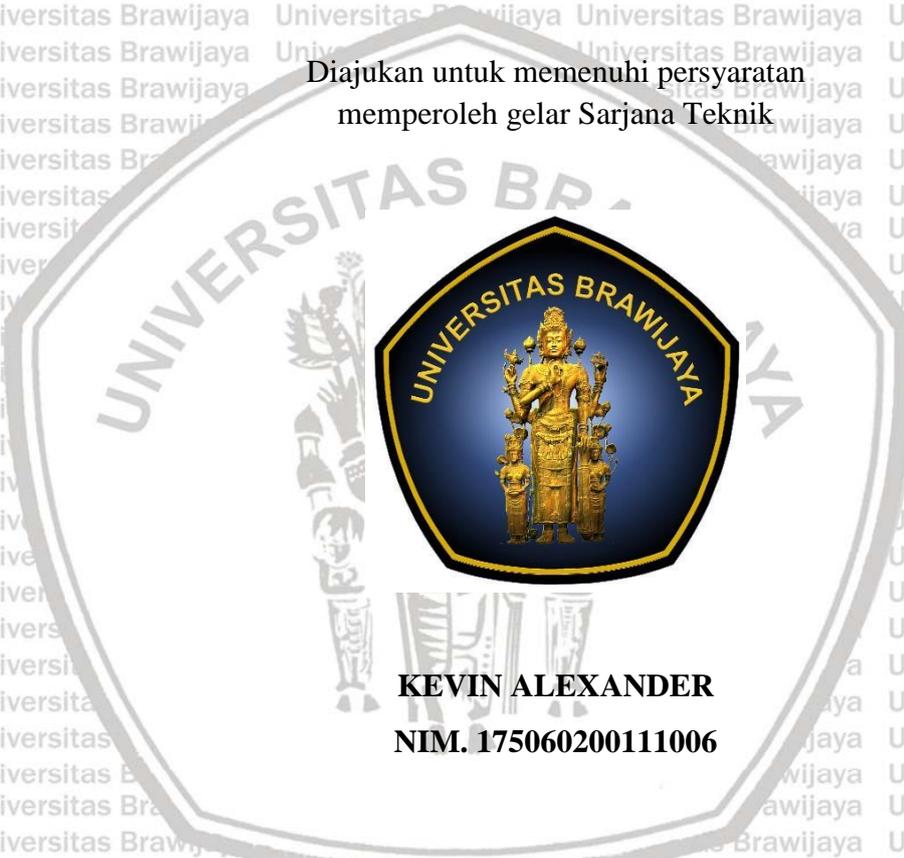


**PENGARUH SUHU AGING DAN PENAMBAHAN *ONE-SIDE*  
CHAMFER TERHADAP KEKUATAN TARIK SAMBUNGAN LAS  
GESEK ALUMINIUM A6061 DAN BAJA SS41**

**SKRIPSI**

**TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK MANUFAKTUR**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**KEVIN ALEXANDER**  
**NIM. 175060200111006**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**  
**FAKULTAS TEKNIK**  
**MALANG**

**2021**





**LEMBAR PENGESAHAN**

**PENGARUH SUHU *AGING* DAN PENAMBAHAN *ONE-SIDE*  
*CHAMFER* TERHADAP KEKUATAN TARIK SAMBUNGAN LAS  
GESEK ALUMINIUM A6061 DAN BAJA SS41**

**SKRIPSI**

**TEKNIK MESIN KONSENTRASI MANUFAKTUR**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**KEVIN ALEXANDER**

**NIM. 175060200111006**

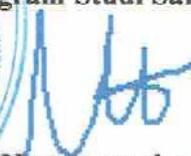
Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing  
pada tanggal 21 Juli 2021

**Dosen Pembimbing I**



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

**Mengetahui,**  
**Ketua Program Studi Sarjana**



**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 masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di 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 di dalam 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, 21 Juli 2021

Mahasiswa,



Kevin Alexander

NIM. 175060200111006





**UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM SARJANA**



## **SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI**

Nomor : 762/UN10.F07.12.11/PP/2021

Sertifikat ini diberikan kepada :

**KEVIN ALEXANDER**

Dengan Judul Skripsi :

**PENGARUH SUHU AGING DAN PENAMBAHAN ONE-SIDE CHAMFER  
TERHADAP KEKUATAN TARIK SAMBUNGAN LAS GESEK ALUMINIUM  
A6061 DAN BAJA SS41**

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



**Prof. DIARDO B. DARMADI, Ir., MT., Ph.D**  
NIP. 19670518 199412 1 001

Malang, 22 Juli 2021

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin

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



**JUDUL SKRIPSI:**

Pengaruh Suhu Aging Dan Penambahan *One-Side Chamfer* Terhadap Kekuatan Tarik Sambungan Las Gesek Aluminium A6061 dan Baja SS41

Nama Mahasiswa : Kevin Alexander

NIM : 175060200111006

Program Studi : Teknik Mesin

Konsentrasi : Teknik Manufaktur

**KOMISI PEMBIMBING :**

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

**TIM DOSEN PENGUJI :**

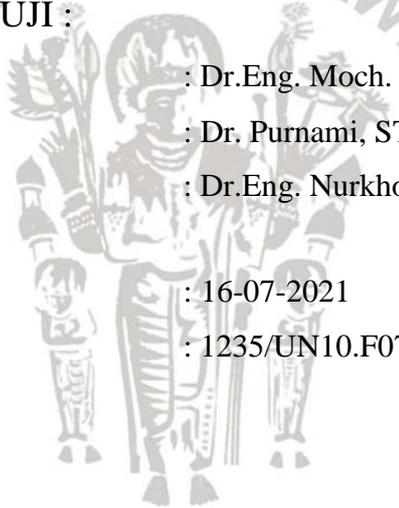
Dosen Penguji 1 : Dr.Eng. Moch. Agus Choiron, ST., MT.

Dosen Penguji 2 : Dr. Purnami, ST., MT.

Dosen Penguji 3 : Dr.Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M. Eng.

Tanggal Ujian : 16-07-2021

SK Penguji : 1235/UN10.F07/SK/2021





# DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR</b> .....	i
<b>DAFTAR ISI</b> .....	iii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	v
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	vii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	ix
<b>RINGKASAN</b> .....	xi
<b>SUMMARY</b> .....	xiii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	4
1.3 Batasan Masalah .....	4
1.4 Tujuan Penelitian .....	4
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	7
2.1 Penelitian Sebelumnya .....	7
2.2 Aluminium .....	8
2.2.1 Klasifikasi Aluminium Berdasarkan Pembuatan .....	9
2.2.2 Klasifikasi Aluminium Berdasarkan Perlakuan Panas .....	9
2.2.3 Klasifikasi Aluminium Berdasarkan Unsur Paduan .....	9
2.2.4 Sifat Mampu Las Aluminium A6061 .....	10
2.3 Baja .....	11
2.3.1 Baja Karbon .....	11
2.3.2 Baja Paduan .....	12
2.3.3 Baja SS41 .....	12
2.4 <i>Heat Treatment</i> .....	12
2.5 <i>Precipitation Hardening</i> .....	13
2.5.1 <i>Solution Heat Treatment</i> .....	14
2.5.2 Tahap Pendinginan/pengejutan ( <i>Quenching</i> ) .....	15
2.5.3 Tahap Penuaan ( <i>Aging</i> ) .....	15
2.6 Pengelasan Gesek .....	19
2.7 Daerah <i>Heat Affected Zone</i> (HAZ) .....	23
2.8 Energi Pengelasan pada Proses <i>Friction Welding</i> .....	23
2.9 Pengujian Sambungan Las .....	25
2.9.1 Macam-Macam Pengujian .....	25
2.9.2 Pengujian Tarik .....	25

2.9.3	Pengujian Kekerasan .....	27
2.10	<i>Jeffries Planimetric Method</i> .....	28
2.11	<i>Hall-Petch Equation</i> .....	29
2.12	Hipotesis .....	30
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b> .....		31
3.1	Metode Penelitian .....	31
3.2	Waktu dan Tempat Penelitian .....	31
3.3	Variabel Penelitian .....	31
3.3.1	Variabel Bebas .....	31
3.3.2	Variabel Terikat .....	32
3.3.3	Variabel Terkontrol .....	32
3.4	Bahan dan Spesifikasi Alat .....	32
3.4.1	Bahan .....	32
3.4.2	Spesifikasi Alat .....	33
3.5	Dimensi Spesimen .....	38
3.6	Skema Penelitian .....	39
3.7	Prosedur Penelitian .....	40
3.7.1	Pengelasan Gesek .....	40
3.7.2	Prosedur Proses <i>Aging</i> .....	40
3.7.3	Pengujian Kekuatan Tarik .....	41
3.7.4	Prosedur Pengujian Kekerasan Vickers .....	41
3.7.5	Pengujian Mikrostruktur .....	42
3.7.6	Pengujian Makrostruktur .....	42
3.8	Diagram Alir Penelitian .....	44
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....		45
4.1	Data Hasil Pengujian Kekuatan Tarik .....	45
4.2	Pembahasan .....	46
4.2.1	Hasil Pengujian Kekuatan Tarik Sambungan Las Gesek .....	46
4.2.2	Temperatur Pada Proses Pengelasan Gesek .....	48
4.2.3	Analisis Foto Makrostruktur Pada Sambungan Las Gesek .....	49
4.2.4	Analisis Foto Mikrostruktur Pada Sambungan Las Gesek .....	51
4.2.5	Hasil Pengujian Kekerasan Pada Sambungan Las Gesek .....	55
<b>BAB V PENUTUP</b> .....		57
5.1	Kesimpulan .....	57
5.2	Saran .....	57
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....		
<b>LAMPIRAN</b> .....		

## DAFTAR TABEL

No	Judul	Halaman
Tabel 3.1	Komposisi Kimia Aluminium A6061 .....	30
Tabel 3.2	Komposisi Kimia Baja SS41 .....	30
Tabel 4.1	Data Hasil Pengujian Kekuatan Tarik <i>Chamfer</i> Satu Sisi .....	43
Tabel 4.2	Data Hasil Pengujian Kekuatan Tarik Tanpa <i>Chamfer</i> .....	44
Tabel 4.3	Perbandingan Luas Daerah HAZ Spesimen Kekuatan Tarik Tertinggi dan Terendah .....	48
Tabel 4.4	Data Hasil Perhitungan Diameter Butir Dengan Metode Planimetri .....	51
Tabel 4.5	Nilai Kekerasan Pada Spesimen Dengan Kekuatan Tarik Tertinggi dan Terendah .....	53

UNIVERSITAS BRAWIJAYA





Halaman ini sengaja dikosongkan



## DAFTAR GAMBAR

No	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Skema temperatur terhadap waktu proses <i>precipitation hardening</i> .....	12
Gambar 2.2	Hubungan antara lama waktu <i>aging</i> dengan kekuatan dan kekerasan paduan aluminium.....	16
Gambar 2.3	<i>Friction stir welding</i> .....	17
Gambar 2.4	<i>Linear friction welding</i> .....	18
Gambar 2.5	<i>Friction surfacing</i> .....	18
Gambar 2.6	Proses <i>continuous drive friction welding</i> .....	19
Gambar 2.7	<i>Inertia friction welding</i> .....	20
Gambar 2.8	Daerah zpl,zpd, dan zud.....	21
Gambar 2.9	Permukaan gesek .....	22
Gambar 2.10	Grafik tegangan dan regangan .....	25
Gambar 2.11	Spesimen uji tarik .....	25
Gambar 2.12	Pengujian kekerasan dengan metode Vickers.....	26
Gambar 2.13	<i>Grain size relationships computed for uniform, randomly oriented, equiaxed grains</i> .....	27
Gambar 3.1	Mesin las gesek.....	31
Gambar 3.2	Jangka sorong .....	31
Gambar 3.3	Kamera digital .....	32
Gambar 3.4	CNC <i>Lathe</i> .....	32
Gambar 3.5	<i>Stopwatch</i> .....	33
Gambar 3.6	Mesin uji tarik.....	33
Gambar 3.7	<i>Power hacksaw</i> .....	34
Gambar 3.8	<i>Micro vickers hardness testing machine</i> .....	34
Gambar 3.9	Mikroskop.....	35
Gambar 3.10	Tungku pemanas.....	35
Gambar 3.11	<i>Thermogun</i> .....	36
Gambar 3.12	Spesimen pengelasan <i>chamfer</i> 30° (a) Spesimen yang berputar (b) Spesimen yang diam .....	36
Gambar 3.13	Spesimen pengelasan tanpa <i>chamfer</i> (a) Spesimen yang berputar (b) Spesimen yang diam.....	36
Gambar 3.14	Skema alat pengelasan gesek.....	37

Gambar 3.15 Spesimen uji tarik.....	39
Gambar 3.16 Diagram alir penelitian.....	41
Gambar 4.1 Grafik hubungan suhu <i>aging</i> terhadap kekuatan tarik.....	44
Gambar 4.2 Grafik suhu pengelasan spesimen <i>chamfer</i> 30° dan tanpa <i>chamfer</i> .....	46
Gambar 4.3 Foto makrostruktur patahan spesimen las gesek (a) spesimen las kekuatan tarik terendah dengan variasi tanpa <i>chamfer</i> dan tanpa <i>aging</i> (b) spesimen las dengan kekuatan tarik tertinggi dengan variasi <i>chamfer</i> 30° dan suhu <i>aging</i> 125°C.....	47
Gambar 4.4 Foto makrostruktur HAZ spesimen las gesek (a) foto makro kekuatan tarik terendah tanpa <i>chamfer</i> dan tanpa <i>aging</i> (b) foto makro kekuatan tarik tertinggi dengan <i>chamfer</i> 30° dan suhu <i>aging</i> 125°C.....	48
Gambar 4.5 Foto mikrostruktur las gesek daerah batas sambungan dengan (a) spesimen las kekuatan tarik terendah tanpa <i>aging</i> dan tanpa <i>chamfer</i> (b) spesimen las kekuatan tarik tertinggi dengan suhu <i>aging</i> 125°C dan <i>chamfer</i> 30°.....	49
Gambar 4.6 Foto mikrostruktur las gesek daerah patahan dengan (a) tanpa <i>aging</i> tanpa penambahan <i>chamfer</i> , (b) spesimen tanpa <i>aging</i> dengan penambahan <i>chamfer</i> 30°, (c) spesimen perlakuan <i>aging</i> 125°C tanpa penambahan <i>chamfer</i> 30°, (d) spesimen perlakuan <i>aging</i> 125°C dengan penambahan <i>chamfer</i> 30°, (e) <i>base metal</i> .....	50
Gambar 4.7 Grafik distribusi kekerasan pada spesimen dengan kekuatan tarik tertinggi dan kekuatan tarik terendah.....	54

## DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1	Surat Keterangan Telah Melakukan Pengujian Kekuatan Tarik
Lampiran 2	Sertifikat Kalibrasi Mesin Uji Tarik
Lampiran 3	Surat Keterangan Telah Melakukan Pembuatan Spesimen Uji Tarik
Lampiran 4	Komposisi Alumunium A6061
Lampiran 5	Komposisi Baja SS41
Lampiran 6	Foto Spesimen Sebelum Pengelasan
Lampiran 7	Foto Spesimen Setelah Pengelasan
Lampiran 8	Foto Spesimen Uji Tarik
Lampiran 9	Hasil Pengujian Kekasaran Permukaan Alumunium A6061
Lampiran 10	Perhitungan Luas Daerah Zpl dan Zpd
Lampiran 11	Perhitungan Batas Daerah Sambungan Las Gesek
Lampiran 12	Perhitungan Jumlah Butir Daerah Patahan Spesimen Variasi Suhu <i>Aging</i> 125°C dan <i>Chamfer</i> 30°
Lampiran 13	Tabel ASTM E 112



Halaman ini sengaja dikosongkan

## RINGKASAN

**Kevin Alexander**, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2021, Pengaruh Suhu *Aging* dan Penambahan *One-Side Chamfer* Terhadap Kekuatan Tarik Sambungan Las Gesek Aluminium A6061 dan Baja SS41, Dosen Pembimbing: Yudy Surya Irawan

Penyambungan logam yang berbeda, seperti aluminium dengan baja, aluminium dengan magnesium, aluminium dengan tembaga, dan baja dengan nikel, mampu memaksimalkan kemampuan terbaik yang dimiliki kedua material. Banyak penggunaan di pembangkit tenaga, kebutuhan militer, kebutuhan otomotif, dan industri listrik yang mudah untuk menggabungkan material yang berbeda (*dissimilar*) dengan berbagai cara pengelasan lebur dan metode pengelasan padat, hal ini dilakukan untuk mengurangi berat, peningkatan ketahanan korosi, dan keuletan yang tinggi. *Solidification defects*, *intermetallic compound* dan penggunaan panas tinggi telah membuat prosedur peleburan (*fusion*) tidak atraktif untuk penggabungan material yang berbeda. Prosedur pengelasan gesek dapat menurunkan atau menghilangkan cacat yang disebabkan oleh pelelehan seperti, porositas, *residual thermal stresses* dan *impurities*, karena saat temperatur pengelasan dalam proses ini lebih rendah dari pada titik leleh logam dasar.

Metode pengelasan gesek merupakan suatu pilihan metode untuk penyambungan jenis logam yang sama maupun jenis logam yang berbeda, dimana dalam proses ini penyambungan kedua jenis logam terjadi pada fase solid tanpa membutuhkan logam pengisi (*filler*), *flux*, dan gas pelindung. Material yang digunakan pada penelitian ini adalah aluminium A6061 dan baja SS41. Penelitian ini menggunakan true experimental dengan cara merotasi material dengan kecepatan 1600 rpm sedangkan material yang diam ditekan dengan gaya tekan awal sebesar 7000 N dan pemberian gaya tekan akhir sebesar 35000 N selama 60 detik. Pada material yang diam diberi *chamfer* dengan variasi *chamfer* 30° dan tanpa *chamfer*.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa dengan penambahan *chamfer* pada satu sisi akan menyebabkan panas yang masuk (*heat input*) semakin kecil dan akan memperkecil daerah HAZ (*heat affected zone*), dan juga dengan dilakukan *aging* akan menyebabkan butiran pada aluminium lebih kecil daripada tanpa *aging*. Kekuatan tarik minimum rata-rata pada spesimen tanpa *chamfer* dan tanpa *aging* sebesar 76,94 MPa. Kekuatan tarik maksimum rata-rata pada spesimen dengan *chamfer* 30° dan suhu *aging* 125°C sebesar 245,01 Mpa.

Kata kunci: Las Gesek, Aluminium A6061, Baja SS41, Kekuatan Tarik Sambungan Las Gesek, *Heat Input*, *Aging*



Halaman ini sengaja dikosongkan



## SUMMARY

**Kevin Alexander**, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering Brawijaya University, in July 2021, *The Effect of the Aging Temperature and the Addition of a Chamfer on One-Side of the Tensile Strength of the Aluminum A6061 and SS41 Steel Friction Welding Joints*, Academic Supervisor: Yudy Surya Irawan

Joining dissimilar metals, such as aluminum to steel, aluminum to magnesium, aluminum to copper, and steel to nickel, can maximize the best capabilities of both materials. Widely used in power generators, military needs, automotive needs, and the electrical industry it is easy to combine dissimilar materials with various melt welding and solid welding methods, this is done to reduce weight, increase corrosion resistance, and high ductility. Solidification defects, intermetallic compounds and the use of high heat have made fusion procedures unattractive for joining dissimilar materials. The friction welding procedure can reduce or eliminate defects caused by melting such as porosity, residual thermal stresses and impurities, because the welding temperature in this process is lower than the melting point of the base metal.

The friction welding method is one choice of method for the connection of the same type of metal or different types of metal, wherein this process the connection of the two types of metal occurs in the solid phase without the need for filler metal, flux, and protective gas. The materials used in this research are A6061 aluminum and SS41 steel. This study uses a true experimental method by rotating the material at a speed of 1600 rpm while the stationary material is pressed with an initial compressive force of 7000 N and a final compressive force of 35000 N for 60 seconds. The stationary material is chamfered with a chamfer variation of 30° and without a chamfer.

The results of this study indicate that the addition of chamfer on one side will cause the heat input to be smaller and will reduce the HAZ (heat affected zone) area, and also by doing aging will cause the grains in aluminum to be smaller than without aging. The average minimum tensile strength on spesimens without chamfers and without aging is 76.94 MPa. The average maximum tensile strength of spesimens with a chamfer of 30° and an aging temperature of 125°C is 245.01 Mpa

**Keywords:** Friction Welding, Aluminium A6061, Steel SS41, Tensile Strength, Heat Input, Aging



Halaman ini sengaja dikosongkan



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Penyambungan yang efektif merupakan salah satu perubahan yang dihadapi dalam industri. Penyambungan logam berbeda jenis (*dissimilar*) semakin diminati dan banyak dikembangkan dan diaplikasikan di berbagai industri. Hal itu terjadi karena sambungan *dissimilar* dapat menghasilkan kombinasi yang menarik dari segi sifat-sifat fungsionalnya, sehingga menawarkan banyak keuntungan teknik dan ekonomis (Yazdipour & Heidarzadeh, 2016). Material yang banyak digunakan saat ini adalah baja dan aluminium.

Baja merupakan salah satu material yang paling banyak digunakan dalam dunia teknik dan kegiatan sektor perindustrian. Baja merupakan salah satu bahan utama untuk pembuatan berbagai mekanisme, mesin, dan konstruksi dalam teknik modern. Hal ini dikarenakan bahwa baja pada khususnya mampu memberikan sifat yang diinginkan pada suatu benda atau struktur, seperti kekuatan, kemampuan mesin, ketahanan aus, dan lainnya. Kandungan baja yang utama diantaranya adalah besi dan karbon (Sari, 2018).

Baja SS41 merupakan salah satu dari golongan baja karbon rendah dimana baja ini memiliki kombinasi sifat mekanik yang baik seperti : kekerasan, keuletan, dan ketangguhan yang baik. Bahan ini termasuk dalam golongan baja karbon rendah karena dalam komposisinya mengandung karbon sebesar 0,08%-0,20%. Baja karbon rendah sering digunakan dalam komponen mesin-mesin industri seperti gear, rantai, skrup dan poros. Selain itu juga baja SS41 juga digunakan sebagai *handle* rem sepeda motor, *body* mobil, pipa saluran, konstruksi jembatan dan rivet (Nofri & Taryana, 2017).

Aluminium ditemukan oleh Sir Humphrey Davy dalam tahun 1809 sebagai suatu unsur, dan pertama kali direduksi sebagai logam pada tahun 1825 oleh H. C. Oersted. Penggunaan aluminium sebagai logam setiap tahunnya adalah pada urutan yang kedua setelah baja dan besi, dan ini merupakan urutan yang tertinggi diantara logam-logam *non-ferrous*. Produksi aluminium tahunan di dunia mencapai 15 juta ton per tahun pada 1981 (Surdia & Saito, 1999). Direktur Utama PT Inalum, Budi Gunadi mengatakan bahwa produksi aluminium di Indonesia mencapai 260 ribu ton pada tahun 2017 dengan peningkatan sebanyak 25% dibandingkan tahun sebelumnya. Indonesia menargetkan

peningkatan produksi aluminium sebanyak 1,5 – 2 juta ton pada tahun 2025 (Kementerian Perindustrian Republik Indonesia, 2018).

Aluminium dan paduan aluminium termasuk logam ringan yang mempunyai kekuatan tinggi, tahan terhadap karat dan merupakan konduktor listrik yang cukup baik. Logam ini dipakai secara luas dalam bidang kimia, listrik, bangunan, transportasi dan alat-alat penyimpanan. Kelebihan dari aluminium yaitu memiliki berat yang ringan dengan berat jenis sebesar  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , memiliki kekuatan yang tinggi, dan tahan terhadap korosi, penghantar panas dan listrik yang baik menjadikan aluminium sebagai material yang ideal untuk digunakan dalam aplikasi konvensional dan baru. Salah satu paduan aluminium yang sering dipakai dalam dunia industri adalah aluminium seri 6061. Aluminium 6061 tergolong kedalam jenis aluminium seri 6xxx dengan elemen paduannya adalah magnesium dan silikon. Paduan jenis ini merupakan salah satu jenis paduan aluminium yang dapat di *heat treatment*, mempunyai sifat mampu potong, mampu las dan daya tahan korosi yang baik (Totten & MacKenzie, 2003).

Penyambungan aluminium dan baja dapat dilakukan dengan menggunakan pengikatan mekanis (*mechanical fastening*), dan juga menggunakan pengikatan adesif (*adhesive bonding*). Kedua metode pengikatan ini memiliki keterbatasan pada kekuatan spesifik sambungan (Uzku, Unlu & Akdag, 2011). Metode penyambungan yang lainnya adalah metode pengelasan (Setyawan, 2014).

Berdasarkan definisi dari *Deutsche Industrie Normen* (DIN) las adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilaksanakan dalam keadaan lumer atau cair. Berdasarkan klasifikasi ini pengelasan dapat dibagi dalam tiga kelas utama yaitu: pengelasan cair, pengelasan tekan dan pematrian. Aluminium merupakan material yang sulit dilakukan proses pengelasan cair, dikarenakan konduktifitas termal yang tinggi sehingga panas dari pengelasan cair sulit memanaskan dan mencairkan dimensinya. Dan juga paduan aluminium mudah teroksidasi dan membentuk oksida aluminium yang mempunyai titik cair yang tinggi. Karena sifat ini maka peleburan antara logam dasar dan logam las menjadi terhalang (Wiryosumarto & Okumura, 2000). Salah satu solusi dalam memecahkan permasalahan dalam teknik penyambungan logam yang sulit dilakukan dengan pengelasan cair yaitu dengan melakukan penyambungan dengan pengelasan gesek (*friction welding*).

Penyambungan logam yang berbeda, seperti aluminium dengan baja, aluminium dengan magnesium, aluminium dengan tembaga, dan baja dengan nikel, mampu memaksimalkan kemampuan terbaik yang dimiliki kedua material. Banyak penggunaan di

pembangkit tenaga, kebutuhan militer, kebutuhan otomotif, dan industri listrik yang mudah untuk menggabungkan material yang berbeda (*dissimilar*) dengan berbagai cara pengelasan lebur dan metode pengelasan padat, hal ini dilakukan untuk mengurangi berat, peningkatan ketahanan korosi, dan keuletan yang tinggi. *Solidification defects*, *intermetallic compound* dan penggunaan panas tinggi telah membuat prosedur peleburan (*fusion*) tidak atraktif untuk penggabungan material yang berbeda. Prosedur pengelasan gesek dapat menurunkan atau menghilangkan cacat yang disebabkan oleh pelelehan seperti, porositas, *residual thermal stresses* dan *impurities*, karena saat temperatur pengelasan dalam proses ini lebih rendah dari pada titik leleh logam dasar (Esmaeili dkk, 2012).

Dalam industri metode pengelasan gesek meluas sebagai proses produksi massal untuk penyambungan material. Pengelasan gesek (*friction welding*) merupakan salah satu teknik penyambungan yang efektif dalam industri. metode penyambungan dengan pengelasan gesek merupakan suatu pilihan metode untuk penyambungan dua jenis logam yang berbeda, dimana dalam proses ini penyambungan kedua jenis logam terjadi pada fase solid tanpa membutuhkan logam pengisi (*filler*), *flux*, dan gas pelindung (Shubhavardhan & Surendran, 2012). Pengelasan gesek merupakan jenis pengelasan bertekanan, proses pengelasan gesek dilakukan dalam keadaan *solid state*. Pengelasan gesek menggunakan panas yang dihasilkan oleh gesekan antara komponen yang ditekan bersama sebagai akibat dari gesekan dan tekanan. Banyak paduan *ferrous* dan *non-ferrous* yang dapat dilas dengan gesekan. Pengelasan gesek dapat digunakan untuk menggabungkan material yang memiliki sifat termal dan mekanik yang berbeda. Temperatur dibawah titik lebur dan waktu pengelasan yang pendek dari pengelasan gesek memungkinkan banyak kombinasi material untuk digabungkan (Yilbas & Sahin, 2014).

*Age hardening (precipitation strengthening)* terjadi karena terbentuknya formasi *clusters* (kelompok-kelompok atom) yang koheren pada atom terlarut. Hal ini mengakibatkan timbulnya regangan karena perbedaan ukuran atom pelarut dan atom terlarut. Kelompok atom tersebut menstabilkan dislokasi karena dislokasi cenderung mengurangi regangan. Dislokasi yang tertahan oleh kelompok atom terlarut yang koheren menimbulkan efek penguatan dan pengerasan. Kekuatan yang tinggi dihasilkan dari dispersi presipitat halus yang terbentuk selama proses perlakuan panas penuaan (penuaan alamiah atau penuaan buatan) (Schonmetz, 1990).

Penuaan buatan (*artificial aging*) merupakan perlakuan panas pada beberapa paduan aluminium diatas temperatur kamar untuk menghasilkan bentuk transisi (metastabil) pada

presipitat. Presipitat transisi ini tetap koheren dengan matrik larutan padat dan menghasilkan pengerasan endapan (Schonmetz, 1990).

Suhu pada proses *artificial aging* sangat berpengaruh terhadap nilai kekuatan tarik spesimen hasil pengelasan gesek. Dimana temperatur *artificial aging* antara 100°C – 200°C dengan *holding time* antara 1 sampai 24 jam (Schonmetz, 1990).

Berdasarkan penjelasan diatas, maka penelitian ini ingin mengekspresimentasikan pengaruh variasi temperatur *artificial aging* pada sambungan las aluminium A6061 dan baja SS41 terhadap kekuatan tarik sambungan las.

## 1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

Bagaimana pengaruh variasi suhu *artificial aging* sambungan las gesek aluminium A6061 dan baja SS41 dengan *chamfer* satu sisi terhadap kekuatan tarik sambungan las

## 1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini dapat mencapai tujuan yang diinginkan maka diperlukan adanya batasan masalah. Batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

1. Pengelasan dilakukan dengan pengelasan *continous drive friction welding* pada suhu ruang
2. Pengujian sifat mekanik dilakukan dengan menggunakan uji kekuatan tarik
3. Pengujian dilakukan dengan suhu ruangan

## 1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh temperatur *artificial aging* dan sudut *chamfer* satu sisi terhadap kekuatan tarik pada sambungan las gesek aluminium A6061 dan baja SS41

## 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah

1. Mengetahui pengaruh variasi temperatur *artificial aging* dan sudut *chamfer* satu sisi terhadap sifat mekanik berupa kekuatan tarik daerah sambungan pada pengelasan aluminium A6061 dan baja SS41 dengan metode pengelasan gesek (*friction welding*)

2. Dapat digunakan sebagai pengembangan dan penelitian khususnya tentang las gesek (*friction welding*)
3. Penelitian ini dapat digunakan sebagai referensi untuk pengembangan penelitian lebih lanjut mengenai pengelasan logam yang berbeda jenis.





Halaman ini sengaja dikosongkan

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Sebelumnya

Uzkut dkk (2010) mengemukakan bahwa metode pengelasan gesek (*friction welding*) termasuk dalam jenis pengelasan bertekanan, proses pengelasan gesek dilakukan keadaan *solid state* di mana tidak ada listrik atau sumber energi lain yang digunakan, energi panas dihasilkan dengan memanfaatkan adanya gesekan pada permukaan dari bagian yang akan dilas. Pengelasan yang diterapkan yaitu dengan menggunakan panas secara efisien pada daerah las sehingga panas akibat gesekan antar permukaan tersebut didistribusikan secara merata pada permukaan yang akan disambung. Selama tahap pemanasan kontinu di mana material yang disambung mengalami deformasi plastik.

Irawan dkk (2012) pada penelitiannya, mendapatkan hasil bahwa sudut *chamfer* dua sisi dapat mempengaruhi kekuatan tarik pada sambungan las gesek aluminium paduan A6061. Sudut *chamfer* yang diteliti pada penelitian ini adalah 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, dan 75°. Nilai kekuatan tarik tertinggi terdapat pada sudut *chamfer* 30°. Hal ini disebabkan karena pada sudut ini, area yang terkena panas dan porositas sangat kecil sehingga dapat meningkatkan kekuatan tarik pada sambungan tersebut.

Irawan dkk (2020), dalam penelitiannya membahas tentang kekuatan torsi pada sambungan las gesek aluminium A6061 dan baja ST41 dengan variasi sudut *chamfer* satu sisi dan *burn off length*. Pada penelitian ini, variasi sudut *chamfer* 30°, 45°, 60°, 90° pada permukaan baja SS41 dan *burn off length* (BoL) 10 mm, 15 mm, dan 20 mm. Hasil pada penelitian ini adalah kekuatan punter tertinggi terdapat pada variasi sudut *chamfer* 30° dan *burn off length* (BoL) 15 mm. Hal ini dikarenakan pada *chamfer* 30° memiliki luas permukaan las gesek yang lebih kecil dan *heat input* optimal terjadi pada *burn off length* 15mm.

Setyawan dkk (2014), dalam penelitiannya membahas tentang kekuatan tarik pada sambungan las gesek aluminium 6061 dengan berbagai suhu *aging*. Pada penelitian ini, proses *artificial aging* dilakukan dengan variasi suhu 150°C, 175°C, 185°C, 200°C, dan 225°C dengan *holding time* selama 7 jam. Hasil dari penelitian ini adalah suhu pada proses *artificial aging* sangat berpengaruh terhadap nilai kekuatan tarik spesimen hasil pengelasan gesek dengan perlakuan *precipitation hardening*.

Abdulla dkk. (2018) dalam penelitiannya, menyimpulkan bahwa tekanan dan *holding time* pada saat *upset* akan mempengaruhi nilai kekuatan tarik dari sambungan las gesek aluminium paduan A6061. Semakin tinggi tekanan *upset* dan semakin lama *holding time* maka nilai kekuatan tarik dari sambungan las gesek akan meningkat. Hal ini dikarenakan *heat input* yang lebih tinggi dan adanya deformasi plastis pada antar permukaan.

Pah dkk (2018), dalam penelitiannya membahas tentang pengaruh waktu gesek (*friction time*) dan tekanan gesek terhadap kekuatan tarik pada sambungan las gesek paduan aluminium dan baja karbon. Pada penelitian ini material yang digunakan adalah aluminium A6061 dan baja AISI-1018 dengan variasi tekanan tempa yaitu 24 MPa, 32 MPa dan 40 MPa dan variasi waktu gesek yaitu 5 detik, 7 detik, 9 detik, dan 11 detik. Hasil dari penelitian ini adalah dengan semakin lamanya waktu gesek, maka kekuatan tarik dari sambungan antara AA6061 dengan baja karbon. Semakin besar tekanan gesek akan menyebabkan semakin kuat kekuatan tarik sambungan yang terbentuk. Waktu gesek yang semakin lama, dan tekanan gesek yang semakin besar akan menyebabkan semakin lamanya proses pembangkitan panas dan semakin banyak panas yang dibangkitkan, yang menyebabkan terjadi perubahan ukuran butiran di daerah HAZ, dan juga menyebabkan bertambah tebalnya suatu lapisan *intermetallic* yang bersifat getas pada sambungan, yang mana berakibat pada turunnya kekuatan tarik sambungan.

## 2.2 Aluminium

Aluminium dan paduan aluminium termasuk logam ringan yang mempunyai kekuatan tinggi, tahan terhadap korosi, dan merupakan konduktor listrik yang cukup baik. Sifat fisis dan mekanis aluminium sangat bervariasi tergantung pada komposisi paduan, proses pembuatan, ataupun proses perlakuan untuk meningkatkan sifat mekanisnya. Aluminium dapat diklasifikasikan berdasarkan tiga dasar pengklasifikasian, yaitu (Cary, 1989):

1. Berdasarkan pembuatan, dengan klasifikasi paduan aluminium produk cor dan paduan aluminium produk tempa.
2. Berdasarkan perlakuan panas, dengan klasifikasi dapat dan tidak dapat diperlakukan.
3. Berdasarkan unsur-unsur paduan, berdasarkan klasifikasi ketiga ini aluminium dibagi menjadi delapan jenis.

### 2.2.1 Klasifikasi Aluminium Berdasarkan Pembuatan

Aluminium produk cor diklasifikasikan berdasarkan paduannya. Sistem pengodeannya menggunakan sistem kode 3 digit dan diikuti dengan satuan desimal (XXX,0). Angka ke-1 dan ke-2 menunjukkan komposisi ingot, yang sesudah pencairan dan proses akan menghasilkan komposisi sesuai dengan proses pengecorannya.

Aluminium produk tempa diklasifikasikan berdasarkan komposisi paduannya. Sistem pengodean berdasarkan komposisi untuk aluminium produk tempa menggunakan sistem kode 4 digit.

### 2.2.2 Klasifikasi Aluminium Berdasarkan Perlakuan Panas

Paduan yang dapat diperlaku-panaskan adalah paduan yang kekuatannya dapat diperbaiki dengan proses perlakuan panas, sedangkan paduan yang tidak dapat diperlaku-panaskan kekuatannya hanya dapat diperbaiki dengan pengerjaan dingin.

Logam paduan aluminium yang termasuk dalam kelompok yang tidak dapat diperlaku-panaskan adalah jenis Al murni, jenis Al-Mn, jenis Al-Si, dan jenis Al-Mg, sedangkan yang termasuk jenis yang dapat diperlaku-panaskan adalah jenis Al-Cu, jenis Al-Mg-Si, jenis Al-Zn, dan jenis Al-Li.

### 2.2.3 Klasifikasi Aluminium Berdasarkan Unsur Paduan

Al murni (seri 1xxx), jenis ini adalah aluminium dengan tingkat kemurnian antara 99,0% dan 99,99%. Aluminium dalam seri ini selain sifatnya yang baik dalam tahan korosi, konduksi panas, dan konduksi listrik, juga memiliki sifat yang memuaskan dalam mampu las dan mampu potong.

Paduan Al-Cu (seri 2xxx), paduan aluminium-tembaga adalah jenis yang dapat diperlaku-panaskan. Sifat mekanik dari paduan ini dapat menyamai sifat dari baja lunak, tetapi daya tahan korosinya rendah bila dibandingkan dengan jenis paduan lainnya. Sifat mampu lasnya juga kurang baik. Paduan jenis ini biasanya digunakan pada konstruksi keling dan banyak sekali digunakan dalam konstruksi pesawat terbang

Paduan Al-Mn (seri 3xxx), paduan aluminium dan mangan adalah jenis yang tidak dapat diperlaku-panaskan sehingga peningkatan kekuatannya hanya dapat diusahakan melalui pengerjaan dingin dalam proses pembuatannya. Bila dibandingkan dengan Al murni, paduan ini mempunyai sifat yang sama dalam hal daya tahan korosi, mampu potong, dan sifat mampu lasnya. Dalam hal kekuatan, jenis paduan ini lebih unggul 620% daripada jenis Al mumi.

Paduan jenis Al-Si (seri 4xxx), paduan aluminium silikon (Al-Si) termasuk jenis yang tidak dapat diperlaku-panaskan. Jenis ini dalam keadaan cair mempunyai sifat mampu alir yang baik dan dalam proses pembekuannya hampir tidak terjadi retak. Karena sifat-sifatnya, maka paduan jenis Al-Si banyak digunakan sebagai logam pengisi (*filler metal*) dalam pengelasan paduan aluminium, baik paduan cor maupun paduan tempa.

Paduan jenis Al-Mg (seri 5xxx), jenis paduan aluminium-magnesium (Al-Mg) ini termasuk jenis yang tidak dapat diperlaku-panaskan, tetapi mempunyai sifat yang baik dalam daya tahan korosi, terutama korosi oleh air laut, dan dalam sifat mampu lasnya.

Paduan jenis Al-Mg-Si (seri 6xxx), merupakan paduan aluminium, magnesium, dan silikon, termasuk jenis yang dapat diperlaku-panaskan. Meskipun tidak sekuat paduan aluminium seri 2xxx dan 7xxx, paduan ini mempunyai Sifat mampu potong, mampu las, dan daya tahan korosi yang cukup baik. Sifat yang kurang dari paduan ini adalah terjadinya pelunakan pada daerah las sebagai akibat dari panas pengelasan yang timbul. Paduan ini sering digunakan dalam bidang arsitektur sebagai dekorasi, kerangka sepeda, dan alat-alat transportasi lainnya.

Paduan jenis Al-Zn (seri 7xxx), paduan aluminium dan seng ini termasuk jenis yang dapat diperlaku-panaskan. Kekuatan tarik yang dapat dicapai lebih dari  $50 \text{ kg/mm}^2$ . Berlawanan dengan kekuatan tariknya, Sifat mampu las dan daya tahannya terhadap korosi kurang baik.

Paduan jenis Al-Li (seri 8xxx), paduan aluminium dan lithium ini termasuk jenis yang dapat diperlaku-panaskan. Biasanya, dalam paduan ini ditambahkan unsur timah sebagai paduan. Paduan Al-Li digunakan untuk konstruksi pesawat terbang yang mengharuskan toleransi yang tinggi terhadap kerusakan (ASM, 1992).

#### **2.2.4 Sifat Mampu Las Aluminium A6061**

Sifat mampu las adalah kemampuan suatu logam untuk dapat dilas ke dalam bentuk yang sudah dirancang dan sambungan las yang dihasilkan memiliki sifat metalurgi yang diperlukan. Kemampuan las yang baik dapat ditandai dengan kemudahan dalam proses pengelasan, tidak adanya cacat las, kekuatan, keuletan, dan ketangguhan yang dapat diterima dalam sambungan las (Groover, 2010)

Paduan seri dalam kelompok ini diberikan silikon dan magnesium untuk membentuk endapan  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , sehingga membuatnya dapat diolah dengan perlakuan panas (*heat treatable*). Paduan ini tidak sekuat sebagian besar paduan 2xxx atau 7xxx, namun memiliki

kemampuan las dan ketahanan korosi yang baik untuk digunakan pada berbagai aplikasi. (Lumley, 2011)

Aluminium A6061 memiliki sifat mampu las (*weldability*) dan memiliki ketahanan terhadap korosi yang baik, tetapi aluminium ini memiliki sifat mampu mesin (*machineability*) yang kurang baik. Paduan ini banyak digunakan pada kendaraan, struktur kapal, dan struktur yang memerlukan ketahanan korosi yang baik (Kalpakjian, 2014).

### 2.3 Baja

Baja adalah logam paduan yang komponen utamanya adalah besi dan karbon sebagai unsur paduan utamanya. Unsur paduan lain yang biasa ditambahkan selain karbon adalah Mangan, Krom, Tungsten, Vanadium, dll. Berbagai jenis kualitas baja bisa didapatkan dengan memvariasikan kandungan karbon dan unsur paduan lainnya. Penambahan kandungan karbon pada baja dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan tariknya tetapi akan menjadi getas dan menurunkan keuletannya (Sari, 2018).

Proses pembuatan dan sifat-sifat alamiah dari bahan-bahan mentah yang digunakan, semua baja mengandung bahan lain yang tidak murni dalam jumlah kecil yang bervariasi, seperti posfor, belerang, mangan, dan silicon, bercampur dengan elemen-elemen sisa lainnya. Kotoran-kotoran ini tidak mungkin dapat dihilangkan seluruhnya dari logam (Surdia & Saito, 1999)

Berdasarkan komposisi karbon, baja dapat diklasifikasikan menjadi 2, yaitu :

1. Baja karbon
2. Baja paduan

#### 2.3.1 Baja Karbon

Baja karbon adalah baja dengan paduan utamanya adalah karbon. Baja ini juga sering disebut dengan baja karbon biasa. Baja dengan kandungan karbon rendah memiliki sifat yang mirip dengan besi. Apabila kandungan karbon meningkat, logam menjadi lebih keras dan sangat kuat tetapi keuletan rendah dan lebih sulit untuk di las. Baja karbon dapat diklasifikasikan sebagai berikut (Sari, 2018):

1. Baja Karbon Rendah (*Low Carbon Steel*)

Baja karbon rendah mengandung sekitar 0,05-0,29% karbon. Baja karbon rendah memiliki sifat kekerasan dan ketahanan aus yang rendah namun memiliki keuletan dan ketangguhan yang tinggi.

## 2. Baja Karbon Sedang (*Medium Carbon Steel*)

Baja karbon sedang mengandung persentase karbon sebesar 0,3-0,59% C. Baja karbon sedang memiliki tingkat kekerasan dan kekuatan yang lebih tinggi daripada baja karbon rendah.

## 3. Baja Karbon Tinggi (*High Carbon Steel*)

Baja karbon tinggi memiliki kandungan karbon antara 0,6-1,4% C. baja karbon tinggi memiliki sifat kekerasan, kekuatan yang tinggi dan getas.

### 2.3.2 Baja Paduan

Baja paduan (*alloy steel*) adalah baja yang mengandung besi (Fe) dan unsur kimia lainnya, atau baja dengan campuran satu atau lebih elemen seperti karbon, mangan, silicon, nikel, chromium, molybdenum dll. Komposisi kimia yang terkandung tersebut sangat beragam. Besaran persentase dan jenis komposisi kimia yang terkandung di dalam baja tersebutlah yang membuat baja paduan mempunyai beragam karakteristik yang berbeda-beda dan membuat baja tersebut juga berbeda dalam peruntukannya. Fungsi utama dari elemen paduan ini adalah untuk meningkatkan sifat-sifat mekanis dari baja (Sari, 2018)

### 2.3.3 Baja SS41

Baja SS41 adalah jenis *carbon steel* yang masuk dalam standard jepang JIS G3101-*"rolled steel for general structure"*. Baja SS41 adalah baja yang memiliki kadar karbon 0,22%, karena kadarnya kurang dari 0,30% maka baja ini termasuk golongan baja karbon rendah dan mempunyai kekuatan tarik sebesar 600-650 Mpa. Elongasinya tergantung diameter batangnya yaitu sekitar 20% s/d 24%. Baja ini biasanya digunakan untuk kawat, paku, peralatan otomotif dan sebagai bahan baku *welded fabrication* (kisi-kisi jendela atau pintu dan jeruji). Aplikasi khusus seperti untuk kawat elektroda berlapis untuk keperluan pengelasan (Surdia & Saito, 1999).

## 2.4 Heat Treatment

Proses perlakuan panas (*heat treatment*) merupakan proses perubahan sifat mekanik material melalui perubahan struktur mikro dengan proses pemanasan lalu pengaturan kecepatan pendinginan dengan atau tanpa mengubah komposisi kimiawi logam. Perlakuan panas (*heat treatment*) bertujuan untuk menghasilkan sifat-sifat logam yang diinginkan. Perubahan sifat logam akibat proses perlakuan panas dapat mencakup keseluruhan bagian dari logam atau sebagian dari logam (Djafrie, 1995).

(Schonmetz, 1990) Menjelaskan metode perlakuan panas untuk aluminium paduan yaitu *precipitation hardening* atau bisa disebut juga penuaan keras (*age hardening*). Melalui *precipitation hardening* aluminium paduan akan mempunyai kekerasan dan kekuatan dari beberapa paduan aluminium dapat ditingkatkan, hal ini dikarenakan saat waktu proses *precipitation hardening* maka akan terbentuk partikel-partikel atau endapan halus (*precipitate*) yang tersebar merata pada matriks aluminium dan hal inilah yang sangat berpengaruh terhadap kekerasan dan kekuatan aluminium paduan. Proses *precipitation hardening* mempunyai beberapa tahapan yaitu tahap perlakuan panas pelarutan (*solution heat treatment*), kemudian tahap pendinginan cepat atau pengejukan pendinginan (*quenching*), selanjutnya tahap akhir yaitu tahap penuaan (*aging*). Dalam proses penuaan (*aging*) ini ada dua jenis yaitu penuaan secara alami (*natural aging*), dan penuaan buatan (*artificial aging*) (Schonmetz, 1990).

Macam-macam proses dalam perlakuan panas (*heat treatment*) yaitu:

#### 1. Pemanasan (*Heating*)

Proses pemanasan (*heating*) sampai temperatur tertentu dan dalam periode waktu.

Tujuannya untuk memberikan kesempatan agar terjadinya perubahan struktur dari atom-atom dapat menyeluruh.

#### 2. Penahanan ( *Holding*)

Proses penahanan (*holding*) pemanasan pada temperatur tertentu, bertujuan untuk memberikan kesempatan agar terbentuk struktur yang teratur dan seragam sebelum proses pendinginan

#### 3. Pendinginan (*Cooling*)

Proses pendinginan (*Cooling*) dengan kecepatan tertentu, bertujuan untuk mendapatkan struktur dan sifat fisik maupun sifat mekanis yang diinginkan (Schonmetz, 1990)

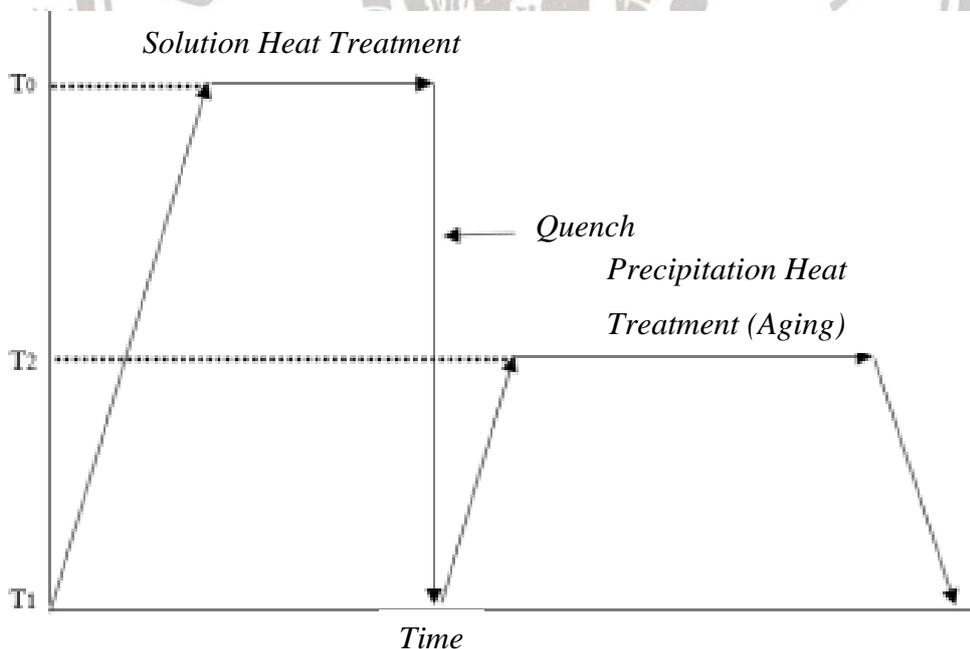
### 2.5 *Precipitation Hardening*

Penguatan presipitasi (*precipitation hardening*) adalah suatu proses dimana paduan aluminium atau baja diberi perlakuan panas. Tujuan dari proses ini adalah untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan pada material tersebut. Proses ini terdiri dari dua tahap, yaitu tahap *solution treatment* dan tahap penuaan. Pada proses *solution treatment*, paduan dipanaskan sampai temperatur diantara garis *solvus* dan *liquidus* dan ditahan (*holding*) sampai terbentuk larutan padat yang homogen (Smith, 1995). Proses pemanasan ini menyebabkan elemen paduan akan larut kedalam larutan padat, yang akan

menyebabkan elemen tersebut tidak berkesempatan berdifusi keluar apabila paduan didinginkan dengan cepat (*quenching*), dengan demikian larutan padat yang homogen akan terbentuk. Proses setelah penahan temperatur adalah pendinginan cepat (*quenching*). Tujuan dari proses ini adalah menjaga agar paduan tetap dalam keadaan satu fasa, yaitu dengan cara menurunkan temperatur dengan cepat (Schonmetz, 1990).

### 2.5.1 Solution Heat Treatment

*Solution heat treatment* merupakan tahap pertama dalam proses *precipitation hardening*. Metodenya yaitu dengan cara melakukan perlakuan panas pada logam aluminium di dalam tungku pemanas (*furnace*) dengan temperatur tinggi (diatas *solvus line*) kurang dari 548°C atau tepatnya pada suhu 530°C dan diberikan waktu penahanan (*Holding time*) yang cukup sesuai dengan jenis material dan dimensi material hingga mencapai batas kelarutannya atau mencapai fasa tunggal, di mana unsur-unsur pemuadur larut seara sempurna ke dalam fasa tersebut. Pada tahap ini terjadi pelarutan fasa-fasa yang ada, menjadi larutan padat. Tujuan dari proses ini yaitu untuk mendapatkan larutan padat yang mendekati homogeny (ASM Internasional, 1998).



Gambar 2.1 Skema Temperatur Terhadap Waktu Proses *Precipitation Hardening*

Sumber: Calister (2007)

### 2.5.2 Tahap Pendinginan/pengejutan (*Quenching*)

Tahap pengejutan/pendinginan (*quenching*) merupakan tahap paling kritis dalam proses perlakuan panas. Pendinginan dilakukan dengan cara mencelupkan aluminium paduan yang telah diperlakukan panas dalam tungku pemanas kedalam media pendingin hingga temperturnya sesuai dengan temperatur kamar untuk memperoleh larutan padat jenuh. Media pendinginnya yaitu air. Dipilih air sebagai media pendinginan pada proses pendinginan cepat karena air merupakan media pendingin yang sangat cocok untuk logam-logam memiliki tingkat kekerasan atau *hardenability* yang relatif rendah seperti logam paduan aluminium. Prosesnya yaitu *quenching* dilakukan secara cepat, dari temperatur pemanas (530°C) menuju ke temperatur yang lebih rendah, pada umumnya mendekati temperatur kamar. Tujuan dilakukan *quenching* yaitu agar larutan padat homogen yang dihasilkan pada proses *solution heat treatment* dan kekosongan atom dalam keseimbangan termal pada temperatur tinggi tetap berada pada tempatnya, atau proses ini berguna untuk menahan atom-atom yang larut dalam atom pelarut. Jadi ketika paduan didinginkan dari temperatur pelarutan dalam keadaan cepat. Proses pembentukan presipitat dalam aluminium juga terjadi dengan cepat (Schonmetz, 1990).

Pada proses ini menghasilkan larutan padat lewat jenuh (*super saturated solid solution*) merupakan fasa tidak stabil ketika berapa temperatur biasa atau temperatur ruang. Pada proses ini tidak hanya menyebabkan atom terlarut tetap ada dalam larutan, juga menyebabkan jumlah kekosongan atom tetap besar. Dengan adanya kekosongan atom dalam jumlah besar maka dapat membantu proses difusi atom pada temperatur ruang untuk membentuk zona *Guiner-Preston* (Zona GP). Zona *Guiner-Preston* (Zona GP) adalah kondisi di dalam paduan di mana terdapat agregasi atom padat atau penglompokan atom padat (Surdia & Saito, 1999).

### 2.5.3 Tahap Penuaan (*Aging*)

Tahap selanjutnya setelah proses *solution heat treatment* dan *quenching* dalam proses *precipitation hardening* yaitu proses *aging* atau penuaan. Perlakuan panas (*aging*) yaitu perlakuan panas pada aluminium dengan cara melakukan penahanan dengan temperatur tertentu (temperatur kamar atau temperatur dibawah *solvus line* batas pelarut) dalam jangka waktu tertentu. Maka pada proses ini akan terjadi perubahan sifat-sifat aluminium paduan seiring berjalannya waktu. *Aging* atau penuaan pada aluminium paduan dapat

dibedakan menjadi dua yaitu penuaan alami (*natural aging*) dan penuaan buatan (*artificial aging*). Adapun penjelasan dari keduanya adalah:

1. *Natural Aging*

Penuaan alami (*natural aging*) adalah penuaan untuk paduan aluminium yang *diage hardening* dalam keadaan dingin. *Natural aging* berlangsung pada temperatur ruang antara 15°C - 25°C dan dengan waktu penahanan 5 sampai 8 hari. Penuaan buatan (*Artificial Aging*) adalah penuaan untuk paduan aluminium yang di *age hardening* dalam keadaan panas.

2. *Artificial Aging*

Penuaan buatan (*artificial aging*) yaitu proses penuaan untuk paduan aluminium dengan cara memanaskan kembali larutan padat jenuh aluminium paduan itu dengan temperatur dibawah garis *solvus* (kisaran suhunya sekitar 100°C - 200°C) disertai dengan penahanan waktu (kisaran suhunya sekitar 1 sampai 1 sampai 24 jam). *Artificial aging* dalam proses *age hardening* dapat dilakukan beberapa variasi perlakuan yang dapat mempengaruhi hasil dari proses *age hardening*. Salah satu variasi tersebut adaah variasi temperatur *artificial aging*. Temperatur *artificial aging* dapat ditetapkan pada temperatur saat pengkristalan paduan aluminium (150°C) di bawah temperatur pengkristalan logam paduan aluminium. Penuaan buatan (*artificial aging*) berlangsung pada suhu antara 100°C-200°C. Pengambilan temperatur *artificial aging* pada temperatur antara 100°C-200°C akan berpengaruh pada tingkat kekerasan sebab pada proses *artificial aging* akan terjadi perubahan-perubahan fasa atau struktur. Perubahan fasa tersebut akan memberikan sumbangan terhadap kekerasan. Urutan perubahan fasa dalam proses *artificial aging* yaitu: pada temperatur ruang sampai dengan temperatur 100°C terjadi pengerasan tahap pertama.

Selanjutnya diatas suhu 100°C (tepatnya 130°C) dan apabila waktu penahanan *artificial aging* terpenuhi maka akan didapatkan tingkat kekerasan yang optimal ini disebut pengerasan tahap kedua. Apabila melebihi zona pengerasan tahap kedua maka paduan akan menjadi lunak kembali. Pada proses *aging* terjadi proses presipitasi dari atom *solution* melalui nukleasi dan pertumbuhan butir dari atom *solute* menjadi *nuclei presipitat*, pada beberapa material proses *aging* untuk menghasilkan kekuatan dan kekerasan yang optimum dapat terjadi dalam kurun waktu lama. Namun apabila temperatur terlalu tinggi atau proses *aging* terlalu lama maka partikel halus yang terdipersi dalam jumlah yang banyak secara berangsur-angsur akan kembali menjadi kasar dengan jumlah yang lebih sedikit dan jarak antara partikel lebih besar, tentunya kekuatannya akan menurun. Urutan perubahan fasa dalam proses. Apabila suhu *aging* dinaikkan atau waktu *aging*

diperpanjang dengan suhu tetap, maka akan terbentuk presipitasi dengan struktur kristal yang teratur atau disebut fasa antara. Fasa antara masih memberikan sumbangan terhadap peningkatan kekerasan pada paduan aluminium. Apabila suhu dinaikkan atau waktu penuaan diperpanjang, maka akan menyebabkan paduan aluminium menjadi lunak kembali (Schonmetz, 1990).

Beberapa tahapan fasa yang terbentuk pada proses *artificial aging* adalah sebagai berikut:

1. Larutan Padat Lewat Jenuh (*Super Saturated Solid Solution  $\alpha$* )

Setelah paduan aluminium melewati tahap *solution heat treatment* dan *quenching* maka akan didapatkan larutan pada lewat jenuh pada temperatur kamar. Pada kondisi ini secara simultan kekosongan atom dalam keseimbangan termal pada temperatur tinggi tetap pada tempatnya. Setelah pendinginan atau *quenching*, maka logam paduan paduan aluminium menjadi lunak jika dibandingkan dengan kondisi awalnya.

2. Zona (GP 1)

Zona ini adalah zona presipitasi yang terbentuk oleh temperatur penuaan atau *aging* yang rendah dan dibentuk oleh segregasi atom Cu dalam larutan padat lewat jenuh atau *super saturated solid solution  $\alpha$* . Zona (GP 1) akan muncul pada tahap mula atau awal dari proses *artificial aging*. Zona ini terbentuk ketika temperatur *artificial aging* dibawah 100°C (tepatnya mulai suhu 27°C-100°C) maka zona ini akan terbentuk. Apabila suhu *artificial aging* yang terlalu tinggi maka zona ini zona GP 1 tidak akan terbentuk. Karakteristik dari zona ini yaitu kekerasan logam paduan aluminium mulai dapat meningkat. Zona ini disebut pengerasan tahap pertama.

3. Zona (GP 2) atau Fasa  $\theta''$

Setelah temperatur *artificial aging* melewati 100°C ke atas, maka akan mulai muncul fasa  $\theta''$  atau zona (GP 2). Pada temperatur 130°C akan terbentuk zona (GP 2) dan apabila waktu penahanan *artificial aging*nya terpenuhi maka akan didapatkan tingkat kekerasan optimal. Biasanya proses *artificial aging* berhenti ketika sampai terbentuknya zona (GP 2) dan terbentuknya fasa antara yang halus (Presipitasi  $\theta''$ ), karena setelah melewati zona (GP 2) maka paduan akan kembali menjadi lunak. Jika proses *artificial aging* berlangsung sampai terbentuknya fasa  $\theta''$  atau zona (GP 2), maka disebut dengan pengerasan tahap kedua.

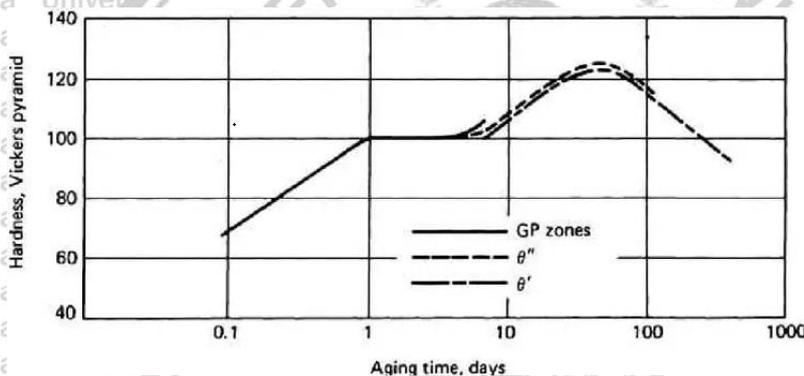
4. Fasa  $\theta'$

Paduan aluminium yang dinaikkan temperatur *aging* atau waktu *aging* diperpanjang tetap temperatur tetap, maka akan terbentuk presipitasi dengan struktur

kristal yang teratur yang berbeda dengan fasa  $\theta'$  ini masih dapat memberikan sumbangan terhadap peningkatan kekerasan pada paduan aluminium. Peningkatan kekerasan pada paduan aluminium. Peningkatan kekerasan yang terjadi pada fasa  $\theta'$  ini berjalan sangat lambat.

#### 5. Fasa $\theta$

Apabila temperatur dinaikkan atau waktu penuaan diperpanjang maka fasa  $\theta'$  (fasa antara) berubah menjadi fasa  $\theta$  (fasa pelunakan). Jika fasa  $\theta$  terbentuk maka akan menyebabkan paduan aluminium kembali menjadi lunak. Sementara waktu penahanan dalam *artificial aging* merupakan salah satu komponen yang dapat mempengaruhi hasil dari proses *age hardening* secara keseluruhan. Seperti halnya temperatur, waktu penahanan pada tahap *artificial aging* akan mempengaruhi perubahan struktur atau perubahan fasa paduan aluminium. Sehingga pemilihan waktu penahanan *artificial aging* harus dilakukan dengan hati-hati (Schonmetz, 1990).



Gambar 2.2 Hubungan antara lama waktu *aging* dengan kekuatan dan kekerasan paduan aluminium

Sumber: Smith (1995)

Dalam kurva penuaan di atas, pada awal-awal tahap *artificial aging* struktur atau fasanya masih berupa larutan pada lewat jenuh (*super saturated solid solution*). Seiring dengan penambahan waktu penuaan atau ketika penuaan sampai di daerah *under aged*, maka maiter bentuk zona *presipitat* zona (GP 1) dan paduan aluminium menjadi agak kuat dan keras. Ketika waktu *aging* ditambah lagi maka akan masuk dalam daerah *peak aged*.

Pada daerah *peak aged* presipitat mengumpul atau mulai terbentuk zona (GP 2) dan fasa antara yang halus (fasa  $\theta'$ ). Jika fase-fase tersebut mulai terbentuk maka akan didapatkan tingkat kekerasan dan kekuatan logam paduan aluminium yang optimal. Apabila setelah mencapai *peak aged* (puncak penuaan) waktu *artificial aging* masih ditambah lagi maka akan masuk daerah *over aged*. Pada daerah *over aged* ini akan didapatkan fasa  $\theta$ , jika fasa

$\theta$  ini terbentuk maka akan menyebabkan paduan aluminium menjadi lunak kembali dan berkurang kekerasannya (Smith, 1995).

## 2.6 Pengelasan Gesek

Pengelasan adalah proses penyambungan material yang dihasilkan oleh pertumbuhan bersama dari material atau pertumbuhan dari salah satu material yang dilas, yang dihasilkan oleh pemanasan sampai temperatur pengelasan, dengan atau tanpa tekanan, dan dengan atau tanpa *filler* (logam pengisi) (Cary, 1989).

Pengelasan fase padat (*solid state joining*) adalah penggabungan bahan atau material sebelum temperatur cair tanpa adanya penambahan logam pengisi. Proses pengelasan fase padat dapat dilakukan dengan atau tanpa tekanan.

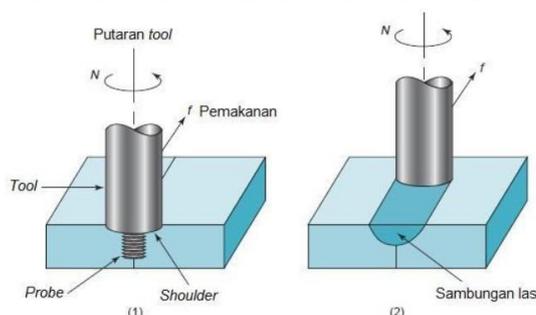
Pengelasan gesek (*friction welding*) adalah pengelasan fase padat yang panasnya dihasilkan dari gerakan relatif dua permukaann yang disambung. Proses ini merupakan metode yang memanfaatkan konversi secara langsung dari energi mekanis menjadi energi panas. Proses pengelasan gesek, yakni ketika benda yang tidak berputar digesekkan dengan benda berputar, dengan tekanan konstan atau meningkat sampai terjadi panas yang mencapai temperatur pengelasan. Setelah dipanaskan, permukaan kemudian diberi tekanan sehingga terjadi difusi atom pada saat terjadi kontak.

Kelebihan dari pengelasan gesek (*friction welding*) adalah kemampuannya untuk mengelas logam aluminium yang tidak dapat di las dengan las cair. Dengan metode ini juga dapat dilakukan pengelasan bahan yang tidak sama (*dissimilar*).

Terdapat beberapa macam metode pengelasan gesek, yaitu:

### 1. *Friction Stir Welding*

*Friction stir welding* merupakan proses *solid-state* dimana sebuah *tool* yang berputar dimakamkan sepanjang garis sambungan antara dua benda kerja. *Tool* yang berputar dimakamkan pada garis sambungan tersebut menghasilkan panas serta secara mekanis menggerakkan logam untuk membentuk sambungan las (Groover, 2010)



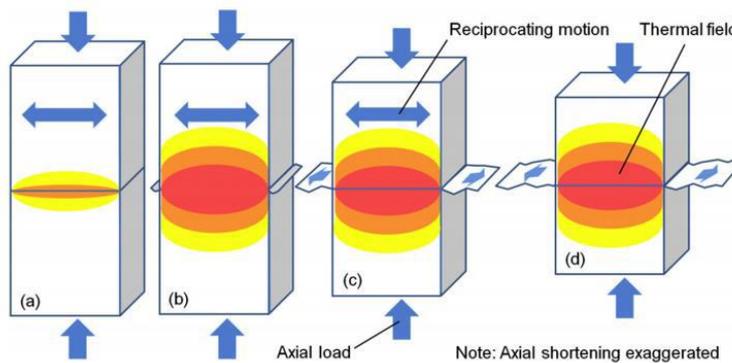
Gambar 2.3 *Friction stir welding*

Sumber: Groover (2010)

## 2. Linear Friction Welding

Dalam pengembangan lebih lanjut dari *friction welding*, permukaan dari dua komponen yang akan disambungkan dikenakan gerak bolak-balik secara linier, sebagai lawan dari gerakan putar. Dengan demikian, dalam *linear friction welding*, komponen tidak harus berbentuk bulat atau tubular pada penampang melintangnya.

Dalam proses penyambungan ini, satu bagian bergerak melintasi permukaan bagian lain dengan mekanisme gerak bolak-balik yang seimbang. Proses ini mampu mengelas komponen persegi atau persegi panjang, serta bagian bulat, terbuat dari logam atau plastic (Kalpakjian, 2014).

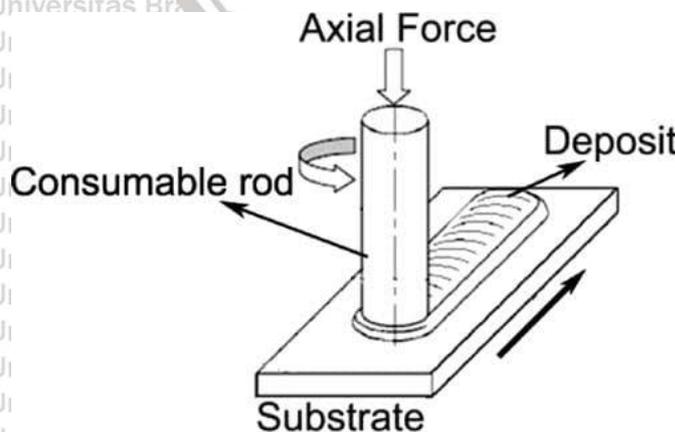


Gambar 2.4 Linear friction welding

Sumber: Jedrasiak dkk (2018)

## 3. Friction Surfacing

*Friction surfacing* adalah jenis pengelasan gesek di mana bahan pelapis melapisi permukaan benda kerja. Bahan pelapis berbentuk batang digosok di bawah tekanan ke permukaan benda kerja untuk membentuk pelapis. Dengan menggerakkan benda kerja relatif terhadap permukaan batang berputar, lapisan dengan ketebalan 0,2 mm sampai 2,5 mm akan timbul ketika proses *friction surfacing* (Mishra dkk, 2005)



Gambar 2.5 Friction surfacing

Sumber: Bhate dkk (2016)

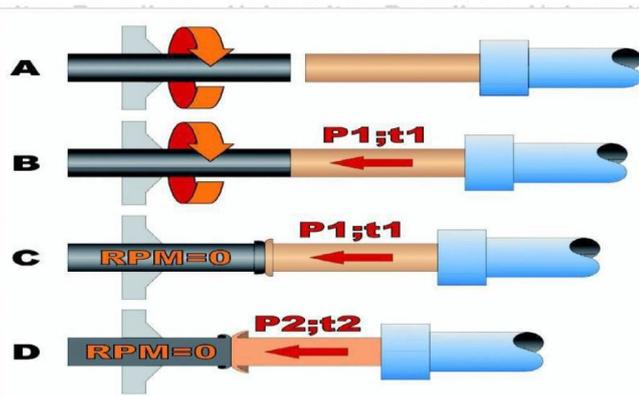
#### 4. *Rotary Friction Welding*

*Rotary friction welding* merupakan pengelasan *solid state* dimanadapat dicapai dengan panas yang didapatkan dari gesekan dua benda kerja yang dimana salah satu benda kerja berputar untuk menaikkan suhu di permukaan benda kerja sedangkan benda kerja yang satunya diam dan menekan benda kerja yang berputar dengantekanan yang cukup untuk membentuk ikatan metalurgi. *Rotary friction welding* terdiri dari dua macam, yaitu *continuous drive friction welding* (CDFW) dan *inertia friction welding*

##### A. *Continuous Drive Friction Welding*

Pengelasan dengan metode *continuous drive friction welding* disebut juga dengan *direct drive welding*. Metode ini menggunakan beberapa alat las seperti mesin bubut yang dilengkapi dengan rem dan kopling, alat untuk mengontrol tekanan, *timer* pengelasan, dan pengontrol gerakan perpindahan. Operasi pada proses pengelasan meliputi penggesekan yang menghasilkan panas, penghentian putaran, dan proses penekanan yang menghasilkan penyambungan. *Continuous Drive Friction Welding* (CDFW) atau las gesek merupakan pengelasan yang memanfaatkan panas yang berasal dari gesekan langsung dari benda itu sendiri dimana salah satu benda kerja diputar dan satunya diam dan menekan. Mekanisme proses ini adalah ketika salah satu benda diputar dengan kecepatan tinggi dan salah satu benda yang lain menekan benda yang berputar tersebut. Akibat dari penekanan tersebut, timbul panas sehingga partikel dari dua logam dapat saling berikatan dan perputaran yang terjadi mengakibatkan partikel dari dua benda tersebut tercampur. Sedangkan penekanan menyebabkan partikel terdorong mengisi celah-celah kosong sekaligus mengeluarkan udara. Dari proses ini menghasilkan proses penyambungan logam tanpa melelehkan logam tersebut (Groover, 2010).

Pada las gesek terdapat beberapa parameter yang perlu diperhatikan saat proses penyambungan, terlebih memperhatikan pada waktu dan gaya yang diberikan pada proses pengelasan. Pada Gambar 2.6,  $P_1;t_1$  adalah gaya tekan awal dan *friction time* (waktu pengelasan gesek), dan pada  $P_2;t_2$  adalah gaya tekan akhir dan *upset time* yang telah ditentukan

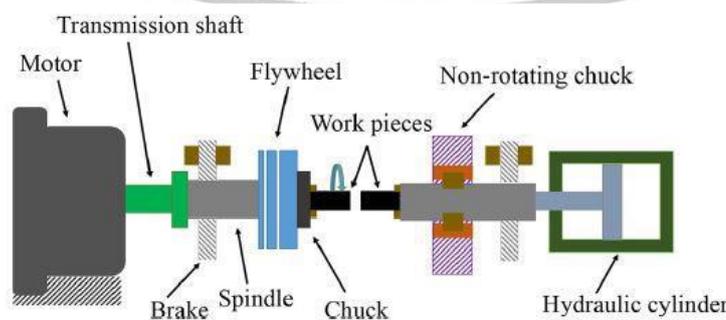


Gambar 2.6 Proses *continuous drive friction welding*  
Sumber: shubhavardhan (2012)

### B. *Inertia drive welding*

Metode *inertia drive welding* menggunakan mesin yang sejenis dengan metode *direct drive welding*. Perbedaannya adalah adanya *fly wheel* pada *spindle* yang berputar. Kandungan energi pada *fly wheel* tergantung pada kecepatan putaran. Ketika putaran *spindle* sudah sesuai kemudian diberikan tekanan aksial dan ditahan konstan sampai terjadi proses pengelasan (Jamarsi & Sulardjaka, 2019).

*Inertia friction welding* merupakan modifikasi dari *friction welding*, meskipun kedua istilah tersebut telah digunakan secara bergantian. Dalam *inertia friction welding*, energi yang dibutuhkan untuk pemanasan disuplai oleh *flywheel*. *Flywheel* dipercepat hingga mencapai kecepatan yang tepat, kemudian kedua permukaan benda kerja saling bergesekan dan gaya aksial diterapkan. Ketika terjadi gesekan pada permukaan kedua benda kerja, roda gila (*flywheel*) akan mulai melambat dan gaya aksial meningkat. Pengelasan selesai dilakukan pada saat roda gila (*flywheel*) berhenti berputar (Kalpakjian, 2014)

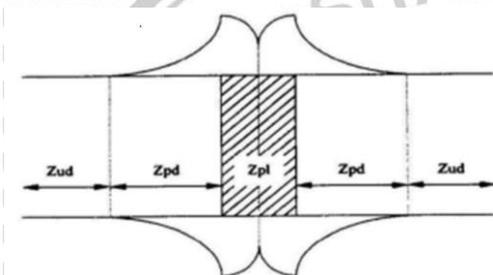


Gambar 2.7 *Inertia friction welding*  
Sumber: Ding dkk (2019)

## 2.7 Daerah *Heat Affected Zone* (HAZ)

Menurut Kalpakjian (2014), daerah HAZ adalah daerah yang terpengaruh panas saat proses pengelasan. Daerah HAZ memiliki struktur mikro dan sifat mekanik yang berbeda dari logam dasar sebelum pengelasan. Hal ini dikarenakan daerah tersebut telah mengalami perlakuan panas yang merupakan efek dari pengelasan.

Menurut Lin dkk (1999) dalam penelitiannya, daerah HAZ pada proses pengelasan gesek dibagi menjadi tiga bagian, yaitu daerah *fully plasticized region* (zpl) yaitu daerah sambungan las yang menyatu sempurna, *partly deformed region* (zpd) yaitu daerah yang mengalami efek panas sebagian, dan *undeformed region* (zud) yaitu daerah yang tidak terpengaruh efek panas dari pengelasan gesek tersebut. Semakin besar panas yang dihasilkan dari pengelasan akan menyebabkan daerah HAZ yang terbentuk juga akan semakin meluas, hal ini akan mempengaruhi kekuatan dari sambungan las yang terbentuk dari hasil pengelasan.



Gambar 2.8 Daerah zpl, zpd, dan zud  
Sumber: Lin dkk (1999)

Bentuk *flash* pada permukaan kontak pada penyambungan dua logam tidak sejenis dengan las gesek, akan menjadi ketidaksimetrian bentuk. Hal ini disebabkan perbedaan sifat-sifat dari kedua jenis logam, seperti sifat-sifat termal, dan kekuatan mekanis yang berbeda. Bentuk *flash* yang tidak simetris menunjukkan daerah pengaruh panas yang tidak simetris pada kedua logam benda kerja (Roumbaut, 2011)

## 2.8 Energi Pengelasan pada Proses *Friction Welding*

Menurut sahin (2010), pada saat terjadinya proses pengelasan gesek atau *friction welding* terdapat energi panas yang timbul dari adanya gesekan antara dua permukaan logam. Hal ini diasumsikan sebagai tekanan gesek yang menyebar ke setiap bagian benda yang berputar maupun yang tidak berputar pada saat proses *friction welding*. Energi panas yang dihasilkan pada proses ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$d\dot{Q} = \omega \cdot dM_t \dots\dots\dots (2-1)$$

Dengan:

$\omega$  = Kecepatan sudut

$dM_t$  = Perbedaan nilai momen torsi lingkaran

$$dM_t = r \cdot dF_{friction} \dots\dots\dots (2-2)$$

Dengan:

$dF_{friction}$  = Gaya gesek

$dM_t$  = Perbedaan nilai momen torsi

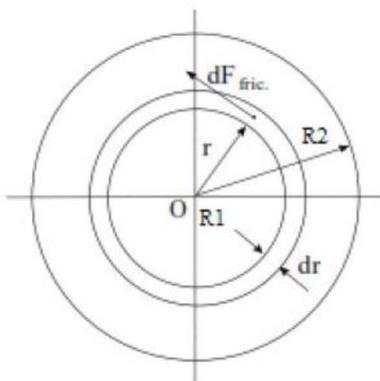
$r$  = jari-jari lingkaran

Kemudian bias dijelaskan bahwa gaya gesek  $dF_{friction}$  menjadi koefisien *friction* lalu terdapat gaya aksial, tekanan melalui lingkaran menjadi:

$$dF_{friction} = r \cdot (\mu \cdot P \cdot 2\pi r \cdot dr) \dots\dots\dots (2-3)$$

Dari penurunan rumus (2-1) dan (2-3) tersebut dapat dijadikan persamaan sebagai berikut:

$$d\dot{Q} = 2\pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot P \cdot r^2 \cdot dr \dots\dots\dots (2-4)$$



Gambar 2.9 Permukaan gesek

Sumber: Sahin (2010)

Dari rumus (2-4) kemudian diintegalkan dengan nilai  $R$  pada (spesimen pejal) untuk mengetahui jumlah kalor yang terjadi selama proses gesekan

$$\int_{R1}^{R2} d\dot{Q} = 2\pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot P \cdot r^2 \cdot dr \dots\dots\dots (2-5)$$

$$\dot{Q} = 2\pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot P \cdot \frac{r^3}{3} \Big|_{R1}^{R2} \dots\dots\dots (2-6)$$

$$\dot{Q} = \frac{2}{3} \pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot P \cdot R^3 \quad (2-7)$$

Dengan:

$\dot{Q}$  = Jumlah energy mekanik per satuan waktu pada permukaan las gesek (W)

$p$  = Friction pressure (N/m<sup>2</sup>)

$\omega$  = Kecepatan sudut (rad/s)

$R$  = Radius benda kerja (m)

$M_t$  = Momen torsi

$\mu$  = Koefisien gesek material

## 2.9 Pengujian Sambungan Las

### 2.9.1 Macam-Macam Pengujian

Secara garis besar, pengujian terhadap sambungan las dibagi menjadi dua, yaitu:

#### 1. Pengujian *Destructive* (merusak)

Pengujian ini merupakan pengujian dengan cara merusak spesimen atau menghancurkan benda yang akan diuji. Uji ini dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik dari suatu material (Avner, 1974). Contoh dari pengujian ini adalah pengujian tarik, pengujian tarik, pengujian kejut dan pengujian kekerasan

#### 2. Pengujian *Non-Destructive* (Tidak Merusak)

Pengujian *non-destructive* (NDT) adalah pengujian suatu material dengan segala cara dengan tidak merusak atau menyebabkan cacat pada material tersebut (Avner, 1974).

Contoh dari pengujian *non-destructive* adalah pengujian ultrasonic, pengujian *eddy current*, dan pengujian penyinaran

### 2.9.2 Pengujian Tarik

Pengujian tarik yang dilakukan pada sebuah material logam akan menghasilkan grafik tegangan-regangan yang dapat memberikan data, di antaranya berupa kekuatan luluh dan kekuatan tarik yang merupakan parameter keuletan (*ductility*) dari spesimen yang diuji tarik (Dieter, 1988).

Metode pengujian tarik dilakukan dengan menaikkan beban sejajar dengan material yang diuji sedikit demi sedikit hingga benda uji tersebut patah. Kemudian sifat-sifat dari kekuatan tariknya dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}}{A} \quad (2-8)$$

Keterangan:

$\sigma$  = Tegangan (N/m<sup>2</sup>)

F = Gaya (N)

A = Luas penampang ( $m^2$ )

Kekuatan tarik adalah tegangan maksimum yang bisa ditahan oleh sebuah material ketika diregangkan atau ditarik, sebelum material tersebut patah. Kekuatan tarik ini diperoleh dengan uji tarik (*tension test*). Uji tarik adalah metode pengujian dengan memperoleh sifat mekanik material akibat beban tarik satu sumbu. Sifat-sifat mekanik yang diperoleh dalam pengujian tarik ini digambarkan dalam bentuk kurva tegangan-regangan (*stress-strain curve*). Selama penarikan, beban meningkat secara bertahap sampai material patah. Parameter yang diukur adalah beban dan perpanjangan.

Data-data yang dapat diperoleh dari kurva tegangan-regangan adalah sebagai berikut:

- a. Keuletan adalah besar regangan plastik sampai terjadi perpatahan, dapat dinyatakan dalam persentasi perpanjangan, atau biasa disebut dengan regangan ( $\epsilon$ ).

$$\epsilon = \frac{L-L_0}{L_0} \times 100\% \dots\dots\dots (2-9)$$

Keterangan:

L = Panjang sesudah patah

L<sub>0</sub> = Panjang awal

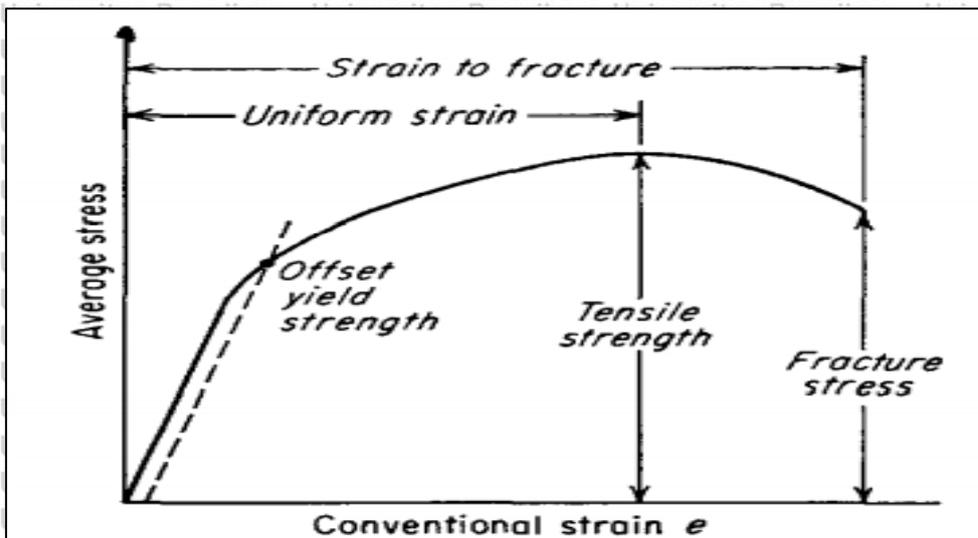
- b. Modulus Elastisitas (E) adalah ukuran kekakuan suatu material. Deformasi terjadi bila bahan mengalami gaya. Regangan awal berbanding lurus dengan besarnya tegangan.

Setelah tegangan diiadakan, regangan lenyap. Dalam menentukan hubungan antara tegangan dan regangan, luas penampang material harus diketahui dengan demikian tegangan yang bekerja dapat ditentukan.

- c. Tegangan luluh (*yield stress*) adalah batas tegangan ketika deformasi plastis mulai terjadi. Pada baja lunak, terdapat titik luluh yang jelas. Pada material lainnya tanpa batas yang jelas, kekuatan luluh didefinisikan sebagai tegangan yang diperlukan untuk menghasilkan regangan plastik sebesar 0,2%. Kekuatan luluh *offset* ditentukan dari tegangan pada perpotongan antar kurva tegangan dan regangan pada garis sejajar dengan kemiringan kurva pada regangan tertentu. Di Amerika Serikat regangan *offset* ditentukan sebesar 0,2 atau 0,1 %

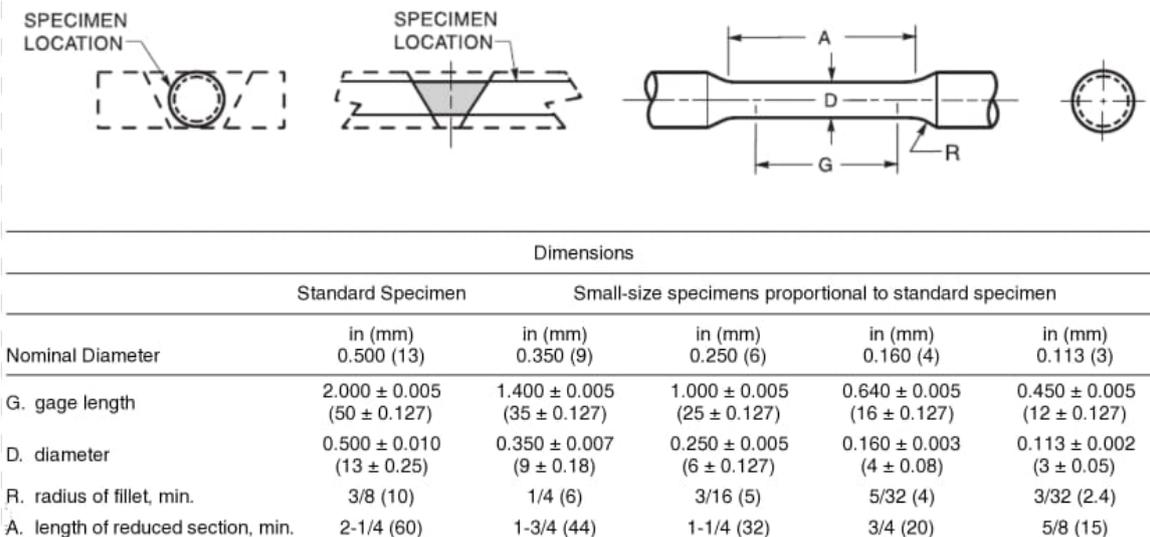
- d. Kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*) adalah batas tegangan tertinggi yang masih mampu diterima oleh material sebelum material tersebut patah.

- e. Ketangguhan adalah suatu ukuran energi yang diperlukan untuk mematahkan material. Ketangguhan ini ada hubungannya dengan luas daerah dibawah kurva tegangan-regangan. (Jamarsi & Sulardjaka, 2019)



Gambar 2.10 Grafik tegangan dan regangan  
Sumber: (Dieter,1988)

Perbedaan kurva tidak terlalu signifikan terhadap regangan yang kecil, tetapi akan menjadi signifikan pada rentang terjadinya pengerasan regangan (*strain hardening*) yaitu setelah melewati titik luluh dan perbedaan akan menjadi besar pada daerah *necking*. Pada gambar 2.10 merupakan salah satu standar spesimen uji tarik berdasarkan dari *American Welding Society* (AWS)



Gambar 2.11 Spesimen uji tarik  
Sumber: AWS B4.0 (2007)

### 2.9.3 Pengujian Kekerasan

Kekerasan (*hardness*) adalah ukuran daya tahan dari suatu material untuk membatasi terjadinya deformasi plastis (Callister, 2014). Semakin besar kekerasan suatu logam maka semakin besar ketahanannya terhadap deformasi. Salah satu metode dalam pengujian

kekerasan adalah dengan metode Vickers. Metode ini menggunakan indenter yang berbentuk *pyramid* beralas bujur sangkar dengan sudut puncak antara dua sisi berhadapan  $136^\circ$ , tapak tekan berbentuk bujur sangkar. Beban yang digunakan antara 1 sampai 1000 gf tergantung kepada kekerasan logam yang di uji (Avner, 1974).

$$\text{VHN} = \frac{F}{A} \times \sin \frac{136^\circ}{2} \quad \dots\dots\dots (2-10)$$

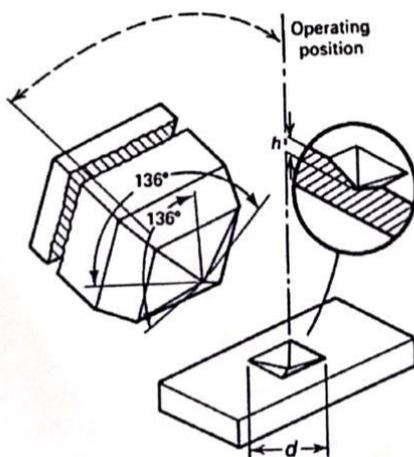
$$\text{VHN} = \frac{F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 1,854 \frac{F}{d^2} \quad \dots\dots\dots (2-11)$$

Dengan:

VHN = Angka kekerasan Vickers

F = Beban (kgf)

d = Diagonal (mm)



Gambar 2.12 Pengujian kekerasan dengan metode Vickers  
Sumber: ASM International (1998)

## 2.10 Jeffries Planimetric Method

Menurut Vander Voort (1999), metode planimetri yang dikembangkan oleh Jeffries telah digunakan selama bertahun-tahun untuk memberikan ukuran jumlah butir per unit area pada bidang penampang yang dapat langsung berhubungan dengan ukuran butir skala angka ASTM. Metode Jeffries umumnya dilakukan dengan menggambar lingkaran atau persegi panjang. Biasanya dengan diameter 79,8 mm ( $5000 \text{ mm}^2$ ) pada foto mikrograf atau pada transparansi yang terdapat pada layar proyeksi. Perbesaran disesuaikan untuk memberikan setidaknya 50 butir dalam area pengukuran. Hitungan dibuat dari jumlah butir



material, kekuatan *yield* bervariasi dengan ukuran butir berdasarkan persamaan Hall-Petch sebagai berikut.

$$\sigma_y = \sigma_o + k_y d^{-1/2} \quad (2-14)$$

Sumber: Callister (2001)

dengan:

$\sigma_y$  = tegangan *yield* (MPa)

$\sigma_o$  = *flow stress material* pada ukuran butir sangat besar (MPa)

$k_y$  = koefisien penguatan (MPa m<sup>-1/2</sup>)

$d$  = diameter butir rata-rata ( $\mu\text{m}$ )

Persamaan Hall-Petch tidak valid untuk material yang memiliki butir yang besar dan bahan polikristalin yang memiliki butir yang sangat halus. Ukuran butir dapat diatur oleh pemadatan dari fase cair dan juga deformasi plastis diikuti oleh perlakuan panas yang tepat. Pengurangan ukuran butir meningkatkan tidak hanya kekuatan, tetapi juga ketangguhan dari banyak paduan (Callister 2001).

## 2.12 Hipotesis

Berdasarkan dari beberapa penelitian sebelumnya dan tinjauan literatur, dapat disimpulkan, bahwa dengan variasi suhu *aging* 125°C, 150°C, dan 175°C maka kekuatan tarik dari hasil lasan gesek akan naik hingga titik maksimal kemudian turun dengan bertambahnya suhu *aging*. Penambahan sudut *chamfer* pada satu sisi juga akan meningkatkan kekuatan tarik pada sambungan las gesek aluminium A6061 dan baja SS41.

## BAB III

### METODE PENELITIAN

#### 3.1 Metode Penelitian

Dalam penelitian ini metode *true experiment* digunakan oleh penulis untuk menjalankan penelitian. Cara penelitian ini digunakan untuk dapat mengetahui pengaruh suhu *aging* dan penambahan sudut *chamfer* pada satu sisi terhadap kekuatan tarik sambungan las gesek Aluminium A6061 dan Baja SS41.

#### 3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan selama Bulan April 2021 – selesai. Pelaksanaan penelitian dilakukan di:

1. Pembuatan spesimen dilakukan di Laboratorium CNC dasar Politeknik Negeri Malang
2. Proses pengelasan gesek dilakukan di Laboratorium Proses Produksi I Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
3. Pengujian kekuatan tarik dilakukan di Laboratorium Struktur Teknik Sipil Universitas Negeri Malang

#### 3.3 Variabel Penelitian

Terdapat tiga variabel pada penelitian ini yaitu variabel bebas, variabel terikat, dan variabel terkontrol.

##### 3.3.1 Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang ditentukan untuk menentukan hasil sebuah proses atau variabel yang besarnya ditentukan sebelum dilakukan penelitian. Variabel bebas pada penelitian ini terdiri dari *temperature aging* yaitu: 125°C, 150°C, 175 °C dan tanpa *aging* dan *chamfer* pada spesimen baja sebesar 30° dan tanpa *chamfer*

### 3.3.2 Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang nilainya dipengaruhi oleh variabel bebas dan didapat setelah proses dilakukan. Dalam penelitian ini yang menjadi variabel terikat adalah kekuatan Tarik Sambungan sambungan las

### 3.3.3 Variabel Terkontrol

Variabel terkontrol adalah variabel yang nilainya tetap selama berlangsung penelitian pada variasi yang berbeda. Variabel terkontrol dalam penelitian ini adalah:

1. Spesimen putar aluminium A6061 Diameter 18 mm
2. Spesimen tekan Baja SS41 Diameter 18 mm
3. *Rotation Speed* 1600 rpm.
4. Gaya tekan awal 7 kN.
5. *Burn off length* 15 mm
6. Gaya tekan akhir 35 kN
7. *Upset Time* 60 detik

## 3.4 Bahan dan Spesifikasi Alat

### 3.4.1 Bahan

Bahan yang digunakan untuk pengelasan pada penelitian ini adalah Aluminium A6061 dan Baja SS41 berbentuk silinder pejal, dengan komposisi yang tertera pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2.

Tabel 3.1  
Komposisi Kimia Aluminium A6061

Elements	A6061
Al	97,9%
Si	0,511%
Fe	0,264%
Cu	0,211%
Mn	0,0215%
Mg	0,906%
Cr	0,0622%
Zn	0,043%
Ti	0,0474%
Lainnya	0,0339%

Tabel 3.2  
Komposisi Kimia Baja SS41

Elements	SS41
C	0,22%
Si	0,2%
Mn	0,63%
P	0,02%
S	0,02%

### 3.4.2 Spesifikasi Alat

#### 1. Mesin Las Gesek

Mesin bubut yang telah dimodifikasi dengan pompa hidrolik akan digunakan sebagai alat pengelasan gesek. Gambar 3.1 menunjukkan mesin bubut dan pompa hidrolik yang akan digunakan. Spesifikasi mesin bubut yang akan digunakan yaitu:

Merek : *Lathe Machine C6232A*

Buatan : China

Tahun : 1978

Daya : 3,5 kW

Putaran *spindle max* : 1600 rpm



Gambar 3.1 Mesin las gesek

#### 2. Jangka Sorong

Jangka sorong digunakan untuk mengukur dimensi spesimen dengan ketelitian 0,05 mm. Gambar 3.2 menunjukkan jangka sorong yang akan digunakan untuk pengukuran.



Gambar 3.2 Jangka sorong

### 3. Kamera Digital

Kamera digital digunakan untuk mendokumentasikan kegiatan skripsi. Gambar 3.3 menunjukkan kamera yang akan digunakan ketika membuat dokumentasi skripsi.



Gambar 3.3 Kamera digital

### 4. Mesin CNC Lathe

Gambar dibawah ini merupakan alat yang digunakan untuk membuat ukuran spesimen yang diinginkan. Berikut spesifikasi mesin CNC yang digunakan:

*Model* : LTC-200

*Type* : CNC Lathes

*Machining Legth* : 299,9 mm

*Chuck Size* : 203,2 mm

*Max RPM* : 4500 Rpm



Gambar 3.5 CNC Lathe

#### 5. Stopwatch

Stopwatch digunakan untuk mengetahui waktu selama proses pengelasan. Gambar 3.5 adalah stopwatch yang nantinya akan digunakan pada saat penelitian.



Gambar 3.5 Stopwatch

#### 6. Alat Pengujian Tarik

Gambar dibawah ini merupakan alat yang digunakan untuk menguji kekuatan tarik hasil dari spesimen yang telah di las gesek. Berikut spesifikasi mesin yang digunakan:

Maksimal kapasitas : 1000 kN

Skala graduasi : 0,1 kN

Metode kalibrasi : JIS 7721



Gambar 3.6 Mesin uji tarik

#### 7. Power Hacksaw

Gambar dibawah ini merupakan alat yang digunakan untuk memotong spesimen sesuai kebutuhan. Berikut spesifikasi mesin yang digunakan yaitu:

Merek	: Kasto
Tipe	: HBS 210/240
Cutting diameter	: 210
Voltage (V) /Frequency (Hz)	: 400/50
Total power requirement (kW)	: 1,3



Gambar 3.7 Power hacksaw

#### 8. Micro Vickers Hardness Testing Machine

Digunakan untuk mengukur kekerasan spesimen dengan metode vickers dengan spesifikasi alat sebagai berikut:

Merek/Tipe	: Mitutoyo HM-200
Pembebanan	: 10-1000 gf
Indenter approach speed	: 60 $\mu$ m/s
Test force loading time	: 1-99 s
Test force dwell time	: 0-999 s

*Test force unloading time* : 1-99 s



*Gambar 3.8 Micro vickers hardness testing machine*

## 9. Mikroskop

Digunakan untuk melihat struktur mikro dari spesimen dengan spesifikasi alat sebagai berikut:

Merek/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*

## 10. Tungku Pemanas

Tungku pemanas Digunakan untuk memanaskan spesimen sesuai dengan temperatur tipikal yang diinginkan. Berikut spesifikasi mesin yang digunakan yaitu:

Merek/Tipe : GEBR's WOLTERS

Voltase : 380 Volt

Daya : 6,6 kW



Gambar 3.10 Tungku pemanas

#### 11. Thermogun

Digunakan untuk mengukur temperatur spesimen pada saat proses pengelasan dengan spesifikasi sebagai berikut:

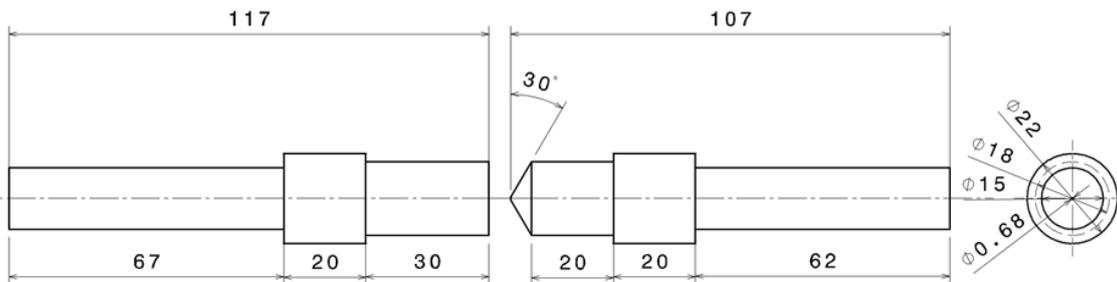
Merek/Tipe	: Krisbow
Pembebanan	: KW06-304
Indenter approach speed	: -50~750
Test force loading time	: -58~1922
Test force dwell time	: kurang dari 1 detik



Gambar 3.11 Thermogun

### 3.5 Dimensi Spesimen

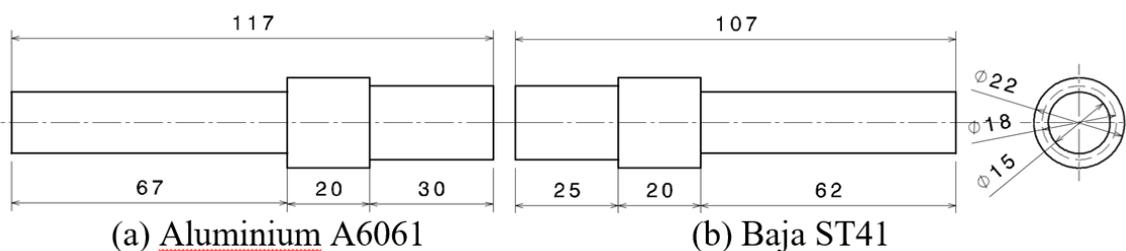
Dimensi benda kerja yang digunakan untuk proses pengelasan ditunjukkan pada gambar 3.12 dan 3.13



(a) Aluminium A6061

(b) Baja ST41

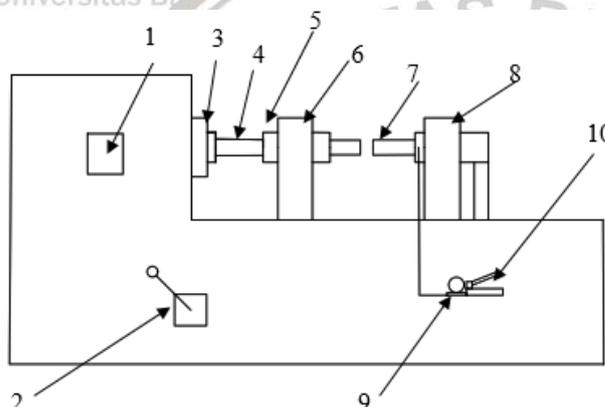
Gambar 3.12 Spesimen chamfer 30° (a) Spesimen yang berputar (b) Spesimen yang diam



Gambar 3.13 Spesimen tanpa *chamfer* (a) Spesimen yang berputar (b) Spesimen yang diam

### 3.6 Skema Penelitian

Gambar 3.14 menunjukkan skema alat pengelasan gesek yang akan dilakukan. Pompa hidrolik memberikan tekanan melalui fluida oli ke silinder hidrolik yang kemudian menekan *chuck spesimen* dan saat *chuck spindle* berputar dengan kecepatan tertentu maka akan timbul panas akibat gesekan spesimen tersebut hingga terjadi sambungan.



Gambar 3.14 Skema alat pengelasan gesek

Keterangan:

1. Tombol pengatur kecepatan *spindle*
2. Tuas on/off mesin bubut
3. *Chuck spindle* mesin bubut
4. Spesimen las
5. *Chuck* spesimen penekan
6. Plat penyangga *chuck* spesimen penekan
7. Silinder hidrolik
8. *Tailstock*
9. Digital *pressure gauge*
10. Pompa Hidrolik

### 3.7 Prosedur Penelitian

#### 3.7.1 Pengelasan Gesek

Proses pengelasan gesek dilakukan dengan menggunakan mesin bubut dengan langkah- langkah sebagai berikut.

1. Mempersiapkan mesin bubut dan spesimen yang akan digunakan seperti pada skema instalasi dan dimensi spesimen sebelum dilas sudah diukur
2. Memasang spesimen (a) Aluminium A6061 pada *chuck* yang berputar dan spesimen (b) Baja SS41 pada *chuck* yang tersambung dengan pompa hidrolis
3. *Centering* antara kedua spesimen tersebut
4. Pemberian aseton pada bidang kontak spesimen las
5. Mengatur kecepatan putaran *spindle* dari motor dengan kecepatan 800 rpm kemudian ditunggu hingga stabil selama sekitar 30 detik
6. Tambahkan kecepatan putar *spindle* menjadi 1600 rpm kemudian ditunggu kembali selama sekitar 30 detik hingga stabil
7. Saat kecepatan putar *spindle* sudah stabil, dilakukan penghitungan mundur dan diberikan gaya penekanan awal sebesar 7 kN
8. Setelah mencapai *burn off length* 15 mm, mesin dimatikan
9.  *Holding* selama 60 detik kemudian ditambahkan gaya penekanan akhir sebesar 35 kN
10. Pelepasan benda kerja pada cekam
11. Inspeksi hasil las

#### 3.7.2 Prosedur Proses Aging

Proses *aging* dilakukan dengan menggunakan tungku pemanas dengan langkah- langkah sebagai berikut

1. Mempersiapkan spesimen las gesek yang sudah dibentuk
2. Bersihkan permukaan spesimen agar tidak ada kotoran di permukaan spesimen
3. Menyusun spesimen didalam tungku pemanas, beri jarak antar spesimen
4. Menutup dan kunci pintu tungku pemanas
5. Nyalakan tungku pemanas dan setting tungku pemanas untuk meningkatkan suhu sampai suhu yang diinginkan (125°C, 150°C, 175°C)
6. Lanjutkan proses holding selama 7 jam jika suhu yang diinginkan telah tercapai
7. Matikan tungku pemanas dan dilanjutkan dengan pendinginan tungku selama 6 jam
8. Buka kunci dan pintu tungku pemanas kemudian keluarkan spesimen dari dalam tungku pemanas

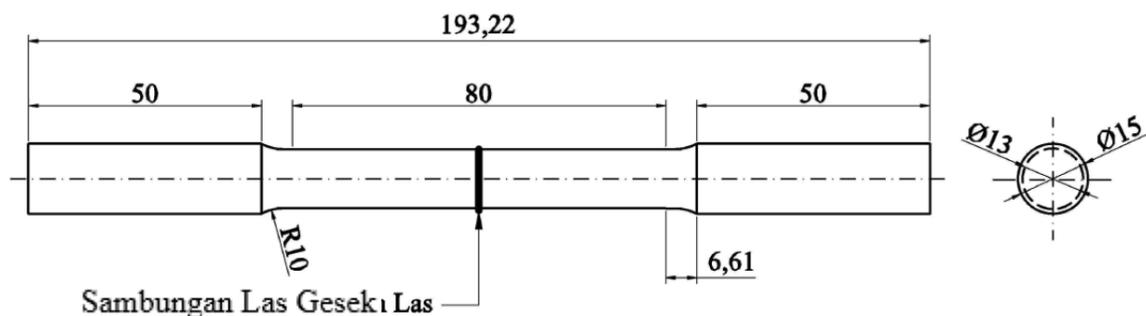
9. Mengulangi langkah nomor 1 hingga semua spesimen selesai dilakukan proses *aging*

10. Proses *aging* selesai

### 3.7.3 Pengujian Kekuatan Tarik

Pengujian kekuatan kekutan tarik dilakukan untuk mengetahui kekuatan tarik pesimen yang telah dilas gesek, berikut prosedur proses pengujian tarik:

1. Mempersiapkan spesimen uji tarik yang sebelumnya telah dibentuk. Seperti Gambar 3.15



Gambar 3.15 Spesimen uji tarik  
Sumber: AWS B4.0 (2007)

2. Mengukur kembali diameter sambungan las spesimen.
3. Memasang spesimen pada mesin uji tarik dengan menjepit spesimen pada kedua *chuck*, pastikan spesimen dalam posisi yang baik dan benar.
4. Menyalakan mesin uji tarik dan mulai memberikan beban tarik aksial secara terus-menerus hingga spesimen putus.
5. Mesin uji tarik dimatikan dan spesimen dilepas dari *chuck*.
6. Mencatat data yang tertera pada layar pengujian yang telah dihasilkan.
7. Mengulangi langkah nomor 1 hingga semua spesimen selesai diuji.
8. Pengujian tarik selesai.

### 3.7.4 Prosedur Pengujian Kekerasan Vickers

Metode pengujian kekerasan Vickers dilaksanakan dengan cara menekan benda uji atau spesimen dengan indenter intan yang berbentuk piramida dengan alas segi empat dan besar sudut dari permukaan-permukaan yang berhadapan  $136^\circ$ . Penekanan oleh indenter akan menghasilkan suatu jejak atau lekukan pada permukaan benda uji.

Berikut ini adalah prosedur pengujian kekerasan Vickers.

1. Meratakan spesimen las dengan mesin *milling*.
2. Mengamplas permukaan yang telah diratakan dengan menggunakan amplas dengan *grit number* 100, 320, 500, 800, 1000, 1500, dan 2000.

3. Memoles permukaan yang telah di amplas dengan menggunakan kain flanel dan disertai dengan autosol, serta memastikan spesimen telah halus layaknya cermin.
4. Meletakkan spesimen pada ragum yang terletak pada alat uji kekerasan.
5. Mengatur waktu indentasi selama 6 detik dan besar pembebanan 50 gf.
6. Menekan tombol “run” dan menunggu hingga indentasi selesai.
7. Mencatat nilai kekerasan yang tertera pada layar.

### 3.7.5 Pengujian Mikrostruktur

Pengujian mikrostruktur pada penelitian ini digunakan untuk mengetahui patahan dan retakan, dan keadaan lain pada sambungan, ukuran butir pada daerah pengaruh panas.

Prosedur pengujian foto mikro adalah sebagai berikut:

1. Pemotongan benda kerja sejajar sumbu benda kerja pada daerah pengaruh panas.
2. Spesimen dimounting dengan menggunakan polyester untuk memudahkan proses penghalusan dan pengamatan.
3. Penghalusan permukaan spesimen dengan menggunakan amplas dengan grit size number 320 , 500, 800, 1000, 1250, 1500. Pastikan spesimen benar-benar halus (permukaan rata).
4. Proses pemolesan dengan kain atau flanel disertai pemberian aerosol, amati apakah benar sudah halus (layaknya cermin) dan tidak ada goresan sama sekali.
5. Etsa dilakukan dengan larutan Hydrofloric Acid (HF) ditambahkan alkohol dengan perbandingan sesuai kesetimbangan kimia.
6. Spesimen dicuci dan dikeringkan.
7. Foto/gambar diambil menggunakan kamera.

### 3.7.6 Pengujian Makrostruktur

Pengujian makrostruktur bertujuan untuk melihat *flash* dan korelasi bentuk *flash* dengan proses pengelasan. Pengujian dengan foto makro juga untuk mengamati kontur, dan keretakan- keretakan makro yang terjadi, pada permukaan *flash* pada daerah sambungan.

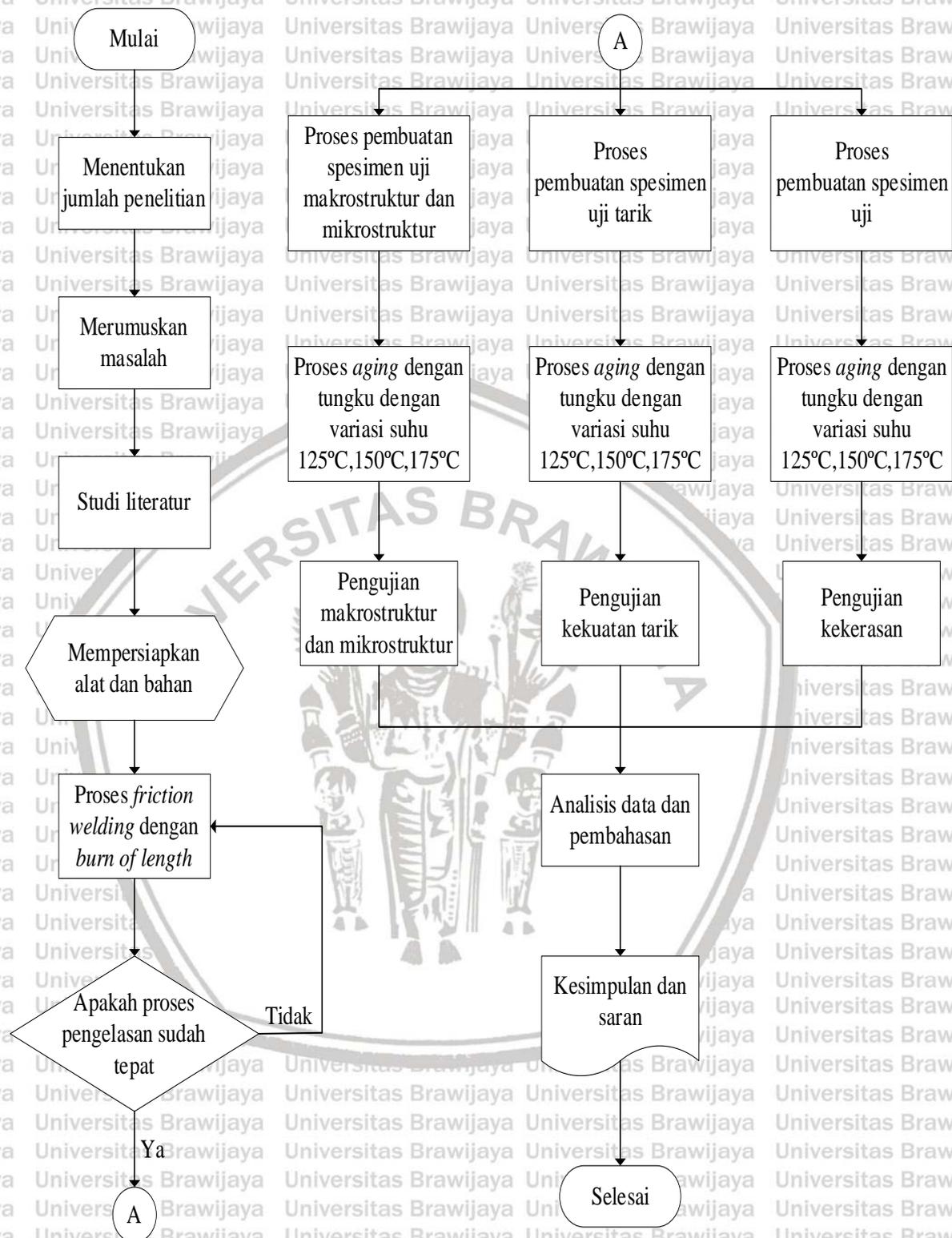
1. Pemotongan benda kerja sejajar sumbu benda kerja pada daerah pengaruh panas.
2. Spesimen dimounting dengan menggunakan polyester untuk memudahkan proses penghalusan dan pengamatan.
3. Penghalusan permukaan spesimen dengan menggunakan amplas dengan grit size number 320 , 500, 800, 1000, 1250, 1500. Pastikan spesimen benar-benar halus

(permukaan rata).

4. Proses pemolesan dengan kain atau flanel disertai pemberian aerosol, amati apakah benar sudah halus (layaknya cermin) dan tidak ada goresan sama sekali.
5. Etsa dilakukan dengan larutan Hydrofloric Acid (HF) ditambahkan alkohol dengan perbandingan sesuai kesetimbangan kimia.
6. Spesimen dicuci dan dikeringkan.
7. Foto/gambar diambil menggunakan kamera.



### 3.8 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.16 Diagram alir penelitian

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Data Hasil Pengujian Kekuatan Tarik

Pengambilan data nilai kekuatan tarik dilakukan setelah proses pengelasan gesek pada semua spesimen dan spesimen las dibentuk sesuai dengan standar spesimen uji tarik yang digunakan. Pengujian kekuatan tarik dilakukan di Laboratorium Struktur, Teknik Sipil, Universitas Negeri Malang. Setiap variasi dilakukan pengulangan sebanyak tiga kali dan didapatkan nilai rata-rata dari ketiga pengulangan tersebut pada setiap variasi. Variasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah suhu *aging* 125°C, 150°C, 175°C, dan tanpa *aging* serta penambahan *chamfer* satu sisi sebesar 30° dan tanpa *chamfer*. Hasil pengujian kekuatan tarik tertera pada tabel dibawah ini.

Tabel 4.1  
Data Hasil Pengujian Kekuatan Tarik *Chamfer* Satu Sisi

Geometri Baja	Suhu <i>Aging</i> (°C)	Pengulangan	Kekuatan Tarik (MPa)	Kekuatan Tarik Rata-Rata (Mpa)
<i>Chamfer</i> 30°	Tanpa <i>Aging</i>	1	153,3	155,91
		2	158,4	
		3	156,1	
	125	1	264,5	245,01
		2	225,5	
		3	245,1	
	150	1	197,1	191,33
		2	188,1	
		3	188,8	
175	1	175,3	166,28	
	2	170,6		
	3	152,9		

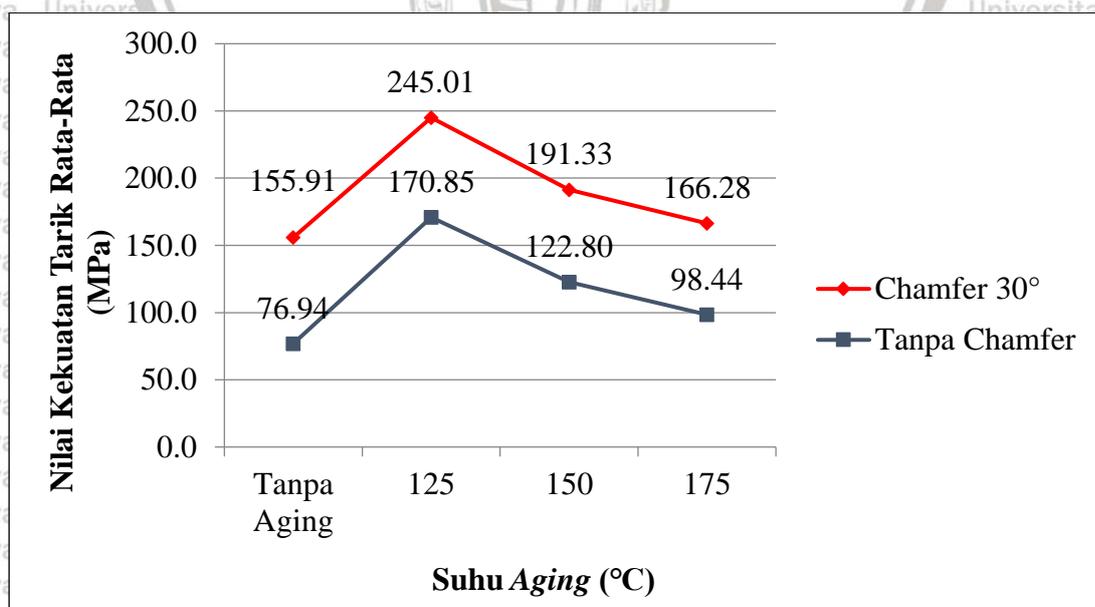
Tabel 4.2  
Data Hasil Pengujian Kekuatan Tarik Tanpa Chamfer

Geometri Baja	Suhu Aging (°C)	Pengulangan	Kekuatan Tarik (MPa)	Kekuatan Tarik Rata-Rata (Mpa)
Tanpa Chamfer	Tanpa Aging	1	78,8	76,94
		2	80,4	
		3	71,5	
	125	1	181	170,85
		2	169,3	
		3	162,2	
150	1	115,2	122,80	
	2	122,3		
	3	130,9		
175	1	102,1	98,44	
	2	98,3		
	3	94,9		

## 4.2 Pembahasan

### 4.2.1 Hasil Pengujian Kekuatan Tarik Sambungan Las Gesek

Dari hasil perhitungan variasi suhu *aging* 125°C, 150°C, 175°C, tanpa *aging* serta penambahan *chamfer* satu sisi sebesar 30° dan tanpa *chamfer*, diperoleh nilai kekuatan tarik pada sambungan las gesek. Analisis data tersebut dapat dilihat pada grafik hubungan antara variasi suhu *aging* dan penambahan *chamfer* pada satu sisi terhadap kekuatan tarik sambungan las gesek berikut ini.



Gambar 4.1 Grafik hubungan suhu *aging* terhadap kekuatan tarik

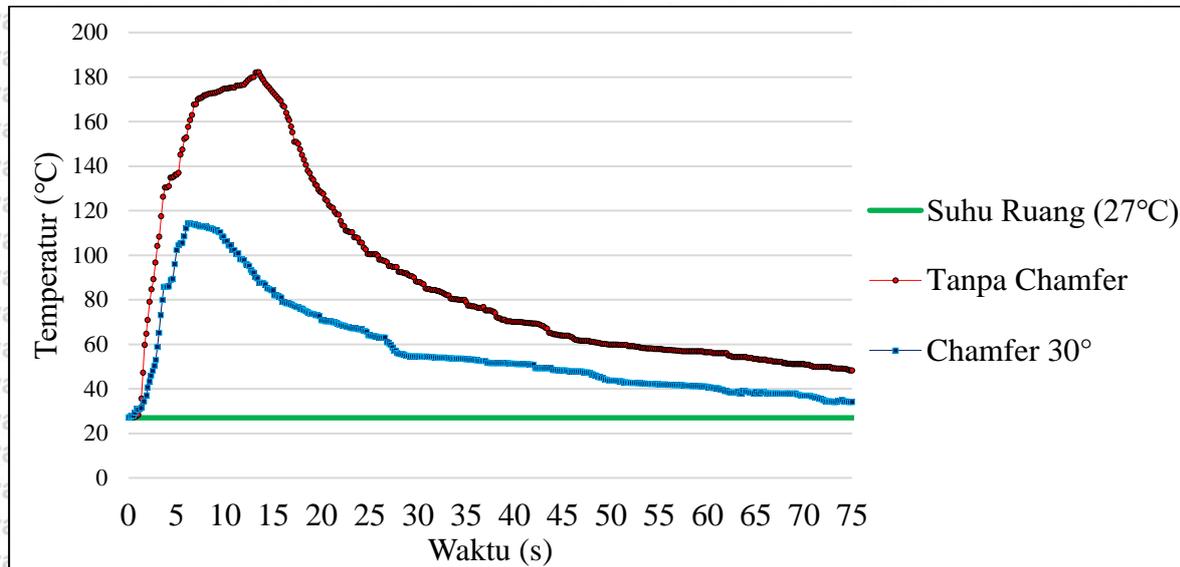
Pada gambar 4.1 grafik hubungan antara suhu *aging* terhadap kekuatan tarik sambungan las gesek dapat ditarik kesimpulan bahwa suhu *aging* dapat meningkatkan kekuatan tarik pada sambungan las gesek, dimana kekuatan tarik akan naik sampai titik maksimal kemudian turun dengan bertambahnya suhu *aging*. Dari grafik tersebut juga diketahui bahwa spesimen dengan penambahan *chamfer* pada satu sisi memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi dibandingkan spesimen tanpa *chamfer*. Pada grafik tersebut dapat terlihat bahwa nilai kekuatan tarik tertinggi terdapat pada spesimen dengan variasi suhu *aging* 125°C dimana untuk spesimen tanpa *chamfer* memiliki kekuatan tarik sebesar 170,85 MPa dan untuk spesimen dengan penambahan *chamfer* pada satu sisi yaitu sebesar 245,01 MPa. Sedangkan nilai kekuatan tarik terendah terdapat pada spesimen tanpa *aging* dimana untuk spesimen tanpa *chamfer* memiliki kekuatan tarik sebesar 76,94 MPa dan untuk spesimen dengan penambahan *chamfer* pada satu sisi yaitu sebesar 155,91 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa suhu *aging* dapat meningkatkan kekuatan tarik sambungan las gesek, dan juga penambahan *chamfer* pada satu sisi akan membuat kekuatan tarik pada sambungan las gesek akan meningkat.

Berdasarkan variasi suhu *aging* spesimen dengan variasi tanpa *aging* memiliki kekuatan tarik paling rendah yaitu 76,94 MPa lalu naik sampai pada kekuatan tarik tertinggi di variasi suhu *aging* 125°C sebesar 245,01 MPa lalu berangsur-angsur menurun perlahan di variasi suhu *aging* 150°C, dan suhu *aging* 175°C. Dapat dijelaskan bahwa *aging* pada suhu 125°C terjadi peningkatan kekuatan tarik, karena pada suhu ini memasuki fasa pengerasan tahap kedua, sehingga kekuatan tariknya maksimal. Sedangkan *aging* pada suhu 150°C dan 175°C memasuki fasa antara yaitu fasa dimana masih dapat memberikan sumbangan terhadap peningkatan kekerasan, akan tetapi peningkatannya sangat lambat.

Berdasarkan variasi geometri spesimen, kekuatan tarik spesimen dengan penambahan *chamfer* 30° memiliki peningkatan kekuatan tarik dari spesimen dengan geometri tanpa *chamfer*. Hal ini dikarenakan pada penambahan geometri *chamfer* 30° memiliki luas wilayah kontak gesek antar spesimen yang lebih kecil sehingga panas yang masuk (*heat input*) akan semakin kecil pula sehingga akan menghasilkan kekuatan tarik yang lebih tinggi daripada spesimen dengan geometri tanpa *chamfer*.

#### 4.2.2 Temperatur Pada Proses Pengelasan Gesek

Panas yang masuk (*heat input*) juga berpengaruh terhadap kekuatan tarik dari spesimen las gesek. Panas yang masuk (*heat input*) dipengaruhi oleh penampang bidang kontak (*interface*) dari spesimen las gesek. Gambar 4.2 dibawah ini menunjukkan suhu pengelasan spesimen *chamfer* 30° dan tanpa *chamfer*.



Gambar 4.2 Grafik suhu pengelasan spesimen *chamfer* 30° dan tanpa *chamfer*

Pada gambar 4.2 dapat dilihat bahwa pada spesimen tanpa *chamfer* memiliki suhu yang lebih tinggi daripada spesimen dengan penambahan *chamfer* pada satu sisi. Untuk suhu pengelasan maksimum tertinggi terdapat pada spesimen tanpa *chamfer* yaitu sebesar 182°C sedangkan untuk spesimen dengan penambahan *chamfer* 30° memiliki suhu pengelasan maksimum sebesar 115°C. Perbedaan tingginya suhu pengelasan terjadi dikarenakan pada spesimen dengan penambahan *chamfer* 30° membutuhkan waktu gesek sekitar 6-7 detik untuk mencapai nilai BOL 15 mm lebih singkat daripada spesimen tanpa penambahan *chamfer* yang membutuhkan waktu gesek sekitar 15-16 detik.

Hal ini dikarenakan penambahan *chamfer* 30° membuat gaya tekan awal terakumulasi di luas wilayah yang lebih kecil sehingga logam baja lebih mudah melakukan penetrasi kedalam logam aluminium sehingga parameter BOL (*Burnt of Length*) 15 mm dapat dicapai dalam waktu yang lebih singkat daripada spesimen tanpa pemberian *chamfer* untuk mencapai BOL 15 mm. Karena BOL 15 mm dicapai dalam waktu yang lebih singkat membuat suhu pengelasan maksimum tercapai lebih rendah dari suhu pengelasan maksimum spesimen tanpa penambahan *chamfer*.

Temperatur yang terlalu tinggi akan terbentuknya daerah ZPD (*partly deformed zone*) yang besar. Pada daerah ZPD panas yang terlalu tinggi merubah struktur butiran logam aluminium sehingga kekerasan aluminium akan berkurang yang nantinya menyebabkan kekuatan tariknya menurun.

#### 4.2.3 Analisis Foto Makrostruktur Pada Sambungan Las Gesek

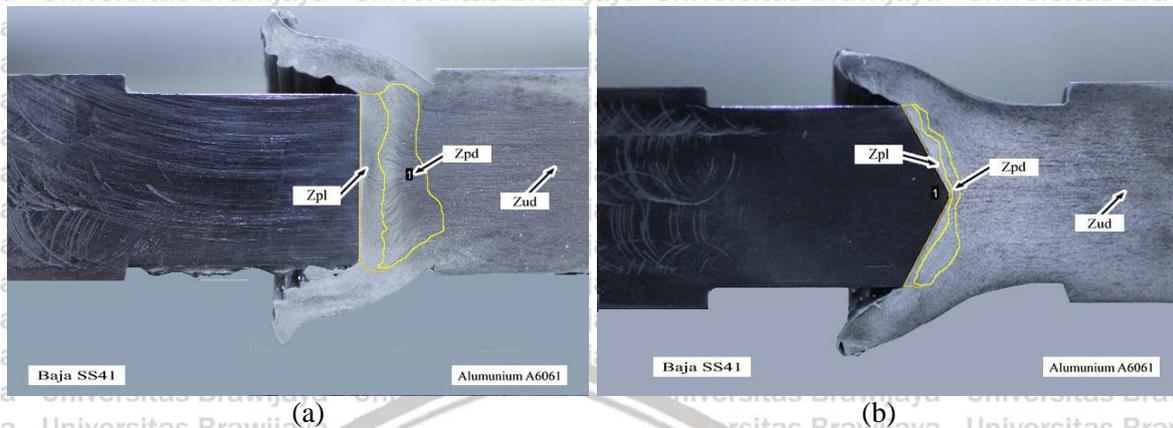
Foto makrostruktur patahan diambil pada tampak atas dan tampak samping dari spesimen las gesek. Pada gambar 4.3 merupakan foto makrostruktur patahan tampak atas dan samping dari spesimen dengan kekuatan tarik terendah yaitu spesimen las dengan variasi spesimen tanpa *chamfer* dan tanpa *aging* (a) dan spesimen dengan kekuatan tarik tertinggi yaitu spesimen las dengan *chamfer* 30° dan suhu *aging* 125°C (b).



Gambar 4.3 Foto makrostruktur patahan spesimen las gesek (a) spesimen las kekuatan tarik terendah dengan variasi tanpa *chamfer* dan tanpa *aging* (b) spesimen las dengan kekuatan tarik tertinggi dengan variasi *chamfer* 30° dan suhu *aging* 125°C.

Pada Gambar 4.3 (a) dapat dilihat bahwa pada spesimen dengan kekuatan terendah yaitu spesimen dengan variasi tanpa *chamfer* dan tanpa *aging*, patahan yang terjadi tepat pada bagian antarmuka (*interface*) dan memiliki bentuk patahan yang ulet, dikarenakan terjadi penyerapan energi disertai adanya deformasi plastis di sekitar patahan, sehingga permukaan patahan tampak kasar dan berserabut. Sementara itu, pada Gambar 4.3 (b) dapat dilihat bahwa spesimen dengan kekuatan tertinggi yaitu pada spesimen dengan variasi *chamfer* 30° dan suhu *aging* 125°C, patahan yang terjadi tepat pada bagian antarmuka (*interface*) dan memiliki bentuk patahan yang getas. Pada patahan getas tidak

terjadi deformasi plastis pada saat terjadi retakan sehingga penyebaran retakan tidak stabil dan sangat cepat. Selain itu, penyerapan energi yang terjadi lebih sedikit sehingga permukaan patahan relatif rata.



Gambar 4.4 Foto makrostruktur HAZ spesimen las gesek (a) foto makro kekuatan tarik terendah tanpa *chamfer* dan tanpa *aging* (b) foto makro kekuatan tarik tertinggi dengan *chamfer* 30° dan suhu *aging* 125°C

Pada Gambar 4.4 merupakan foto makrostruktur penampang melintang pada spesimen las gesek. Gambar 4.4 (a) menunjukkan foto makrostruktur dari spesimen las gesek dengan nilai kekuatan tarik terendah, yaitu spesimen dengan variasi tanpa *chamfer* dan tanpa *aging*. Sedangkan pada Gambar 4.4 (b) menunjukkan foto makrostruktur dari spesimen las gesek dengan nilai kekuatan tarik tertinggi, yaitu spesimen dengan variasi *chamfer* 30° dan suhu *aging* 125°C. Luas daerah HAZ yang ditunjukkan pada Gambar 4.4 (a) dan (b) diukur dengan menggunakan *software* berbasis komputer, yaitu ImageJ yang hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Perbandingan Luas Daerah HAZ Spesimen Kekuatan Tarik Tertinggi dan Terendah

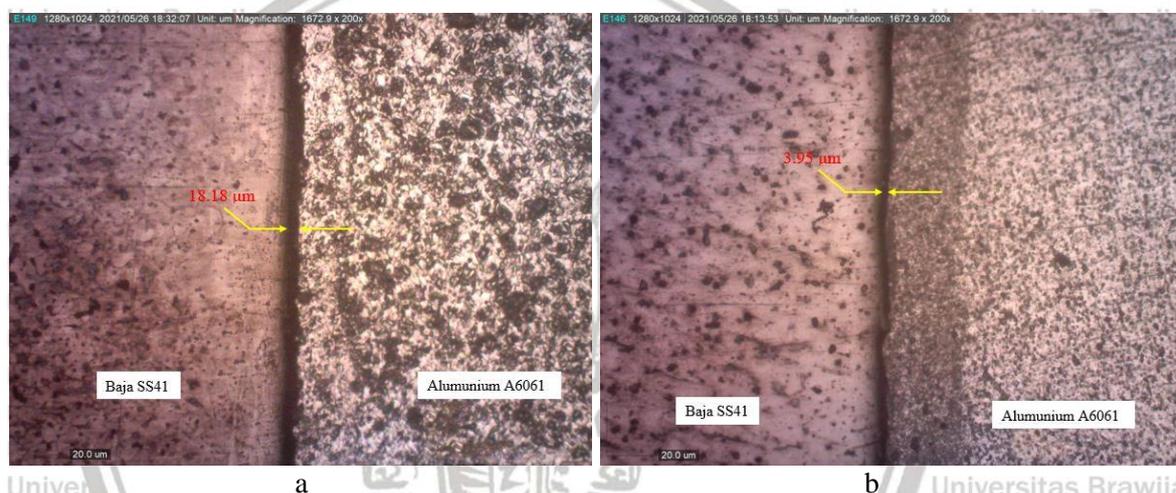
Daerah	Luas daerah (mm <sup>2</sup> )	
	Tanpa <i>Chamfer</i> dan Tanpa <i>Aging</i>	<i>Chamfer</i> 30° dan Suhu <i>Aging</i> 125°C
Zpl	45,54	13,709
Zpd	78,344	23,838

Pada Tabel 4.3 dapat dilihat bahwa pada spesimen dengan nilai kekuatan tarik terendah, yaitu pada spesimen dengan variasi tanpa *chamfer* dan tanpa *aging* memiliki luas daerah zpl sebesar 45,54 mm<sup>2</sup> dan luas daerah zpd sebesar 78,344 mm<sup>2</sup>. Sedangkan pada spesimen dengan nilai kekuatan tarik tertinggi, yaitu pada spesimen dengan *chamfer* 30° dan suhu *aging* 125°C memiliki luas daerah zpl sebesar 13,709 mm<sup>2</sup> dan luas daerah zpd sebesar 23,838 mm<sup>2</sup>. Luas daerah HAZ akan mempengaruhi nilai kekuatannya. Semakin luas daerah HAZ yang terbentuk, maka nilai kekuatan tarik akan menurun karena

daerah HAZ merupakan daerah yang terpengaruh oleh panas yang akan melunakkan logam pada saat proses pengelasan.

#### 4.2.4 Analisis Foto Mikrostruktur Pada Sambungan Las Gesek

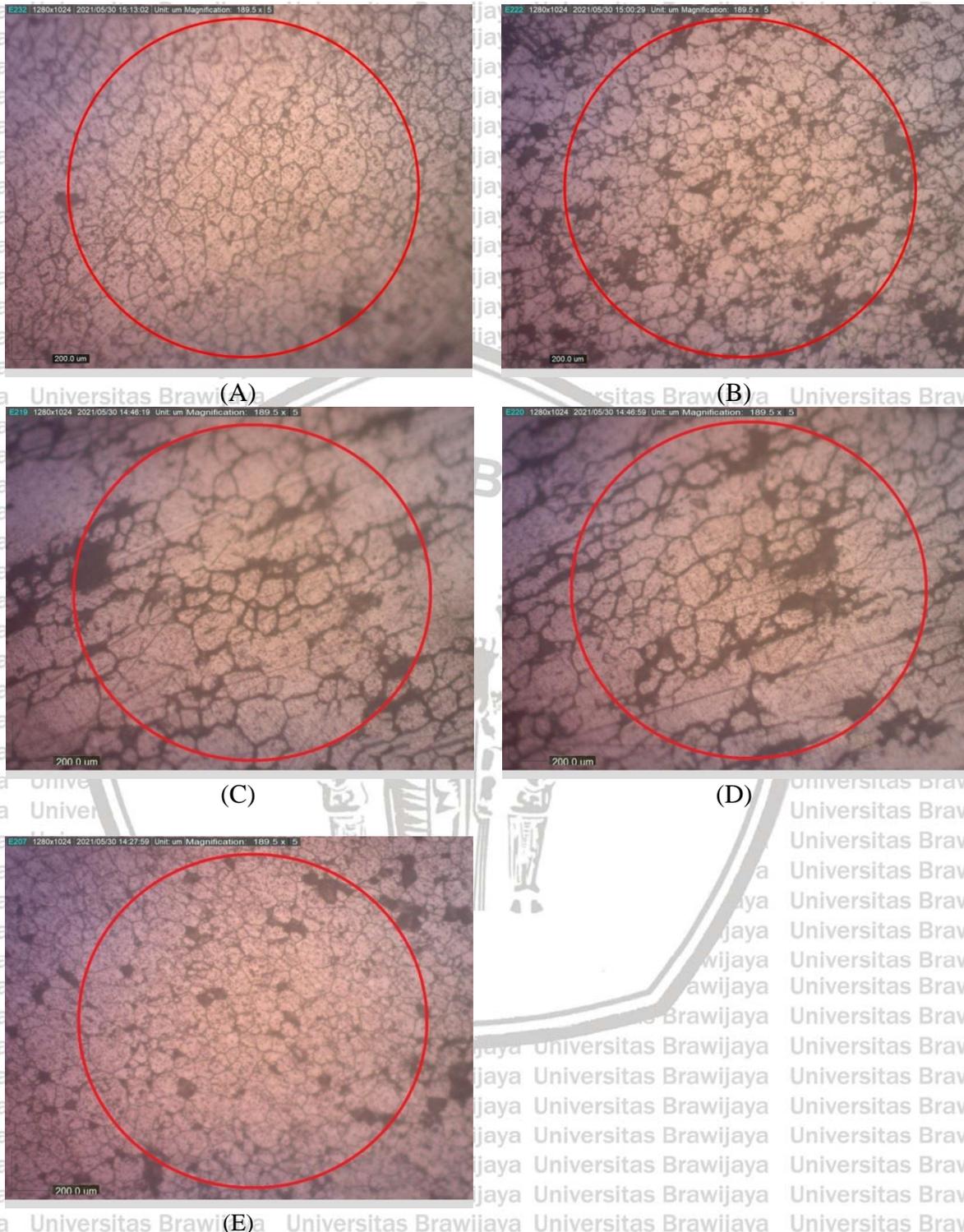
Pengambilan foto mikrostruktur pada daerah sambungan menggunakan perbesaran sebesar 189,5x. Hasil dari foto mikrostruktur pada daerah sambungan dapat dilihat pada gambar 4.5. Pada Gambar 4.5 (a) merupakan foto mikrostruktur pada spesimen las gesek dengan kekuatan tarik terendah yaitu spesimen las dengan variasi tanpa *aging* dan tanpa *chamfer* dan Gambar 4.5 (b) merupakan foto mikrostruktur pada spesimen las gesek dengan kekuatan tarik tertinggi yaitu spesimen las dengan variasi suhu *aging* 125°C dan *chamfer* 30°. Pada Gambar 4.5 adalah foto mikrostruktur yang diambil pada daerah batas sambungan.



Gambar 4.5 Foto mikrostruktur las gesek daerah batas sambungan dengan (a) spesimen las kekuatan tarik terendah tanpa *aging* dan tanpa *chamfer* (b) spesimen las kekuatan tarik tertinggi dengan suhu *aging* 125°C dan *chamfer* 30°

Pada Gambar 4.5 menunjukkan foto mikrostruktur pada daerah sambungan pada spesimen dengan kekuatan tarik terendah dan tertinggi. Tebal garis warna gelap yang memanjang pada batas sambungan, menunjukkan suatu lapisan getas yang terbentuk pada batas sambungan. Tebal garis berwarna gelap pada spesimen dengan kekuatan tarik terendah adalah 18,18 µm, sedangkan pada spesimen dengan kekuatan tarik tertinggi adalah 3,95 µm. Semakin tebal garis berwarna gelap yang memanjang pada batas sambungan, mengidentifikasi terbentuknya suatu lapisan *intermetallic* yang bersifat getas pada batas sambungannya. Lapisan *intermetallic* yang bersifat getas ini, menurunkan kekuatan tarik sambungan. Formasi lapisan *intermetallic* yang semakin tebal, menyebabkan kegetasan sambungan meningkat. Formasi *intermetallic* yang bersifat getas

ini mulai terbentuk pada temperatur di bawah temperatur leleh aluminium dengan terdifusinya atom-atom aluminium pada baja.



**Gambar 4.6** Foto mikrostruktur patahan spesimen (a) tanpa *aging* tanpa penambahan *chamfer*, (b) spesimen tanpa *aging* dengan penambahan *chamfer* 30°, (c) spesimen perlakuan *aging* 125°C tanpa penambahan *chamfer* 30°, (d) spesimen perlakuan *aging* 125°C dengan penambahan *chamfer* 30°, (e) *base metal*.

Pengambilan foto mikrostruktur dilakukan di Laboratorium Pengujian Bahan Politeknik Negeri Malang menggunakan perbesaran sebesar 189,5x5 pada mikroskop Olympus BH-2. Pada daerah *heat affected zone* (HAZ) pengambilan foto dilakukan pada jarak 0,5-1 mm dari *interface*. Perhitungan diameter butir dilakukan dengan menggunakan metode planimetri (*jeffries method*). Metode ini bertujuan menghitung besar butir per satuan luas pada lingkaran berdiameter 80 mm (luas lingkaran 5000 mm<sup>2</sup>). Metode planimetri dapat digunakan ketika di dalam lingkaran minimal terdapat 50 butir. Contoh perhitungan pada spesimen tanpa *aging* dan tanpa penambahan *chamfer* adalah sebagai berikut.

$$f = M^2/A$$

$$f = 947.5^2/5000$$

$$f = 179,5$$

Dimana:

$f$  = Bilangan Jeffries

$M$  = Magnification

$A$  = Luas area lingkaran (5000 mm<sup>2</sup>)

$$Na = f(N1 + N2/2)$$

$$Na = 179.5 (214 + 62/2)$$

$$Na = 179.5 (214 + 31)$$

$$Na = 179.5 (245)$$

$$Na = 43.990,06 \text{ pcs/mm}^2$$

$$G = (3,321928 \log_{10} Na) - 2,954$$

$$G = (3,321928 \log_{10} 43.990) - 2,954$$

$$G = 12.47089$$

Dimana:

$Na$  = Banyak Butir per Luas (pcs/mm<sup>2</sup>)

$f$  = Bilangan Jeffries

$N1$  = Banyaknya Butir didalam Lingkaran

$N2$  = Banyaknya Butir berpotongan dengan Lingkaran

$G = \text{Grain Size Number ASTM-112}$

Nilai  $f$  didapatkan dengan melakukan pembagian kuadrat perbesaran dengan bilangan 5000 mm<sup>2</sup>. Setelah melakukan perhitungan di atas, kemudian dilakukan interpolasi dengan nilai yang terdapat pada tabel standar ASTM E 112 (Lampiran 13). Dari hasil interpolasi tersebut, didapatkan nilai sebesar 5,35  $\mu\text{m}$

Tabel 4.4  
Data Hasil Perhitungan Diameter Butir Dengan Metode Planimetri

Nama Spesimen	Diameter Butir
Base Metal Aluminium	4,75 $\mu\text{m}$
Kekuatan Tarik Terendah Spesimen Tanpa <i>Aging</i> Tanpa penambahan <i>Chamfer</i>	5,53 $\mu\text{m}$
Kekuatan Tarik Terendah Spesimen Tanpa <i>Aging</i> dengan <i>Chamfer 30°</i>	5,40 $\mu\text{m}$
Kekuatan Tarik Tertinggi Spesimen <i>Aging 125°C</i> Tanpa penambahan <i>Chamfer</i>	8,69 $\mu\text{m}$
Kekuatan Tarik Tertinggi Spesimen Perlakuan <i>Aging 125°C</i> dengan <i>Chamfer 30°</i>	8,01 $\mu\text{m}$

Tabel 4.4 menunjukkan ukuran butir rata-rata pada spesimen dengan variasi kekuatan tarik terendah pada spesimen tanpa perlakuan tanpa penambahan *chamfer* memiliki diameter butir pada daerah las 5,53  $\mu\text{m}$  dan untuk variasi kekuatan tarik tertinggi pada spesimen tanpa perlakuan *aging* dengan *chamfer 30°* memiliki diameter butir sebesar 8,01  $\mu\text{m}$ . Sedangkan untuk aluminium base metal memiliki ukuran diameter butir rata-rata 4,75  $\mu\text{m}$

Spesimen tanpa perlakuan dengan *chamfer* terlihat memiliki ukuran butir yang lebih besar daripada spesimen *base metal* hal ini dikarenakan saat pengelasan *heat input* saat pengelasan mempengaruhi pertumbuhan besar butir aluminium sehingga kekuatan tariknya akan menurun jika dibandingkan *base metal*

Pertambahan ukuran butir terlihat juga pada spesimen tanpa perlakuan tanpa penambahan *chamfer* memiliki ukuran yang lebih besar dikarenakan spesimen tanpa penambahan *chamfer* mengalami *heat input* yang lebih besar daripada *heat input* spesimen *chamfer* sehingga butirannya mengalami pertumbuhan besar butir yang lebih signifikan sehingga akan menurunkan kekerasannya yang membuat aluminium lebih mudah terdeformasi yang nanti akan menghasilkan kekuatan tarik yang lebih rendah dari spesimen dengan butiran yang lebih kecil

Hal tersebut sesuai dengan persamaan *hall-petch* dimana dengan bertambah besarnya diameter butir maka semakin besar pembagi dari *koefisien* penguatan sehingga semakin kecil nilai tegangan *yield* yang dihasilkan

Untuk spesimen dengan perlakuan *aging* 125°C tanpa penambahan *chamfer* memiliki diameter rata rata butir sebesar 8,69  $\mu\text{m}$  sedangkan untuk spesimen dengan perlakuan *aging* 125°C dengan penambahan *chamfer* 30° memiliki ukuran butir sebesar 8,01  $\mu\text{m}$  dimana ukuran butir meningkat dikarenakan panas yang masuk saat proses *aging* menyebabkan pertumbuhan ukuran butir

#### 4.2.5 Hasil Pengujian Kekerasan Pada Sambungan Las Gesek

Hasil pengujian kekerasan pada spesimen las gesek yang memiliki kekuatan tarik tertinggi dan terendah ditunjukkan pada Tabel 4.4. Pengujian kekerasan ini menggunakan metode Vickers. Pengambilan sampel kekerasan hanya dilakukan pada spesimen dengan kekuatan tarik tertinggi dan kekuatan tarik terendah dengan menggunakan pembebanan 50 gf dengan waktu indentasi 6 detik.

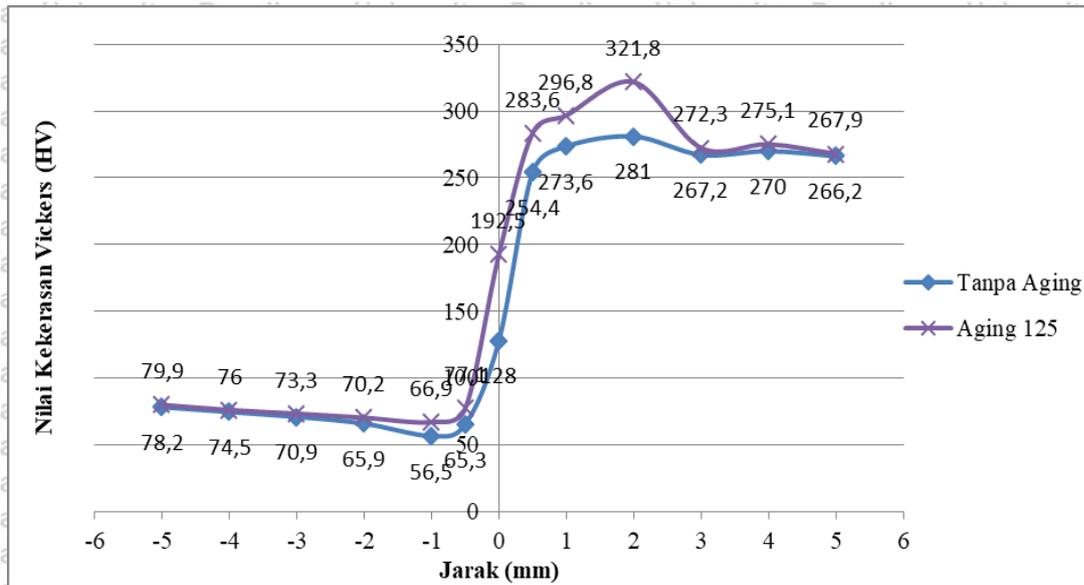
Tabel 4.5

Nilai Kekerasan Pada Spesimen Dengan Kekuatan Tarik Tertinggi dan Terendah

Tanpa <i>Aging</i> dan Tanpa <i>Chamfer</i>		Suhu <i>Aging</i> 125°C dan <i>Chamfer</i> 30°	
Jarak dari <i>interface</i> (mm)	Nilai kekerasan (HV)	Jarak dari <i>interface</i> (mm)	Nilai kekerasan (HV)
5	266,2	5	267,9
4	270	4	275,1
3	267,2	3	272,3
2	281	2	321,8
1	273	1	296,8
0,5	254,4	0,5	283,6
0	128	0	192,5
-0,5	65,3	-0,5	77,1
-1	56,5	-1	66,9
-2	65,9	-2	70,2
-3	70,9	-3	73,3
-4	74,5	-4	76
-5	78,2	-5	79,9

Pada Tabel 4.4 dapat dilihat bahwa nilai kekerasan pada hasil lasan memiliki nilai yang berbeda pada tiap daerah lasan. Pada pengujian kekerasan diambil 13 titik, dimana 5 titik terletak pada spesimen yang berputar (Aluminium A6061), 1 titik pada *interface*, dan 5 titik lainnya pada spesimen yang diam (Baja SS41). Pengujian kekerasan pada daerah Baja ditunjukkan dengan tanda negatif, sedangkan pengujian kekerasan pada daerah

aluminium ditunjukkan tanpa tanda negatif, dan pengujian kekerasan pada daerah *interface* ditunjukkan dengan angka 0.



Gambar 4.7 Grafik distribusi kekerasan pada spesimen dengan kekuatan tarik tertinggi dan kekuatan tarik terendah

Pada Gambar 4.7 menunjukkan jarak yang terletak di sebelah kiri pada Gambar 4.7, yaitu -5, -4, -3, -2, -1, dan -0.5 merupakan bagian yang berputar sedangkan jarak yang terletak di sebelah kanan pada Gambar 4.7, yaitu 0.5, 1, 2, 3, 4, dan 5 merupakan bagian yang diam. Pada Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa pada spesimen yang memiliki kekuatan tarik tertinggi, yaitu spesimen dengan variasi suhu *aging* dan *chamfer* 30° nilai kekerasannya lebih tinggi pada setiap bagian daerah yang diuji dibandingkan dengan nilai kekerasan pada spesimen yang memiliki kekuatan tarik terendah, yaitu spesimen dengan variasi tanpa *aging* dan tanpa *chamfer*. Hal ini disebabkan karena pada spesimen dengan variasi suhu *aging* 125°C sudah memasuki pengerasan tahap kedua, dimana tingkat kekerasan yang didapatkan pada spesimen ini adalah kekerasan yang tertinggi, dan juga pada spesimen *chamfer* 30° pada satu sisi memiliki bidang kontak yang kecil, sehingga panas yang masuk (*heat input*) semakin kecil, daerah HAZ semakin kecil yang menyebabkan ukuran butir yang terbentuk lebih kecil daripada yang memiliki HAZ lebih besar sehingga nilai kekerasan yang dihasilkan meningkat dan menyebabkan nilai kekuatan tarik meningkat. Sedangkan pada spesimen dengan variasi tanpa *chamfer* bidang kontak yang bergesekan lebih besar dari spesimen dengan *chamfer* sehingga panas yang masuk (*heat input*) semakin kecil, daerah HAZ semakin kecil yang menyebabkan ukuran butir yang terbentuk semakin besar sehingga nilai kekerasan yang dihasilkan menurun dan menyebabkan nilai kekuatan tarik menurun.

## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian pengaruh suhu *aging* dan penambahan *chamfer* 30° pada satu sisi terhadap kekuatan tarik sambungan las gesek aluminium A6061 dan baja SS41 adalah sebagai berikut.

1. Penambahan *chamfer* pada satu sisi dalam proses pengelasan gesek pada aluminium A6061 dan baja SS41 akan meningkatkan kekuatan tarik dari sambungan las gesek dan juga suhu *aging* akan meningkatkan nilai kekuatan tarik pada sambungan las gesek aluminium A6061 dan baja SS41 hingga titik maksimum yaitu pada suhu 125°C, kemudian akan turun secara perlahan

#### 5.2 Saran

1. Perlu dilakukan pengecekan ulang terhadap mesin las dan pemasangan spesimen pada mesin las sebelum melakukan pengelasan
2. Diperlukan mesin las gesek dengan hidrolik otomatis
3. Melakukan *pre-heat* terhadap material sebelum pengelasan agar sifat mekanik dari materialnya tetap sama



Halaman ini sengaja dikosongkan

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdulla, F.A.M., Irawan, Y.S., Darmadi, D.B. 2018. *Tensile Strength and Macro-Microstructures of A6061 CDFW Weld Joint Influenced by Pressure and Holding Time in the Upset Stage*. Jurnal Rekayasa Mesin Vol. 9, No.2, p. 149-154
- American Society for Testing and Materials. 2004. *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. ASTM Designation E 112-96. ASTM International. West Conshohocken
- American Welding Society B4.0;2007. *Standard Methods for Mechanical Testing of Welds*
- ASM Handbook 02. 1992. *Properties and Selection: Nonferrous Alloy and Special-Purpose Material*. Vol 2. ASM International
- ASM Handbook Volume 1. 1998: Casting ASM International : Metal Park. Ohio
- Avner, Sydney H. 1974. *Introduction to Physical Metallurgy*. New York: McGraw-Hill
- Bhate, S.S., Bhatwadekar S.G. *A Literature of Research on Rotary Friction Welding*. *International Journal of Innovative Technology and Research* Vol. 4, 2601-2604
- Callister, William D. 2014. *Material Science and Engineering*, John Wiley and Sons Inc, New York.
- Cary, Howard B. 1989. *Modern Welding Technology*. New Jersey: Prentice Hall
- Dieter, George E. 1988. *Mechanical Metallurgy*. Singapore: McGraw-Hill
- Ding, Y., You, G., Wen, H., Li, P., Tong, X., Zhou, Y. 2019. *Microstructure and Mechanical Properties of Inertia Friction Welded Joints Between Alloy Steel 42CrMo and Cast Ni-based Superalloy K418*. *Journal of Alloys and Compounds*, p. 176-184. Elsevier
- Djafrie, Sriati. 1995. *Mechanical Metallurgy*. Jakarta: Erlangga
- Esmaili, A., Besharati Givi, M.K., Zareie Rajani, H.R. 2012. *Experimental investigation of material flow and welding defects in friction stir welding of aluminum to brass*. *Materials and Manufacturing Processes*, vol: 27 (12): 1402–1408
- Groover, Mikell P. 2010. *Fundamentals of Modern Manufacturing*. USA: John Wiley & Sons
- Jamasri & Sulardjaka. 2019. *Pengelasan Paduan Aluminium*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press
- Irawan, Y.S., Wasila, I.B., Oerbandono, Tjuk., 2020, *Torsion Strength of Dissimilar Metals Weld Joint of A6061-SS41 Round Bar with Various One-Sided Chamfer Angle and Burn-Off Length*. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research* Vol.8, 4247-4253, August 2020
- Irawan, Y. S., Wirohardjo, M., Ma'arif, M.S., 2012, *Tensile Strength of Weld Joint Produced by Spinning Friction Welding of Round Aluminum A6061 with Various Chamfer Angles*. *Advanced Materials Research* Vol. 576, 761-765. Trans Tech Publications, Switzerland

Jedrajiak, P., Shercliff, H.R., McAndrew, A.R., Colegrove, P.A. 2018. *Thermal Modelling of Linear Friction Welding*. Journal of Materials and Design, p. 362-369. Elsevier

Kementrian Perindustrian Republik Indonesia. 2018. *Kemenperin Kejar Produksi Aluminium Nasional 2 Juta Ton Tahun 2025*, diakses di: <https://www.kemenperin.go.id/artikel/18851/Kemenperin-Kejar-Produksi-Aluminium-Nasional-2-Juta-Ton-Tahun-2025>. (diakses 17 September 2020)

Kalpakkian, Serope. 2014. *Manufacturing Engineering and Technology*. Singapore: Pearson Education Inc

Lumley, Roger. 2011. *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*. United Kingdom: Woodhead Publishing Limited

Lin, C.B., Mu, C. K., Wu, W. W. dan Hung, C.H. 1999. *The Effect of Joint Design and Volume Fraction on Friction Welding Properties of A360/SiC Composites*. Welding Research Supplement. Department of Mechanical Engineering, Tamkang University, Taiwan. *Welding Journal Vol. 78 No. 3* p. 100-109

Mishra, R. S. & Ma, Z. Y. 2005. *Friction stir welding and processing*. *Materials Science and Engineering:R Reports*, 50(1), 1-78

Nofri, Media & Taryana, Acang. 2017. *Analisis Sifat Mekanik Baja SKD 61 Dengan Baja ST 41 Dilakukan Hardening Dengan Variasi Temperatur*. *Bina Teknika Vol.13, No.2*, 189-199

Rn, Shubhavardhan, Surendran S, 2012. *Friction Welding To Join Dissimilar Metals*, Department Of Ocean Engineering and IIT Madras, Chennai 600036, India

Rombaut, Pieter. 2011. *Joining of Disimilar Materials throught Rotary Friction Welding*. Thesis. Universiteit Gen.

Sahin, Mumin dkk. 2010. "Modelling of Friction Welding". Faculty of Engineering and Arch. Mechanical Engineering Trakya University

Sari, Nasm Herlina. 2018. *Material Teknik*. Yogyakarta: Deepublish

Schonmetz, Alois. 1990. *Pengetahuan Bahan Dalam Pengerjaan Logam*. Bandung: Angkasa

Setyawan, P.E., Irawan, Y.S., Suprpto, W. 2014. *Kekuatan Tarik dan Porositas Hasil Sambungan Las Gesek Aluminium 6061 dengan Berbagai Suhu Aging*. *Jurnal Rekayasa Mesin Vol.5, No.2* p. 141-148

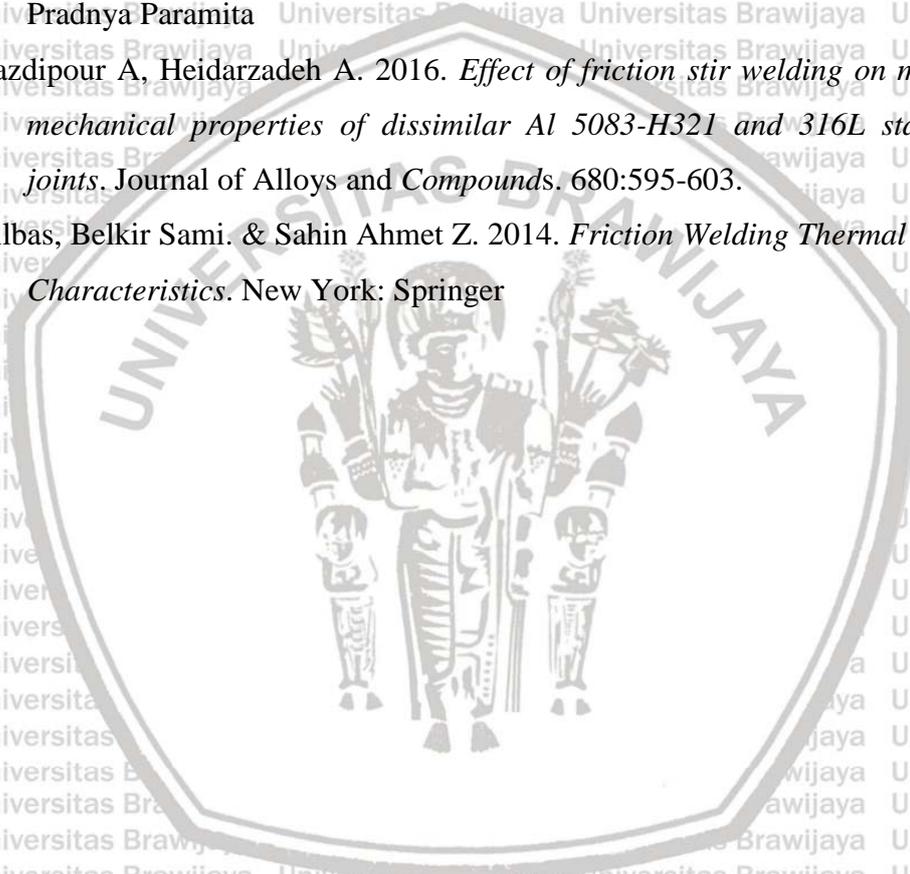
Smith, R, 1995, *Chemical Process Design*, McGraw Hill International Book Company, Singapore

Suherman, 1987. *Ilmu Logam I*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Surdia, T. & Saito, S, 1999. *Pengetahuan Bahan Teknik*. Jakarta: PT Pradnya Paramita

Totten, George E. & MacKenzie, D. Scott. 2003. *Handbook of aluminum*, Vol. 1. New York: Marcel Dekker

- Uzkut, M., Unlu, B.S., & Akdag, M. 2011. *Determination of Optimum Welding Parameters in Connecting High Alloyed X53CrMnNiN219 and X45CrSi93 by Friction Welding*. Bulletin of Materials Sciences, Vol. 34, No. 4, pp. 815-823
- Uzkut, Mehmet, et. al. 2010. *Friction Welding And Its Applications In Today's World*. Sarajevo: International Symposium on Sustainable Development, issd 2010 science book, 710-724
- Vander Voort, G.F. 1999. *Metallography: Principles and Practice*. New York: ASM International
- Wiryosumarto, H. & Okumura, T. 2000. *Teknologi Pengelasan Logam*. Jakarta: PT Pradnya Paramita
- Yazdipour A, Heidarzadeh A. 2016. *Effect of friction stir welding on microstructure and mechanical properties of dissimilar Al 5083-H321 and 316L stainless steel alloy joints*. Journal of Alloys and Compounds. 680:595-603.
- Yilbas, Belkir Sami. & Sahin Ahmet Z. 2014. *Friction Welding Thermal and Metallurgical Characteristics*. New York: Springer





Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran 1 Surat Keterangan Telah Melakukan Pengujian Kekuatan Tarik



The Learning University

LABORATORIUM STRUKTUR
JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS NEGERI MALANG
Gedung D9 Lt 1 Kampus UM Jl. Semarang No. 5 Malang Telp/Fax: (0341) 587 082

SURAT KETERANGAN

No. 03C.05.2021

Yang bertandatangan di bawah ini Laboran / Teknisi Laboratorium Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Negeri Malang, menerangkan bahwa,

Nama : Kevin Alexander
NIM : 175060200111006
Instansi : Jurusan Teknik Mesin - Fakultas Teknik - Universitas Brawijaya

Telah melakukan pengujian kuat tarik sambungan las gesek terhadap material Alumunium A6061
dengan baja SS41 sebanyak 24 benda uji pada tanggal 27 April 2021 s/d 3 Mei 2021 di
Laboratorium Struktur - TeknikSipil - FT - UM.

Demikian keterangan ini dibuat untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Malang, 3 Mei 2021
Koordinator Uji
Laboratorium Struktur - FT - UM



Lusti Mustikasari, Amd
NITK. 19900511 20160548

Lampiran 2 Sertifikat Kalibrasi Mesin Uji Tarik



**PT. GLOBAL QUALITY INDONESIA**  
 CALIBRATION OF INDUSTRIAL INSTRUMENT AND MEDICAL INSTRUMENT TESTING, TRAINING, QUALITY CONSULTANT.  
 PROFICIENCY TESTING, INSPECTION, CONFORMITY TESTING, CERTIFICATE PERSONAL, MAINTENANCE & REPAIR



**KAN**  
 Komite Akreditasi Nasional  
**LK-057-IDN**

### CALIBRATION CERTIFICATE

**Certificate Number** : 06205/GQI-Ser 04/21  
**Page** : 1 of 2

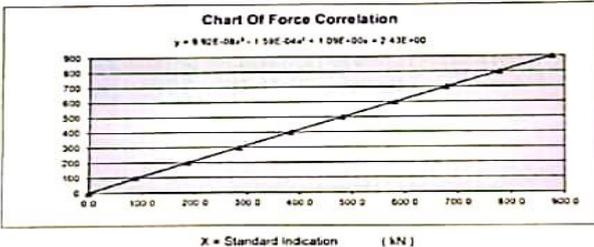
**Order Number** : 031 0421 121  
**Received Date** : 06 April 2021  
**Equipment Name** : Universal Testing Machine  
**Manufacturer** : Sinon Shinjin  
**Model/Type** : WEW-1000  
**Serial Number** : 068  
**Capacity/Graduation** : 1000 kN / 0.1 kN  
**Technician ID** : HF  
**Typewriter ID** : MS

**Owner** : Laboratorium Struktur, Universitas Negeri Malang  
**Address** : Jl. Semarang No 5, Sumbersoni, Kec. Lowok Waru, Kota Malang  
**Calibration Location** : Lab Struktur  
**Calibration Date** : 06 April 2021  
**Calibration Method** : IK-G-01 ref JIS B 7721 : 2009  
**Environmental Condition** : T before = 27.5 °C RH before = 61 %  
 T after = 27.5 °C RH before = 60 %

Calibration Report

Instrument Indication (kN)	Standard Indication (kN)		Correction (kN)	Error of Force (%)
	Before Setting	After Setting		
0	0.00	-	0.00	0.00
100	86.90	-	-13.10	13.10
200	185.93	-	-14.07	7.03
300	284.27	-	-15.73	5.24
400	382.83	-	-17.17	4.29
500	481.43	-	-18.57	3.71
600	580.37	-	-19.63	3.27
700	678.57	-	-21.43	3.06
800	778.20	-	-21.80	2.73
900	876.53	-	-23.47	2.61

Uncertainty  $U_{95\%} = \pm 0.38 \%$



**Chart Of Force Correlation**  
 $y = 0.92E-08x^2 - 1.59E-04x + 1.09E+00 + 2.43E+00$

The Uncertainty is taken at a Confidence Level 95 % and Coverage Factor (k) = 2

<b>Standard used</b>			
<b>Name</b>	Merk/Type	Serial Number	Traceable to SI through
Load Cell	MATEST / C140-03	C140-03/AH/G003	LK-013-IDN
Gauge Block	Mitutoyo/Grade 0	31121	LK-001-IDN



**GLOBAL QUALITY INDONESIA**  
 Dir. Ruzi Hamid  
 Director

FR.15.01



06205042157  
 Customer Certificate Non-Valid Entry

Komplek Kopo Mas Regency  
 Blok N No 7C Bandung 40227

022-5436533 - 5436775  
 022-54425388

calibration@globalquality.co.id  
 customercare@globalquality.co.id

www.globalquality.co.id

### Lampiran 3 Surat Keterangan Telah Melakukan Pembuatan Spesimen Uji Tarik



KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI  
**POLITEKNIK NEGERI MALANG**  
**JURUSAN TEKNIK MESIN**  
 Terakreditasi: B, sesuai Kpts. BAN No..007/BAN-PT/Ak-XII/Dpl-III/V/2012  
 Jl. Soekarno Hatta No 9 Malang 65145 Tlp / Fax. (0341) 550180  
<http://www.polinema.ac.id>



#### SURAT KETERANGAN NOMOR : 52 /PL2.TM/KM/2021

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Rafik Djoenaidi,ST  
 N I P : 19780125 200112 1 002  
 Jabatan : Pranata Laboratorium Pendidikan  
 Politeknik Negeri Malang

Menerangkan dengan sesungguhnya bahwa mahasiswa :

Nama : Kevin Alexander  
 Nim : 175060200111006  
 Jurusan : Teknik Mesin Universitas Brawijaya  
 Fakultas : Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

Benar - benar telah melaksanakan Penelitian / Pengambilan Data di Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Malang pada tanggal 14 - 28 April 2021, guna keperluan penyusunan skripsi.

Demikian surat keterangan ini dibuat untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Malang, 28 April 2021  
 Pranata Laboratorium Pendidikan  
 Politeknik Negeri Malang  
**PENGUJIAN & PERLAKUAN**  
**BAHAN**  
 LAB. BAHAN TEKNIK MESIN  
 POLITEKNIK NEGERI MALANG  
 Rafik Djoenaidi,ST  
 19780125 200112 1 002

FRM.RME.02.01.00

## Lampiran 4 Komposisi Aluminium A6061



PT Sutindo Surya Sejahtera

Metod : Al-SS-6063

12/24/2020 12:09:31 PM

Comment : Al-Base SS-6063

Element

Sample No : Sample ID :

OV. 14034 CETAK 1 BILLET 6061

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
	%	%	%	%	%	%	%	%
Ø (3)	0.511	0.264	0.211	0.0215	0.906	0.0622	0.043	0.0474

	Na	Ca	Ni	Pb	P	Sn	Sb	Sr
	%	%	%	%	%	%	%	%
Ø (3)	0.0018	0.00067	0.005	0.0043	<0.00050	0.0005	0.0004	0.00022

	Be	Zr	Bi	Cd	Al
	%	%	%	%	%
Ø (3)	0.00006	0.0043	<0.00030	0.00017	97.9



## Lampiran 5 Komposisi Baja SS41



### PT. GROWTH SUMATRA INDUSTRY

Head Office / Factory : Jln. K.L. Yos. Sudarso Km 10 - Medan.

Phone : (061) 685 1989 ( 7 lines ) Facs. : (061) 685 1474, 685 5779.



### MILL TEST CERTIFICATE

Customer : PT.BENTENG ANUGERAH SEJAHTERA BK 8778 GY      Commodity : Cold Drawn Steel Round Bars      Certification No : 138/AS/I/2021/GS  
 Specification : SGD 400 - D = SS 41      No. PO : -  
 Contract No : -      Date Of Issue : 18/01/2021

DIMENSION		HEAT NUMBER	QUANTITY	CHEMICAL COMPOSITION (%)					TENSILE STRENGTH (N/mm <sup>2</sup> )	HARDNESS	
DIAMETER (in,mm)	LENGTH (mtr)			C	Si	Mn	P	S		(HRB)	(HB)
25 MM	6 M	2A1035	156	0.24	0.16	0.48	0.04	0.04	649	0	180
20	6	2B409	365	0.20	0.20	0.64	0.03	0.03	640	75	0
		5B707		0.19	0.23	0.64	0.04	0.04	644	83	0
7/8 IN	6 M	3B435	490	0.22	0.20	0.63	0.02	0.02	630	77	0
		2A1035		0.24	0.16	0.48	0.04	0.04	650	85	0
25 MM	6 M	5B1115	208	0.22	0.22	0.62	0.02	0.01	632	0	173

Approved By:  
Kabag. Quality Control



Prepared By:



## Lampiran 6 Foto Spesimen Sebelum Pengelasan



Lampiran 7 Foto Spesimen Setelah Pengelasan



Lampiran 8 Foto Spesimen Uji Tarik

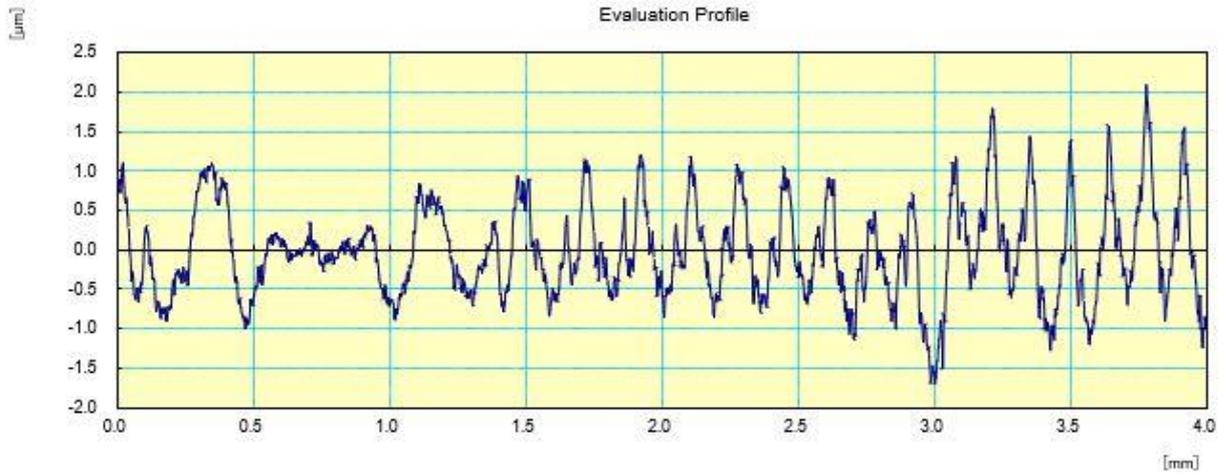


Lampiran 9 Hasil Pengujian Kekasaran Permukaan Aluminium A6061



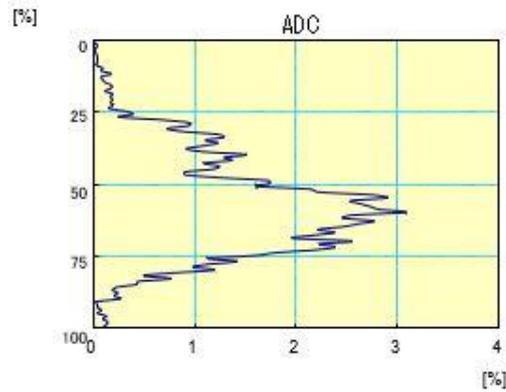
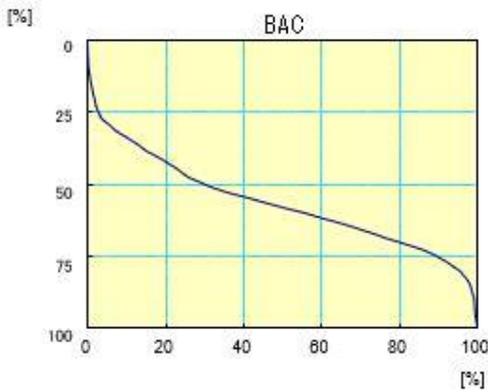
15-Mar-2021

# CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	0.484 µm		
Rq	0.595 µm		
Rz	2.472 µm		

Copyright (C) 2013 Mitutoyo Corporation

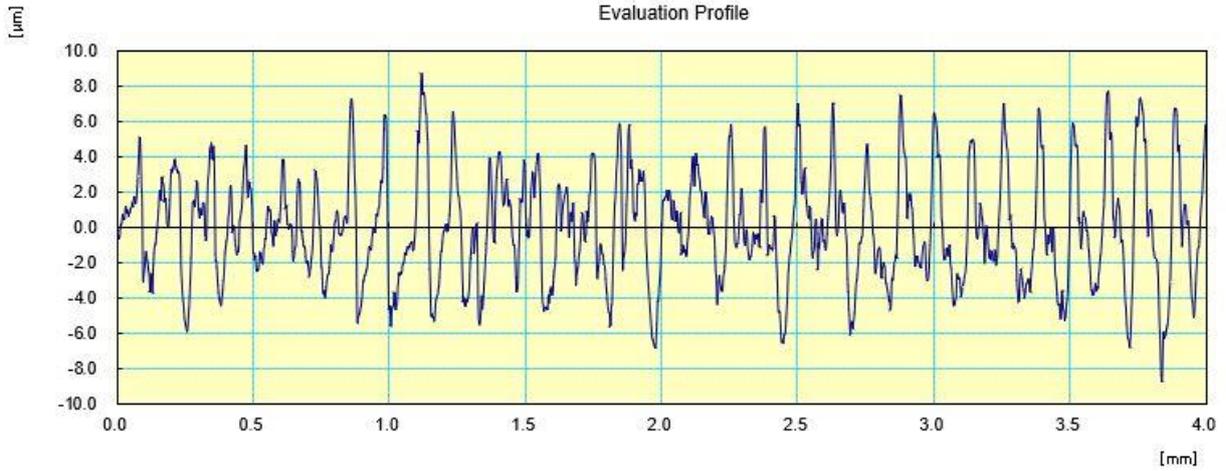


Hasil Pengujian Kekasaran Permukaan Baja SS41 Variasi Tanpa Chamfer



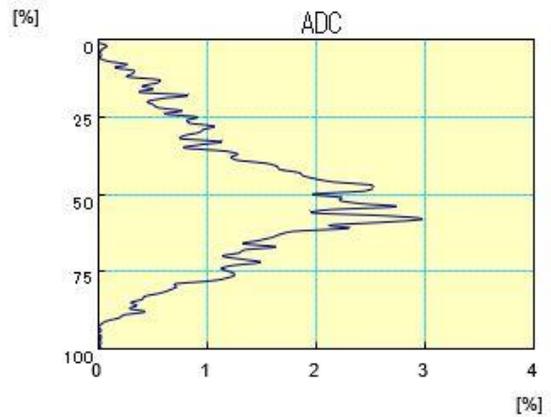
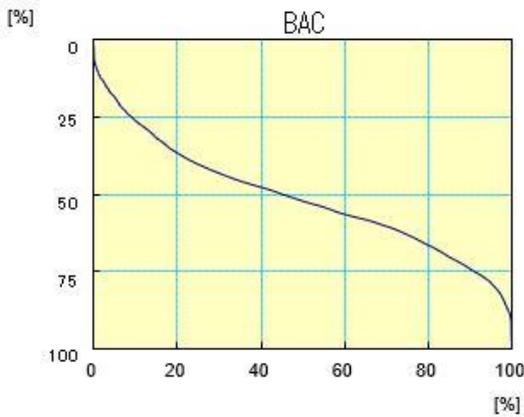
15-Mar-2021

# CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
$\lambda_s$	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	2.455 µm		
Rq	3.032 µm		
Rz	13.677 µm		

Copyright (C) 2013 Mitutoyo Corporation

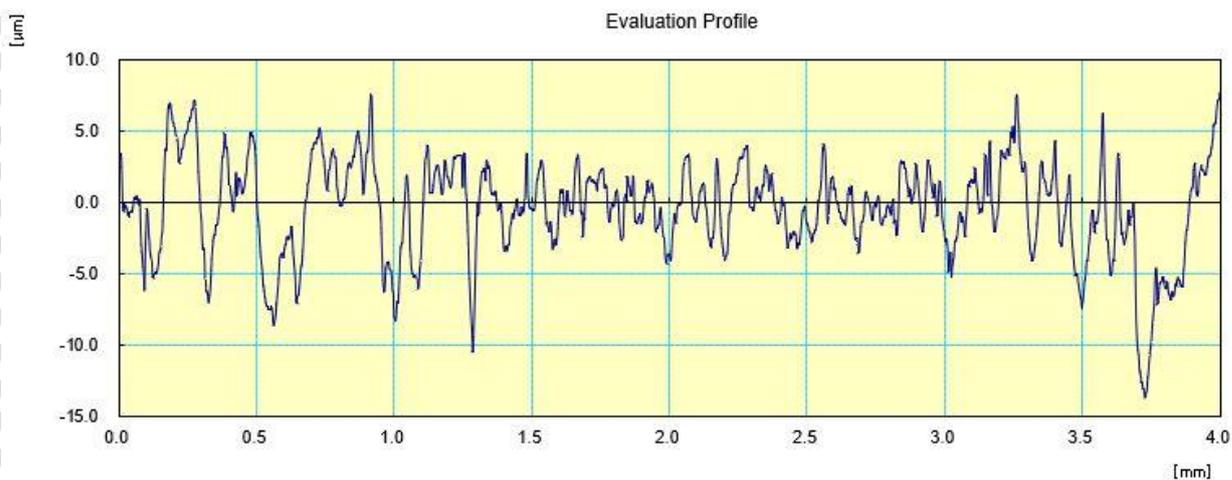


Hasil Pengujian Kekasaran Permukaan Baja SS41 Variasi Chamfer 30°

**Mitutoyo**

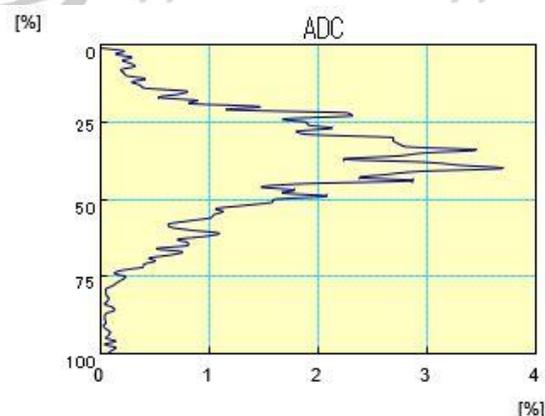
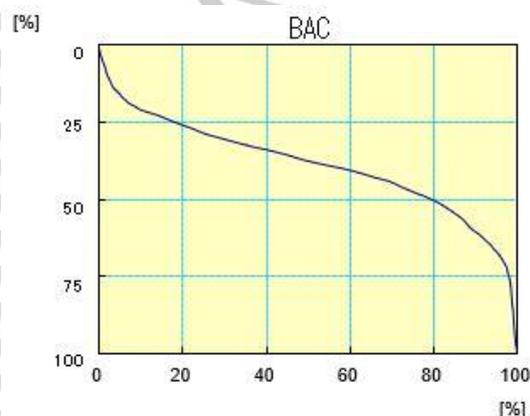
15- Mar -2021

## CERTIFICATE OF INSPECTION



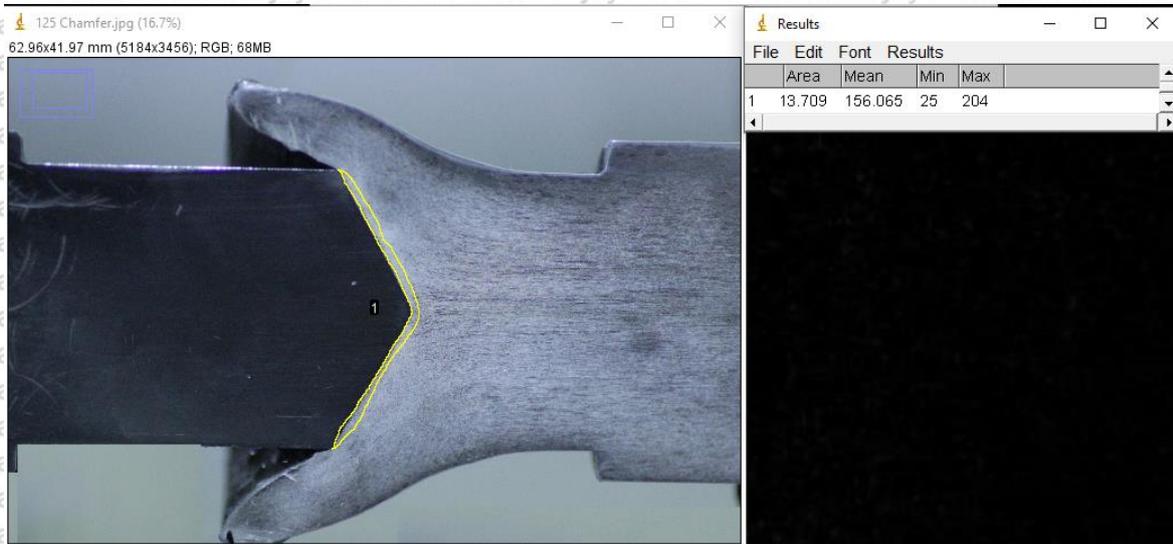
Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
$\lambda_s$	2.5 $\mu$ m	Filter	GAUSS
Ra	2.567 $\mu$ m		
Rq	3.165 $\mu$ m		
Rz	14.563 $\mu$ m		

Copyright (C) 2013 Mitutoyo Corporation



### Lampiran 10 Perhitungan Luas Daerah Zpl dan Zpd

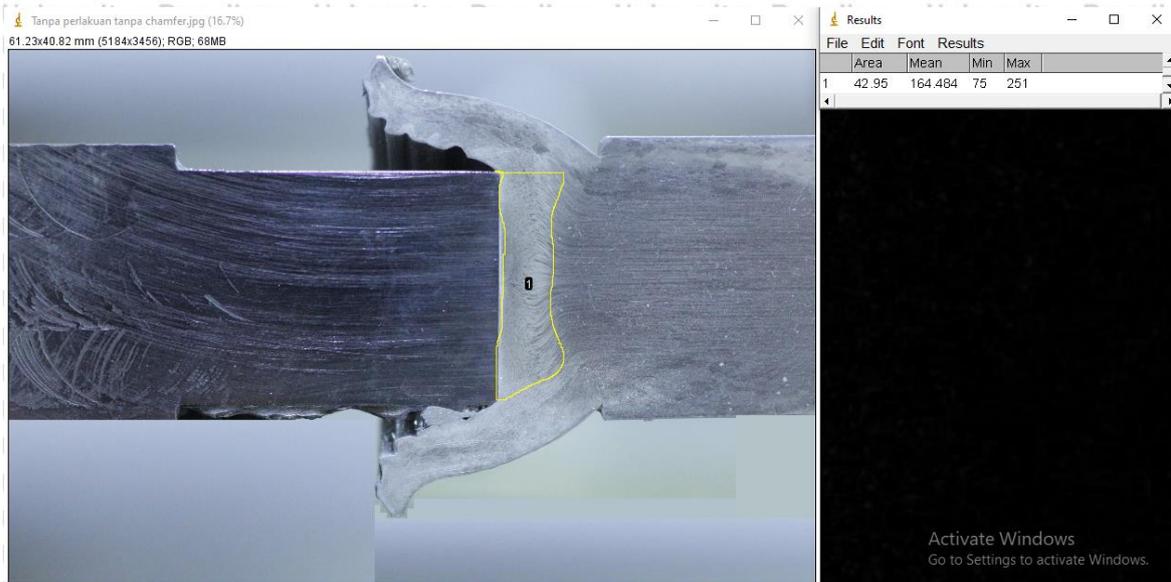
Variasi suhu *aging* 125°C dan *Chamfer* 30° daerah Zpl (Kekuatan Tarik Tertinggi)



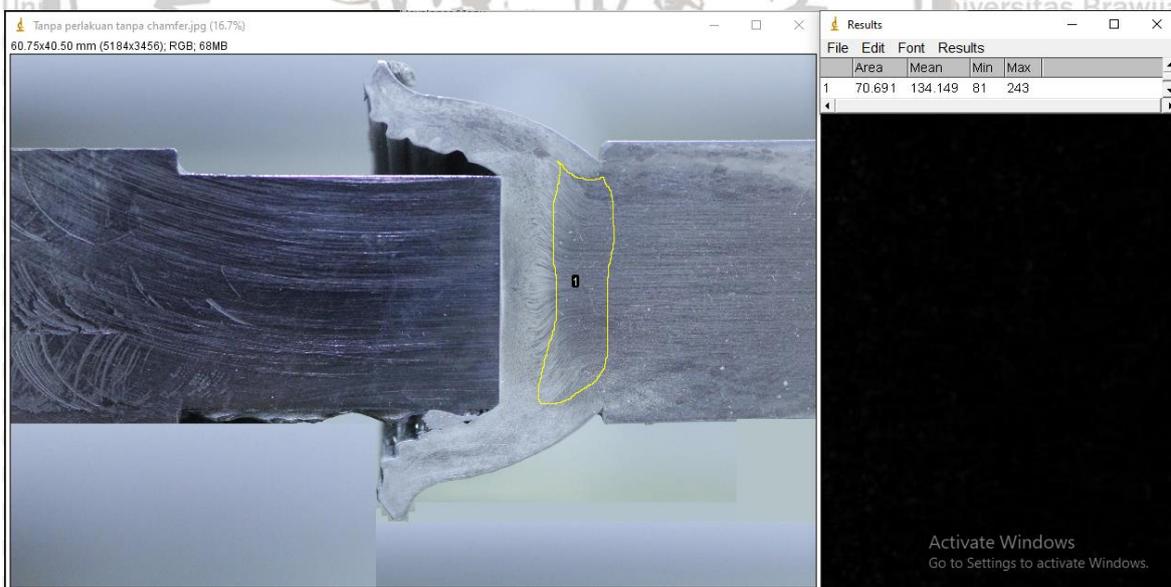
Variasi suhu *aging* 125°C dan *Chamfer* 30° daerah Zpd (Kekuatan Tarik Tertinggi)



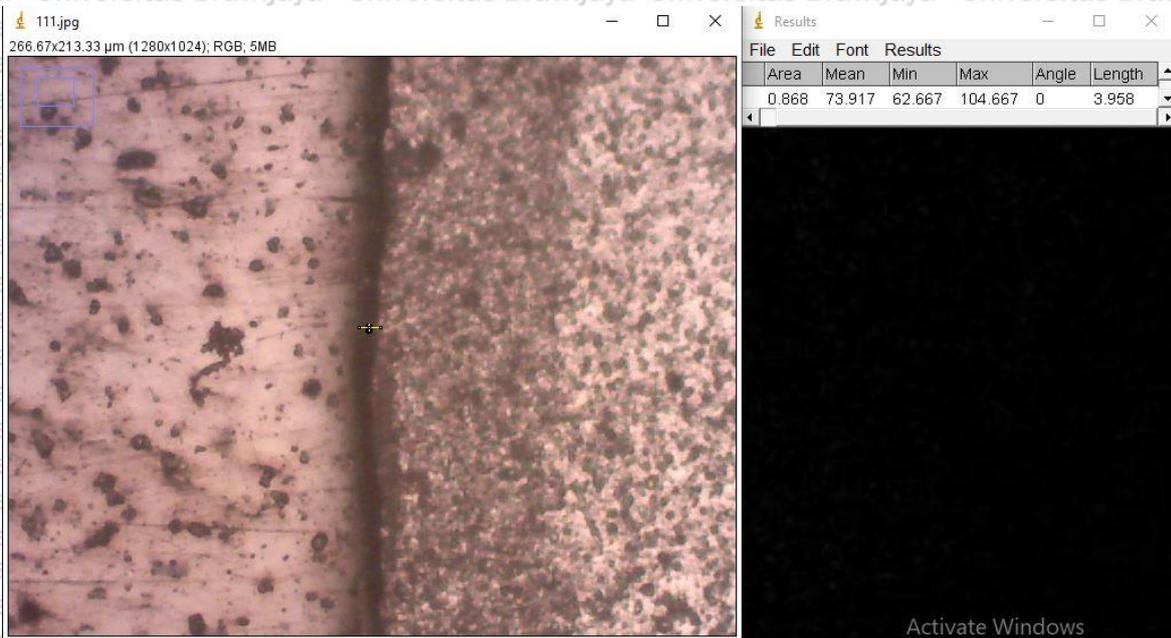
### Variasi Tanpa Aging dan Tanpa Chamfer daerah Zpl (Kekuatan Tarik Terendah)



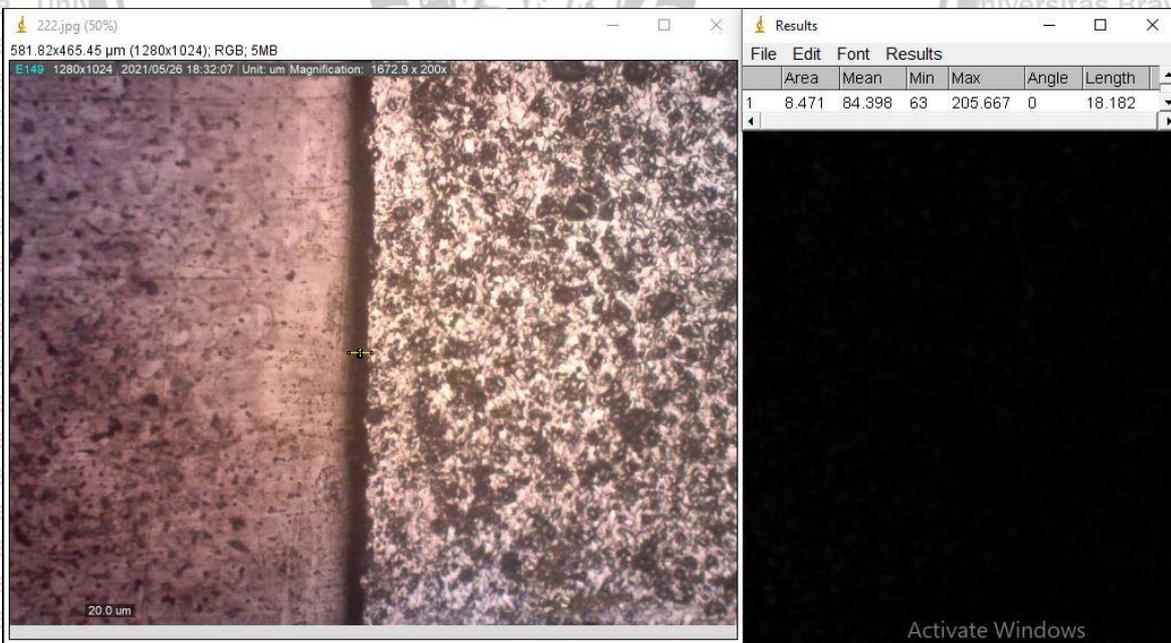
### Variasi Tanpa Aging dan Tanpa Chamfer daerah Zpd (Kekuatan Tarik Terendah)



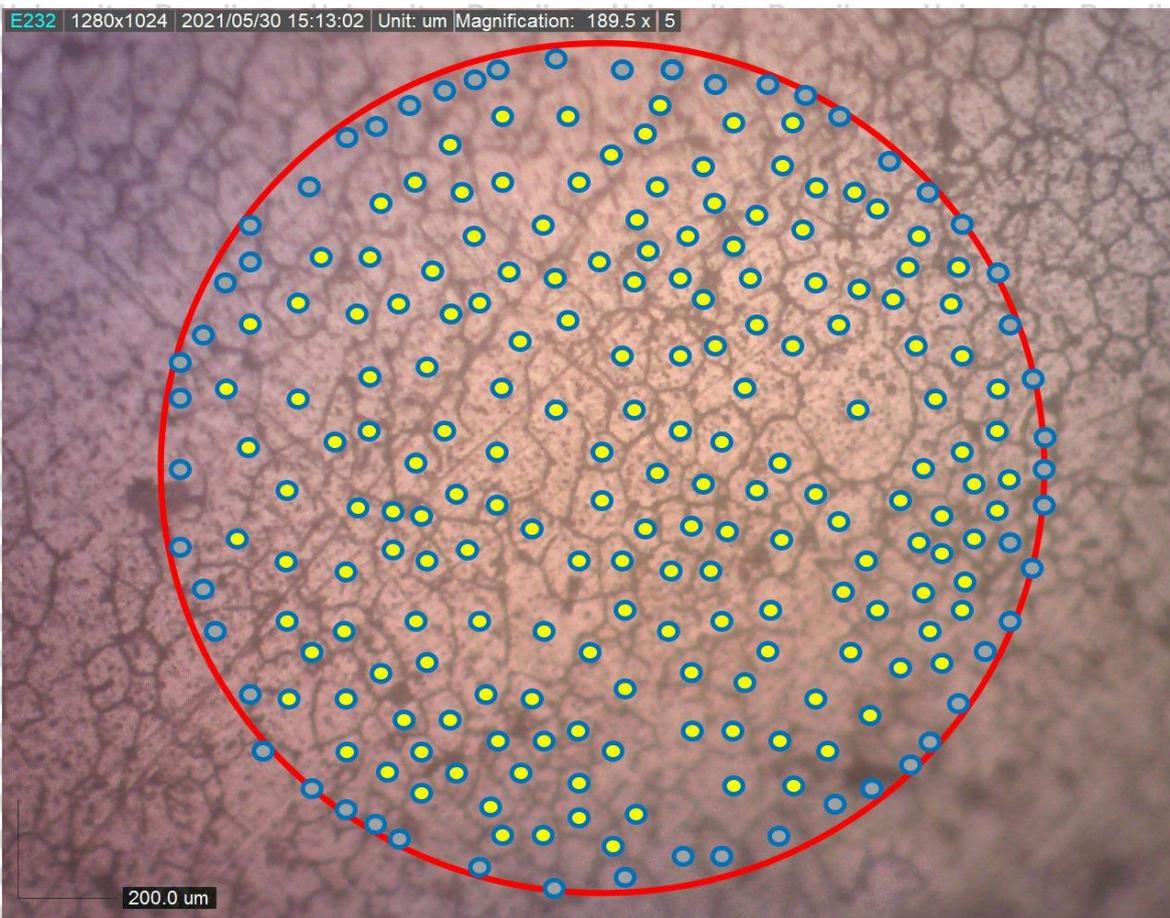
**Lampiran 11** Perhitungan Batas Daerah Sambungan Las Gesek  
 Variasi Suhu Aging 125°C dan Chamfer 30° (Kekuatan Tarik Tertinggi)



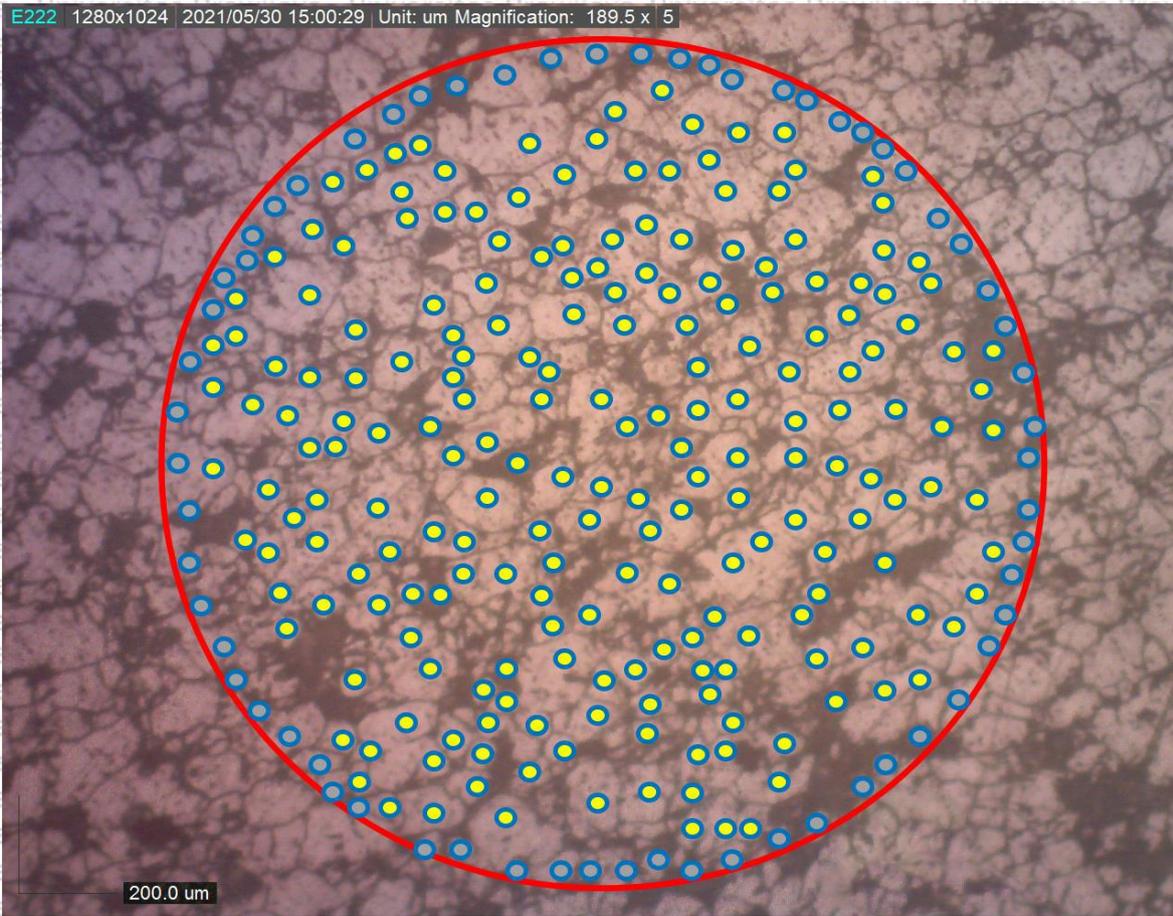
Variasi Tanpa Aging dan Tanpa Chamfer (Kekuatan Tarik Terendah)



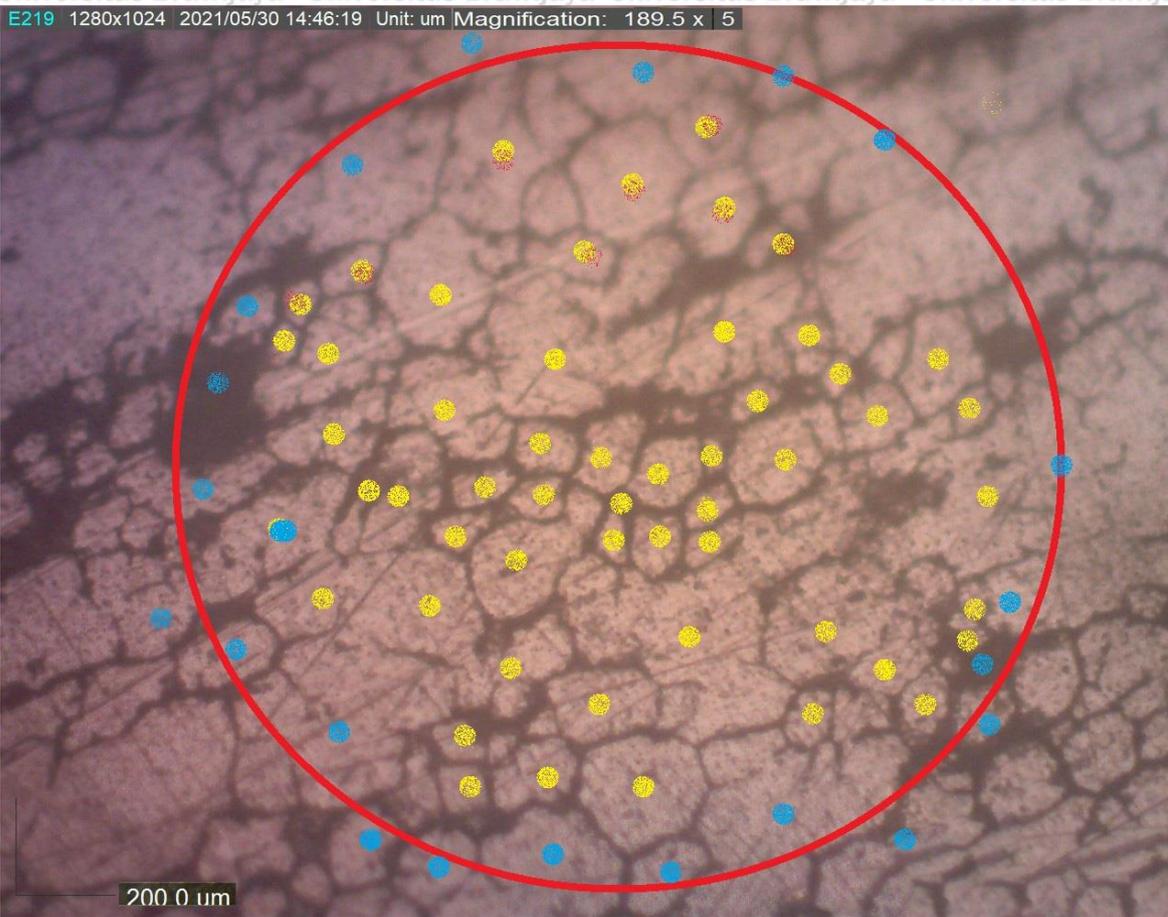
### Lampiran 12 Perhitungan Jumlah Butir Daerah Patahan Spesimen Variasi Tanpa Aging dan Tanpa Chamfer



Perhitungan Jumlah Butir Daerah Patahan Spesimen Variasi Tanpa Aging dan Chamfer 30°

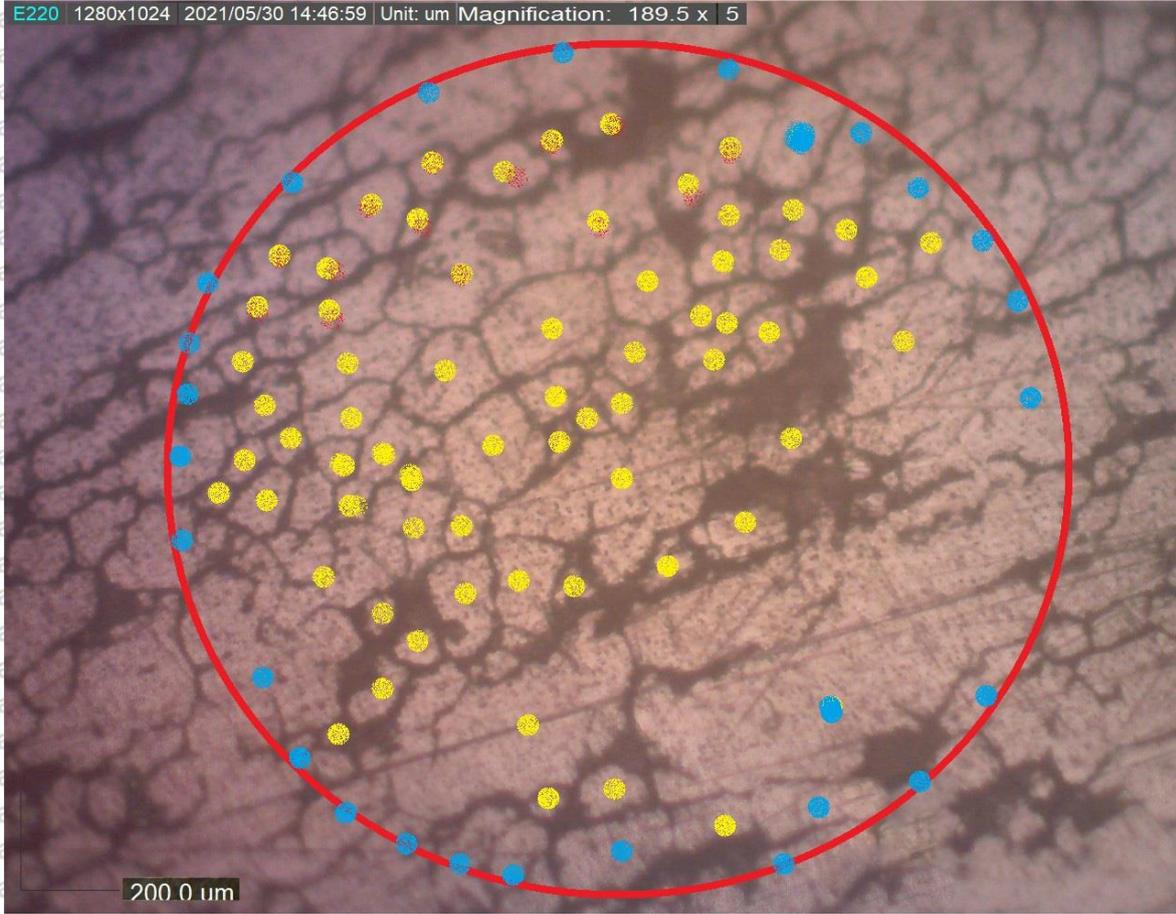


### Perhitungan Jumlah Butir Daerah Patahan Spesimen Variasi Suhu Aging 125 °C Tanpa Chamfer



Perhitungan Jumlah Butir Daerah Patahan Spesimen Variasi Suhu Aging 125 °C dan Chamfer 30°

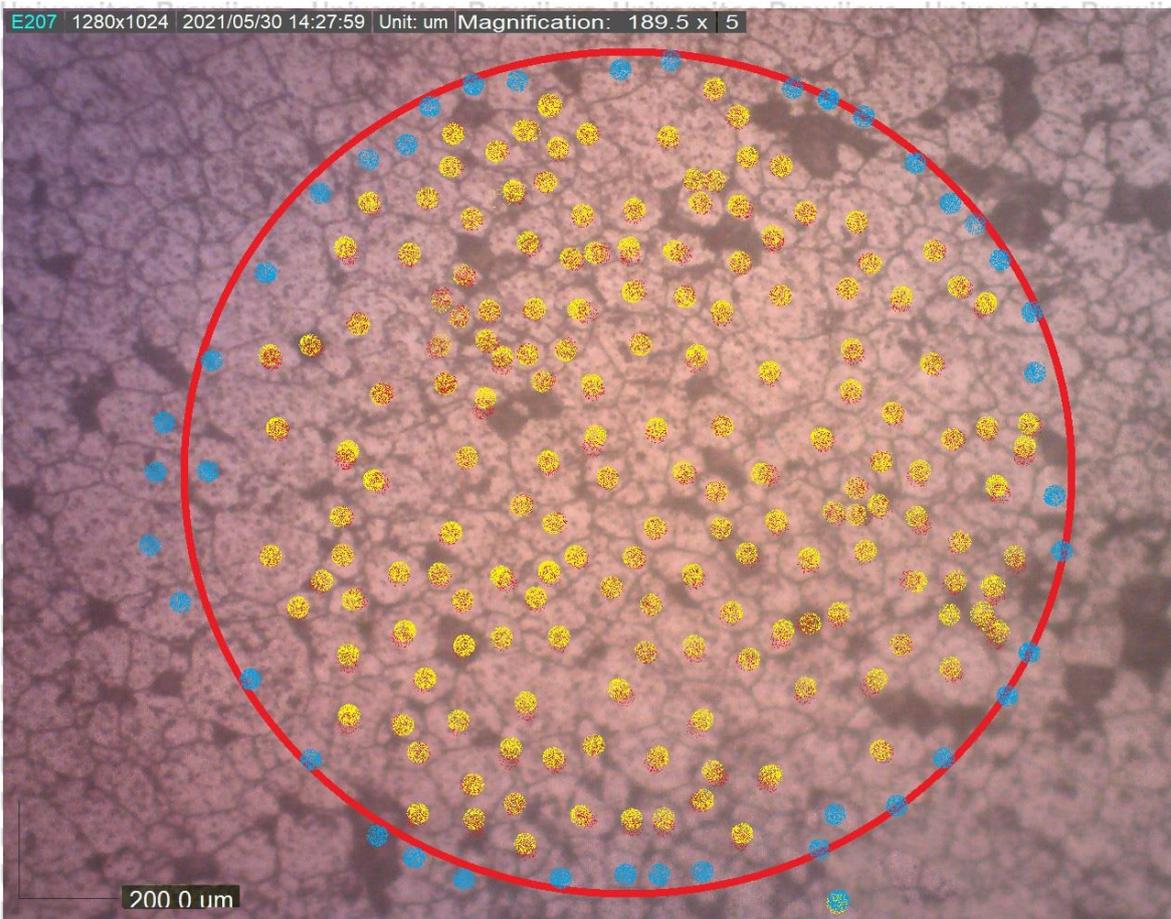
E220 1280x1024 2021/05/30 14:46:59 Unit: um Magnification: 189.5 x 5



200.0 um



### Perhitungan Jumlah Butir *Base Metal*



## Lampiran 13 Tabel ASTM E 112



TABLE 4 Grain Size Relationships Computed for Uniform, Randomly Oriented, Equiaxed Grains

Grain Size No. G	$\bar{N}_V$ Grains/Unit Area		$\bar{A}$ Average Grain Area		$\bar{d}$ Average Diameter		$\bar{\lambda}$ Mean Intercept		$\bar{N}_L$ No./mm
	No./in. <sup>2</sup> at 100X	No./mm <sup>2</sup> at 1X	mm <sup>2</sup>	μm <sup>2</sup>	mm	μm	mm	μm	
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.00
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.00
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.00

