitian ini disusun secara sistematis dibagi dalam beberapa bab, dengan perincian sebagai berikut :

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini berisi penjelasan latar belakang, perumusan permasalahan, tujuan, batasan masalah, manfaat penelitian, metodologi penelitian dan sistematika laporan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi teori-teori dipakai sebagai dasar untuk melakukan rujukan dan pembahasan permasalahan yang diangkat pada tugas akhir ini.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi uraian-uraian urutan proses pengerjaan tugas akhir ini yang meliputi : studi literatur, pengambilan data, analisa data dan pembahasan, serta kesimpulan dan saran.

BAB 4 DATA HASIL PENGUJIAN

Bab ini berisi hasil uji tarik dan uji lentur putar serta fraktografi makro dan mikro permukaan patahan uji lentur putar

BAB 5 ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi analisa pengaruh temperatur terhadap batas lelah dan pola patahan hasil pembebanan lentur putar..

BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN

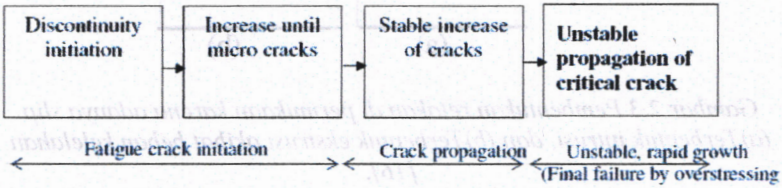
Bab ini berisi kesimpulan dan saran untuk pengembangan eksperimen dalam tugas akhir ini.

**HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN**

# BAB 2
# TINJAUAN PUSTAKA

## 2.1 Mekanisme Patah Lelah

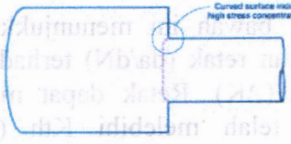
Patah yang terjadi pada komponen konstruksi akibat pembebanan yang berulang-ulang disebut patah lelah (*fatigue*). Mekanisme patah lelah secara umum terdiri dari tiga tahap, yaitu : tahap awal terjadinya retakan (*fatigue crack initiation*), perambatan retakan (*crack propagation*) dan patah akhir yang sering disebut patah statik.




*Gambar 2.1. Mekanisme kelelahan logam [6].*

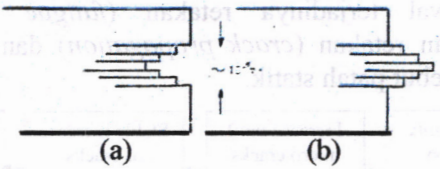
Secara umum awal retakan/retak mikro (gambar 2.1) dimulai dari terjadinya deformasi lokal yang disebabkan oleh besarnya pemusatan tegangan akibat adanya cacat pada material, antara lain :

1. Goresan pada permukaan.
2. Retakan pada permukaan atau dekat permukaan.
3. Inklusi, yaitu adanya diskontinu akibat terdapat logam yang tidak menyatu dengan logam lain dalam satu paduan.
4. Permukaan yang tidak rata/cekung, seperti terlihat pada gambar 2.2.



*Gambar 2.2 Permukaan Berbentuk Cekung yang menjadi sumber tegangan [22].*

Adanya tegangan yang terpusat menyebabkan terjadinya deformasi plastik setempat yang ditandai dengan adanya garis-garis slip pada permukaan spesimen yang diuji lelah. Slip setempat ini menimbulkan cacat permukaan yang berupa intrusi dan ekstrusi (gambar 2.3). Terbentuknya garis-garis slip ini biasanya berlangsung dalam beberapa ribu siklus tegangan yang pertama [16].




*Gambar 2.3 Pembentukan retakan di permukaan karena adanya slip (a)Terbentuk intrusi, dan (b)Terbentuk ekstrusi akibat beban kelelahan [16].*

Siklus pembebanan selanjutnya akan menyebabkan terjadinya lebih banyak lagi garis-garis slip, khususnya di sekitar daerah ekstrusi dan intrusi. Hal tersebut menyebabkan munculnya retakan pada spesimen.

### 2.1.1 Perambatan Lelah pada Tegangan Amplitudo Konstan

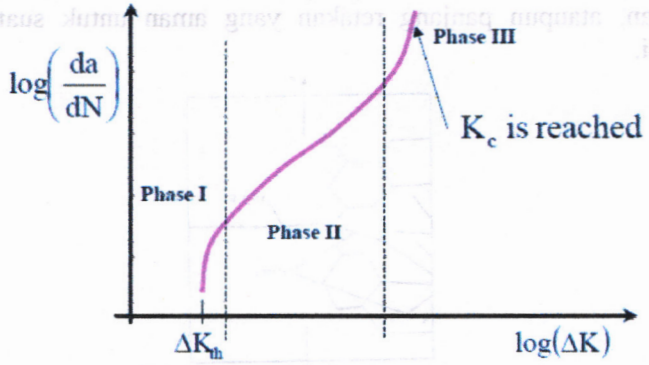
Untuk beban dengan amplitudo konstan, hubungan laju perambatan retak dengan faktor intensitas tegangan umumnya dituliskan sebagai berikut :

$$da/dN = f(K) \qquad (2.1)$$

Keterangan : da/dN : Laju perambatan retak

Gambar 2.4 di bawah ini menunjukkan kurva hubungan antara laju perambatan retak (da/dN) terhadap konstanta Faktor Intensitas Tegangan ($\Delta K$). Retak dapat merambat disebabkan besar pembebanan telah melebihi Kth (K threshold-Faktor Intensitas Tegangan ambang) dan sebaliknya, jika besar pembebanan kurang dari Kth maka retak tidak akan merambat.

Laju perambatan retak pada tiap tahapan retak lelah tidak sama. Pada tahap/daerah I (inisiasi retak), retak merambat dengan sangat pelan (beberapa angstrom persiklus), semakin lama laju perambatan retak semakin cepat dan laju tercepat adalah saat perambatan retak memasuki tahap III (*fracture*).

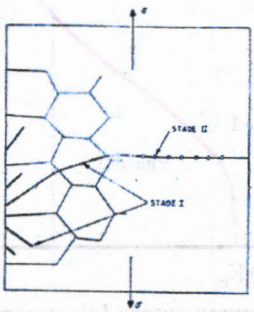



*Gambar 2.4 Hubungan antara laju perambatan retak (da/dN) dengan Faktor Intensitas Tegangan (ΔK ) [14].*

Perbandingan laju perambatan retak dapat dilihat pada kurva berwarna merah (gambar 2.4). Bentuk kurva berwarna merah pada tahap I cenderung mengarah ke arah horizontal karena laju retakan sangat lambat sehingga seiring dengan bertambahnya putaran siklus tidak terjadi perubahan laju retakan yang signifikan. Pada tahap II, kurva merah menunjukkan bentuk yang lebih stabil, laju retakan semakin bertambah besar dan hubungan antara da/dN dengan ΔK merupakan hubungan liniear dengan kecepatan beberapa mikron persiklus.) Laju retakan menjadi lebih cepat saat mendekati patah statik.

Secara mikroskopik, perambatan retak tahap I terjadi dalam beberapa butir kristal dan membentuk sudut 45° terhadap arah pembebanan (gambar 2.5) Perambatan retak tahap I ini belum dapat diamati secara makro. Pada perambatan retakan tahap II (gambar 2.5) arah perambatan retak tegak lurus terhadap arah pembebanan dan di daerah ini terdapat ciri yang perambatan retak

khusus yaitu ditandai dengan mulai munculnya striasi (*striasion*). Striasi hanya dapat diamati melalui mikroskop elektron seperti SEM (*Scanning Electron Microscope*). Perambatan tahap II ini dapat dikatakan mendominasi perambatan retak lelah. Oleh karena itu, perambatan retak lelah tahap II ini dapat digunakan untuk memperkirakan umur lelah yang aman, atau beban dinamik yang aman, ataupun panjang retakan yang aman untuk suatu konstruksi.

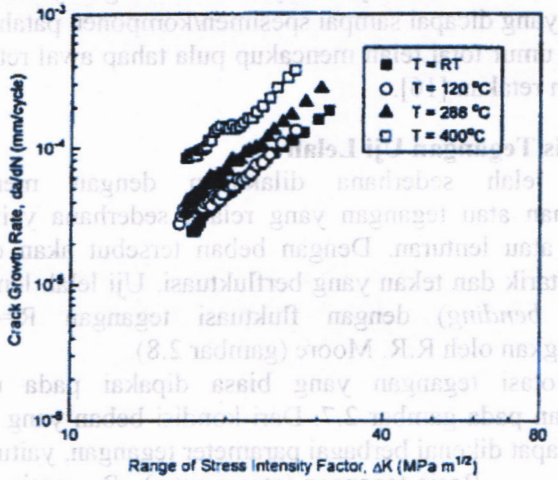



*Gambar 2.5 Penggambaran skematik perambatan retak tahap I dan II dari retak lelah [16].*

Gambar 2.6 merupakan kurva yang menunjukkan perilaku perambatan retak yang dipengaruhi temperatur pada *pressure vessel steel.*

Kurva tersebut menunjukkan laju perambatan retak lelah pada temperatur kamar hingga temperatur 120°C adalah hampir sama sedangkan pada temperatur diatas 120°C maka laju perambatan retak lelah semakin cepat seiring dengan kenaikan temperaturnya. Hal ini membuktikan bahwa pada temperatur di atas temperatur kamar maka laju perambatan retak semakin cepat sehingga material lebih cepat patah.

Patah statik terjadi disebabkan perambatan retak lelah telah menjalar cukup jauh sehingga beban yang bekerja hanya ditopang oleh penampang sisa yang belum retak. Sisa penampang tersebut tidak mampu lagi menahan besar tegangan hingga akhirnya patah (patah statik).




*Gambar 2.6 Pengaruh Temperatur terhadap Laju perambatan retak Lelah pada pressure vessel steel [26].*

## 2.2 Perkiraan Umur Lelah

Memprediksi umur lelah suatu komponen merupakan hal yang sangat sulit. Kesukaran tersebut disebabkan oleh banyaknya faktor yang mempengaruhi umur lelah, antara lain : beban, kondisi material, proses pengerjaan, temperatur operasi. Perubahan kecil pada faktor-faktor tersebut akan menyebabkan perubahan pada umur lelahnya. Oleh karena itu seringkali perlu dilakukan uji lelah pada suatu struktur yang lengkap atau suatu komponen dengan kondisi beban dan lingkungan yang mirip dengan situasi sebenarnya [16].

Pengujian lelah terhadap spesimen kecil tetap bermanfaat karena datanya dapat digunakan untuk :

- Mengetahui sumber kriteria patah
- Membandingkan karakteristik material
- Membandingkan besarnya pengaruh proses pengerjaan, kehalusan permukaan, dan sebagainya terhadap kelelahan.

Umur lelah biasanya dinyatakan sebagai jumlah siklus tegangan yang dicapai sampai spesimen/komponen patah. Dengan demikian umur total telah mencakup pula tahap awal retakan dan penjalaran retakan [16].

### 2.2.1 Jenis Tegangan Uji Lelah

Uji lelah sederhana dilakukan dengan memberikan pembebanan atau tegangan yang relatif sederhana yaitu beban uniaksial atau lenturan. Dengan beban tersebut akan diperoleh tegangan tarik dan tekan yang berfluktuasi. Uji lelah lentur putar (*rotating bending*) dengan fluktuasi tegangan R=-1 telah dikembangkan oleh R.R. Moore (gambar 2.8).

Notasi tegangan yang biasa dipakai pada uji lelah ditunjukkan pada gambar 2.7. Dari kondisi beban yang berulang tersebut dapat dikenai berbagai parameter tegangan, yaitu :

Rasio tegangan (*stress ratio*) : R = σmin / σmaks

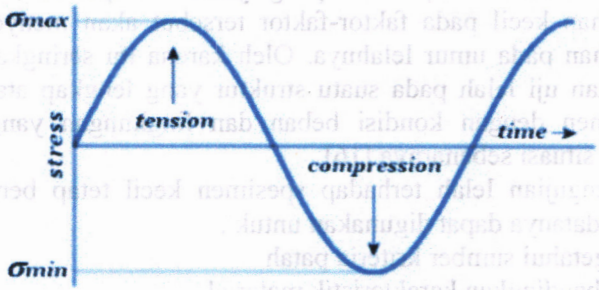
Di mana : σmin = tegangan minimum

σmaks = tegangan maksimum

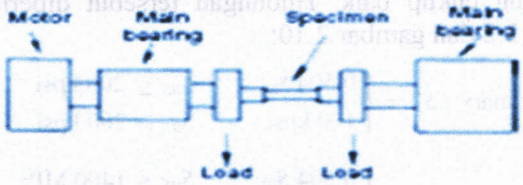
$$\sigma_a = \text{stress amplitude} = \frac{\Delta\sigma}{2}$$

$$\Delta\sigma = \text{stress range} = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

$$\sigma_m = \text{mean stress} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

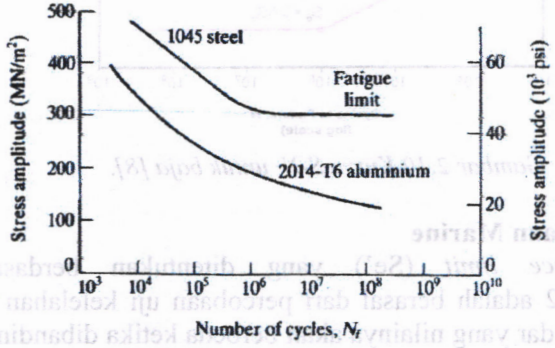



*Gambar 2.7 Notasi untuk beban siklus amplitudo konstan (R=-1) [21].*




*Gambar 2.8 Mesin uji lelah lentur putar [26].*

Data umur lelah dipresentasikan dalam bentuk diagram Wohler atau kurva S-N (gambar 2.9). Baja mempunyai batas lelah (*fatigue limit*) atau batas ketahanan (*endurance limit*) yang jelas, sedangkan Aluminium tidak mempunyai batas kelalahan yang jelas. Batas lelah adalah batas tegangan yang akan memberikan umur lelah yang tak berhingga. Untuk baja, batas lelah ini diambil setelah jumlah siklus tegangan mencapai $10^6$ atau $10^7$. Pada daerah diatas jumlah siklus ini, kurva S-N untuk material baja akan mendatar. Bagian kurva S-N yang miring menunjukkan kekuatan lelah pada umur lelah terbatas.




*Gambar 2.9 Kurva S-N pada Baja AISI 1045 dan Aluminium [25].*

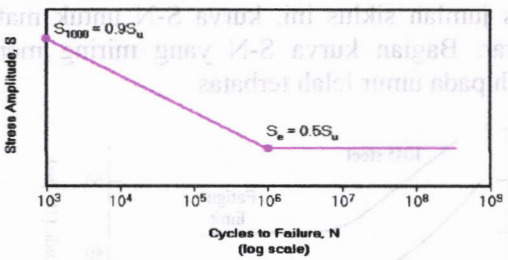
- ***Fatigue Limit/Endurance Limit.*** Besaran angka tertentu dari logam ferrous yang telah diuji dengan mesin uji rotating bending R.R. Moore. Kemudian didapatkan hubungan antara *ultimate tensile strength* (*Sut* ) dengan *endurance limit* (*Se*) dengan nilai

akurasi yang cukup baik. Hubungan tersebut diberikan dalam persamaan 2.2 dan gambar 2.10:

$$\text{U.S. Customary} : S'_e = \begin{cases} 0.504\, S_{ut} & S_{ut} \le 200 \text{ kpsi} \\ 100 \text{ kpsi} & S_{ut} > 200 \text{ kpsi} \end{cases} \qquad (2.2)$$

$$\text{SI/metric} : S'_e = \begin{cases} 0.504\, S_{ut} & S_{ut} \le 1400 \text{ MPa} \\ 700 \text{ MPa} & S_{ut} > 1400 \text{ MPa} \end{cases}$$

*Endurance limit* (Se') pada persamaan 2.2 berbeda dari *endurance limit* yang didapatkan dari uji fatik dan *actual endurance limit* (Se) untuk suatu elemen mesin yang biasanya punya karakteristik berbeda, seperti dalam hal pengerjaan akhir, ukuran, pembebanan, temperatur dan faktor-faktor berpengaruh lainnya.




*Gambar 2.10 Kurva S-N untuk baja [8].*

### 2.2.2 Persamaan Marine

*Endurance limit* (Se') yang ditentukan berdasarkan persamaan 2.2 adalah berasal dari percobaan uji kelelahan pada spesimen standar yang nilainya akan berbeda ketika dibandingkan dengan kondisi sebenarnya pada suatu elemen mesin. Sehingga, diperlukan beberapa faktor modifikasi, sehingga perkiraan ketahanan lelah rancangan bisa mendekati kondisi aktual dimana suatu elemen mesin bekerja/beroperasi. Faktor-faktor modifikasi tersebut dirumuskan oleh Joseph Marin (1962) dalam persamaan berikut :

$$S_e = k_a\, k_b\, k_c\, k_d\, k_e\, S'_e \qquad (2.3)$$

Keterangan :
Se : batas lelah elemen mesin yang diperiksa
Se': batas lelah yang didapatkan dari percobaan lentur putar
Ka : faktor permukaan
Kb : faktor ukuran
Kc : faktor tipe pembebanan
Kd : faktor suhu
Ke : faktor-faktor berpengaruh lainnya
Sifat perkalian dari persamaan 2.3 telah dibuktikan keakuratannya melalui pengujian suatu baja G43400 (tanur listrik, kualitas untuk pesawat terbang) dan disimpulkan bahwa persamaan 2.2 telah memenuhi syarat untuk memperkirakan batas ketahanan dari suatu elemen mesin [5].

**- Faktor permukaan (Ka)**

Pengerjaan akhir permukaan spesimen uji lentur putar R.R. Moore adalah sangat halus sedangkan kondisi aktual mesin mungkin memiliki kekasaran permukaan yang bermacam-macam. Untuk itu, diperlukan faktor kekasaran permukaan yang tergantung pada tingkat kehalusan permukaan dan kekuatan tarik material, seperti diberikan dalam persamaan 2.4 :

$$k_a = a S_{ut}^b \qquad (2.4)$$

Dimana koefisien (a) sebagai unit tegangan dan eksponen (b) dapat dilihat pada tabel 2.1. Semakin kasar permukaan spesimen maka harga koefisien (a) dan eksponen (b) semakin bertambah.

Tabel 2.1 Koefisien a dan eksponen b sebagai penentu tingkat kekasaran[7].

| | Factor ($a$) | | |
|---|---|---|---|
| Surface finish | kpsi | Mpa | Exponent ($b$) |
| Ground | 1.34 | 1.58 | – 0.085 |
| Machined | 2.70 | 4.51 | – 0.265 |
| Cold-drawn | 2.70 | 4.51 | – 0.265 |
| Hot-rolled | 14.4 | 57.7 | – 0.718 |
| As forged | 39.9 | 272 | – 0.995 |

Untuk beban lentur dan putar, maka faktor ukuran yang dipakai berdasarkan besar diameter yang mengikuti persamaan 2.5 :

$$k_b = \begin{cases} (d/0.3)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \le d \le 2 \text{ in} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d \le 10 \text{ in} \\ (d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \le d \le 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \le 254 \text{ mm} \end{cases} \quad (2.5)$$

Untuk tipe beban bending, torsi atau geser maka harga Kc mengikuti persamaan 2.6 :

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{bending} \\ 0.577 & \text{torsion and shear} \end{cases} \quad (2.6)$$

- **Faktor Temperatur (Kd)**

Untuk temperatur yang sangat rendah, dibawah temperatur kamar maka material yang ulet dapat berubah menjadi getas. Faktor temperatur (rasio ST/SRT) diberikan melalui persamaan 2.7. ST adalah kekuatan tarik material pada temperatur tertentu dan SRT adalah kekuatan tarik pada temperatur kamar.

$$k_d = \frac{S_T}{S_{RT}} \quad (2.7)$$

Tabel 2.2 Faktor Temperatur (Kd)[7].

| °F | $k_d$ | °C | $k_d$ |
|---|---|---|---|
| 70 | 1.000 | 20 | 1.000 |
| 100 | 1.008 | 50 | 1.010 |
| 200 | 1.020 | 100 | 1.020 |
| 300 | 1.024 | 150 | 1.025 |
| 400 | 1.018 | 200 | 1.020 |
| 500 | 0.995 | 250 | 1.000 |
| 600 | 0.963 | 300 | 0.975 |
| 700 | 0.927 | 350 | 0.927 |
| 800 | 0.872 | 400 | 0.922 |
| 900 | 0.797 | 450 | 0.840 |
| 1000 | 0.698 | 500 | 0.766 |
| 1100 | 0.567 | 550 | 0.670 |

- **Faktor-faktor berpengaruh lainnya (Ke)**

Banyak faktor lainnya yang mempengaruhi suatu pembebanan dinamik seperti adanya tegangan sisa, korosi, frekuensi putaran, konsentrasi tegangan, dan lain-lain. Secara umum pengaruh faktor Ke terdapat dalam persamaan berikut :

$$k_e = \frac{1}{K_f} \qquad (2.8)$$

**Faktor konsentrasi tegangan lelah (Kf)**

$$Kf = 1 + (K t - 1)q \qquad (2.9)$$

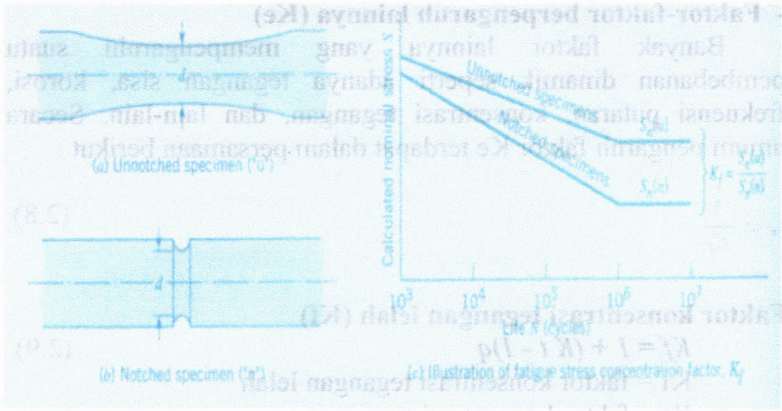
Kf = faktor konsentrasi tegangan lelah

Kt = faktor konsentrasi tegangan

Harga sensivitas takikan berkisar antara 0-1. Untuk material yang mempunyai takikan maka harga sensivitas takikan terbesar q=1. Jika material tersebut tidak mempunyai takikan maka harga q=0 dan harga Kf = 1.

**Konsentrasi Tegangan (Kt)**

*Gambar 2.11 berikut adalah pengaruh konsentrasi tegangan* terhadap umur suatu material yang dikenai beban dinamis. Jika diberi tegangan yang sama besar untuk material yang sama dan identik, terlihat bahwa material yang tidak mengalami konsentrasi tegangan memiliki jumlah siklus yang lebih banyak jika dibandingkan dengan material yang mengalami konsentrasi tegangan. Harga konsentrasi tegangan untuk spesimen yang tidak mempunyai takikan adalah Kt=1.




*Gambar 2.11 Pengaruh Takikan pada Batas Lelah Material [10].*

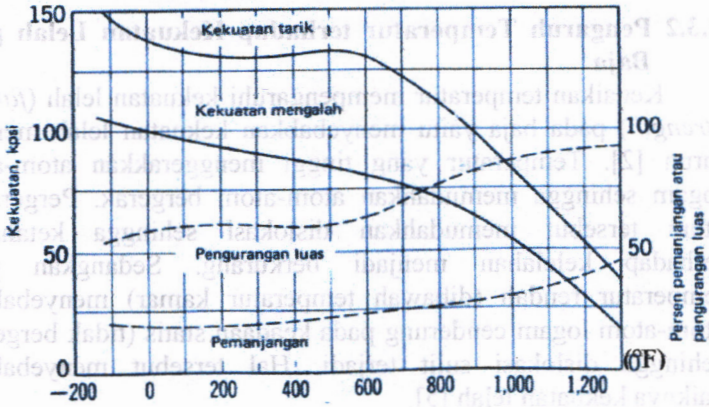
## 2.3 Pengaruh Temperatur terhadap Sifat Mekanik Baja

### 2.3.1 Pengaruh Temperatur terhadap Kekuatan Tarik dan *Yield* Baja

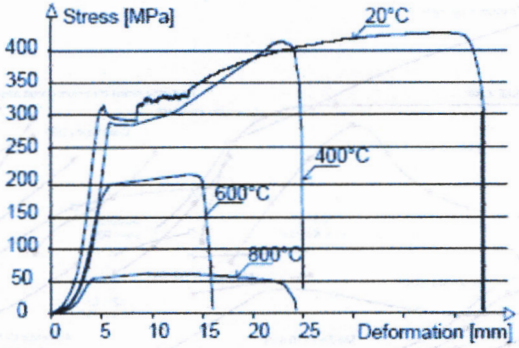
Temperatur mempengaruhi semua sifat mekanis dari bahan [5]. Pada temperatur tinggi, kekuatan logam akan berkurang disebabkan deformasi plastis lebih mudah terjadi [16]. Seperti pada baja, secara umum kekuatan tarik pada baja akan turun seiring dengan kenaikan temperatur (gambar 2.12). Suatu pengecualian adalah pada baja yaitu baja memiliki kekuatan tarik maksimum pada temperatur antara 400°F hingga 600°F. Hal itu disebabkan pada selang temperatur tersebut terjadi penyepuhan regang [24]. Pada temperatur diatas 600°F, kekuatan tarik baja mengalami penurunan secara drastis sedangkan pada temperatur yang sangat tinggi (diatas 0.4 Temperatur lelehnya) maka baja dan logam lainnya akan mengalami *creep* [21].

Temperatur juga mempengaruhi kekuatan *yield* (kekuatan mengalah) yaitu semakin tinggi temperatur maka kekuatan *yield* mengalami penurunan. Hal itu disebabkan pada temperatur tinggi dislokasi lebih cepat terjadi sehingga kekuatan yield menjadi lebih kecil [28]. Sebagai contoh, kekuatan *yield* baja (pada

temperatur 500°F) turun menjadi 70% dari kekuatan yield pada temperatur kamar seperti terlihat pada gambar 2.12.




*Gambar 2.12 Pengaruh Temperatur terhadap sifat mekanik baja [5].*



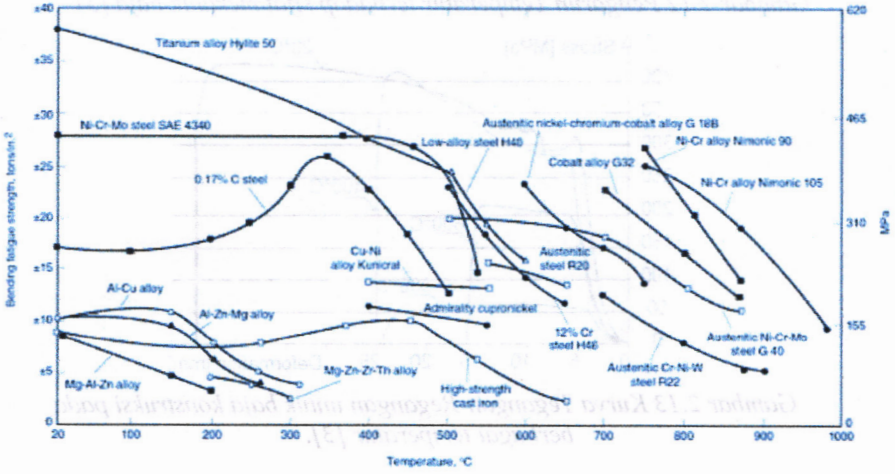

*Gambar 2.13 Kurva Tegangan-Regangan untuk baja konstruksi pada berbagai temperatur [3].*

Pada gambar 2.13 diperlihatkan kurva hasil tes uji tarik baja konstruksi pada berbagai temperatur tes. Berdasarkan kurva tersebut juga dapat disimpulkan kekuatan yield dan kekuatan tarik turun seiring dengan kenaikan temperatur. Pada temperatur sekitar 400°C tampak bahwa kekuatan tarik baja memiliki nilai maksimum. Sedangkan pada temperatur 800°C terjadi penurunan

kekuatan *yield* sebesar 90% dari kekuatan *yield* pada temperatur kamar.

### 2.3.2 Pengaruh Temperatur terhadap Kekuatan Lelah pada Baja

Kenaikan temperatur mempengaruhi kekuatan lelah (*fatigue strength*) pada baja yaitu menyebabkan kekuatan lelah menjadi turun [2]. Temperatur yang tinggi menggerakkan atom-atom logam sehingga memudahkan atom-atom bergerak. Pergerakan atom tersebut memudahkan dislokasi sehingga ketahanan terhadap kelelahan menjadi berkurang. Sedangkan pada temperatur rendah (dibawah temperatur kamar) menyebabkan atom-atom logam cenderung pada keadaan statis (tidak bergerak) sehingga dislokasi sulit terjadi. Hal tersebut menyebabkan naiknya kekuatan lelah [5].

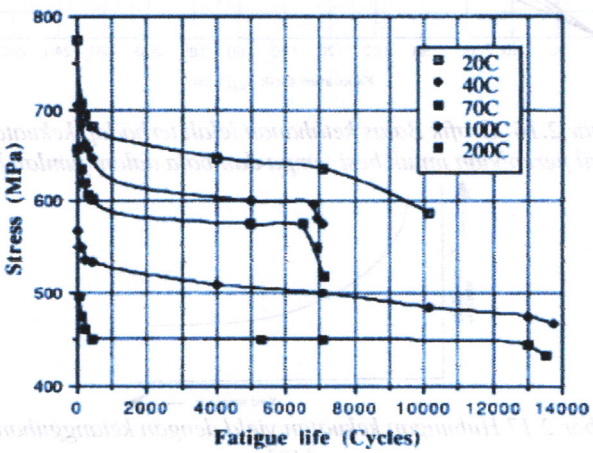



*Gambar 2.14 Pengaruh temperatur terhadap kekuatan lelah pada pembebanan bending [4].*

Secara umum, kenaikan temperatur menyebabkan turunnya kekuatan lelah pada berbagai macam logam. Seperti pada gambar 2.14, menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur

menyebabkan turunnya kekuatan lelah namun terdapat pengecualian seperti pada baja karbon yang memiliki kekuatan maksimum pada temperatur 370°C. Fenomena tersebut disebabkan oleh peristiwa Dynamic Strength Aging atau *peningkatan kekuatan tarik disebabkan oleh naiknya kekerasan* logam akibat *strain hardening*. Besi tuang berkekuatan tinggi juga menunjukkan peningkatan kekuatan lelah seiring naiknya temperatur dan pada temperatur sekitar 460°C kekuatan lelah mulai cenderung turun. Penurunan ketahanan lelah menyebabkan semakin pendeknya umur lelah suatu logam.

Gambar 2.15 menunjukkan kecederungan turunnya kekuatan lelah seiring kenaikan temperatur yang dialami Aluminuum. Pada tingkat tegangan yang sama maka Aluminum pada temperatur tinggi menghasilkan jumlah putaran lebih rendah daripada pada kondisi temperatur lebih rendah.

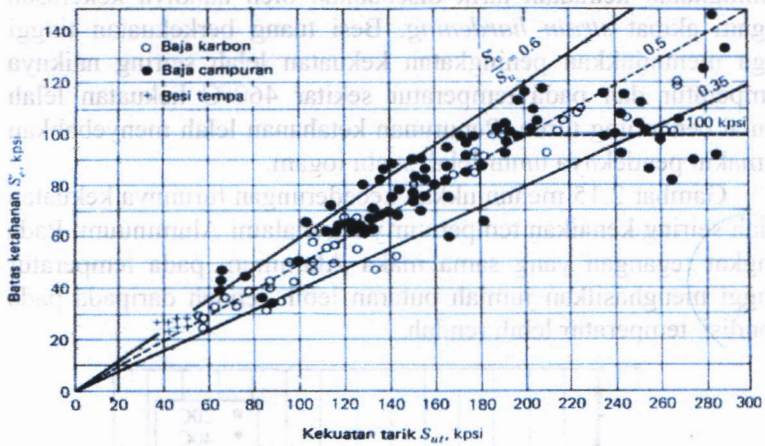



*Gambar 2.15 Kurva tegangan terhadap umur lelah Aluminium pada berbagai temperatur [9].*

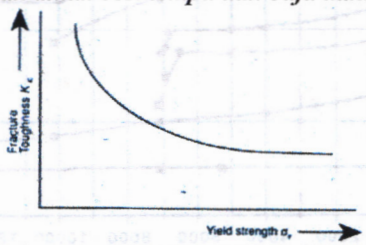
### 2.3.3 Hubungan antara Kekuatan Tarik dengan Kekuatan Lelah pada Baja

Berdasarkan gambar 2.16 menunjukkan grafik hubungan antara batas ketahanan lelah baja terhadap kekuatan tarik. Baja

dengan kekuatan tarik sampai 200kpsi (1400MPa) memiliki batas kelelahan antara 35%-60% dari kekuatan tarik. Gambar 2.16 juga menunjukkan bahwa batas lelah akan naik seiring dengan kenaikan kekuatan tariknya.




*Gambar 2.16 Grafik Batas ketahanan lelah terhadap kekuatan tarik dari hasil percobaan untuk besi tempa dan baja dalam jumlah besar [5].*




*Gambar 2.17 Hubungan kekuatan yield dengan ketangguhan patah [10].*

Untuk mengetahui kekuatan lelah maka diperlukan serangkaian percobaan yang banyak disebabkan sifat statistis dari kelelahan. Hal itu berarti batas ketahanan lelah suatu baja cenderung berada pada range nilai tertentu, tidak bersifat pasti pada nilai/angka tertentu. Hal tersebut menyebabkan terdapat

daerah penyebaran batas nilai ketahanan lelah. Keberagaman nilai batas ketahanan lelah tersebut akan selalu terjadi walaupun kekuatan tarik yang dimiliki sejumlah besar spesimen uji lentur putar bernilai sama. Untuk keperluan pengujian lentur putar, *digunakan rumus untuk memperkirakan batas ketahanan rata-*ratanya (mean endurance limit/Se'), sebagai berikut :

| | |
|---|---|
| Se' = 0.5 Sut | Sut < 200 kpsi (1400 Mpa) |
| Se' = 100 kpsi (700Mpa) | Sut > 200 kpsi |

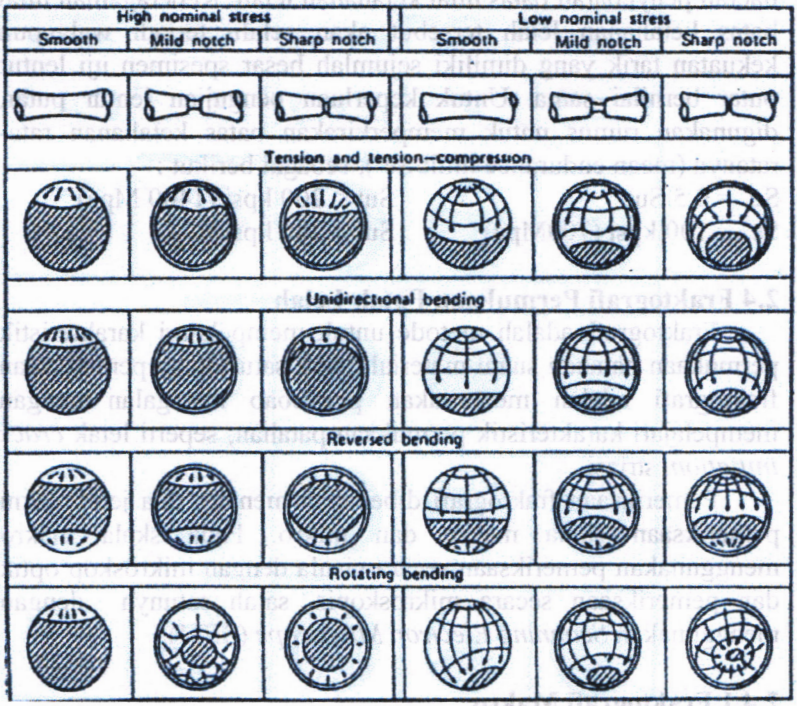
## 2.4 Fraktografi Permukaan Patah Lelah

Fraktografi adalah metode untuk mempelajari karakteristik permukaan patahan suatu material Salah satu tujuan pemeriksaan fraktografi adalah menentukan penyebab kegagalan dengan mempelajari karakteristik permukaan patahan, seperti letak *crack initiation,* striasi.

Pemeriksaan fraktografi dibedakan menjadi dua jenis yakni pemeriksaan skala makro dan mikro. Pada skala makro menggunakan pemeriksaan secara visula dengan mikroskop optik dan pemeriksaan secara mikroskopis, salah satunya dengan menggunakan *Scanning Electron Micoscope* (SEM).

### 2.4.1 Fraktografi Makro

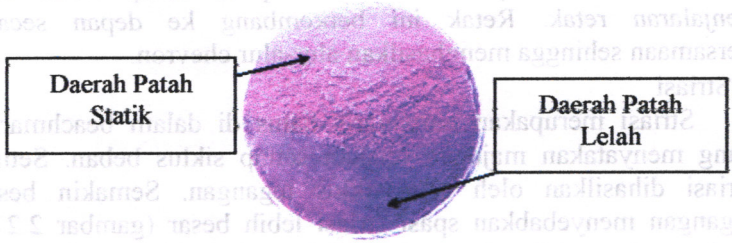
Ciri-ciri permukaan patah lelah memiliki kekhususan yang pada dasarnya dibagi menjadi dua daerah, yaitu daerah patah lelah (patah fatik) dan daerah patah statik (gambar 2.19). Daerah patah statik mirip dengan pola patahan getas, ditandai dengan banyaknya butiran pada penampang patahan dan cenderung berwarna putih dan mengkilat. Daerah patah statik adalah daerah yang terbentuk akibat tegangan yang bekerja pada penampang tersisa mencapai kekuatan tarik material sehingga komponen patah menjadi dua. Luas daerah patah statik ditentukan oleh besarnya beban. Semakin tinggi beban maka luas daerah patahan statik lebih besar dari daerah patah lelah dan sebaliknya, semakin rendah beban uji maka luas daerah patahan statik semakin kecil [33].




*Gambar 2.18 Skema patah lelah untuk beban aksial dan bending spesimen silinder [13].*

Fraktografi makro juga dapat menunjukkan bentuk-bentuk patahan untuk material silinder dengan berbagai macam pembebanan (gambar 2.18). Daerah luasan patah statik pada gambar ditunjukkan dengan arsiran. Pada pengujian lentur putar (*rotating bending*) untuk *high nominal stress* terdapat perbedaan luasan patah statik antara *sharp notch* dan *mild notch*. *Sharp notch* memiliki takik relatif dalam sehingga konsentrasi tegangan di bawah takikan besar. Konsentrasi tegangan besar ini menyebabkan siklus yang dialami material pendek. Akibatnya, striasi yang terjadi relatif sedikit dan daerah patah statiknya besar. Sedangkan *mild notch* memiliki takik kecil sehingga konsentrasi

tegangan di bawah takikan kecil. Konsentrasi tegangan kecil menyebabkan siklus yang dialami material panjang. Akibatnya, striasi yang terjadi relatif banyak dan daerah patah statiknya kecil.



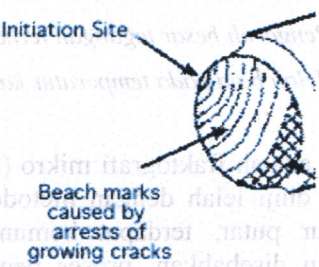

*Gambar 2.19 Bentuk permukaan patahan lelah dan statik [12].*

### 2.4.1 Fraktografi Mikro

Fraktografi mikro dapat mengidentifikasi ciri-ciri patah lelah seperti striasi, *beachmark*, *crack initiation area* dan *chevron*.

- Garis pantai (*Beachmark).*

Pada awal retak (*origin*), perambatan retak awal berjalan pelan, membentuk daerah patah fatigue. Penjalaran retak di daerah fatigue ditandai oleh *progression mark* (tanda gerak maju) atau biasa disebut *beachmark. Beachmarks* terjadi karena adanya perubahan pada kondisi pembebanan. Beban dengan variabel yang konstan atau frekuensi yang tetap tidak akan menampakkan garis pantai pada permukaan patahannya.




*Gambar 2.20 Beachmarks [24].*

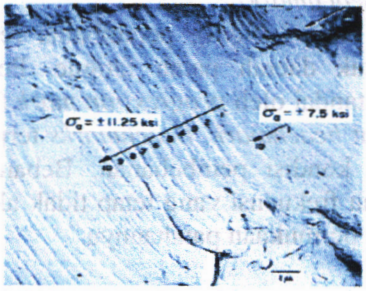
MILIK PERPUSTAKAAN ITS

- Alur-alur Chevron

Arah pertumbuhan retak hampir selalu berasal dari ujung-ujung alur chevron. Alur-alur chevron terbentuk karena hampir semua retakan berjalan bersamaan pada tahap awal dari penjalaran retak. Retak ini berkembang ke depan secara bersamaan sehingga menghasilkan alur-alur chevron.

- Striasi

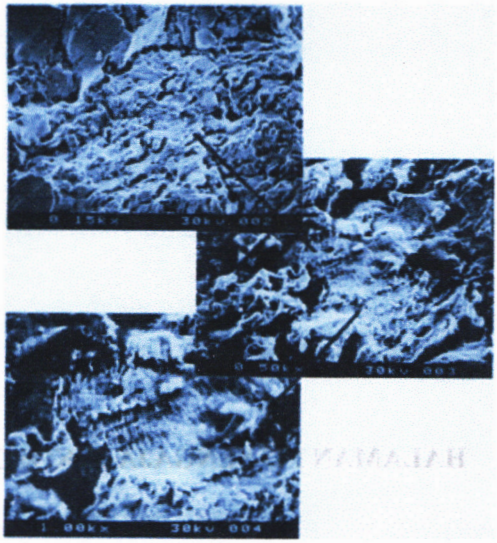
Striasi merupakan garis-garis halus di dalam beachmarks yang menyatakan majunya retakan setiap siklus beban. Setiap striasi dihasilkan oleh satu siklus tegangan. Semakin besar tegangan menyebabkan spasi striasi lebih besar (gambar 2.21). Pada patahan akibat kegagalan lelah, striasi tidak selalu dapat muncul dan diamati. Hal tersebut disebabkan diantaranya oleh jarak/spasi antara striasi terlalu kecil; striasi menghilang akibat kerusakan pada permukaan oleh jenis pembebanan dan terjadinya oksidasi pada permukaan benda/material [13]. Garis striasi tidak pernah saling menyilang/bertabrakan.




*Gambar 2.21 Pengaruh besar tegangan terhadap spasi striasi pada pengujian lelah baja pada temperatur kamar [14].*

Gambar 2.22 adalah fraktografi mikro (SEM) dari spesimen baja karbon yang diuji lelah dengan metode lentur putar. Pada pembebanan lentur putar, terdapat kemungkinan striasi sulit ditemukan. Hal itu disebabkan, proses pembebanan tekan dan tarik yang bergantian pada setiap titik di permukaan spesimen uji

sehingga garis striasi tidak tampak jelas. Tegangan tarik menyebabkan striasi terbuka akan tetapi tegangan tekan menyebabkan striasi menutup dan hal ini berlangsung pada setiap siklusnya.

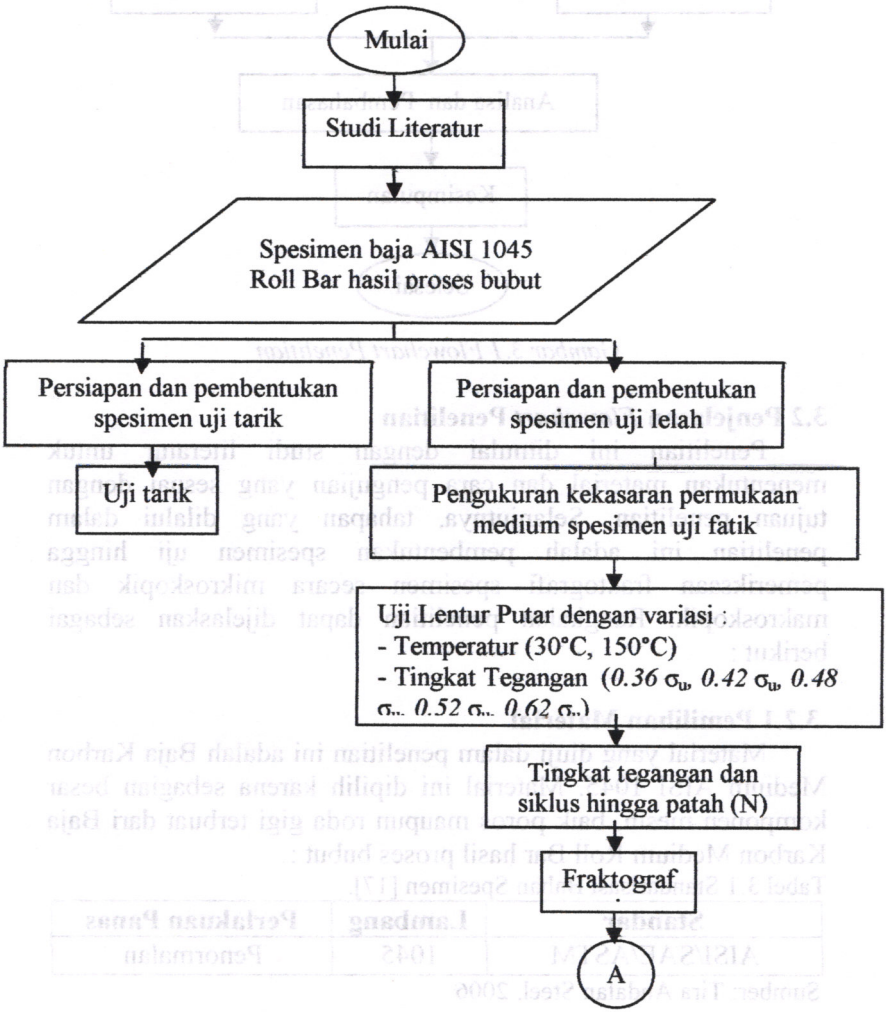


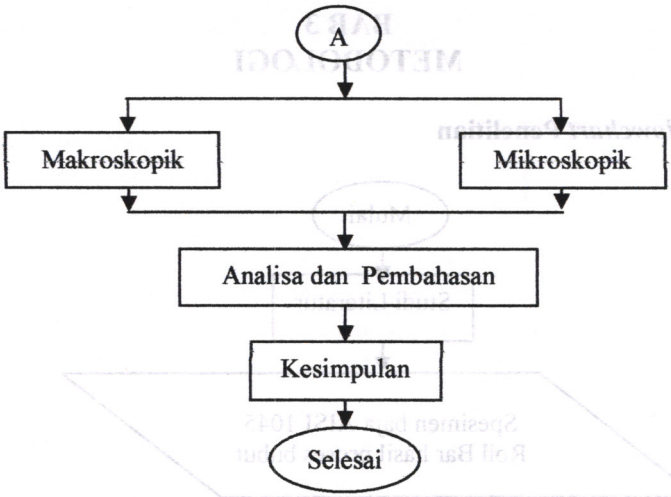
*Gambar 2.22 Garis striasi yang sulit ditemukan pada spesimen baja karbon yang diuji lentur putar [13].*

**HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN**

# BAB 3
# METODOLOGI

## 3.1 *Flowchart* Penelitian






*Gambar 3.1 Flowchart Penelitian*

## 3.2 Penjelasan *Flowchart* Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan studi literatur untuk menentukan material dan cara pengujian yang sesuai dengan tujuan penelitian. Selanjutnya, tahapan yang dilalui dalam penelitian ini adalah pembentukan spesimen uji hingga pemeriksaan fraktografi spesimen secara mikroskopik dan makroskopik. Rangkaian penelitian dapat dijelaskan sebagai berikut :

### 3.2.1 Pemilihan Material

Material yang diuji dalam penelitian ini adalah Baja Karbon Medium AISI 1045. Material ini dipilih karena sebagian besar komponen mesin, baik poros maupun roda gigi terbuat dari Baja Karbon Medium Roll Bar hasil proses bubut :

Tabel 3.1 Standarisasi Bahan Spesimen [17].

| Standar | Lambang | Perlakuan Panas |
|---|---|---|
| AISI/SAE/ASTM | 1045 | Penormalan |

Sumber: Tira Andalan Steel, 2006

Tabel 3.2 Komposisi kimia AISI 1045 [17].

| Nama Kimia | Persentase (%) |
|---|---|
| Carbon | 0.42-0.50 |
| Mangan | 0.50-0.80 |
| Silikon | Maks. 0.40 |
| Sulfur | 0.020-0.040 |
| Crom+Molibium+Nikel | Maks.0.63 |

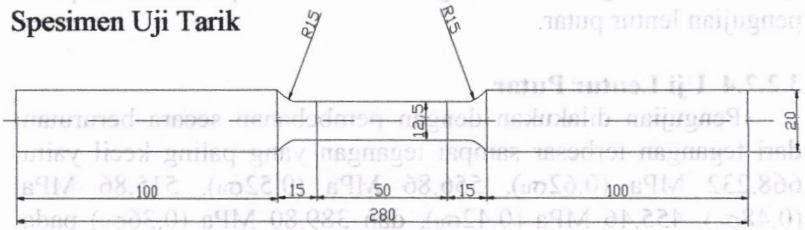
Sumber: Tira Andalan Steel, 2006.

### 3.2.2 Langkah-langkah Percobaan

#### 3.2.2.1 Pembentukan Spesimen Uji Tarik dan Uji Lelah

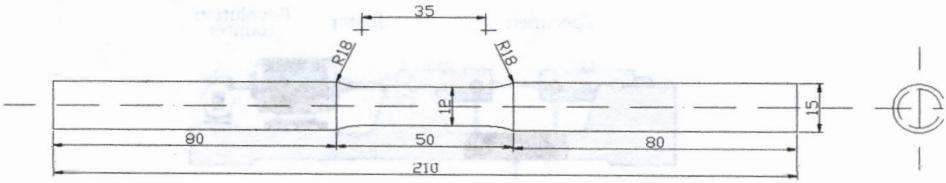
Material baja karbon AISI 1045 dibentuk sesuai standar masing-masing pengujian. Spesimen pengujian tarik dibentuk sesuai standar JIS 2201 No 10 dan spesimen uji lelah dibentuk sesuai dengan standar yang terdapat dalam *Operation Manual For HT-8120 Rotary Bending Fatigue Testing Machine,* Shimaden Co.Ltd.

Spesimen Uji Tarik




*Gambar 3.2 Spesimen uji tarik (JIS 2210 No 10) [19].*

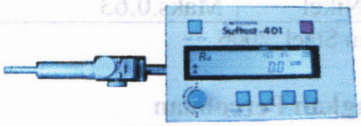
Spesimen Uji Lelah




*Gambar 3.3 Spesimen uji lelah [15].*

### 3.2.2.2 Pengukuran Kekasaran Permukaan Spesimen Uji Lelah

Spesimen uji lentur putar ini memiliki tingkat kekasaran permukaan medium (Rz = 10-13μm), hasil penggerindaan sampai grid 500. Pengukuran angka kekasaran permukaan medium menggunakan *Surface roughness tester* MITUTOYO Surface-401.



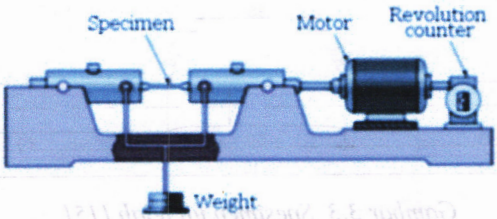
*Gambar 3.4 Surface roughness tester MITUTOYO [18].*

### 3.2.2.3 Uji Tarik

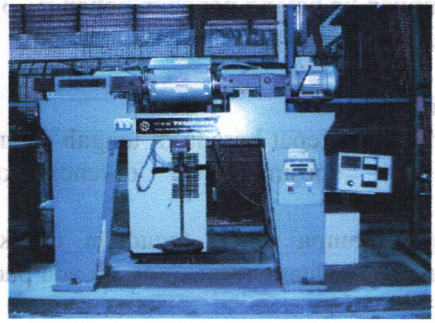
Uji tarik dilakukan dengan mesin uji tarik universal *Woolpert Machine* tipe 30 TUZ 750 berkapasitas beban 300 kN di laboratorium Metalurgi Teknik Mesin ITS. Pengujian tarik bertujuan untuk menentukan besar tegangan tarik dari spesimen uji lelah dan digunakan sebagai acuan dalam pembebanan pada pengujian lentur putar.

### 3.2.2.4 Uji Lentur Putar

Pengujian dilakukan dengan pembebanan secara berurutan dari tegangan terbesar sampai tegangan yang paling kecil yaitu 668.232 MPa (0.62$\sigma_u$), 556.86 MPa (0.52$\sigma_u$), 515.86 MPa (0.48$\sigma_u$), 455.46 MPa (0.42$\sigma_u$), dan 389.80 MPa (0.36$\sigma_u$) pada mesin uji lelah. Berikut ini skema alat yang digunakan untuk uji lelah.




*Gambar 3.5 Skema Alat Uji Lentur Putar [18].*



*Gambar 3.6 Alat Uji Lentur Putar HT-8120 [18].*

**Persiapan Spesimen Uji Lentur Putar**

- Spesimen uji berdiameter 15 mm dan panjang 210 mm disiapkan sebanyak keperluan pengujian.
- Spesimen uji dibubut sesuai standar (gambar 3.3)
- Sebelum diuji, spesimen dipastikan sudah memiliki tingkat kekasaran permukaan yang diinginkan dan diperiksa kondisi permukaannya.

**Persiapan Alat Uji Lentur Putar**

- Mesin uji lentur putar diperiksa sebelum dijalankan.
- Kondisi air pendingin diperiksa pada kondisi yang diinginkan.
- Melakukan pengecekan semua sambungan ke power.

**Pengaturan Beban**

Tegangan pada pengujian lentur putar dihitung dengan menggunakan persamaan berikut

$$S=\frac{16Wa}{\pi d^3} \quad (3.1)$$

dimana :

W = berat material uji = m x g

m = massa (kg)

g = percepatan gravitasi bumi (9.81 $m/s^2$)

a = jarak dari tumpuan ke batang penahan beban = 385 mm
d = diameter material uji (mm)

**Prosedur Pengujian**

1. Spesimen uji dipasang tepat berada di tengah (diantara ke dua *holder*) kemudian spesimen uji dikencangkan dengan seperangkat kunci inggris.
2. Mesin dihidupkan tanpa diberi tegangan untuk mengecek apakah perputaran holder dengan spesimen uji ada pada satu garis horisontal.
3. Sensor diatur agar berjarak 18 mm, jarak sensor yang terlalu jauh menyebabkan sensor tidak dapat mendeteksi kapan spesimen akan patah.
4. Tegangan diletakkan pada gantungan. Tegangan awal sebesar 668.232 MPa (0.62σu)
5. Tombol *reset* ditekan dan spesimen uji ditutup dengan penutup.
6. Power dihidupkan untuk memulai percobaan.
7. Saat spesimen patah, mula-mula matikan mesin dan baru kemudian penutup mesin dibuka. Pada kenyataannya saat spesimen uji patah, motor akan mati secara otomatis.
8. Angka yang tertera pada *counter* (jumlah siklus) dicatat dan spesimen yang sudah patah dikeluarkan.
9. Langkah 5-8 diulangi dengan tegangan berurutan sebesar 556.86 MPa (0.52σu), 515.86 MPa (0.48σu), 455.46 MPa (0.42σu) dan 389.80 MPa (0.36σu)
10. Jumlah siklus (putaran) pada tegangan tertentu yang bersesuaian dicatat untuk menggambarkan kurva S-N.

**3.2.2.5 Pengamatan Pola Patahan (Fraktografi)**

Pengamatan pola patahan secara makro dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik zeiss pembesaran 10 kali dan dilakukan foto secara digital pada penampang spesimen yang patah. Secara mikroskopis, pengamatan pola patahan dilakukan dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM)

# BAB 4
# DATA HASIL PENGUJIAN

## 4.1 Hasil Uji Tarik

*Tabel 4.1 Tabel Hasil Uji Tarik*

| Data | Spesimen 1 | Spesimen 2 | Spesimen 3 |
|---|---|---|---|
| **Sebelum percobaan** | | | |
| Standar pengujian | JIS Z 2241 | | |
| Standar spesimen | JIS Z 2201 no 10 | | |
| Gauge length awal, Lo (mm) | 50.3 | 49.9 | 49.95 |
| Diameter awal, Do (mm) | 12.45 | 12.4 | 12.33 |
| Luas spesimen awal, Ao ($mm^2$) | 121.676 | 120.7 | 119.34 |
| **Saat percobaan** | | | |
| Beban lumer, Py (kN) | 88 | 86.5 | 86 |
| Beban maksimum, Pu (kN) | 131.5 | 130.5 | 128.5 |
| **Sesudah percobaan** | | | |
| Gauge length akhir, Li (mm) | 61.4 | 61.9 | 61.6 |
| Diameter akhir, Di (mm) | 8.74 | 9.00 | 8.65 |
| Luas spesimen akhir, Ai ($mm^2$) | 60.1 | 63.59 | 58.73 |
| Yield strength, $\sigma_y$ (MPa) | 723.232 | 716.652 | 720.630 |
| Tegangan maksimum, $\sigma_u$ (MPa) | 1080.739 | 1081.193 | 1076.775 |
| Elongation, (%) | 22.06 | 24.048 | 23.32 |

Dari tabel 4.1 didapatkan besarnya tegangan maksimum rata-rata adalah 1079.562 MPa dan besarnya tegangan yield rata-rata adalah 720.171 Mpa.

## 4.2 Hasil Uji Lentur Putar

Data uji kelelahan didapatkan melalui pengujian lentur putar dengan pemberian tegangan pada mesin uji lentur putar mulai dari tegangan paling besar sampai tegangan paling kecil (lampiran A). Terdapat 3 spesimen yang diuji pada setiap tingkat tegangan. Besar tegangan pada setiap iterasi percobaan masih menunjukkan nilai dalam batas toleransi walaupun secara nominal besarnya berbeda (Tabel 4.2). Berikut ini merupakan tabel yang menunjukkan data semua spesimen yang telah di uji lentur putar :

## Hasil Eksperimen Uji Lentur Putar

Tabel 4.1 Hasil pengujian lentur putar
Temperatur : 30°C = 86°F

| No. | Beban (kg) | No. Pengujian | Diameter (mm) | Tegangan Uji Lentur Putar (MPa) | Umur lelah (siklus) | Jarak retak/ patah dari kiri material uji | Keterangan |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1. | 40 kg | KG500-2a | 12 | 445.488 | 1246699 | - | Tidak patah dan tidak retak |
| | | KG500-2b | 12.1 | 424.534 | 1237976 | - | Tidak patah dan tidak retak |
| | | KG500-2c | 11.7 | 480.642 | **1114406*** | 7.7 | **Patah** |
| 2. | 45 kg | KG500-3a | 11.9 | 513.915 | **292004** | 6.4 | **Patah** |
| | | KG500-3b | 11.9 | 513.915 | 320402* | 5.9 | Terdapat satu retakan. Panjang retakan = 20.3 mm. Mesin diberhentikan. |
| | | KG500-3c | 11.9 | 513.915 | **300455** | 17.2 | **Patah** |
| 3. | 50 kg | KG500-4a | 11.9 | 571.017 | 240918* | 42.5 | Terdapat satu retakan. Panjang retakan = 18.8 mm. Mesin berhenti. |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | KG500-4b | 12 | 556.860 | 225072* | 8 | Terdapat satu retakan. Panjang retakan = 20 mm. Mesin berhenti. |
| | | KG500-4c | 12 | 556.860 | 298380* | 5.06 | Terdapat satu retakan. Panjang retakan = 24.8 mm. Mesin berhenti. |
| 4. | 60 kg | KG500-5a | 11.9 | 685.220 | 1220* | - | Mesin berhenti karena material mengalami lendutan yang besar. Tidak patah dan tidak retak. |
| | | KG500-5b | 11.9 | 685.220 | 1509* | - | Mesin berhenti karena material mengalami lendutan yang besar. Tidak patah dan tidak retak. |
| | | KG500-5c | 12 | 668.232 | 1954* | - | Mesin berhenti karena material mengalami lendutan yang besar. Tidak patah dan tidak retak. |

Temperatur : 150°C = 302°F

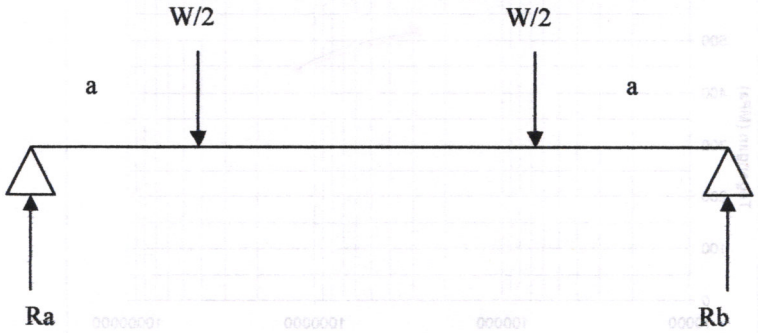
| No. | Beban (kg) | No. Pengujian | Diameter (mm) | Tegangan Uji Lentur Putar (MPa) | Umur lelah (siklus) | Jarak retak/ patah dari kiri material uji | Keterangan |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1. | 40 kg | KG500-2a | 11.9 | 480.642 | **390770*** | 3.6 | Spesimen patah. Terdapat 2 goresan pada permukaan spesimen sebelum di uji lentur |
| | | KG500-2b | 12 | 445.03 | 996782 | - | Tidak patah dan tidak retak, mesin berhenti sendiri |
| | | KG500-2c | 11.9 | 456.4 | 1086455 | - | Tidak Patah dan tidak retak, mesin berhenti sendiri. |
| 2 | 45 kg | KG500-3a | 11.8 | 526.6 | 200311* | 48.5 | Terdapat satu retakan, sepanjang 17 mm, tidak patah, mesin berhenti sendiri |
| | | KG500-3b | 11.9 | 513.4 | **246696** | 4.4 | **Patah** |
| | | KG500-3c | 11.9 | 513.4 | **261517** | 49.8 | **Patah** |
| 3. | 50 kg | KG500-4a | 11.9 | 570.4 | 62992* | | Tidak retak dan tidak |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | patah, spesimen berwarna gosong di tengah, mesin berhenti sendiri |
| | | KG500-4b | 11.9 | 570.4 | 51060* | 3.6 | Terdapat satu retakan melingkar. Panjang retakan = 36 mm. spesimen berwarna gosong di bagian tengah, mesin berhenti sendiri |
| | | KG500-4c | 11.9 | 570.4 | 60248* | 6.5 | Terdapat satu retakan melingkar. Panjang retakan = 26 mm. Spesimen berwarna gosong di bagian tengah, mesin berhenti sendiri |
| 4. | 60 kg | KG500-5a | 12 | 667.6 | 722* | - | Mesin berhenti karena material mengalami lendutan yang besar. Tidak patah dan tidak retak. |
| | | KG500-5b | 11.9 | 684.5 | 949* | - | Mesin berhenti karena material mengalami |

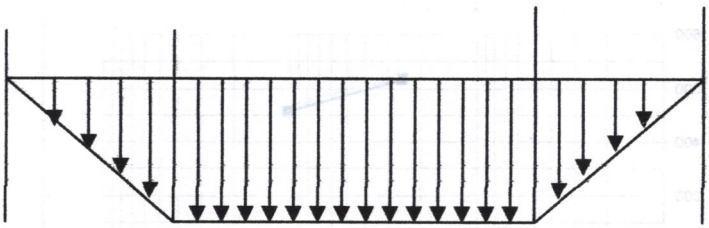
| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | lendutan yang besar. Tidak patah dan tidak retak. |

Keterangan : * = data tidak valid

Diagram bidang momen dan distribusi gaya pada pembebanan lentur putar dapat dilihat pada gambar 4.1 dibawah ini. Dari gambar 4.1 memperlihatkan bahwa konsentrasi tegangan pada spesimen uji fatik adalah merata. Pada material uji tidak *terdapat konsentrasi tegangan yang terpusat sehingga daerah* patah atau retak bisa terjadi di sepanjang material uji.



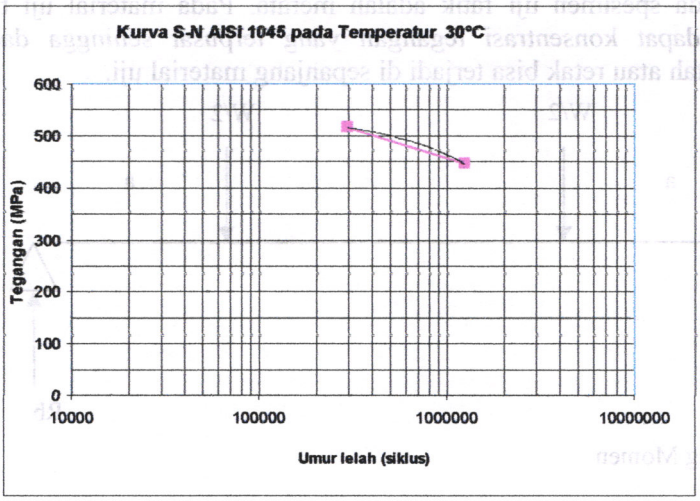

Bidang Momen



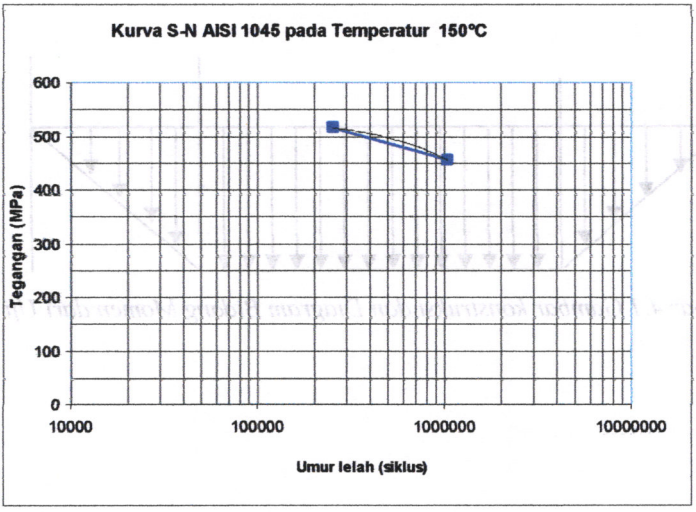
*Gambar 4.1 Gambar konstruksi dan Diagram Bidang Momen dari Uji*

## 4.3 Kurva S-N Hasil Eksperimen Uji Lelah

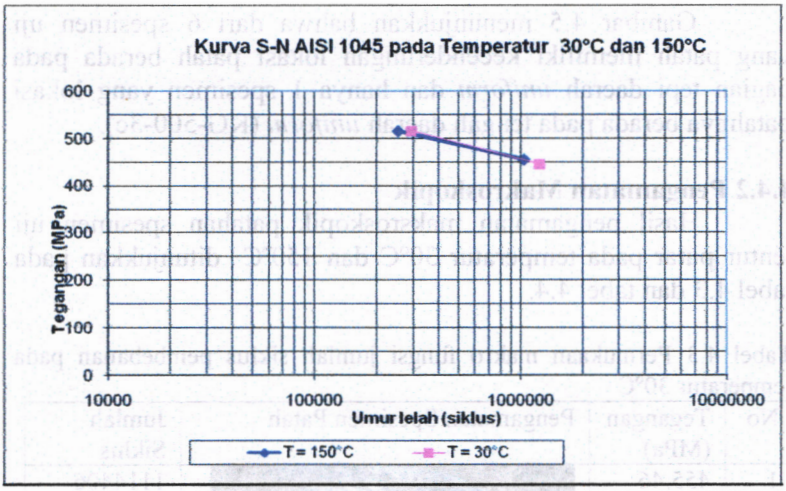
Data uji lelah yang telah didapat dari pengujian lentur putar diubah kedalam bentuk kurva S-N, sebagai berikut :




*Gambar 4.2 Kurva S-N Hasil Eksperimen Uji lelah pada temperatur 30°C*




*Gambar 4.3 Kurva S-N Hasil Eksperimen Uji lelah pada temperatur 150°C*



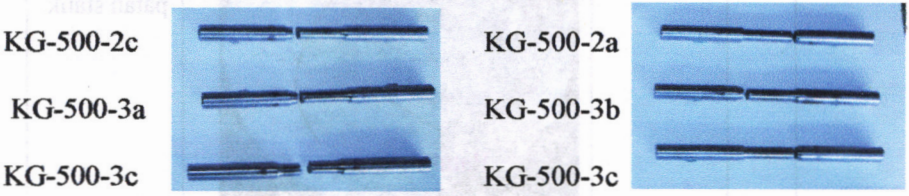

*Gambar 4.4 Kurva S-N Hasil Eksperimen Uji Lelah pada temperatur 30°C dan 150°C*

## 4.4 Fraktografi

Pada penelitian ini, fraktografi dilakukan secara makroskopik dan mikroskopik. Fraktografi makroskopik yaitu melalui pengamatan visual dan menggunakan mikroskop optik sedangkan fraktografi mikroskopik dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM).

### 4.4.1 Pengamatan Visual

Letak patahan spesimen uji lentur putar pada temperatur 30°C dan Temperatur 150°C ditunjukan pada gambar 4.5.



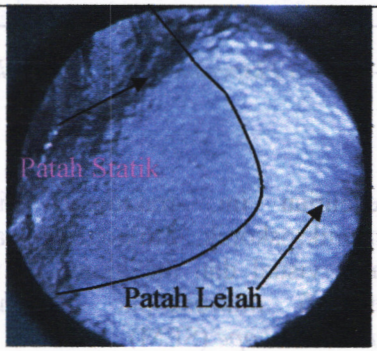
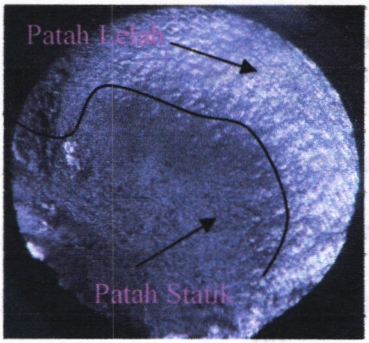

*Gambar 4.5 Letak Patahan Spesimen pada (a). T= 30°C dan (b). T = 150°C*

Gambar 4.5 menunjukkan bahwa dari 6 spesimen uji yang patah memiliki kecenderungan lokasi patah berada pada bagian tepi daerah *uniform* dan hanya 1 spesimen yang lokasi patahnya berada pada tengah daerah *uniform* (KG-500-3c).

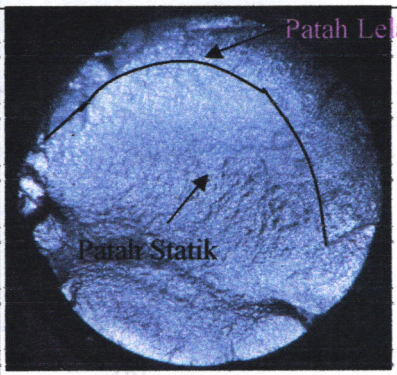
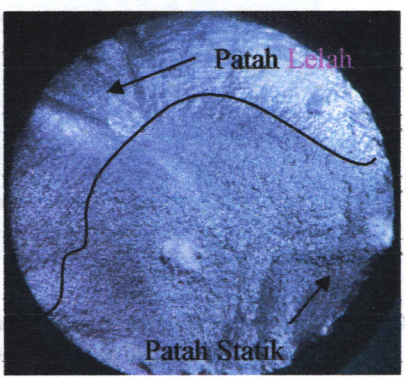
### 4.4.2 Pengamatan Makroskopik

Hasil pengamatan maksroskopik patahan spesimen uji lentur putar pada temperatur 30°C dan 150°C ditunjukkan pada tabel 4.3 dan tabel 4.4.

Tabel 4.3 Permukaan makro fungsi jumlah siklus pembebanan pada temperatur 30°C

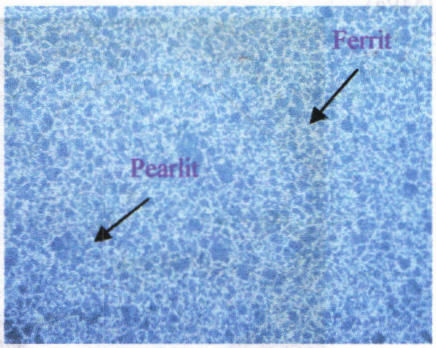
| No | Tegangan (MPa) | Pengamatan Spesimen Patah | Jumlah Siklus |
|---|---|---|---|
| 1 | 455.46 (0.42 σu) |   | 1114406<br>53.4% luas daerah patah statik |
| 2 | 515.86 (0.48 σu) |   | 296230<br>57.4% luas daerah patah statik |

Tabel 4.4 Permukaan Makro fungsi jumlah siklus pembebanan pada temperatur 150°C

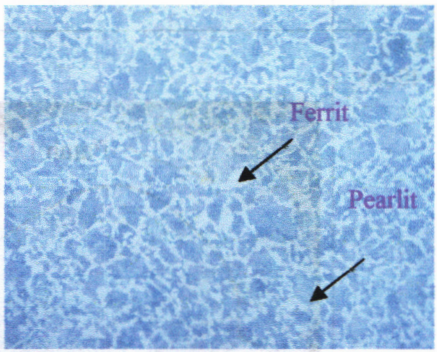
| No | Tegangan (MPa) | Pengamatan Spesimen Patah | Jumlah Siklus |
|---|---|---|---|
| 1 | 455.46 (0.42σu) |   | 390770<br><br>56.8% luas daerah patah statik |
| 2 | 515.86 (0.48σu) |   | 254107<br><br>62.7% luas daerah patah statik |

### 4.4.3 Pengamatan Mikroskopis Spesimen uji lelah (Metalografi dan SEM)

#### 4.4.3.1 Pengamatan Metalografi Material Spesimen Uji Lelah (Baja AISI 1045)




(a).



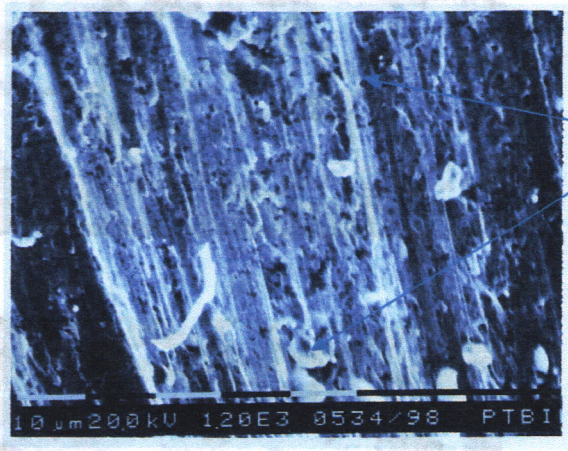

(b).

*Gambar 4.6 Metalografi Material Spesimen uji Fatik dengan perbesaran : (a). 200 x dan (b). 400 x*

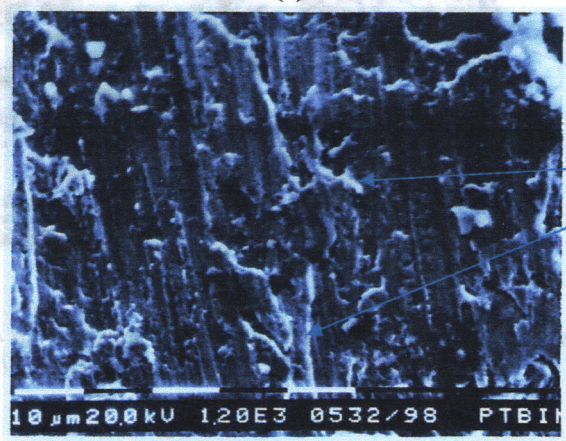
Melalui pengamatan metalografi spesimen uji lelah (gambar 4.6) didapatkan penjelasan bahwa material uji lelah pada penelitian ini memiliki komposisi yang homogen, yaitu struktur mikro tersusun atas fase ferit dan perlit yang tersebar merata. Hal ini mendukung pernyataan asumsi untuk ekperimen uji lelah ini.

### 4.4.3.2 Pengamatan Spesimen Uji Lelah dengan SEM

Berikut ini merupakan hasil pengamatan mikro permukaan patah lelah dengan SEM pada temperatur 30°C (gambar 4.7) dan 150°C (gambar 4.8). Pengambilan gambar uji SEM dilakukan pada daerah patah lelah pada masing-masing permukaan patah lelah.

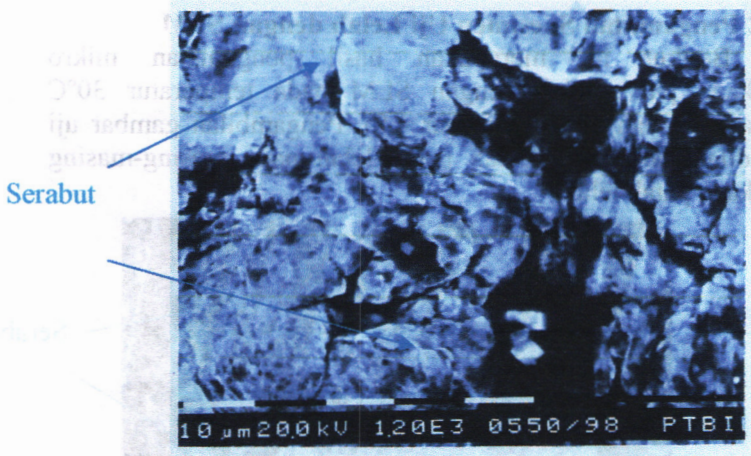



(a).

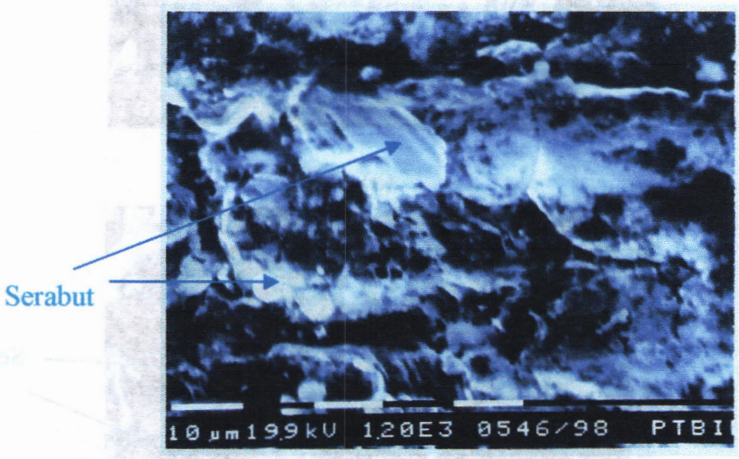



(b).

*Gambar 4.7 Pengamatan permukaan patahan spesimen uji lelah dengan SEM, Temperatur 30°C pada tegangan (a). 0.42σu , (b). 0.48σu*




(a).

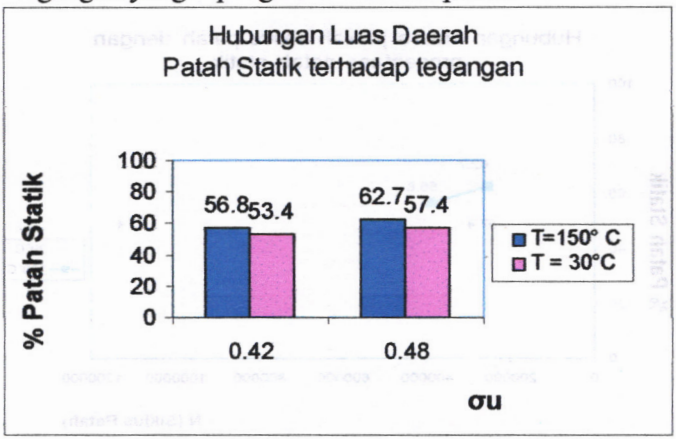



(b).

*Gambar 4.8 Pengamatan permukaan patahan spesimen uji lelah dengan SEM, Temperatur 150°C pada tegangan (a). 0.42σu , (b). 0.48σu*

## 4.5 Perbandingan Prosentase Luas Daerah Patah Statik terhadap tegangan pada spesimen T= 30°C dan T= 150°C

Gambar 4.9 merupakan grafik yang menyatakan hubungan antara luas daerah patah statik spesimen uji lentur putar dengan *besar tegangan yang dipengaruhi oleh temperatur.*




*Gambar 4.9 Hubungan Luas Daerah Patah Statik terhadap tegangan*

## 4.6 Hubungan antara prosentase Luas Daerah Patah Statik terhadap jumlah siklus patah (Umur Lelah) pada temperatur T= 30°C dan T= 150°C

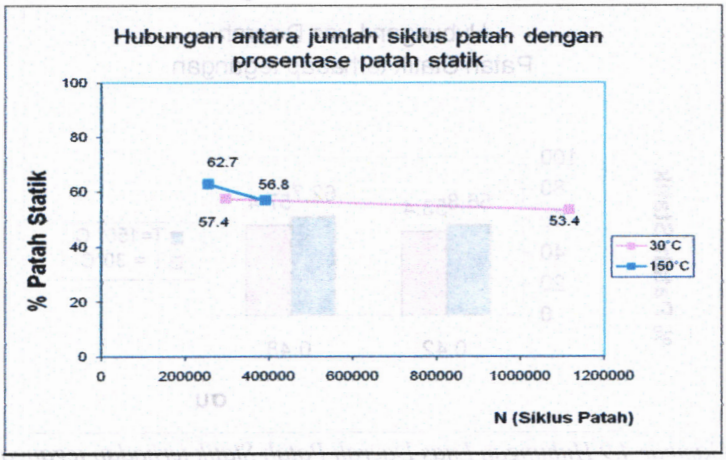
Tabel berikut ini menunjukkan hubungan antara prosentase luas daerah patah statik dengan umur lelahnya (tabel 4.5)

Tabel 4.5 Hubungan antara Prosentase Luas Daerah Patah Statik dengan Umur Lelah dan tegangan

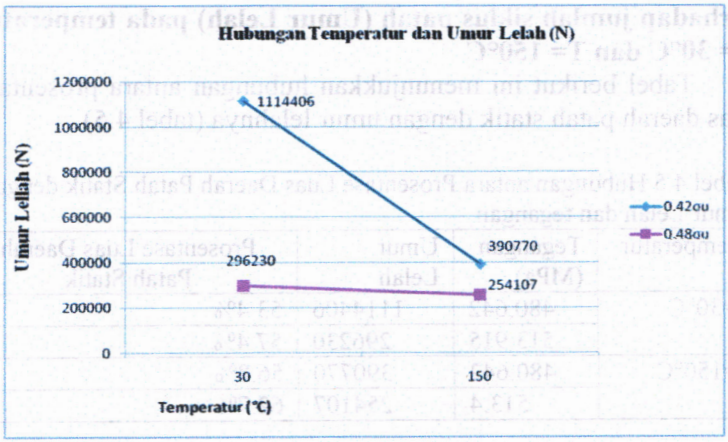
| Temperatur | Tegangan (MPa) | Umur Lelah | Prosentase Luas Daerah Patah Statik |
|---|---|---|---|
| T=30°C | 480.642 | 1114406 | 53.4% |
| | 513.915 | 296230 | 57.4% |
| T=150°C | 480.642 | 390770 | 56.8% |
| | 513.4 | 254107 | 62.7% |

Gambar 4.10 merupakan grafik yang menyatakan hubungan antara prosentase luas daerah patah statik dengan umur

lelah, dimana semakin panjang umur lelah maka luasan daerah patah statik semakin kecil. Gambar 4.11 menunjukkan hubungan antara temperatur dengan umur lelah, dimana umur lelah temperatur semakin tinggi menyebabkan umur lelah semakin pendek.




*Gambar 4.10 Hubungan Luas Daerah Patah Statik terhadap jumlah siklus patah (Umur lelah)*




*Gambar 4.11 Hubungan antara temperatur dengan Umur Lelah*

# BAB 5
# ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

## 5.1 Analisa Data

### *5.1. 1 Validasi Data Uji Lentur Putar*

Berdasarkan persamaan Marine (lampiran C) didapatkan nilai batas lelah baja AISI 1045 pada temperatur kamar adalah 398.03 MPa dan batas lelah pada temperatur 150°C adalah 338.743 MPa. Kedua nilai batas lelah tersebut adalah nilai berdasarkan teoritis yang selanjutnya akan dijadikan pembanding terhadap batas lelah hasil eksperimen.

Berdasarkan hasil eksperimen uji lentur putar didapatkan beberapa data uji lelah (tabel 4.2). Sebelum dilakukan pembahasan maka diperlukan validasi data hasil eksperimen dengan cara menganalisa satu persatu kondisi spesimen uji dari sebelum spesimen di uji lentur putar hingga mengalami patah lelah. Dari analisa tersebut akan didapatkan beberapa data eksperimen yang valid, yang dapat dijadikan acuan dalam pembahasan. Selanjutnya akan diadakan komparasi nilai batas lelah dari hasil eksperimen dengan nilai batas lelah berdasarkan perhitungan teoritis (Persamaan Marine).

Berdasarkan data hasil eksperimen (tabel 4.2) didapatkan suatu kecenderungan siklus patah yang hampir sama besar (pada tegangan yang sama) antara temperatur 30°C dan 150°C. Pada tiap besar tegangan diuji 3 buah spesimen uji. Pada temperatur 30°C, dengan tegangan 455.46 MPa (0.42 $\sigma_u$) telah menunjukkan daerah batas lelah (*fatigue limit)*. Hal itu ditandai dengan tidak patahnya 2 spesimen uji pada siklus diatas $10^6$. Sedangkan 1 spesimen uji pada tegangan ini, yang seharusnya tidak patah menjadi patah disebabkan memiliki diameter yang lebih kecil (11.7 mm). Diameter yang lebih kecil menyebabkan tegangan yang diberikan pada spesimen ini lebih besar dari spesimen lainnyasehingga spesimen akhirnya patah dan data ini tidak valid. Pada tegangan 515.86 MPa (0.48 $\sigma_u$), kondisi temperatur 30°C telah menunjukkan daerah diatas batas lelah (*fatigue limit)*

disebabkan pada siklus kurang dari $10^6$ , spesimen telah patah yaitu pada siklus 292.004 dan 300.455 sedangkan satu spesimen lagi tidak patah tetapi hanya mengalami retak.

Analisa pada temperatur 150°C memiliki kemiripan dengan kondisi temperatur 30°C. Hal itu disebabkan, pada kondisi kedua temperatur tersebut tidak menunjukkan perbedaan yang terlalu signifikan. Pada tegangan 455.46 MPa (0.42 $\sigma_u$), temperatur 150°C, juga telah menunjukkan daerah *fatigue limit*. Hal itu dibuktikan dengan adanya spesimen uji yang tidak patah pada siklus diatas $10^6$ (1.086.455). Sedangkan 1 spesimen lainnya mengalami patah dikarenakan pada kondisi awal (sebelum di uji) memiliki 2 goresan pada permukaannya sehingga terdapat konsentrasi tegangan yang memudahkan terjadinya patah dan data ini tidak valid. Pada tegangan 515.86 MPa (0.48 $\sigma_u$), pada temperatur 150°C juga telah menunjukkan daerah diatas *fatigue limit* disebabkan spesimen patah pada siklus kurang dari $10^6$ yaitu pada siklus 246.696 dan 261.517 sedangkan satu spesimen lagi tidak patah tetapi hanya mengalami retak.

Dari hasil validasi data uji lelah didapatkan umur lelah rata-rata pada tingkat tegangan 515.86 MPa (0.48 $\sigma_u$) sebagai berikut :

Tabel 5.1. Perbandingan Umur Lelah Spesimen Uji lentur putar

| Tegangan (MPa) | T = 30°C | T = 150°C |
|---|---|---|
| | Umur Lelah rata-rata | Umur Lelah rata-rata |
| 515.86 (0.48 $\sigma_u$) | 296230 | 254107 |

Pada tegangan diatas 515.86 MPa yaitu 556.86 MPa (0.52 $\sigma_u$) dan 668.232 Mpa (0.62 $\sigma_u$), menyebabkan mesin berhenti sebelum spesimen mengalami patah. Spesimen uji hanya mengalami keretakan dan pada temperatur 150°C, spesimen selain retak juga mengalami perubahan warna, menjadi gosong dibagian tengahnya.

### 5.1. 2 Analisa Fraktografi Makro dan Mikro

#### 5.1. 2.1 Analisa Fraktografi Makro

Berdasarkan gambar 4.5 diketahui bahwa letak patah spesimen uji pada kedua temperatur menunjukkan kecenderungan patah di tepi daerah *uniform* (permukaan yang mendekati perubahan dimensi penampang). Pada spesimen uji yang tidak patah tapi hanya mengalami retak juga menunjukkan kecenderungan letak retak yang sama yaitu di tepi daerah uniform. Selain itu, terdapat satu spesimen (KG 500 3C), patah ditengah bagian *uniform*. Dari data tersebut diatas menunjukkan bahwa didaerah *uniform* patah bisa terjadi dimana saja.

Fraktografi makro yang ditunjukkan tabel 4.3 dan 4.4 memberikan informasi bahwa pada setiap permukaan patah lelah selalu mempunyai dua daerah patah yaitu daerah patah lelah dan patah statik. Selain itu, fraktografi makro juga menunjukkan perbedaan luasan antara kedua daerah tersebut berdasarkan pengaruh beban dan temperatur. Pada temperatur 150°C, permukaan patah statik menunjukkan adanya serabut/*fibrous* (lihat gambar 4.5).

#### 5.1.2.2 Analisa Fraktografi Mikro

Fraktografi mikro diambil menggunakan *Scanning Electron Microsope* (SEM), ditunjukkan oleh gambar 4.7-4.8. Dari gambar tersebut, memberikan informasi bahwa tidak dapat dideteksinya striasi maupun *chevron*. Terdapat perbedaan tampilan hasil SEM antara temperatur 30°C dan 150°C. Perbedaan tersebut meliputi bentuk dan ukuran serabut (daerah ulet). Pada temperatur 30°C, menunjukkan garis-garis hasil pembebanan yang masih terlihat jelas dan bentuk daerah serabut (setelah mengalami deformasi) memiliki ukuran lebih kecil. Sedangkan pada temperatur 150°C, garis-garis hasil pembebanan tidak tampak dan memiliki ukuran daerah berserabut yang lebih besar akibat deformasi berlebihan.

## 5.2 Pembahasan

### 5.2.1 Pengaruh Temperatur terhadap Batas Lelah (*Fatigue Limit/Endurance Limit)*

Pengaruh temperatur operasi terhadap batas lelah baja poros AISI 1045 dapat diketahui dengan membandingkan nilai batas lelah pada temperatur 30°C dan temperatur 150°C. Berdasarkan hasil validasi data uji lelah diketahui bahwa batas lelah pada ke dua temperatur tersebut berada pada range tegangan pengujian yang sama besar yaitu pada tegangan 445.46 Mpa (0.42 $\sigma_u$). Sebenarnya terdapat perbedaan nilai batas lelah pada kedua temperatur tersebut, akan tetapi perbedaannya tidak signifikan, sehingga nilai batas lelah berada pada *range* yang sama.

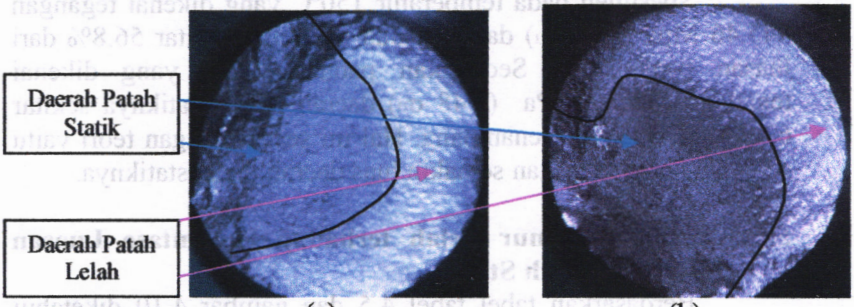
Sedangkan nilai batas lelah yang didapatkan secara teoritis yaitu sebesar 398.03 MPa pada temperatur 30°C dan 338.743 MPa pada temperatur 150°C. Nilai batas lelah teoritis pada temperatur 30°C lebih tinggi daripada pada temperatur 150°C. Hal itu sesuai dengan teori yang menyatakan bahwa batas lelah akan turun seiring dengan kenaikan temperatur disebabkan deformasi lebih mudah terjadi pada spesimen di atas temperatur kamar.

Batas lelah hasil pengujian lebih tinggi dibandingkan dengan hasil perhitungan teoritis yaitu memiliki selisih sekitar 58 Mpa. Selisih tersebut masih dianggap wajar. Perbedaan nilai batas lelah (*fatigue limit)* itu disebabkan pada uji lentur putar ini menggunakan spesimen uji yang terbatas sehingga nilai batas lelah yang didapatkan juga terbatas. Akan tetapi nilai batas lelah hasil eksperimen sudah bisa dikatakan mewakili nilai batas limit spesimen, mengingat bahwa nilai batas lelah itu bukanlah suatu nilai yang mutlak tetapi berupa daerah jangkauan (*range*). Sehingga pada spesimen yang sejenis pun bisa dimungkinkan memiliki nilai batas lelah yang berbeda-beda.

### 5.2.2 Pengaruh Tegangan terhadap Luasan Daerah Patah Statik

Pada eksperimen ini, data permukaan patah pada tegangan 445.46 Mpa (0.42 $\sigma_u$) dapat digunakan sebagai pembanding permukaan patah lelah pada tegangan 515.86 MPa (0.48 $\sigma_u$). Ciri khusus yang terdapat pada pengujian lentur putar ini yaitu adanya daerah patah statik dan patah lelah. Daerah patah lelah merupakan daerah perambatan retak. Daerah patah lelah ini lebih halus dibandingkan daerah patah statik. Patah lelah ini terlihat mengkilap.

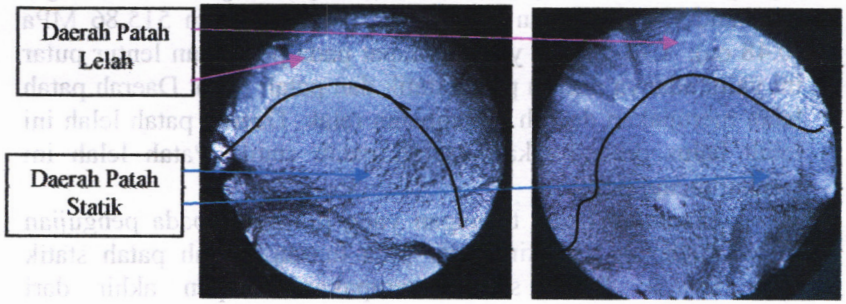
Semakin besar tegangan yang diberikan pada pengujian lentur putar ini semakin besar pula luasan daerah patah statik yang terjadi. Patah statik merupakan tahapan akhir dari mekanisme perambatan retak. Patah statik ini disebabkan oleh tegangan yang bekerja pada penampang tersisa akan mencapai kekuatan tarik material kemudian mengakibatkan material patah menjadi dua. Bidang patahan pada patah statik ini mirip dengan uji impak yaitu berserabut dan berwarna kelabu.




*Gambar 5.1 Perbedaan penampang baja AISI 1045 kekasaran permukaan medium pada temperatur 30°C dengan tegangan (a) 445.46 Mpa (0.42 σu) dan (b). 515.86 MPa (0.48 σu)*

Pada spesimen yang dikenai tegangan 445.46 Mpa (0.42 $\sigma_u$) daerah patah statiknya sekitar 53.4 % dari luasan penampang. Sedangkan pada spesimen yang dikenai tegangan

515.86 MPa (0.48 $\sigma_u$) daerah patah statiknya sekitar 57.4% dari luasan penampang. Hal ini sesuai dengan teori yaitu semakin besar tegangan semakin luas daerah patah statiknya.




(a). (b).

*Gambar 5.2 Perbedaan penampang baja AISI 1045 kekasaran permukaan medium pada temperatur 150°C dengan tegangan (a) ) 445.46 Mpa (0.42 σu) dan (b) 515.86 MPa (0.48 σu)*

Spesimen pada temperatur 150°C yang dikenai tegangan 445.46 Mpa (0.42 $\sigma_u$) daerah patah statiknya sekitar 56.8% dari luasan penampang. Sedangkan pada material yang dikenai tegangan 515.86 MPa (0.48 $\sigma_u$) daerah patah statiknya sekitar 62.7% dari luasan penampang. Hal ini sesuai dengan teori yaitu semakin besar tegangan semakin luas daerah patah statiknya.

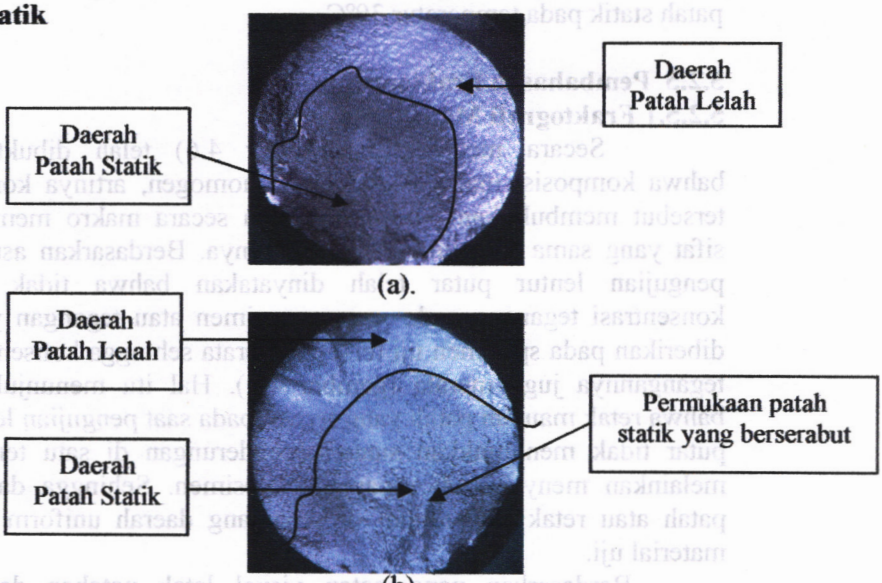
### 5.2.3 Pengaruh Umur Lelah terhadap Prosentase Luasan Daerah Patah Statik

Berdasarkan tabel tabel 4.5 dan gambar 4.10 diketahui hubungan antara umur lelah dengan prosentase luas daerah patah statik. Pada temperatur 30°C, spesimen yang patah dengan siklus sebesar 1114406 memiliki luasan daerah patah statik sebesar 53.4% dan spesimen patah pada siklus lelah rata-rata sebesar 296230 memiliki prosentase luasan daerah patah statik sebesar 57.4%. Jika dibandingkan kondisi kedua spesimen patah tersebut maka didapatkan suatu hubungan bahwa semakin panjang umur lelah maka semakin kecil prosentase luasan daerah patah statik.

Panjangnya umur lelah mengindikasikan siklus pembentukan daerah patah lelah semakin besar sehingga daerah patah lelah yang dihasilkanpun juga lebih besar daripada daerah patah statik. Sebaliknya, jika umur lelah lebih pendek maka luasan daerah patah statik menjadi lebih besar daripada luasan daerah patah lelah. Fenomena di atas juga dialami oleh spesimen patah pada temperatur 150°C.

Pada temperatur 150°C, spesimen yang patah pada siklus 390770 memiliki prosentase luasan daerah patah statik sebesar 56.8%. Luasan tersebut lebih kecil jika dibandingkan pada spesimen patah yang memiliki umur lelah lebih pendek yaitu 254107. Spesimen yang memiliki umur lelah lebih pendek (254107) memiliki luasan daerah yang lebih besar yaitu 62.7%.

### 5.2.4 Pengaruh Temperatur terhadap Luasan Daerah Patah Statik




*Gambar 5.3 Perbedaan penampang baja AISI 1045 pada tegangan 515.86 MPa (0.48 σu) (a) Temperatur 30°C dan (b) Temperatur 150°C*

Perbandingan luas daerah patah statik pada kedua temperatur dapat dilihat pada gambar 4.9. Gambar 4.9 menunjukkan grafik perbedaan luasan daerah patah statik antara temperatur 30°C dan temperatur 150°C. Pada tegangan yang sama yaitu 515.86 MPa (0.48 $\sigma_u$), spesimen pada temperatur 150°C memiliki persentase luasan daerah statik yang lebih besar daripada spesimen pada temperatur 30°C walaupun perbedaan tersebut tidak signifikan yaitu sebesar 62.7% dari luasan penampang. Sedangkan luas daerah patah statik pada temperatur 30°C yaitu 57.4%. Prosentase daerah patah statik yang dipengaruhi temperatur mengindikasikan juga seberapa besar umur lelahnya. Berdasarkan gambar 4.11, semakin tinggi umur lelah maka daerah patah statik semakin kecil. Pada temperatur 150°C, memiliki umur lelah yang lebih pendek sehingga daerah patah statik juga semakin lebih besar daripada luasan daerah patah statik pada temperatur 30°C.

### 5.2.5 Pembahasan Fraktografi

#### 5.2.5.1 Fraktografi Makro

Secara metalografi (gambar 4.6) telah dibuktikan bahwa komposisi material uji adalah homogen, artinya kondisi tersebut membuktikan bahwa spesimen secara makro memiliki sifat yang sama di seluruh penampangnya. Berdasarkan asumsi pengujian lentur putar telah dinyatakan bahwa tidak ada konsentrasi tegangan pada semua spesimen atau tegangan yang diberikan pada spesimen uji tersebut merata sehingga konsentrasi tegangannya juga merata (gambar 4.1). Hal itu menunjukkan bahwa retak maupun patah yang terjadi pada saat pengujian lentur putar tidak menunjukkan suatu kecenderungan di satu tempat melainkan menyebar di sepanjang spesimen. Sehingga daerah patah atau retak bisa terjadi di sepanjang daerah uniform dari material uji.

Berdasarkan pengamatan visual letak patahan dari 6 spesimen yang patah, maka didapatkan 5 dari spesimen tersebut mengalami patah pada daerah di tepi daerah *uniform* dan satu

spesimen patah ditengah, dapat dilihat pada gambar 4.5. Hal ini mengindikasikan adanya konsentrasi tegangan ataupun residual stress terbesar yang terjadi akibat proses pengerjakan spesimen uji fatik. Pada daerah tepi tersebut merupakan daerah transisi dari dimensi ketebalan tinggi menuju ke lebih kecil, sehingga berpotensi menyimpan residual stress yang lebih besar dari daerah lainnya.

Fraktografi makro juga dapat diamati dari bentuk patahan uji lentur putar pada tabel 4.3 dan 4.4. Tampak jelas sekali perbedaan permukaan antara patahan lelah dan patahan statik. *Pada permukaan patahan lelah menunjukkan suatu kontur garis*-garis yang bermula pada suatu titik awal retak menuju pembentukan permukaan daerah patah statik. Pada daerah patah statik, tampak adanya dominasi kontur berbentuk butiran. Untuk kontur permukaan patahan statik pada spesimen yang diuji pada temperatur 150°C selain menunjukkan kontur berbentuk butiran juga ada bentuk serabut-serabutnya/*fibrous*. Kontur berbentuk serabut disebabkan oleh pengaruh temperatur. Temperatur menyebabkan meningkatnya keuletan spesimen sehingga ketika mengalami proses patah statik maka kontur permukaannya menghasilkan serabut.

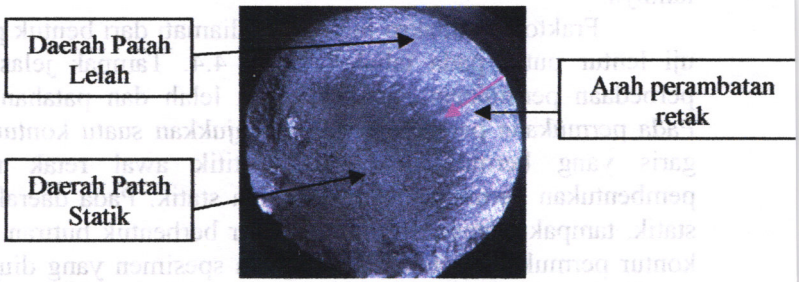
### 5.2.5.2 Fraktografi Mikro

Fraktografi mikro pada patah lelah seperti adanya striasi dan *chevron* dapat diamati dengan menggunakan SEM. Pada pemeriksaan SEM semua spesimen uji lelah (pada temperatur 30°C dan 150°C) tidak dapat menunjukkan adanya striasi dengan jelas. Hal itu disebabkan faktor jenis pembebanan pada uji lelah ini yaitu tegangan yang digunakan adalah jenis lentur putar. Sehingga setiap permukaan spesimen telah mengalami tegangan tekan dan tarik bergantian. Hal itu menyebabkan, striasi yang terbentuk pada titik di permukaan akibat terkena tegangan tarik, akan tertutup oleh tegangan tekan sehingga pada pengujian lelah dengan beban siklik seringkali sulit ditemui adanya striasi dengan jelas.



MILIK PERPUSTAKAAN ITS

Pengamatan daerah *crack initiation* juga sulit diamati dengan SEM. Retak bergerak menuju daerah patah statik dengan kecepatan yang semakin besar seiring dengan bertambahnya siklus (gambar . Hingga mendekati patah statik, maka kecepatan mencapai maksimum, hingga akhirnya penampang patah menjadi dua. :




*Gambar 5.4 Arah perambatan retak lelah menuju daerah patah statik Pada temperatur 150°C*

Pengamatan mikro lainnya menunjukkan bahwa terdapat perbedaan permukaan patahan uji lentur putar antara spesimen pada temperatur 30°C dan 150°C. Pada temperatur 150°C (gambar 4.8), pada tegangan $0.48\sigma_u$ menunjukkan bahwa daerah berserabut mengalami perubahan yaitu bentuk struktur mikro seperti mengalami pemuaian dibandingkan pada suhu kamar. Pemuaian struktur mikro pada temperatur 150°C dapat terjadi disebabkan sifat dari logam yang memuai jika terkena panas diatas temperatur kamar walaupun temperatur tersebut tidak sampai mengubah struktur mikro dari logam.

# BAB 6
# KESIMPULAN DAN SARAN

## 6.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapat dari penelitian ini adalah:

1. Pada temperatur 30°Cdan 150°C didapatkan nilai tegangan batas lelah berada pada kisaran (range) yang sama yaitu 455.46 Mpa (0.42 $\sigma_u$).
2. Dari hasil ekpesimen ini, pada tingkat tegangan yang sama, semakin tinggi temperatur baja AISI 1045 maka umur lelahnya semakin rendah. Pada tingkat tegangan 515.86 MPa (0.48 $\sigma_u$), temperatur 30°C memiliki umur lelah rata-rata 296230 siklus dan pada temperatur 150°C memiliki umur lelah rata-rata sebesar 254107 siklus.
3. Dari hasil ekpesimen ini didapatkan bahwa pada tingkat tegangan yang sama, semakin tinggi temperatur maka semakin besar luasan daerah patah statiknya. Pada tegangan 515.86 MPa (0.48$\sigma_u$), temperatur 150°C memiliki prosentase luasan daerah patah statik 62.7% dan prosentase luasan daerah patah statik pada temperatur 30°C sebesar 57.4%.
4. Dari hasil ekpesimen ini didapatkan hasil bahwa semakin tinggi tingkat tegangan yang diberikan saat pengujian lentur putar maka luasan darah patah statik semakin besar. Pada temperatur 30°C, prosentase luasan daerah patah statik dengan tingkat tegangan 455.46 MPa (0.42$\sigma_u$) sebesar 53.4% dan pada tingkat tegangan 515.86 MPa (0.48$\sigma_u$) sebesar 57.4 %. Pada temperatur 150°C, prosentase luasan daerah patah statik pada tingkat tegangan 455.46 MPa (0.42$\sigma_u$) sebesar 56.8% dan tingkat tegangan 515.86 MPa (0.48$\sigma_u$) sebesar 62.7 %.
5. Dari hasil ekpesimen ini didapatkan bahwa retakan maupun patahan yang terjadi pada saat pengujian lentur putar tidak menunjukkan suatu kecenderungan di satu tempat melainkan menyebar disepanjang poros dikarenakan tidak adanya pemusatan konsentrasi tegangan di sepanjang poros uji.

## 6.2 Saran

Adapun saran yang diperlukan adalah :

1. Penelitian poros yang menerima beban lentur ini masih dapat dikembangkan lebih lanjut dengan memperhatikan pengaruh amplitudo, jenis perlakuan panas atau bahkan pada jenis material yang berbeda.
2. Pengujian sebaiknya dilakukan dengan lebih banyak spesimen uji agar kevalidan data lebih terjaga.
3. Pengaturan beban secara digital akan lebih memudahkan mengetahui tegangan batas lelah suatu material uji.

# DAFTAR PUSTAKA


[1]. ASM Handbook Committe. 1996. **Fatigue and Fracture, Vol. 19**. American Society for Metal.

[2]. ASM Handbook Committe. 2002. **Failure Analysis and Prevention Vol. 11, 9th edition**. American Society for Metal.

[3]. Kallerová, Ing. Petra; Wald, Prof. Ing. František. 2007. **Mechanical Properties Of Steel at Elevated Temperature**. Czech Technical University in Prague.

[4]. ASM Handbook Committe. 2002. **Material Selection Design, Vol. 20**. American Society for Metal.

[5]. Shigley, Joseph E., Mitchell, Larry D., Harahap, Gandhi. 1999. **Perencanaan Teknik Mesin Jilid 1**. Jakarta : Erlangga.

[6]. **Fatigue strength of structural steel elements**, available at www.sv.vt.edu/classes/MSE2094_NoteBook/97ClassProj/anal/kelly/fatigue.html, diakses 19 juli 2009.

[7]. Brown, Thomas H. 2005. **Marks' Calculation For Machine Design**. USA : The McGraw-Hill Companies, Inc.

[8]. Deutschman, Aaron D. **Machine Design Theory and Practice**. Macmullian Publishing Co.

[9]. Kalantary, M.R., Chung, T.E, Faulkner, R.G. 1994. **Mechanism of crack propagation in low cycle fatigue of type 316L stainless steel within the temperature range 20-300 °C.** Institute of Polymer 7k'chnology and Materials Engineering and Mechanical Engineering Department, Loughborough Universi~ of Technology, Loughborough, Leics. LE11 3TU (UK).

[10]. John, Vernon. 1991. **Introduction to engineering Materials**.

[11]. Fatigue Experimental, available at: www.sv.vt.edu/classes/, diakses 19 juli 2009.

[12]. Schunke, Michael. 2006. **Fractography Online Resource and Archive.** University of Southampton, available at www.southampton.com, diakses 19 juli 2009.

[13]. ASM Handbook Committe. 2002. **Fractography, Vol. 12**. American Society for Metal.

[14]. **Crack Propagation Lecture 12.** The university of Jennesse at Martin.

[15]. Hung Ta Instrument. 1998. **Operation Manual For HT-8120 Rotary Bending Fatigue Testing Machine**. Shimaden Co.Ltd.

[16]. Soeharto, Dr. Ir. 1999. **Diktat Kuliah : Mekanika Patahan.** Surabaya : Teknik Mesin FTI – ITS.

[17]. Tira Andalan Steel, PT. 2006. **High Quality Machinery Steel.** Indonesia.

[18]. Surftest 401 series 178 Mitutoyo Catalog.

[19]. JIS kekuatan Tarik.

[20]. Bhaumik, S.K and Rangaraju, R. 2001. **Fatigue Failure of a hollow power transmission shaft**. Material Science Divison, National; Aerospace Laboratories, Bangalpre, India.

[21].**Fatigue**, available at : www.materials_17_01_07\, diakses 19 juli 2009

[22]. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, Volume 5(2)

[23]. Yamaguchi, Koji and Kanazawa, Kenji. 1997. **Crack Propagation in Low-Cycle Fatigue of Type 316 Stainless Steel at Temperatures below 600 °C Observed by Scanning Electron Microscopy.** Fatigue Testing Division, National Research Institute for Metals, Tokyo, Japan.

[24]. *Mechanical testing. 2008.* ***Fatigue Testing*, part 3**.*available* at : www.cmmok.xinwen520.com, diakses 1Agustus 2009.

[25]. H. Courtney, Thomas. 2000. **Mechancial Behaviour of Material.** The McGraw- Hill International editions.

[26]. **Fatigue crack at pressure vessel steel** , available at : http://article.nuclear.or.kr/jknsfile/v27/A04803285536, diakses 1 Agustus 2009.

**HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN**

# LAMPIRAN

# LAMPIRAN A

Tegangan yang diberikan pada pengujian lentur putar dapat dihitung berdasarkan persamaan 3.1, sebagai berikut :

$$S = \frac{16\ W\ a}{\pi\ d^3}$$

Di mana :

W = berat material uji = m x g

m = massa (kg)

g = percepatan gravitasi bumi (9.81 m/s$^2$)

a = *jarak dari tumpuan ke batang penahan beban* = 385 mm

d = diameter material uji (mm)

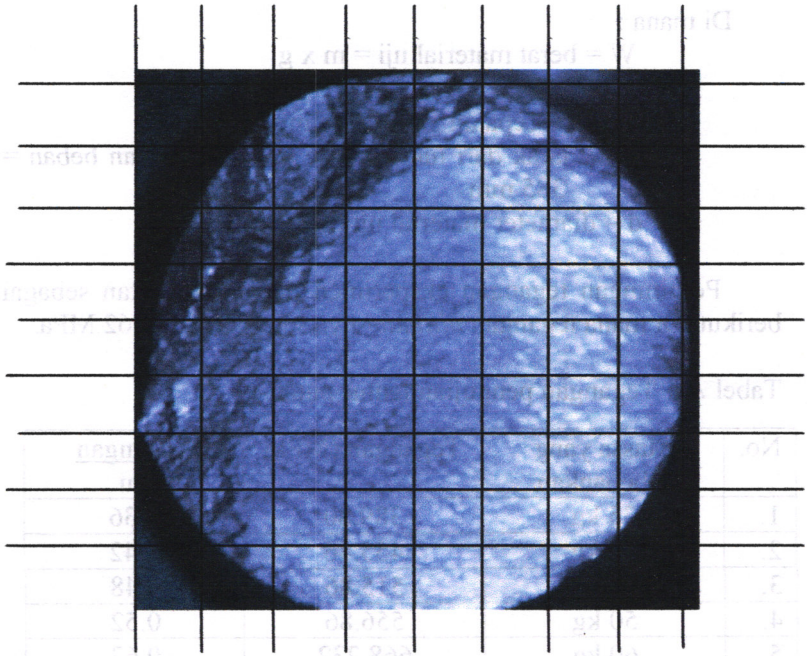
Perhitungan tegangan eksperimen dapat ditabelkan sebagai berikut. Di mana tegangan *ultimate*-nya sebesar 1079.562 MPa.

Tabel A.1 Tegangan pengujian lentur putar

| No. | Massa yang dibebankan | Tegangan (MPa) | $\frac{\text{Tegangan}}{\sigma u}$ |
|---|---|---|---|
| 1. | 35 kg | 389.80 | 0.36 |
| 2. | 40 kg | 455.46 | 0.42 |
| 3. | 45 kg | 515.86 | 0.48 |
| 4. | 50 kg | 556.86 | 0.52 |
| 5. | 60 kg | 668.232 | 0.63 |

# LAMPIRAN B

Untuk menghitung luasan daerah patah statik dalam persentase dibuat suatu perbandingan antara luasan daerah patah statik (yang berwarna kelabu) dan luasan seluruh penampang patahan .



Gambar B.1 Patahan pada spesimen KG500-2c

$$\% \text{ patah statik} = \frac{\text{luasan patah statik}}{\text{luasan penampang}} \times 100\ \%$$

$$= \frac{32 \text{ kotak}}{60 \text{ kotak}} \times 100\ \%$$

$$= 53.4\ \%$$

# LAMPIRAN C

Batas lelah pada $10^6$ siklus pembebanan dapat dihitung berdasarkan persamaan 2.2 berikut.

$$S_e = k_a\, k_b\, k_c\, k_d\, k_e\, S'_e$$

Se : batas lelah elemen mesin yang diperiksa
Se': batas lelah yang didapatkan dari percobaan lentur putar R.R Moore, untuk baja Se'= 0.504 x Su
Ka : faktor permukaan
Kb : faktor ukuran
Kc : faktor tipe pembebanan
Kd : faktor suhu
Ke : faktor-faktor berpengaruh lainnya

Batas lelah pada $10^6$ siklus pembebanan untuk material dengan temperatur 30°C (temperatur kamar).
Su = 1079.562 MPa
Se' = 0.504 x 1079.562 MPa = 544.099 MPa
Ka = 0.79 (dari tabel 2.3 digunakan koefisien a = 4.51 dan b = -0.265)
Kb = 0.926 (karena diameter benda uji 2.79mm< D< 51mm)
Kc = 1 (beban bending)
Kd = 1 (dari tabel 2.3)
Ke = 1 (tidak bertakik)
Se($10^6$) = 0.79 x 0.926 x 1 x 1 x 1 x 544.099 = 398.03 MPa

Batas lelah pada $10^6$ siklus pembebanan untuk material dengan temperatur 150°C.
Su = 130 kpsi = 896.35 Mpa (Kekuatan Tarik pada Temperatur 150°C, berdasarkan gambar 2.7)
Se' = 0.504 x 896.35 MPa = 451.76 MPa
Ka = 0.79 (dari tabel 2.3 digunakan koefisien a = 4.51 dan b = -0.265)

Kb = 0.926 (karena diameter benda uji 2.79mm< D< 51mm)
Kc = 1 (beban bending)
Kd = 1.025 (dari tabel 2.3)
Ke = 1 (tidak bertakik)
$Se(10^6) = 0.79 \times 0.926 \times 1 \times 1 \times 1 \times 451.76 = 338.743$ MPa

## BIOGRAFI PENULIS

Penulis bernama lengkap Rani Kartika Nuri, terlahir di Blitar pada tanggal 19 Juli 1986. Penulis menghabiskan masa kecil hingga SMA nya di kota kelahirannya. Menempuh pendidikan SD di SDN Kanigoro 3, melanjutkan di SMP 1 Kanigoro dan SMAN 1 Blitar. Kemudian mengikuti SPMB dan diterima di perguruan tinggi di Surabaya yaitu ITS, Juusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri. Masa kuliah ditempuh selama 5 tahun dengan IPK 3,1. Masa kuliah dihabiskan dengan banyak pengalaman seperti aktif berorganisasi di BEM ITS, Himpunan Mahasiswa Mesin, Klub Pers Dimensi dan lembaga dakwah jurusan 'Ash-shaff' serta kerja part time mulai dari menjadi guru les privat hingga menjadi staff administrasi sebuah TKIT di Surabaya. Di dunia kuliah banyak ilmu dan pengalaman yang didapatkan oleh penulis. Semoga Ilmu dan pengalaman hidup penulis bisa berkontribusi membangun bangsa dan Islam kedepannya. Penulis sangat berterima kasih kepada para Bapak/Ibu pengajar/dosen yang telah membimbing dan mengajari arti 'Ilmu dan belajar' kepada penulis.