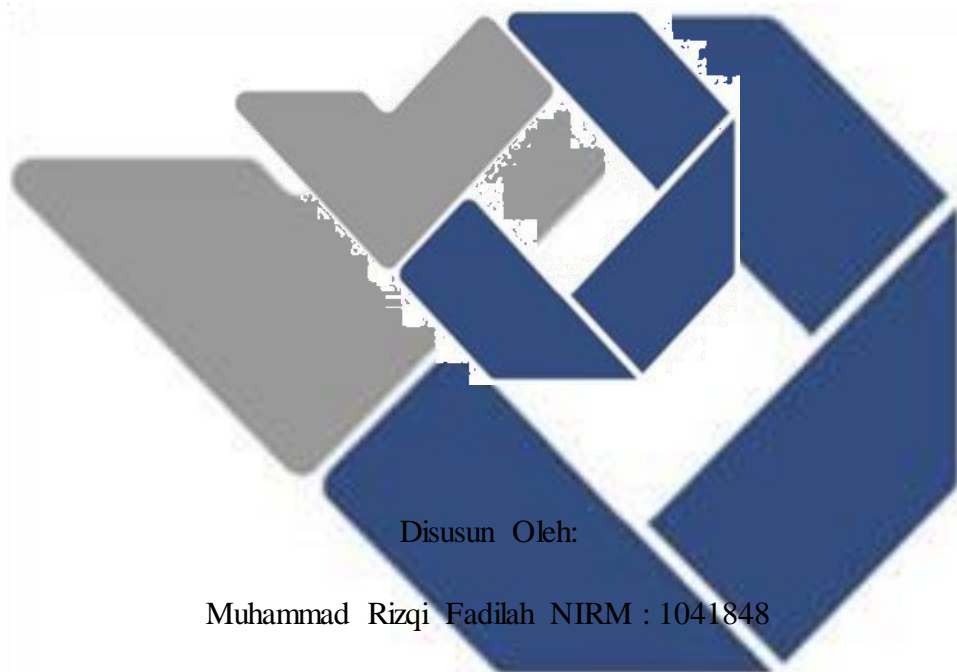


**PENGARUH VARIASI (JARAK PENEKANAN) TERHADAP  
KEKUATAN SAMBUNGAN LAS GESEK (*FRICTION  
WELDING*) PADA BAJA KARBON S45C**

**PROYEK AKHIR**

Laporan ini Disusun untuk memenuhi syarat menyelesaikan pendidikan Dipolma  
IV Program Studi Teknik Mesin dan Manufaktur Di Jurusan Teknik Mesin



**POLITEKNIK MANUFaktur NEGERI  
BANGKA BELITUNG  
2021/2022**

**LEMBAR PENGESAHAN**

**PENGARUH VARIASI (JARAK PENEKANAN) TERHADAP  
KEKUATAN SAMBUNGAN LAS GESEK (*FRICTION  
WELDING*) PADA BAJA KARBON S45C**

Oleh:

Muhammad Rizqi Fadilah/NIM:1041848

Laporan akhir ini telah dan disahkan sebagai salah satu syarat kelulusan Program  
Diploma IV Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung

Menyetujui,

Pembimbing 1



Rodika, S.S.T.,M.T.

Pembimbing 2



Fajar Aswin, S.S.T.,M.Sc.

Penguji 1



Sugiarto, S.S.T., M.T

Penguji 2



Zaldy. S. Suzen, S.S.T.,M.T

## PERNYATAAN BUKAN PLAGIAT

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama Mahasiswa : Muhammad Rizqi Fadilah NIM : 1041848

Dengan Judul : Pengaruh Variasi (Jarak Penekanan) terhadap kekuatan sambungan Las Gesek (*Friction Welding*) pada Baja Karbon S45C

Menyatakan bahwa laporan akhir ini adalah hasil kerja saya sendiri dan bukan merupakan plagiat. Pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya dan ternyata dikemudian hari ternyata melanggar pernyataan ini, saya bersedia menerima sanksi yang berlaku dan untuk daftar riwayat hidup penulis dapat dilihat pada lampiran 1 hal 35.

Nama Mahasiswa

Sungailiat, 12 Januari 2022

1. Muhammad rizqi Fadilah

Tanda tangan

Muhammad Rizqi Fadilah

## ABSTRAK

Teknologi las gesek friction welding merupakan salah satu metode proses pengelasan jenis solid state welding dimana sumber panas ditimbulkan oleh dua logam yang begesekan. Dengan mengkombinasikan panas dan tekanan tempa maka dua buah logam akan tersambung dengan baik. Teknologi las gesek ini belum banyak diperhatikan walaupun teknologi ini efisien dan efektif tetapi belum banyak diterapkan pada industri menengah dan kecil. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian dalam proses penyambungan dua buah logam tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kekuatan sambungan las setelah proses pengelasan dengan menggunakan variasi jarak penekanan 3 mm, 4 mm, dan 5 mm material yang digunakan dalam penelitian ini, baja karbon poros S45C Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode eksperimen untuk mengetahui kekuatan impak metode charpy pada poros S45C menggunakan las gesek (frection welding) Studi telah menunjukkan bahwa pengelasan pada jarak penekanan terdalam menghasilkan sambungan las yang sangat kuat, semakin besar penekanan selama proses pengelasan maka semakin kuat sambungan pada pengelasan. Pengelasan dengan jarak penekanan 4 mm dan 5 mm, memiliki energi yang diserap dan harga impak lebih tinggi dibandingkan dengan jarak penekanan 3mm Hasil energy yang diserap tertinggi yaitu pada jarak penekanan 5 mm dengan nilai rata-rata 70,82 joule, dan nilai terendah ada pada jarak penekanana 3 mm dengan nilai rata-rata 55,28 joule. Hasil harga impak tertinggi yaitu pada jarak penekanan 5 mm dengan nilai rata-rata 2,023 joule/mm<sup>2</sup>, dan nilai terendah ada pada jarak penekanana 3 mm dengan nilai rata-rata 1,579 joule/mm<sup>2</sup>.

*Kata kunci: las gesek, variasi jarak penekanan, baja karbon sedang, impak*

## ABSTRACT

*Friction welding technology is a friction welding method Solid state welding is a type of welding in which the heat source is generated by two metals rubbing against each other. By combining the heat and pressure of forging the two metals will be well connected. This friction welding technology has not received much attention even though this technology is efficient and effective but has not been widely applied to medium and small industries. Therefore, it is necessary to conduct research in the process of joining two metals. The purpose of this research is to determine the strength of the welded joint after the welding process using variations in the pressure distance of 3 mm, 4 mm, and 5 mm. The material used in this study, carbon steel shaft S45C The method used in this study is an experimental method to determine the impact strength of the Charpy method on the S45C shaft using friction welding. Studies have shown that welding at the deepest compression distance produces a very strong weld joint, the greater the emphasis during the welding process, the stronger the welding process. joints in welding. Welding with compression distance of 4 mm and 5 mm, has a higher energy absorbed and impact value compared to a distance of 3 mm. The highest absorbed energy yield is at a distance of 5 mm with an average value of 70,82 joules, and the lowest value is at a distance of 5 mm. suppression of 3 mm with an average value of 55,28 joules. The result of the highest impact value is the compression distance 5 mm with an average value of 2,023 joules mm, and the lowest value is at a compression distance of 3 mm with an average value of 1,579 joules/mm<sup>2</sup>.*

*Keywords: friction welding with variations in compression distance, medium carbon impact.*

## KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan Alhamdulillah segala puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT, karena berkat rahmat dan hidayah-nya penyusunan tugas akhir yang berjudul PENGARUH VARIASI (JARAK PENEKANAN) TERHADAP KEKUATAN SAMBUNGAN LAS GESEK (*FRICTION WELDING*) PADA BAJA KARBON S45C, ini dapat terselesaikan guna memenuhi salah satu persyaratan dalam menyelesaikan pendidikan pada jurusan Teknik Mesin Manufaktur Politeknik Negeri Bangka Belitung. Perjalanan panjang telah penulis lalui dalam rangka perampungan penulisan skripsi ini. Banyak hambatan yang di hadapi dalam penyusunanya, namun berkat kehendak-nyalah sehingga penulis berhasil menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, dengan penuh kerendahan hati pada kesempatan ini patutlah penulis mengucapkan berterima kasih kepada:

1. Kedua orang tua, ayahanda tercinta Otto Aryanto, ibunda tercinta Agustini dan adik saya yang senantiasa memberikan kasih sayang dan selalu berdoa serta memberikan dukungan pada penulis.
2. Bapak Rodika, M.T, selaku dosen pembimbing utama yang telah banyak memberikan masukan dan bimbingan tentang pelaksanaan makalah tugas akhir ini.
3. Bapak Fajar Aswin, M.Sc, selaku dosen pembimbing kedua yang telah banyak memberikan dukungan semangat dan masukan tentang pelaksanaan makalah tugas akhir ini.
4. Serta teman saya Ardi Meilianto, Picki Ilham yang telah berjuang bersama-sama sampai titik ini, dan juga teman saya Welcy Fratama, Rahmat Maulid, Riyo Mulyadi, Rizki Fachrezi dan semua pihak yang telah ikut membantu dan memberikan dukungan moral dalam penyelesaian makalah proyek akhir yang sebagai salah satu syarat kelulusan.

Akhir kata, penulis mengharapkan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan semoga Allah SWT selalu memberikan perlindungan bagi kita semua.

Sungailiat, 20 Januari 2022

Muhammad Rizqi Fadilah



## DAFTAR ISI

	Halaman
COVER.....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	ii
PERNYATAAN BUKAN PLAGIAT .....	iii
ABSTRAK .....	iv
KATA PENGANTAR .....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Batasan Masalah .....	3
1.5 Manfaat penelitian.....	4
BAB II DASAR TEORI .....	5
2.1 Baja Karbon .....	5
2.1.1 Baja Karbon Rendah .....	5
2.1.2 Baja Karbon Menengah .....	5
2.1.3 Baja Karbon Tinggi.....	5
2.2 Baja S45C .....	6
2.3 Proses dasar pengelasan.....	6



2.4 Las gesek ( <i>Friction Welding</i> ).....	6
2.4.1 Kelebihan dan kekurangan las gesek ( <i>friction welding</i> ) .....	8
2.4.2 Aplikasi Las Gesek .....	9
2.4.3 Variabel-variabel Proses Pada Las Gesek.....	9
2.5 Mesin Bubut.....	10
2.5.1 Kecepatan Putar (Revolution per Menit – RPM).....	10
2.5.2 Eretan .....	11
2.6 Pengujian Impak .....	11
2.7 Jenis-jenis metode uji impak.....	12
2.8 Penelitian sebelumnya.....	15
<b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>	<b>18</b>
3.1 Diagram Alir .....	18
3.1.1 Studi Literatur .....	19
3.1.2 Merancang Instrumen Penelitian .....	19
3.1.3 Persiapan material.....	19
3.1.4 Proses las gesek.....	20
3.1.5 Pengujian impak.....	20
3.1.6 Analisis contoh pengambilan data .....	21
3.1.7 Kesimpulan .....	21
<b>BAB IV PEMBAHASAN.....</b>	<b>22</b>
4.1 Rancangan Eksperimen.....	22
4.2 Waktu dan Tempat Penelitian.....	22
4.2.1 Waktu Penelitian.....	22
4.2.2 Tempat Penelitian .....	22
4.3 Persiapan Material dan Alat Untuk Las Gesek .....	22

4.4 Proses Pengelasan .....	23
4.4.1 Langkah-Langkah Proses Pengelasan Gesek : .....	23
4.4.2 Hasil Pengelasan Gesek .....	25
4.5 Pembuatan Spesimen Uji .....	25
4.6 Pengujian Impak .....	26
4.6.1 Analisis patahan spesimen uji impak .....	28
4.6.2 Data Hasil Energi Yang Diserap .....	28
4.6.3 Data Hasil Harga Impak.....	29
4.7 Analisis Data .....	30
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>32</b>
5.1 Kesimpulan .....	32
5.2 Saran.....	32
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>33</b>



## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Daerah Las Gesek (H.Amanto & B.T.Wibowo, 2006) .....	7
2.2 aplikasi pengelasan gesek metode rotary ada pada Cylinder (Prasetyono & Subiyanto.M.S.c, 2012) .....	9
2.3 Mesin Bubut merek Krisbow Polman Babel .....	10
2.4 <i>Chuck</i> pada mesin bubut merek krisbow Polman Babel.....	11
2.5 (a) Divisi pada eretan, dan (b) <i>tool post</i> pada .....	11
2.6 Uji Impak Metode <i>Charpy</i> (R.Pramono, 2016) .....	13
2.7 Uji Impak Metode <i>Izod</i> (R.Pramono, 2016) .....	14
3.1 Skema Diagram Alir Penelitian .....	18
3.2 Gambar Awal Poros Baja Karbon S45C .....	19
3.3 Pengelasan Gesek <i>Friction Welding</i> ( <a href="http://jurnalmahasiswa.unesa.ac.id">http://jurnalmahasiswa.unesa.ac.id</a> , n.d.) .....	20
3.4 Ukuran Spesimen Standar Uji impak (H.Amanto & B.T.Wibowo, 2006) .....	21
4.1 (a) Pemasangan benda kerja pada <i>Tool Post</i> dan (b) Pemasangan benda kerja pada <i>Chuck</i> .....	23
4.2 Benda kerja dalam posisi <i>center</i> .....	24
4.3 Proses pengelasan benda kerja .....	24
4.4 Proses terjadi penyambungan pengelasan benda kerja .....	25
4.5 Gambar Hasil Pengelasan Gesek .....	25
4.6 Spesimen uji impak Jarak penekanan (a) 3 mm, (b) 4 mm,.....	26
4.7 Gambar spesimen uji impak .....	27
4.8 Mesin uji impak Polman <i>TESTING MACHINE</i> metode <i>Charpy</i> model.....	27
4.9 Patahan spesimen uji setelah pengujian impak dengan .....	28
4.10 Diagram energi yang diserap terhadap Jarak penekanan 3 mm,4 mm, dan 5 mm. ....	30
4.11 Diagram harga impak terhadap Jarak penekanan 3 mm, 4 mm, dan 5 mm. ...	31

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1 Suhu standar pengelasan .....	8
4.3 Data Hasil Energi Yang Diserap .....	29
4.4 Data Hasil Harga Impak.....	29



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 : Daftar araiwayat Hidup

Lampiran 2 : Peralatan dan Mesin yang digunakan untuk proses pengelasan gesek

Lampiran 3 : Perhitungan Energi yang diserap dan Harga Impak

Lampiran 4 : Sartifikat Baja Karbon S45C



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi di bidang konstruksi yang semakin canggih berperan penting dalam teknologi dan perbaikan logam dan tidak dapat dipisahkan dari pengelasan. Konstruksi struktur logam pada masa itu banyak mengandung unsur-unsur pengelasan, terutama dalam bidang konstruksi. Pengelasan merupakan salah satu sambungan yang memerlukan keahlian teknis tingkat tinggi dalam pengelasan agar diperoleh kualitas sambungan yang baik. Pengelasan adalah teknologi penyambungan logam yang melelehkan sebagian logam dasar dan logam pengisi dengan atau tanpa penambahan logam. Pengelasan gesek tanpa menggunakan kabel/elektroda las, sehingga dapat dipastikan sambungan antara kedua bahan yang akan dilas tersambung secara merata. Juga, dengan menghubungkan poros dengan cara ini, perpindahan poros logam las dapat diminimalkan.

Pengelasan gesek adalah proses pengelasan *solid state* di mana dua logam digesek bersama untuk menghasilkan sumber panas. Kombinasi panas dan tekanan dalam penempaan menciptakan ikatan yang baik antara kedua logam. Teknik pengelasan gesekan ini efisien dan efektif, dan meskipun tidak banyak digunakan di industri kecil dan menengah, teknik ini kurang mendapat perhatian. Oleh karena itu, perlu dipelajari proses penyambungan dua logam. Selain itu, pengelasan gesekan dapat menghemat bahan, mengurangi waktu proses dan menggabungkan dua bahan yang berbeda atau jenis yang sama. dan dapat menggabungkan bahan silinder (Santoso, 2012).

Adapun produk yang bisa digunakan pada proses las gesek (*friction welding*) yaitu (*tie rod end*) yang ada di kendaraan roda empat mobil di Industri Otomotif. Selain di Industri Otomotif produk yang menggunakan metode las gesek (*friction welding*) ini juga terdapat pada transportasi laut yaitu penyambung poros baling-baling kapal (Wiryosumarto & Okumura, 2008).

Pengelasan gesek adalah pengelasan solid-state tanpa menggunakan logam pengisi dengan menggunakan metode tekanan dimana dua benda kerja yang akan disambung ditempatkan dalam kontak dan diatur gerakan relatif dalam tekanan, maka gesekan akan membangkitkan panas disekitar permukaan kontak, ketika sudah mencapai temperatur tempa maka diberikan tekanan tempa. tetapi proses pengelasan ini pada dasarnya sangat dipengaruhi oleh kecepatan putaran, durasi gesekan dan tekanan aksial (gesek, tempa). Dalam penelitian ini dilakukan pengelasan gesek langsung. Proses yang dilakukan adalah dengan memvariasikan tekanan gesek sebesar 8 MPa, 14 MPa, dan 20 MPa dalam waktu gesekan 60 detik, 80 detik, dan 100 detik sampai mencapai temperatur tertentu, kemudian diberikan variasi tekanan tempa sebesar 30 MPa, 40 MPa, 60 MPa dengan menggunakan baja AISI 4140 sebagai benda kerja, kecepatan putar yang digunakan 4500 Rpm. Efek dari tekanan gesek, tekanan tempa dan durasi gesekan terhadap *impact strength* dianalisa melalui uji impak. Dari penelitian ini didapat Kekuatan impact tertinggi diperoleh pada kombinasi parameter durasi gesek 100 detik, dengan tekanan gesek 20 MPa dan tekanan tempa 60 MPa yaitu sebesar 0,3228017 J/mm<sup>2</sup>. Kekuatan impact terendah diperoleh pada kombinasi parameter durasi gesek 60 detik, dengan tekanan gesek 8 MPa dan tekanan tempa 30 MPa yaitu sebesar 0,0420214 J/mm<sup>2</sup>. Perubahan tekanan gesekan, durasi gesek, dan tekanan tempa mempengaruhi temperatur pengelasan. temperatur pengelasan tertinggi adalah 1075°C. Dari ketiga parameter yang di variasikan, parameter tekanan gesek paling berpengaruh terhadap kekuatan impak sambungan las direct (*friction welding*) (Satyadianto, 2015)

Penelitian yang telah dilakukan dengan menggunakan mesin las gesek dimana waktu gesekan diubah sebesar 35 detik, 45 detik, 55 detik, dan 65 detik. Parameter proses pengelasan gesek adalah kecepatan putar 4215 rpm, tekanan gesek 127,27 kg/cm<sup>2</sup>, dan tekanan tempa 1018,18 kgf/cm<sup>2</sup>. Sampel uji terbuat dari baja karbon ST 60. Sampel uji yang dihasilkan diuji dengan uji sifat metalografi dan mekanik. Sifat mekanik meliputi uji kekuatan tarik, uji kekerasan sambungan, dan uji kekuatan puntir. Sebagai metode manufaktur

alternatif untuk produk pin pegas, yang menganalisis perubahan struktur mikro dan sifat mekanik. Perubahan struktur ini terjadi karena panas yang dihasilkan berbeda-beda tergantung dari waktu gesekan dan pengaruh proses penempaan. Panas terbaik dihasilkan dengan waktu gesekan 45 detik. Jika waktu wiper melebihi 45 detik, panas akan dihasilkan dan cenderung berkurang. Penurunan ini disebabkan oleh efek gesekan kedua logam baja ST 60. Kuat tarik 414,54N/mm<sup>2</sup>, kuat puntir 16 kgf.m, kekerasan logam las 45,5 HRA, HAZ 43 HRA Sifat mekanik terbaik terjadi pada proses las gesek dengan waktu gesek 45 detik. Proses las gesek ini dapat digunakan untuk pembuatan produk knockpin, menjadikan proses ini sebagai alternatif dari proses yang digunakan sebelumnya. Meskipun pengelasan gesek memiliki banyak keuntungan, tetapi juga memiliki kelemahan seperti bahan berbentuk kotak atau persegi, atau bahan yang tidak disambung dengan benar dan hanya digunakan untuk tujuan tertentu (Husodo, 2013).

Berdasarkan penjelasan di atas maka akan dilakukan penelitian tentang las gesek yang diharapkan untuk mengetahui kekuatan sambungan las setelah proses pengelasan dengan menggunakan pengujian dampak metode *charpy*.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Rumusan masalah yang ada pada penelitian ini adalah Bagaimana pengaruh kecepatan putar, dan jarak penekanan terhadap kekuatan dampak pada proses penyambungan las gesek pada baja karbon S45C.

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah Untuk mengetahui pengaruh kecepatan putar, jarak penekanan terhadap kekuatan dampak pada proses penyambungan las gesek pada baja karbon S45C.

## **1.4 Batasan Masalah**

Agar penelitian ini dapat berjalan dengan lancar dan berjalan secara fokus dan tertata serta mencapai tujuan yang diinginkan batasan masalah yang diberlakukan adalah:



1. Untuk penelitian tentang las gesek ini menggunakan mesin bubut merek Krisbow dengan mengatur kecepatan rpm dan menentukan jarak penekanan untuk proses las gesek.
2. Menggunakan material baja karbon S45C.

### **1.5 Manfaat penelitian**

Adapun manfaat dari penelitian tentang las gesek ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk menambah referensi sebagai penelitian dalam pengembangan di dalam bidang las gesek.
2. Menambah pengetahuan tentang pengelasan gesek.
3. Mengetahui cara penggunaan pengelasan gesek sebagai proses penyambungan suatu material baja karbon S45C.



## **BAB II**

### **DASAR TEORI**

#### **2.1 Baja Karbon**

Baja adalah jenis logam besi yang mengandung unsur-unsur dalam jumlah terbatas seperti karbon (C), belerang (S), fosfor (P), silikon (Si), dan mangan (Mn). Secara umum, sifat baja sangat dipengaruhi oleh proporsi karbon dan struktur mikronya. Struktur mikro baja karbon dipengaruhi oleh perlakuan panas dan komposisi baja. Karbon dapat membentuk karbida dengan elemen paduan lainnya dalam baja, meningkatkan kekerasan, ketahanan gores dan ketahanan panas baja. Perbedaan proporsi karbon dalam campuran logam baja karbon adalah salah satu cara untuk menjelaskan kandungan karbon baja (Supardi, 1999)

##### **2.1.1 Baja Karbon Rendah**

Baja karbon rendah (baja konstruksi) mengandung karbon kurang dari 0,3% dalam campuran baja karbon. Karena kandungan karbonnya yang rendah (kurang dari 0,3% C), tidak keras. Baja karbon rendah tidak dapat dikeraskan karena kandungan karbonnya tidak cukup untuk membentuk struktur martensit (Amanto & Wibowo, 2006).

##### **2.1.2 Baja Karbon Menengah**

Baja karbon sedang (medium carbon steel) mengandung karbon 0,3% C - 0,6%, sedangkan kandungan unsur karbon sebagian memperkuat baja dengan perlakuan panas yang sesuai. Baja karbon lebih keras dan lebih kuat dari baja konstruksi (Amanto & Wibowo, 2006).

##### **2.1.3 Baja Karbon Tinggi**

Baja karbon tinggi mengandung 0,6% - 1,5% karbon dan memiliki kekerasan tinggi tetapi daktilitas rendah, sehingga hampir tidak mungkin untuk mengetahui jarak dari tegangan leleh ke tegangan proporsional dalam grafik tegangan-regangan. Berbeda dengan baja karbon rendah, perlakuan panas pada baja karbon tinggi tidak akan memberikan hasil yang optimal karena terlalu banyak martensit akan menyebabkan baja menjadi getas. Sifat mekanik baja juga

tergantung pada ikatan karbon dan besi. Menurut Schonmetz terdapat 3 bentuk utama Kristal saat karbon mengadakan ikatan dengan besi (Amanto & Wibowo, 2006).

## **2.2 Baja S45C**

Baja S45C adalah kelompok baja karbon sedang dengan kandungan karbon sekitar 0,51%. Ini setara dengan baja karbon ST 60, Karena kandungan karbon tinggi dari baja S45C, baja ini memiliki sifat machinability dan kekuatan yang baik. perlakuan yang tepat dari baja ini dapat mencapai kekerasan dan keuletan yang diinginkan.

## **2.3 Proses dasar pengelasan**

Perkembangan penggunaan metode pengelasan di bidang konstruksi, seperti kapal, jembatan, rangka baja, bejana tekan, pipa berkecepatan tinggi, jaringan pipa, kendaraan kereta api, dan lain-lain, sangat luas. Pengelasan dapat digunakan untuk perbaikan seperti mengisi lubang pada coran, menebalkan bagian yang aus, dan lain-lain (Wiryosumarto & Okumura, 2008).

Pengelasan adalah proses penyambungan dua buah logam menjadi satu sampai logam tersebut mengkristal kembali tanpa menggunakan bahan tambahan atau energi panas berupa pengenceran bahan yang dilas. Tergantung pada pekerjaan yang dilakukan, pengelasan dibagi menjadi:

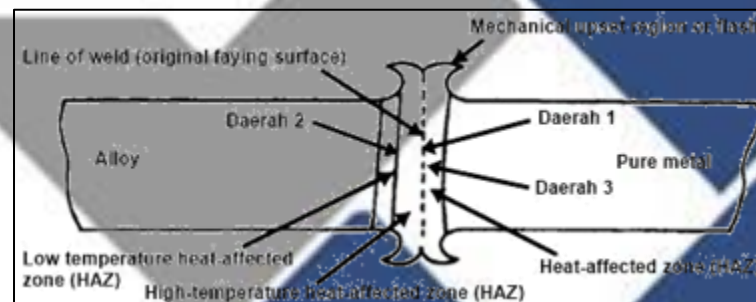
1. Pengelasan fluida adalah pengelasan fusi logam yang harus dihubungkan dengan sumber panas busur listrik atau sumber gas pembakaran.
2. Pengelasan tekan adalah pengelasan dimana sambungan dipanaskan kemudian ditekan hingga menyatu.
3. Pematrian adalah paduan logam dengan titik leleh rendah, dan bahan dasarnya tidak meleleh karena digunakan untuk sambungan las yang diikat (Wiryosumarto & Okumura, 2008).

## **2.4 Las gesek (*Friction Welding*)**

Banyak penelitian telah dilakukan pada pengelasan gesek. Beberapa penelitian terkait nilai kekuatan tarik, uji impak, dan kekerasan las telah dilakukan.

Oleh karena itu, pembahasan dalam *literature review* ini difokuskan untuk mendapatkan data tekanan gesek dan hasil *joint* dari metode las gesek.

Las gesek adalah proses pengelasan tanpa logam pengisi. Metode ini didasarkan pada konversi energi mekanik menjadi energi panas dengan pengelasan, pembentukan tanpa menggunakan logam pengisi dari sumber panas yang berbeda. Panas las dihasilkan oleh gerakan relatif dari dua benda kerja yang terhubung. Sambungan terjadi antara dua permukaan Standar yang digunakan dalam menyesuaikan dari industri yang menerapkannya. Namun, secara global acuan utama adalah ISO 15620 terkait (*friction welding of metallic materials*). Lalu, ada pula beberapa Standar Nasional dari berbagai negara seperti ANSI/AWS C6.1 – 1989 milik USA dan JIS Z 3607 (1994) friction welding of carbon steels milik Jepang (Prasetyono & Subiyanto.M.S.c, 2012).



Gambar 2.1 Daerah Las Gesek (H.Amanto & B.T.Wibowo, 2006)

Berdasarkan daerah pada pengelasan gesek di bagi menjadi 3 daerah pengelasan yaitu : Daerah 1 : daerah gesekan (*friction phase*), Daerah 2 : daerah berhenti (*breaking phase*), Daerah 3 : daerah penempaan / tempa (*forging phase*). Daerah 1 adalah daerah gesekan merupakan daerah dimana dua buah logam di gesekan untuk meningkatkan temperatur. Waktu yang di butuhkan cukup besar dibandingkan daerah lainnya. Daerah 2 adalah daerah berhenti dimana pada daerah ini durasi waktu harus secepat mungkin supaya temperatur panas tidak hilang. Daerah 3 merupakan daerah penempaan/tempa dimana pada daerah ini diberi gaya tertentu dan diberi waktu saat penempaan berlangsung

Bahan bergesekan satu sama lain, satu berputar dan yang lain diam, kemudian kontak di bawah aksi gaya tekan aksial. Gesekan antara dua permukaan

kontak berlangsung terus menerus, sehingga panas yang dihasilkan oleh gesekan terus meningkat hingga mencapai suhu leleh logam dan standar suhu pada pengelasan gesek 1400°C, sehingga terjadi flash. Pengelasan berlangsung ketika kompresi dan panas diterapkan pada kedua sisi sampai pertemuan kedua bahan mencapai titik leleh (D.D.Kautz, 1983).

Parameter penting dalam proses pengelasan gesek adalah tekanan gesek (Pf), waktu gesek (tf), tekanan tempa (Pu), waktu tempa (tu) dan kecepatan putar (s) selama proses penyambungan, dan plastisitas. deformasi terjadi selama proses penyambungan. Deformasi plastis terjadi karena tekanan tempa, dan proses difusi terjadi karena pemanasan yang kuat dalam proses pengelasan. Deformasi plastis adalah pembentukan logam yang ukuran atau bentuk logamnya tidak dapat kembali ke keadaan semula (Suryadi, 2020).

Table 2.1 Suhu standar pengelasan

No	Logam dan Oksida Logam	Suhu Lebur (°C)
1	Aluminium	657
2	Aluminium Oxide	2020-2050
3	Besi	1535
4	Besi Tuang Kelabu	1200
5	Baja Karbon Rendah	1500
6	Baja Karbon Tinggi	1300-1400
7	Tembaga	1083
8	Brass	850-900
9	Zinc	419
10	Oksida Zinc	1800
11	Oksida Tembaga	1236
12	Tin Bronze	850-950
13	FeO	1370
14	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1565
15	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	1527

#### 2.4.1 Kelebihan dan kekurangan las gesek (*friction welding*)

Dibandingkan dengan proses penyambungan las gesek (*friction welding*) memiliki beberapa keunggulan. Keunggulan dari pengelasan gesek ini adalah:

1. Tidak diperlukan logam pengisi dalam proses pengelasan.
2. Pengelasan gesekan tidak memerlukan fluks atau logam pengisi dan gas.
3. Kemungkinan inklusi terak dan porositas dapat dihindari.
4. Sangat cocok untuk produksi massal.

5. Lebih ramah lingkungan karena tidak menghasilkan asap atau gas.
6. Mengurangi tenaga kerja, biaya pemeliharaan, meningkatkan produktivitas dan mengurangi biaya alat yang mudah rusak.
7. Kontrol toleransi las dengan hati-hati.
8. Dimungkinkan untuk menggabungkan dua bahan dengan sifat yang berbeda.

Namun, metode pengelasan gesekan juga memiliki kelemahan sebagai berikut:

1. Objek yang ditautkan harus simetris.
2. Salah satu bahan yang akan disambung harus memiliki sifat deformasi plastis.
3. Batasan bentuk yang dapat dilas.

#### 2.4.2 Aplikasi Las Gesek

Salah satu hasil pengaplikasian sambungan dari pengelasan gesek, dengan menggunakan dua logam yang berbeda *dissimilar*. Seperti ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 aplikasi pengelasan gesek metode rotary ada pada Cylinder  
(Prasetyono & Subiyanto.M.S.c, 2012)

#### 2.4.3 Variabel-variabel Proses Pada Las Gesek

Parameter variabel-variabel proses pengelasan mesin las gesekan dijelaskan sebagai berikut:

1. Kecepatan putaran adalah kecepatan spindel saat benda kerja dicengkeram selama pengelasan. Dalam proses pengelasan gesekan, hanya satu benda kerja yang berputar dan yang lainnya tidak (Sai'in, 2016).
2. Kecepatan putar, gaya penekanan, dan waktu pengelasan adalah parameter kunci yang diperlukan untuk menggabungkan panas dan tekanan untuk membentuk lasan untuk mendapatkan las yang baik. Parameter ini disesuaikan



sehingga antarmuka yang dipanaskan mencapai kisaran suhu ulet di mana pengelasan dimungkinkan. Setelah kedua permukaan dipanaskan, tekanan aksial diterapkan untuk menggabungkan dua permukaan las. Pada tahap akhir dari proses pengelasan, kedua permukaan bersentuhan dengan difusi atom, membentuk ikatan logam antara dua benda kerja (Satyadianto, 2015).

## 2.5 Mesin Bubut

Mesin bubut adalah mesin pemotong logam yang memegang benda kerja dan membuat gerakan rotasi dasar yang berputar pada suatu sumbu sementara pahat bergerak sepanjang benda kerja untuk membentuk bentuk kekerasan. Dalam pengelasan gesek, alat bubut digunakan sebagai alat untuk melakukan proses pengelasan gesek dengan menggunakan putaran spindel pada mesin bubut, dan geser digunakan sebagai pengukur jarak dorong dalam proses pengelasan gesek. dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Mesin Bubut merek Krisbow Polman Babel

### 2.5.1 Kecepatan Putar (Revolution per Menit – RPM)

Kecepatan putar mesin bubut adalah kemampuan mesin bubut untuk memotong putaran per menit. Dalam las gesek kecepatan putar merupakan salah satu parameter penting dalam pengelasan yang mempengaruhi hasil dari pengelasan gesek tersebut. *Chuck* merupakan salah satu bagian dari mesin bubut yang berputar tergantung dari kecepatan putar yang digunakan. Pada pengelasan ini salah satu benda kerja akan dipasangkan pada *chuck* sebagai bagian yang berputar untuk

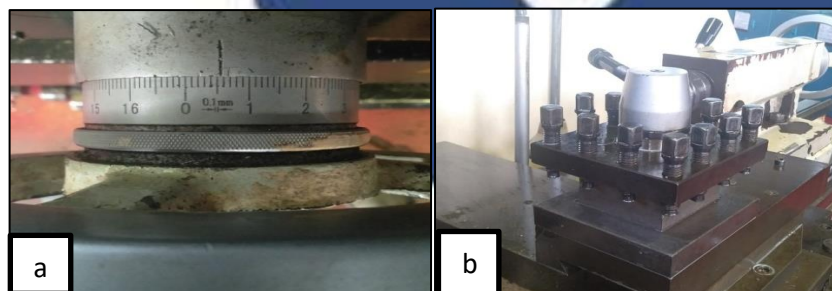
dilakukan gesekan ke benda kerja lainnya sesuai kecepatan putar yang telah ditentukan yang dapat di lihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 *Chuck* pada mesin bubut merek krisbow Polman Babel

### 2.5.2 Eretan

Eretan merupakan salah satu bagian utama dari mesin bubut. Pada eretan terdapat tool post sebagai tempat dudukan pahat bubut, pada pengelasan gesek tool post digunakan sebagai tempat dudukan benda kerja yang akan dilakukan proses pengelasan gesek. Eretan pada pengelasan gesek berfungsi sebagai penentu jarak penekanan pada saat proses pengelasan gesek, dimana eretan pada mesin bubut memiliki skala nonius dengan ketelitian  $1 \text{ div} = 0,1 \text{ mm}$ , dengan satu kali putaran penuh eretan menghasilkan jarak 17 mm dan dapat di lihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 (a) Divisi pada eretan, dan (b) *tool post* pada

Mesin bubut merek krisbow Polman Babel

### 2.6 Pengujian Impak

Sejarah pengujian impak dikembangkan pada 1905 oleh ilmuwan Perancis Georges Charpy kemudian pengujian digunakan pada masa Perang Dunia ke II, karena ketika itu banyak terjadi fenomena patah getas yang dialami pada sambungan las kapal – kapal perang dan tanker – tankernya. Uji impak merupakan



pengujian yang menggunakan beban cepat. Pada pengujian mekanik terdapat perbedaan jenis beban yang diberikan pada material, uji tarik, uji tekan, dan uji torsi adalah pengujian yang menggunakan beban statis. Pengujian dampak menggunakan beban dinamis. Proses penyerapan juga terjadi, juga dikenal sebagai pemuatan cepat atau pemuatan kejut. Proses Penyerapan Energi ini diubah menjadi berbagai reaksi terhadap material, seperti deformasi plastis, efek histeris, efek gesekan dan inersia (R.Pramono, 2016).

## 2.7 Jenis-jenis metode uji impact

Metode uji impact ini terdiri dari beberapa jenis antara lain sebagai berikut:

### A. Metode Charpy

Uji impact dengan memfokuskan benda uji dengan posisi horizontal dan arah beban berlawanan dengan arah tekanan (R.Pramono, 2016). Kelebihan dari metode *charpy* ini adalah:

1. Hasil tes lebih akurat.
2. Tugas lebih mudah dipahami dan dilakukan.
3. Menghasilkan tegangan uniform di sepanjang penampang
4. Waktu tes lebih singkat.

Sementara itu kekurangan dari metode *charpy* ini adalah sebagai berikut:

1. Hanya dapat dipasang pada posisi horizontal
2. Specimen dapat bergeser dari tumpuan karna tidak dicekam
3. Pengujian hanya dapat dilakukan pada specimen yang kecil.

Untuk menghitung energi yang diserap dapat dihitung dengan rumus di bawah ini:

$$E = m.g(h_0 - h_1) \dots \dots \dots (2.1)$$

$$h_0 = l (1 - \cos \theta) \dots \dots \dots (2.2)$$

$$h_1 = l (1 - \cos \phi) \dots \dots \dots (2.3)$$

Keterangan:

$E$  = energi yang diserap (joule)

$m$  = massa pendulum (kg)

$g$  = percepatan gravitasi ( $9,8 \text{ m/s}^2$ )

$h_0$  = jarak awal pendulum dan material uji (m)

$h_1$  = jarak akhir pendulum setelah diayunkan (m)

$\cos\beta$  = sudut setelah pendulum menabrak benda kerja

$\cos\alpha$  = sudut awal sebelum pendulum diayunkan

Untuk menghitung harga impak atau HI pada dihitung dengan rumus dibawah ini.

$$HI = E/A \dots \dots \dots (2.4)$$

Keterangan

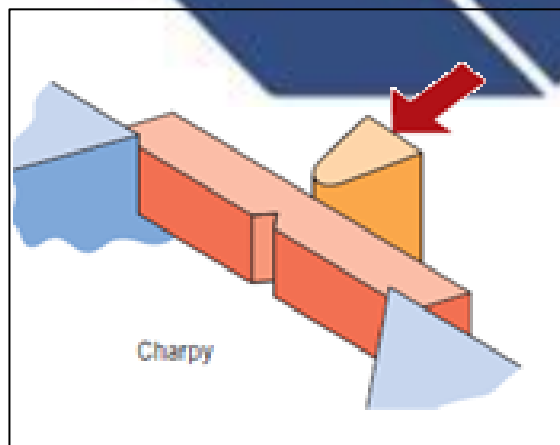
HI= Harga impak

$E$ = Energi yang diserap dalam satuan (joule)

$A$ = Luas penampang takik dalam satuan  $\text{mm}^2$

$$A = P \times L \dots \dots \dots (2.5)$$

$$A = 7\text{mm} \times 5\text{mm} = 35\text{mm}^2$$



Gambar 2.6 Uji Impak Metode Charpy (R.Pramono, 2016)

## B. Metode *Izod*

Merupakan pengujian impact dengan meletakkan posisi dari uji coba specimen pada tumpuan dengan posisi pembebanan searah dengan arah tekikan (R.Pramono, 2016). Pada umumnya metode *izod* banyak digunakan di wilayah amerika

Kelebihan metode *izod* ini antara lain adalah sebagai berikut:

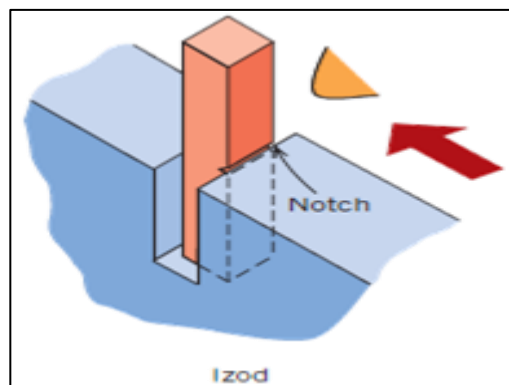
1. Tumbukan tepat pada titik specimen tidak akan medah bergeser karna salah satu ujung nya dicekam.
2. Dapat menggunakan specimen dengan ukuran lebih besar.

Kekurangan dari metode *izod* ini antara lain adalah sebagai berikut:

1. Biaya pengujian dari metode *izod* ini lebih mahal.
2. Pembebanan yang dilakukan hanya pada ujungnya saja sehingga hasil yang diperoleh kurang baik.
3. Hasil perpatahannya kurang baik
4. Waktu yang digunakan cukup panjang karna prosedur pengujian dari metode *izod* ini yang banyak.

Adapun tujuan dari pengujian impact test ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui pengaruh beban dampak terhadap sifat mekanik material.
2. Mengetahui standar prosedur pengujian dampak.
3. Mengetahui faktor yang memengaruhi kegagalan material dengan beban dampak.
4. Mengetahui kemampuan material terhadap beban dampak dari berbagai temperatur yang di ukur.



Gambar 2.7 Uji Impak Metode *Izod* (R.Pramono, 2016)

## 2.8 Penelitian sebelumnya

Penelitian terdahulu sebagai perbandingan pada penelitian las gesek yang akan dilakukan.

Penelitian dilakukan pada mesin las gesek dengan variasi waktu gesekan 35 detik, 45 detik, 55 detik dan 65 detik. Parameter proses pengelasan gesek adalah kecepatan putar 4215 rpm, tekanan gesek 127,27 kgf/cm<sup>2</sup> dan tekanan tempa 1018,18 kgf/cm<sup>2</sup>. Spesimen terbuat dari baja karbon ST60. Prototipe yang dihasilkan menjadi sasaran pengujian metalografi dan pengujian properti mekanik. Sifat mekanik meliputi pengujian kekuatan tarik, pengujian kekerasan sambungan dan pengujian kekuatan puntir. Analisis dilakukan dengan mengkaji perubahan struktur mikro dan sifat mekanik sebagai dasar pertimbangan sebagai alternatif proses pembuatan produk dengan pegas. Perubahan struktur mikro ini terjadi karena panas yang dihasilkan sesuai dengan waktu gesekan dan pengaruh proses penempaan berbeda. Pemanasan terbesar terjadi pada waktu gesekan 45 detik. Waktu tahan lebih lama dari 45 detik menghasilkan panas yang cenderung berkurang. Pengurangan ini disebabkan oleh efek gesekan dari dua bagian yang terbuat dari baja ST60. Sifat mekanik tertinggi dalam hal kekuatan tarik 414,54 N/mm<sup>2</sup>, kekuatan torsi 16 kgf.m, kekerasan logam las 45,5 HRA, HAZ 43 HRA dicapai pada proses pengelasan gesekan dengan waktu gesekan 45 detik. Oleh karena itu, pin pegas terbalik dapat diproduksi menggunakan proses pengelasan gesekan ini, dan proses ini dapat digunakan sebagai alternatif dari proses yang digunakan selama ini. Meskipun memiliki banyak keuntungan, pengelasan gesek juga memiliki kelemahan seperti bahan berbentuk kotak, persegi panjang, dan bahan yang digunakan hanya untuk tujuan tertentu karena ikatan yang buruk (Husodo, 2013).

Banyak penelitian yang telah dilakukan untuk mengetahui dan membahas tentang sifat material dan sambungan pengelasan gesek melakukan sebuah penelitian tentang “pengaruh durasi gesek, tekanan gesek dan tekanan tempa terhadap uji impact pada sambungan las gesek langsung pada baja karbon AISI 1045”. Penelitian tersebut menggunakan variasi variable sebagai berikut: tekanan gesek (5,98 MPa, 11,96 MPa, 17,94 MPa), putaran mesin dibuat konstan (4124

Rpm), waktu gesek 70 detik, 90 detik), dan tekanan gesek (23,93 MPa, 33,5 MPa, 52,64 MPa). Hasil penelitian tersebut menyimpulkan bahwa semakin bertambahnya tekanan gesek serta tekanan upset akan membuat ikatan lasan menjadi semakin baik, hal ini juga dibuktikan dengan pengujian struktur mikro dimana terdapat banyak struktur mikro berupa perlit.

Melakukan penelitian tentang “pengujian sifat mekanik dan struktur mikro pada sambungan pengelasan gesek sama jenis baja ST60, sama jenis AISI 201 dan beda jenis baja ST60 dengan AISI 201”. Dari penelitian nya tersebut menunjukkan hasil pengujian tarik maksimal pengelasan sama jenis baja ST60 terjadi pada kecepatan putar sebesar 3350 rpm, waktu gesek 10 detik waktu tempa 2 detik, tekanan gesek 2,757 Mpa dan tekanan tempa 4,136 Mpa menghasilkan temperatur pengelasan sebesar 539,7 dengan kekuatan tarik 5 670,78 Mpa dan kekuatan luluh sebesar 417,99 Mpa atau 102,97% dari logam induk baja ST60 sebesar 651,39 Mpa (Laksono & Sugiyanto, 2014).

Pengelasan gesek adalah pengelasan solid-state tanpa menggunakan logam pengisi dengan menggunakan metode tekanan dimana dua benda kerja yang akan disambung ditempatkan dalam kontak dan diatur gerakan relatif dalam tekanan, maka gesekan akan membangkitkan panas disekitar permukaan kontak, ketika sudah mencapai temperatur tempa maka diberikan tekanan tempa. tetapi proses pengelasan ini pada dasarnya sangat dipengaruhi oleh kecepatan putaran, durasi gesekan dan tekanan aksial (gesek, tempa). Dalam penelitian ini dilakukan pengelasan gesek langsung. Proses yang dilakukan adalah dengan memvariasikan tekanan gesek sebesar 8 MPa, 14 MPa, dan 20 MPa dalam waktu gesekan 60 detik, 80 detik, dan 100 detik sampai mencapai temperatur tertentu, kemudian diberikan variasi tekanan tempa sebesar 30 MPa, 40 MPa, 60 MPa dengan menggunakan baja AISI 4140 sebagai benda kerja, kecepatan putar yang digunakan 4500 Rpm. Efek dari tekanan gesek, tekanan tempa dan durasi gesekan terhadap impact strength dianalisa melalui uji impact. Dari penelitian ini didapat Kekuatan impact tertinggi diperoleh pada kombinasi parameter durasi gesek 100 detik, dengan tekanan gesek 20 MPa dan tekanan tempa 60 MPa yaitu sebesar 0,3228017 J/mm<sup>2</sup>. Kekuatan impact terendah diperoleh pada kombinasi parameter

durasi gesek 60 detik, dengan tekanan gesek 8 MPa dan tekanan tempa 30 MPa yaitu sebesar 0,0420214 J/mm<sup>2</sup>. Perubahan tekanan gesekan, durasi gesek, dan tekanan tempa mempengaruhi temperatur pengelasan. Temperatur Pengelasan tertinggi adalah 1075°C. Dari ketiga parameter yang di variasikan, parameter tekanan gesek paling berpengaruh terhadap kekuatan impact sambungan las direct friction welding (Satyadianto, 2015).

Pengelasan gesek adalah pengelasan *solid state* tanpa menggunakan logam pengisi dengan menggunakan metode tekanan dimana dua benda kerja yang akan disambung ditempatkan dalam kontak dan diatur gerakan relatif dalam tekanan, maka gesekan akan membangkitkan panas disekitar permukaan kontak, ketika sudah mencapai temperatur tempa maka diberikan tekanan tempa. tetapi proses pengelasan ini pada dasarnya sangat dipengaruhi oleh kecepatan putaran, durasi gesekan dan tekanan aksial gesek tempa. Dalam penelitian ini dilakukan pengelasan gesek langsung agar mempunyai sifat mekanik yang diinginkan. Proses yang dilakukan adalah dengan memvariasikan tekanan gesek sebesar 5.98 MPa, 11.96 MPa, dan 17.94 MPa dalam waktu gesekan 70 detik dan 90 detik sampai mencapai temperatur tertentu, kemudian diberikan variasi tekanan tempa sebesar 23.93 MPa, 33.5 MPa, 52.64 MPa dan menggunakan baja AISI 1045 sebagai benda kerja, kecepatan putar yang digunakan 4124 Rpm. Efek dari tekanan gesek, tekanan tempa dan durasi gesekan saat pengelasan yang bervariasi akan mempengaruhi kekuatan impact las gesek langsung. Sambungan lasan material AISI 1045 memiliki kekuatan impak yang semakin meningkat seiring dengan penambahantekanan gesek dan tekanan tempa, sehingga dapat membuat ikatan sambungan lebih baik. Karena weld metal mendapatkan input panas yang paling tinggi dan pada saat pendinginan ukuran butir yang terbentuk kecil. Struktur mikro pada base metal tidak terjadi banyak perubahan, sedangkan untuk daerah HAZ yang dekat dengan weld metal struktur mikronya berupa ferrit dan pearlit dengan dominasi perlit grain size kasar. Untuk weld metal sendiri struktur mikronya berupa ferrit dan pearlit halus. Perubahan yang terlihat adalah banyak terdapat perlit sehingga akan menaikkan kekerasan dan kekuatan dengan semakin baiknya ikatan pada sambungan (Prasetyono & Subiyanto.M.S.c, 2012)



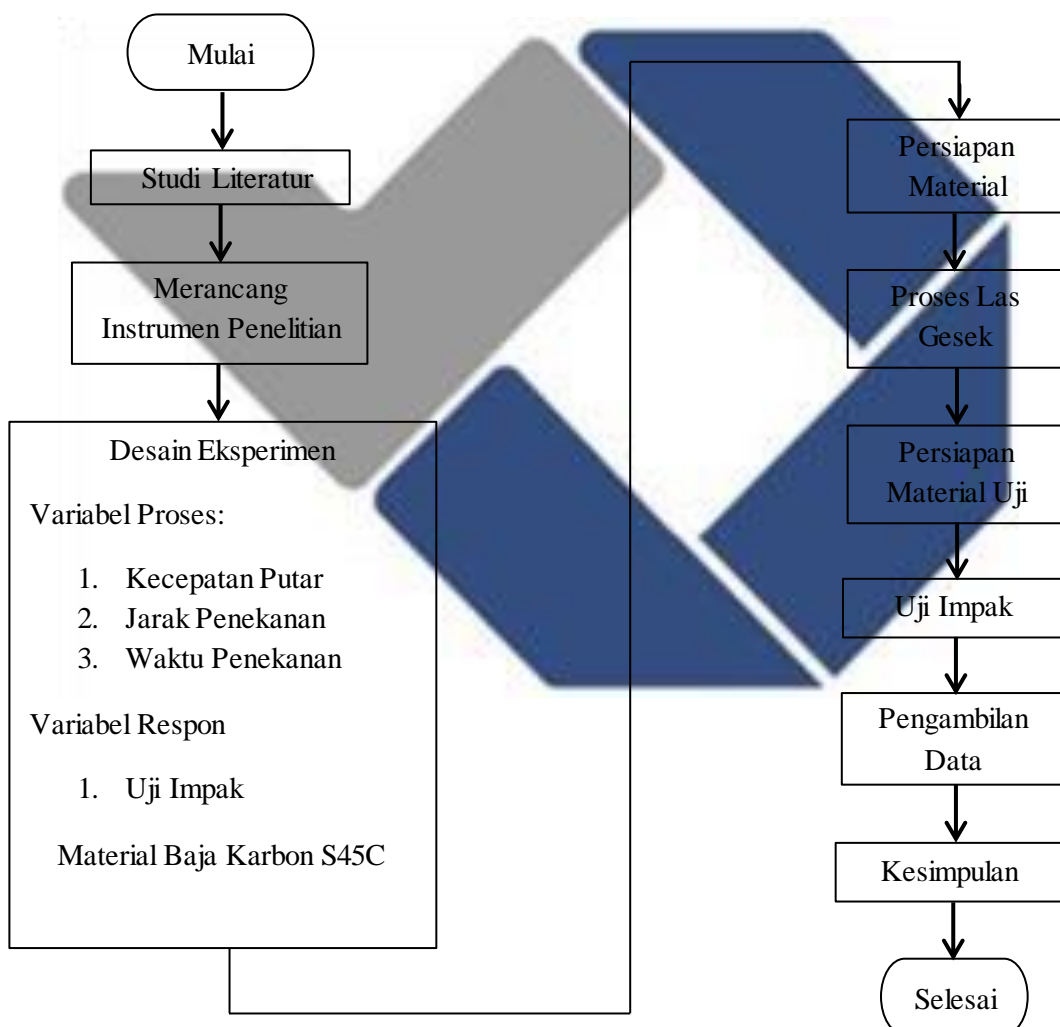
### BAB III

#### METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode eksperimen untuk mengetahui kekuatan impak pada poros S45C menggunakan las gesek (*friction welding*) skema system metodologi penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.1.

#### 3.1 Diagram Alir

Berikut ini adalah diagram alir yang menggambarkan proses alur penelitian



Gambar 3.1 Skema Diagram Alir Penelitian

### 3.1.1 Studi Literatur

Dalam penelitian ini data-data di dapatkan dari sumber pustaka seperti karya ilmiah, jurnal, dan buku.

### 3.1.2 Merancang Instrumen Penelitian

Parameter yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

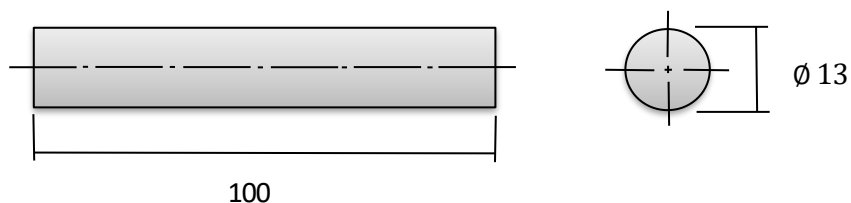
1. Kecepatan Rpm yang ditentukan untuk pengelasan gesek (*friction welding*) 720 Rpm.
2. Jarak penekanan yang ditentukan adalah 3 mm, 4 mm, 5 mm
3. Waktu pengelasan yang digunakan tetap yaitu 5 menit
4. Mesin yang digunakan adalah mesin bubut
5. Menggunakan baja karbon poros S45C

Benda kerja yang digunakan adalah baja karbon poros S45C dengan diameter  $\varnothing 13 \text{ mm}$  dan panjang 100 mm. Pengelasan ini dilakukan menggunakan dengan tipe pengelasan gesek (*friction welding*). Pengelasan ini dilakukan dengan menggunakan mesin bubut doall dan proses pengerjaan nya akan direkam dengan kamera perekam. Setelah proses pengelasan dilakukan akan dilakukan pengujian impak dimana hasil dari pengelasan tadi akan di uji impak untuk mengetahui kekuatan impak nya setelah melakukan proses pengelasan.

### 3.1.3 Persiapan material

1. Persiapan material

Persiapan untuk material untuk melakukan proses pengelasan gesek (*friction welding*) adalah menggunakan poros baja karbon S45C dengan kandungan karbon 0,50 % Material ini memiliki dimensi  $\varnothing 13 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  yang tertera pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Gambar Awal Poros Baja Karbon S45C



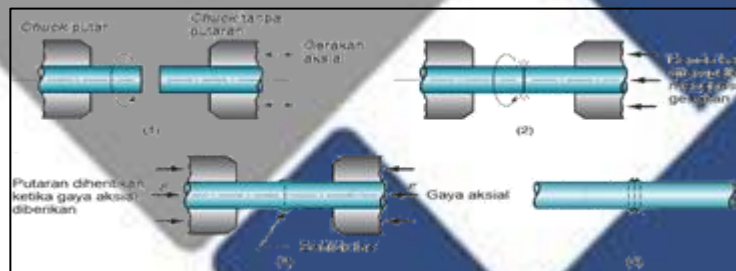
## 2. Persiapan alat

Adapun alat-alat yang diperlukan dalam proses pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut dan Peralatan dan Mesin yang digunakan untuk proses pengelasan gesek (*friction welding*) dapat dilihat pada lampiran 2 hal 36.

1. Mesin bubut merek Krisbow
2. Mesin uji impact
3. Mata pahat Karbida
4. Stopwatch
5. Jangka sorong
6. Thermogun

### 3.1.4 Proses las gesek

Penelitian ini melakukan percobaan terhadap benda kerja yang akan dilakukan pengeujian dengan menggunakan pengeujian impact.

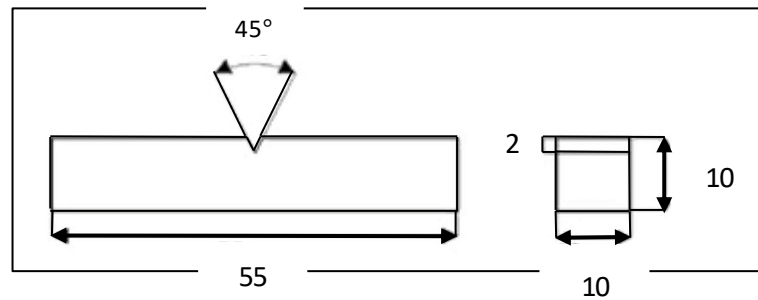


Gambar 3.3 Pengelasan Gesek *Friction Welding*

(<http://jurnal mahasiswa.unesa.ac.id>, n.d.)

### 3.1.5 Pengeujian impact

Pengeujian impact ini akan dilakukan setelah melakukan proses pengelasan gesek pengeujian impact ini melakukan metode *charpy*. Pembuatan spesimen pada benda kerja hasil pengelasan disesuaikan dengan Standar Uji Impact ASTM E23. (*American Standard Testing & Material Section E No 23*) dengan metode *charpy impact test*. Analisis dan pengeujian impact yang dilakukan untuk mendapatkan nilai dari hal yang diperoleh dari pengeujian impact Maka yang awalnya benda kerja berbentuk poros dengan ukuran  $\varnothing 13 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , diubah menjadi bentuk balok dengan ukuran  $55 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  dengan kedalaman takik 2 mm, dan sudut takik



Gambar 3.4 Ukuran Spesimen Standar Uji Impact (H.Amanto & B.T.Wibowo, 2006)

### 3.1.6 Analisis contoh pengambilan data

Menganalisis hasil proses pengujian yaitu, untuk mengetahui kekuatan uji impact pada baja karbon poros S45C setelah melakukan proses pengelasan dengan menggunakan metode las gesek. Untuk memperjelas proses penelitian ini dapat dilihat pada proses sistematis uji coba pengelasan gesek, berikut adalah contoh tabel data dari hasil uji coba pengelasan gesek, yang ada di tabel 3.1.

Tabel 3.1 Contoh Data Hasil Uji coba Las Gesek *Friction Welding*

No Spesimen	Putaran spindel (rpm)	Waktu gesek (menit)	Jarak penekanan (mm)
1			3
2			3
3			3
4			4
5	720	5 menit	4
6	Rpm		4
7			5
8			5
9			5

### 3.1.7 Kesimpulan

Dari hasil analisis dan uji coba maka diambil kesimpulan dari setiap hasil tersebut.

## BAB IV PEMBAHASAN

### 4.1 Rancangan Eksperimen

Berikut merupakan rancangan eksperimen penelitian yang akan dilakukan. Dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Rancangan Eksperimen Penelitian

Jenis Pengelasan	Variabel Proses			Variabel Respon	Material
	RPM	Waktu gesek	Jarak penekanan		
Las Gesek ( <i>Friction Welding</i> )	720 Rpm	5 Menit	3 mm	Uji Impak Metode <i>Charpy</i>	Baja Karbon Sedang S45C
			4 mm		
			5 mm		

### 4.2 Waktu dan Tempat Penelitian

#### 4.2.1 Waktu Penelitian

Lama pelaksanaan tugas akhir ini adalah di mulai dari bulan Agustus 2021 sampai dengan Desember 2021.

#### 4.2.2 Tempat Penelitian

Lokasi pelaksanaan tugas akhir ini akan dikerjakan di laboratorium Teknik Mesin Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung yang beralamatkan di Kawasan Industri Air Kantung Sungailiat 33211 Bangka Provinsi Bangka Belitung.

### 4.3 Persiapan Material dan Alat Untuk Las Gesek

Material dan alat yang digunakan untuk proses pengelasan gesek pada penelitian ini Peralatan dan Mesin yang digunakan untuk proses pengelasan gesek dapat dilihat pada lampiran 2 hal 36 :

1. Alat :

- Mesin Bubut merek Krisbow
- Thermogun

- V-Block
- Plat
- Kacamata
- Pahat bubut Karbida
- Stopwatch
- Jangka sorong

2. Material Poros Baja Karbon S45C.

#### 4.4 Proses Pengelasan

Proses pengelasan dilakukan pada mesin bubut dengan satu putaran spindle. Prosesnya dimulai dengan pemasangan benda kerja dengan dimensi  $\varnothing 13 \times 100$  mm pada *chuck* dan dudukan pahat, kemudian kedua permukaan benda kerja harus sejajar. Kemudian lakukan proses pengelasan sesuai dengan rancangan penelitian yang telah dibuat.

##### 4.4.1 Langkah-Langkah Proses Pengelasan Gesek :

1. Proses dimulai dari pemasangan benda kerja pada *chuck*, dan *tool post* pada mesin bubut.



Gambar 4.1 (a) Pemasangan benda kerja pada *Tool Post* dan (b) Pemasangan benda kerja pada *Chuck*

2. Satukan benda kerja sampai kedua permukaan bertemu, dan pastikan kedua benda kerja harus dalam posisi *center*, dan permukaan kedua spesimen rata.



Gambar 4.2 Benda kerja dalam posisi *center*

3. Lakukan proses pengelasan gesek hingga kedua permukaan benda kerja mencair, dan menyatu sesuai dengan rancangan eksperimen yang akan dilakukan.



Gambar 4.3 Proses pengelasan benda kerja

4. Proses penekanan

Pada proses ini benda kerja yang telah digesek akan mencair dan dilakukan penekanan sehingga terjadi penyambungan terhadap benda kerja yang terdapat pada gambar 4.4 di halaman 25 berikut ini.



Gambar 4.4 Proses terjadi penyambungan pengelasan benda kerja

#### 4.4.2 Hasil Pengelasan Gesek

Hasil pengelasan gesek dari proses yang telah dilakukan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 4.5.

Las Gesek ( <i>Friction Welding</i> )								
Jarak Penekanan 3 mm			Jarak Penekanan 4 mm			Jarak Penekanan 5 mm		

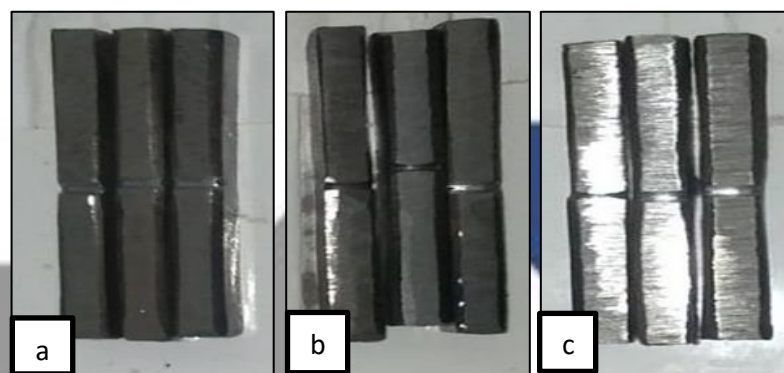
Gambar 4.5 Gambar Hasil Pengelasan Gesek

#### 4.5 Pembuatan Spesimen Uji

Pembuatan spesimen pada benda kerja hasil pengelasan disesuaikan dengan Standar Uji Impak ASTM E23. Maka yang awalnya benda kerja berbentuk poros dengan ukuran  $\varnothing 13 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , diubah menjadi bentuk balok dengan ukuran  $55 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  dengan kedalaman takik 2 mm, dan sudut takik  $45^\circ$ . Sedangkan pada penelitian ini benda kerja yang awalnya ukuran  $\varnothing 13 \text{ mm} \times 100$



mm dilakukan proses pengelasan gesek. setelah proses pengelasan gesek benda kerja dirapihkan dan dibubut menjadi  $\varnothing 10 \text{ mm} \times 55 \text{ mm}$  dan untuk membuat spesimen uji impact benda kerja digrinda berbentuk balok dengan ukuran  $55 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$  yang tertera pada gambar 4.7 pada halaman 27 berikut ini. dan tidak memungkinkan untuk dibuat menjadi standar spesimen uji impact dengan ukuran  $55 \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  maka dari itu ukuran benda kerja tidak mengikuti standar seperti pada gambar yang tertera di bab 3 halaman 21.



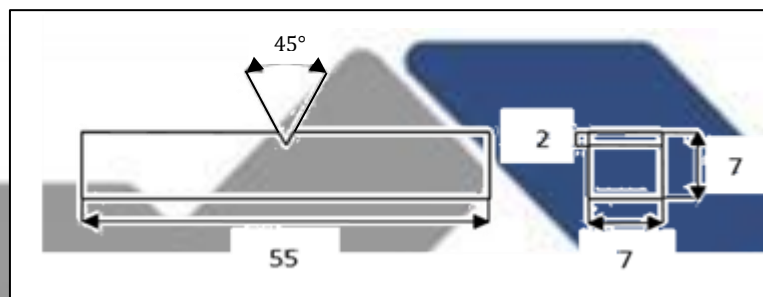
Gambar 4.6 Spesimen uji impact Jarak penekanan (a) 3 mm, (b) 4 mm, dan (c) 5 mm.

#### 4.6 Pengujian Impact

Pada pengujian impact ini proses yang akan dilakukan adalah uji impact metode *charpy* pada pengujian impact ini menggunakan dengan ukuran benda kerja uji yaitu  $55 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ . Untuk mengetahui nilai energi yang diserap dan harga impact hasil dari pengelasan yang dilakukan. Adapun proses dalam pengujian impact sebagai berikut:

1. Material : Poros Baja Karbon S45C
2. Dimensi :  $55 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$
3. Panjang lengan bandul = panjang titik ayun bandul dengan titik takik 0,75 meter
4. Alat Penguji : *TESTING MACHINE* metode *charpy* model JB-300B. Dengan kapasitas bandul 150 *Joule*.
5. Pastikan material yang akan diuji memiliki ukuran  $55 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$  dengan kedalaman takik 2 mm.

6. Letakkan material yang akan diuji pada landasan dengan arah takikan membelakangi datangnya lengan bandul.
7. Putar jarum penunjuk pada titik awal.
8. Lepaskan pengunci lengan bandul hingga menabrak material yang diuji.
9. Lakukan pengereman setelah lengan bandul mencapai ketinggian maksimum.
10. Kemudian catat hasil pengujian yang didapat.
11. Letakkan lengan bandul pada pada posisi semula sampai benar benar terkunci.
12. Lakukan proses yang sama seperti di atas untuk material uji selanjutnya.



Gambar 4.7 Gambar spesimen uji impak



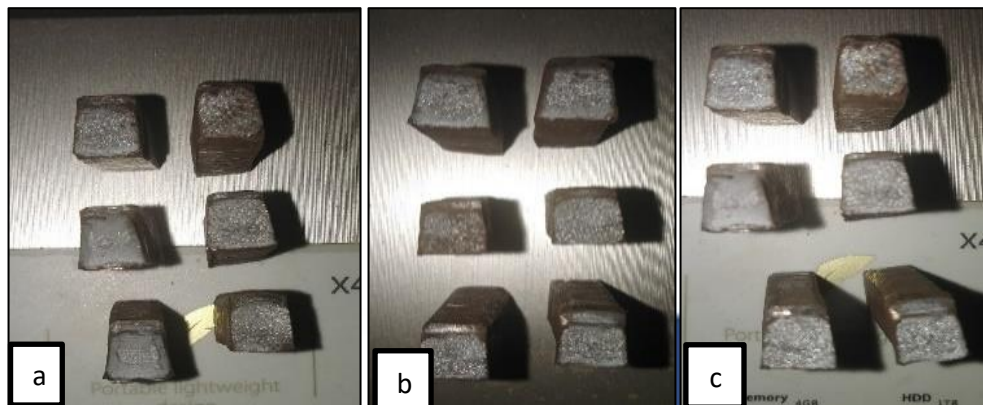
Gambar 4.8 Mesin uji impak Polman *TESTING MACHINE* metode *Charpy* model

JB-300B



#### 4.6.1 Analisis patahan spesimen uji impak

Berikut adalah patahan spesimen uji setelah dilakukan proses pengujian impak, dapat dilihat pada gambar 4.9.



Gambar 4.9 Patahan spesimen uji setelah pengujian impak dengan Jarak penekanan, (a) 3 mm,(b) 4 mm, dan (c) 5 mm

Dari hasil pengujian impak yang dilakukan terhadap patahan specimen uji impak setiap variasi jarak penekanan 3 mm,4 mm,5 mm pada pengelasan gesek (*friction welding*) terhadap baja karbon S45C adalah patah getas yang merupakan fenomena patah pada material yang diawali terjadinya retakan secara cepat di bandingkan patah ulet tanpa deformasi plastis terlebih dahulu dan dalam waktu yang singkat peristiwa patah getas dinilai lebih berbahaya dari patah ulet, karena terjadi tanpa disadari begitu saja. Dan biasanya patah getas terjadi pada material martensit, atau material yang memiliki komposisi karbon yang sangat tinggi.

Untuk menghitung hasil energi yang diserap dan hasil Harga Impak pada data di halaman 29 berikut ini dapat dihitung dengan rumus yang tertera pada bab 2 halaman 12 dan 13.

#### 4.6.2 Data Hasil Energi Yang Diserap

Hasil data energi yang diserap pada proses pengelasan gesek dengan jarak penekanan 3 mm, 4 mm, dan 5 mm pada spesimen 1 sampai 9 dapat dilihat pada tabel 4.2 di halaman 29 berikut. dan hasil perhitungan dari data pada halaman 29 berikut ini dapat dilihat pada lampiran 3 hal 39.

Tabel 4.2 Data Hasil Energi Yang Diserap

No Spesimen	Kecepatan Rpm	Waktu gesek (menit)	Jarak Penekanan (mm)	Energi Yang Diserap (Joule)	Rata-rata
1	720 RPM	5 Menit	3 mm	55,27	55,28
2			3 mm	51,65	
3			3 mm	58,92	
4			4 mm	62,64	62,63
5			4 mm	64,49	
6			4 mm	60,77	
7			5 mm	68,28	70,82
8			5 mm	70,18	
9			5 mm	74,01	

#### 4.6.3 Data Hasil Harga Impak

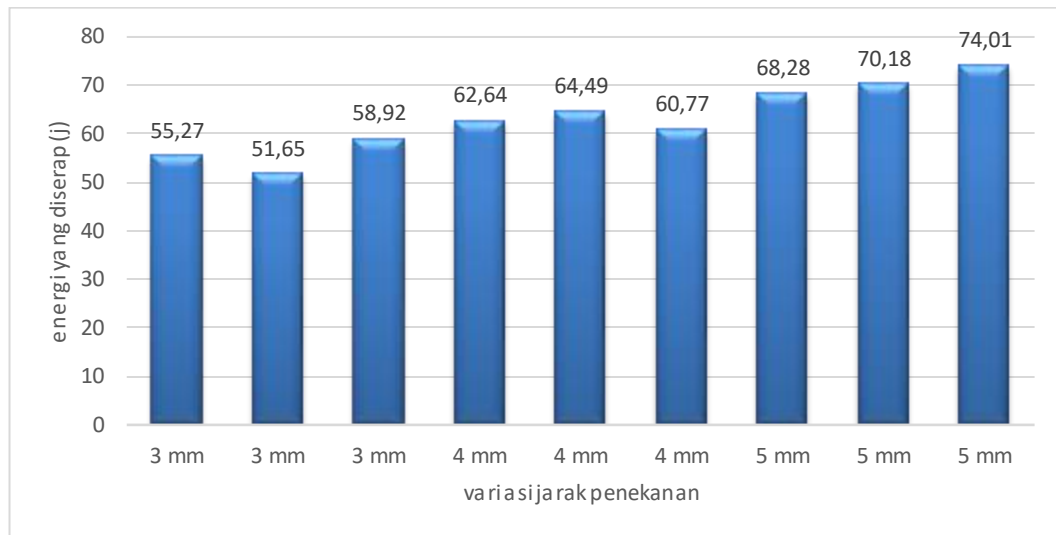
Hasil data harga impak pada proses pengelasan gesek, dengan Jarak penekanan 3 mm, 4 mm, dan 5 mm pada benda kerja 1 sampai 9 dapat dilihat pada tabel 4.3 dan hasil perhitungan dari data di bawah ini dapat di lihat pada lampiran 3 hal 39.

Tabel 4.3 Data Hasil Harga Impak

No. Spesimen	Kecepatan Rpm	Waktu gesek (menit)	Jarak Penekanan (mm)	Harga Impak (Joule/mm <sup>2</sup> )	Rata-rata
1	720 Rpm	5 Menit	3 mm	1,579	1,579
2			3 mm	1,475	
3			3 mm	1,683	
4			4 mm	1,789	1,789
5			4 mm	1,842	
6			4 mm	1,736	
7			5 mm	1,950	2,023
8			5 mm	2,005	
9			5 mm	2,114	

#### 4.7 Analisis Data

Berikut ini adalah diagram data hasil pengujian impact yang akan dilakukan analisis sebagai berikut :



Gambar 4.10 Diagram energi yang diserap terhadap Jarak penekanan 3 mm, 4 mm, dan 5 mm.

Pada gambar diagram di atas menunjukkan bahwa energi yang diserap pada 9 spesimen hasil pengujian impact pada pengelasan gesek dengan setiap variasi waktu gesek menghasilkan energi serapan yang berbeda, dan memiliki pengaruh pada kekuatan sambungan las. Nilai energi yang diserap tertinggi terdapat pada jarak penekanan 5 mm dengan nilai rata-rata energi yang diserap yaitu 70,82 *joule*, sedangkan jarak penekanan 4 mm menghasilkan nilai rata-rata energi yang diserap yaitu 62,63 *joule* nilainya lebih kecil dari pada jarak penekanan 5 mm, dan nilai terendah didapatkan pada jarak penekanan 3 mm dengan nilai rata-rata energi yang diserap yaitu 55,28 *joule*. Hal ini menunjukkan bahwa semakin lama jarak penekanan yang dilakukan pada saat proses pengelasan gesek, maka semakin tinggi nilai energi yang diserap.



Gambar 4.11 Diagram harga impact terhadap Jarak penekanan 3 mm, 4 mm, dan 5 mm.

Dari data diagram di atas menunjukkan bahwa harga impact hasil pengujian impact pada pengelasan gesek dengan variasi jarak penekanan 3 mm, 4 mm, dan 5 mm menghasilkan harga impact yang berbeda, yang memiliki pengaruh terhadap kekuatan sambungan las. Nilai tertinggi terdapat pada jarak penekanan 5 mm dengan nilai rata-rata harga impact yaitu  $2,023 \text{ joule/mm}^2$ , sedangkan jarak penekanan 4 mm menghasilkan nilai rata-rata harga impact lebih kecil dari jarak penekanan 5 mm yaitu  $1,789 \text{ joule/mm}^2$ , dan nilai terendah didapatkan pada jarak penekanan 3 mm dengan nilai rata-rata harga impact yaitu  $1,579 \text{ joule/mm}^2$ . Hal ini menunjukkan bahwa semakin lama jarak penekanan yang dilakukan pada saat proses pengelasan gesek, maka semakin tinggi nilai harga impact yang didapatkan.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang dilakukan memberikan hasil dan pembahasan data yang dilakukan mengenai pengaruh dari proses pengelasan gesek (*friction welding*) terhadap uji impak metode *Charpy*. Untuk sambungan las baja karbon poros S45C, sebagai berikut:

- Hasil energi yang diserap tertinggi yaitu pada jarak penekanan 5 mm dengan nilai rata-rata 70,82 *joule*, dan nilai terendah ada pada jarak penekanan 3 mm dengan nilai rata-rata 55,28 *joule*.
- Hasil harga impak tertinggi yaitu pada jarak penekanan 5 mm dengan nilai rata-rata 2,023 *joule/mm<sup>2</sup>*, dan nilai terendah ada pada jarak penekanan 3 mm dengan nilai rata-rata 1,579 *joule/mm<sup>2</sup>*.
- Dan dari kesimpulan hasil pengujian impak yang dilakukan terhadap pepatahan spesimen uji impak setiap variasi jarak penekanan 3 mm, 4 mm, dan 5 mm pada pengelasan gesek terhadap baja karbon S45C adalah patah getas yang merupakan fenomena patah pada material yang diawali terjadinya retakan secara cepat dibandingkan patah ulet tanpa deformasi plastis terlebih dahulu dan dalam waktu yang singkat peristiwa patah getas dinilai lebih berbahaya dari patah ulet, karena terjadi tanpa disadari begitu saja. Dan biasanya patah getas terjadi pada material martensit, atau material yang memiliki komposisi karbon yang sangat tinggi.

#### 5.2 Saran

Sebelum melakukan proses pengelasan gesek (*friction welding*) dan pengujian impak dianjurkan untuk melakukan pemeriksaan visual terhadap benda kerja supaya untuk menghindari penggunaan benda kerja yang cacat demi mendapatkan nilai yang signifikan.

## DAFTAR PUSTAKA

Amanto, H. & Wibowo, B., 2006. Pengertian dan macam-macam kandungan dari Baja Karbon.

*Materials Aso.* 2016. *Friction Welding in the Manufacturing of.* [Online] Available at: <http://www.azom.com/articleID=4606>.

[www.slideshare.net/surajaggarwal094/welding-lectures-1-3](http://www.slideshare.net/surajaggarwal094/welding-lectures-1-3). [Online].

D.D.Kautz, J. a., 1983. Lawrence Livermore Fundamentals of friction welding. In: Jakarta: ASM Handbook.

Edusainstek dkk, 2018. Pengaruh pengelasan friction welding. *Teknik Mesin*.

H.Amanto & B.T.Wibowo, 2006. *ASTM E23: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.* [Online] Available at: <https://archive.org/details/gov.law.astm.e23.1982> [Accessed 24 Agustus 2021].

<http://jurnalmahasiswa.unesa.ac.id>, n.d. [Online].

Husodo, N., 2013. Pengaruh kecepatan dan waktu las gesek friction welding. *Teknik Mesin*, Volume 6.

Laksono, H. W. & Sugiyanto, 2014. Analisis Hasil pengelasan Gesek Pada Sambungan Sama Jenis Baja St60 sama Jenis AISI dan Beda Jenis Baja St60. Volume 2.

Prasetyono, S. & Subiyanto.M.S.c, I. H., 2012. Pengaruh Durasi Gesek, Tekanan Gesek dan Tekanan Tempa terhadap Impact Strength sambungan Las Gesek langsung pada Baja Karbon AISI 1045. Volume 1.

R.Pramono, 2016. *pengertian pengujian impak metode charpy dan metode izod.* Medan: Jurnal Teknik Mesin.

Sai'in, A., 2016. Variabel-variabel Proses pada Las Gesek.

Santoso, e. a., 2012. Pengaruh las gesek frection welding. *Teknik Mesin*.

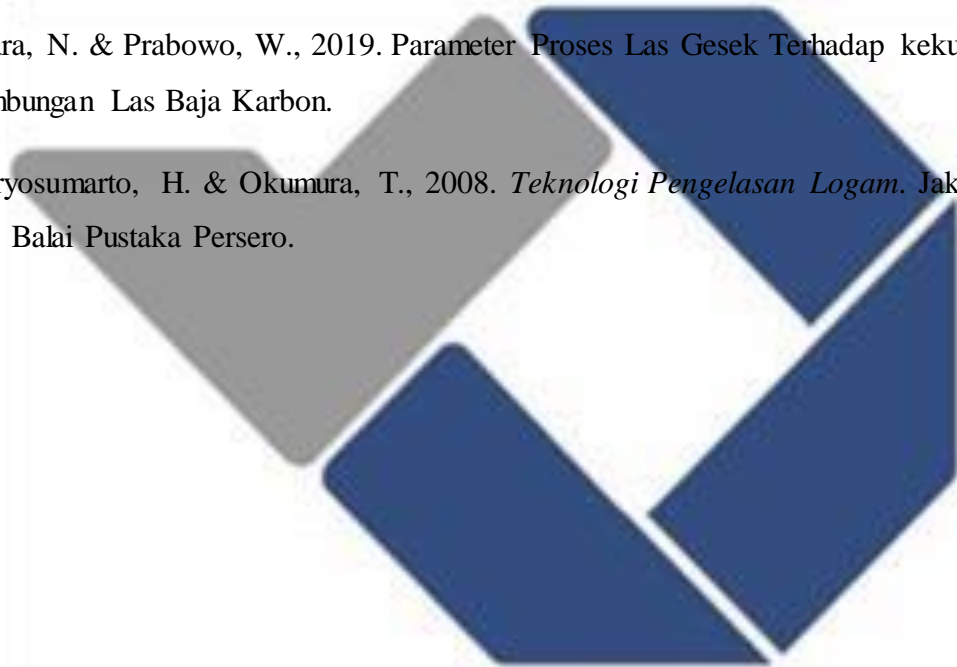
Satyadianto, D., 2015. Pengaruh Variasi Tekanan Gesek, Tekanan Tempa, dan Durasi Gesek terhadap kekuatan impak pada sambungan las gesek dengan menggunakan baja paduan AIS I4140.

Supardi, 1999. Pengujian Logam Baja Karbon.

Suryadi, 2020. Pengaruh Waktu Las Gesek Titik Terhadap Sambungan Lembaran Body mobil. *Jurnal Program Studi Ilmiah Magister Teknik Mesin*, Volume 10, pp. 1-8.

Ufara, N. & Prabowo, W., 2019. Parameter Proses Las Gesek Terhadap kekuatan sambungan Las Baja Karbon.

Wirjosumarto, H. & Okumura, T., 2008. *Teknologi Pengelasan Logam*. Jakarta: PT. Balai Pustaka Persero.





**Lampiran 1**  
**DAFTAR RIWAYAT HIDUP**



**1. Data Pribadi**

Nama Lengkap : Muhammad Rizqi Fadilah  
Tempat & Tanggal lahir : Sungailiat, 24 Mei 1999  
Alamat : Dsn. Urisan Jaya, Ds. Padang, kec. Manggar  
Kab.Belitung Timur, Prov. Bangka Belitung.  
Jenis Kelamin : Laki-laki  
Agama : Islam  
Telp : -  
Hp : 081368069328/083175360270  
E-mail : [muhammadrjr11@gmail.com](mailto:muhammadrjr11@gmail.com)

**2. Riwayat Pendidikan**

SD NEGERI 16 Manggar Lulus Tahun 2012  
SMP HARAPAN Sungailiat Lulus Tahun 2015  
SMK NEGERI 1 Manggar Lulus Tahun 2018  
POLMAN BABEL sampai dengan Selesai

**3. Riwayat Pendidikan Non Formal**

-

Sungailiat, 18 Januari 2022

Muhammad Rizqi Fadilah

## Lampiran 2

### Peralatan dan Mesin yang digunakan untuk proses pengelasan gesek (*friction welding*)



Gambar 1. Mesin bubut merek krisbow Politeknik Manufaktur negeri Bangka Belitung



Gambar 2. Infrared Thermometer 50°C – 1150°C



Gambar 3. Kacamata Bubut



Gambar 4. Pahat Bubut Karbida CNMG



Gambar 5. Stopwatch



Gambar 6. V-Block



Gambar 7. Plat



Gambar 8. Jangka Sorong

### Lampiran 3

#### Perhitungan Energi yang diserap dan Harga Impak

Dik :

$l$  : 0,75 m  
 $m$  : 15,3 kg  
 $g$  : 9,8 m/s<sup>2</sup>  
 $A$  : 35cm<sup>2</sup>  
 $\alpha$  : 150°  
 $\beta$  : 112°  
 $\beta$  : 114°  
 $\beta$  : 110°  
 $\beta$  : 108°  
 $\beta$  : 107°  
 $\beta$  : 109°  
 $\beta$  : 105°  
 $\beta$  : 104°  
 $\beta$  : 102°

Dit : HI ?

Jawab :

$h_0$  :  $l (1 - \cos \alpha)$   
 $h_0$  :  $0,75 (1 - \cos 150^\circ)$   
 $h_0$  :  $0,75 (1 - (-0,8660))$   
 $h_0$  :  $0,75 (1,8660)$   
 $h_0$  : 1,3995 m

$h_1$  :  $l (1 - \cos \beta)$   
 $h_1$  :  $0,75 (1 - \cos 112^\circ)$   
 $h_1$  :  $0,75 (1 - (-0,3746))$   
 $h_1$  :  $0,75 (1 + 0,3746)$   
 $h_1$  :  $0,75 (1,3746)$   
 $h_1$  : 1,0309 m

$h_1$  :  $l (1 - \cos \beta)$   
 $h_1$  :  $0,75 (1 - \cos 114^\circ)$   
 $h_1$  :  $0,75 (1 - (-0,4067))$   
 $h_1$  :  $0,75 (1 + 0,4067)$   
 $h_1$  :  $0,75 (1,4067)$   
 $h_1$  : 1,0550 m

$$\begin{aligned}
h_1 &: 1 (1 - \cos \beta) \\
h_1 &: 0,75 (1 - \cos 110^\circ) \\
h_1 &: 0,75 (1 - (-0,3420)) \\
h_1 &: 0,75 (1 + 0,3420) \\
h_1 &: 0,75 (1,3420) \\
h_1 &: 1,0065 \text{ m}
\end{aligned}$$

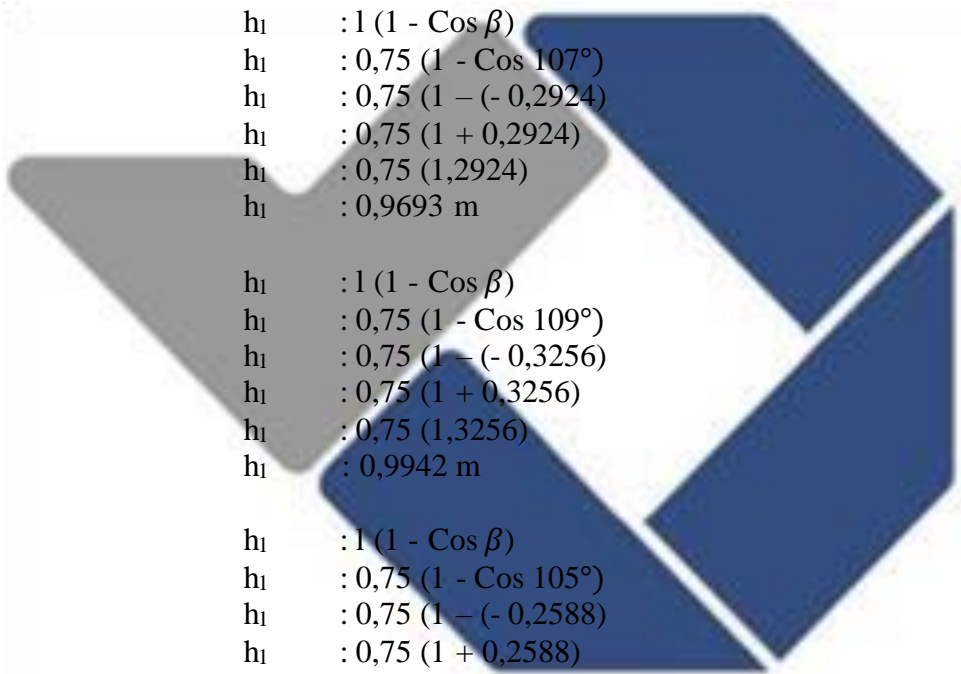
$$\begin{aligned}
h_1 &: 1 (1 - \cos \beta) \\
h_1 &: 0,75 (1 - \cos 108^\circ) \\
h_1 &: 0,75 (1 - (-0,3090)) \\
h_1 &: 0,75 (1 + 0,3090) \\
h_1 &: 0,75 (1,3090) \\
h_1 &: 0,9817 \text{ m}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
h_1 &: 1 (1 - \cos \beta) \\
h_1 &: 0,75 (1 - \cos 107^\circ) \\
h_1 &: 0,75 (1 - (-0,2924)) \\
h_1 &: 0,75 (1 + 0,2924) \\
h_1 &: 0,75 (1,2924) \\
h_1 &: 0,9693 \text{ m}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
h_1 &: 1 (1 - \cos \beta) \\
h_1 &: 0,75 (1 - \cos 109^\circ) \\
h_1 &: 0,75 (1 - (-0,3256)) \\
h_1 &: 0,75 (1 + 0,3256) \\
h_1 &: 0,75 (1,3256) \\
h_1 &: 0,9942 \text{ m}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
h_1 &: 1 (1 - \cos \beta) \\
h_1 &: 0,75 (1 - \cos 105^\circ) \\
h_1 &: 0,75 (1 - (-0,2588)) \\
h_1 &: 0,75 (1 + 0,2588) \\
h_1 &: 0,75 (1,2588) \\
h_1 &: 0,9441 \text{ m}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
h_1 &: 1 (1 - \cos \beta) \\
h_1 &: 0,75 (1 - \cos 104^\circ) \\
h_1 &: 0,75 (1 - (-0,2419)) \\
h_1 &: 0,75 (1 + 0,2419) \\
h_1 &: 0,75 (1,2419) \\
h_1 &: 0,9314 \text{ m}
\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
h_1 &: 1 (1 - \cos \beta) \\
h_1 &: 0,75 (1 - \cos 102^\circ) \\
h_1 &: 0,75 (1 - (-0,2079)) \\
h_1 &: 0,75 (1 + 0,2079) \\
h_1 &: 0,75 (1,2079) \\
h_1 &: 0,9059 \text{ m}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_{112^0} &= m \times g (h_0 - h_1) \\
E_{112^0} &= 15,3 \times 9,8 (1,3995 - 1,0309) \\
E_{112^0} &= 149,94 (0,3686) \\
E_{112^0} &= 55,27 \text{ J}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_{114^0} &= m \times g (h_0 - h_1) \\
E_{114^0} &= 15,3 \times 9,8 (1,3995 - 1,0550) \\
E_{114^0} &= 149,94 (0,3445) \\
E_{114^0} &= 51,65 \text{ J}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_{110^0} &= m \times g (h_0 - h_1) \\
E_{110^0} &= 15,3 \times 9,8 (1,3995 - 1,0065) \\
E_{110^0} &= 149,94 (0,393) \\
E_{110^0} &= 58,92 \text{ J}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_{108^0} &= m \times g (h_0 - h_1) \\
E_{108^0} &= 15,3 \times 9,8 (1,3995 - 0,9817) \\
E_{108^0} &= 149,94 (0,4176) \\
E_{108^0} &= 62,64 \text{ J}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_{107^0} &= m \times g (h_0 - h_1) \\
E_{107^0} &= 15,3 \times 9,8 (1,3995 - 0,9693) \\
E_{107^0} &= 149,94 (0,4301) \\
E_{107^0} &= 64,49 \text{ J}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_{109^0} &= m \times g (h_0 - h_1) \\
E_{109^0} &= 15,3 \times 9,8 (1,3995 - 0,9942) \\
E_{109^0} &= 149,94 (0,4053) \\
E_{109^0} &= 60,77 \text{ J}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_{105^0} &= m \times g (h_0 - h_1) \\
E_{105^0} &= 15,3 \times 9,8 (1,3995 - 0,9441) \\
E_{105^0} &= 149,94 (0,4554) \\
E_{105^0} &= 68,28 \text{ J}
\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}E104^0 &= m \times g (h_0 - h_1) \\E104^0 &= 15,3 \times 9,8 (1,3995 - 0,9314) \\E104^0 &= 149,94 (0,4681) \\E104^0 &= 70,18 \text{ J}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}E102^0 &= m \times g (h_0 - h_1) \\E102^0 &= 15,3 \times 9,8 (1,3995 - 0,9059) \\E102^0 &= 149,94 (0,4936) \\E102^0 &= 74,01 \text{ J}\end{aligned}$$

$$HI 112^\circ = \frac{55,27}{35} = 1,579 \text{ J/mm}^2$$

$$HI 114^\circ = \frac{51,65}{35} = 1,475 \text{ J/mm}^2$$

$$HI 110^\circ = \frac{58,92}{35} = 1,683 \text{ J/mm}^2$$

$$HI 108^\circ = \frac{62,64}{35} = 1,789 \text{ J/mm}^2$$

$$HI 107^\circ = \frac{64,49}{35} = 1,842 \text{ J/mm}^2$$

$$HI 109^\circ = \frac{60,77}{35} = 1,736 \text{ J/mm}^2$$

$$HI 105^\circ = \frac{68,28}{35} = 1,950 \text{ J/mm}^2$$

$$HI 104^\circ = \frac{70,18}{35} = 2,005 \text{ J/mm}^2$$

$$HI 102^\circ = \frac{74,01}{35} = 2,114 \text{ J/mm}^2$$