

**PENGARUH RPM PENGELASAN TERHADAP FATIGUE CRACK
GROWTH RATE PADA A6061 ONE-SIDED CHAMFER FRICTION
WELD JOINTS**

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONSTRUKSI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**ILHAM ZAIDAN
NIM. 175060200111039**

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2022



LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH RPM PENGELASAN TERHADAP *FATIGUE CRACK*
GROWTH RATE PADA *A6061 ONE-SIDED CHAMFER FRICTION***

WELD JOINTS

**SKRIPSI
TEKNIK MESIN KONSENTRASI KONSTRUKSI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



ILHAM ZAIDAN
NIM. 175060200111039

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing pada
tanggal 03 Januari 2022:

DOSEN PEMBIMBING I

DOSEN PEMBIMBING II

Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng.
NIP. 19750710 199903 1 004

Moch. Syamsul Ma'arif, ST., MT.
NIP. 19710726 200012 1 001

Mengetahui,
Ketua Program Studi S1

Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP. 19740930 200012 1 001



PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan, dan makalah ilmiah yang diteliti dan diulas dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya, tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata didalam Naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 3 Januari 2022



Ilham Zaidan
NIM. 175060200111039





UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA

SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : 3/UN10.F07.12.11/PP/2022

Sertifikat ini diberikan kepada :

ILHAM ZAIDAN

Dengan Judul Skripsi :

PENGARUH RPM PENGELASAN TERHADAP FATIGUE CRACK GROWTH RATE
PADA AG061 ONE-SIDED CHAMFER FRICTION WELD JOINTS

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi $\leq 20\%$, dan dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal

Malang, 3 Januari 2022

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin

MEGA NUR SASONGKO, ST., MT., Dr. Eng
NIP. 19740930 200012 1 001



Prof. Mardiat B. Darmadi, Ir., MT., Ph.D
NIP. 19670518 199412 1 001

IDENTITAS TIM PENGUJI SKRIPSI

JUDUL SKRIPSI:

Pengaruh RPM Pengelasan Terhadap *Fatigue Crack Growth Rate* pada
 A6061 *One-Sided Chamfer Friction Weld Joints*

Nama Mahasiswa : Ilham Zaidan

NIM : 175060200111039

Program Studi : Teknik Mesin

Konsentrasi : Konstruksi

KOMISI PEMBIMBING

Pembimbing I : Dr.Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng.

Pembimbing II : Moch. Syamsul Ma'arif, ST., MT.

TIM DOSEN PENGUJI

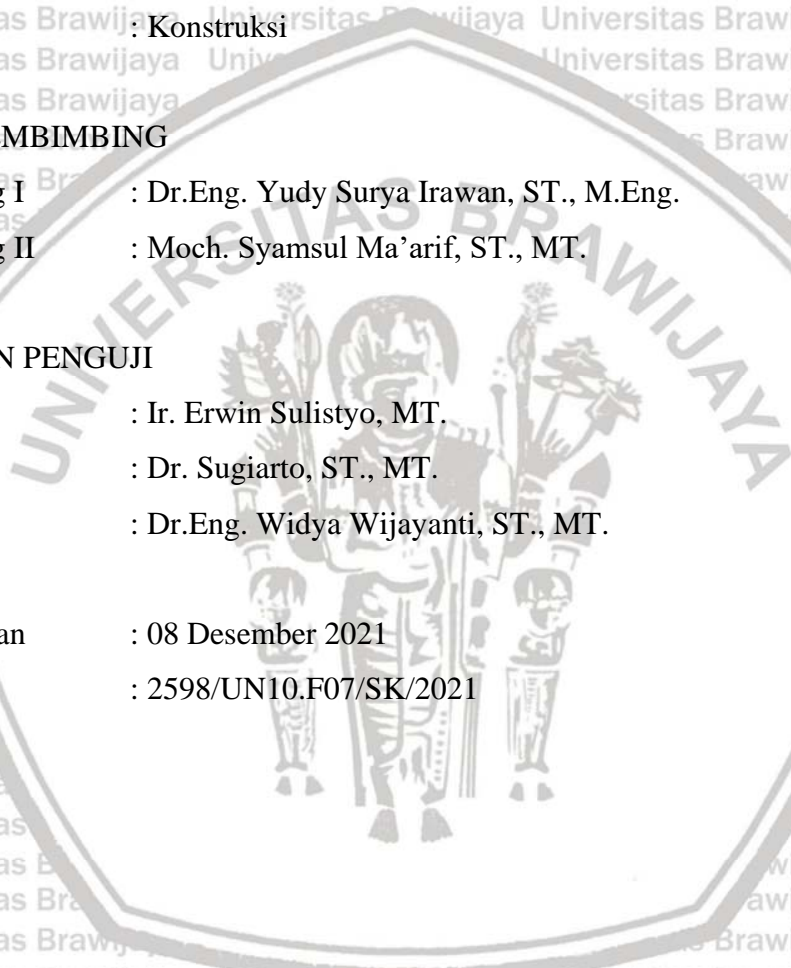
Ketua : Ir. Erwin Sulistyو, MT.

Sekretaris : Dr. Sugiarto, ST., MT.

Anggota : Dr.Eng. Widya Wijayanti, ST., MT.

Tanggal Ujian : 08 Desember 2021

SK Penguji : 2598/UN10.F07/SK/2021





UNIVERSITAS BRAWIJAYA



*Teriring Ucapan Terima Kasih
Karya tulis ini saya persembahkan kepada:
Ibu dan Alm. Ayah tercinta*

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada kehadirat Allah SWT, atas rahmat, karunia dan segala limpahan berkat-Nya penulis dapat melaksanakan Penyusunan laporan proposal Skripsi dengan judul “**Pengaruh Rpm Pengelasan Terhadap *Fatigue Crack Growth Rate* pada A6061 One-Sided Chamfer Friction Weld Joints**” ini dapat terselesaikan dengan baik.

Dalam melaksanakan penyusunan laporan proposal skripsi ini, penulis mendapatkan motivasi, dukungan dan bantuan dari berbagai pihak dalam menghadapi hambatan yang dialami penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan proposal skripsi ini. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada yang terhormat:

1. Bapak dan Ibu tercinta yang telah mendukung dan mendoakan penulis sehingga dapat menyelesaikan proposal skripsi dan kuliah dengan lancar.
2. Bapak Prof. Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D., selaku Ketua Jurusan sekaligus KKDK Konstruksi Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
3. Bapak Teguh Dwi Widodo, ST., M.Eng., Ph.D., selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
4. Bapak Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT., selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
5. Bapak Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng., selaku dosen pembimbing I yang telah memberikan bimbingan, arahan, dorongan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan laporan proposal skripsi ini.
6. Bapak Moch. Syamsul Ma'arif, ST., MT., selaku dosen pembimbing II yang juga telah memberikan bimbingan, dan dorongan kepada penulis untuk dapat menyelesaikan proposal skripsi ini.
7. Segenap Staff Pengajar dan Staff Karyawan Jurusan Teknik Mesin dan Fakultas Teknik.
8. Jovidianto Soesilodewo selaku Teman Seperjuangan Skripsi.
9. Teman teman Mesin UB 2017 (M17) yang selalu memberi dukungan.
10. Teman teman asisten Laboratorium Fenomena Dasar Mesin Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
11. Semua pihak yang telah membantu terselesaikannya skripsi ini, yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa laporan skripsi ini tidak lepas dari kekurangan. Oleh sebab itu penulis menghargai saran dan masukan untuk kesempurnaan laporan proposal skripsi ini. Semoga laporan proposal skripsi ini dapat bermanfaat bagi banyak pihak, baik bagi penulis dan pembaca sekaligus bisa menjadi bahan acuan untuk penelitian selanjutnya.

Malang, Desember 2021

Penulis



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
RINGKASAN	xi
SUMMARY	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Sebelumnya	5
2.2 Aluminium	6
2.2.1 Sifat Mekanik Aluminium	8
2.2.2 Sifat Mampu Las Aluminium	8
2.3 <i>Friction Welding</i>	9
2.3.1 Definisi <i>Friction Welding</i>	9
2.3.2 Kelebihan <i>Friction Welding</i>	10
2.3.3 <i>Continous Drive Friction Welding</i> (CDFW)	11
2.3.4 <i>Similar Friction Welding</i>	11
2.4 Daerah Sambungan Las	11
2.5 <i>Chamfer</i>	12
2.6 <i>Fatigue</i>	13
2.7 Faktor Intensitas Tegangan (K)	16
2.8 Mekanisme Perambatan Retak	18
2.9 Hubungan Laju Perambatan Retak dan Faktor Intensitas Tegangan ($da/dN - \Delta K$)	19
2.10 Karakteristik Makroskopis Perambatan Retak Lelah	22
2.11 Alat Uji Kelelahan	22



2.12	Hipotesis	23
BAB III METODE PENELITIAN		
25		
3.1	Tempat dan Waktu Penelitian	25
3.2	Variabel Penelitian	25
3.2.1	Variabel Bebas	25
3.2.2	Variabel Terikat	26
3.2.3	Variabel Terkontrol	26
3.3	Spesifikasi Alat dan Bahan	26
3.3.1	Spesifikasi Alat	26
3.3.2	Bahan	31
3.3.3	Dimensi Spesimen	32
3.4	Instalasi Penelitian	32
3.4.1	Instalasi Mesin Bubut untuk Pengelasan Gesek	32
3.4.2	Instalasi Mesin Uji <i>Fatigue</i>	33
3.5	Prosedur Penelitian	34
3.5.1	Prosedur Pengelasan Gesek	34
3.5.2	Prosedur Pengambilan Data	35
3.5.3	Pengambilan Foto Makrostruktur	36
3.5.4	Pengambilan Foto Mikrostruktur	37
3.6	Diagram Alir Penelitian	38
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		
39		
4.1	Data Hasil Pengujian	39
4.2	Laju Perambatan Retak	44
4.3	Permukaan Patah Spesimen	51
4.4	Foto Mikrostruktur	53
BAB V PENUTUP		
Error! Bookmark not defined.		
5.1	Kesimpulan	55
5.2	Saran	55
DAFTAR PUSTAKA		
57		
LAMPIRAN		
61		



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Sistem Penamaan Paduan Aluminium	7
Tabel 3.1 Komposisi Kimia Aluminium A6061	31
Tabel 3.2 Variasi Penelitian.....	32
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Tarik.....	41
Tabel 4.2 Hasil Data Uji Laju Rambat Retak Lelah.....	43
Tabel 4.3 Data Hasil Perhitungan Diameter Butir.....	54



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Halaman ini sengaja dikosongkan



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Tahapan–Tahapan Las Gesek 9

Gambar 2.2 Skema *Countinuous Drive Friction Welding* 11

Gambar 2.3 Daerah *Zpl, Zpd, Zud* pada *Continuous Drive Friction Welding* 12

Gambar 2.4 *Chamfer* pada Benda Silinder 12

Gambar 2.5 Permukaan Patah pada Kegagalan *Fatigue* 13

Gambar 2.6 Tiga Siklus Tegangan *Fatigue* (A) Tegangan Terbalik (B) Tegangan Berulang (C) Tegangan *Irregular* atau Siklus Tegangan Acak 14

Gambar 2.7 Mode Perpatahan Broek 17

Gambar 2.8 Harga K_{IC} pada Daerah *Plane Stress Plane Strain* 18

Gambar 2.9 Mekanisme Perambatan Retak Lelah 18

Gambar 2.10 Kurva Karakteristik Perambatan Retak Elah $\log Da/Dn$ Terhadap Δk 20

Gambar 2.11 *Fatigue Crack Growth Rate Specimen* Dengan Retakan Pada Permukaan 20

Gambar 2.12 Skematik Spesimen Dengan Retak Permukaan Pada Momen *Bending* 21

Gambar 2.13 Permukaan Patah Lelah dari Baut 22

Gambar 2.14 *Cantilever Rotating Bending Fatigue Testing Machine* 23

Gambar 3.1 *Stopwatch* 26

Gambar 3.2 Jangka Sorong 27

Gambar 3.3 Mesin Bubut LTC-200 27

Gambar 3.4 Mesin Bubut Untuk Pengelasan 28

Gambar 3.5 *Power Hacksaw* 29

Gambar 3.6 Kamera 29

Gambar 3.7 *Thermogun* 30

Gambar 3.8 Mesin Uji *Fatigue* 30

Gambar 3.9 Mikroskop Olympus BH-2 31

Gambar 3.10 Dimensi Spesimen Las Gesek Dengan *Chamfer* 0° , dan 30° 32

Gambar 3.11 Skema Instalasi Mesin Bubut Untuk Pengelasan Gesek 32

Gambar 3.12 Skema Uji *Fatigue* 33

Gambar 3.13 Spesimen Uji Lelah 35

Gambar 3.14 *Fatigue Crack Growth Rate Specimen* Dengan Retakan pada Permukaan 35

Gambar 3.15 *Completely Reversed Stress Cycle* 35

Gambar 4.1 Grafik Suhu Pengelasan Tiap Perubahan BOL Perdetik 39

Gambar 4.2 Grafik *Heat Input* Teoretis 39



Gambar 4.3	Grafik Hubungan Antara Panjang Retak Dengan Siklus.....	44
Gambar 4.4	Grafik Hubungan Antara Da/Dn Dengan ΔK	45
Gambar 4.5	Grafik <i>Region</i> II Seluruh Variasi.....	46
Gambar 4.6	Grafik Garis Regresi Variasi Sudut Chamfer 0° 800 rpm.....	47
Gambar 4.7	Grafik Garis Regresi Variasi Sudut Chamfer 0° 1120 rpm.....	47
Gambar 4.8	Grafik Garis Regresi Variasi Sudut Chamfer 0° 1600 rpm.....	48
Gambar 4.9	Grafik Garis Regresi Variasi Sudut Chamfer 30° 800 rpm.....	48
Gambar 4.10	Grafik Garis Regresi Variasi Sudut Chamfer 30° 1120 rpm.....	49
Gambar 4.11	Grafik Garis Regresi Variasi Sudut Chamfer 30° 1600 rpm.....	49
Gambar 4.12	Foto Makro Patahan Spesimen <i>Fatigue Crack Growth Rate</i>	52
Gambar 4.13	Foto Struktur Mikro Sambungan Las Gesek A6061-(A) Chamfer 30° 1600 rpm (B) Tanpa Chamfer 800 rpm.....	54



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Grafik Temperatur – Waktu Pengelasan	61
Lampiran 2 Nilai <i>Heat Input</i>	64
Lampiran 3 Foto Spesimen Sambungan Las Gesek	65
Lampiran 4 Perambatan Retak	66
Lampiran 5 Patahan Hasil Uji <i>Fatigue</i>	69
Lampiran 6 Hasil Uji Kekasaran	70





UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Halaman ini sengaja dikosongkan

RINGKASAN

Ilham Zaidan, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, September 2021, Pengaruh RPM Pengelasan Terhadap *Fatigue Crack Growth Rate* pada A6061 *One-Sided Chamfer Friction Weld Joints*, Dosen Pembimbing: Yudy Surya Irawan, Moch. Syamsul Ma'arif.

Aluminium merupakan salah satu logam yang masih sering digunakan dalam proses manufaktur dikarenakan aluminium mudah dibentuk, tahan korosi, dan memiliki densitas yang rendah. Las gesek merupakan salah satu metode pengelasan yang cocok untuk Aluminium yang mempunyai konduktivitas termal yang tinggi. Menimbang fatigue merupakan fenomena kegagalan yang sering terjadi pada material terutama pada bagian sambungan, dilakukannya penelitian ini untuk meneliti tentang laju perambatan retak pada hasil las gesek *Continuous Drive Friction Welding* (CDFW) aluminium seri 6061.

Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan parameter optimum baik dari geometri maupun proses manufaktur untuk mendapatkan kualitas pengelasan terbaik. Parameter yang digunakan dalam penelitian ini adalah variasi sudut *chamfer* 0° dan 30° satu sisi diam dengan kecepatan putaran *spindle* 800 rpm, 1120 rpm, dan 1600 rpm pada salah satu benda kerja las gesek kemudian diberikan gaya tekan awal 7 kN hingga mencapai *burn of length* 3 mm dan *upset force* 21 kN selama 60 detik. Kemudian spesimen didesain menjadi spesimen uji lelah sesuai dengan standar ASTM. Spesimen diuji dengan mesin *cantilever rotary bending fatigue test* dengan rotasi 1400 rpm.

Hasil pengujian ini adalah nilai konstanta laju perambatan retak lelah variasi sudut *chamfer* 0° rpm 800 konstanta $C = 5,08E-08 \frac{\text{mm/siklus}}{(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^m}$ dan $m = 2.091$; variasi sudut *chamfer* 0° rpm 1120 konstanta $C = 2,05E-08 \frac{\text{mm/siklus}}{(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^m}$ dan $m = 2.253$; variasi sudut *chamfer* 0° rpm 1600 konstanta $C = 1,45E-09 \frac{\text{mm/siklus}}{(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^m}$ dan $m = 2.983$; variasi sudut *chamfer* 30° 800 rpm konstanta $C = 7,37E-10 \frac{\text{mm/siklus}}{(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^m}$ dan $m = 3.216$; variasi sudut *chamfer* 30° 1120 rpm konstanta $C = 3,81E-10 \frac{\text{mm/siklus}}{(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^m}$ dan $m = 3.342$; dan variasi sudut *chamfer* 30° 1600 rpm konstanta $C = 7,27E-11 \frac{\text{mm/siklus}}{(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^m}$ dan $m = 3.682$. Nilai di atas menunjukkan bahwa variasi sudut *chamfer* 30° 1600 rpm memiliki konstanta laju perambatan retak lelah yang paling lambat, sekaligus menunjukkan ketahanan yang paling tinggi terhadap perambatan retak lelah.

Kata Kunci: Aluminium 6061; Sudut Chamfer; Laju Perambatan Retak Lelah; Konstanta Paris



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Halaman ini sengaja dikosongkan

SUMMARY

Ilham Zaidan, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, Desember 2021, *Effect of Spindle Rotational Speed on Fatigue Crack Growth Rate in A6061 One-Sided Chamfer Friction Weld Joints*. Thesis Advisor : Yudy Surya Irawan, Moch. Syamsul Ma'arif.

Aluminum is one of the metals that still often used in the manufacturing process because aluminum is easy to form, has a good corrosion resistance, and low density. Friction welding is a method that is suitable for Aluminum which has high thermal conductivity. Considering that fatigue is a failure phenomenon that often occurs in materials, especially in the joint part, this study was conducted to examine the rate of crack propagation in the Continuous Drive Friction Welding (CDFW) aluminum series 6061.

This research was conducted to obtain optimal parameters both from the geometry and the manufacturing process to get the best quality of welding result. The parameters used in this study are 0° and 30° chamfer angles on one side at the stationary specimen with a spindle rotation speed of 800 rpm, 1120 rpm, and 1600 rpm on the rotating ones. The stationary specimen was given an initial compressive force of 7 kN until it reaches a burn of length 3 mm and upset force of 21 kN for 60 seconds. Then the specimens were processed into fatigue test specimens according to ASTM standards. The specimens were tested with a cantilever rotary bending fatigue test machine with a rotation of 1400 rpm.

The results of this test are the constant value of fatigue crack propagation rate variation of chamfer angle 0° 800 rpm constant $C = 5,08E-08 \frac{\text{mm/cycle}}{(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^m}$ and $m = 2.091$; variation of chamfer angle 0° 1120 rpm constant $C = 2,05E-08 \frac{\text{mm/cycle}}{(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^m}$ and $m = 2.253$; variation of chamfer angle 0° 1600 rpm constant $C = 1,45E-09 \frac{\text{mm/cycle}}{(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^m}$ and $m = 2.983$; variation of chamfer angle 30° 800 rpm constant $C = 7,37E-10 \frac{\text{mm/cycle}}{(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^m}$ and $m = 3.216$; variation of chamfer angle 30° 1120 rpm constant $C = 3,81E-10 \frac{\text{mm/cycle}}{(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^m}$ and $m = 3.342$; and the variation of the chamfer angle 30° 1600 rpm constant $C = 7,27E-11 \frac{\text{mm/sikus}}{(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^m}$ dan $m = 3.682$. All of those value above shows that fatigue crack propagation rate of 0° chamfer angle with 1600 rpm spindle speed, was found to be the slowest rate rather than any other variation. Which also shows that this variation has a better durability to fatigue crack growths.

Keywords: Aluminum 6061; Chamfer Angle; Fatigue Crack Growth Rate; Paris Constant



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Halaman ini sengaja dikosongkan



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kini di dunia industri dan perkembangan ilmu teknologi, tidaklah terlepas dari konstruksi permesinan. Konstruksi mesin dari pengertiannya merupakan proses perancangan, pembuatan, penyusunan serta *maintenance* dari mesin itu sendiri. Beberapa proses manufaktur tersebut diantaranya yaitu permesinan (*machining*), pengecoran (*casting*), dan pengelasan (*welding*).

Friction Welding adalah salah satu metode penyambungan *solid-state*. Metode pengelasan gesekan pertama kali dipatenkan pada tahun 1890-an (Nicholas, 2003). Metode ini memanfaatkan kesempatan untuk menghasilkan panas menggunakan gesekan pada kedua permukaan logam dan membuat sambungan logam (Nicholas, 2003). Kedua permukaan benda logam yang saling bersinggungan mengakibatkan panas, dimana panas tersebut terbentuk mendekati titik leleh dari bahan yang digunakan pada las gesek sehingga sisi yang bersinggungan akan menjadi plastis. Bentuk paling umum dari pengelasan gesekan adalah *rotary friction welding*; *linear friction welding*, dan *friction stir welding*. Ada dua jenis *rotary friction welding*, yang dikenal sebagai *continuous friction welding* atau *continuous drive friction welding* dan *inersia friction welding*.

Untuk pengujian kekuatan las, dapat digolongkan menjadi dua golongan, yaitu pengujian yang merusak benda hasil las, atau dengan kata lain *destructive test*, dan pengujian yang tidak merusak benda hasil las, yang disebut *nondestructive test* (Messler, 2004). Bahan yang banyak digunakan pada pengujian ini adalah aluminium. Material ini adalah salah satu material yang sering digunakan pada proses manufaktur karena memiliki kekuatan, konduktivitas listrik serta konduktivitas panas yang baik serta mudah dibentuk (Langer, 1990).

Pada sambungan las terdapat banyak hal yang mengakibatkan kegagalan atau kerusakan yang salah satunya dapat disebabkan oleh kelelahan. Kelelahan merupakan salah satu jenis kegagalan logam yang terjadi karena pemberian beban secara dinamis dan berulang-ulang. Kelelahan juga merupakan penyebab terbesar kegagalan logam dimana diperkirakan kurang lebih 90% kegagalan logam terjadi akibat kelelahan (Dieter, 1986).

Seperti yang diketahui kecepatan putaran *spindle* saat proses pengelasan memiliki pengaruh terhadap hasil pengelasan. Pengaruh terlihat baik dari deformasi yang dihasilkan serta pada *heat input* yang diterima. Pada beberapa penelitian sebelumnya, objektif peneliti

adalah untuk mendapatkan nilai FCGR pada hasil pengelasan dengan variasi geometri. Sedangkan untuk penelitian dengan penggunaan variasi proses pengelasan, objektif penelitian baru sampai pada kekuatan tarik dan kekuatan *fatigue* tanpa mendapatkan nilai *fatigue crack growth rate*. Oleh karena itu penulis berencana untuk melakukan penelitian pada bidang *fatigue fracture mechanics* terkhususnya *fatigue crack growth rate* (FCGR) pada sambungan hasil pengelasan, mengingat belum adanya penelitian yang berfokus pada pengaruh RPM sekaligus variasi geometri terhadap FCGR. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan parameter pengelasan dan variasi geometri terbaik untuk menghasilkan sambungan las dengan peningkatan *mechanical properties*.

Dalam penelitian ini material yang digunakan adalah Aluminium A6061 dikarenakan aluminium paduan tersebut banyak digunakan dalam industri kereta api, perkapalan, otomotif, dan dirgantara. Parameter yang divariasikan yaitu putaran spindle pengelasan pada sambungan *friction welding* dengan *chamfer* satu sisi dan tanpa penggunaan *chamfer* terhadap FCGR pada kondisi sebenarnya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang permasalahan yang dibahas pada penelitian ini adalah bagaimana pengaruh kecepatan putaran pengelasan pada *one-sided chamfer friction weld* joints terhadap laju perambatan retak lelah aluminium A6061.

1.3 Batasan Masalah

Batasan ruang lingkup pada penelitian ini adalah:

1. Material yang digunakan adalah A6061.
2. Pengelasan dilakukan dengan proses permesinan las gesek (*friction welding*).
3. Penggunaan *chamfer* satu sisi pada spesimen pengelasan.
4. Pengujian dilakukan yaitu pengujian laju perambatan retak lelah menggunakan *cantilever rotary bending machine fatigue test*.
5. Pengukuran dilakukan untuk menentukan laju perambatan retak lelah hasil pengujian.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui bagaimana pengaruh putaran spindle pada A6061 *one-sided friction weld joints* terhadap laju perambatan retak lelah.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat untuk peneliti selanjutnya:

1. Memanfaatkan teori perkuliahan terkhusus yang berhubungan dengan *fatigue and fracture mechanics*.
2. Menjadi sumber informasi, penambah wawasan pengetahuan bagi peneliti terutama mengenai *fatigue and fracture mechanics*, serta *friction welding*.
3. Menjadi sumber literatur untuk penelitian berikutnya terkait pengaruh parameter pengelasan terhadap laju perambatan retak lelah.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Irawan, dkk (2012) dengan penelitian yang berjudul “*Tensile Strength of Weld Joint Produced by Spinning Friction Welding of Round Aluminium A60601 Various Chamfer Angles*” menyimpulkan bahwa kekuatan tarik dipengaruhi oleh besar sudut *chamfer*. Sudut *chamfer* yang divariasikan yaitu 15°, 30°, 45°, 60° dan 70°. Hasil pengujian menunjukkan kekuatan tarik terbesar pada sudut *chamfer* 30°. Analisis mikrostruktur sambungan las menunjukkan luas HAZ kecil yang sebabkan kekuatan tarik maksimal, porositas sambungan las yang kecil dan luas daerah *fully plasticized zone* mempengaruhi kekuatan tarik.

Al Faizal., dkk (2014) dengan subjek uji material Al 6063-T6 melihat pengaruh dari putaran *spindle* terhadap kekuatan tarik dan kekasaran yang dihasilkan. Area sambungan dibagi menjadi tiga bagian, yaitu *center of weld* (pusat las) dan HAZ pada sisi material induknya. Sedangkan area pusat Las memiliki kekerasan dan kekuatan tarik paling tinggi. Kekerasan maksimum yang dicapai adalah sebesar 79 BHN, didapatkan dengan kecepatan putaran 1200 rpm.

Okzendo (2019), Kekuatan tarik sambungan las gesek pada Alumunium A6061 meningkat seiring mengecilnya sudut *chamfer* dan peningkatan kecepatan putaran. Rara rata nilai kekuatan Tarik yang paling tinggi didapatkan pada variasi sudut *chamfer* 30° pada kecepatan putaran 1600 rpm dengan nilai 220.93 N/mm². Serta untuk nilai kekuatan tarik yang paling rendah didapatkan pada variasi sudut *chamfer* 60° dengan kecepatan putaran 800 rpm dengan nilai 152.80 N/mm².

Irawan (2019), menyimpulkan bahwa penggunaan *chamfer* satu sisi dan *clamping* pada proses *friction welding* menghasilkan kekuatan tarik yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan spesimen tanpa *chamfer* dan *clamping*. Serta, spesimen pengelasan dengan kekuatan tarik yang tinggi memiliki laju perambatan retak yang rendah.

2.2 Aluminium

Aluminium merupakan salah satu logam yang paling banyak digunakan setelah baja.

Aluminium termasuk golongan IIA dalam sistem periodik unsur. Aluminium memiliki berat jenis $2,7 \text{ g/cm}^3$, memiliki nomor atom 13, memiliki titik lebur 660°C (Sofyan, 2010).

Karakteristik dari aluminium adalah:

1. Sifat mekanik

Sifat mekanik aluminium baik murni maupun paduan dipengaruhi oleh konsentrasi kandungan dan perlakuan yang diberikan.

2. Sifat mampu cor

Sifat aluminium yang menunjukkan kemampuan bahan logam untuk diolah dengan melalui proses pengecoran menjadi suatu produk.

3. Sifat mampu mesin

Sifat aluminium yang menunjukkan kemampuan untuk dibentuk dengan proses permesinan.

4. *Surface finish*

Proses yang dapat diperlakukan dengan berbagai lapisan tambahan pada permukaan aluminium seperti lapisan oksida.

5. Ketahanan Korosi

Daya tahan aluminium untuk menahan kerusakan pada bagian permukaan yang disebabkan oleh reaksi kimia.

6. Konduktivitas panas dan listrik

Konduktivitas panas adalah proses pemindahan energi panas dari temperatur tinggi ke temperatur rendah. Konduktivitas listrik adalah kemampuan material untuk menghantarkan listrik.

7. Sifat mampu las (*weldability*)

Kemampuan material untuk dapat dilas tanpa mengalami penurunan sifat-sifat yang dimiliki tanpa secara berlebihan.

Paduan aluminium diklasifikasikan menjadi dua kelas utama, yaitu aluminium tuang (*cast aluminium*) dan aluminium pengerjaan (*wrought aluminium*).

Tabel 2.1

Sistem Penamaan Paduan Aluminium

Aluminium pengerjaan (*wrought aluminium*)

1xxx	Al murni (99,0% min. Al)	Not age hardenable
2xxx	Al-Cu	Age hardenable
3xxx	Al-Mn	Not age hardenable
4xxx	Al-Si dan Al-Si-Mg	Age hardenable jika memiliki kandungan Mg
5xxx	Al-Mg	Not age hardenable
6xxx	Al-Mg-Si	Age hardenable
7xxx	Al-Zn	Age hardenable
8xxx	Al-Sn, Li	Age hardenable

Sumber: Askeland (2010)

Sifat-sifat umum dari paduan aluminium yang terdapat pada Tabel 2.1 (Kalpakjian, 1989):

1. Aluminium Murni, seri 1xxx
 - a. Kandungan aluminium murni 99%.
 - b. Ketahanan korosi baik
 - c. *Good thermal conductivity and electricity*
 - d. *Machinability*
 - e. *Low Strength*
2. Copper (Al-Cu), seri 2xxx
 - a. Kekuatan tinggi untuk ratio berat
 - b. Ketahanan korosi rendah
 - c. Sifat kurang mampu las
3. Manganese (Al-Mn), seri 3xxx
 - a. Ketahanan korosi baik
 - b. Kekuatan Tinggi,
 - c. *Good Machinability*
 - d. Kurang baik dalam mendapat perlakuan panas, sehingga dalam perbaikan *properties* hanya dengan cara *coldworking*
4. Silicon (Al-Si), seri 4xxx
 - a. Titik lebur rendah
 - b. Pembentukan film abu-gelap menjadi arang oksida
 - c. Kemampuan perlakuan panas kurang baik.
5. Magnesium (Al-Mg), seri 5xxx
 - a. Ketahanan korosi baik
 - b. Memiliki kekuatan menengah hingga tinggi,
 - c. Tidak memiliki kemampuan perlakuan panas.

6. Magnesium dan silikon (Al-Mg-Si), seri 6xxx
 - a. Kekuatan sedang
 - b. Memiliki kemampuan permesinan baik
 - c. Daya tahan korosi baik
 - d. Kemampuan diberi perlakuan panas
7. Zinc (Al-Zn), seri 7xxx
 - a. Memiliki kekuatan menengah hingga sangat tinggi,
 - b. Memiliki kemampuan perlakuan panas.

2.2.1 Sifat Mekanik Aluminium

Sifat-Sifat mekanik aluminium:

1. Kekerasan
Ukuran kemampuan sebuah material untuk menahan *force* tanpa mengalami deformasi plastis. (Callister, 2007).
2. Keausan (*wearness*)
Yaitu pengikisan yang terjadi pada material dikarenakan oleh menggunakan material tersebut atau lingkungan. Keausan merupakan salah satu hal yang memiliki pengaruh paling merusak pada logam (Avner, 1974)
3. Kekuatan (*Strength*)
Merupakan nilai kemampuan material untuk menahan tegangan tanpa menyebabkan *fracture*. (Callister, 2007).
4. Kelelahan (*Fatigue*)
Yaitu kecenderungan logam patah jika menerima tegangan atau beban secara berulang-ulang atau beban dinamis dan fluktuatif (Callister, 2007).

2.2.2 Sifat Mampu Las Aluminium

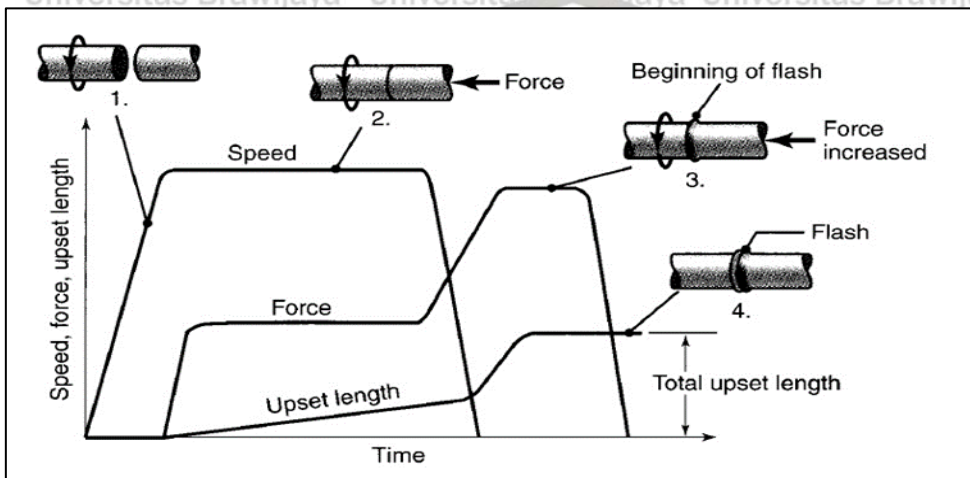
Berikut merupakan sifat mampu las aluminium, diantaranya:

1. Memiliki panas jenis dan daya hantar panas yang tinggi maka sukar untuk memanaskan dan mencairkan sebagian kecil.
2. Paduan aluminium memiliki berat jenis rendah, oleh karena itu membuat banyak zat-zat lain yang terbentuk selama pengelasan akan tenggelam. Keadaan itu membuat zat-zat yang tidak diinginkan terdapat didalamnya.
3. Titik lebur rendah, maka daerah yang kena pemanasan mudah mencair. (Askeland, 2010)

2.3 Friction Welding

2.3.1 Definisi Friction Welding

Friction welding adalah salah satu metode dalam pengelasan tekan. Prinsip dasar dari pengelasan sendiri adalah dengan cara memanaskan logam yang akan di las supaya logam tersebut dapat meleleh dan saling menempel. Dalam metode *friction welding*, bekerja dengan menggabungkan dua buah material dalam fasa padat yang dipengaruhi oleh kecepatan putar dari *spindle* dan tekanan secara aksial yang menghasilkan panas dari gesekan antara kedua material tersebut (AWS, 2010). Tahap las gesek dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Tahapan-tahapan las gesek
Sumber: Kalpakjian (2014)

Faktor yang mempengaruhi *friction welding* atau las gesek sebagai berikut:

1. Kecepatan Putaran

Kecepatan putaran merupakan salah satu faktor utama pada penelitian ini. Kecepatan putaran yang dimaksud adalah putaran spindle yang menahan benda kerja pada posisi tertentu selama proses pengelasan. Pada saat proses pengelasan gesek, putaran yang terjadi hanya pada salah satu sisi dari benda kerja. Dimana pada sisi yang lainnya akan dicekam dalam posisi diam.

2. Konduktivitas termal dari material.

Konduktivitas termal merupakan kemampuan material untuk menghantarkan panas. Dalam kata lain konduktivitas thermal juga bisa diartikan sebagai nilai laju perpindahan panas melalui suatu unit ketebalan persatuan luas. Nilai tinggi untuk konduktivitas thermal secara langsung menampilkan bahwa material tersebut merupakan sebuah konduktor yang baik. Pada pengelasan gesek, spesimen akan

bersentuhan dan menimbulkan perpindahan panas. Hal ini menunjukkan bahwa konduktivitas thermal material memiliki peran dalam menentukan hasil pengelasan.

3. Sifat mekanik dari bahan yang bergabung pada suhu tinggi.

Setiap material memiliki *mechanical properties* yang beragam pula. Perbedaan sifat ini akan memberikan efek yang berbeda atas pengelasan gesek yang dilakukan

4. Jumlah panas yang dihasilkan.

Parameter pengelasan yang ditetapkan akan menghasilkan total panas yang berbeda.

Hal ni akan memberikan perbedaan yang nyata pada karakteristik hasil las.

5. Gaya Gesek

Gaya gesek merupakan gaya yang diberikan, ataupun dengan kata lain bekerja disaat kedua permukaan spesimen pengelasan bersentuhan dan berputar.

6. Waktu Gesek

Waktu gesek adalah waktu yang menunjukkan lamanya gaya gesek pada saat proses pengelasan berlangsung.

2.3.2 Kelebihan *Friction Welding*

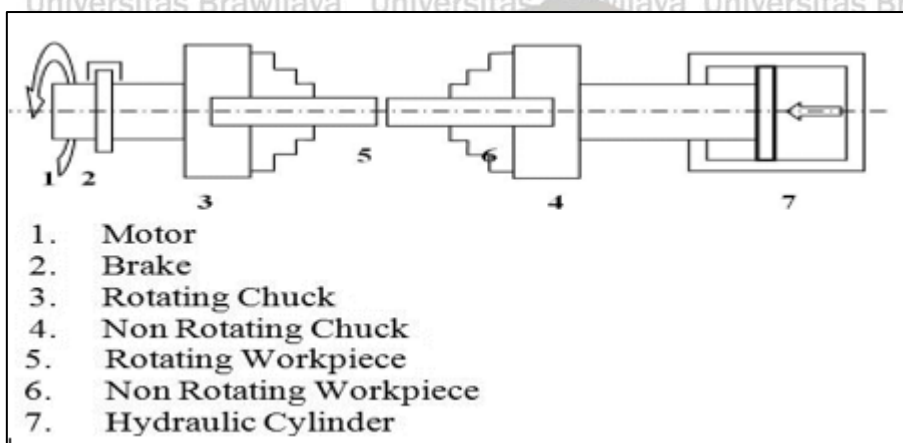
Friction Welding yang populer dalam dunia industri dikarenakan *friction welding* memiliki kemampuan yang tidak dapat digunakan pada metode pengelasan konvensional.

Berikut merupakan beberapa kelebihan dari *friction welding*, (Messler, 2004) , yaitu :

- Dapat digunakan untuk menyambungkan dua logam dengan material yang berbeda.
- Daerah HAZ dari proses pengelasan yang relatif lebih kecil dibanding pengelasan konvensional
- Pengelasan gesek membutuhkan energi yang lebih kecil.
- Pengelasan pada temperatur rendah dapat mempertahankan mikrostruktur dan sifat material yang dihasilkan dari proses pengelasan.
- Biaya relatif lebih murah
- Pemantauan pengelasan dapat dikontrol dengan mudah, karena pelaksanaannya saat ini dapat dilakukan secara otomatis
- Siklus pengelasan dapat dipantau secara otomatis oleh mesin

2.3.3 *Continous Drive Friction Welding (CDFW)*

CDFW merupakan pengelasan yang dilakukan dengan memanfaatkan panas yang berasal dari benda itu sendiri. Pengelasan dilakukan dengan benda kerja berputar pada satu sisi dan diam pada sisi lainnya. Mekanisme ini dimana satu benda diputar dengan kecepatan tinggi dan satu benda sisanya menekan benda yang berputar. Akibat penekanan tersebut timbul panas membuat partikel dari dua benda tersebut tercampur. Penekanan yang terjadi mengakibatkan partikel terdorong dan mengisi celah-celah kosong serta mengeluarkan udara. Dari proses tersebut menghasilkan penyambungan logam tanpa pencairan yang disebut *solid state process*. Skema CDFW dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Skema *continous drive friction welding*
Sumber: Sahin (2010)

2.3.4 *Similar Friction Welding*

Metode *Similar friction welding* mempunyai cara kerja yang hampir sama dengan metode pengelasan pada umumnya dan menggunakan material yang sama.

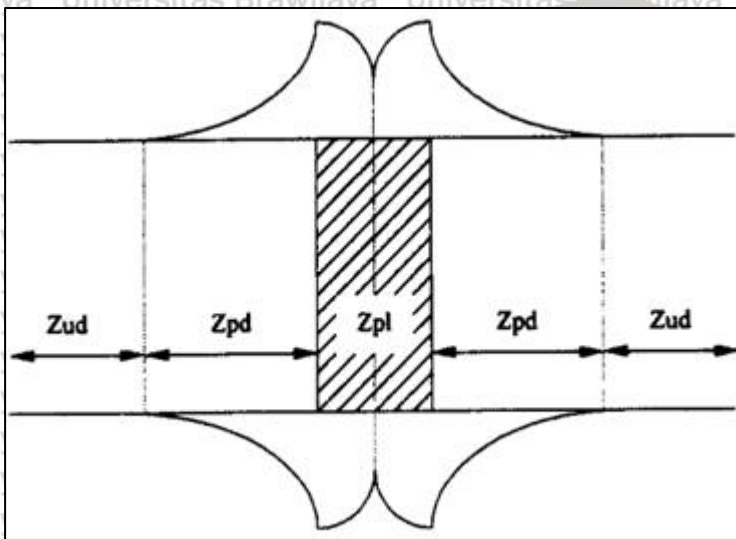
2.4 Daerah Sambungan Las

Pada proses pengelasan, panas yang dihasilkan pada paduan aluminium mengakibatkan pencairan sebagian, pelarutan padat, tergantung dari tinggi suhu daerah las. Nilai suhu akan mengakibatkan struktur mikro dan sifat mekanismenya berbeda dari logam awalnya. Struktur mikro pada HAZ dipengaruhi oleh tingkat *heat input* dan temperatur dimana zona ini bertumbuh (Kalpakjian, 2014)

Daerah HAZ pada pengelasan gesek dibagi menjadi beberapa bagian yaitu:

1. *Fully plasticized region (Zpl)* merupakan daerah sambungan yang tersambung secara sempurna

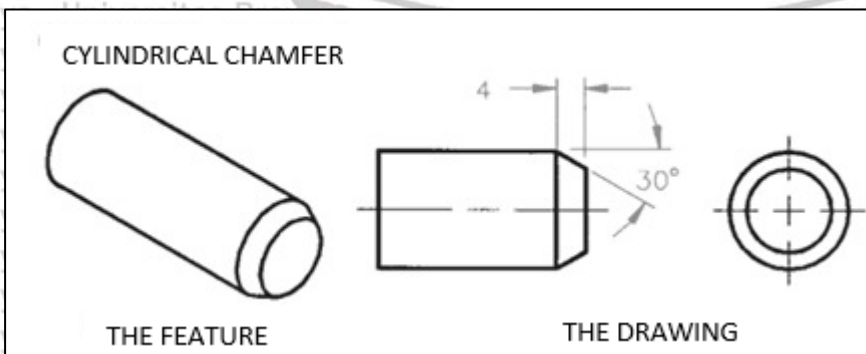
2. *Partly deformed region* (Zpd) merupakan daerah yang mengalami panas dan terdeformasi secara sebagian
 3. *Undeformed region* (Zud) adalah daerah yang tidak terpengaruh panas dikarenakan hasil sambungan las tersebut berupa rongga udara
- Semakin besar panas yang dihasilkan maka akan terbentuk daerah HAZ yang semakin besar pula, dimana akan mempengaruhi kekuatan dari sambungan las tersebut. Hal ini disebabkan karena permukaan pengelasan akan membuat butiran bertumbuh membesar sehingga menurunkan kekuatannya (Kalpakjian, 2014). Zona HAZ dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Daerah *zpl*, *zpd*, *zud*
 Sumber: Lin (1999)

2.5 Chamfer

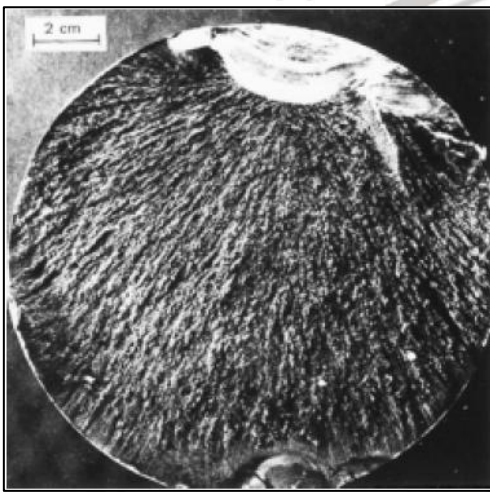
Menurut Madsen (2012), *chamfer* adalah relief sudut pada bagian ujung dari suatu benda. *Chamfer* pada Gambar 2.4 biasanya digunakan untuk menghilangkan bagian yang tajam pada ujung benda atau untuk membantu masuknya pin atau *thread*.



Gambar 2.4 *Chamfer* pada benda silinder
 Sumber: Madsen (2012)

2.6 Fatigue

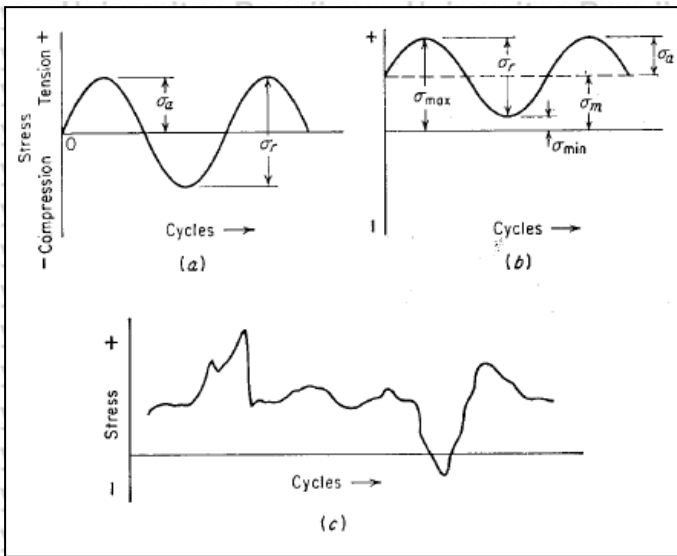
Fatigue adalah kecenderungan logam untuk patah jika menerima tegangan atau beban secara berulang-ulang atau beban dinamis dan fluktuatif (Callister, 2007). Logam yang dikenai tegangan berulang akan rusak pada tegangan yang jauh lebih rendah dibanding yang dibutuhkan untuk menimbulkan perpatahan pada penerapan beban tunggal. Kegagalan yang terjadi pada keadaan beban dinamis disebut kegagalan lelah atau *fatigue failures* (Dieter, 1986). Patah *fatigue* diawali dengan adanya retak pada bagian yang mengalami pembebanan secara terus-menerus. Dengan menjalarnya retak menjadi permukaan patahan seperti pada Gambar 2.5, maka luas permukaan yang tidak cacat menjadi berkurang sehingga akhirnya terjadi patahan.



Gambar 2.5 Permukaan patah pada kegagalan *fatigue*
Sumber: Callister (2001)

Terdapat 3 faktor utama yang dapat menyebabkan kegagalan *fatigue*, yaitu tegangan tarik maksimum yang tinggi, terjadi variasi fluktuasi yang cukup besar pada tegangan yang diberikan, dan jumlah siklus yang cukup besar pada tegangan yang diberikan. Variabel-variabel lain yang mempengaruhi kegagalan patah yaitu korosi, suhu, struktur metalurgi, tegangan sisa, dan lain-lain (Dieter, 1986).

Terdapat tiga siklus umum tegangan fluktuatif yang dapat menyebabkan *fatigue* pada Gambar 2.6, yaitu:



Gambar 2.6 Tiga siklus tegangan fatigue (a) tegangan terbalik (b) tegangan berulang (c) tegangan irregular atau siklus tegangan acak

Sumber: Dieter (1986)

1. Tegangan Terbalik

Pada siklus tegangan ini nilai maksimum dan minimum tegangan adalah sama. Tegangan tarik dianggap positif dan tegangan tekan dianggap negatif.

2. Tegangan Berulang

Pada siklus tegangan berulang, tegangan maksimum σ_{max} dan tegangan minimum σ_{min} tidak sama. Pada gambar 2.8 (b) di atas diilustrasikan keduanya sebagai tegangan tarik, akan tetapi tidak menutup kemungkinan terjadi kesamaan pada tegangan tekan.

3. Tegangan Acak

Pada siklus ini bentuk dari tegangan berulang yang terjadi sangat tidak teratur, perioda dan amplitudonya dapat berubah dengan waktu.

Pada suatu siklus tegangan berfluktuasi dapat dipertimbangkan memiliki dua komponen, yaitu tegangan rata-rata σ_m , serta amplitudo tegangan σ_a . Selain itu juga kita harus mempertimbangkan adanya *range of stress* atau jarak tegangan σ_r . Seperti yang terlihat pada gambar 2.8 (b), jarak tegangan dapat kita peroleh dari selisih antar tegangan maksimum dan tegangan minimum atau dalam rumus:

$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min} \dots\dots\dots(2-1)$$

Sedangkan amplitude tegangan didapatkan dari setengah jarak tegangan, dinyatakan dengan rumus :

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{max}}{2} - \frac{\sigma_{min}}{2} \dots \dots \dots (2-2)$$

Tegangan rata-rata merupakan rata-rata dari tegangan maksimum dan tegangan minimum, dinyatakan dengan rumus :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \dots \dots \dots (2-3)$$

Dua rasio yang digunakan dalam menunjukkan data *fatigue* yaitu :

- Rasio tegangan :

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \dots \dots \dots (2-4)$$

- Rasio amplitudo :

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1-R}{1+R} \dots \dots \dots (2-5)$$

dengan:

σ_r = Jarak tegangan (*Range of stress*)

σ_a = Amplitudo tegangan

σ_m = Tegangan rata-rata (*Mean stress*)

σ_{max} = Tegangan maksimum

σ_{min} = Tegangan minimum

R = Rasio tegangan

A = Rasio *amplitude*

Pada pengujian ini dilakukan dengan menggunakan *cantilever rotary bending fatigue*.

Jika benda kerja diputar dan diberi pembebanan di ujungnya akan terjadi momen *bending* yang secara kontinyu memberikan tegangan *bending* pada ujung benda kerja. Untuk mencari siklus dan tegangan *bending* dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut.

- Siklus:

$$N = n \times t \dots \dots \dots (2-6)$$

Sumber: Pratowo (2016)



- Tegangan *bending*:

$$\sigma_b = \frac{M}{I} y = \frac{WL}{\pi d^3 / 32} \dots \dots \dots (2-7)$$

Sumber: Khurmi (2005:128-129)

Dengan, σ_b adalah tegangan *bending* dalam kgf/mm², W adalah beban *bending* dalam kgf, L adalah jarak spesimen dari beban lentur dalam mm, dan d adalah diameter spesimen dalam mm. Sedangkan N merupakan siklus, n adalah jumlah kecepatan putaran motor dalam rpm dan t adalah waktu dalam menit selama putaran berlangsung.

2.7 Faktor Intensitas Tegangan (K)

Faktor K merupakan penggambaran distribusi tegangan di sekitar retakan. Secara umum faktor intensitas tegangan (K) dapat dihitung dari persamaan P.C. Paris dan G.C. Sih (Dieter, 1986):

$$K = \beta S \sqrt{\pi a} \dots \dots \dots (2-15)$$

Dengan β adalah faktor geometri.

Menurut Feddersen, nilai β untuk spesimen dengan *center crack tension* (CCT) adalah (Schijve, 2009):

$$\beta = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{W}\right)} \dots \dots \dots (2-16)$$

Sehingga harga K dapat dihitung dengan rumus :

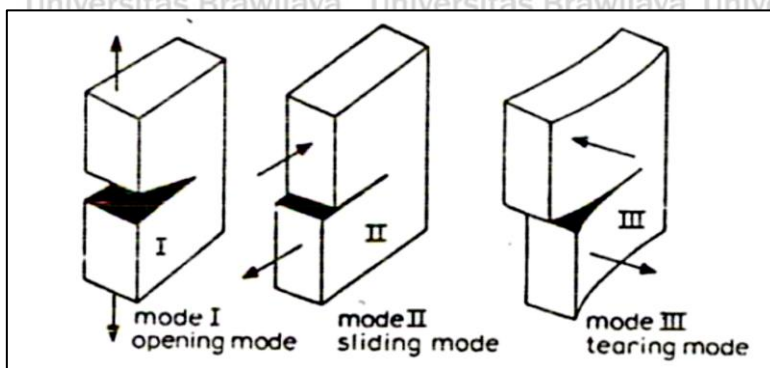
$$K = S \sqrt{\pi a \cdot \sec\left(\frac{\pi a}{W}\right)} \dots \dots \dots (2-17)$$

Berdasar ASTM, dapat diketahui harga K untuk spesimen *center crack tension* (CCT) dapat dihitung dengan rumus :

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{\beta} \sqrt{\frac{\pi a}{2W} \sec \frac{\pi a}{2}} \dots \dots \dots (2-18)$$

Dengan catatan: $\Delta P = P_{\max} - P_{\min}$
 $a = 2a/W$

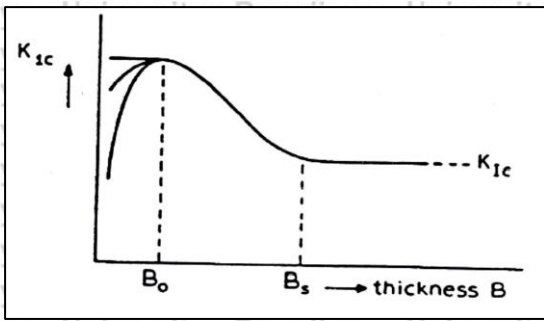
Di dalam mekanika perpatahan ada 3 macam mode sehingga ada 3 macam nilai K (Gambar 2.7). KI untuk mode I yaitu mode tarik dengan arah membuka retak. KII untuk mode II yaitu model geser. KIII untuk mode III model geser sejajar. KI merupakan faktor intensitas tegangan untuk mode I dimana retak terentang oleh tegangan tarik yang bekerja pada arah tegak lurus terhadap permukaan bidang retak. Jadi KI adalah faktor intensitas tegangan untuk arah pembebanan membuka retak (Broek, 1986).



Gambar 2.7 Mode perpatahan Broek
Sumber: Broek (1986)

Pada mode I merupakan sistem pembebanan yang paling penting, karena pembebanannya membuka retak dimana nilai KI kritisnya disebut KIC, yang lebih dikenal dengan istilah ketangguhan perpatahan regangan bidang. KIC merupakan sifat ketahanan bahan terhadap perpatahan. Ada 2 macam keadaan ekstrim yaitu; benda uji tipis keadaan tegangannya disebut tegangan bidang (plane stress), sedangkan benda uji tebal terdapat regangan bidang (plane strain). Plane stress adalah kondisi munculnya tegangan bidang pada daerah sekitar retak yang disebabkan oleh pembebanan pada komponen. Plane strain adalah meningkatnya tegangan bidang menjadi kondisi regangan yang terjadi pada daerah sekitar retak yang disebabkan oleh pembebanan pada komponen. Kondisi regangan bidang ditinjau dari segi tegangan bidang lebih berbahaya dan nilai faktor intensitas tegangan kritisnya lebih rendah dibanding benda uji yang hanya mengalami tegangan bidang (Broek, 1986).

Secara umum harga KIC bervariasi terhadap ketebalan pada daerah plane stress. Akan tetapi pada daerah plane strain nilai KIC lebih rendah dan relatif konstan. Hal ini menunjukkan bahwa spesimen yang tebal tidak selamanya memiliki ketangguhan yang tinggi, tetapi ketangguhan tertinggi diperoleh pada ketebalan tertentu (Broek, 1986).



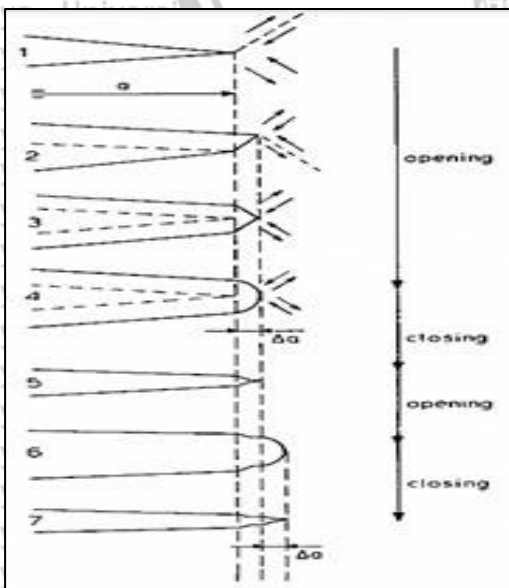
Gambar 2.8 Harga K_{Ic} pada daerah *plane stress plane strain*

Sumber: Broek (1986)

Seperti pada Gambar 2.8 harga KIC tinggi adalah dengan ketebalan B_0 . Ketebalan B_0 merupakan pembatas antara daerah *plane stress* dan *plane strain*. Karena harga KIC merupakan salah satu nilai ketangguhan bahan, maka makin besar KIC makin tinggi ketangguhannya. Ketangguhan tertinggi dari suatu bahan diperoleh pada ketebalan tertentu. Harga KIC sama untuk spesimen dengan bentuk dan ukuran yang sama meskipun bentuk geometri retakan berbeda (Broek, 1986).

2.8 Mekanisme Perambatan Retak

Perpatahan adalah pemisahan atau pemecahan suatu benda padat, menjadi dua bagian atau lebih diakibatkan adanya tegangan. Komposisi perpatahan terdiri atas dua tahap, yaitu timbulnya retak dan tahap penjaralan retak. Tahap awal pembentukan retak ini memerlukan jumlah siklus yang cukup besar. Perambatan retak yang terjadi pada tahap ini sangat lambat. Mekanisme penjaralan retak lelah dapat dijelaskan pada Gambar 2.9 (Broek, 1986).



Gambar 2.9 Mekanisme perambatan retak lelah

Sumber: Broek (1986)

Kegagalan lelah ditunjukkan oleh aspek-aspek sebagai berikut (Dieter, 1986):

1. Sisi-sisi retak awal jelas.
2. Adanya perambatan retak ditunjukkan oleh *sea-shore mark*.
3. Daerah patah akhir jelas (*final failure*).

Daerah patahan biasanya memiliki ciri-ciri bidang patahan yang mirip patahan pada uji *sway* atau pada uji *crack toughness* (ketangguhan patahan) pada material yang sama. Bidang patahannya tampak kasar atau berserabut (Dieter, 1986).

2.9 Hubungan Laju Perambatan Retak dan Faktor Intensitas Tegangan ($da/dN - \Delta K$)

Metode dalam perhitungan umur kelelahan adalah dengan menggunakan kurva $da/dN - \Delta K$, yakni dengan pemetaan perbandingan pertambahan retak dengan jumlah siklus terhadap selisih faktor intensitas tegangan karena pembebanan dinamis. Dalam menentukan da/dN dan harus mengamati pertambahan retak dan jumlah siklus yang tercatat. Secara umum persamaan karakteristik laju perambatan retak dinyatakan oleh rumus P.C. Paris dan G.C. Sih (Broek, 1986) sebagai berikut:

$$da/dN = C(\Delta K)^m \dots\dots\dots (2-19)$$

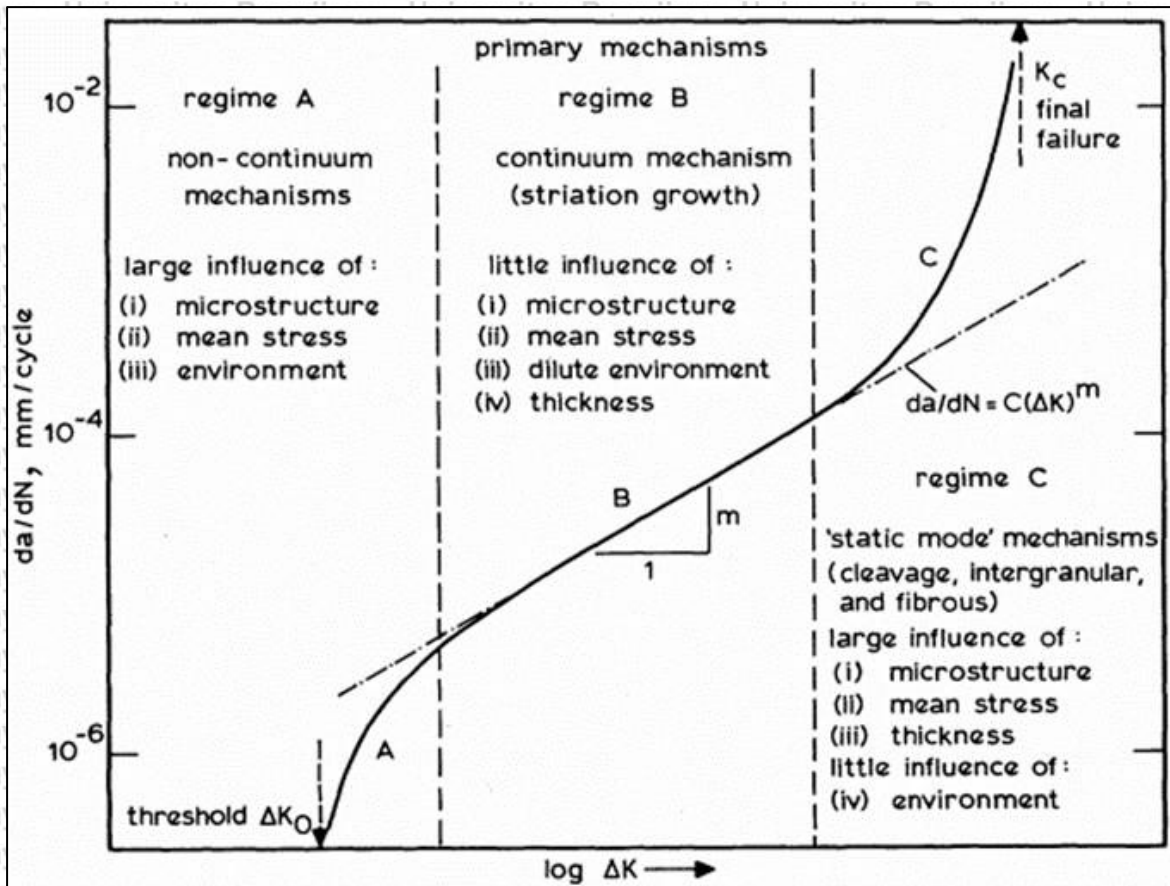
Apabila persamaan (2-19) diubah menjadi persamaan linier adalah dijadikan persamaan dalam log, seperti persamaan berikut :

$$\log(da/dN) = C_1 + m \log(\Delta K) \dots\dots\dots (2-20)$$

Dengan catatan : $C_1 = \log C = \text{konstanta}$

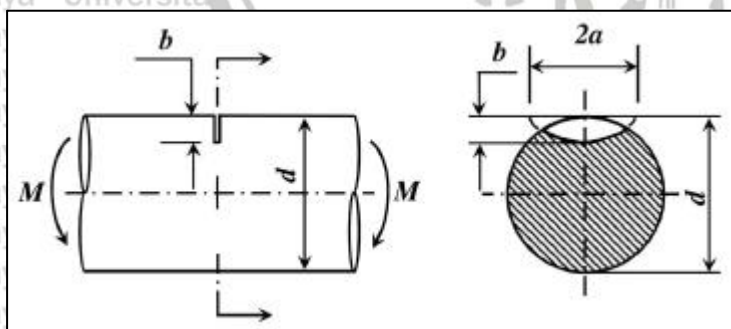
Konstanta C adalah referensi opini untuk perambatan retak lelah dan delta K adalah keseluruhan SIFR (Par Ljustell, 2013). Karakteristik bahan hasil pengujian fatik biasanya ditunjukkan dalam bentuk kurva $da/dN - \Delta K$ dalam skala log. Harga m pada persamaan (2-19) menunjukkan kemiringan atau angka eksponensial dari kurva tersebut. yang Secara umum daerah dipertimbangkan untuk menghitung harga m adalah daerah linier yang mempunyai kecepatan perambatan retak teratur (Broek, 1986). Secara umum karakteristik perambatan retak fatik untuk bahan metal dibagi menjadi tiga daerah seperti diperlihatkan pada Gambar 2.10 (Ritchie, 1979).





Gambar 2.10 Kurva karakteristik perambatan retak lelah log da/dN terhadap ΔK
 Sumber: Ritchie (1979)

Dalam perhitungan *stress intensity factor range* (SIFR) untuk silinder pejal dengan retakan pada bagian sisi luar (seperti pada Gambar 2.11), dapat dihitung menggunakan persamaan 2-12 disaat *stress ratio*, $R = -1$, seperti yang terjadi pada *cantilever rotary bending fatigue testing machine*.



Gambar 2.11 *Fatigue crack growth rate specimen* dengan retakan pada permukaan.
 Sumber: Zhang (2011)

$$\Delta K = F_I \cdot \sigma_a \cdot \sqrt{\pi \cdot b} \quad (2-11)$$

Dimana σ_a adalah amplitudo tegangan ($\sigma_{\text{maximum}} - \sigma_{\text{minimum}}$), b merupakan kedalaman retakan, dan F_I adalah faktor geometri dengan nilai 0,66. Setelah menghitung nilai SIFR, dan rasio da/dN antara *crack propagation* (da) dan *number of cycles* (dN) telah terhitung. Hubungan keduanya dapat diplot untuk mendapatkan laju perambatan retak lelah.

Dengan σ_a adalah amplitudo tegangan ($\sigma_{\text{maximum}} - \sigma_{\text{minimum}}$), b adalah kedalaman retak, dan faktor modifikasinya, F_I adalah 0,66. F_I dapat dicari dengan rumus:

$$F_I = F_{I,3}^T \frac{F_{I,2}^B}{F_{I,2}^T} \quad (2-22)$$

$$F_{I,2}^B = 1,121 - 1,199\lambda + 4,775\lambda^2 - 1,628\lambda^3 - 7,035\lambda^4 + 13,27\lambda^5 \quad (2-23)$$

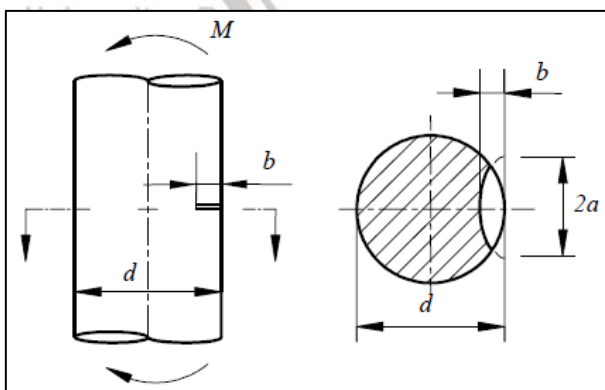
$$F_{I,2}^T = 1,12 - 0,231\lambda + 10,55\lambda^2 - 21,72\lambda^3 + 30,39\lambda^4 \quad (2-24)$$

$$F_{I,3}^T = (1,12 - 0,23\beta - 0,901\beta^2 + 0,949\beta^3 - 0,208\beta^4) \times (1 + 0,157\gamma - 0,634\gamma^2 + 4,59\gamma^3 - 6,628\gamma^4) \quad (2-25)$$

$$\lambda = \frac{b}{d}; \beta = \frac{b}{a}; \gamma = \frac{a}{d} \quad (2-26)$$

Sumber: Zhang, et al. (2011)

Dimana d adalah diameter bagian kritis untuk spesimen, a adalah setengah panjang retak permukaan seperti ditunjukkan pada skema Gambar 2.12. Dengan mengganti nilai yang diukur ke dalam Persamaan 2-21, nilai ΔK dihitung. Nilai-nilai da/dN diperoleh dari kurva pertumbuhan retak. Dengan demikian, hubungan antara da/dN dan ΔK diplot pada grafik logaritmik ganda.



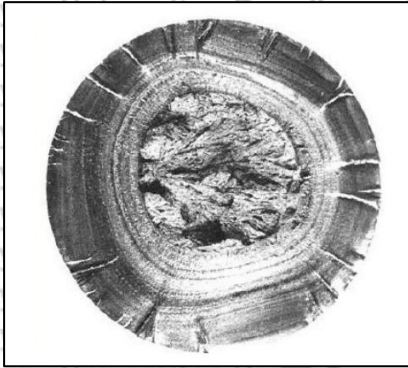
Gambar 2.12 Skematik spesimen dengan retak permukaan pada momen *bending*

Sumber: Zhang, et.al. (2011)

2.10 Karakteristik Makroskopis Perambatan Retak Lelah

Karakteristik makroskopis dari kelelahan logam adalah sebagai berikut

1. Tidak adanya deformasi plastis secara makro.
2. Terdapat tanda 'garis-garis pantai' (*beach marks*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13 dibawah ini.



Gambar 2.13 Permukaan patah lelah dari baut
Sumber: Abrianto (2009)

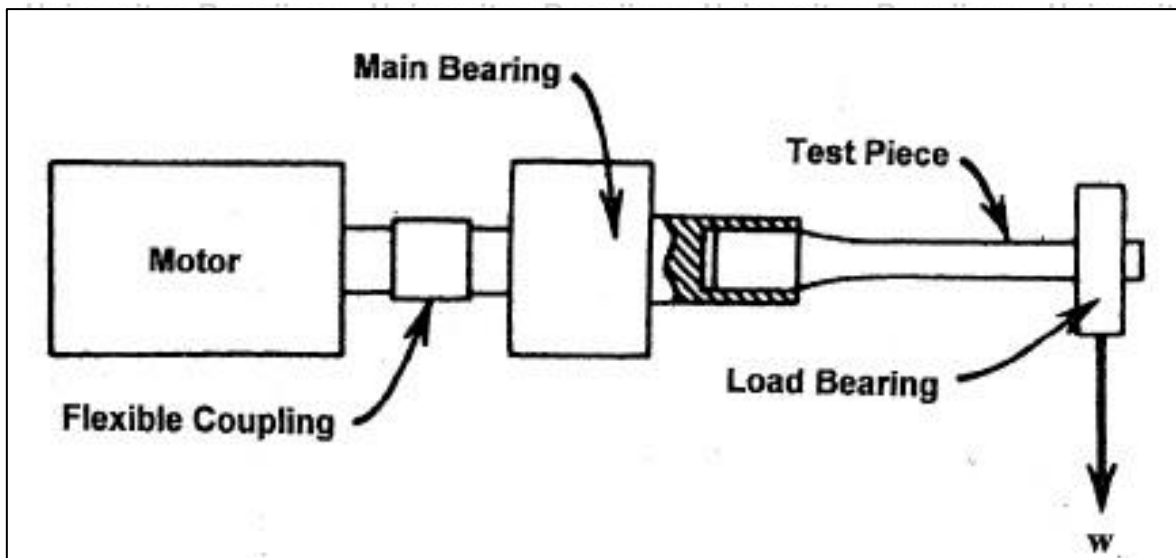
Tanda garis-garis pantai (*sea-shore marks*) yang merupakan tanda penjarangan retakan, mengarah tegak lurus dengan tegangan tarik dan setelah menjalar sedemikian hingga penampang yang tersisa tidak mampu lagi menahan beban yang bekerja, maka akhirnya terjadilah patah akhir atau patah statik (Abrianto, 2009).

2.11 Alat Uji Kelelahan

Uji kelelahan adalah jenis uji dinamis yang menentukan perilaku relative material ketika mengalami beban berulang atau berfluktuasi. Alat uji kelelahan atau biasa dikenal dengan mesin uji lelah yang mempunyai prinsip kerja pembebanan pada spesimen uji yang berputar adalah *Rotating bending fatigue tester*. Alat ini digunakan untuk mensimulasikan kondisi tegangan pada bagian-bagian mesin yang memiliki beban berputar (Avner, 1974).

Pembebanan yang diberikan pada *Rotating bending fatigue tester* bervariasi tergantung pada nilai kekuatan tarik 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 berupa komponen yang umum. Bagian utama dari *rotating bending fatigue tester* yaitu motor listrik, kopling, *bearing*, serta *chuck*. Skema *rotating cantilever fatigue testing machine* dapat dilihat pada gambar 2.14 berikut.



Gambar 2.14 Cantilever rotating bending fatigue testing machine
Sumber: Stephens (2001:63)

2.12 Hipotesis

Dari uraian penelitian-penelitian sebelumnya dan tinjauan pustaka di atas maka dapat ditarik hipotesis bahwa penggunaan *chamfer* akan mengakibatkan berkurangnya luas bidang kontak awal pada spesimen pengelasan dan memberikan pengaruh pada gaya penekanan dan deformasi yang terjadi. Selain itu peningkatan kecepatan putaran *spindle* akan akan memperkecil nilai *friction time* karena pengelasan membutuhkan waktu lebih singkat hingga mencapai *burn of length* yang di control dan memberikan efek pada pengurangan *heat input*. Hal diatas akan meningkatkan hasil kualitas pengelasan, yang sekaligus memperlambat laju perambatan retak lelah yang terjadi.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Halaman ini sengaja dikosongkan



BAB III METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode *true experimental*. Metode ini digunakan agar dapat mengetahui pengaruh putaran spindle pada *chamfer* satu sisi *friction weld joints* terhadap laju perambatan retak lelah dengan material Aluminium A6061.

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Maret 2021 sampai Juli 2021. Tempat yang akan digunakan untuk penelitian ini yaitu:

1. Laboratorium Proses Produksi, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya.
2. Laboratorium Fenomena Dasar Mesin, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

3.2 Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini terdapat tiga variabel yaitu variabel bebas, variabel terikat, dan variabel terkontrol.

3.2.1 Variabel Bebas

Variabel bebas merupakan variabel yang menyebabkan atau mempengaruhi nilai dari variabel terikat. Pada penelitian ini, variabel bebas yang digunakan adalah :

Chamfer Angle : 0° , 30°

Putaran Spindle : 800 rpm, 1120 rpm, 1600 rpm

3.2.2 Variabel Terikat

Variabel terikat merupakan variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas. Pada penelitian ini, variabel terikat yang digunakan adalah laju perambatan retak lelah.

3.2.3 Variabel Terkontrol

Variabel terkontrol merupakan variabel yang harus dijaga konstan agar tidak mempengaruhi nilai dari variabel terikat. Pada penelitian ini, variabel terkontrol yang digunakan diambil dari penelitian referensi yang menjadi studi lanjut pada penelitian ini, diantaranya:

1. *Burn of Length 3mm*
2. Gaya penekanan awal : 7 kN
3. Gaya penekanan akhir: 21 kN
4. *Holding time akhir: 20 detik*
5. Temperatur ruangan saat dilakukan pengelasan gesek yaitu 27° C.

3.3 Spesifikasi Alat dan Bahan

3.3.1 Spesifikasi Alat

1. *Stopwatch*

Stopwatch (Gambar 3.1) digunakan untuk mengetahui waktu dalam proses pengelasan gesek. Dengan spesifikasi sebagai berikut.

Measure unit: 1/100 detik

Split time

Countdown timer



Gambar 3.1 *Stopwatch*

Sumber: Laboratorium Pengecoran Logam Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

2. Jangka Sorong

Jangka sorong (Gambar 3.2) digunakan untuk mengukur dimensi benda kerja dengan spesifikasi sebagai berikut.

Jenis Ukuran : Metrik (mm) dan Inchi

Skala : 0.05 mm atau 1/128"

Akurasi : +/- 0.05 mm



Gambar 3.2 Jangka Sorong

Sumber: Laboratorium Fenomena Dasar Mesin Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

3. Mesin Bubut LTC-200

Alat ini (Gambar 3.3) digunakan untuk membubut spesimen agar sesuai dengan dimensi yang diinginkan.

X/Z Axis Motor (kW) : 1.2

Max. Turning Diameter (mm) : 300

Max. Turning Length (mm) : 300

Max. Swing Over Bed (mm) : 500

Spindle speed (rpm) : 4500



Gambar 3.3 Mesin Bubut LTC-200

Sumber: Laboratorium CNC Politeknik Negeri Malang

4. Mesin Bubut untuk Pengelasan

Alat ini (Gambar 3.4) digunakan untuk pengelasan ini merupakan mesin bubut yang telah dimodifikasi sehingga dapat digunakan untuk pengelasan gesek.

Spesifikasi mesin sebagai berikut:

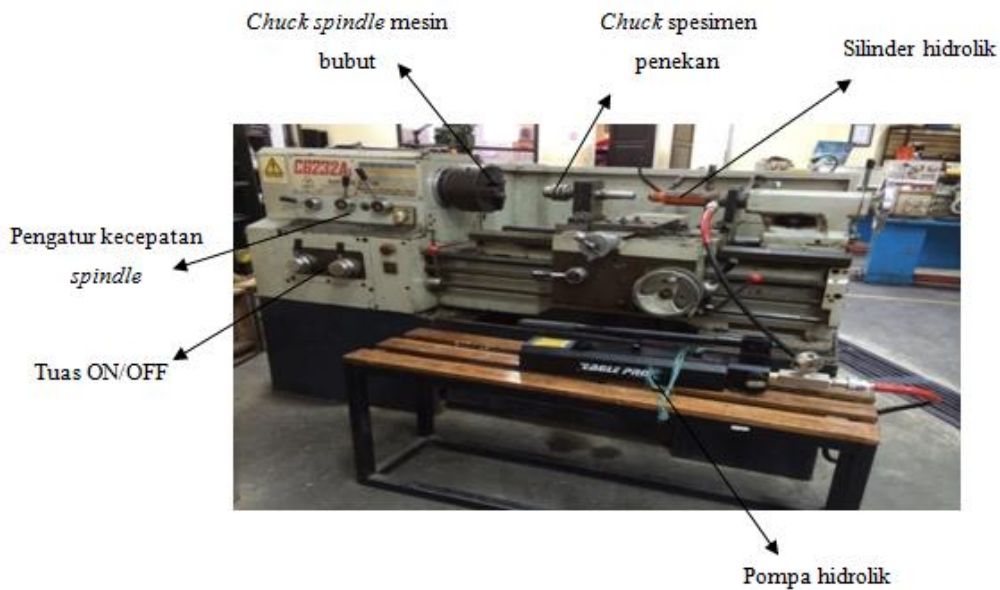
Merk/Type : *Lathe Machine C6232A*

Buatan : China

Tahun : 1978

Daya : 3.5 kW

Putaran Spindle Max : 1600 rpm



Gambar 3.4 Mesin bubut untuk pengelasan

Sumber: Laboratorium Proses Produksi I Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

5. Power Hacksaw

Alat ini (Gambar 3.5) digunakan untuk memotong spesimen pengelasan gesek.

Merek : Kasto

Tipe : HBS 210/240

Cutting Diameter (mm) : 210

Voltage (V)/Frequency (Hz) : 400/50

Total Power Requirement (kW) : 1.3



Gambar 3.5 Power Hacksaw

Sumber: Laboratorium Proses Produksi I Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

6. *Digital Microscope*

Alat ini (Gambar 3.6) digunakan untuk mengambil gambar alat yang digunakan, saat proses pengujian laju perambatan retak lelah.

- Merk/Type : M0004 Digital Microscope HD USB 2MP VIDEO
- Magnifikasi : 600x
- Tipe baterai : Li-Ion
- Format foto : JPEG, BMP



Gambar 3.6 Digital Microscope

7. *Thermogun*

Alat ini (Gambar 3.7) digunakan untuk mengukur temperatur pada proses pengelasan.

- Brand : Krisbow
- Model : KW06-304
- Range (°C) : -50 ~ 750
- Range (°F) : -58 ~ 1922
- Respon Time (Sec) : Less than 1 Second



Gambar 3.7 Thermogun

8. *Mesin Uji Fatigue*

Alat ini (Gambar 3.8) digunakan untuk mengetahui kekuatan lelah dari spesimen hasil pengelasan gesek. Berikut merupakan spesifikasi dari motor listrik mesin Uji *Fatigue* yang digunakan.

- Tipe : *Single Phase Motor YC90L-4 / 1HP*
- Daya : 1,65 kW
- Volt / Amp : 220 V / 7.5 A
- Putaran *Spindle max* : 1400 rpm
- Class : B



Gambar 3.8 Mesin Uji *Fatigue*

Sumber: Laboratorium Pengecoran Logam Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

9. Mikroskop

Alat ini (Gambar 3.9) digunakan untuk melihat struktur mikro dari specimen dengan spesifikasi alat sebagai berikut:

Merk/Tipe : Olympus BH-2

Jenis : Binokular

Lensa mata : WF 10x/18

Perbesaran lensa objektif : 5x, 10x, dan 40x

Daya lampu : 100 watt



Gambar 3.9 Mikroskop Olympus BH-2

Sumber: Laboratorium Penguujian Bahan Teknik Mesin Universitas Merdeka Malang

3.3.2 Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu Aluminium A6061 dengan komponen bahan sebagai berikut:

Tabel 3.1

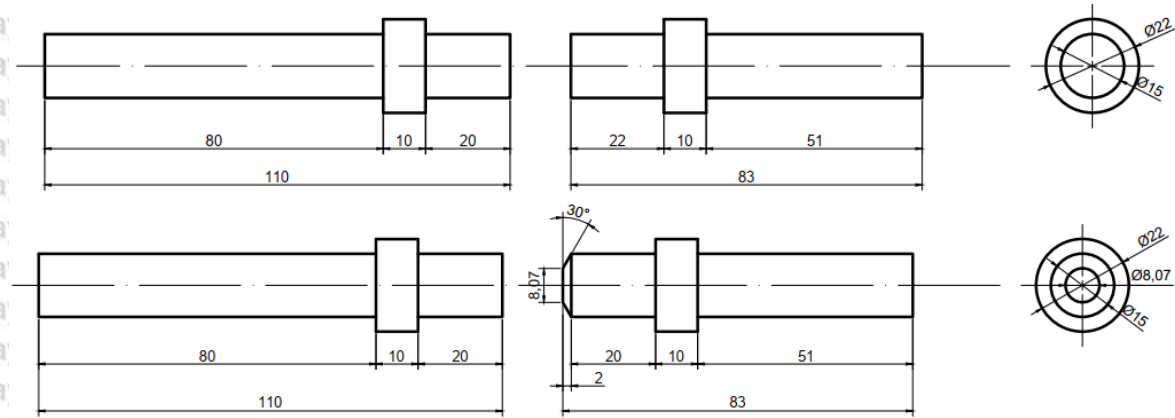
Komposisi kimia alumunium A6061

No. Code	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Lainnya
6061	98,75	0,652	0,272	0,171	0,020	0,808	0,065	0,024	0,024	0,018



3.3.3 Dimensi Spesimen

Dimensi spesimen yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada gambar berikut ini.



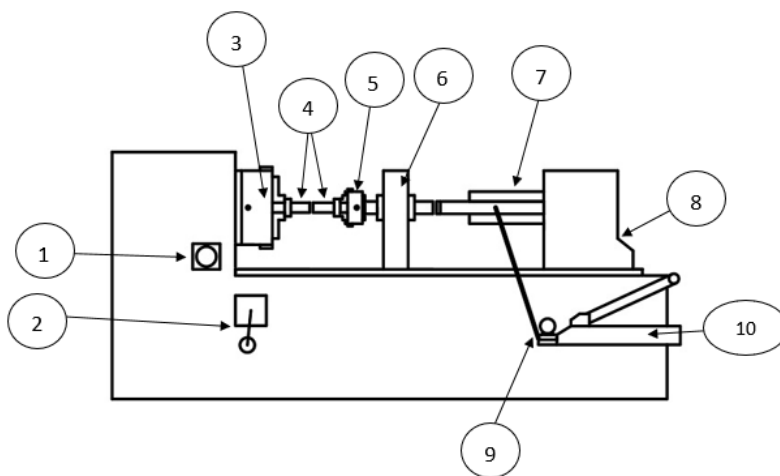
Gambar 3.10 Dimensi spesimen las gesek dengan Chamfer 0°, dan 30°

Tabel 3.2 Variasi Penelitian

No	Sudut <i>one-sided chamfer</i>	Variasi Kecepatan Putaran	Jumlah Spesimen
1	0°	800	3
		1120	3
		1600	3
1	30°	800	3
		1120	3
		1600	3

3.4 Instalasi Penelitian

3.4.1 Instalasi Mesin Bubut untuk Pengelasan Gesek

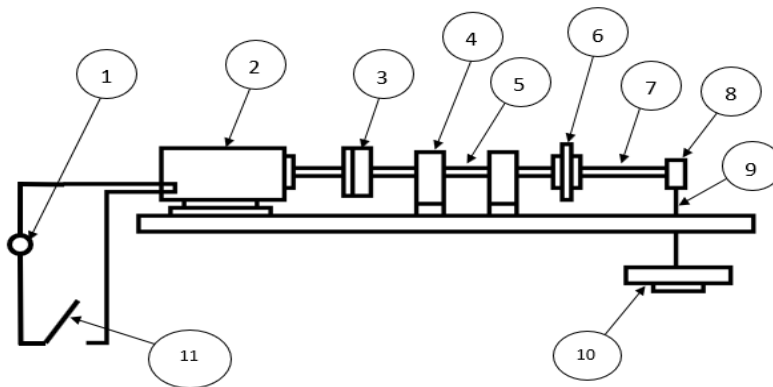


Gambar 3.11 Skema instalasi mesin bubut untuk pengelasan gesek

Keterangan:

1. Pengatur kecepatan *spindle*
2. Tuas *on/off*
3. *Chuck spindle* mesin bubut
4. Spesimen las
5. *Chuck* spesimen penekan
6. Plat penyangga *chuck* spesimen penekan
7. Silinder hidrolik
8. *Tailstock*
9. *Pressure Gauge* digital
10. Pompa hidrolik

3.4.2 Instalasi Mesin Uji *Fatigue*



Gambar 3.12 Skema uji *fatigue*

Keterangan:

1. Sumber listrik
2. Motor listrik
3. *Flexible coupling*
4. *Bearing*
5. Poros
6. *Chuck*
7. Spesimen
8. *Bearing* beban
9. Batang beban
10. Beban
11. Saklar

3.5 Prosedur Penelitian

3.5.1 Prosedur Pengelasan Gesek

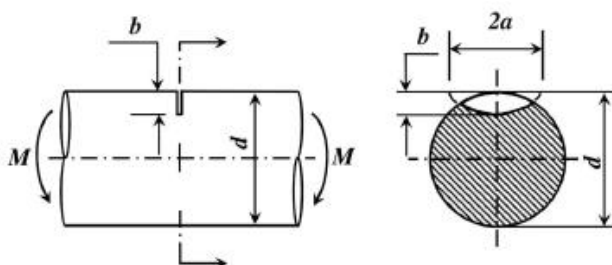
Proses pengelasan gesek dilakukan dengan mesin bubut yang telah dimodifikasi dengan langkah-langkah sebagai berikut :

1. Mempersiapkan mesin bubut sesuai dengan skema instalasi serta dimensi spesimen telah diukur menggunakan jangka sorong.
2. Memasang spesimen (a) pada *chuck* yang berputar dan spesimen (b) pada *chuck* yang diam.
3. Melakukan *centering* pada dua spesimen tersebut.
4. Mempersiapkan *thermo gun* serta diposisikan mengarah ke titik sambungan las.
5. Mengatur kecepatan putar *spindle*. Kecepatan *spindle* yang digunakan sebesar 800 rpm, tunggu hingga kondisi telah stabil selama 30 detik, dan lakukan langkah selanjutnya dengan memasukan putaran spindle 1600 rpm, tunggu hingga kondisi stabil selama 30 detik.
6. Menghidupkan mesin lalu atur tekanan pada pompa hidrolik.
7. Melakukan pengelasan dengan variasi sudut *chamfer* dengan pemberian gaya awal sebesar 7 kN.
8. Melakukan pengelasan dengan variasi kecepatan putaran spindle.
9. Setelah tercapai *burn of length* 3 mm, matikan mesin dan berikan gaya penekanan akhir sebesar 21 kN lalu lakukan *holding time* selama 20 detik.
10. Spesimen dilepas dari *chuck* dan didinginkan dengan media udara ruangan.
11. Spesimen hasil pengelasan diukur dimensinya menggunakan jangka sorong.
12. Mengulangi langkah 2 hingga langkah 9 untuk pengelasan dengan spesimen yang lain.
13. Pengelasan selesai.

3.5.2 Prosedur Pengambilan Data

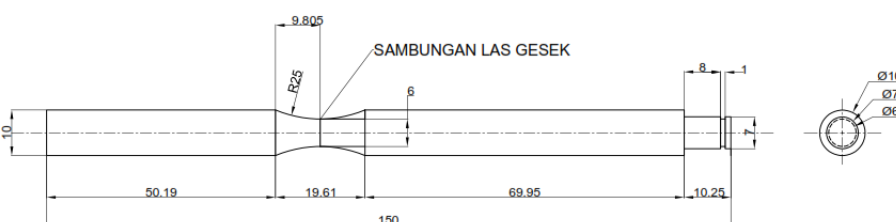
Hasil pengelasan gesek kemudian dilakukan pengujian untuk mengetahui laju perambatan retak lelah dari hasil pengelasan gesek dengan langkah sebagai berikut:

1. Mengambil spesimen dari hasil pengelasan gesek.
2. Melakukan proses *finishing* hingga spesimen menjadi spesimen uji *fatigue*.
3. Melakukan proses *machining* menggunakan *electrical discharge machine* untuk membentuk *slit* pada spesimen dengan ukuran panjang 2,5 mm ; lebar 0,2 mm ; dan kedalaman 0,8 mm (Gambar 3.13).
4. Mengamplas seluruh spesimen (Gambar 3.14) menggunakan kertas amplas dengan tingkat kekasaran #800, #1200, dan #2000. Pada tahap akhir pengamplasan, gunakan autosol untuk mengamplas bagian tengah spesimen uji *fatigue*.



Gambar 3.13 Fatigue crack growth rate specimen dengan retakan pada permukaan.

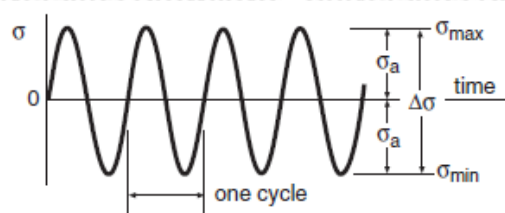
Sumber: Zhang (2011)



Gambar 3.14 Spesimen uji lelah

Sumber: Kuhn (2000)

5. Menyiapkan alat uji *fatigue*
6. Melakukan uji *fatigue* dengan mode pembebanan *completely reversed stress cycle* (Gambar 3.15).



Gambar 3.15 Completely reversed stress cycle

Dimana:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = -1$$

$$\sigma_{min} = -\sigma_{max}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_a = \sigma_{max}$$

$$\sigma_y = 220 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{max} = 10\%, 15\%, 30\% \sigma_y$$

$$\sigma_{max} = 22, 33, \text{ dan } 66 \text{ MPa}$$

$$\sigma_a = 22, 33, \text{ dan } 66 \text{ MPa}$$

7. Mengambil gambar menggunakan *digital microscope* yang telah disiapkan untuk menangkan perambatan retak lelah disetiap interval waktu 1 menit, dan catatlah jumlah siklus putaran.
8. Untuk mendapatkan nilai dari perambatan retak, hasil gambar yang terambil dapat diukur menggunakan *software ImageJ*.
9. Menghitung *Stress intensity Factor*.
10. Menghitung banyak siklus pada masing-masing tegangan amplitudo.
11. Mengulangi langkah 1 hingga langkah 6 untuk pengujian *fatigue* dengan variasi kecepatan putaran yang lain.
12. Melakukan analisis dari data-data tersebut dan menarik kesimpulan

3.5.3 Pengambilan Foto Makrostruktur

1. Meratakan specimen las dengan mesin *milling*
2. Mengamplas permukaan yang telah rata dengan menggunakan amplas dengan *grit number* 100, 320, 500, 800, 1000, 1500, dan 2000
3. Memoles permukaan yang telah diampas dengan menggunakan kain flannel disertai dengan autosol, pastikan specimen telah halus layaknya cermin dan tidak ada goresan.
4. Pemberian etsa dengan menggunakan larutan *Hydrofluoric Acid* (HF) dan Alkohol 95% dengan perbandingan 1:3, biarkan selama 60 detik.
5. Specimen dicuci dengan air dan dikeringkan
6. Mengambil gambar dengan menggunakan *digital microscope*.

3.5.4 Pengambilan Foto Mikrostruktur

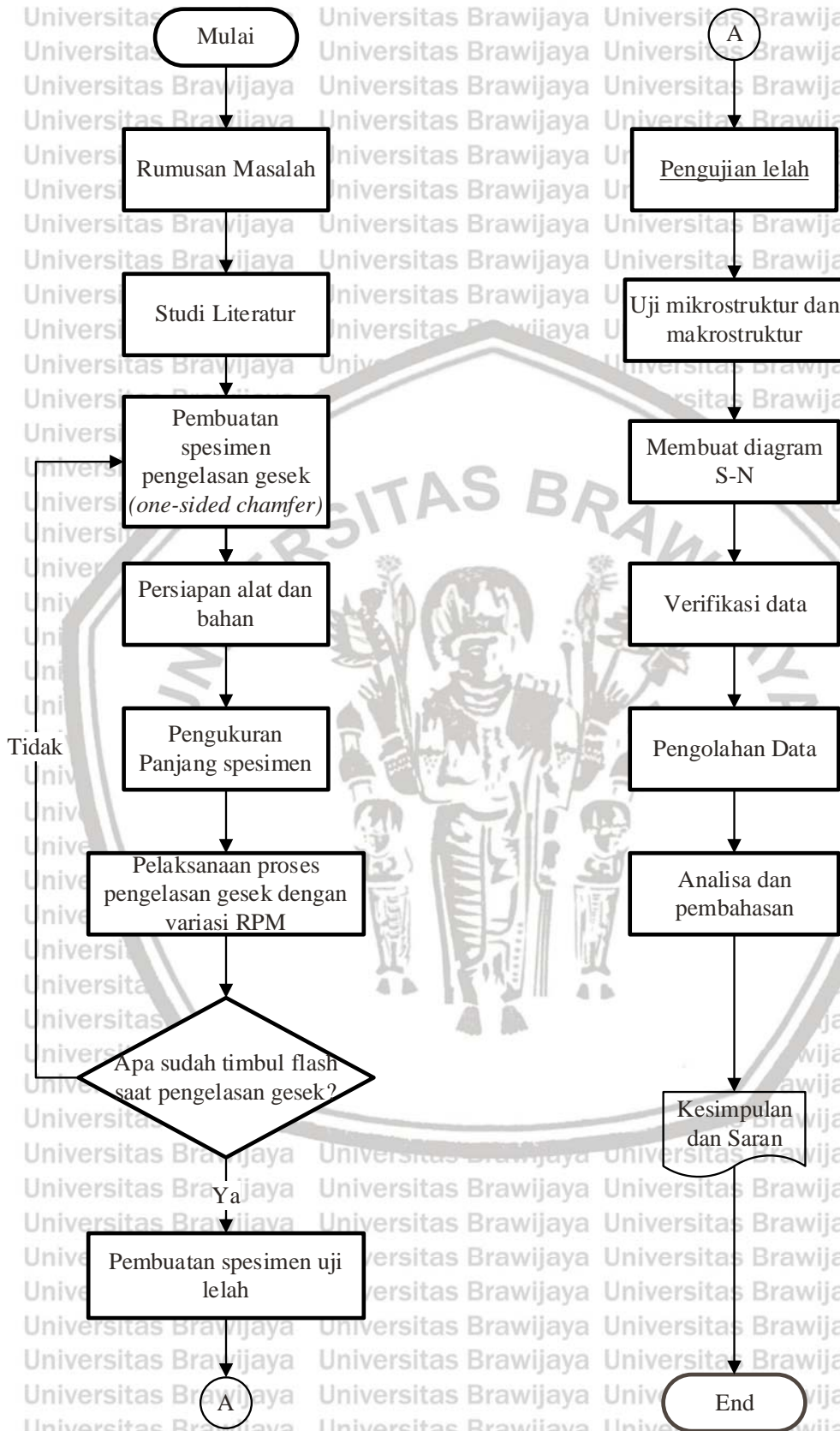
1. Meratakan spesimen las dengan mesin milling
2. Mengamplas permukaan yang telah rata dengan menggunakan amplas dengan *grit number* 100, 320, 500, 800, 1000, 1500, dan 2000
3. Memoles permukaan yang telah diampas dengan menggunakan kain flannel disertai dengan autosol, pastikan spesimen telah halus layaknya cermin dan tidak ada goresan.
4. Pemberian etsa dengan menggunakan larutan *Hydrofluoric Acid* (HF) 100%, dan biarkan selama 60 detik.
5. Spesimen dicuci dengan air dan dikeringkan
6. Mengambil gambar dengan menggunakan mikroskop.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



3.6 Diagram Alir Penelitian

Gambar 3.16 merupakan diagram alir dalam skripsi ini.

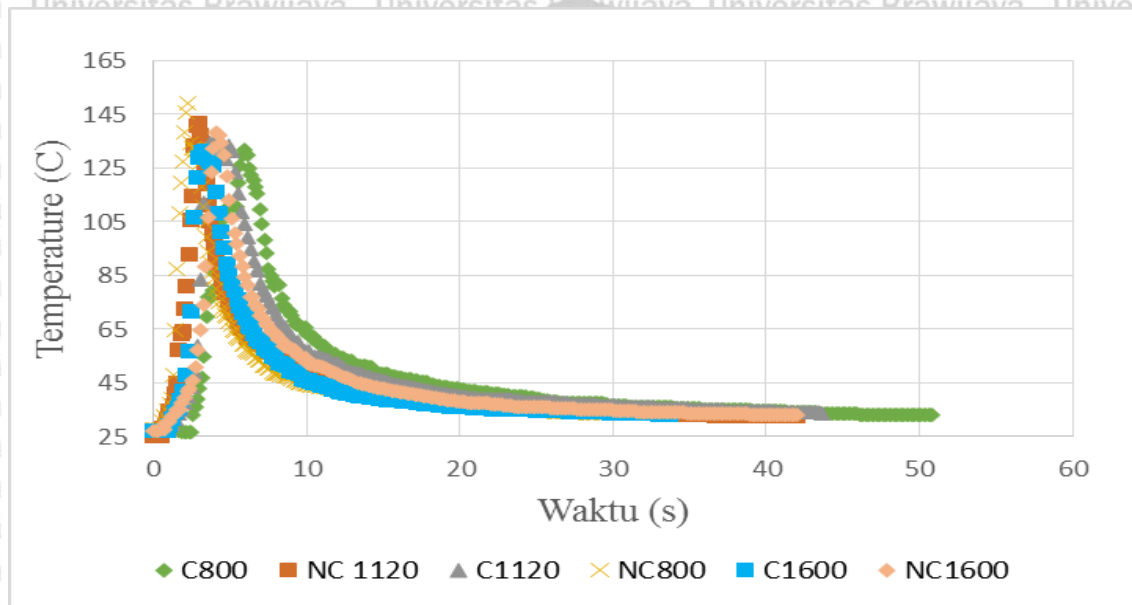


Gambar 3.16 Diagram alir penelitian

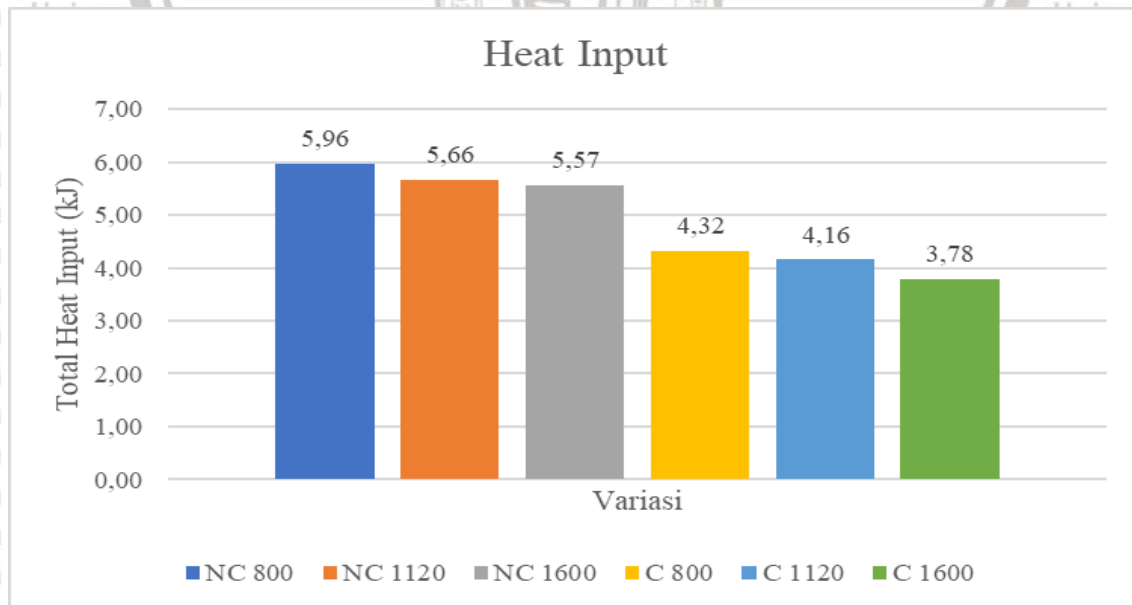
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Pengujian

Dibawah ini ditampilkan grafik nilai perubahan temperatur terhadap waktu selama proses pengelasan serta nilai akumulasi *heat input* pengelasan menggunakan variasi sudut *chamfer* dan kecepatan putaran *spindle*.



Gambar 4.1 Grafik suhu pengelasan tiap perubahan BOL perdetik



Gambar 4.2 Grafik *heat input* teoretis

Pada Gambar 4.1, dapat dilihat pada spesimen dengan variasi sudut *chamfer* 0° 800 rpm memiliki suhu yang paling tinggi daripada spesimen dengan variasi tinggi kerucut yang lain. Dapat dilihat juga bahwa pada spesimen dengan variasi *chamfer* 30° 1600 rpm memiliki suhu yang paling rendah pada saat pengelasan. Spesimen dengan variasi *chamfer* 0° 800 rpm memiliki nilai suhu tertinggi paling besar senilai $149,2^{\circ}\text{C}$. Sedangkan pada spesimen dengan variasi *chamfer* 30° 1600 rpm memiliki nilai suhu tertinggi paling kecil sebesar $131,1^{\circ}\text{C}$.

Gambar 4.2 menunjukkan *heat input* teoretis spesimen tiap variasi tinggi kerucut. Dapat dilihat pada spesimen dengan variasi sudut *chamfer* 0° 800 rpm memiliki *heat input* teoretis tertinggi sebesar 5,96 kJ dan variasi *chamfer* 30° 1600 rpm memiliki *heat input* teoretis terendah sebesar 3,78 kJ. Hal ini diakibatkan karena pada spesimen dengan variasi penggunaan *chamfer* 30° memiliki luas area kontak *interface* spesimen yang lebih kecil dibandingkan spesimen tanpa *chamfer*. Luasan area kontak yang lebih kecil menurunkan nilai *heat input* pada proses pengelasan karena area kontak yang bergesekan lebih sedikit pada setiap perubahan BOL perdetiknya. Oleh karena itu juga dapat dilihat kecenderungan variasi yang menggunakan *chamfer* memiliki temperatur yang lebih rendah dibandingkan spesimen tanpa *chamfer*. Selain itu variasi dari perbedaan kecepatan putaran *spindle* yang walaupun berbanding lurus dengan *heat input*, juga secara tidak langsung mempersingkat proses pengelasan untuk mencapai BOL 3 mm. Proses pengelasan yang lebih singkat akan menurunkan nilai *friction time* yang juga memperkecil nilai *heat input* dan meningkatkan kekuatan tarik yang dihasilkan.

Data pengujian *Cantilever rotary bending fatigue test* dilakukan menggunakan pembebanan yang berdasarkan data sekunder kekuatan tarik dari pengujian sebelumnya, dengan variasi geometris maupun proses manufaktur yang sama. Untuk setiap variasinya dilakukan 3 kali pengujian sehingga memperoleh nilai rata rata kekuatan tarik disetiap variasi. Variasi yang digunakan adalah sudut *chamfer* 0° , dan 30° dengan variasi kecepatan putaran *spindle* 800, 1120, dan 1600 rpm. Hasil pengujian kekuatan tarik tertera pada Tabel 4.1 di bawah ini.

Tabel 4.1
Hasil Pengujian Tarik

Sudut Chamfer (Derajat)	RPM	UTS (MPa)
0°	800	178,91
	1120	182,43
	1600	184,79
30°	800	185,63
	1120	217,03
	1600	220,29

Dari hasil pengujian kekuatan tarik diatas, didapatkan nilai UTS tertinggi terdapat pada variasi sudut *chamfer* 30° sebesar 220,29 Mpa. Nilai UTS tersebut digunakan untuk menentukan pembebanan yang diberikan pada *Cantilever Rotary Bending Fatigue Test* dengan besar tegangan bending sebanding dengan 15% dari UTS tertinggi. Perhitungan pembebanan pada pengujian specimen *fatigue crack growth*. Dengan memasukan nilai $\sigma_b = 33,0435$ MPa, Panjang lengan, $L = 82,8$ mm, dan diameter benda kerja, $d = 6$ mm. Maka pembebanan benda kerja sebagai berikut.

$$\sigma_b = \frac{W \times L \times r}{\pi d^4 / 64} \rightarrow W = \frac{\sigma_b \pi d^3}{L \times 32}$$

$$W = \frac{33,0435 \text{ MPa} \times \pi \times 6^3 \text{ mm}^3}{82,8 \text{ mm} \times 32} = 8,45 \text{ N}$$

$$W = 862 \text{ gf}$$

Jadi, untuk pembebanan pengujian lelah sebesar $W = 862$ gf.

Kemudian spesimen diputar 1400 rpm pada *cantilever rotating bending fatigue machine test* untuk diukur laju perambatan retak lelahnya dengan menggunakan mikroskop digital setiap pemberhentian 1 menit. Sehingga, mendapatkan harga siklus dengan menggunakan persamaan (2-6) sebagai berikut. Dimisalkan benda kerja telah diputar selama 20 menit maka nilai N :

$$N = n \times t$$

$$N = 1400 \text{ rpm} \times 20 \text{ menit} = 28000 \text{ siklus}$$

Pada saat melakukan proses pengujian perambatan retak lelah, didapatkan nilai panjang retak, a , dan kedalaman retak, b yang nantinya akan diplot dalam kurva $2a-N$. Nilai a didapatkan cara mengambil foto menggunakan *digital microscope* dengan magnifikasi 300x sehingga mendapatkan foto *landscape* dengan lebar 1 mm (ukuran nyata). Foto-foto ini diambil dalam kurun waktu tertentu dan digabungkan di akhir menggunakan *software Photoshop*. Foto hasil penggabungan dihitung ukuran total

retaknya menggunakan *software ImageJ*. Sedangkan nilai b didapatkan dari foto hasil penampang patahan setelah pengujian, yang diukur kedalamannya dengan titik acuan retak lelah menggunakan *software ImageJ*. Nilai panjang retak, a , dan kedalaman retak, b digunakan untuk mendapatkan nilai faktor modifikasi ketangguhan retak (F_1). Dibawah ini merupakan contoh perhitungan faktor modifikasi ketangguhan retak pada variasi *chamfer* 0° dengan kecepatan putaran spindle 1600 rpm, yang mana diketahui nilai retakan, $a = 3,42$ mm, kedalaman retak $b = 1,58$ mm, dan diameter kritis, $d = 6$ mm, maka :

$$\lambda = \frac{b}{d} = \frac{1,58}{6} = 0,26 ; \beta = \frac{b}{a} = \frac{1,58}{3,42} = 0,46 ; \gamma = \frac{a}{d} = \frac{3,42}{6} = 0,57$$

$$F_{1,2}^B = 1,121 - 1,199\lambda - 4,775\lambda^2 - 1,628\lambda^3 - 7,035\lambda^4 + 13,27\lambda^5$$

$$= 1,121 - 1,199(0,26) + 4,775(0,26)^2 - 1,628(0,26)^3 - 7,035(0,26)^4 + 13,27(0,26)^5$$

$$= 1,09$$

$$F_{1,2}^T = 1,12 - 0,231\lambda + 10,55\lambda^2 - 21,72\lambda^3 + 30,39\lambda^4$$

$$= 1,12 - 0,231(0,26) + 10,55(0,26)^2 - 21,72(0,26)^3 + 30,39(0,26)^4$$

$$= 1,54$$

$$F_{1,3}^T = (1,12 - 0,23\beta - 0,901\beta^2 + 0,949\beta^3 - 0,208\beta^4) \times (1 + 0,157\gamma - 0,634\gamma^2 + 4,59\gamma^3 - 6,628\gamma^4)$$

$$= (1,12 - 0,23(0,46) - 0,901(0,46)^2 + 0,949(0,46)^3 - 0,208(0,46)^4) \times (1 + 0,157(0,57) - 0,634(0,57)^2 + 4,59(0,57)^3 - 6,628(0,57)^4)$$

$$= 0,935$$

$$F_1 = F_{1,3}^T \frac{F_{1,2}^B}{F_{1,2}^T} = 0,935 \frac{1,09}{1,54} = 0,661$$

Setelah mendapatkan nilai F_1 pada semua titik panjang retak setiap variasi, maka nilai rata-rata faktor modifikasi ketangguhan retak setiap variasi adalah $F_1 = 0,661$. Nilai-nilai panjang retak, a , kedalaman retak, b , dan rata-rata faktor modifikasi ketangguhan retak, F_1 kemudian disubstitusikan kedalam persamaan 2-21. Sehingga Nilai *Stress Intensity Factor* (ΔK) dapat dihitung. Setelah nilai ΔK dihitung maka nilai tersebut diplot kedalam grafik log-log $da/dN - \Delta K$, dimana da/dN dapat dicari dari kurva $2a - N$ pada setiap titik. Kemudian grafik log-log $da/dN - \Delta K$ dianalisis dan dihitung konstanta laju perambatan retak dari masing-masing variasi. Hasil data pengujian lelah dapat dilihat pada Tabel 4.2.

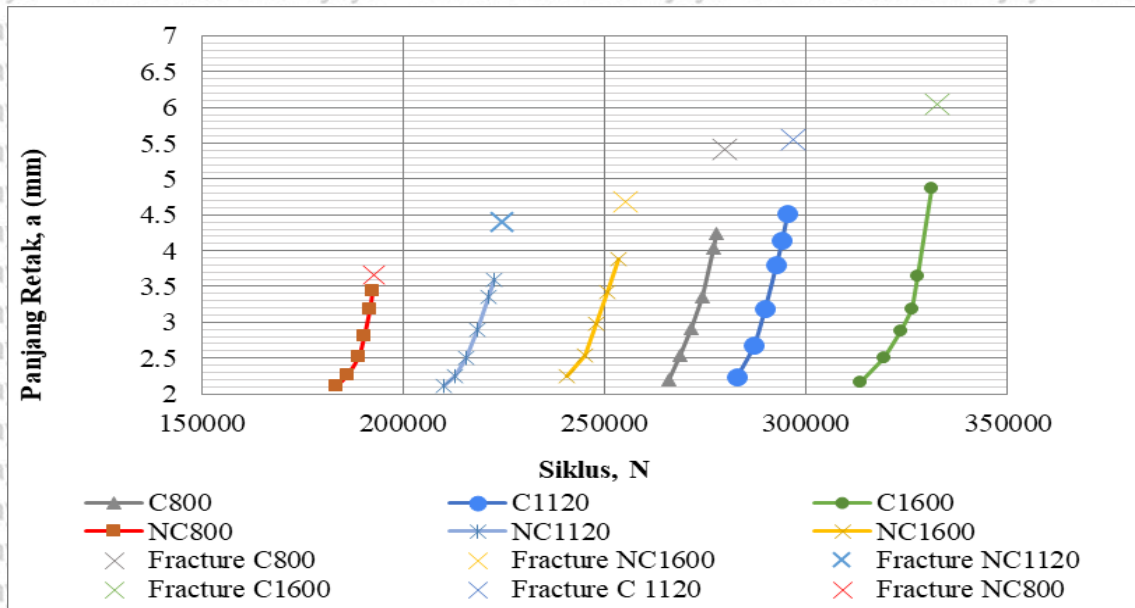
Tabel 4.2
Hasil Data Uji Laju Rambat Retak Lelah

Sudut Chamfer	RPM	Siklus, N	Panjang Retak, 2a (mm)	Kedalaman Retak, b (mm)	ΔK (MPa·m ^{1/2})	da/dN
0	800	183400	4,21	0,85	35,61991	1,1E-05
		186200	4,53	0,97	38,05127	5,7E-05
		189000	5,04	1,07	39,96458	9,1E-05
		190400	5,62	1,33	44,5563	0,00021
		191800	6,37	1,82	52,12175	0,00027
		192500	6,89	1,98	54,36457	0,00037
	1120	210000	4,22	0,83	35,19836	1E-05
		212800	4,48	0,94	37,45823	4,6E-05
		215600	5,01	1,12	40,88767	9,5E-05
		218400	5,78	1,38	45,3861	0,00014
		221200	6,72	1,95	53,95114	0,00017
		222600	7,2	2,04	55,18212	0,00017
30	1600	240800	4,48	0,85	35,61991	9,3E-06
		245000	5,08	0,99	38,44155	7,1E-05
		247800	5,97	1,422	46,07158	0,00016
		250600	6,84	1,58	48,56371	0,00016
		253400	7,76	1,87	52,83286	0,00016
		266000	4,38	0,85	35,61991	8,2E-06
	800	268800	5,06	1,09	40,33635	0,00012
		271600	5,81	1,42	46,03917	0,00013
		274400	6,7	1,52	47,63269	0,00016
		277200	8,07	1,64	49,47722	0,00024
		277900	8,47	1,92	53,53452	0,00029
		282800	4,47	0,94	37,45823	7,9E-06
1120	287000	5,34	1,24	43,02235	0,0001	
	289800	6,38	1,74	50,96335	0,00019	
	292600	7,59	2,13	56,38624	0,00022	
	294000	8,26	2,82	64,87956	0,00024	
	295400	9,03	3,5	72,27987	0,00028	
	313600	4,33	0,88	36,24304	6,9E-06	
1600	319200	4,99	1,04	39,40034	5,9E-05	
	323400	5,74	1,29	43,88117	8,9E-05	
	326200	6,37	1,52	47,63269	0,00011	
	327600	7,3	1,98	54,36457	0,00019	
	331100	9,73	3,35	70,71405	0,00035	

4.2 Laju Perambatan Retak

Pengujian lelah dilakukan dengan *cantilever rotating bending fatigue machine test*.

Pengukuran perambatan retak lelah dilakukan dengan cara benda kerja diputar dengan kecepatan 1400 rpm dan setelah terjadi awal retak (*crack initiation*) proses pengujian diberhentikan setiap 30 detik untuk mengukur perpanjangan retak yang terjadi pada benda kerja. Sehingga, hasil pengujian tersebut dapat dimasukkan ke dalam grafik hubungan panjang retak dengan siklus (kurva a-N) yang ditunjukkan pada Gambar 4.3.

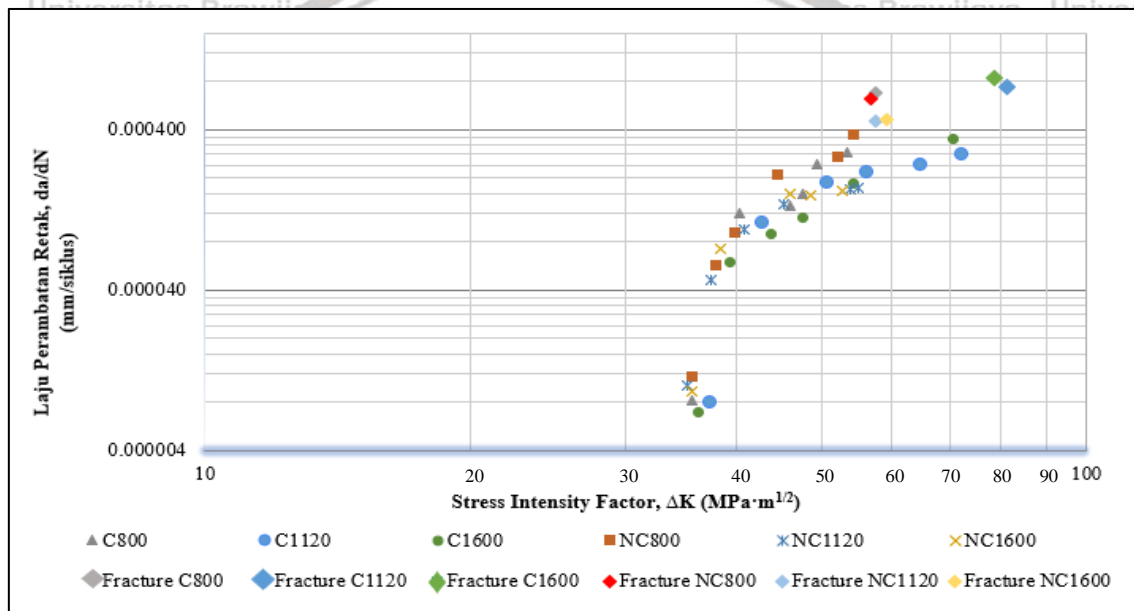


Gambar 4.3 Grafik hubungan antara panjang retak dengan siklus

Dari Gambar 4.3 menunjukkan menunjukkan data mengenai nilai panjang retak pada setiap variasi permukaan geometri sudut *chamfer* 0° , dan 30° satu sisi dengan kecepatan putaran spindle 800, 1120, dan 1600 hasil las gesek A6061. Pada variasi sudut *chamfer* 0° 800 rpm didapatkan rentang panjang retak 4,21-6,37 mm dengan rentang siklus 183.400-194.600. Pada variasi sudut *chamfer* 0° 1120 rpm didapatkan rentang panjang retak 4,22-6,72 mm dengan rentang siklus 210.000-221.200. Pada variasi sudut *chamfer* 0° 1600 rpm didapatkan rentang panjang retak 4,48-7,76 mm dengan rentang siklus 240.800-252.000. Lalu pada variasi sudut *chamfer* 30° 800 rpm didapatkan rentang panjang retak 4,38-8,07 mm dengan rentang siklus 266.000-277.200. Pada variasi sudut *chamfer* 30° 1120 rpm didapatkan rentang panjang retak 4,47-9,03 mm dengan rentang siklus 282.800-294.000. Pada variasi sudut *chamfer* 30° 1600 rpm didapatkan rentang panjang retak 4,33-9,73 mm dengan rentang siklus 313.600-324.800.

Dapat diketahui bahwa nilai panjang retak maksimum tertinggi terjadi pada variasi permukaan geometri sudut *chamfer* 30° 1600 rpm yaitu sebesar 9,73 mm dengan siklus 324.800. Sedangkan nilai panjang retak maksimum terendah terjadi pada variasi permukaan geometri sudut *chamfer* 0° 800 rpm yaitu sebesar 6,37 mm dengan siklus 194.800. Hal ini berbanding lurus dengan data sebelumnya dimana variasi permukaan geometri sudut *chamfer* 30° memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi dibandingkan variasi yang lainnya.

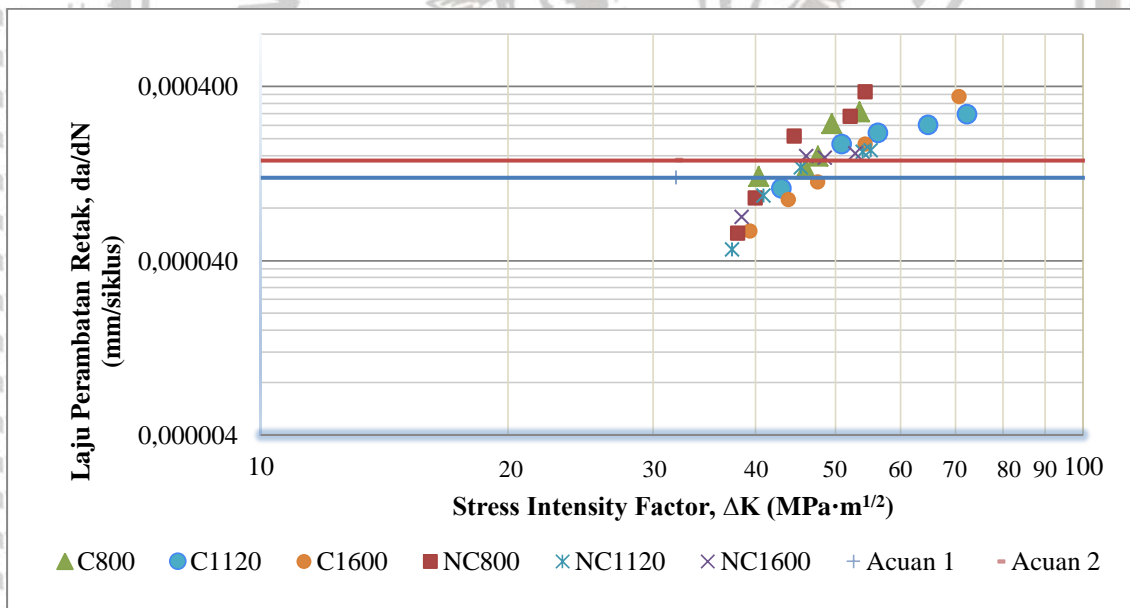
Nilai-nilai dari grafik a-N tersebut digunakan untuk mencari nilai da/dN sehingga mendapatkan hasil grafik hubungan da/dN dengan ΔK menggunakan persamaan 2-10. Kemudian hasil perhitungan digunakan untuk membuat grafik hubungan antara da/dN dan ΔK seperti pada Gambar 4.4.



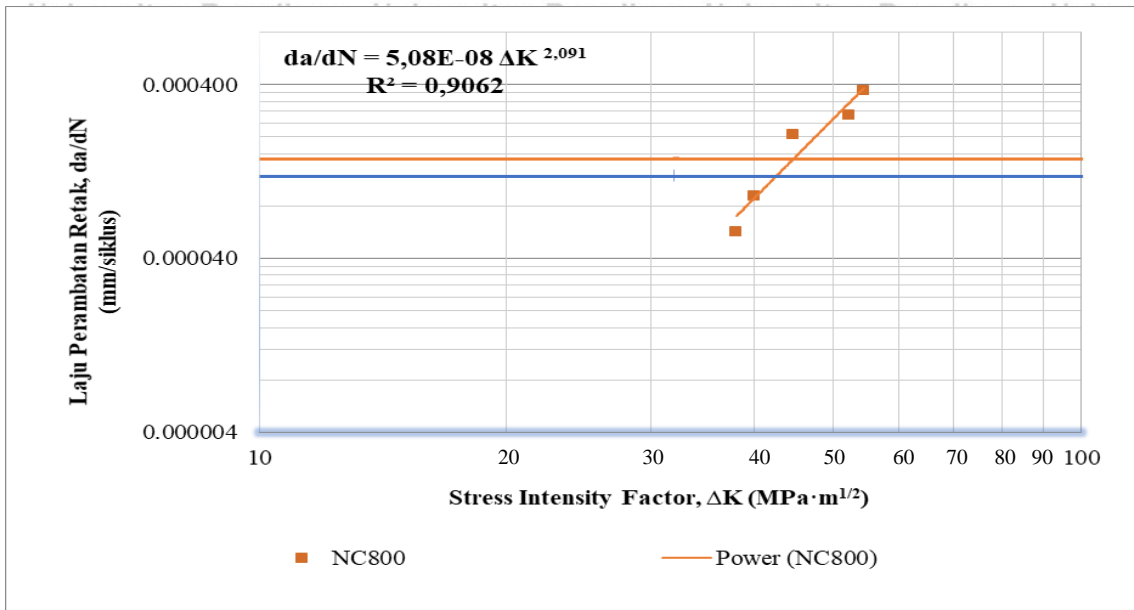
Gambar 4.4 Grafik hubungan antara da/dN dengan ΔK region I, II, dan III

Dari Gambar 4.4 menunjukkan grafik hubungan da/dN terhadap ΔK . Pada grafik tersebut pada variasi permukaan geometri *chamfer* 0° , dan 30° satu sisi dengan kecepatan putaran spindle 800 rpm, 1120 rpm, dan 1600 rpm hasil las gesek A6061. Pada gambar diatas dapat dijabarkan bahwa variasi 0° 800 rpm, memiliki nilai *Stress Intensity Factor* (SIF) berada pada kisaran 35,61-52,12 MPa·m^{1/2}. Variasi 0° 1120 rpm memiliki nilai *Stress Intensity Factor* (SIF) berada pada kisaran 35,19-53,95 MPa·m^{1/2}. Variasi 0° 1600 rpm memiliki nilai *Stress Intensity Factor* (SIF) berada pada kisaran 35,61-48,87 MPa·m^{1/2}. Kemudian untuk variasi 30° 800 rpm memiliki nilai *Stress Intensity Factor* (SIF) berada pada kisaran 35,61-48,87 MPa·m^{1/2}. Variasi 30° 1120 rpm memiliki nilai *Stress Intensity Factor* (SIF) berada pada kisaran 37,45-72,27 MPa·m^{1/2}. Variasi 30° 1600

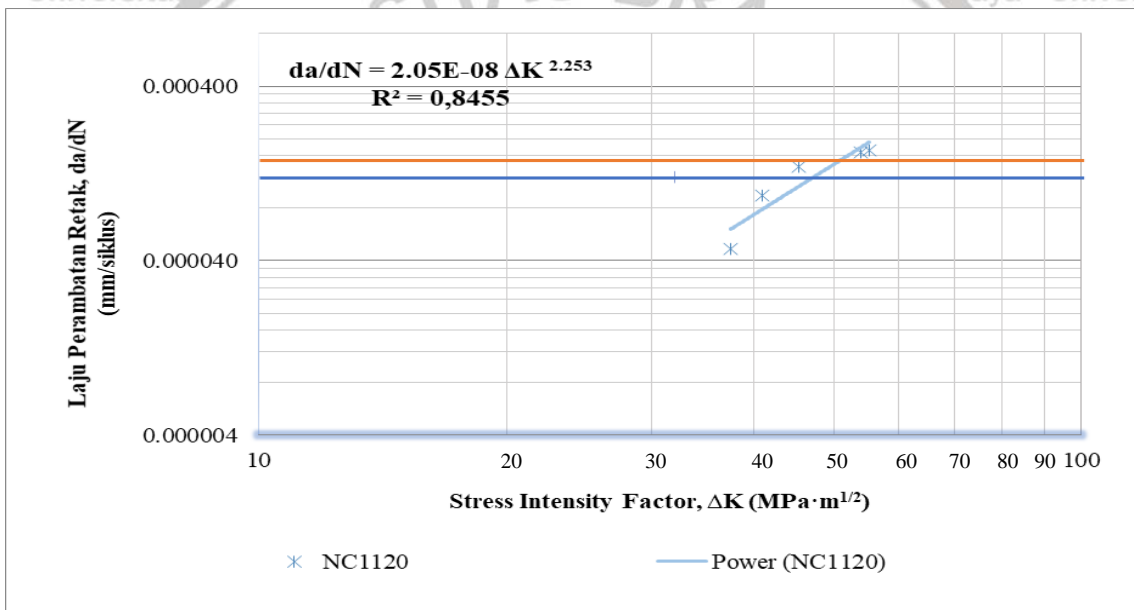
rpm memiliki nilai *Stress Intensity Factor* (SIF) berada pada kisaran 36,24-70,71 MPa·m^{1/2}. Pada grafik tersebut pada variasi permukaan geometri *chamfer* 0°, dan 30° satu sisi dengan kecepatan putaran spindle 800 rpm, 1120 rpm, dan 1600 rpm hasil las gesek A6061. Pada gambar diatas dapat dijabarkan bahwa variasi 0° 800 rpm memiliki nilai *Stress Intensity Factor* (SIF) berada pada kisaran 35,61-54,36 MPa·m^{1/2}. Variasi 0° 1120 rpm memiliki nilai *Stress Intensity Factor* (SIF) berada pada kisaran 35,19-55,18 MPa·m^{1/2}. Variasi 0° 1600 rpm memiliki nilai *Stress Intensity Factor* (SIF) berada pada kisaran 35,61-52,83 MPa·m^{1/2}. Kemudian untuk variasi 30° 800 rpm memiliki nilai *Stress Intensity Factor* (SIF) berada pada kisaran 35,61-53,53MPa·m^{1/2}. Variasi 30° 1120 rpm memiliki nilai *Stress Intensity Factor* (SIF) berada pada kisaran 37,45-72,27 MPa·m^{1/2}. Variasi 30° 1600 rpm memiliki nilai *Stress Intensity Factor* (SIF) berada pada kisaran 36,24-70,71 MPa·m^{1/2}. Dapat diketahui bahwa nilai SIF maksimum tertinggi terdapat pada variasi permukaan geometri sudut *chamfer* 30° yaitu sebesar 72,27 MPa·m^{1/2} dengan laju perambatan retak lelah 0,000275 mm/siklus. Sedangkan untuk nilai SIF maksimum terendah terdapat pada variasi permukaan geometri sudut *chamfer* 0° yaitu sebesar 48,870 MPa·m^{1/2} dengan laju perambatan retak lelah 0,00016429 mm/siklus.



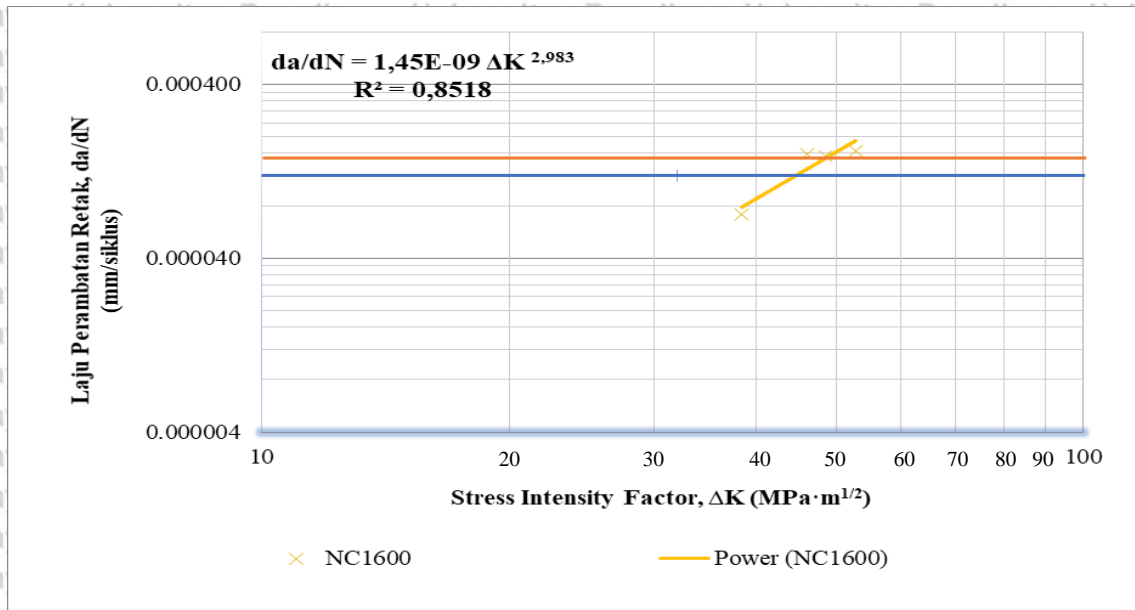
Gambar 4.5 Grafik region II seluruh variasi



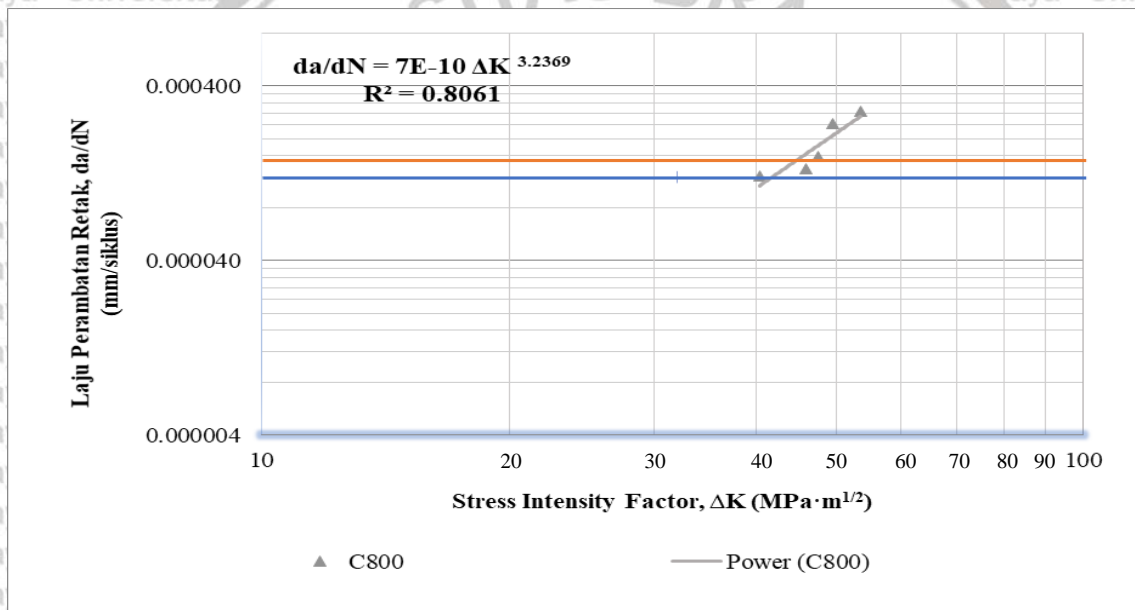
Gambar 4.6 Grafik garis regresi variasi sudut chamfer 0° 800 rpm



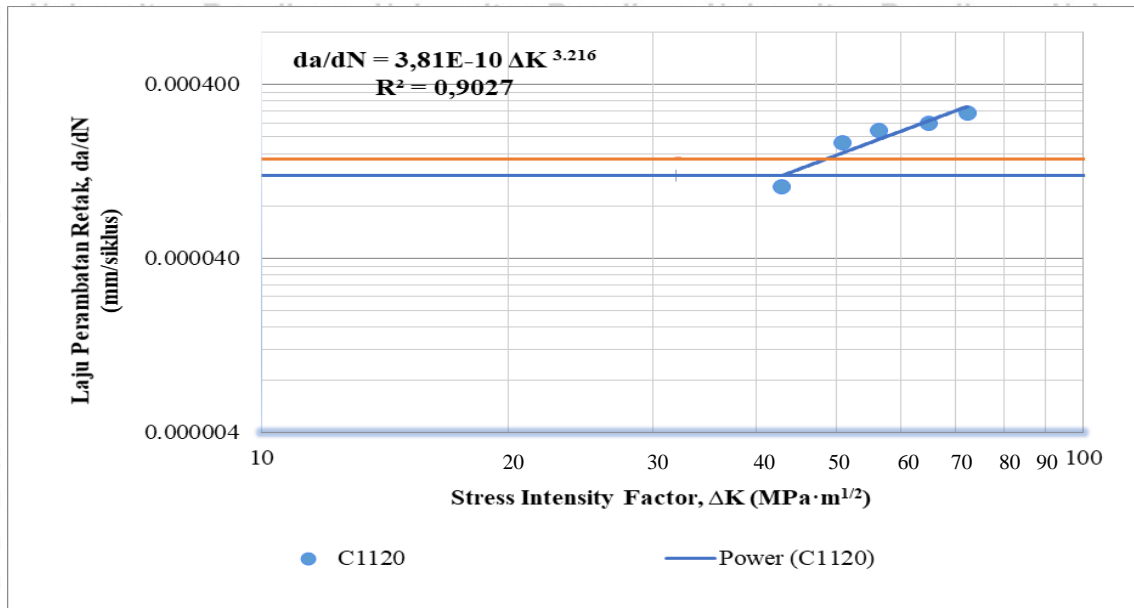
Gambar 4.7 Grafik garis regresi variasi sudut chamfer 0° 1120 rpm



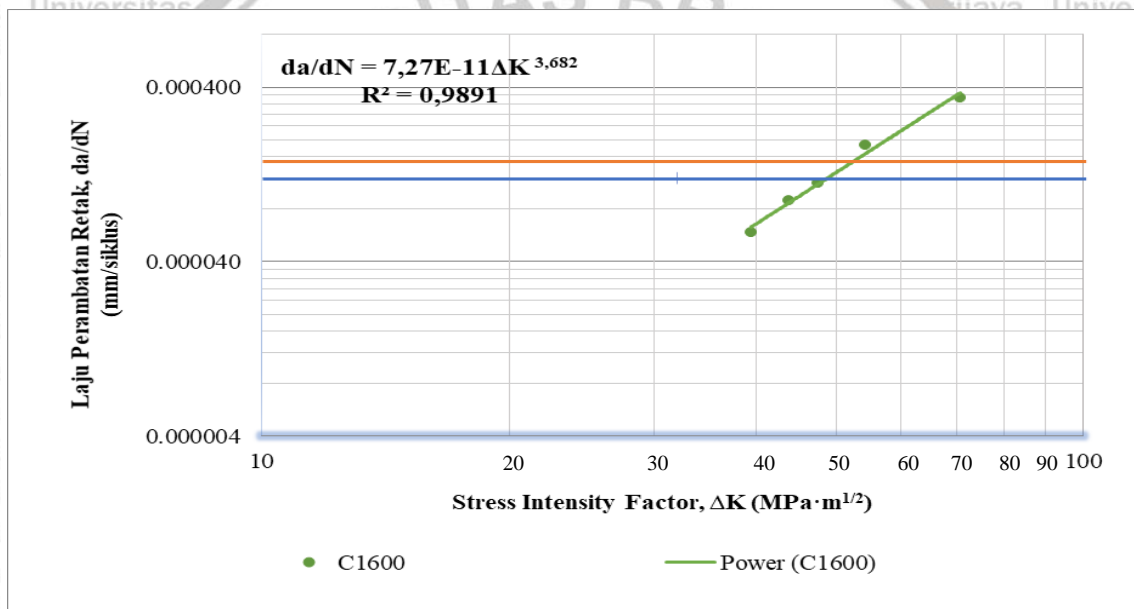
Gambar 4.8 Grafik garis regresi variasi sudut chamfer 0° 1600 rpm



Gambar 4.9 grafik garis regresi variasi sudut chamfer 30° 800 rpm



Gambar 4.10 Grafik garis regresi variasi sudut chamfer 30° 1120 rpm



Gambar 4.11 Grafik garis regresi variasi sudut chamfer 30° 1600 rpm

Dari grafik hubungan antara da/dN dengan ΔK dapat digunakan untuk menghitung konstanta C dan m. C dan m merupakan konstanta Paris yang menunjukkan kedudukan dan nilai eksponensial pada region II dari grafik ΔK - da/dN . Berikut merupakan contoh perhitungan variasi sudut chamfer 30° 1600 rpm.

Dengan menarik garis lurus melewati titik-titik pada plot log-log (Gambar 4.11) tersebut didapatkan:

$$\text{Diketahui} : \left(\Delta K_A; \frac{da}{dN_A} \right) = \left(48,82; 12 \times 10^{-5} \right) \text{ dan } \left(\Delta K_B; \frac{da}{dN_B} \right) = \left(51,87; 15 \times 10^{-5} \right)$$

$$\text{Perhitungan} : m = \frac{\log\left(\frac{da}{dN_A}\right) - \log\left(\frac{da}{dN_B}\right)}{\log(\Delta K_A) - \log(\Delta K_B)} = \frac{\log 12 \times 10^{-5} - \log 15 \times 10^{-5}}{\log 48,82 - \log 51,87} = 3,682$$

$$C = \frac{\frac{da}{dN}}{(\Delta K)^m} = \frac{12 \times 10^{-5} \frac{\text{mm}}{\text{siklus}}}{(48,82 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}})^{2,309}} = 7,27 \times 10^{-11} \frac{\text{mm/siklus}}{(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^m}$$

Dengan menggunakan rumus diatas, diperoleh hasil variasi lainnya:

$$\text{Variasi sudut chamfer } 0^\circ \text{ 800 rpm, } C = 5,08 \times 10^{-8} \frac{\text{mm/siklus}}{(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^m}, \text{ dan } m = 2,091$$

$$\text{Variasi sudut chamfer } 0^\circ \text{ 1120 rpm, } C = 2,05 \times 10^{-8} \frac{\text{mm/siklus}}{(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^m}, \text{ dan } m = 2,253$$

$$\text{Variasi sudut chamfer } 0^\circ \text{ 1600 rpm, } C = 1,45 \times 10^{-9} \frac{\text{mm/siklus}}{(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^m}, \text{ dan } m = 2,983$$

$$\text{Variasi sudut chamfer } 30^\circ \text{ 800 rpm, } C = 7,37 \times 10^{-10} \frac{\text{mm/siklus}}{(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^m}, \text{ dan } m = 3,216$$

$$\text{Variasi sudut chamfer } 30^\circ \text{ 1120 rpm, } C = 3,81 \times 10^{-10} \frac{\text{mm/siklus}}{(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^m}, \text{ dan } m = 3,342$$

$$\text{Variasi sudut chamfer } 30^\circ \text{ 1600 rpm, } C = 7,27 \times 10^{-11} \frac{\text{mm/siklus}}{(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^m}, \text{ dan } m = 3,682$$

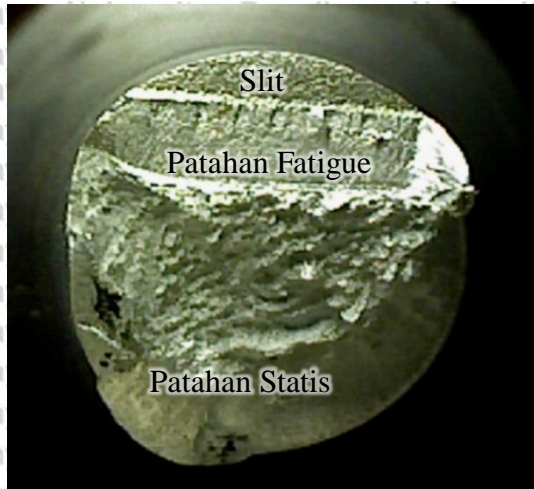
Hal ini dapat terjadi dikarenakan pada variasi sudut *chamfer* 30° luas penampang yang lebih kecil dibandingkan dengan variasi lainnya yang menyebabkan adanya penambahan gaya dari benda kerja yang lebih besar pada saat pengelasan, sehingga menyebabkan deformasi plastis yang tinggi. Kecepatan putaran *spindle* yang semakin besar menyebabkan penyebaran *heat input* yang kecil karena proses penyatuan kedua spesien menjadi cepat pada proses pengelasan sehingga membuat kekuatan tarik material semakin meningkat dan konstanta laju perambatan retak lelah yang terjadi lebih kecil.

Selanjutnya, dapat dilihat pada grafik di atas dimana spesimen sudut *chamfer* 30° 1600 rpm memiliki nilai *stress intensity factor range* yang tinggi diikuti dengan siklus yang lebih panjang dibandingkan variasi lainnya. Waktu yang panjang untuk memunculkan peretakan awal pada spesimen ini disebabkan karena nilai *ultimate tensile strength* (UTS) yang lebih tinggi dibandingkan dengan variasi lainnya, sehingga memerlukan jumlah siklus pembebanan lelah yang lebih banyak.

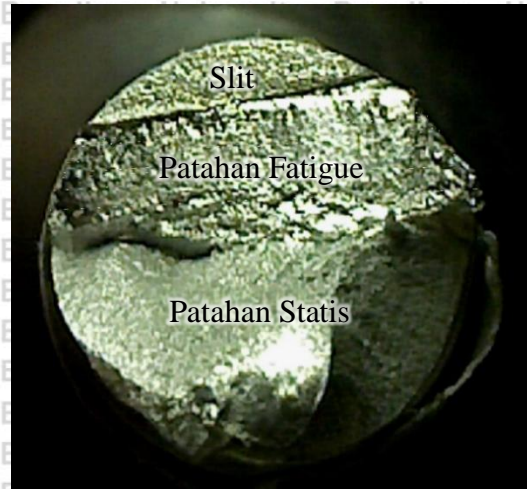
4.3 Permukaan Patah Spesimen

Dapat dilihat bahwa hasil permukaan patah dari masing-masing variasi permukaan geometri sudut *chamfer* (a) 0° 800 rpm, (b) 0° 1120 rpm, (c) 0° 1600 rpm, (d) 30° 800 rpm, (e) 30° 1120 rpm, (f) 30° rpm 1600 yang ditunjukkan pada Gambar 4.12 menggunakan kamera lensa makro. Pada patahan lelah terdapat dua jenis daerah patahan yaitu daerah patah lelah dan daerah patah statis. Bentuk perambatan retak pada patahan lelah yang terlihat pada lensa makro seperti ombak yang bersusun disebut *beachmarks*. Bentuk patahan ini memiliki permukaan yang relatif lebih datar. Sedangkan, bentuk perambatan retak pada patahan statis memiliki permukaan yang relatif tidak datar yang diakibatkan oleh ketidaksanggupan material dalam menahan perambatan retak lelah.

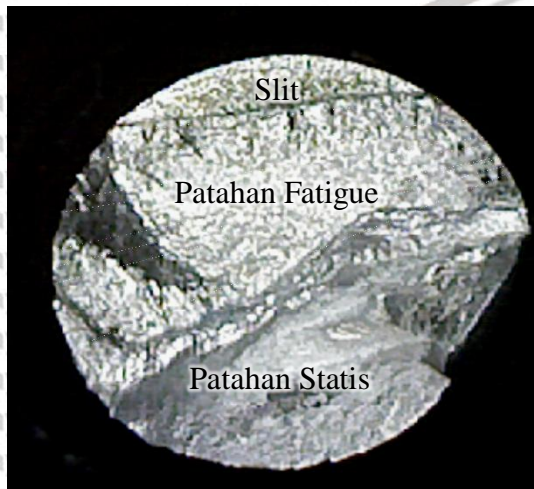
Hasil pengamatan patahan dari spesimen menunjukkan bahwa luasan patahan sebanding dengan panjang retakan yang merambat pada spesimen. Namun pada gambar D dan F menunjukkan permukaan patah yang bergelombang (permukaan yang tidak lurus rata). Hal tersebut disebabkan karena tidak meratanya penyatuan logam secara *solid state* pada proses pengelasan. Lalu untuk luasan permukaan yang relatif semakin besar disebabkan karena pada variasi permukaan geometri sudut *chamfer* 30° memiliki nilai kekuatan tarik yang tinggi sesuai dengan dasar teori. Peningkatan kecepatan putaran spindle pada proses pengelasan juga menurunkan *heat input* yang mengakibatkan minimumnya daerah HAZ dan meningkatkan kekuatannya. Sehingga semakin besar kekuatan tarik juga menyebabkan semakin tingginya nilai SIF terhadap perambatan retak lelah yang terjadi. Dan juga dengan semakin tingginya SIF maka membuat laju perambatan retak (da/dN) semakin besar dan nilai kontanta laju perambatan retak (C) yang kecil. Dengan semakin panjangnya perambatan retak lelah (da/dN) dan semakin kecilnya konstanta laju perambatan retak lelah (C) maka semakin besar juga luas daerah patah lelah yang terjadi.



A (sudut 0° 800 rpm)



B (sudut 0° 1120 rpm)



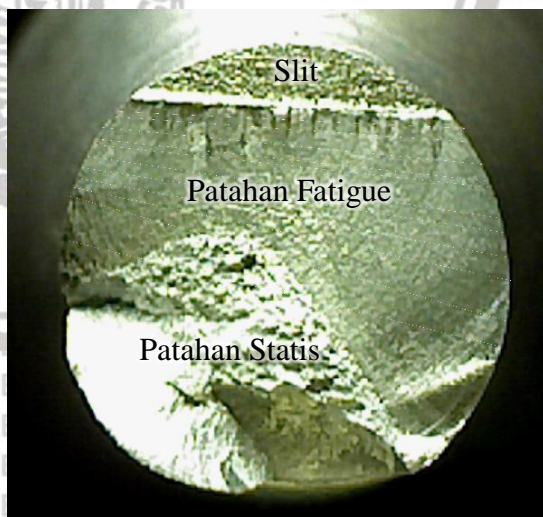
C (sudut 0° 1600 rpm)



D (sudut 30° 800 rpm)



E (sudut 30° 1120 rpm)



F (sudut 30° 1600 rpm)

Gambar 4.12 Foto makro patahan spesimen *fatigue crack growth*

4.4 Foto Mikrostruktur

Bagian ini menjelaskan mengenai struktur mikro yang terbentuk pada spesimen hasil las gesek aluminium A6061 dengan variasi sudut chamfer 30° kecepatan putaran spindle 1600 serta variasi Sudut chamfer 0° (tanpa chamfer) kecepatan putaran spindle 800 rpm. Foto mikro diambil menggunakan mikroskop pada bagian patahan fatigue pada spesimen. Spesimen di potong hingga berukuran kecil dan mendapatkan proses *etching* sebanyak 5-6 kali sebelum pengambilan gambar mikrostruktur dilakukan. Dapat dilihat pada gambar dibawah, dimana gambar (a) memiliki ukuran butir yang lebih kecil bila dibandingkan dengan gambar (b). Selain itu dapat dilihat juga bahwa terdapat dua perbedaan warna putih dan bercak hitam pada kedua foto mikrostruktur. Untuk area berwarna putih menunjukkan matriks aluminium, sedangkan bercak berwarna hitam merujuk pada paduan Mg-Si pada A6061. Pada foto (a) terlihat bahwasanya bercak hitam tersebar lebih merata dibandingkan dengan foto (b). Penyebaran yang kurang merata pada foto mikrostruktur disebabkan karena perbedaan laju pendinginan pada saat penyatuan logam A6061 secara *solid-state*.

Perhitungan diameter butir dilakukan dengan menggunakan metode planimetri (*Jeffries method*). Metode ini bertujuan menghitung besar butir per satuan luas pada lingkaran berdiameter 0.16 mm (luas lingkaran 0.02 mm^2). Metode planimetri dapat digunakan ketika di dalam lingkaran minimal terdapat 50 butir. Contoh perhitungan pada variasi tinggi kerucut 0 mm adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 N_A &= f \left(n_1 + \frac{1}{2} n_2 \right) \\
 &= 3.225 \left(102 + \frac{36}{2} \right) \\
 &= 387 \text{ pcs/mm} \\
 G &= (3.321928 \log_{10} N_A) - 2.954 \\
 &= (3.321928 \cdot \log(387)) - 2.954 \\
 &= 5.642
 \end{aligned}$$

Keterangan:

N_A = Banyaknya butir/luas (pcs/mm^2)

n_1 = Jumlah butir di dalam lingkaran

n_2 = Jumlah butir yang memotong lingkaran

f = Bilangan Jeffries

G = ASTM *grain size number*

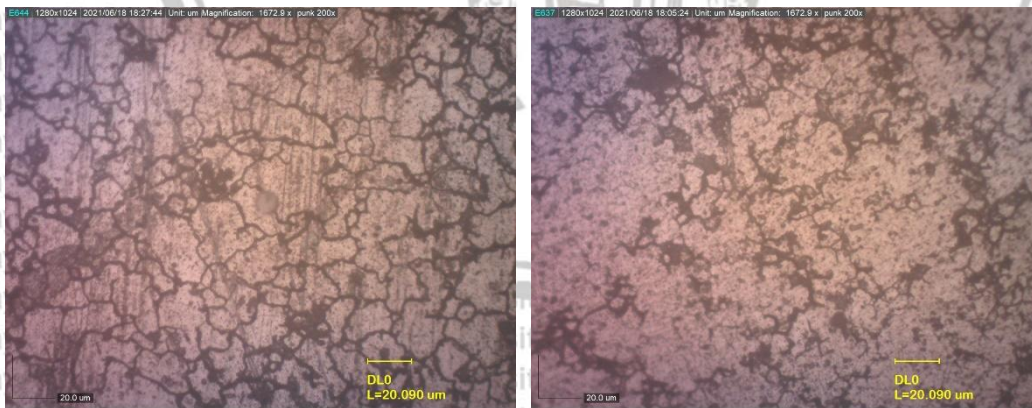
D = Diameter butir rata-rata (μm)

Nilai f didapatkan dengan membagi area aktual dengan area yang sebenarnya. Area aktual diukur dengan *software ImageJ*, dan area yang sebenarnya disesuaikan dengan ASTM E. 112. Setelah melakukan perhitungan, dilakukan interpolasi dengan nilai yang terdapat pada tabel standar ASTM E. 112. Untuk mendapatkan nilai diameter rata-rata butir. Tabel 4.3 menunjukkan hasil yang didapat.

Tabel 4.3
Data Hasil Perhitungan Diameter Butir.

Variasi	D (μm)
C1600	50.9828
NC800	60.9221

Terlihat bahwa pada Gambar 4.13 (a) memiliki memiliki ukuran butir yang lebih kecil bila dibandingkan dengan Gambar 4.13 (b). Dimana Gambar 4.13 (a) memiliki ukuran diameter butir sebesar 50,9828 μm dan Gambar 4.13 (b) memiliki ukuran diameter sebesar 60,9221 μm . Pada gambar a, batas butir yang dihasilkan memiliki jarak yang lebih dekat antara satu butir dengan butir lainnya apabila dibandingkan dengan Gambar 4.13 (b). Batas butir yang dekat disebabkan oleh dislokasi butir yang besar akibat kecepatan putaran spindle pengelasan yang tinggi. Ukuran butir yang kecil dengan batas butir yang berdekatan meningkatkan ikatan antar butir dan membuat kekuatan tarik menjadi lebih tinggi. Hal ini akan memperkecil nilai laju perambatan retak lelah yang terjadi pada spesimen.



Gambar 4.13 Foto struktur mikro pada bagian 2 mm dari *interface* sambungan las gesek A6061 (a) sudut *chamfer* 30° kecepatan putaran spindle 1600 rpm (b) sudut *chamfer* 0° kecepatan putaran spindle 800 rpm

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Pengujian ini diperoleh bahwa nilai konstanta laju perambatan retak lelah variasi sudut *chamfer* 0° rpm 800 konstanta $C = 5,08E-08 \frac{\text{mm/siklus}}{(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^m}$ dan $m = 2.091$; variasi sudut *chamfer* 0° rpm 1120 konstanta $C = 2,05E-08 \frac{\text{mm/siklus}}{(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^m}$ dan $m = 2.253$; variasi sudut *chamfer* 0° rpm 1600 konstanta $C = 1,45E-09 \frac{\text{mm/siklus}}{(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^m}$ dan $m = 2.983$; variasi sudut *chamfer* 30° 800 rpm konstanta $C = 7,37E-10 \frac{\text{mm/siklus}}{(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^m}$ dan $m = 3.216$; variasi sudut *chamfer* 30° 1120 rpm konstanta $C = 3,81E-10 \frac{\text{mm/siklus}}{(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^m}$ dan $m = 3.342$; dan variasi sudut *chamfer* 30° 1600 rpm konstanta $C = 7,27E-11 \frac{\text{mm/siklus}}{(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^m}$ dan $m = 3.682$. Nilai C dan m berpengaruh pada perambatan retak lelah, namun penentuan laju perambatan retak terendah diambil dari nilai C yang menunjukkan bahwa nilai konstanta laju perambatan retak lelah paling lambat pada variasi *chamfer* 30° 1600 rpm.

Penggunaan *chamfer* 30° dan peningkatan kecepatan putaran *spindle* meningkatkan ketahanan spesimen terhadap laju perambatan retak lelah. Hal ini dapat terjadi dikarenakan pada variasi sudut *chamfer* 30° memiliki luas penampang gesekan awal yang lebih kecil dibandingkan dengan variasi lainnya yang menyebabkan adanya penambahan gaya dari benda kerja yang lebih besar pada saat pengelasan sehingga terjadi deformasi plastis yang tinggi. Kecepatan putaran *spindle* yang tinggi yang mempercepat berlangsungnya proses pengelasan dan menurunkan nilai *friction time* untuk mencapai *burn of length* 3 mm. Sehingga nilai *heat input* akan menjadi lebih rendah dan berpengaruh pada peningkatan kekuatan tarik dari hasil pengelasan gesek. Hal ini akan membentuk ikatan logam yang lebih kuat serta menurunkan laju perambatan retak lehanya.

5.2 Saran

Untuk penelitian kedepannya, peneliti menyarankan untuk memberi perhatian khusus terhadap getaran yang muncul pada saat pengujian laju perambatan retak lelah. Peredaman yang baik sangat diperlukan untuk mengurangi *shock load* yang terjadi dan mendapatkan

data yang akurat. Selain itu pengambilan gambar menggunakan kamera dengan spesifikasi tinggi akan dapat menampilkan perambatan retak yang jelas dan lebih mudah dianalisa.

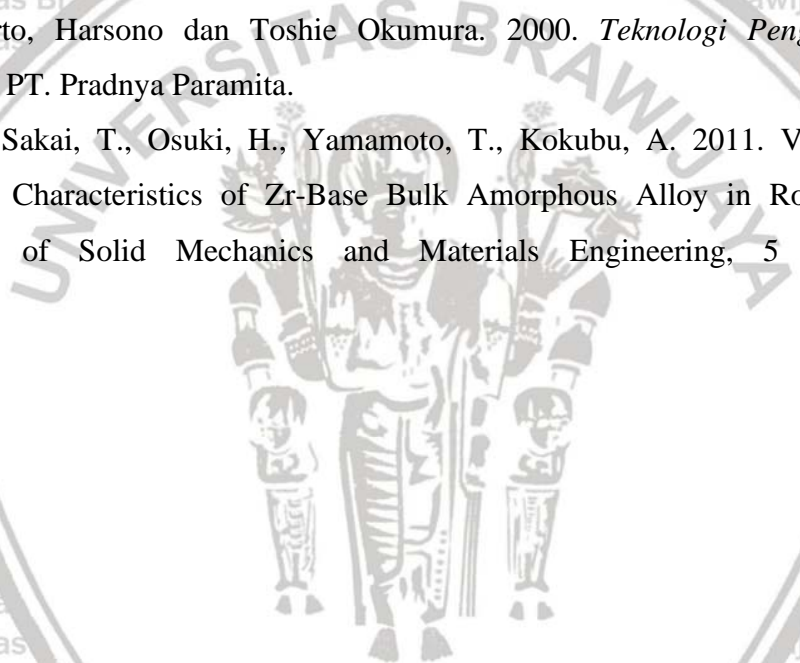


DAFTAR PUSTAKA

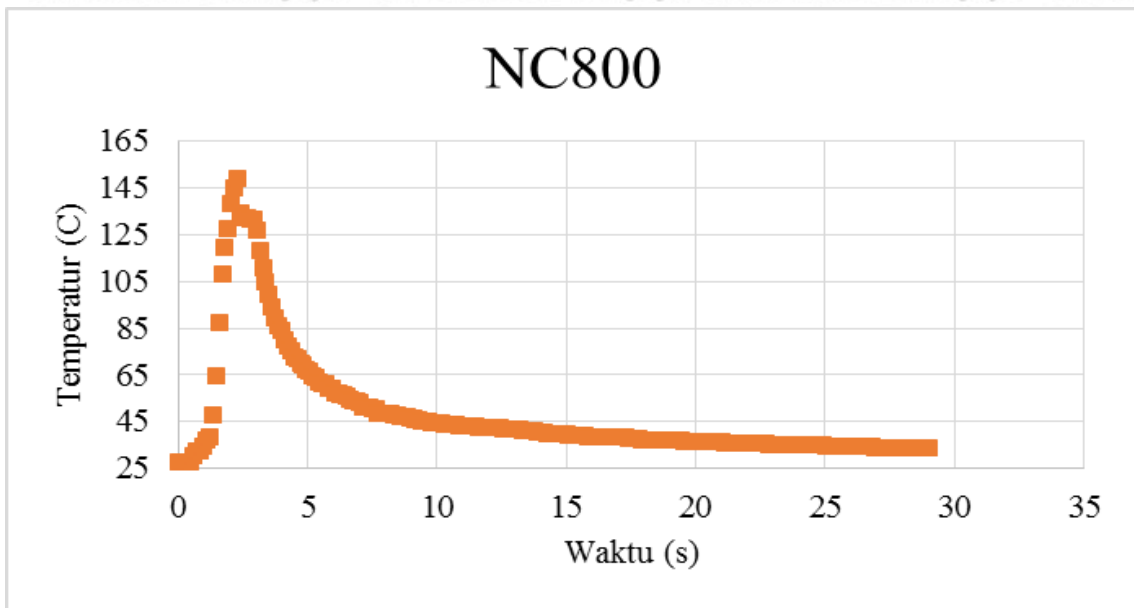
- Abrianto. 2009. *Karakteristik Kelelahan Logam*. UNJANI.
- Aisyah, Lis S., Iqbal, Muhammad N., Fauzan, Achmad. 2016. The effect of Chamfer to the Tensile Strength of Steel Jis S45cr Friction Welding Joints. University of Muhammadiyah Malang.
- Askeland, Donald R. 2010. *The Science and Engineering of Materials*. University of Missouri, USA
- ASM Handbook Volume 6. 1993. *Welding Brazing and Soldering*. ASM Handbook Committee, USA.
- Astro, R.B., Amirudin, D., Mufida, D.H., Humairo, S., Sparisoma, V. 2017. *Analisis Koefisien Gesek Statis dan Kinetis Benda di Bidang Miring Menggunakan Video Tracker*. Prosiding Seminar Kontribusi Fisika 2017, p.265-272.
- Avner, Sidney. 1974. *Introduction to Physical Metallurgy*. Singapore: McGraw-Hill Co
- AWS (2010). *Standard Welding Terms and Definitions*, American Welding Society.
- AWS (2010). *Structural Welding Code Steel*, American Welding Society.
- Barnes, T. A., Pashby, I. R. (2000). Joining techniques for aluminium spaceframes used in automobiles. *Journal of Materials Processing Technology*, 99 (1-3), 62–71.
- Bauccio, M. (Ed.) (1993). *ASM Metals Reference Book*. ASM International, 614.
- Broek, D. 1986. *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, Kluwer Academic Publisher. London: UK.
- Callister, William D. 2007. *Material Science and Engineering*. New York: Wiley Binder
- Dieter, George. 1986. *Mechanical Metallurgy*. Maryland. McGraw Hill Book.
- Dowling, Norman E. 2012. *Mechanical Behavior of Materials Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue Fourth Edition*. London. Pearson International.
- Elmer J. W., and Kautz D. D. 1993. *The ASM Handbook, Welding, Brazing, and Soldering*. Fundamentals of Friction Welding. Lawrence Livermore National Laboratory Vol.6
- Irawan, Yudy. 2019. Tensile Strength and Fatigue Crack Growth Rate of Chamfered and Clamped A6061 Friction Weld Joints.
- Kalpakjian, Serope. 1989. *Manufacturing Engineering and Technology*. Singapore: Pearson Education Inc.
- Kalpakjian, Serope. 2014. *Manufacturing Engineering and Technology*. Singapore: Pearson Education Inc.

- Khurmi, R.S. & Gupta, J.K. 2005. *Machine Design (S.I. Units)*. New Delhi: Eurasia Publishing House (PVT.) LTD. pp. 128-129.
- Kuhn, Howard. 2000. ASM Handbook Volume 8 *Mechanical Testing and Evaluation*. ASM Handbook Committee, USA.
- Kutz, Myer. 2009. *Eshbach's Handbook of Engineering Fundamentals*, Fifth Edition. New Jersey. John Wiley & Sons.
- Langer, Edward L. 1990, ASM Handbook Volume 2 *Properties and Selection: Non-ferrous Alloys and Special Purpose Materials*, ASM Handbook Committee, USA.
- Lin, C. B. Lin, C. K. Mu, W. W. Wu and C. H. Hung. (1999). *The Effect Of Joint Design and Volume Fraction On Friction Welding Properties Of A360/Sic (P) Composites*. *Welding Research Supplement*. Departement Engineering, Tamkang University, Taiwan.
- Maalekian, M. (2007). Friction welding – critical assessment of literature. *Science and Technology of Welding and Joining*, 12 (8), 738–759.
- Madsen, D.A. 2012. *Engineering Drawing and Design: Fifth Edition*. USA: Delmar
- Messler, Robert W, Jr. (2004). *Principles of Welding*. Materials Science and Engineering Departement. Troy-New York.
- Nicholas, E. D. (2003). Friction Processing Technologies. *Welding in the World*, 47 (11-12), 2–9.
- Pratama, D. Y (2018). Kekuatan Lelah Sambungan Friction Welding Aluminium A6061 Dengan Dan Tanpa Geometri Kerucut Satu Sisi. Malang: Repository UB. 9555
- Pratowo, B. & Apriyansyah, N. 2016. Analisis Kekuatan Fatik Baja Karbon Rendah SC10 Dengan Tipe *Rotary Bending*. Bandar Lampung: Jurnal Teknik Mesin Universitas Bandar Lampung. Vol. 2 no.1.
- R. O. Ritchie. 1979. *Near Threshold Fatigue Crack Propagation in Steels*. New York: Int. Met.
- Sahin, M., Misirli, C. 2010. *Mechanical and Metalurgical Properties of Friction Welded Aluminium Joints*. Edited, Zaki Ahmad. INTECH, Ch. 11, p. 278-300.
- Santoso, E. B, Irawan, Y. S dan Sutikno, E. 2012. Pengaruh Sudut *Chamfer* dan Gaya Tekan Akhir Terhadap Kekuatan Tarik Dan Porositas Sambungan Las Gesek Pada Paduan Al – Mg – Si. Malang : Jurnal Rekayasa Mesin. Vol.03.01, pp 293-298.
- Satriawibawa, R. P. 2021. Pengaruh Panjang Kerucut Terpancung Pada Sisi Diam Terhadap Kekuatan Tarik Sambungan Las Gesek Aluminium A6061 Malang: Teknik Mesin Universitas Brawijaya Pp. 46.

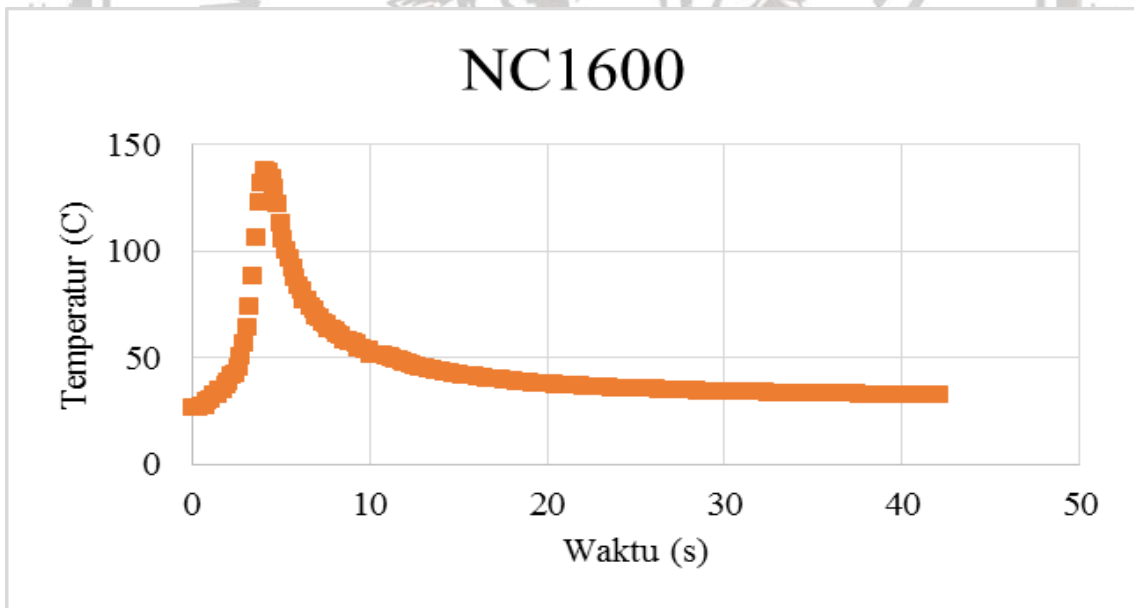
- Schijve, J. 2009. *Fatigue of Structures and Materials*, second ed. New York: Springer.
- Sofyan, T.B. (2010). *Pengantar Material Teknik*. Jakarta: PT. Salemba Teknika.
- Stephens, Ralph I. 2001. *Metal Fatigue in Engineering Second Edition*. New York. John Wayne and Sons.
- Surdia, Tata dan Shinroku Saito. 1999. *Pengetahuan Bahan Teknik*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- Tyagita, D.A. (2014). Kekuatan Puntir dan Porositas Hasil Sambungan Las Gesek AlMg-Si Variasi Chamfer dan Gaya Tekan Akhir. Malang: Jurnal Rekayasa Mesin. Vol.05.01
- Uday, M. B., Ahmad Fauzi, M. N., Zuhailawati, H., Ismail, A. B. (2010). Advances in friction welding process: a review. *Science and Technology of Welding and Joining*, 15 (7), 534–558.
- Wirjosumarto, Harsono dan Toshie Okumura. 2000. *Teknologi Pengelasan Logam*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- Zhang, Y., Sakai, T., Osuki, H., Yamamoto, T., Kokubu, A. 2011. Very High Cycle Fatigue Characteristics of Zr-Base Bulk Amorphous Alloy in Rotating Bending. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 5 (10), 519-533.



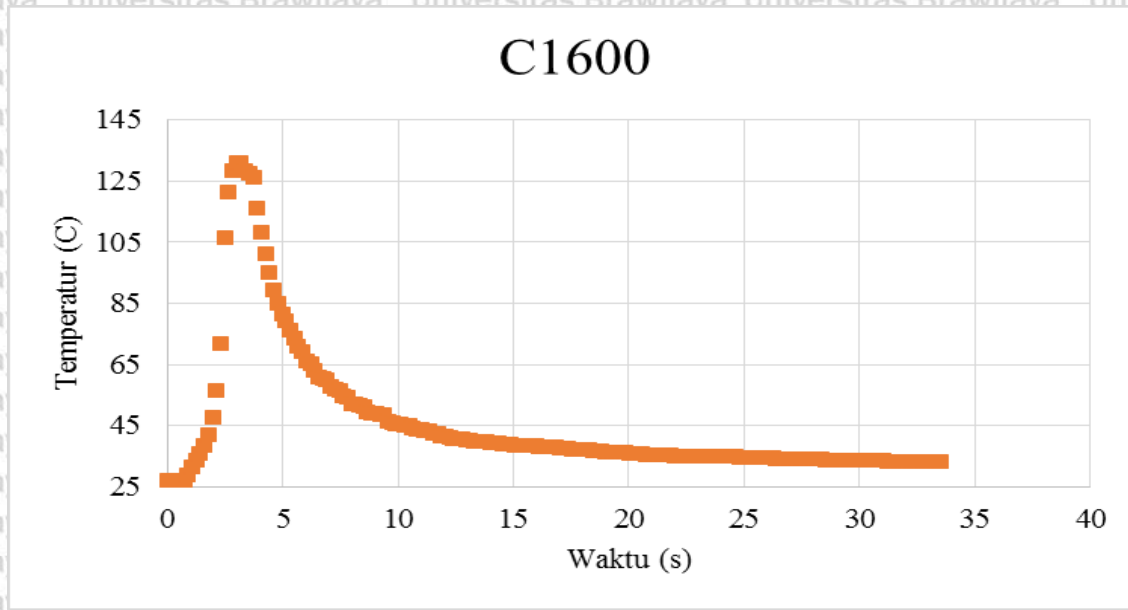
Lampiran 1 Grafik Temperatur-Waktu Pengelasan Variasi Sudut Chamfer 0° 800 RPM



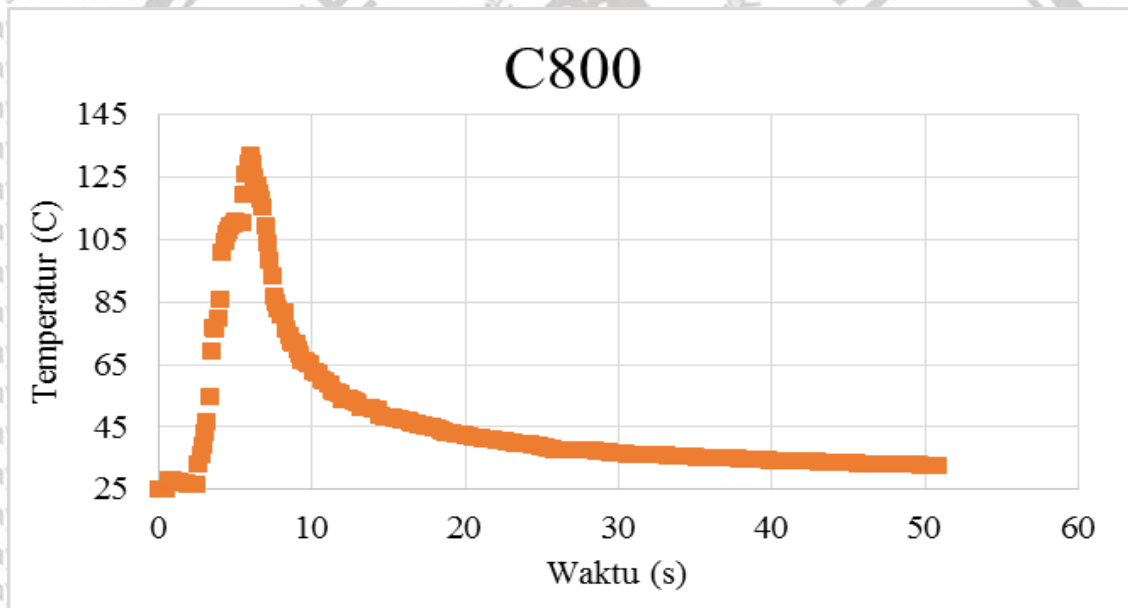
Variasi Sudut Chamfer 0° 1600 RPM



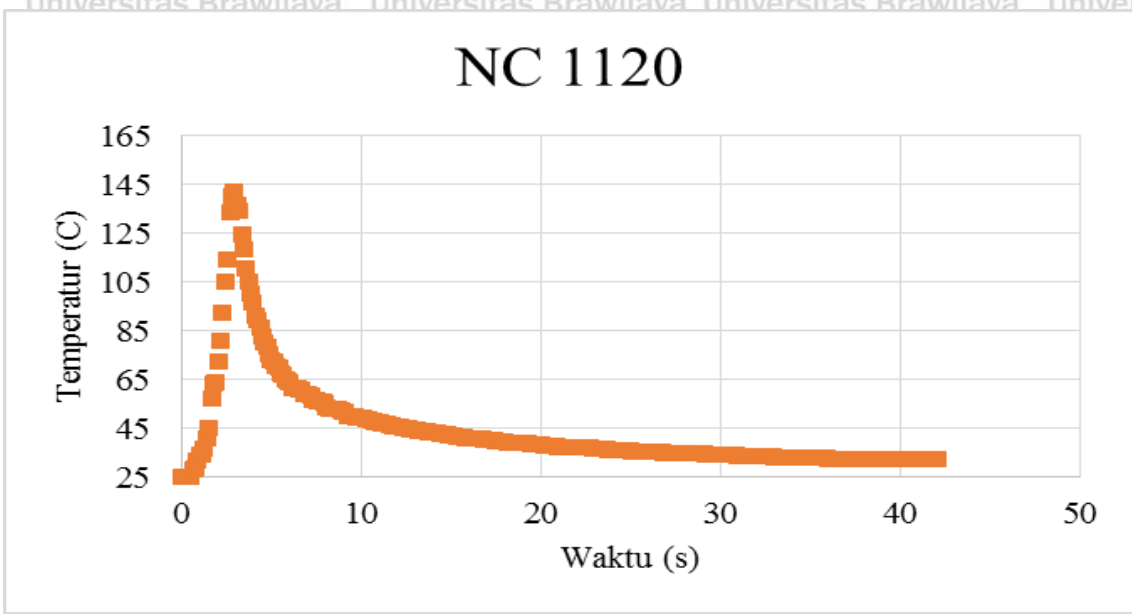
Variasi Sudut Chamfer 30° 1600 RPM



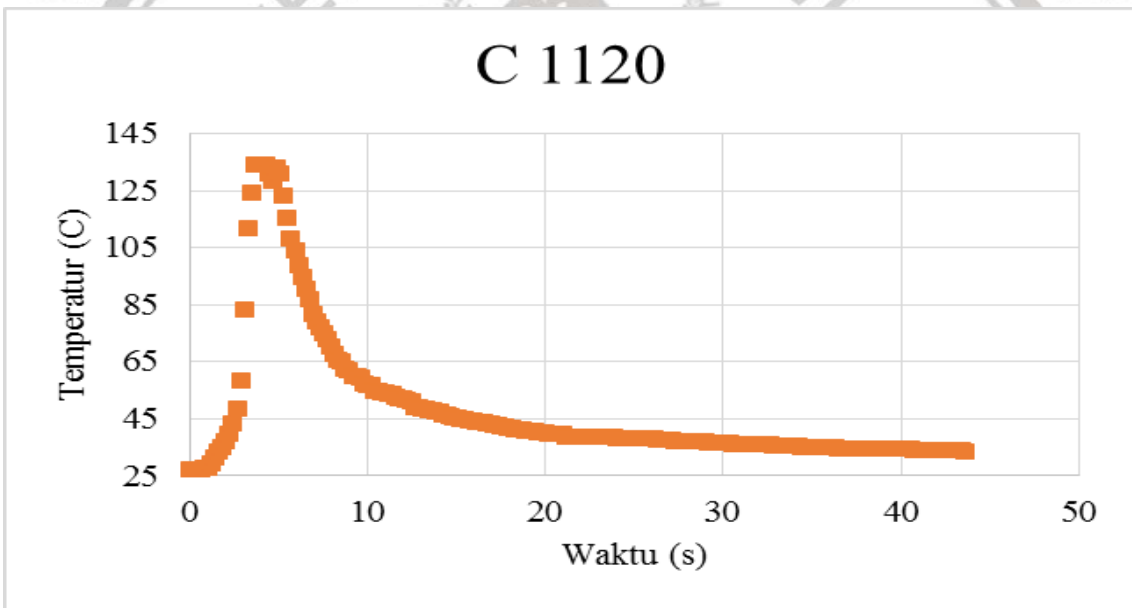
Variasi Sudut Chamfer 30° 800 RPM



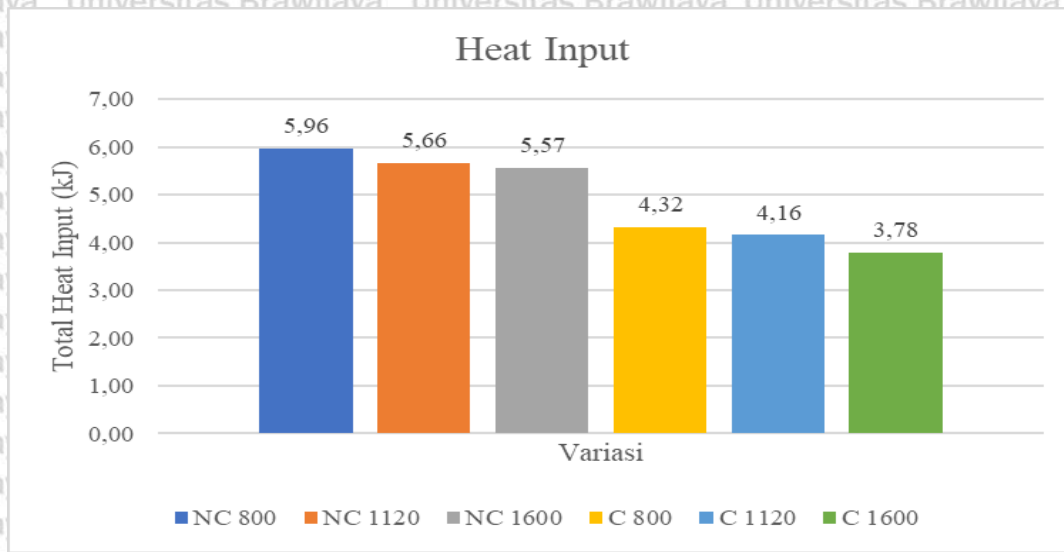
Variasi Sudut Chamfer 0° 1120 RPM



Variasi Sudut Chamfer 30° 1120 RPM



Lampiran 2 Nilai Heat Input



Perhitungan Heat Input :

$$Q = \frac{2}{3} \pi \cdot \omega \cdot \mu \cdot P \cdot t_f \cdot r^3$$

Q = Laju Energi thermal yg dibangkitkan (joule)

P = Friction Pressure (N/m²) sesuai dengan variasi pengelasan

ω = Kecepatan Putaran Spindle (rad/s)

μ = Koefisien Gesek = 0,4 (mengacu pada jurnal “Analisis Koefisien Gesek Statis dan Kinetis Benda di Bidang Miring Menggunakan Video Tracker” pada Prosiding Seminar Kontribusi Fisika 2017, p. 265-272.)

t_f = waktu gesekan (s)

R = radius permukaan gesek (m)

Gaya penekanan awal yang diberikan senilai 7 kN.

Luas Penampang Hydraulic Pump = 0,007 m²

Sehingga nilai P, friction pressure :

$$P = \frac{F}{A} = \frac{7000 \text{ N}}{0,007 \text{ m}^2} = 1000000 \text{ N/m}^2$$

Contoh perhitungan Q Variasi Tanpa Chamfer RPM 800 Pada Burn off Length 3 mm :

$$Q = \frac{2}{3} \pi \cdot \omega \cdot \mu \cdot P \cdot t_f \cdot r^3$$

$$Q = \frac{2}{3} \cdot 3,14 \cdot 83,733 \cdot 0,4 \cdot 1000000 \cdot 6,3 \cdot 0,015^3$$

$$Q = 14907,7152 \text{ Joule} = 1,491 \text{ kJ}$$

Nilai heat input pada *chart* merupakan nilai akumulasi heat input total dari seluruh perhitungan dari BOL 0 mm sampai BOL 3 mm disetiap variasi.

Lampiran 3 Foto Spesimen Sambungan Las Gesek

Sudut Chamfer 0° 800 RPM



Sudut Chamfer 0° 1120 RPM



Sudut Chamfer 0° 1600 RPM



Sudut Chamfer 30° 800 RPM



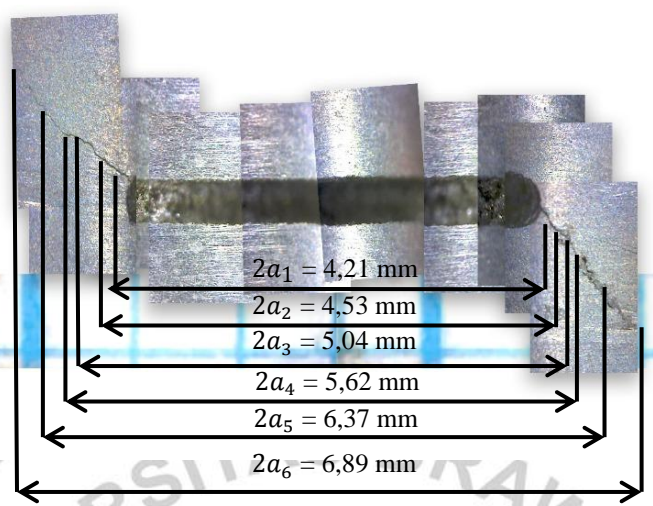
Sudut Chamfer 30° 1120 RPM



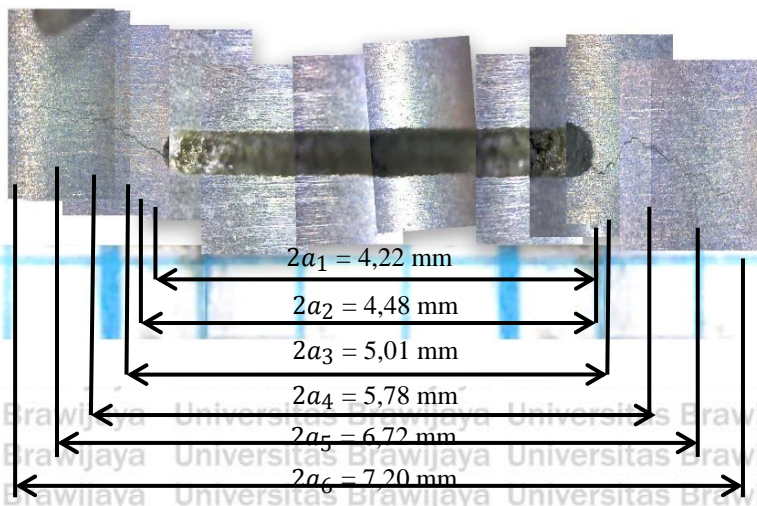
Sudut Chamfer 30° 1600 RPM



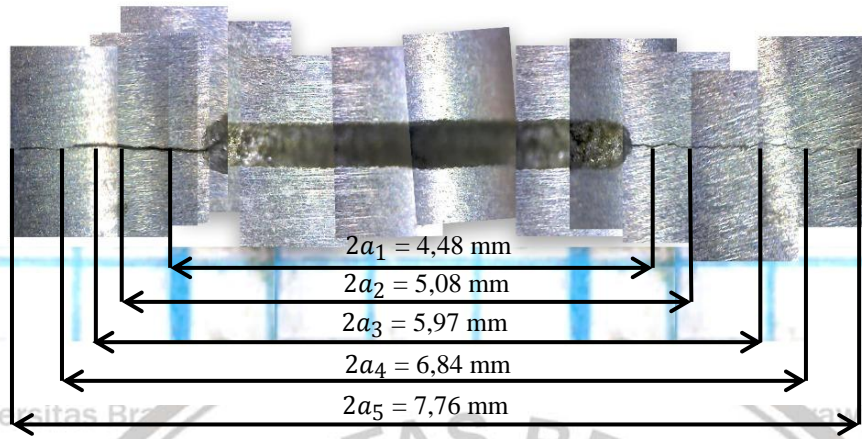
Lampiran 4 Perambatan Retak Sudut Chamfer 0°, 800 RPM



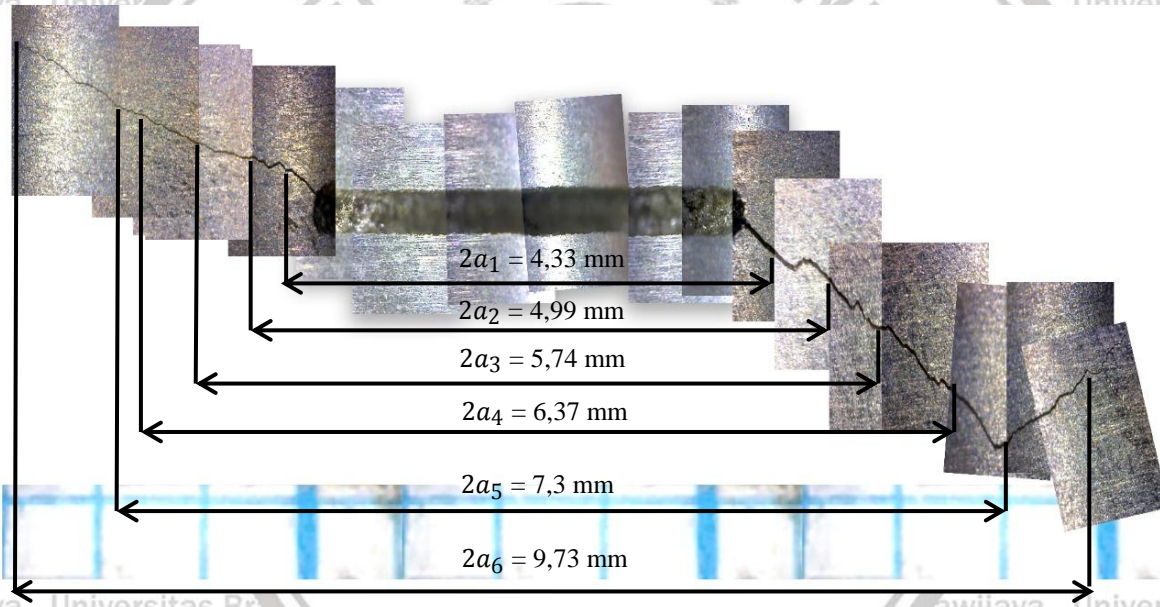
Sudut Chamfer 0° 1120 RPM



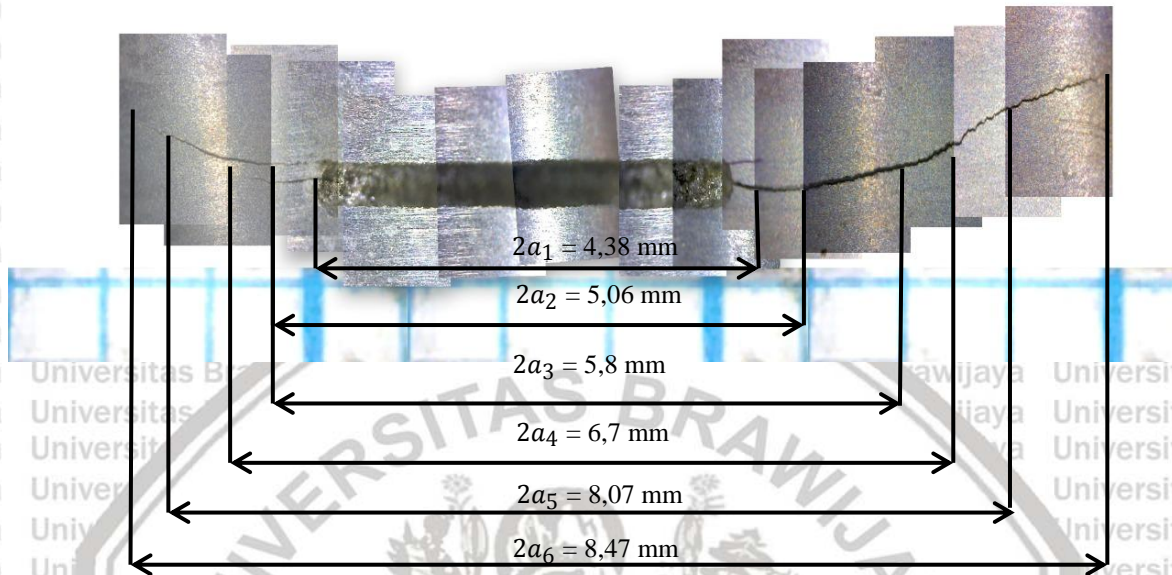
Sudut Chamfer 0°, 1600 RPM



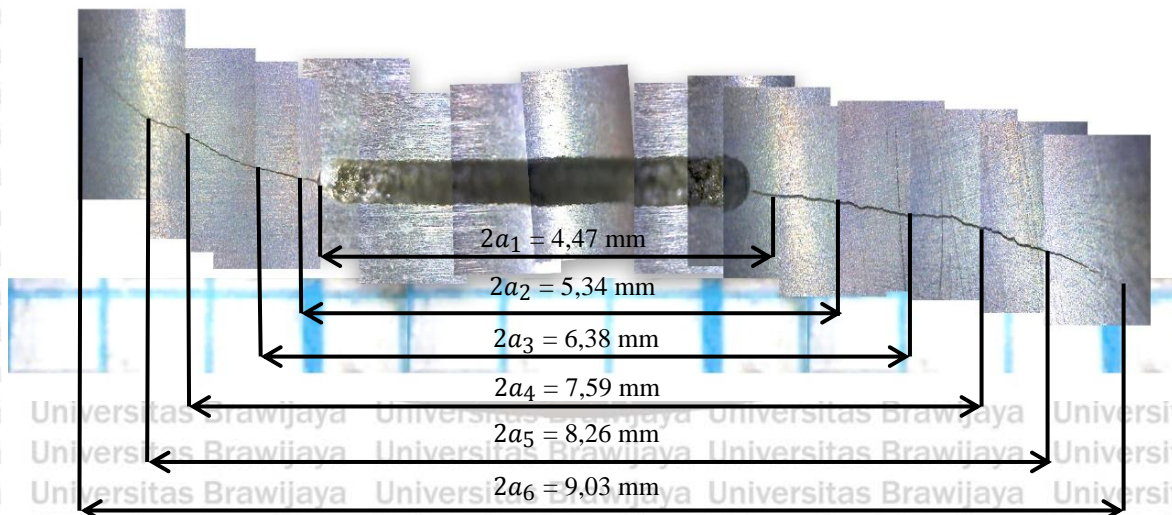
Sudut Chamfer 30°, 1600 RPM



Sudut Chamfer 30°, 800 RPM

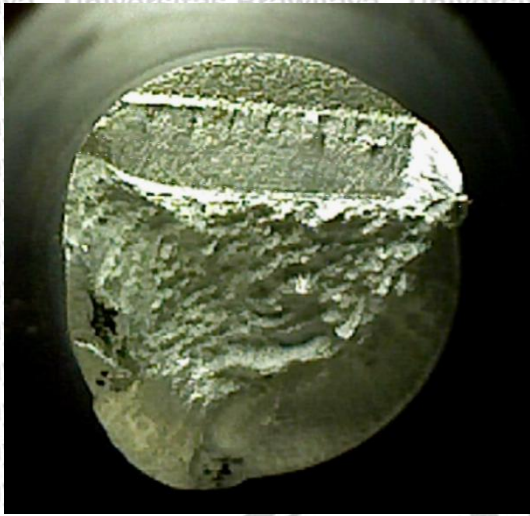


Sudut Chamfer 30°, 1120 RPM

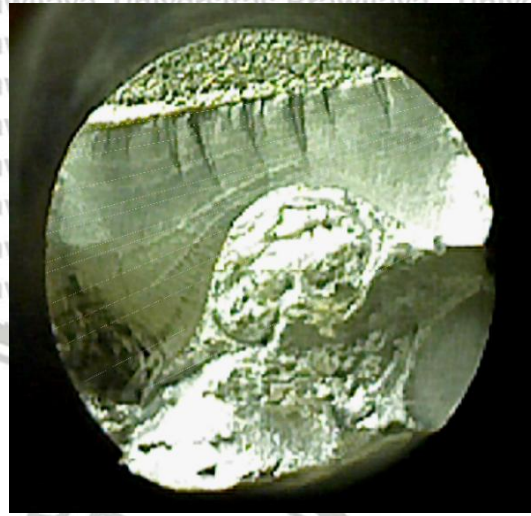


Lampiran 5 Patahan Hasil Uji Lelah

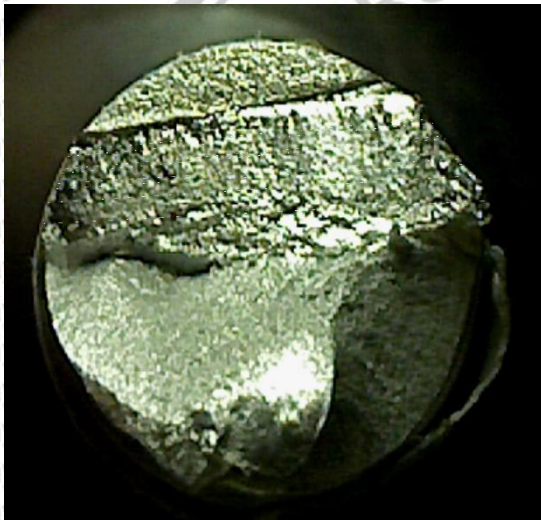
Sudut Chamfer 0° 800 RPM



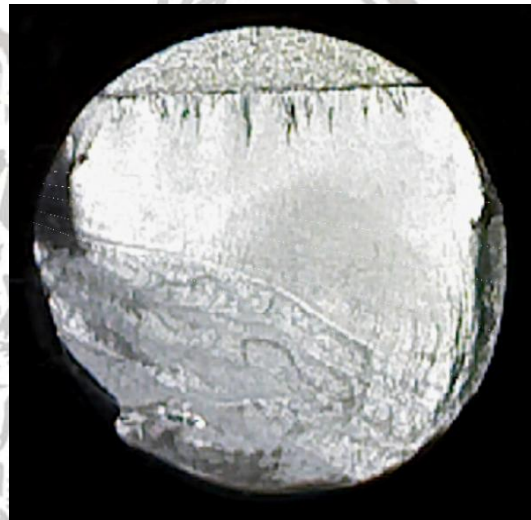
Sudut Chamfer 30° 800 RPM



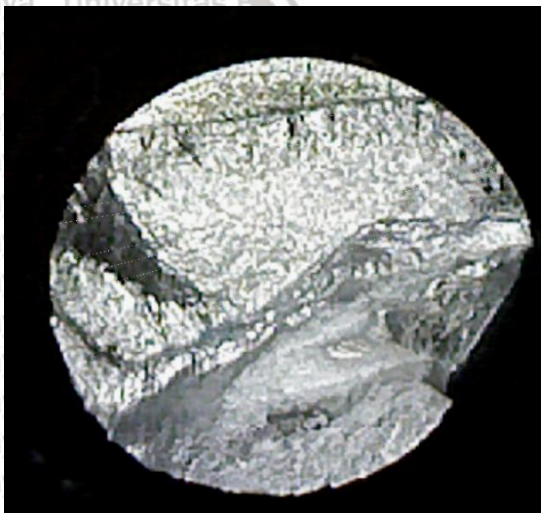
Sudut Chamfer 0° 1120 RPM



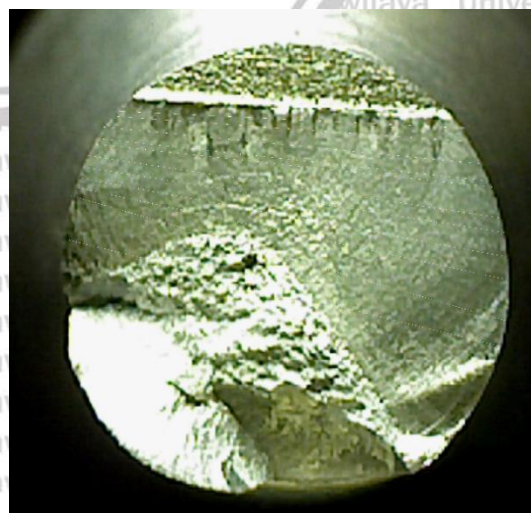
Sudut Chamfer 30° 1120 RPM



Sudut Chamfer 0° 1600 RPM



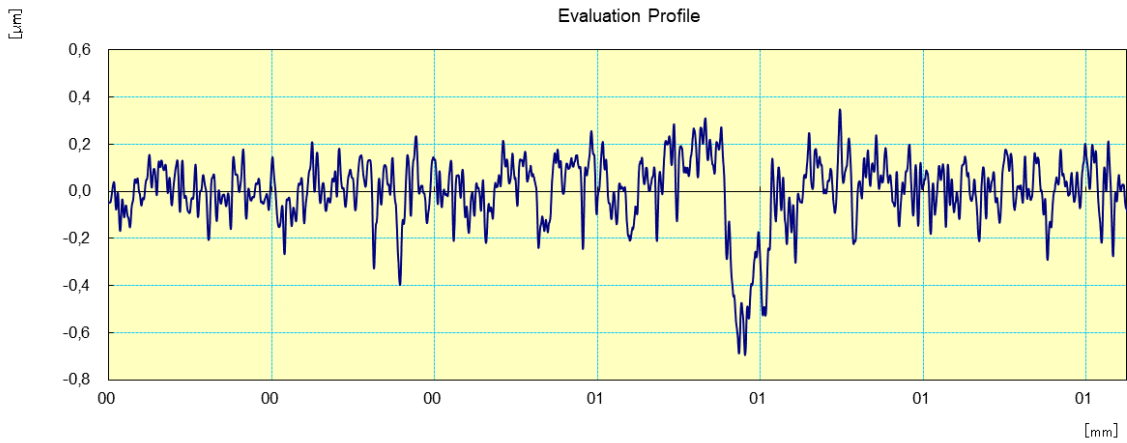
Sudut Chamfer 30° 1600 RPM



Lampiran 6 Hasil Uji Kekasaran

a) Sudut Chamfer 0° 800 RPM

CERTIFICATE OF INSPECTION

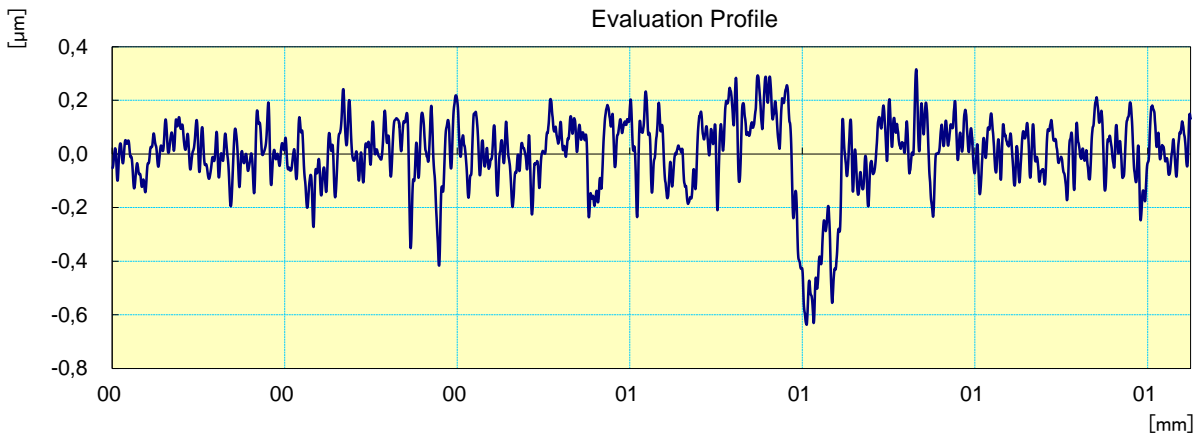


Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.25mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	0.100 µm		
Rq	0.129 µm		
Rz	0.641 µm		



b) Sudut Chamfer 0° 1120 RPM

CERTIFICATE OF INSPECTION

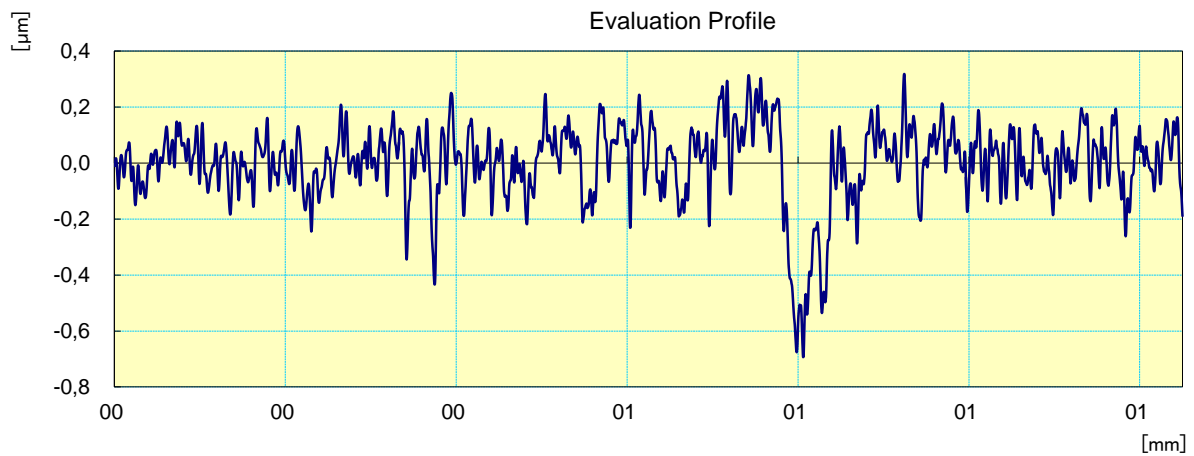


Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.25mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	0.097 µm		
Rq	0.124 µm		
Rz	0.613 µm		



c) Sudut Chamfer 0° 1600 RPM

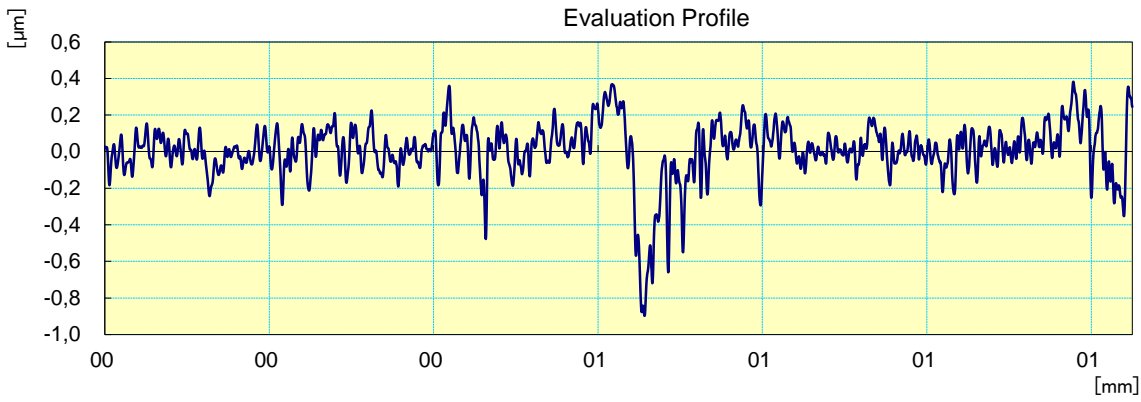
CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.25mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	0.099 µm		
Rq	0.127 µm		
Rz	0.620 µm		

d) Sudut Chamfer 30° 800 RPM

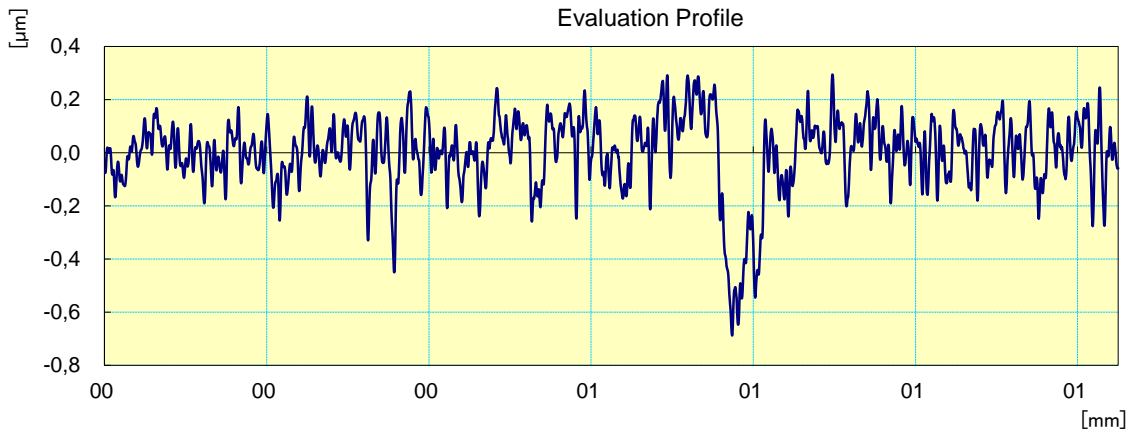
CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.25mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	0.106 µm		
Rq	0.142 µm		
Rz	0.766 µm		

e) Sudut Chamfer 30° 1120 RPM

CERTIFICATE OF INSPECTION

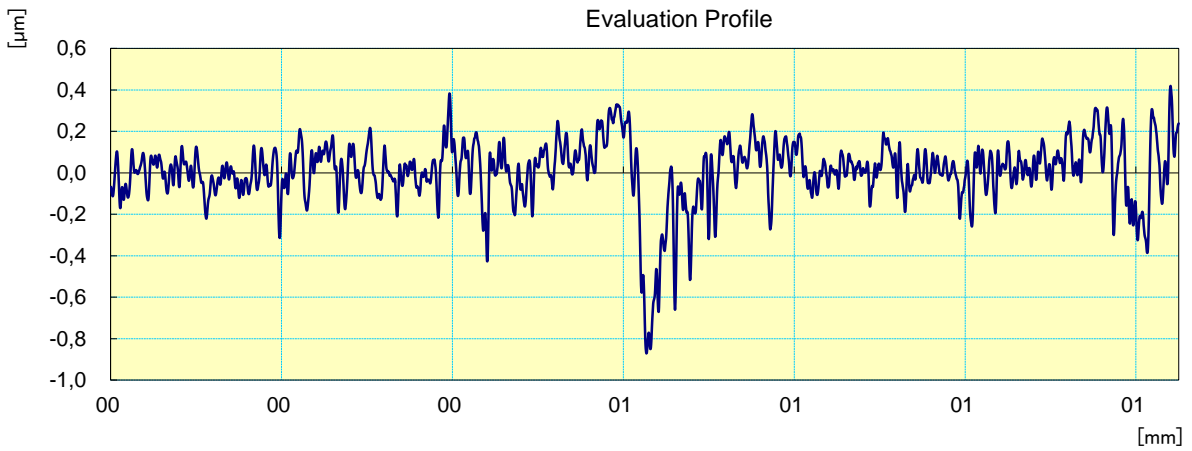


Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.25mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	0.101 µm		
Rq	0.131 µm		
Rz	0.642 µm		



f) Sudut Chamfer 30° 1600 RPM

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.25mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	0.108 µm		
Rq	0.143 µm		
Rz	0.779 µm		

