

**ANALISIS NILAI BATAS TEGANGAN PADA ALAT UJI KELELAHAN
ROTATING BENDING TIPE CANTILEVER TERHADAP VARIASI PUTARAN**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

**DUTA KRISTIANTO
NIM. 0810620054-62**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2013**

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala berkat, rahmat, dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan skripsi dengan judul **“Analisis Nilai Batas Tegangan Pada Alat Uji Kelelahan Rotating Bending Tipe Cantilever Terhadap Variasi Putaran”**.

Proses penyusunan skripsi ini tidak lepas dari dukungan banyak pihak, oleh karena itu dengan segala kerendahan hati penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak – pihak yang telah banyak membantu dalam penyusunan skripsi ini. Atas selesainya skripsi ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua saya Rusbandi dan Mintarsih, kakak saya Bangkit Gotama serta adik saya Trivian Klesani dan seluruh keluarga besar saya atas doa, dukungan moral dan materiil yang telah diberikan selama ini.
2. Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
3. Bapak Dr.Eng. Anindito P, ST., M.Eng. selaku Sekertaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
4. Bapak Ir. Endi Sutikno, MT. selaku dosen pembimbing I yang telah memberikan pengarahan, motivasi, dan bimbingan selama proses penyusunan skripsi ini.
5. Ibu Femiana Gapsari MF, ST., MT selaku dosen pembimbing II yang memberikan inspirasi pada skripsi ini dan dengan sabar memberikan bimbingan dan motivasinya agar penyusunan skripsi ini dapat selesai dengan baik.
6. Bapak Ir. Tjuk Oerbandono, MSc.CSE yang selalu memberikan motivasi kepada saya selama menjadi dosen wali.
7. Seluruh dosen Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya atas ilmu yang telah diberikan.
8. Seluruh karyawan di Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya atas bantuanya dalam menyelesaikan seluruh kebutuhan administrasi.
9. Bella Marselina Prima Dewi yang selalu memberikan motivasi dan inspirasi selama saya menyelesaikan skripsi dan kuliah .

10. Saudara - saudaraku “EMPEROR” Mesin Angkatan 2008 atas bantuan saran, dan semangatnya pada pengerjaan skripsi ini.
11. Teman-teman seperjuangan Miko Febritito Kenang, Lutfi Tri Wahyudi, Anggara Dharma Perkasa, Gusti Muhamad Islami, M. Syaefuddin J.S, Wanda Indrayana, Rezavanni Fahruloh, M. Auf, dan para pejuang skripsi lainnya.
12. Saudara - saudaraku asisten Lab. Motor Bakar Beji, Iko, Kusud, Bayu, Kenong, Anas, Hafied, Hasan, dan Prima atas bantuan selama menjadi asisten, kepala Lab. Motor Bakar Bapak Dr. Eng. Nucholis Hamidi, ST., M.Eng dan Mas Eko Mujianto atas saran yang telah diberikan.
13. Brogader Komunitas Suzuki Thunder Malang dan Koster Indonesia yang selalu memberikan dukungan dan semangat dalam menyelesaikan kuliah saya.
14. Seluruh pihak yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu atas bantuan yang telah diberikan dalam menyelesaikan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu saran dan kritik yang bersifat membangun sangat diharapkan untuk masukan di masa mendatang. Akhirnya penulis berharap semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Malang, Juli 2013,

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR LAMPIRAN	vii
RINGKASAN	viii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Penelitian Sebelumnya	4
2.2 GUM	5
2.3 Ketidakpastian Pengukuran.....	6
2.4 Kesalahan Sistemik dan Kesalahan Random	7
2.4.1 Kesalahan Random (Tipe A).....	8
2.4.2 Kesalahan Sistemik (Tipe B).....	10
2.4.3 Keseluruhan Ketidakpastian dari Suatu Variabel Pengukuran....	11
2.5.2 Sumber - Sumber Ketidakpastian.....	12
2.5 Kelelahan.....	13
2.5.1 Parameter Pembebanan	14
2.5.2 Diagram S-N.....	18
2.6 Uji Kelelahan	20
2.7 Bentuk dan Ukuran Benda Uji	21
2.8 Alat Uji Kelelahan.....	23
2.9 <i>Rotating Bending Fatigue Tester</i>	23
2.10 Hipotesa.....	25



BAB III METODOLOGI PENELITIAN	26
3.1 Metode Penelitian.....	26
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian	26
3.3 Variabel Penelitian	26
3.3.1 Variabel Bebas	26
3.3.2 Variabel Terikat.....	26
3.3.3 Variabel Terkontrol	27
3.4 Peralatan dan Bahan Penelitian.....	27
3.4.1 Peralatan yang digunakan.....	27
3.4.2 Bahan yang digunakan	29
3.5 Dimensi Spesimen Uji Kelelahan	29
3.6 Instalasi Alat Uji <i>Fatigue</i> (<i>rotating bending tipe cantilever</i>).....	30
3.7 Prosedur Penelitian.....	30
3.7.1 Prosedur persiapan bahan uji.....	30
3.7.2 Prosedur pengambilan data	31
3.8 Diagram Sistem Produksi.....	32
3.9 Rancangan Penelitian	32
3.10 Diagram Alir Penelitian	33
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	34
4.1 Data Hasil Pengujian.....	34
4.2 Analisa Diagram S-N	35
4.2.1 Diagram S-N pengujian dengan kecepatan putar 2800rpm.....	35
4.2.2 Diagram S-N pengujian dengan kecepatan putar 2500rpm.....	36
4.2.3 Diagram S-N pengujian dengan kecepatan putar 2200rpm.....	37
4.2.4 Diagram S-N.....	38
4.2 Grafik Hubungan Putaran dan Siklus.....	40
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	42
5.1 Kesimpulan	42
5.2 Saran.....	42

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Kesalahan dalam pengukuran variabel X (a) dengan dua kali pembacaan (b) dengan satu kali pembacaan	7
Gambar 2.2	Interval ketidakpastian random di Sekitar nilai rata-rata dari sebuah pembacaan sampel dari suatu variabel X_i	8
Gambar 2.3	Distribusi kemungkinan kesalahan sistematik β pada distribusi B	10
Gambar 2.4	Pengertian tegangan siklik	14
Gambar 2.5	Diagram batas tegangan terhadap kelelahan logam	15
Gambar 2.6	Diagram Goodman	17
Gambar 2.7	Diagram Haigh	17
Gambar 2.8	Diagram S-N dengan pembagian umur lelah	19
Gambar 2.9	Diagram S-N pada baja AISI 1045	19
Gambar 2.10	Diagram S-N pada alumunium 2024 T4	20
Gambar 2.11	Variasi spesimen uji lelah	22
Gambar 2.12	Bentuk dan ukuran standar spesimen uji kekuatan lelah	22
Gambar 2.13	Konstruksi sederhana <i>rotating bending fatigue tester</i>	24
Gambar 2.14	Permukaan spesimen pengujian yang mengalami proses lelah pada <i>rotating bending fatigue tester</i>	25
Gambar 3.1	<i>Stopwatch</i>	27
Gambar 3.2	Jangka sorong	27
Gambar 3.3	Mesin bubut T.U. CNC 2A	28
Gambar 3.4	Alat uji tarik	28
Gambar 3.5	Alat uji <i>rotating bending tipe cantilever</i>	29
Gambar 3.6	Dimensi spesimen dan keterangannya	29
Gambar 3.7	Instalasi alat uji <i>fatigue (rotating bending tipe cantilever)</i>	30
Gambar 4.1	Diagram S-N pengujian dengan kecepatan putar poros 2800rpm	35
Gambar 4.2	Diagram S-N pengujian dengan kecepatan putar poros 2500rpm	36
Gambar 4.3	Diagram S-N pengujian dengan kecepatan putar poros 2200rpm	37
Gambar 4.4	Diagram S-N	38
Gambar 4.5	Grafik Hubungan Putaran dan Siklus	40

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Table 3.1	Rancangan analisa nilai batas tegangan terhadap variasi putaran	32
Tabel 4.1	Data Umur Lelah Hasil Pengujian <i>Fatigue</i> (siklus)	34



DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1.	Data Hasil Pengujian
Lampiran 2.	Uji Komposisi Pada Alumunium 6061



RINGKASAN

Duta Kristianto, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, April 2013, *Analisis Nilai Batas Tegangan Pada Alat Uji Kelelahan Rotating Bending Tipe Cantilever Terhadap Variasi Putaran*, Dosen Pembimbing : Endi Sutikno dan Femiana Gapsari M F.

Perkembangan dunia industri memberikan kemajuan pada sistem pengukuran dan pengujian. Nilai pengukuran atau pengujian merupakan suatu parameter yang sangat penting pada setiap unit industri. Pengukuran dan pengujian pada dasarnya dilakukan untuk mendapatkan angka yang diikuti dengan nama besaran acuan. Pengukuran pada setiap alat ukur atau alat uji harus memenuhi standar. Salah satu unsur pengukuran yang harus dipahami dalam ketidakpastian adalah mengenai nilai batas alat ukur atau alat uji. Aryanto (2011), melakukan rancang bangun dan membuat alat uji kelelahan *rotating bending* tipe *cantilever*. Pada pengecoran logam di Laboratorium Pengecoran Logam Universitas Brawijaya, produk pengecoran perlu diuji kelelahannya. Untuk itu dirancang dan dibuatlah alat uji kelelahan ini, karena sebelumnya tidak ada alat uji kelelahan. Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisa nilai batas tegangan alat uji kelelahan, di mana nilai batas yang dianalisa adalah nilai batas tegangan yang mencerminkan besar kekuatan lelah serta umur lelah dari spesimen uji.

Metode penelitian yang digunakan adalah *true experimental research*. Penelitian ini menggunakan variasi kecepatan putar poros 2800 rpm, 2500rpm, dan 2200 rpm. Pada penelitian ini juga mengontrol beban yang diberikan kepada spesimen pengujian sebesar 48 MPa, 36 MPa, 24 MPa, dan 12 MPa. Spesimen pengujian kelelahan berupa material Aluminium 6061 tanpa perlakuan. Spesimen diujikan hingga mengalami patah menggunakan beberapa variasi kecepatan putar poros dengan menggunakan empat pembebanan yang telah ditentukan melalui pengujian tarik sebelumnya untuk mendapatkan nilai tegangan yieldnya..

Dari penelitian yang telah dilakukan didapatkan hasil peningkatan kecepatan putar poros dan penambahan pembebanan akan meningkatkan jumlah siklus. Jumlah siklus yang paling sedikit terjadi pada pengujian kelelahan dengan putaran poros 2800 rpm dan tegangan bending 48 MPa serta jumlah siklus yang paling banyak terjadi pengujian kelelahan dengan putaran poros 2200 rpm pada tegangan bending 12 MPa. Kecepatan putar poros dan pembebanan yang semakin kecil menimbulkan besar tegangan amplitudo yang semakin kecil sehingga menghasilkan batas lelah yang semakin besar dan akhirnya spesimen pengujian akan menghasilkan patah pada waktu yang semakin lama dan jumlah siklus yang semakin besar. Karena dibutuhkan siklus yang semakin besar untuk melewati batas deformasi plastisnya.

Kata kunci: *rotating bending* tipe *cantilever*, kelelahan, siklus, tegangan

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Sejalan dengan perkembangan dunia industri memberikan kemajuan pada sistem mutu yang terjalin secara institusi nasional bahkan internasional. Oleh karena itu nilai pengukuran dan pengujian merupakan suatu parameter yang sangat penting pada setiap unit industri. Pengukuran dan pengujian pada dasarnya dilakukan untuk mendapatkan angka yang diikuti dengan nama besaran acuan. Bila tidak diikuti nama besaran acuan, hasil pengukuran ataupun pengujian menjadi tidak berarti.

Pada suatu kegiatan analisa sifat material di beberapa laboratorium material sering sekali digunakan alat uji kelelahan. Alat uji kelelahan pada umumnya merupakan alat untuk mengetahui umur dari suatu material yang telah melalui proses pembebanan dalam waktu tertentu. Pada prakteknya uji kelelahan digunakan pada mayoritas industri manufaktur serta kegiatan pemeliharaan sehingga proses produksi dapat memiliki acuan perlakuan pada material bahan baku produksi.

Ivan Aryanto pada 2011 melakukan rancang bangun alat uji *fatigue* (kelelahan) *rotating bending* tipe *cantilever*. Alat ini merupakan *prototype* alat uji kelelahan jenis *rotating bending* lainnya. Pada pengecoran logam di Laboratorium Pengecoran Logam Universitas Brawijaya, produk hasil pengecoran logam perlu diuji kelelahannya. Untuk itu dirancang dan dibuatlah alat uji kelelahan, karena sebelumnya belum ada alat uji kelelahan.

Suatu alat ukur ataupun alat uji yang dibuat perlu dilakukan pengukuran ketidakpastian. Pengukuran pada setiap alat ukur atau alat uji harus memenuhi standar. Salah satunya unsur pengukuran yang harus dipahami dalam ketidakpastian adalah mengenai nilai batas alat ukur atau alat uji. Ketidakpastian merupakan parameter yang berhubungan dengan hasil pengukuran yang mencirikan penyebaran dari nilai – nilai yang cukup bias yang dikaitkan dengan besaran ukur. Ketidakpastian mengandung perkiraan nilai benar yang diukur dari sumber yang berbeda, dan ketidakmampuan membaca sebuah alat ukur di luar batas bagian terkecil yang ditunjukkan. Sebelum melakukan kegiatan pengukuran dengan suatu alat perlu dilakukan pengukuran ketidakpastian. Di mana terdapat beberapa aturan serta metode yang harus diterapkan untuk mendapatkan nilai ketidakpastian. Semua proses pengukuran ketidakpastian harus sesuai dengan GUM (*Guide to the expression of uncertainty in measurement*). GUM

merupakan suatu panduan yang telah ditetapkan secara internasional untuk menganalisa angka ketidakpastian dari suatu alat pengukuran atau pengujian. Konsep analisa pengukuran dengan GUM terkait hanya untuk mengamati data sendiri.

Sering kali dalam pengukuran terdapat berbagai kesalahan dalam analisis pengukuran. GUM memberikan pemecahan masalah dengan menghimpun segala kesalahan pengukuran tersebut ke dalam sebuah bentuk ketidakpastian pengukuran, sehingga dengan analisa ketidakpastian meringkas proses pengukuran untuk mendapatkan spesifikasi besaran ukuran, metode pengukuran, dan prosedur pengukuran.

Menurut ISO 9001, bahwa alat ukur atau alat uji harus diketahui nilai ketidakpastiannya sebelum digunakan sebagai alat ukur atau alat uji. Sedangkan rancang bangun alat uji ini belum disertai dengan analisa ketidakpastiannya. Oleh karena itu, perlu dianalisa ketidakpastiannya agar dalam penggunaan alat uji tersebut dapat diperoleh data-data yang akurat sehingga dapat diketahui keandalannya.

Sesuai dengan petunjuk GUM, untuk menganalisa ketidakpastian suatu alat ukur atau alat uji, perlu diketahui sebelumnya faktor-faktor yang mempengaruhi terjadinya ketidakpastian pada alat ukur atau alat uji. Faktor-faktor tersebut adalah penyebab yang memungkinkan terjadi kesalahan pengukuran. Selain itu hal yang paling penting dalam pengukuran yaitu evaluasi ketidakpastian. Sesuai dengan GUM terdapat dua jenis evaluasi, yaitu tipe A dan tipe B. Tipe A merupakan evaluasi ketidakpastian berdasarkan hasil penelitian, sedangkan tipe B berdasarkan spesifikasi alat, studi literatur, sertifikat kalibrasi, pengukuran sebelumnya dan lainnya.

Oleh karena itu penulis melakukan analisa alat uji kelelahan sebagai penelitian. Dimana alat uji kelelahan yang dianalisa adalah alat uji kelelahan yang ada pada Laboratorium Pengecoran Logam Universitas Brawijaya. Sehingga nantinya alat uji kelelahan ini dapat digunakan oleh khalayak umum.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas dapat dirumuskan sebuah permasalahan, yaitu bagaimana batas nilai tegangan dari alat uji kelelahan *rotating bending* tipe *cantilever* terhadap variasi putaran?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan permasalahan pada penelitian ini meliputi:

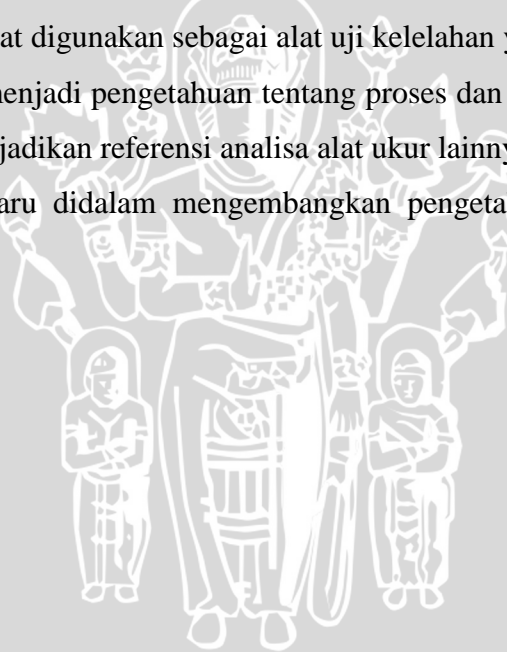
- 1 Alat uji kelelahan yang digunakan adalah jenis *rotating bending tipe cantilever*
- 2 Material yang digunakan adalah Al6061
- 3 Tidak membahas spesimen pengujian secara detail
- 4 Tidak membahas rancang bangun alat uji kelelahan secara detail

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah menganalisa nilai batas tegangan pada alat uji kelelahan *rotating bending tipe cantilever* terhadap variasi putaran.

1.5 Manfaat Penelitian

- 1 Dengan adanya penelitian ini diperoleh data-data yang akurat, dan selanjutnya alat uji yang dirancang dapat digunakan sebagai alat uji kelelahan yang standar.
- 2 Bagi pembaca dapat menjadi pengetahuan tentang proses dan prosedur analisa yang dilakukan dan dapat dijadikan referensi analisa alat ukur lainnya.
- 3 Menambah wacana baru didalam mengembangkan pengetahuan dibidang teknik pengukuran.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Setiap alat ukur atau alat uji mempunyai nilai ketidakpastian (*uncertainty*), ketelitian, dan keakuratan yang menunjukkan bahwa setiap alat ukur atau alat uji yang dibuat mempunyai keterbatasan ukur hanya pada batas tertentu. Sampai saat ini sudah banyak tulisan yang mengemukakan tentang ketidakpastian alat ukur atau alat uji dan ketidakpastian pengukuran.

Arif (2004) mengungkapkan tentang ketidakpastian pengukuran pada alat ukur kesilindrisan, yang dirancang dan dikembangkan dengan modifikasi *carriage*, mengganti sensor *dial indicator* dengan serta mengoptimasikan pengambilan dan pengendaliannya melalui *personal computer* (PC). Alat ukur tersebut memiliki penyimpangan bekisar $\pm 3,03$ μm untuk pemeriksaan 200 pada $k = 2$. Berdasarkan DIN 1319-3 dan DIN 2257 yang mengatakan bahwa untuk mengukur suatu produk dengan toleransi T . Ketidakpastian alat ukur yang dapat digunakan antara 0,1 sampai dengan 0,2 dari nilai toleransinya ($U \leq 0,1T - 0,2T$). Alat ukur kesilindrisan digunakan untuk memeriksa kesilindrisan benda uji berbentuk silinder dengan diameter masing-masing 70 mm dan 42,95 mm. Hasil rata-rata benda uji I nilai kesilindrisannya 38,9 μm untuk panjang pengukuran 200 mm dengan ketidakpastian $\pm 4,42$ μm pada $k = 2$. Sedangkan benda uji II mempunyai nilai kesilindrisan masing-masing 199,6 μm untuk panjang pengukuran 100 mm dengan ketidakpastian $\pm 13,93$ μm pada $k = 2$.

Torowati (2007) menuliskan ketidakpastian pengukuran pipet gondok melalui perhitungan bentangan nilai ketidakpastian yang bertujuan mendapatkan suatu rentang nilai pengukuran dimana diantara rentang nilai tersebut terdapat nilai yang sebenarnya dari besaran yang diukur. Data yang digunakan untuk penentuan nilai ketidakpastian ini adalah hasil pengukuran pipet gondok yang dilakukan dengan metode gravimetri. Penentuan nilai ketidakpastian gabungan berentang untuk pipet gondok tersebut dihitung dengan tingkat kepercayaan 95% dan $k = 2$. Penentuan nilai ketidakpastian pengukuran terhadap alat ukur gelas berupa pipet gondok yang digunakan di dalam laboratorium pada umumnya.

Marthina Mini (2008) menganalisa tentang ketidakpastian alat uji kekuatan sabuk dagu helm. Penulis melakukan analisa ketidakpastian alat uji kekuatan sabuk dagu helm untuk mendapatkan bentangan nilai pada pengukuran batas atas dan batas bawah alat ukur. Penulis mendapatkan faktor-faktor penyebab kesalahan pengukuran pada alat uji, yaitu:

ketidakpastian alat ukur standar, ketidakpastian pembacaan alat ukur, ketidakpastian karena karena ketidaklurusan antara jarum penunjuk dengan alat ukur, ketidaksesuaian antara putaran motor dengan panjang pemuluran, ketidakpastian karena adanya *sliding* antara batang penggantung dengan pemegangnya. Selain itu juga didapatkan angka ketidakpastian alat uji kekuatan sabuk dagu helm sebesar 4,8 mm dari hasil perhitungan bentangan alat uji dengan tingkat ketidakpastian 95% dan ketidakpastian *random* 1,8 mm.

2.2 GUM

GUM (*Guide Expression of Uncertainty Measurement*) merupakan panduan atau petunjuk untuk menganalisa dan menyatakan ketidakpastian pengukuran suatu alat ukur atau alat uji. GUM (1993) didasarkan pada perkembangan terbaru dan prinsip-prinsip statistik matematika. GUM (1993) memberikan aturan umum untuk mengevaluasi dan menyatakan ketidakpastian dalam pengukuran yang lebih dari detailnya, instruksi ilmiah atau rekayasa yang spesifik.

Cikal bakal GUM pertama diterbitkan pada tahun 1980. Ini merupakan inisiatif dari BIPM, *Biro International des Poids et Mesures*. Dokumen resmi pertama GUM dibuat pada tahun 1992. Pada tahun 1997 *Joint Committee for Guides in Metrologi* (JCGM) dibuat oleh tujuh organisasi internasional:

- BIPM
- IEC, *International Electro-technical Commission*
- IFCC, *International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*
- ILAC, *International Laboratory Accreditation Cooperation*
- ISO, *International Organization for Standardization*
- IUPAC, *International Union of Pure and Applied Chemistry*
- IUPAP, *International Union of Pure and Applied Physics*
- OIML, *International Organization of Legal Metrology*

Sejak itu JCGM telah memiliki tanggung jawab pada penyusunan GUM dan GUM memiliki andil penting dalam ISO standar, sesuai dalam ISO *Guide* 98-3:2008. GUM menjadi standar pengukuran ketidakpastian di dalam ISO standar dimana GUM merupakan standar khusus yang harus dipatuhi untuk memenuhi nilai ketidakpastian alat ukur dan alat uji yang akan digunakan dalam aktivitas pengukuran ataupun pengujian.

2.3 Ketidakpastian Pengukuran

Ketidakpastian adalah suatu parameter yang menetapkan rentang nilai yang didalamnya diperkirakan nilai benar yang diukur berada muncul dari sumber yang berbeda, dan ketidakmampuan membaca sebuah alat ukur di luar batas bagian terkecil yang ditunjukkan.

Ketika menyatakan hasil pengukuran, penting juga untuk menyatakan ketepatan atau perkiraan ketidakpastian pada pengukuran tersebut dengan memberikan batasan nilai dari kemampuan suatu alat uji atau alat ukur. Batasan yang dimaksud adalah batasan maksimum dan minimum dari kemampuan sehingga didapatkan *range* nilai terukur yang diijinkan.

Dalam melakukan analisa ketidakpastian telah diatur dalam ketentuan GUM. GUM memiliki metode pemecahan masalah dalam mengukur ketidakpastian hingga mendapatkan hasil evaluasi yang kemudian diolah datanya secara matematis hingga menjadi sebuah grafik penyebaran nilai ukur atau nilai uji menggunakan beberapa *software* seperti MatLab, @Risk, dan lainnya.

GUM membedakan antara dua jenis evaluasi ketidakpastian, yaitu:

- Tipe A: Evaluasi ketidakpastian dengan analisis statistik dari serangkaian pengamatan.
- Tipe B: Evaluasi ketidakpastian dengan cara selain analisis statistik, misalnya dengan menggunakan perkiraan dari pengukuran sebelumnya, spesifikasi dari pabriknya, buku pegangan, sertifikat kalibrasi dan lainnya.

Dalam melakukan percobaan, pengetahuan tentang teori ketidakpastian sangat penting. Dengan teori tersebut kita dapat memberikan penilaian yang wajar dari percobaan kita. Jelas bahwa hasil percobaan kita dapat diharapkan tepat sama dengan hasil riset, dimana hasil benar adalah x_0 . Namun, selama harga x_0 berada pada:

$$x_0 - \Delta x < x_0 < x_0 + \Delta x$$

dengan :

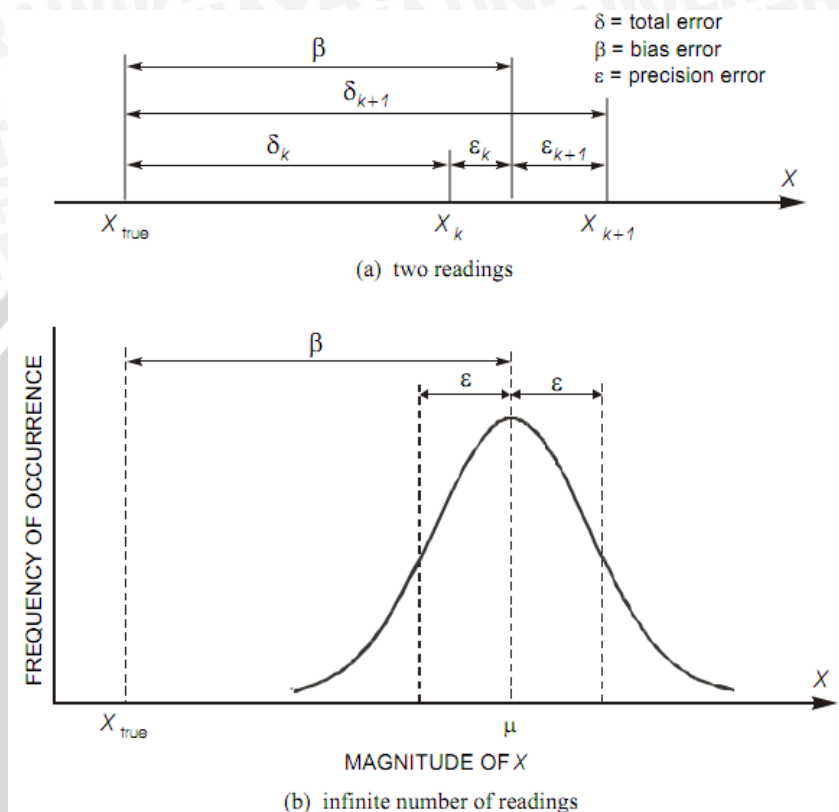
x_0 = nilai terbaik, sebagai pengganti nilai benar

Δx = kesalahan pada hasil pengukuran yang disebabkan oleh kesalahan alat, pengamat, waktu dan lain-lain.

maka percobaan kita sungguh-sungguh mempunyai arti dan dapat dipertanggung jawabkan.

2.4 Kesalahan Sistemik dan Kesalahan Random

Ketelitian didefinisikan sebagai kedekatan antara nilai terukur dengan nilai sebenarnya (Coleman & Steele,1999), sehingga derajat ketidakteelitian atau kesalahan pengukuran total (δ) adalah perbedaan antara nilai terukur dan nilai sebenarnya. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1. Kesalahan dalam pengukuran variabel X (a) dengan dua kali pembacaan (b) dengan satu kali pembacaan

Sumber: Coleman and Steele (1995:65)

Pada grafik tersebut menggambarkan bahwa kesalahan total adalah penjumlahan kesalahan sistemik (bias) dan kesalahan random (acak). Kesalahan sistemik (β) adalah komponen yang tetap atau konstan dari kesalahan total, sedangkan kesalahan random (ϵ) adalah komponen yang selalu acak dari kesalahan total, sehingga bias mempunyai nilai yang berbeda pada setiap pengukuran. Jika pengukuran dilakukan dengan tak terbatas kali, maka dapat digambarkan sebagai sebuah kurva distribusi normal dari pembacaan, dengan nilai rata-ratanya (μ) mempunyai jarak (β) dari nilai sebenarnya. Sehingga kesalahan total dapat dirumuskan sebagai :

$$\delta_i = \beta + c_i \quad (2-1)$$

dimana : δ_i = kesalahan total pada pengukuran ke-i

β = kesalahan sistematis

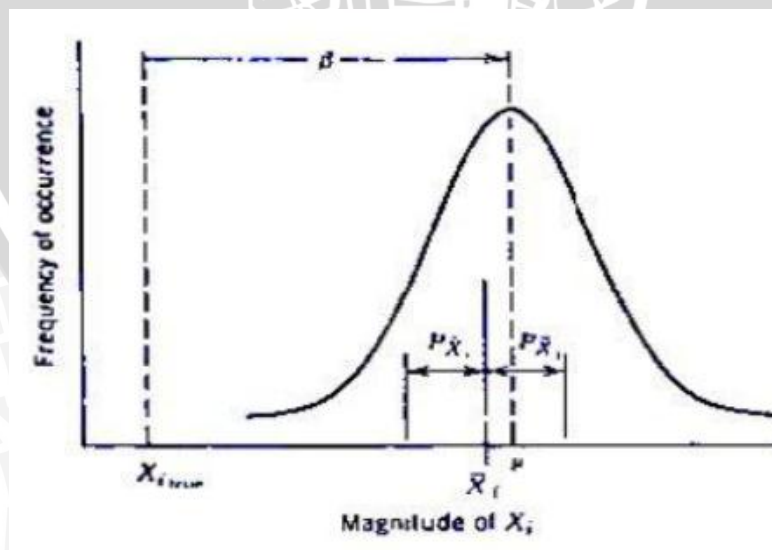
c_i = kesalahan random pada pengukuran ke-i

Pada kenyataannya, nilai sebenarnya dari nilai X tidaklah pernah dapat diketahui, sehingga tidaklah mungkin dapat ditentukan secara tepat kesalahan sistematis maupun kesalahan random dari pengukuran nilai X . Oleh karena itu, **Coleman dan Steel** berpendapat bahwa jika dibuat suatu statement tentang nilai X didasarkan pada pengukuran, maka hanya dapat dikatakan bahwa dengan kepercayaan $C\%$ nilai sebenarnya dari X berkisar dalam interval X_{best} , biasa diasumsikan sebagai nilai rata-rata dari sejumlah N pembacaan yang telah diambil, sedangkan U_s adalah ketidakpastian dari X yang berhubungan dengan perkiraan (kepercayaan $C\%$) sebagai pengaruh dari kombinasi kesalahan sistematis dan kesalahan random. Oleh karena itu ketidakpastian dapat dibedakan menjadi dua yaitu:

- Ketidakpastian sistematis, yaitu komponen ketidakpastian yang ditimbulkan karena pengaruh dari kesalahan sistematis proses pengukuran atau pengujian, kesalahan yang terjadi menghasilkan nilai nominal yang sama, walaupun dilakukan pengujian berulang kali.
- Ketidakpastian random, yaitu komponen ketidakpastian yang terjadi menghasilkan nilai nominal yang berbeda dari pengujian yang dilakukan berulang kali.

2.4.1 Kesalahan Random (Type A)

Ketidakpastian random dapat juga disebut ketidakpastian Tipe A dan diestimasi dari perhitungan serta analisa statistik pada distribusi kesalahan random seperti pada Gambar 2.2 berikut :



Gambar 2.2. Interval ketidakpastian random di sekitar nilai rata-rata dari sebuah pembacaan sample dari suatu variabel X_i

Sumber: Coleman and Steele (1995:65)

Untuk mendapatkan distribusi tersebut, diambil sampel dengan ukuran N dan dicatat hasil pengukurannya, kemudian dihitung harga rata-rata dan standar deviasinya dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$$

$$S_x = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \right]^{1/2} \quad (2-2)$$

dimana:

\bar{X} = rata-rata

N = jumlah pembacaan individual X_i

S_x = standar deviasi

Kemudian dengan batas kepercayaan 95% untuk sebuah sampel pengukuran X , sejumlah N dari distribusi Gaus, didefinisikan sebagai ketidakpastian random P , sehingga persamaan ketidakpastiannya adalah sebagai berikut:

$$P_{X_i} = tS_{X_i} \quad (2-3)$$

dimana:

P_{x_i} = ketidakpastian random dari sampel X_i

S_{x_i} = standar deviasi sampel X_i

t = diambil dari distribusi t

≈ 2 untuk tingkat kepercayaan 95% dengan $N \geq 10$

Jika suatu pengukuran dapat didefinisikan dengan persamaan berikut:

$r = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ dimana r = pengukuran yang merupakan fungsi dari sejumlah n variabel pengukuran. X_1 maka ketidakpastian random hasil pengukuran dapat didefinisikan dari persamaan sebagai berikut (Coleman & Steele, 1999):

$$P_r^2 = \sum_{i=1}^J \theta_i^2 P_i^2 \quad (2-4)$$

dimana:

P_r = ketidakpastian random hasil pengukuran

P_i = ketidakpastian random hasil variabel X_i

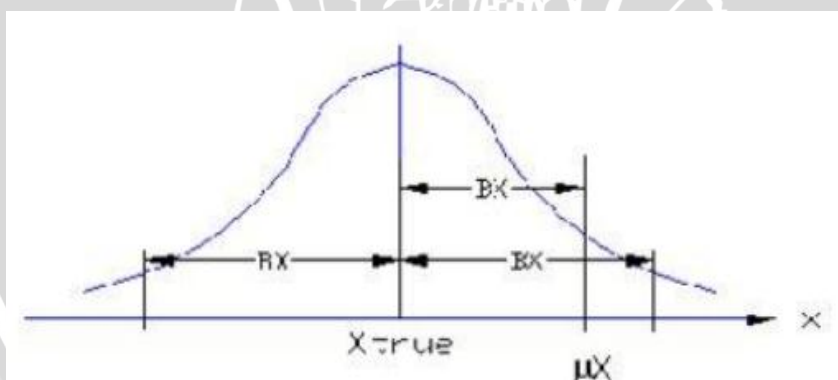
$$\theta_{i,k} = \frac{\partial r}{\partial X_{i,k}}$$

∂X = variabel komponen kesalahan (*error*)

2.4.2 Kesalahan Sistematis (Tipe B)

Kesalahan sistematis yang dapat juga disebut ketidakpastian Tipe B, untuk suatu variable terukur adalah kesalahan yang tetap dan tinggal setelah semua koreksi kalibrasi dibuat. Nilainya sama pada setiap pembacaan, dan tidak akan pernah diketahui kecuali jika nilai sebenarnya sudah diketahui. Tetapi nilai sebenarnya dari variabel terukur tersebut tidak pernah dapat diketahui. Sehingga akan timbul pertanyaan, bagaimana dapat mengukur kesalahan sistematis dan seberapa tingkat kepercayaan statistik yang dapat digunakan.

Pendekatan yang digunakan dalam *American National Standards Institute* atau *American Society of Mechanical Engineers* PTC 19-1-1998, *Test Uncertainty* dalam mendefinisikan ketidakpastian sistematis B, adalah nilai perkiraan pada batas tingkat kepercayaan 95% dari nilai sebenarnya pada nilai kesalahan sistematis. Konsep dari sebuah tingkat kepercayaan untuk ketidakpastian sistematis dapat diinterpretasikan bahwa dengan kepercayaan 95% besarnya kesalahan sistematis, sama dengan atau lebih kecil dari B. pendekatan untuk mengestimasi besarnya kesalahan sistematis dapat diperoleh dengan mengasumsikan bahwa kesalahan sistematis adalah penggambaran realisasi tunggal distribusi *parent statistic* dari kemungkinan kesalahan sistematis, seperti terlihat pada Gambar 2.3 berikut:



Gambar 2.3. Distribusi kemungkinan kesalahan sistematis β pada distribusi B
Sumber: Berty Pellasula (2010)

Jika suatu pengukuran dapat didefinisikan dengan persamaan berikut:

$$r = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2-5)$$

dimana:

r = pengukuran yang merupakan fungsi dari sejumlah n variabel pengukuran X_i .

X_i = hasil pengukuran ke- i

maka ketidakpastian sistematis hasil pengukuran dapat diestimasi dari persamaan sebagai berikut (Coleman & Steele, 1999):

$$B_r^2 = \sum_{i=1}^J \theta_i^2 B_i^2 + 2 \sum_{i=1}^{J-1} \sum_{k=i+1}^J \theta_i \theta_k B_{ik} \quad (2-6)$$

dimana:

B_r = ketidakpastian sistematis hasil pengukuran

B_i = ketidakpastian sistematis dari variabel X_i

B_{ik} = *covariance estimator* untuk kesalahan sistematis pada X_i dan X_k

$$B_{ik} = \sum_{\alpha=1}^L (B_i)_\alpha (B_k)_\alpha$$

L = jumlah sumber kesalahan sistematis elemental untuk pengukuran variabel X_i dan X_k

$$\theta_{i,k} = \frac{\partial r}{\partial X_{i,k}}$$

∂X = variabel komponen kesalahan (*error*)

2.4.3 Keseluruhan Ketidakpastian dari suatu Variabel Pengukuran

Keseluruhan ketidakpastian dari suatu variabel pengukuran X adalah interval disekitar nilai terbaik dari X dimana nilai X sebenarnya terletak di dalamnya dengan tingkat kepercayaan yang diberikan. Untuk mendapatkan keseluruhan ketidakpastian, harus didekati dengan menggabungkan estimasi ketidakpastian random dan ketidakpastian sistematis.

ISO Guide to Expression of Uncertainty in Measurement menyatakan bahwa metode untuk mengkombinasikan estimasi ketidakpastian adalah menjumlahkan varian (atau standar deviasi kuadrat) dari estimasi. Metode pada *Iso Guide to Expression of Uncertainty in Measurement* menyebutkan bahwa *combined standard uncertainty* untuk variabel i adalah:

$$u_c^2 = S_{B_i}^2 + S_i^2 \quad (2-7)$$

dimana:

u_c = ketidakpastian standar gabungan

S_{B_i} = estimasi standar deviasi ketidakpastian sistematis untuk variabel i

S_i = estimasi standar deviasi ketidakpastian random untuk variabel i

Sehubungan dengan tingkat kepercayaan ketidakpastian untuk suatu variabel, *ISO Guide to Expression of Uncertainty in Measurement* merekomendasikan *converage factor*, yaitu:

$$U_{\%} = t_{\%} u_C \quad (2-8)$$

dimana:

$U_{\%}$ = *expanded uncertainty* dengan tingkat kepercayaan

Sehingga dengan batas $\pm U_{\%}$, disekitar variabel \bar{X} akan mendapatkan nilai sebenarnya dari variabel dengan tingkat kepercayaan yang diberikan. Untuk derajat kebebasan $\nu_i \geq 9$ dan tingkat kepercayaan 95%, maka $t_{95} \approx 2$, sehingga Persamaan (2-7) dan Persamaan (2-8) menjadi :

$$U_{95} = \left(S_{B_i}^2 + S_i^2 \right)^{1/2} \quad (2-9)$$

Dan untuk ketidakpastian sistematis β yang merupakan estimasi kepercayaan 95% ($2S_B$) dari batas β , maka Persamaan (2-9) menjadi :

$$U_{95} = \left(B_i^2 + P_i^2 \right)^{1/2} \quad (2-10)$$

2.4.4 Sumber-Sumber Ketidakpastian

Ketidakpastian pada suatu pengukuran dipengaruhi oleh banyak sumber yang mengakibatkan penyebaran nilai pengukuran. Sumber-sumber tersebut yaitu:

- Standar atau referensi

Standar atau referensi memiliki nilai ketidakpastian sendiri. Secara umum setiap standar telah dibandingkan dengan standar yang mempunyai tingkatan yang lebih tinggi agar ketidapastiannya tertelusur atas garis kalibrasinya.

- Benda uji

Benda uji adalah objek yang diukur, sehingga kualitas dari benda uji ini akan mempengaruhi ketidakpastian hasil pengukuran. Kualitas benda uji dapat berasal dari material benda uji atau bentuknya atau dimensinya ataupun hal lain yang mempengaruhi.

- Instrumen

Suatu proses yang menggunakan instrument dapat merubah nilai dari measurand. Hal ini disebabkan karena setiap instrument mempunyai kesalahan sistematis, sehingga juga akan mempengaruhi ketidakpastian suatu pengukuran.

- Metode
Metode yang menyebabkan adanya kesalahan yang besar harus dihindarkan karena pendekatan dan asumsi yang diterapkan pada metode dan prosedur pengukuran merupakan contoh dari sumber ketidakpastian.
- Lingkungan
Lingkungan sekitar pengukuran adalah sumber yang paling banyak memberikan pengaruh pada hasil pengukuran, sehingga dalam setiap pengukuran kondisi lingkungan seharusnya dijaga konstan.
- Operator
Operator yang melakukan pengukuran juga dapat mempengaruhi hasil pengukuran. Ketidakpastian hasil pengukuran dapat timbul karena keterampilan pengesetan serta penyimpangan dalam skala pembacaan.

2.5 Kelelahan

Fatigue (kelelahan) pada logam dapat diartikan sebagai patahnya logam akibat pembebanan berulang dalam sejumlah siklus. Menurut ASTM (*American Society of Testing Material*), *fatigue* didefinisikan sebagai proses perubahan yang progresif pada struktur secara permanen di lokasi tertentu atau terlokalisir yang disebabkan oleh siklus beban berulang (*stress* atau *strain*), dengan akumulasi dari perubahan ini akan mengakibatkan retak (*crack*) ataupun patah (*fracture*). Proses terjadinya kelelahan melalui tiga kejadian, yaitu :

1. Naiknya tegangan pada daerah retak yang dapat menimbulkan adanya konsentrasi tegangan yang kemudian akan terjadi bentuk plastis. Kemudian terjadi retak mikro pada daerah tersebut.
2. Retak mikro akan berkembang dan jika pembebanan berulang diteruskan, retak akan merambat.
3. Setelah retak merambat cukup jauh, maka beban yang bekerja hanya akan didukung oleh penampang sisa yang belum retak dan akhirnya terjadi *final fracture*.

Pelopop dalam penelitian mengenai kelelahan logam adalah Wohler (Jerman) dan Fairbairn (Inggris) tahun 1860. Pengamatan yang lebih mendetail terhadap kelelahan logam, dilakukan sejak 1903 oleh Ewing dan Humparey yang mengarah pada lahirnya

teori 'Mekanisme Patah Lelah'. Hingga saat ini, mekanisme patah lelah adalah terdiri atas 3 tahap kejadian yaitu:

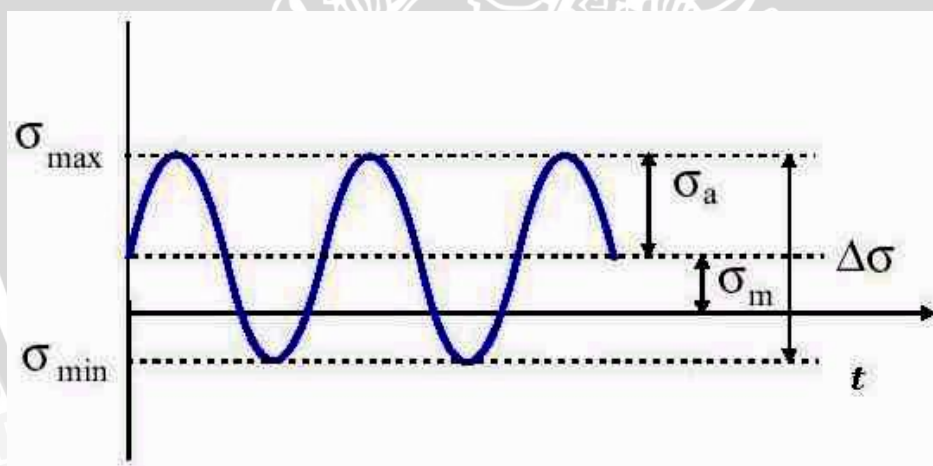
1. Tahap awal terjadinya retakan (*crack inisiation*).
2. Tahap penjaralan retakan (*crack propagation*).
3. Tahap akhir (*final fracture*)

Karakteristik kelelahan logam dapat dibedakan menjadi 2 yaitu karakteristik makro dan karakteristik mikro. Karakteristik makro merupakan ciri-ciri kelelahan yang dapat diamati secara visual (dengan mata telanjang atau dengan kaca pembesar). Sedangkan karakteristik mikro hanya dapat diamati dengan menggunakan mikroskop.

2.5.1 Parameter Pembebanan

Kekuatan lelah suatu logam mempengaruhi umur lelah dari suatu logam dan untuk memperkirakannya ada beberapa faktor yang diperhitungkan salah satunya adalah pembebanan. Parameter pembebanan yang berpengaruh terhadap kelelahan logam adalah tegangan rata-rata, σ_m dan tegangan amplitudo, σ_a serta frekuensi pembebanan.

1. Pengaruh tegangan rata-rata



Gambar 2.4 Pengertian tegangan siklik
Sumber : Abrianto (2007:12)

Tegangan amplitudo (S_a):

$$S_a = \sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2 \quad (\text{Abrianto,2007}) \quad (2-11)$$

dimana:

$S_a = \sigma_a$ = tegangan amplitudo

σ_{\max} = tegangan maksimum

σ_{\min} = tegangan minimum

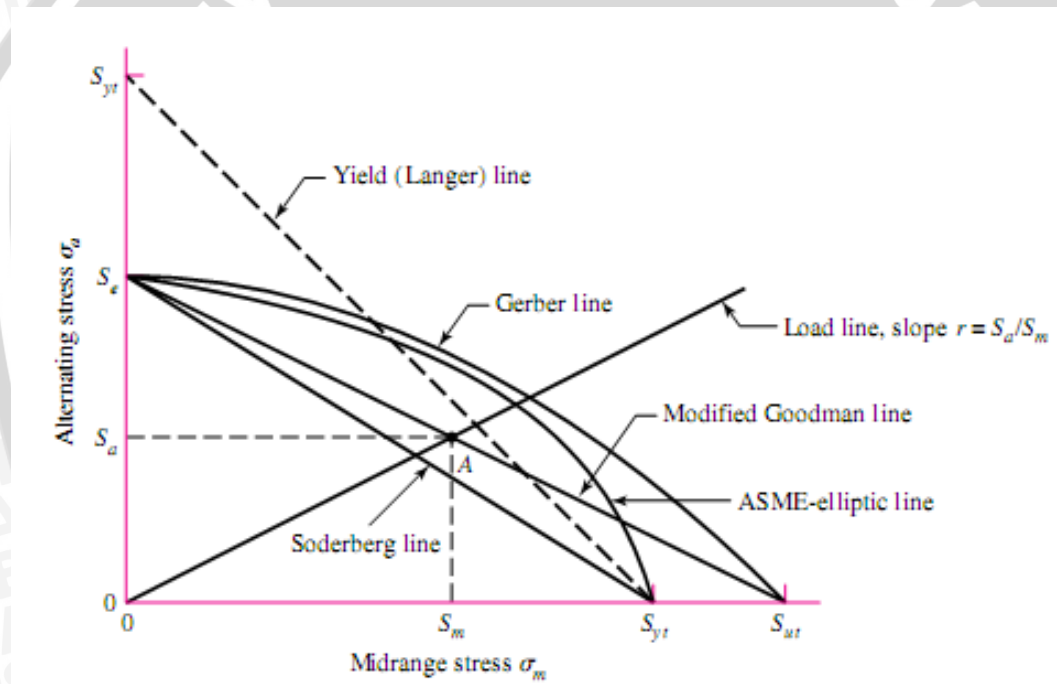
Tegangan rata-rata (S_m):

$$S_m = \sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2 \quad (\text{Abrianto, 2007}) \quad (2-12)$$

Rasio tegangan (R):

$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} \quad (\text{Abrianto, 2007}) \quad (2-13)$$

Besarnya tegangan rata-rata yang bekerja akan menentukan terhadap besarnya tegangan amplitudo yang diijinkan untuk mencapai suatu umur lelah tertentu. Bila tegangan rata-rata sama dengan 0 atau rasio tegangan sama dengan -1, maka besarnya tegangan amplitudo yang diijinkan adalah nilai batas lelahnya (S_e). Dengan demikian jika tegangan rata-ratanya semakin besar maka tegangan amplitudonya harus diturunkan. Hal ini terlihat pada alternatif diagram Goodman atau pada diagram-diagram lainnya, lihat Gambar 2.13 berikut ini:



Gambar 2.5 Diagram batas tegangan terhadap kelelahan logam
Sumber : Abrianto (2007:13)

Persamaan-persamaan yang digunakan pada diagram batas tegangan seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.13 diatas adalah sebagai berikut:

a. Soderberg (USA, 1930):

$$S_a/S_e + S_m/S_{yt} = 1 \quad (2-14)$$

dimana:

S_a = tegangan amplitudo

S_e = batas lelah

b. Goodman (England, 1899):

$$S_a/S_e + S_m/S_{ut} = 1 \quad (2-15)$$

dimana:

S_e = batas lelah (*endurance limit*)

S_{ut} = kekuatan tarik

c. Gerber (Germany, 1874):

$$S_a/S_e + (S_m/S_{ut})^2 = 1 \quad (2-16)$$

d. Morrow (USA, 1960s):

$$S_a/S_e + S_m/\sigma_f = 1 \quad (2-17)$$

dimana:

S_e = batas lelah (*endurance limit*)

S_u = kekuatan tarik

σ_f = tegangan patah sebenarnya (*true fracture stress*)

Perbandingan dari tegangan amplitudo terhadap tegangan rata-rata disebut rasio amplitudo ($A=S_a/S_m$), sehingga hubungan antara nilai R dan A yaitu sebagai berikut:

- jika $R = -1$, maka $A = \sim$ (kondisi *fully reversed*)
- jika $R = 0$, maka $A = 1$ (kondisi *zero to maximum*)
- jika $R = \sim$, maka $A = -1$ (kondisi *zero to minimum*)

Pada Gambar 2.5 diatas yang memperlihatkan aman tidaknya kondisi pembebanan terhadap kelelahan logam, berdasarkan hasil diskusi atas berbagai permasalahan, maka dapat dinyatakan sebagai berikut:

- Diagram. a (Soderberg) adalah paling konservatif dan paling aman, atau digunakan pada kondisi nilai R mendekati 1.
- Data hasil pengujian, cenderung berada diantara diagram b dan c (Goodman dan Gerber).
- Untuk baja keras (getas), diagram b dan d (Goodman dan Morrow) hampir berimpit (sama).
- Untuk baja lunak (ulet), diagram D (Morrow) akan lebih akurat.
- Pada kondisi $R < 1$ (atau perbedaan tegangan rata-rata dan tegangan amplitudo cukup kecil), maka ke-4 diagram hampir sama (berimpit).

Jika tegangan siklik atau tegangan amplitudo meningkat, maka umur lelah akan semakin menurun, begitu pula dari pengaruh meningkatnya tegangan rata-rata, maka akan menyebabkan penurunan umur kelelahan logam.

2. Pengaruh pembebanan Amplitudo

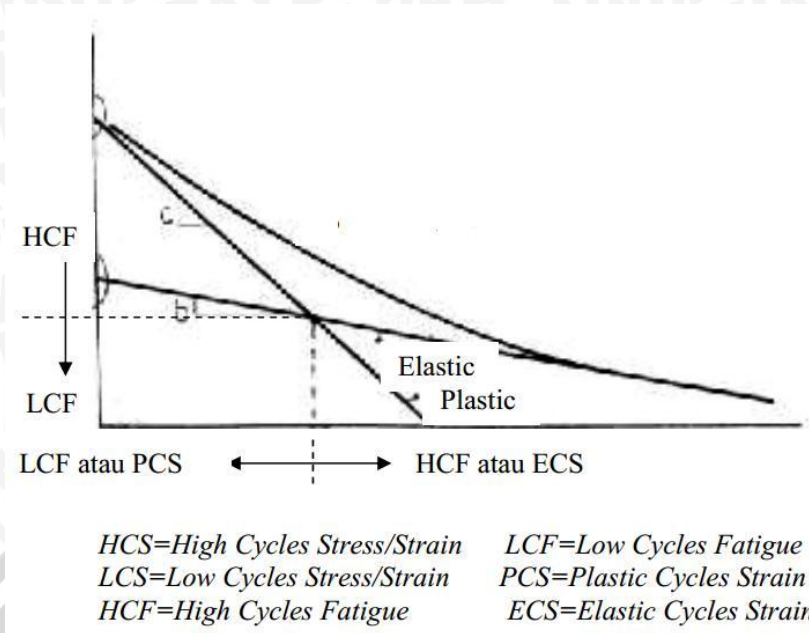
Seperti telah dijelaskan sebelumnya, tegangan amplitudo akan sangat berpengaruh terhadap umur kelelahan logam. Perkiraan kelelahan pada pembebanan yang kompleks atau variabel, seringkali didasarkan pada hukum kerusakan non linier (*linier damage rule*) yang pertama kali diajukan oleh Palmgren (1924) dan dikembangkan oleh Miner (1945) sehingga metoda ini dikenal dengan hukum Miner. Hukum ini tidak selalu sesuai dengan kenyataan, sehingga munculah berbagai alternatif yang lain seperti teori kerusakan non linier (Collins, 1986), metoda perhitungan siklus (*cycle counting*) yaitu metoda perhitungan curah hujan *rain flow counting* (Downing, 1982).

3. Pengaruh frekuensi pembebanan

Pengaruh frekuensi ini dapat dilihat pada pengujian kelelahan logam dengan frekwensi $\pm 500 \div 10.000$ siklus/menit, pada interval ini hampir tidak ada pengaruhnya terhadap kekuatan lelah materialnya. Sebagai contoh pada pengujian kelelahan baja dengan frekwensi $200 \div 5.000$ siklus/menit, tidak menunjukkan adanya pengaruh tersebut terhadap batas lelahnya, tetapi pengujian pada frekuensi 100.000 siklus/menit, maka batas lelahnya akan semakin meningkat (karena pada frekuensi tinggi, deformasi plastis yang terjadi tidak sebesar pada frekuensi rendah). Pengaruh frekuensi tersebut terjadi pula pada logam-logam non ferro.

2.5.2 Diagram S-N

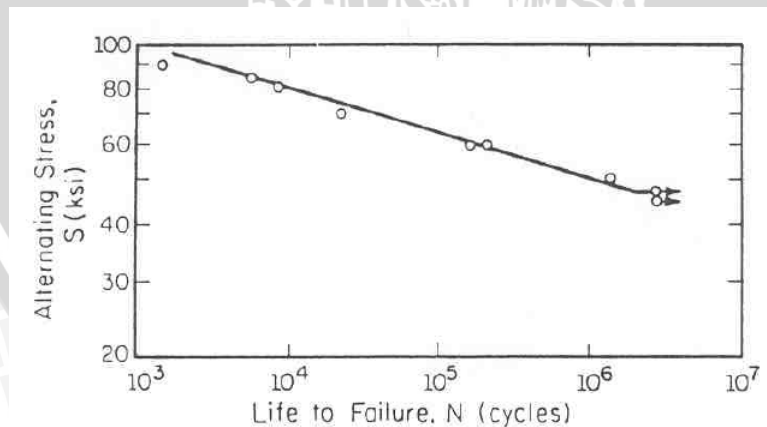
Konsep tegangan-siklus (S-N) merupakan pendekatan pertama untuk memahami fenomena kelelahan logam. Konsep ini secara luas dipergunakan dalam aplikasi perancangan material dimana tegangan yang terjadi dalam daerah elastik dan umur lelah cukup panjang. Metoda S-N ini tidak dapat dipakai dalam kondisi sebaliknya (tegangan dalam daerah plastis dan umur lelah relatif pendek), hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.8. Umur lelah yang diperhitungkan dalam metoda S-N ini adalah umur lelah tahap I (inisiasi retak lelah) dan umur lelah II (propagasi retakan).



Gambar. 2.8 Diagram S-N dengan pembagian umur lelah

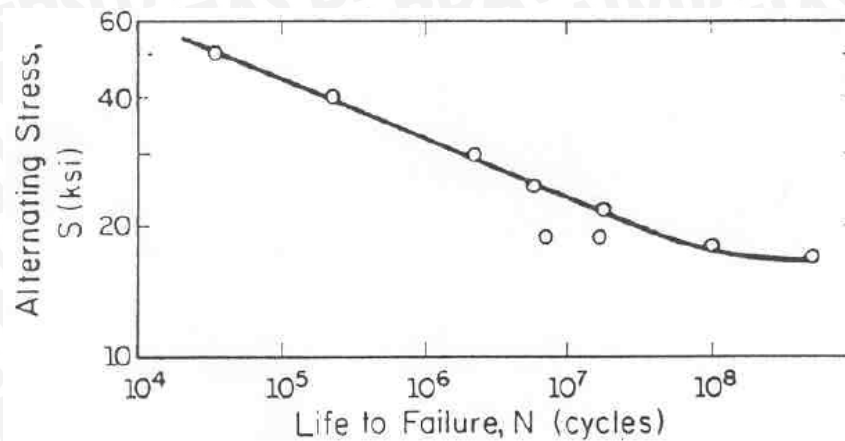
Sumber : Abrianto (2007:51)

Dasar dari metode S-N ini adalah diagram Wohler atau diagram S-N yang secara eksperimen didapat dari pengujian lelah lentur putar dengan tegangan yang bekerja berfluktuasi secara sinusoidal antara tegangan tarik dan tekan, sebagai contoh adalah pada pengujian R.R Moore dengan 4 titik pembebanan pada frekwensi 1750 rpm terhadap spesimen silindris berdiameter 0,25÷0,3 in. Kurva hasil pengujian ini ditunjukkan pada Gambar 2.9 dan Gambar 2.10 berikut ini.



Gambar. 2.9 Diagram S-N pada baja AISI 1045

Sumber : Abrianto (2007:52)



Gambar. 2.10 Diagram S-N pada alumunium 2024-T4

Sumber : Abrianto (2007:52)

2.6 Uji Kelelahan

Uji kelelahan merupakan sebuah metode untuk menentukan perilaku material dengan memberikan beban yang fluktuatif. Cara kerja pembebanan yaitu dengan memberikan beban tertentu (mungkin nol) kepada suatu spesimen uji secara berulang-ulang dengan jumlah siklus pembebanan tertentu hingga menghasilkan *failure* (umur lelah).

Umumnya, pengujian diulang dengan spesimen yang spesifik dan beban yang bervariasi. Pembebanan dapat diterapkan secara aksial, torsi, atau *flexure*. Bergantung pada amplitudo beban rata-rata dan siklus pembebanan, nilai *net stress* dalam spesimen mungkin berbanding lurus dengan siklus pembebanan, atau mungkin berbanding terbalik.

Data dari uji kelelahan sering kali disajikan dalam sebuah diagram SN yang merupakan plot dari jumlah siklus yang dibutuhkan untuk menghasilkan kegagalan pada spesimen uji terhadap tegangan siklik amplitudo. Tegangan siklik biasanya digambarkan dalam tegangan amplitudo, tegangan maksimum atau tegangan minimum. Setiap kurva dalam diagram SN menggambarkan tegangan rata-rata yang konstan.

Pengujian kelelahan dibahas dalam "Pedoman Pengujian Kelelahan," ASTM STP 91-A, dan "Pengujian Mekanik Bahan," AJ Fenner, Philosophical Library, Inc. ASTM D-671, detail prosedur standar untuk pengujian kelelahan (Weibull, 1961)

Tujuan dari tes kelelahan secara umum untuk menentukan umur lelah dan atau *danger point*, yaitu suatu lokasi kegagalan dari spesimen uji yang dikenakan dalam urutan tes atau pengujian dengan ditentukan oleh tegangan amplitudo. Dalam beberapa kasus tertentu ini mungkin satu-satunya tujuan dari tes; misalnya jika spesimen uji adalah bagian mesin yang rumit atau komponen perakitan, beban yang diterapkan melalui tegangan

amplitudo dimaksudkan untuk mensimulasikan proses munculnya tegangan hingga hilangnya tegangan pada akhir pengujian.

Dalam kebanyakan kasus, bagaimanapun, diperlukan bahwa pengujian harus dirancang sedemikian caranya untuk tidak hanya menjawab pertanyaan spesifik yang ingin diketahui, tetapi juga akan memungkinkan bentuk umum dari hasil yang diperoleh dan berkontribusi untuk menemukan hukum atau aturan terkait umur lelah dengan berbagai faktor berpengaruh. Untuk tujuan ini sangat diperlukan bahwa kondisi pengujian akan disederhanakan, berkaitan dengan urutan dari tegangan amplitudo atau spesimen uji ataupun kedua faktor tersebut. Dengan menyederhanakan dan idealisasi tes, kondisi itu akan mungkin untuk satu atau beberapa variasi faktor yang mempengaruhi umur lelah.

Urutan sederhana amplitudo diperoleh dengan menerapkan pembalikan tegangan dari amplitudo konstan pada spesimen uji sampai terjadi kegagalan. Beda spesimen uji pada seri pengujian mungkin akan dikenakan amplitudo tegangan yang berbeda, tetapi untuk setiap spesimen uji yang sama maka amplitudonya tidak akan pernah bervariasi. Tipe pengujian kelelahan ini disebut *constant-amplitudo test*. Berdasarkan tingkat tegangannya, *constant-amplitudo test* dibagi menjadi tiga, yaitu

1) *Routine Test*

Di mana diterapkan tegangan sedemikian rupa sehingga semua spesimen diharapkan mengalami kegagalan setelah sejumlah siklus pembebanan dengan tingkat sedang.

2) *Short-life Test*

Di mana tingkat tegangan terletak di atas nilai tegangan *yield* dan beberapa spesimen uji diharapkan untuk mengalami kegagalan secara statis pada aplikasi pembebanan.

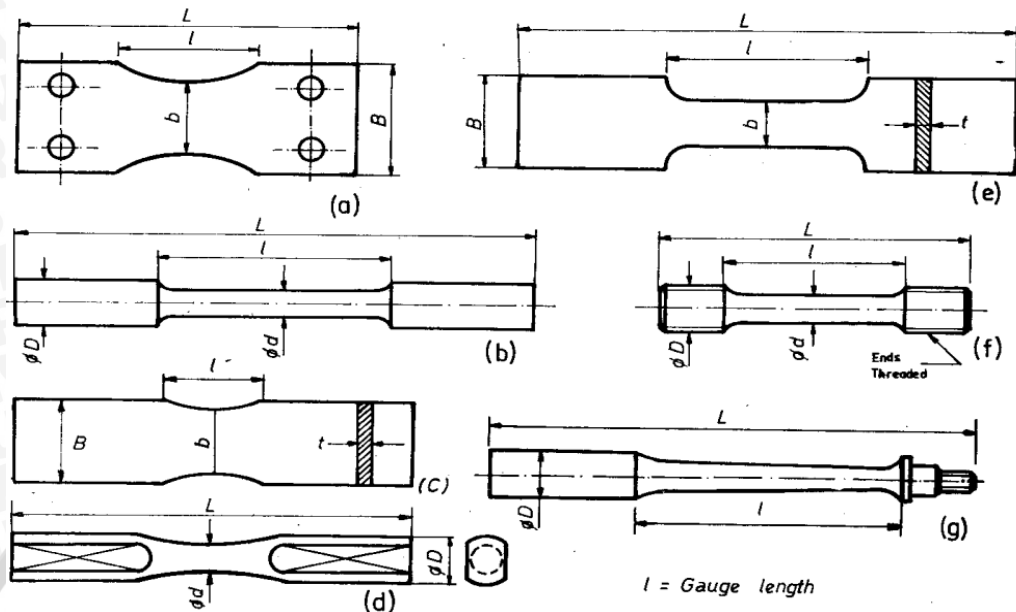
3) *Long-life Test*

Tingkat tegangan terletak di bawah atau tepat di batas lelah dan sebagian kecil dari spesimen tidak gagal setelah jumlah siklus.

2.7 Bentuk dan Ukuran Benda Uji Kelelahan

Pada dasarnya benda uji yang digunakan pada uji kelelahan disesuaikan dengan jenis alat uji kelelahannya. Masing- masing alat uji kelelahan memiliki cara kerja dan karakter menghasilkan kondisi lelah yang berbeda-beda. Tujuannya adalah menciptakan daerah patah (lelah) yang diakibatkan tegangan terpusat. Benda uji pada uji kelelahan telah

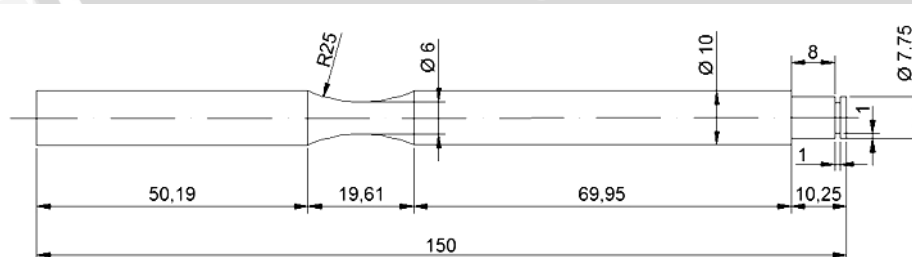
memiliki standar ukuran dan bentuk tersendiri sesuai dengan ketentuan ASTM, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Variasi specimen uji lelah : (a) *Alternating bending tester*, (b) *Rotating bending tester*, (c) dan (d) *Push-Pull tester, bending attachment*, (e) dan (f) *Push-Pull tester, axial loading*, (g) *Cantilever type rotating bending tester*

Sumber : Dr. Oğuzhan Yılmaz (2004:11)

Benda uji yang digunakan pada umumnya mempunyai penampang lingkaran atau segi empat dengan ujung lebih tebal sebagai tempat penjepitan agar patahan yang terjadi berkurang pada bagian ini dan bagian yang terpengaruh oleh pembebanan bagian tengah diberi ukuran khusus. Untuk benda uji specimen kekuatan lelah telah diatur pada ASTM standar E606-92 sebagai berikut



Gambar 2.12 Bentuk dan ukuran standar specimen uji kekuatan lelah

Sumber : ASTM E606-92 (1998)

2.8 Alat Uji Kelelahan

Alat uji kelelahan atau umumnya dikenal sebagai mesin uji lelah dapat diklasifikasikan dalam berbagai pandangan seperti: tujuan pengujian, jenis tegangan, sumber tegangan, karakteristik pengoperasian, jenis pembebanan, dan lain lain. Urutan yang paling tepat dari alternatif memilih sebuah sistem klasifikasi tergantung pada siapa yang akan menggunakan. Salah satu sistem mungkin lebih disukai oleh produsen alat uji dan pekerja riset lainnya.

Klasifikasi yang pertama yaitu, jenis alat uji berdasarkan tujuannya:

- 1.) Alat uji kelelahan dengan tujuan umum
- 2.) Alat uji kelelahan dengan tujuan khusus

Hampir sama dengan alat uji kelelahan umum, tetapi dengan tambahan alat bantu sesuai dengan tujuan khususnya, seperti pada:

- Frekuensi tinggi
- Lingkungan yang beresiko korosi
- Temperatur tinggi atau rendah
- Tingkat pengujian *multi-stress*
- Dilatasi temperatur yang menghasilkan tambahan pembebanan
- Pembebanan yang berulang-ulang

Klasifikasi yang kedua yaitu jenis alat uji berdasarkan jenis pembebanan:

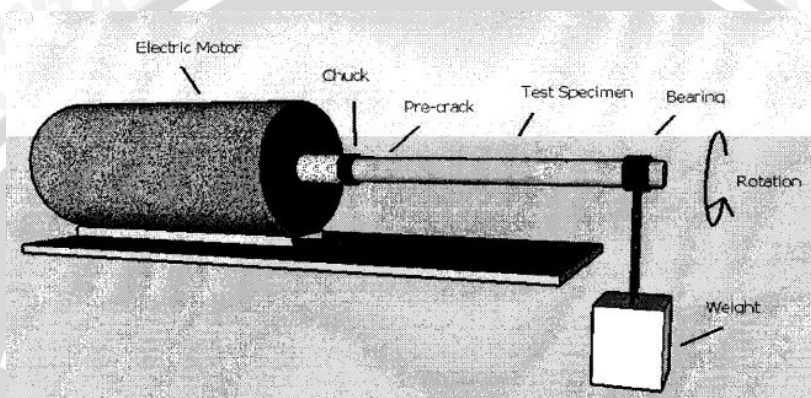
- 1.) Pembebanan aksial
- 2.) Pembebanan berulang-ulang
- 3.) Pembebanan berputar
- 4.) Beban torsi
- 5.) Pembebanan biaxial dan triaxial
- 6.) Kombinasi pembebanan dan torsion

2.9 Rotating Bending Fatigue Tester

Rotating bending fatigue tester merupakan alat uji kelelahan yang memiliki prinsip kerja pembebanan pada spesimen uji yang berputar. Alat ini dirancang pertama kali oleh Wohler, seorang Jerman yang menganalisa kegagalan pada as roda kereta api. Beliau merancang sebuah alat uji yang sederhana untuk mengetahui pembebanan maksimal pada as roda kereta api pada saat diberikan beban berat.

Pembebanan yang diberikan pada alat ini bervariasi tergantung pada nilai *tensile strength* suatu spesimen pengujian. Disamping itu, putaran yang diberikan pada spesimen pengujian adalah konstan, sehingga gaya putar dan torsi yang dikenakan pada spesimen uji tidak mempengaruhi proses pembebanan.

Rotating bending fatigue tester merupakan alat pengujian kelelahan yang bersifat *low cost test*. Pengujian ini cukup sederhana dan hanya membutuhkan instalasi alat pengujian dengan komponen yang umum. Bagian utama dari *Rotating bending fatigue tester* yaitu motor listrik, *chuck*, poros, dan *bearing* seperti terlihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Konstruksi sederhana *rotating bending fatigue tester*

Sumber : Spinal Rod Fatigue Testing and Analysis (2008:8)

Proses terjadinya patah pada spesimen adalah diawali dengan proses retakan melingkar pada suatu titik hingga proses patah di inti batang spesimen. Urutan proses terjadinya patah terjadi secara merata pada permukaan lingkaran batang spesimen, yaitu:

- *Pre crack*

Terjadi retakan awal pada permukaan benda uji kelelahan. Proses ini terjadi dengan waktu yang sangat lama dimulai saat awal pengujian.

- *Heat tint*

Permukaan benda uji mulai mengalami kenaikan suhu. Pada benda uji berbahan besi (*ferro*) biasanya terjadi perubahan warna permukaan.

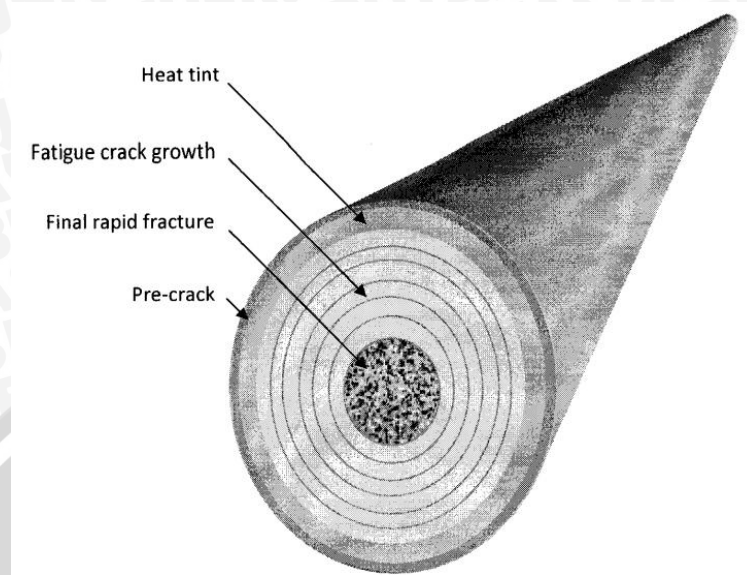
- *Fatigue crack growth*

Pada proses ini perambatan retakan terjadi secara cepat dan arah rambatan cenderung menuju ke pusat batang uji kelelahan.

- *Final rapid fracture*

Proses ini merupakan lanjutan dari proses perambatan retakan menuju bagian pusat silinder atau batang hingga menyebabkan patah (*fracture*).

Urutan proses tersebut terlihat pada Gambar 2.14 yang terjadi pada sebuah spesimen uji *Rotating bending fatigue tester*.



Gambar 2.14 Permukaan spesimen pengujian yang mengalami proses lelah pada *rotating bending fatigue tester*

Sumber : Spinal Rod Fatigue Testing and Analysis (2008:9)

2.10 Hipotesa

Kecepatan putar poros memiliki pengaruh dalam nilai hasil pengujian kelelahan. Semakin tinggi putaran akan mengakibatkan semakin kecilnya nilai siklus kekuatan lelah pada nilai batas masing-masing tegangan pada alat uji kelelahan *rotating bending* tipe *cantilever*.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah penelitian eksperimental nyata (*true experimental research*) yang bertujuan untuk mengetahui nilai batas tegangan pada alat uji kelelahan *rotating bending* tipe *cantilever* terhadap variasi pembebanan. Dengan asumsi variabel yang lain konstan. Kajian literatur dari berbagai sumber baik dari buku, jurnal yang ada di perpustakaan maupun dari internet juga dilakukan untuk menambah informasi yang diperlukan.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Tempat yang digunakan untuk melakukan penelitian dilakukan pada bulan Desember 2012 adalah:

- Laboratorium Pengecoran Logam Teknik Mesin Universitas Brawijaya untuk pengambilan data alat uji kelelahan.
- Laboratorium Pengujian Bahan Teknik Mesin Universitas Brawijaya untuk pengujian tarik spesimen.

3.3 Variabel Penelitian

Terdapat tiga variabel dalam penelitian ini, yaitu variabel bebas, variabel terikat, variabel terkontrol.

3.3.1 Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang mempengaruhi nilai variabel terikat, besarnya ditentukan oleh peneliti dan harganya divariasikan untuk mendapatkan hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat dari objek penelitian. Variabel bebas yang digunakan adalah kecepatan putar poros pada alat uji kelelahan yaitu: 2800rpm, 2500rpm, dan 2200rpm.

3.3.2 Variabel Terikat

Variabel terikat merupakan variabel yang besarnya bergantung pada variabel bebas yang diberikan. Adapun variabel terikat dalam penelitian ini adalah: Nilai batas tegangan

3.3.3 Variabel Terkontrol

Variabel terkontrol adalah variabel yang dijaga konstan selama penelitian, variabel yang dijaga konstan dalam penelitian ini adalah:

- Material spesimen Al6061
- Pengujian pada suhu ruangan yang konstan
- Pembebanan yang diberikan sebesar 48 MPa, 36 MPa, 24 MPa, dan 12 MPa.

3.4 Peralatan dan Bahan Penelitian

3.4.1 Peralatan yang digunakan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *Stopwatch*

Alat yang digunakan untuk mengukur lama waktu yang dibutuhkan spesimen uji *fatigue* untuk menerima beban bending hingga patah.



Gambar 3.1 *Stopwatch*

2. Jangka sorong

Alat yang digunakan untuk mengukur dimensi spesimen uji kelelahan dengan spesifikasi sebagai berikut:

Merk, Bahan : Mitutoyo, Jepang

Batas ukur : 0 – 150 mm

Ketelitian : 0,05 mm



Gambar 3.2 Jangka sorong

3. Mesin bubut T.U. CNC 2A

Spesifikasi mesin:

Merk, Buatan : EMCO, Austria

Tegangan : 220 – 240 V

Daya : 700 W

Frekwensi : 50/60 Hz



Gambar 3.3 Mesin bubut T.U. CNC 2A

4. Alat uji tarik

Spesifikasi alat yang digunakan

Mesin Uji Tarik

Merk : MFL Piuf-Und Me Bystome GmbH D 6800 Manheim

Kapasitas : 100 KN

Tipe : UPD 10



Gambar 3.4 Mesin uji tarik

5. Alat uji kelelahan tipe *rotating bending* tipe *cantilever*



Gambar 3.5 Alat uji *rotating bending* tipe *cantilever*

Spesifikasi alat:

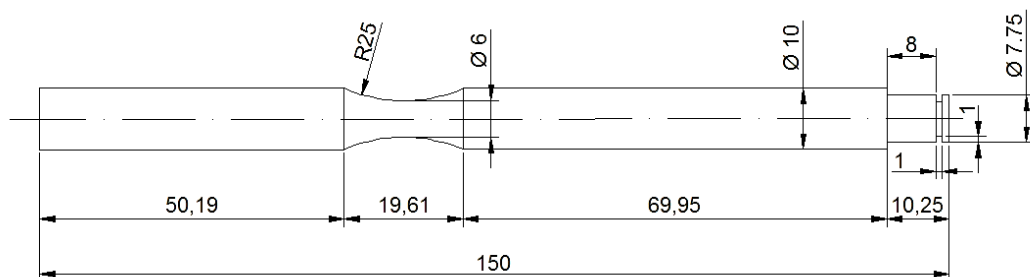
- Tipe motor listrik : *Single phase induction motor*
- Daya motor : 0,5 HP
- Voltase motor : 220 V
- Kecepatan putar : 2800 rpm (max)
- Diameter Poros : 300 mm

3.4.2 Bahan yang digunakan

Bahan spesimen yang digunakan adalah Al 6061 atau yang dikenal dengan Aluminium paduan Al-Mg-Si dengan komposisi sebagai berikut:

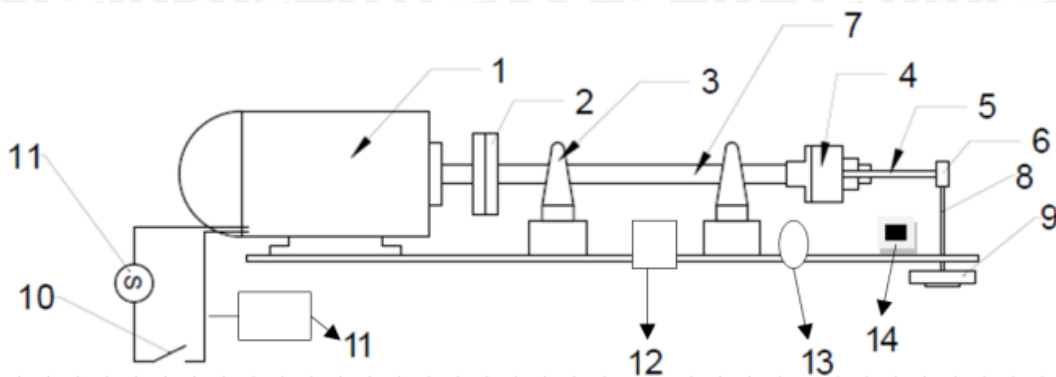
97,63% Al; 0,661% Si; 1,023% Mg

3.5 Dimensi Spesimen Uji Kelelahan



Gambar 3.6 Dimensi spesimen dan keterangannya (Satuan: mm)

3.6 Instalasi Alat Uji Kelelahan *Rotating Bending Tipe Cantilever* (ASTM E606-92)



Gambar 3.7 instalasi alat uji *fatigue*

Keterangan instalasi alat uji *fatigue*:

1. Motor listrik
2. *Flexible coupling*
3. *Bearing*
4. *Chuck*
5. Spesimen
6. *Bearing beban*
7. Poros
8. Batang beban
9. Beban
10. Saklar
11. Sumber listrik
12. Indikator siklus
13. Indikator waktu
14. Sensor patahnya spesimen
15. *Slider Trafo*

3.7 Prosedur Penelitian

3.7.1 Prosedur persiapan bahan uji

Langkah-langkah yang diambil dalam mempersiapkan bahan uji atau spesimen penelitian ini adalah:

- 1) Studi literatur
- 2) Menyiapkan bahan pengujian
- 3) Melakukan pemotongan bahan sesuai ukuran standar pengujian kelelahan

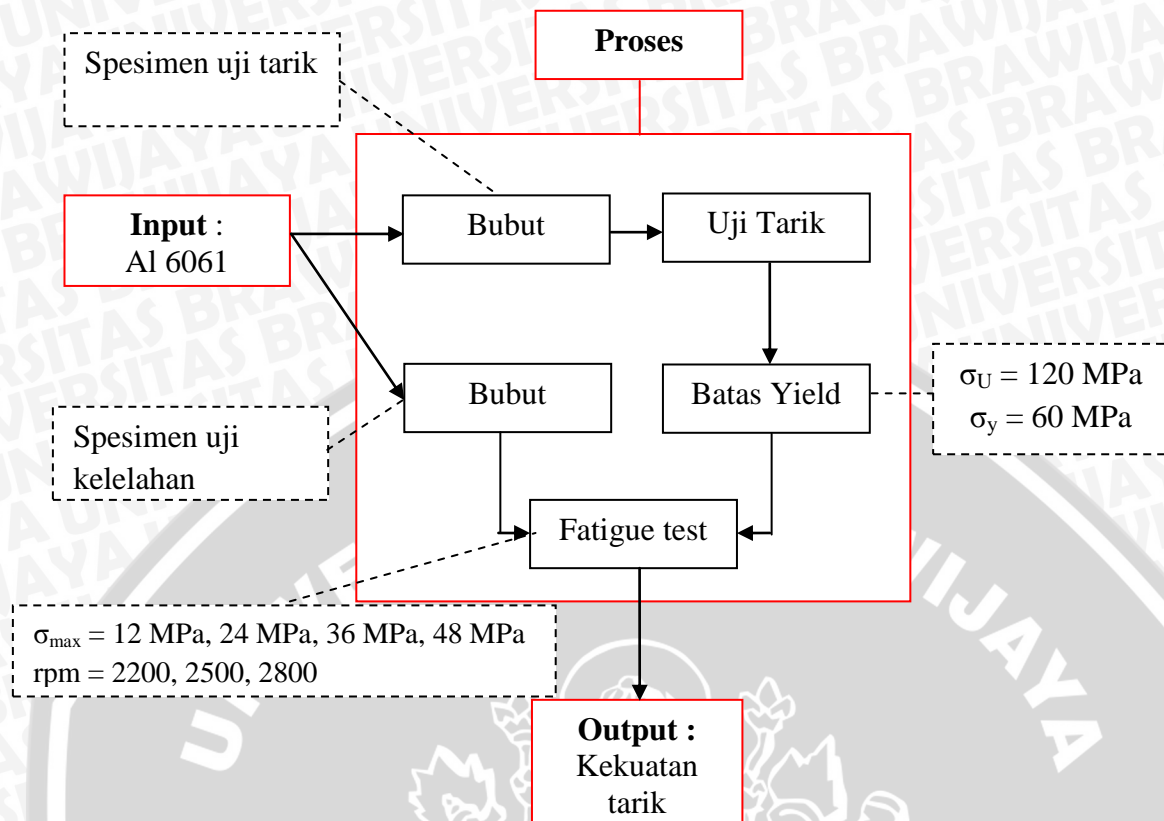
- 4) Membuat *haur glass* pada masing-masing spesimen pengujian melalui proses permesinan.
- 5) Melakukan pengujian tarik, untuk mengetahui nilai tegangan *yield* (σ_y) dari spesimen pengujian.
- 6) Menentukan variabel nilai tegangan dibawah tegangan *yield*.
- 7) Melakukan pengujian kelelahan pada spesimen uji kelelahan untuk mendapatkan besar nilai kelelahan sebenarnya.

3.7.2 Prosedur pengambilan data

Dari spesimen yang sudah disiapkan dan diuji nilai yieldnya lalu dilakukan pengambilan data pada alat uji kelelahan *rotating bending* tipe *cantilever* dengan langkah sebagai berikut:

- 1) Pengujian spesimen
 - a. Menyiapkan alat uji kelelahan
 - b. Mengatur *slider trafo* untuk mendapatkan kecepatan putar poros 2800rpm
 - c. Menyiapkan spesimen pengujian
 - d. Melakukan pengujian kelelahan dengan pembebanan 48 MPa
 - e. Melakukan pengulangan langkah kerja 1b-1d selama 3 kali
 - f. Melakukan pengulangan langkah kerja 1b-1d untuk pengujian spesimen dengan pembebanan 36 Mpa, 24 MPa, dan 12 MPa.
 - g. Melakukan pengulangan langkah kerja 1a-1f untuk pengujian spesimen dengan kecepatan putar 2500rpm dan 2200 rpm.
- 2) Pengolahan data
 - a. Membuat tabel hubungan variabel putaran pada batas nilai tegangan terhadap jumlah siklus dan waktu yang dibutuhkan untuk membuat siklus menjadi patah.
 - b. Membuat diagram S-N
 - c. Menghitung banyaknya siklus pada masing-masing variabel putaran pada tiap pembebanan.
- 3) Membandingkan data hasil pengujian spesimen antar variasi putaran
- 4) Menganalisa data
- 5) Mengambil kesimpulan

3.8 Diagram Sistem Produksi



Gambar 3.8 Diagram sistem produksi

3.9 Rancangan Penelitian

Rancangan penelitian ini akan mencari pengaruh faktor variasi putaran pada alat uji kelelahan *rotating bending* tipe *cantilever* terhadap nilai batas tegangan. Dimana faktor variasi pembebanan terdiri dari 3 faktor. Rancangan penelitian dari penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.1 sebagai berikut:

Table 3.1 Rancangan analisa nilai batas tegangan terhadap variasi pembebanan

Putaran (rpm)	Pembebanan		
	Y ₁ MPa	Y ₂ MPa	Y ₃ MPa
2800	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃
2500	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃
2200	X ₃₁	X ₃₂	X ₃₃

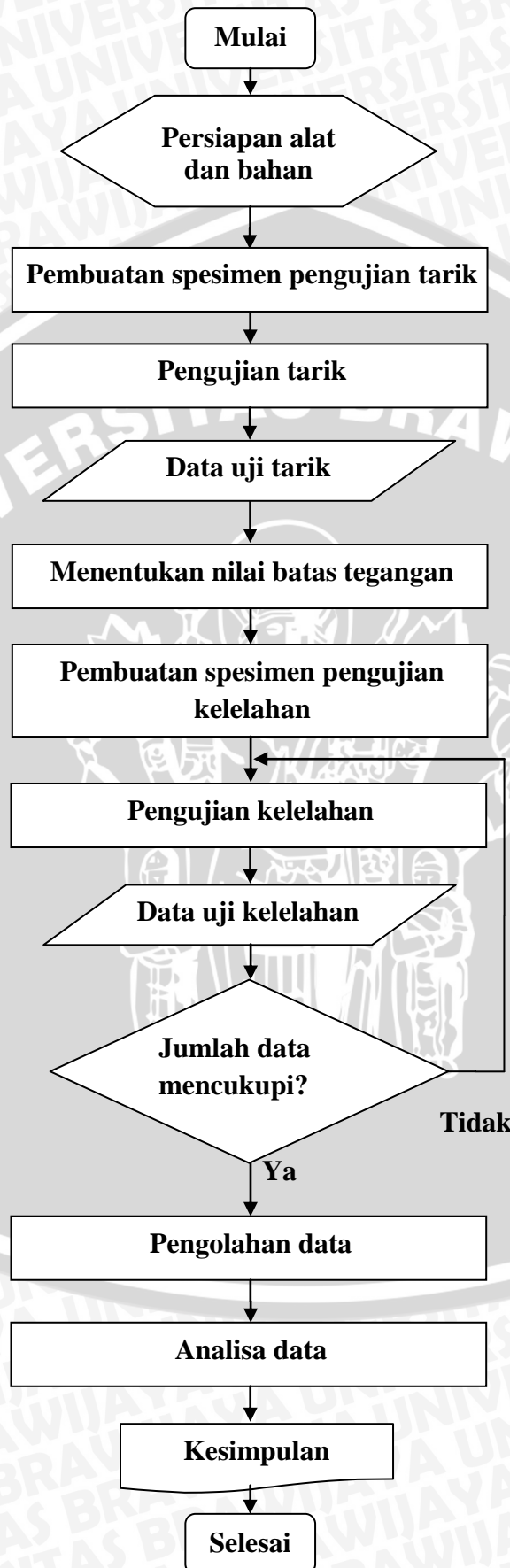
dengan:

Y_i = Data tegangan yield ke-i yang ditentukan berdasarkan pengujian tarik

X_i = Data pengamatan yang berupa data jumlah siklus putaran pada perlakuan variasi putaran ke-i dan besar tegangan yield ke-j

3.10 Diagram Alir Peneletian

Langkah-langkah yang dilakukan dijelaskan dalam diagram alir dibawah ini:



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Pengujian

Dari hasil pengujian dengan menggunakan alat uji kelelahan *rotating bending type cantilever* didapatkan data berupa jumlah siklus dan waktu (menit) yang di butuhkan spesimen untuk menerima beban hingga patah. Data tersebut diambil dengan variasi putaran poros 2800 rpm, 2500 rpm, dan 2200 rpm, serta dengan berat pembebanan yang berasal dari tiga titik tegangan bending maksimum yaitu 48 MPa, 36 MPa, 24 MPa, dan 12 MPa. Pengambilan data dilakukan sebanyak tiga kali pada setiap tegangan dan kecepatan putar poros. Spesimen yang digunakan adalah Al 6061, dengan bentuk serta ukuran yang sama . Data pengujian kelelahan pada spesimen dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut ini:

Tabel 4.1 Data Umur Lelah Hasil Pengujian *Fatigue* (siklus)

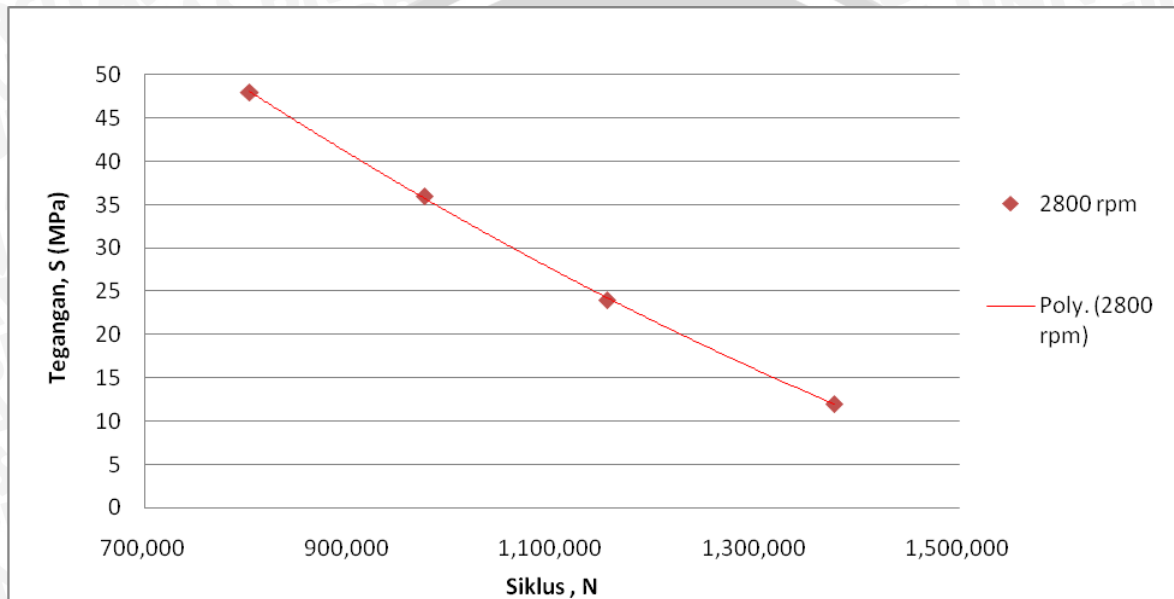
Kecepatan putar poros (rpm)	Tegangan bending maksimum (MPa)	Beban (gram)	Rata-rata lama patah (menit)	Rata-rata siklus (putaran)
2800	48	1178	291,9835	803.064
	36	883	336,684	974.661
	24	588	401,9183	1.153.754
	12	294	496,1463	1.376.680
2500	48	1178	338,5367	852.851
	36	883	410,8363	996.708
	24	588	516,0744	1.255.043
	12	294	542,202	1.392.740
2200	48	1178	429,9186	1.003.079
	36	883	455,269	1.099.525
	24	588	600,2376	1.296.781
	12	294	653,1003	1.479.267

Dari data pada Tabel 4.1 dapat diketahui kecenderungan pengaruh kecepatan putar poros alat uji kelelahan *rotating bending type cantilever* terhadap jumlah siklus yang dihasilkan hingga spesimen uji kelelahan patah. Rata - rata siklus yang paling sedikit

terjadi pada pengujian kelelahan dengan putaran poros 2800 rpm dan tegangan bending maksimum 48 MPa sebesar 803.604 siklus. Jumlah rata - rata siklus yang paling banyak terjadi dan pengujian kelelahan dengan putaran poros 2200 rpm pada tegangan bending maksimum 12 MPa sebesar 1.479.267 siklus.

4.2 Analisa Diagram S-N

4.2.1 Diagram S-N pengujian dengan kecepatan putar poros 2800 rpm



Gambar 4.1 Diagram S-N pengujian dengan kecepatan putar poros 2800 rpm

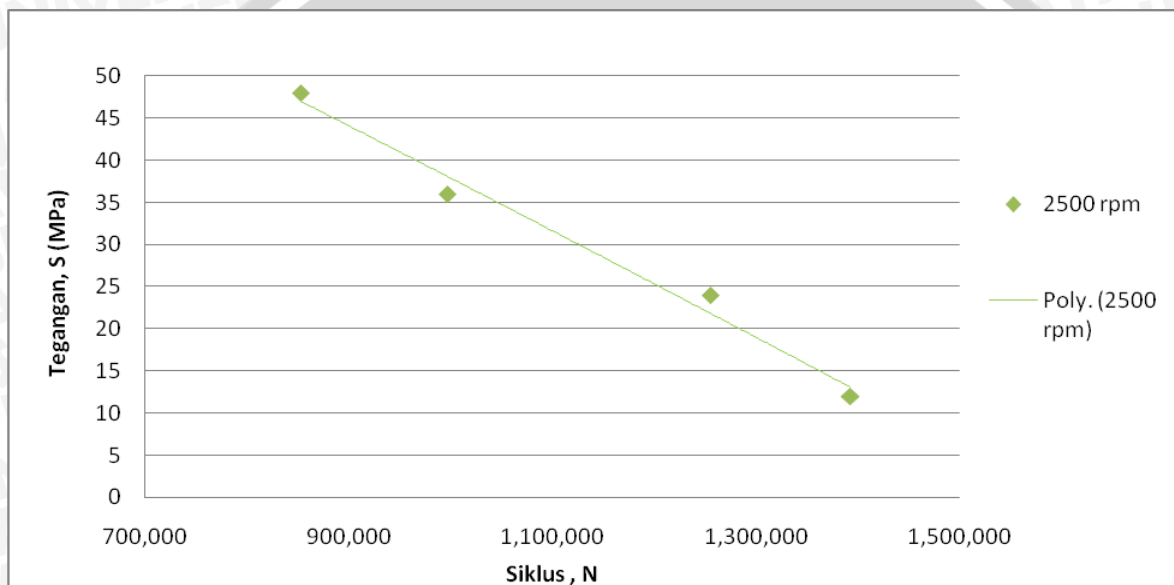
Dari data diagram S-N di atas dapat diketahui hubungan antara tegangan (MPa) yang diberikan pada spesimen pengujian dan jumlah siklus pada variasi kecepatan putar motor 2800 rpm. Jumlah rata - rata siklus pembebanan paling kecil terdapat pada pembebanan 48 MPa yaitu sebesar 821.345 siklus. Jumlah rata - rata siklus pembebanan paling besar terdapat pada pembebanan 12 MPa yaitu sebesar 1.320.417 siklus.

Dari diagram S-N pengujian kelelahan *rotating bending type cantilever* dengan kecepatan putar poros 2800 rpm memiliki kecenderungan menurun seiring dengan semakin besarnya pembebanan mulai dari 48 MPa, 36 MPa, 24 MPa hingga 12 MPa. Hal ini disebabkan semakin besar beban pada spesimen pengujian kelelahan maka akan menghasilkan tegangan yang semakin tinggi sehingga jumlah siklus yang dibutuhkan agar spesimen mencapai titik leleh atau menghasilkan patah akan semakin banyak.

Secara teoritis besarnya tegangan pada alat uji kelelahan *rotating bending type cantilever* atau besar pembebanan mempengaruhi banyaknya siklus yang terjadi sesuai dengan pendapat Abrianto Akuan dalam bukunya yang membahas mengenai kelelahan

logam, di mana pembebanan yang berbeda akan menghasilkan tegangan amplitudo yang berbeda pula. Hasil penelitian menunjukkan alat uji kelelahan pada Laboratorium Pengecoran Logam Universitas Brawijaya telah sesuai secara teoritis, di mana pembebanan yang semakin kecil dengan tegangan yang kecil pula akan menghasilkan batas lelah yang semakin besar, sehingga spesimen pengujian akan menghasilkan patah pada waktu yang semakin lama dan jumlah siklus yang semakin besar pada kecepatan putaran poros 2800 rpm.

4.2.2 Diagram S-N pengujian dengan kecepatan putar poros 2500 rpm



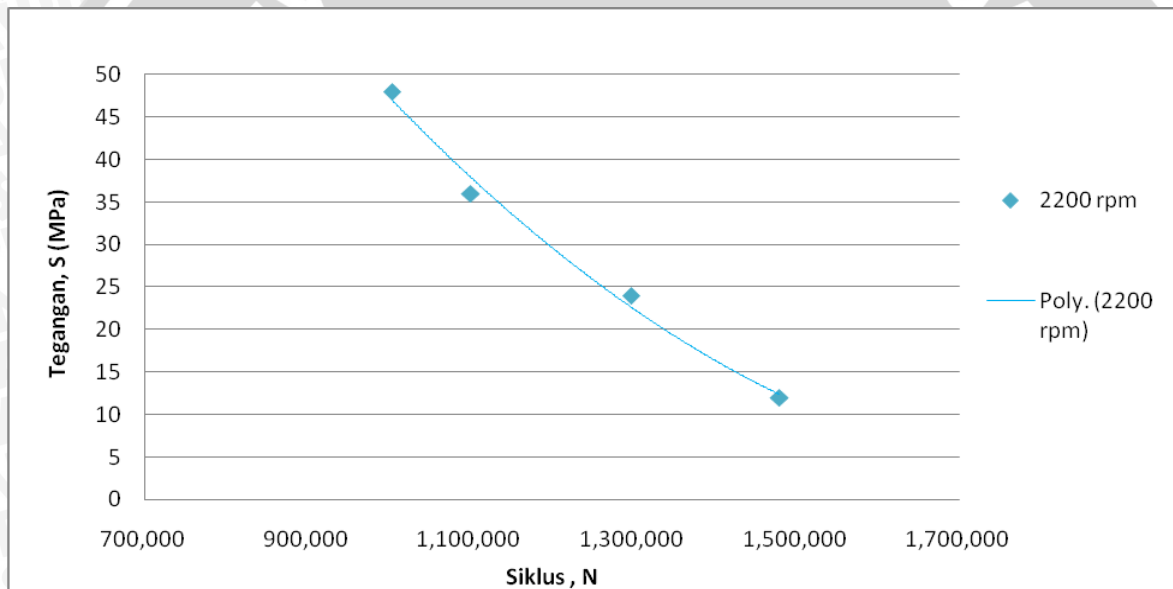
Gambar 4.2 Diagram S-N pengujian dengan kecepatan putar poros 2500 rpm

Dari data diagram S-N di atas dapat diketahui hubungan antara tegangan (MPa) yang diberikan pada spesimen pengujian dan jumlah siklus pada variasi kecepatan putar motor 2500 rpm. Jumlah rata-rata siklus pembebanan paling kecil terdapat pada pembebanan 48 MPa yaitu sebesar 852.851 siklus. Jumlah rata-rata siklus pembebanan paling besar terdapat pada pembebanan 12 MPa yaitu sebesar 1.392.740 siklus.

Dari diagram S-N pengujian kelelahan *rotating bending type cantilever* dengan kecepatan putar poros 2500 rpm memiliki kecenderungan menurun seiring dengan semakin besarnya pembebanan mulai dari 48 MPa, 36 MPa, 24 MPa hingga 12 MPa. Hal ini disebabkan semakin besar beban pada spesimen pengujian kelelahan maka akan menghasilkan tegangan yang semakin tinggi sehingga jumlah siklus yang dibutuhkan agar spesimen mencapai titik lelah atau menghasilkan patah akan semakin banyak.

Secara teoritis besarnya tegangan pada alat uji kelelahan *rotating bending type cantilever* atau besar pembebanan mempengaruhi banyaknya siklus yang terjadi sesuai dengan pendapat Abrianto Akuan dalam bukunya yang membahas mengenai kelelahan logam, di mana pembebanan yang berbeda akan menghasilkan tegangan amplitudo yang berbeda pula. Hasil penelitian menunjukkan alat uji kelelahan pada Laboratorium Pengecoran Logam Universitas Brawijaya telah sesuai secara teoritis, di mana pembebanan yang semakin kecil dengan tegangan yang kecil pula akan menghasilkan batas lelah yang semakin besar, sehingga spesimen pengujian akan menghasilkan patah pada waktu yang semakin lama dan jumlah siklus yang semakin besar pada kecepatan putaran poros 2500 rpm.

4.2.3 Diagram S-N pengujian dengan kecepatan putar poros 2200 rpm



Gambar 4.3 Diagram S-N pengujian dengan kecepatan putar poros 2200 rpm

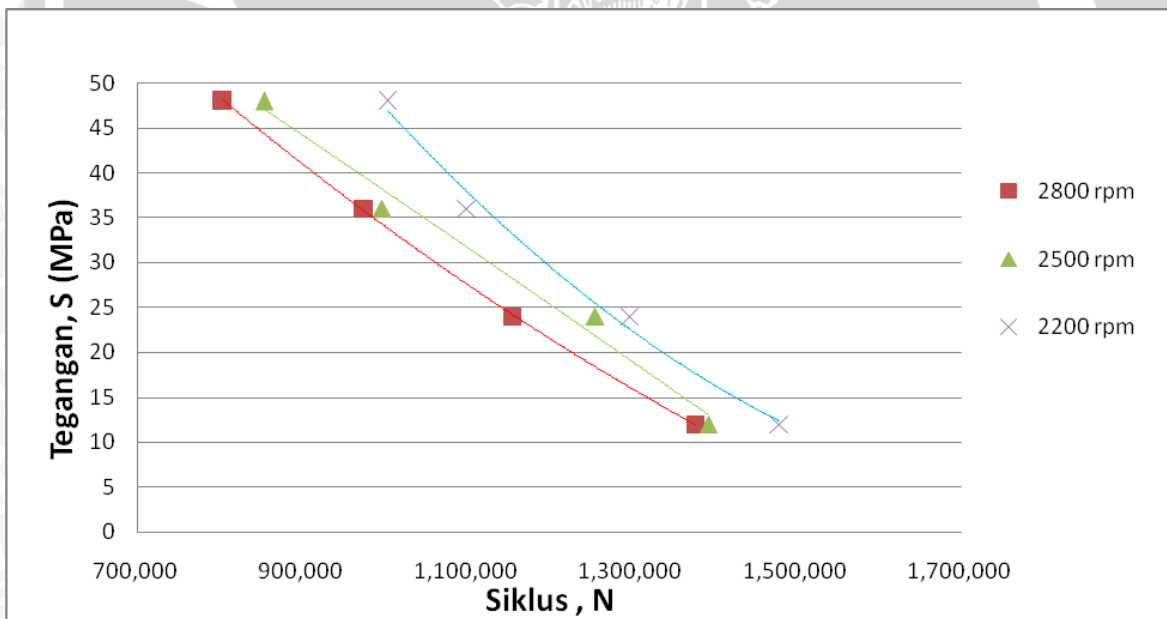
Dari data diagram S-N di atas dapat diketahui hubungan antara tegangan (MPa) yang diberikan pada spesimen pengujian dan jumlah siklus pada variasi kecepatan putar motor 2200 rpm. Jumlah rata-rata siklus pembebanan paling kecil terdapat pada pembebanan 48 MPa yaitu sebesar 1.003.079 siklus. Jumlah rata-rata siklus pembebanan paling besar terdapat pada pembebanan 12 MPa yaitu sebesar 1.479.267 siklus.

Dari diagram S-N pengujian kelelahan *rotating bending type cantilever* dengan kecepatan putar poros 2200 rpm memiliki kecenderungan menurun seiring dengan semakin besarnya pembebanan mulai dari 48 MPa, 36 MPa, 24 MPa hingga 12 MPa. Hal ini disebabkan semakin besar beban pada spesimen pengujian kelelahan maka akan

menghasilkan tegangan yang semakin tinggi sehingga jumlah siklus yang dibutuhkan agar spesimen mencapai titik lelah atau menghasilkan patah akan semakin banyak.

Secara teoritis besarnya tegangan pada alat uji kelelahan *rotating bending type cantilever* atau besar pembebanan mempengaruhi banyaknya siklus yang terjadi sesuai dengan pendapat Abrianto Akuan dalam bukunya yang membahas mengenai kelelahan logam, di mana pembebanan yang berbeda akan menghasilkan tegangan amplitudo yang berbeda pula. Hasil penelitian menunjukkan alat uji kelelahan pada Laboratorium Pengecoran Logam Universitas Brawijaya telah sesuai secara teoritis, di mana pembebanan yang semakin kecil dengan tegangan yang kecil pula akan menghasilkan batas lelah yang semakin besar, sehingga spesimen pengujian akan menghasilkan patah pada waktu yang semakin lama dan jumlah siklus yang semakin besar pada kecepatan putaran poros 2200 rpm.

4.2.4 Diagram S-N



Gambar 4.4 Diagram S-N

Dari data pada diagram di atas dapat diketahui hubungan antara tegangan (MPa) dan siklus dalam variasi putaran motor. Pada pembebanan 48 MPa rata - rata nilai siklus terbanyak terdapat pada variasi putaran poros 2200 rpm, yaitu sebesar 907.403 siklus. Sedangkan rata - rata nilai siklus paling kecil terdapat pada variasi putaran poros 2800 rpm, yaitu sebesar 821.345 siklus.

Pada pembebanan 36 MPa rata - rata nilai siklus terbanyak terdapat pada variasi putaran poros 2200 rpm, yaitu sebesar 1.008.951 siklus. Sedangkan rata - rata nilai siklus paling kecil terdapat pada variasi putaran poros 2800 rpm, yaitu sebesar 978.219 siklus.

Pada pembebanan 24 MPa rata - rata nilai siklus terbanyak terdapat pada variasi putaran poros 2200 rpm, yaitu sebesar 1.230.023 siklus. Sedangkan rata - rata nilai siklus paling kecil terdapat pada variasi putaran poros 2800 rpm, yaitu sebesar 1.189.341 siklus.

Pada pembebanan 48 MPa rata - rata nilai siklus terbanyak terdapat pada variasi putaran poros 2200 rpm, yaitu sebesar 1.464.421 siklus. Sedangkan rata - rata nilai siklus paling kecil terdapat pada variasi putaran poros 2800 rpm, yaitu sebesar 1.320.417 siklus.

Secara teoritis besarnya tegangan akibat pembebanan dan kecepatan putar poros pada alat uji kelelahan *rotating bending type cantilever* atau disebut juga frekuensi pembebanan mempengaruhi banyaknya siklus yang terjadi. Hasil penelitian melalui pengujian alat uji kelelahan pada Laboratorium Pengecoran Logam Universitas Brawijaya telah sesuai secara teoritis, di mana besar tegangan yang semakin kecil menimbulkan besar tegangan amplitudo yang semakin kecil sehingga menghasilkan batas lelah yang semakin besar dan akhirnya spesimen pengujian akan menghasilkan patah pada waktu yang semakin lama dan jumlah siklus yang semakin besar. Karena dibutuhkan siklus yang semakin besar untuk melewati batas deformasi plastisnya.

Begitu pula dengan besarnya frekuensi pembebanan akibat perbedaan kecepatan putar juga berpengaruh terhadap banyaknya siklus yang terjadi. Semakin besar putaran maka tegangan amplitudo yang dihasilkan akan meningkat karena adanya pembebanan berulang-ulang yang semakin cepat. Hal ini menyebabkan batas lelah semakin kecil sehingga dibutuhkan sedikit siklus untuk melewati daerah deformasi plastis dan mengakibatkan patah.

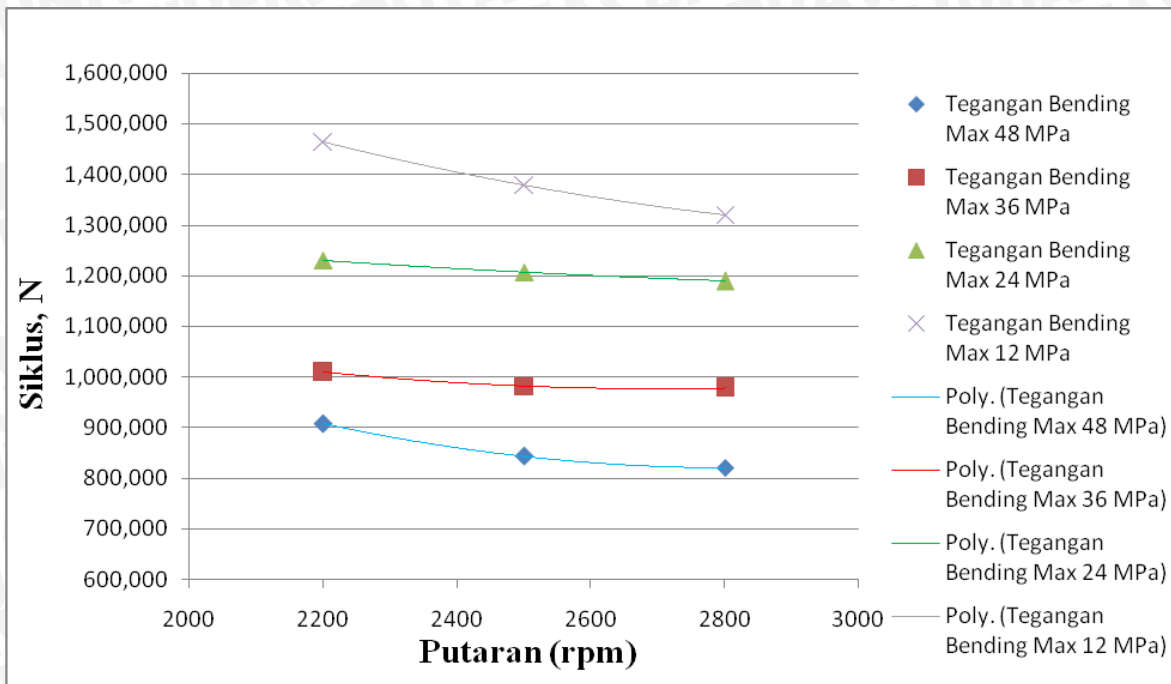
Dari data grafik di atas dapat disimpulkan melalui rumus persamaan yang didapat dari pengolahan persamaan regresi logaritma, yaitu:

$$S = -89.2 \ln(n) + 1279$$

dimana: n = jumlah siklus

S = Besar batas tegangan

4.3 Grafik Hubungan Putaran dan Siklus



Gambar 4.5 Grafik Hubungan Putaran dan Siklus

Dari data pada diagram di atas dapat diketahui hubungan antara jumlah siklus dan putaran (rpm) dalam variasi pembebanan. Pada pembebanan 48 MPa rata - rata nilai siklus terbanyak terdapat pada variasi putaran poros 2200 rpm, yaitu sebesar 907.403 siklus. Sedangkan rata - rata nilai siklus paling kecil terdapat pada variasi putaran poros 2800 rpm, yaitu sebesar 821.345 siklus.

Pada pembebanan 36 MPa nilai rata - rata siklus terbanyak terdapat pada variasi putaran poros 2200 rpm, yaitu sebesar 1.008.951 siklus. Sedangkan rata - rata nilai siklus paling kecil terdapat pada variasi putaran poros 2800 rpm, yaitu sebesar 978.219 siklus.

Pada pembebanan 24 MPa rata - rata nilai siklus terbanyak terdapat pada variasi putaran poros 2200 rpm, yaitu sebesar 1.230.023 siklus. Sedangkan rata - rata nilai siklus paling kecil terdapat pada variasi putaran poros 2800 rpm, yaitu sebesar 1.189.341 siklus.

Pada pembebanan 48 MPa rata - rata nilai siklus terbanyak terdapat pada variasi putaran poros 2200 rpm, yaitu sebesar 1.464.421 siklus. Sedangkan rata - rata nilai siklus paling kecil terdapat pada variasi putaran poros 2800 rpm, yaitu sebesar 1.320.417 siklus.

Secara teoritis besarnya putaran poros pada alat uji kelelahan *rotating bending type cantilever* atau disebut juga frekuensi pembebanan, mempengaruhi banyaknya siklus yang terjadi. Hasil penelitian menunjukkan alat uji kelelahan pada laboratorium pengecoran logam Universitas Brawijaya telah sesuai secara teoritis, di mana frekuensi pembebanan

yang semakin besar akan menghasilkan batas lelah yang semakin kecil, sehingga spesimen pengujian akan menghasilkan patah pada waktu dan jumlah siklus yang semakin kecil. Hal ini terjadi pada seluruh seluruh variasi pembebanan, terlihat pada grafik seluruhnya memiliki kecenderungan yang sama pada saat meningkatnya frekuensi pembebanan atau kecepatan putaran poros.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang sudah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

- Peningkatan kecepatan putar poros alat uji kelelahan *rotating bending* tipe *cantilever* atau frekuensi pembebanan dan peningkatan tegangan akan menurunkan jumlah siklus dan waktu (menit) yang di butuhkan spesimen untuk menerima beban hingga patah.
- Jumlah rata - rata siklus yang paling sedikit terjadi pada pengujian kelelahan dengan putaran poros 2800 rpm dan tegangan bending maksimum 48 MPa serta jumlah rata - rata siklus yang paling banyak terjadi dan pengujian kelelahan dengan putaran poros 2200 rpm pada tegangan bending maksimum 12 MPa.

5.2 Saran

- Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui nilai ketidakpastian dari alat uji kelelahan *rotating bending* type *cantilever* yang terdapat pada Laboratorium Pengecoran Logam Universitas Brawijaya.
- Diharapkan ada penyempurnaan konstruksi dari alat uji kelelahan *rotating bending* type *cantilever*.

DAFTAR PUSTAKA

- Adams, Thomas M. 2002. *Guide for Estimation of Measurement Uncertainty in Testing*. A2LA
- Akuan, Abrianto. 2007. *Kelelahan Logam*. Bandung: Diktat Kuliah Teknik Metalurgi UNJANI.
- Alaneme, K. K. 2011. *Design of a Cantilever – Type Rotating Bending Fatigue Testing Machine*. Nigeria: Federal University of Technology
- ASM Handbook Volume 8. 2000 *Fatigue, Creep Fatigue, and Thermomechanical Fatigue Life Testing*, Materials Park, OH. ASM International
- Bannantine, Julie A. *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*. New Jersey: Prentice Hall
- Bell, Stephanie. 1999. *Measurement Good Practice Guide*. Middlesex: National Physical Laboratory
- Brandolisio, Daniele. 2009. *Rotating Bending Machine for High Cycle Fatigue Testing*. Gent: KaHo University Sint-Lievent Ghent
- Coleman, H.W. & Steele, W.G. 2009. *Experimentation, Validation, and Uncertainty Analysis for Engineers*. John Wiley & Sons, Inc.
- ISO. 1993. *Guide to Expression of Uncertainty in Measurement*. International Organization of Standardization. Geneva
- Kalpakjian, Scope. 1989. *Manufacturing Engineering and Technology*. USA : Addison Wesley Publish Company
- Lee, Yung-Li. 2005. *Fatigue Testing and Analysis*. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann
- Mini, Martha. 2007. *Analisa Ketidakpastian Alat Uji Kekuatan Sabuk Daggu Helm*. Tesis tidak diterbitkan. Surabaya: Program Pasca Sarjana Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Muste, Marian. 2009. *Guidelines for The Assessment of Uncertainty of Hydrometric Measurement*. Iowa City: World Meteorological Organization
- Torowati. 2007. *Penentuan Nilai Ketidakpastian Pengukuran Pipet Gondok*. Urania volume 13. Tangerang: Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir
- VAMAS Technical Working Area 13. Low Cycle Fatigue. 2003. *A Procedure For The Measurement of Machine Alignment In Axial Testing*. Euro Test Solution Ltd
- Weibull, W. 1960. *Fatigue Testing and Analysis of Results*. California: Pergamon Press INC

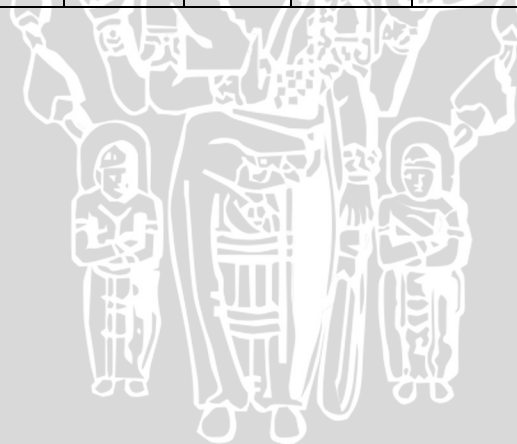
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LAMPIRAN



Lampiran 1. Data Hasil Pengujian

Kecepatan putar poros (rpm)	Tegangan Bending Maksimum (MPa)	Beban (gram)	Data 1		Data 2		Data 3		Rata-Rata	
			Lama Patah (menit)	Jumlah Siklus	Lama Patah (menit)	Jumlah Siklus	Lama Patah (menit)	Jumlah Siklus	Lama Patah (menit)	Jumlah Siklus
2800	48,4	1178	293,3375	821.345	284,473	789.427	298,14	798.421	291,9835	803.064
	36,3	883	349,364	978.219	324,196	952.204	336,492	993.560	336,684	974.661
	24,2	588	424,765	1.189.341	408,964	1.176.759	372,026	1.095.16 2	401,9183	1.153.754
	12,1	294	471,58	1.320.417	562,71	1.389.245	454,149	1.420.37 7	496,1463	1.376.680
2500	48,4	1178	337,422	843.556	348,67	870.433	329,518	844.564	338,5367	852.851
	36,3	883	392,897	982.243	441,798	1.012.524	397,814	995.358	410,8363	996.708
	24,2	588	482,6892	1.206.723	521,877	1.253.691	543,657	1.304.71 5	516,0744	1.255.043
	12,1	294	551,653	1.397.132	543,621	1.380.276	531,332	1.400.81 2	542,202	1.392.740
2200	48,4	1178	412,456	907.403	446,83	1.120.357	430,47	981.477	429,9186	1.003.079
	36,3	883	458,614	1.008.951	475,538	1.247.759	431,655	1.041.86 8	455,269	1.099.525
	24,2	588	559,101	1.230.023	632,89	1.374.985	608,722	1.285.33 6	600,2376	1.296.781
	12,1	294	665,646	1.464.421	656,415	1.495.243	637,24	1.478.13 7	653,1003	1.479.267





Lampiran 2. Uji Komposisi pada Aluminium 6061

FROM : FAX NO. : Oct. 30 2012 09:59AM P1

KUM-04

INSPECTION CERTIFICATE No 11.9586

EN 10204 - 3.1

Consigner:		Quantity: 29								
Consignee:		Net Weight, kg.: 1422								
Contract number: V1263-S PO-KL M-01/170111 part 1		Specification No: V1263								
Article number:		Lot No: 1 Package No: 715210								
Description of Goods: Sheet		Requirements on the Products:								
Grade of Product	Dimensions, inch/mm	Material conforms to quality of alloy: 6061 T651								
	6.000X1216.2X2438.4	Product conforms to all requirements of: ASTM B209-07 This product conforms to European Union RoHS Directive 2002/95/EC								
Mechanical Properties										
The Condition of Tested Standards	Lot Number	Cast Number	Number of Tests	Tensile Strength		Yield Strength (0.2% offset)		Elongation, %		Hardness, HB
				ksi	ksi	ksi	ksi	min	max	
Required				min	max	min	max	min	max	
	670190	13-6158	5	45.2	48.7	41.0	42.5	12.0	14.0	
Chemical Composition, %										
Element	Silicon Si	Iron Fe	Copper Cu	Manganese Mn	Magnesium Mg	Chromium Cr	Nickel Ni	Zinc Zn	Titanium Ti	Zirconium Zr
Required	0.4-0.6	0.7	0.15-0.40	0.15	0.8-1.2	0.04-0.35	-	0.25	0.15	-
Contents	0.66	0.22	0.21	0.08	1.01	0.05	-	0.08	0.08	-
Element	Ti+Zr	Al	Tin Sn	Bismuth Bi	Plumbum Pb	Mn+Cr	Cu	Other Elements		Al
Required	-	-	-	-	-	-	-	Each	Total	remainder
Contents	-	-	-	-	-	-	-	0.06	0.15	remainder
								0.06	0.15	remainder
Other Tests										
Method	Macro-structure	Micro-structure	L/SI	Electro-conductivity	SCF	Contents H2 of metals em3/100gr				
Result										

