

## Analisis Pengaruh *Multiple Repair Welding* terhadap Kekuatan dan *Microstructure* pada Sambungan Pengelasan Baja JIS - G3101

### *Analysis of the Effect of Multiple Repair Welding on the Strength and Microstructure of JIS - G3101 Steel Welded Joints*

Kiryanto<sup>1</sup>, Ahmad Firdhaus<sup>2\*</sup>, Tri Laksana<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,  
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

\*Corresponding author: [ahmadf@lecturer.undip.ac.id](mailto:ahmadf@lecturer.undip.ac.id)

#### ABSTRAK

DOI;  
[10.30595/jrst.v9i1.21921](https://doi.org/10.30595/jrst.v9i1.21921)

#### Histori Artikel:

Diajukan:  
21/05/2024

Diterima:  
11/04/2025

Diterbitkan:  
11/04/2025

Dalam industri manufaktur, proses perbaikan las yang dilakukan lebih dari satu kali (*multiple repair gouging*) seringkali digunakan untuk memperbaiki sambungan las yang cacat, namun proses pengelasan yang berulang dapat mengubah sifat material. Penelitian ini menggunakan sampel baja JIS - G3101 yang diperbaiki dengan variasi *multiple repair gouging*, diikuti dengan pengujian kekuatan tarik, kekerasan, dan analisis struktur mikro menggunakan mikroskop elektron pemindai (SEM). Hasil penelitian menunjukkan bahwa *multiple repair welding* mempengaruhi kekuatan tarik dan kekerasan pada sambungan las, yang tergantung pada jumlah dan kondisi pengelasan ulang. Struktur mikro juga mengalami perubahan, dengan terbentuknya fasa martensite pada zona HAZ (*Heat Affected Zone*) pada setiap lapisan perbaikan las. Meskipun perbaikan las dapat meningkatkan ketahanan sambungan terhadap kegagalan, hasil yang optimal dicapai dengan pengaturan prosedur pengelasan yang tepat.

**Kata Kunci:** Gouging, JIS G3101, Struktur mikro, Uji Impak, Uji Tarik

#### ABSTRACT

*In the manufacturing industry, multiple repair welding processes are often used to repair defective weld joints, but repeated welding processes can change the material properties. This study used JIS - G3101 steel samples repaired with multiple repair welding variations, followed by tensile strength, hardness, and microstructure analysis using a Scanning Electron Microscope (SEM). The results showed that multiple repair welding affected the tensile strength and hardness of the weld joint, which depended on the number and conditions of re-welding. The microstructure also changed, with the formation of martensite phase in the HAZ (Heat Affected Zone) zone on each weld repair layer. Although weld repair can improve the resistance of the joint to failure, optimal results are achieved with proper welding procedure settings.*

**Keywords:** Gouging, JIS G3101, Microstructure, Impact Test, Tensile Test

#### 1. PENDAHULUAN

Teknologi pengelasan memiliki peranan krusial dalam pembuatan dan perbaikan struktur logam. Proses pengelasan sering digunakan dalam berbagai industri, termasuk konstruksi dan reparasi, khususnya dalam bidang perkapalan. Pengelasan dapat didefinisikan sebagai teknik menyambung beberapa logam dengan menggunakan energi panas. Selain digunakan dalam proses konstruksi, teknologi las juga bermanfaat untuk

memperbaiki komponen yang aus, menambal lubang cor, dan berbagai aplikasi lainnya (Broido, 2015; Mičian et al., 2018; Moskvitin et al., 2013).

Pemahaman dan pengembangan teknologi pengelasan yang efektif sangat penting untuk memastikan keandalan dan ketahanan struktur logam dalam berbagai kondisi operasional (Wirjosumarto & Okumura, 2000). Kesalahan dalam proses pengelasan logam sering terjadi di lapangan. Kesalahan-kesalahan

tersebut tidak bisa diabaikan karena dapat menyebabkan cacat dan kerusakan pada komponen logam, seperti keretakan.

Jika suatu material mengalami cacat berulang kali, diperlukan usaha ekstra untuk memperbaikinya. Salah satu metode yang paling efisien untuk menghilangkan logam berlebih adalah *repair welding* dengan teknik *gouging*. Teknik ini tidak hanya cepat tetapi juga mampu menghasilkan alur dasar yang halus dan ideal untuk pengelasan ulang, sehingga meningkatkan kualitas dan keandalan hasil pengelasan (Gorka, 2002; Kromm et al., 2017; Nowotny et al., 2007).

*Carbon Arc Gouging* (CAG) merupakan salah satu teknik penting dalam proses fabrikasi pengelasan yang bertujuan untuk menghilangkan logam berlebih atau cacat akibat pengelasan. Proses *repair gouging* ini terjadi melalui aliran arus listrik antara elektroda *gouging* dan logam, yang menyebabkan logam tersebut mencair. Logam cair ini kemudian dihembuskan dengan udara berkecepatan tinggi, sehingga menyingkirkan logam yang mencair tersebut dan membentuk alur atau *groove* yang bersih.

Alur yang terbentuk ini ideal untuk dilakukan pengelasan ulang, memastikan hasil yang berkualitas dan mengembalikan integritas struktur logam (AWS Committee on Structural Welding, 1999). Prosesnya yang tidak bergantung pada oksidasi, membakar kotoran/*graphite*, dan cepat mengering membuat *repair gouging* dapat diterapkan diberbagai jenis logam sehingga dapat mengurangi risiko keretakan (Kalpakjian & Schmid, 2010).

Namun, proses *repair gouging* ini tentu akan mempengaruhi sifat mekanik suatu material termasuk kekerasan, kekuatan tarik, atau bahkan struktur mikronya (Kanagawa et al., 2000; Kenigsberg et al., 2019; Zhao, 2013). Maka dari itu diperlukan perhatian khusus terutama pada persiapan yang harus dilakukan untuk memperbaikinya seperti prosedur, ukuran kecacatan, tebal material, dan faktor lain yang berpengaruh agar hasil *repair* lebih maksimal (AWS Committee on Arc Welding and Cutting, 1991).

Penelitian menunjukkan bahwa perlakuan *multiple weld repairs* dapat mengurangi sekitar 90% kekuatan dan daktilitas material dari kekuatan asli sebelum diperbaiki sebanyak dua kali. Selain itu, terjadi perluasan pada daerah *Heat Affected Zone* (HAZ) seiring dengan penambahan jumlah *repair* pada material (Liu et al., 2022). Penelitian lain mendukung temuan ini, dengan menyebutkan

bahwa energi impact suatu material cenderung berkurang dari 165 J (baja yang hanya dilas) menjadi 130 J (baja dengan tiga kali perbaikan) (Łomozik & Turyk, 2018).

Sementara itu, penelitian lebih lanjut pada struktur mikro baja jenis A283 Gr C setelah dilakukan *repair* dengan *gouging arc welding* menunjukkan bahwa pada daerah HAZ ditemukan lebih banyak fasa *ferrit* dan *perlit* yang berubah menjadi fasa *austenite* dengan butiran yang lebih kasar atau pembentukan butiran yang lebih besar (Budiarto et al., 2018).

Temuan-temuan ini mengindikasikan bahwa meskipun *repair welding* dapat memperbaiki cacat pengelasan, terdapat konsekuensi signifikan terhadap sifat mekanis dan mikrostruktur material yang perlu diperhatikan dalam proses fabrikasi dan perbaikan logam. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi dan membandingkan kekuatan tarik, kekuatan impact, serta struktur mikro baja SS400 yang telah mengalami proses perlakuan *repair gouging* secara berulang.

Oleh karena itu, penelitian ini akan melakukan eksperimen untuk memahami sejauh mana proses *repair gouging* mempengaruhi sifat mekanis dan struktur mikro baja SS400, yang sangat penting untuk aplikasi industri yang memerlukan keandalan dan ketahanan tinggi. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan lebih dalam tentang dampak dari *repair gouging* berulang terhadap performa material baja SS400, serta panduan praktis dalam proses fabrikasi dan perbaikan logam.

## **2. METODE PENELITIAN**

### **2.1 Material**

Dalam penelitian ini, teknik pengelasan yang dipilih adalah SMAW (*Shield Metal Arc Welding*) dengan posisi 1G, menggunakan *bevel single V-butt joint* 45° dan kuat arus 125 *ampere* untuk masing-masing spesimen. Proses pengelasan ini bertujuan untuk menyambung dua atau lebih logam dan umumnya menghasilkan tiga area penting: *base metal*, *fusion line*, dan *Heat Affected Zone* (HAZ). Di *base metal*, proses pembekuan cepat menyebabkan pembentukan struktur *dendritic* kasar dengan segregasi, yang sering kali diikuti penyusutan volume saat elektroda membeku, menyebabkan distorsi atau keretakan.

Pada daerah *fusion line*, terjadi pencampuran antara *weld metal* dan *base metal*. Sementara pada HAZ, suhu tinggi memicu pengkombinasian butir-butir dan transformasi fasa. Pada penelitian ini juga dilakukan teknik

*Carbon Arc Gouging* digunakan sebagai metode perbaikan, yang efektif untuk menyingkirkan cacat pengelasan dengan membentuk kawah atau alur melalui hembusan udara tinggi yang mengeliminasi logam cair, memungkinkan pengelasan ulang.

Proses *gouging* ini juga diaplikasikan dalam preparasi pengelasan spesimen penelitian sebagai *back weld*, di mana dilakukan gouging dan pengelasan pada daerah *root* untuk memastikan sambungan yang lebih rapat dan kuat. Untuk spesifikasi material yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis Baja *Structural Steel* (SS) 400 yang sesuai standar JIS (*Japanese Industrial Standards*) G3101 (*Japanese Standards Association*, 2015) dapat dilihat pada **Tabel 1** dan **Tabel 2** di bawah ini.

**Tabel 1.** Sifat Mekanik SS400

| Sifat mekanik                 | Nilai   |
|-------------------------------|---------|
| <i>Yield strength</i> (MPa)   | ≥245    |
| <i>Tensile Strength</i> (MPa) | 400-510 |
| <i>Elongation</i> (%)         | ≥17     |
| <i>Hardness</i> (Hb)/(HV)     | 160     |
| <i>Modulus Young</i> (GPa)    | 190-210 |

**Tabel 2.** Komposisi Kimia SS400

| Unsur                 | Nilai (%) |
|-----------------------|-----------|
| <i>Carbon</i> (C)     | ≤0.30     |
| <i>Manganese</i> (Mn) | ≤1.60     |
| <i>Fosfor</i> (P)     | ≤0.040    |
| <i>Sulfur</i> (S)     | ≤0.040    |

**Tabel 3.** Komposisi Kimia AWS E7016 (AWS Committee on Filler Metals and Allied Materials, 2012)

| Unsur                 | Nilai (%) |
|-----------------------|-----------|
| <i>Carbon</i> (C)     | 0,08      |
| <i>Manganese</i> (Mn) | 0,94      |
| <i>Silicon</i> (Si)   | 0,60      |

**Tabel 4.** Komposisi Kimia Elektroda *Gouging*

| Unsur                            | Jumlah (%) |
|----------------------------------|------------|
| <i>Fixed Carbon/Graphite</i> (C) | >95        |
| <i>Copper</i> (Cu)               | <5         |

**Tabel 3** Elektroda pengelasan menggunakan jenis elektroda AWS E7016 diameter 4.0 mm. Pemilihan jenis elektroda ini dikarenakan sifatnya yang *low hydrogen* dimana diharapkan agar logam tidak terjadi cacat *porosity* karena elektroda ini tidak mudah menyerap gas hidrogen

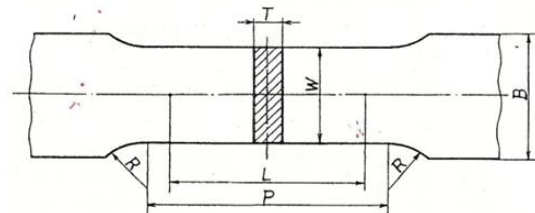
**Tabel 4** Elektroda *gouging arc welding* menggunakan elektroda las jenis NS-8945 Nikko Steel berdiameter 3,2 mm. Elektroda *gouging*

berfungsi untuk meleburkan logam yang nantinya akan terbentuk alur yang bersih sebelum dilas kembali.

Proses pengelasan dan gouging dilakukan di PT Yasa Wahana Tirta Samudera, Semarang. Sementara itu, proses pengujian mekanik dilakukan di dua lokasi berbeda. Pengujian tarik dilaksanakan di Laboratorium Struktur dan Konstruksi Kapal, Universitas Diponegoro Semarang, sedangkan pengujian impak dan struktur mikro dilakukan di Laboratorium Las dan Material Teknik Mesin, Universitas Diponegoro, Semarang.

## 2.2 Pengujian Tarik

Material yang telah mendapat perlakuan gouging selanjutnya akan dibuat spesimen tarik. Prinsip pengujian ini adalah spesimen dijepit pada mesin uji tarik dengan diberi beban tarik *uniaxial* yang besarnya terus meningkat secara berlanjut hingga spesimen patah. Pengujian tarik bertujuan mengetahui nilai tertinggi dari kekuatan tarik material sebelum patah (*Ultimate Tensile Strength*). Standard pengujian yang banyak digunakan untuk pengujian tarik adalah ASTM E8 (ASTM International, 2013). Dimensi spesimen uji tarik dapat dilihat pada **Gambar 1**, **Gambar 2**, dan **Tabel 5**.



**Gambar 1.** Dimensi Spesimen Uji Tarik

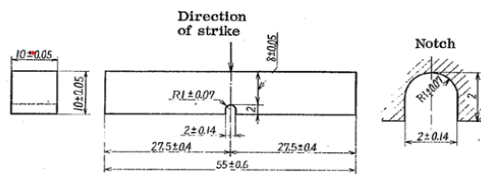
**Tabel 5.** Dimensi Spesimen Uji Tarik

| Keterangan | Panjang    |
|------------|------------|
| W          | 25 mm      |
| L          | 50 mm      |
| P          | App. 60 mm |
| T          | 10 mm      |
| R          | 15 mm      |
| B          | Min. 30 mm |



**Gambar 2.** Spesimen Uji Tarik

## 2.3 Pengujian Impak



**Gambar 3.** Dimensi Spesimen Uji Impak Charpy



**Gambar 4.** Spesimen Uji Impak Charpy

**Tabel 6.** Dimensi Spesimen Uji Impak Charpy

| Dimensi             | Nilai |
|---------------------|-------|
| L(Overall Length)   | 55 mm |
| W(Width)            | 10 mm |
| T (Thickness)       | 10 mm |
| N (Notch Thickness) | 2 mm  |
| Notched Charpy      | 45°   |

Pengujian impak bertujuan untuk mengetahui nilai ketangguhan suatu material (*ductility*). Uji impak dilakukan dengan memberikan pembebanan mendadak yang terbatas di area tertentu pada material. Energi impak pada material dinyatakan dalam satuan joule. Ada beberapa jenis pengujian impak yang diklasifikasikan dengan metode pembebanan dan jenis spesimen dari bentuk notchnya.

Pengujian impak yang sering digunakan adalah jenis pengujian impak Charpy V-notch dan Izod.

Standar yang paling umum digunakan untuk jenis pengujian adalah ASTM E23-18 (ASTM International, 2016) spesimen penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 3**, **Gambar 4**, dan **Tabel 6**.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Hasil Uji Tarik

Spesimen pengujian yang telah mendapatkan perlakuan pengelasan dan *repair* baja SS400 yang telah diuji tarik berjumlah 3 spesimen rata-rata memiliki bentuk patahan **Gambar 5** dan mendapatkan nilai rata-rata kuat tarik ditunjukkan pada uraian berikut. Terlihat bentuk patahan spesimen setelah dilakukan uji tarik yaitu pada daerah *weld metal*. Daerah *weld*

*metal* dan HAZ memang semakin meluas setelah dilakukan *repair* secara berlapis-lapis.

Pengujian tarik yang telah dilakukan pada spesimen G0, G1, G2, dan G3 didapatkan rata-rata nilai tegangan tarik atau kekuatan tarik yang telah di hitung dapat dilihat pada

**Tabel 7** dan untuk grafiknya dapat dilihat pada **Gambar 6**.

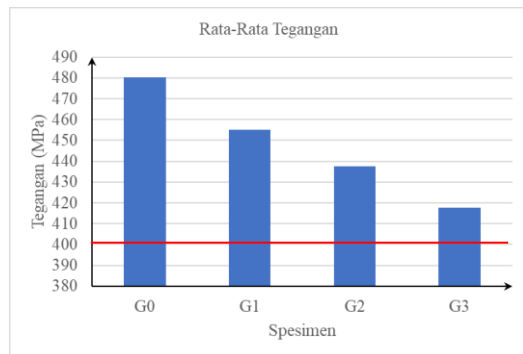


**Gambar 5.** Bentuk Patahan Spesimen Tarik

Nilai rata-rata tegangan tarik yang mengalami tren penurunan disebabkan karena perlakuan *repair* secara berulang yang membutuhkan suhu tinggi sehingga menyebabkan nilai kekuatannya menurun. Hal ini ditunjukkan oleh spesimen *repair* 3 kali (G3) yang memiliki nilai terkecil sebesar 417,66 MPa dibandingkan spesimen lain. Meskipun begitu semua nilai tarik masih memenuhi standard JIS dan BKI. Berdasarkan hasil pengujian tarik maka didapatkan rata-rata nilai regangan tarik pada **Tabel 8** dan **Gambar 7**.

**Tabel 7.** Hasil Tegangan Tarik Baja SS400

| Test Pieces | Area (mm) | P Max (KN) | $\sigma$ Max (MPa) | Rata-rata (MPa) |
|-------------|-----------|------------|--------------------|-----------------|
| G0-1        | 100       | 48.5       | 485                | 480.33          |
| G0-2        | 100       | 49.5       | 495                |                 |
| G0-3        | 100       | 46.2       | 461                |                 |
| G1-1        | 100       | 45.9       | 458                | 455.00          |
| G1-2        | 100       | 45.5       | 455                |                 |
| G1-3        | 100       | 45.3       | 452                |                 |
| G2-1        | 100       | 44.4       | 444                | 437.66          |
| G2-2        | 100       | 43.8       | 437                |                 |
| G2-3        | 100       | 43.2       | 432                |                 |
| G3-1        | 100       | 41.4       | 414                | 417.66          |
| G3-2        | 100       | 42.0       | 420                |                 |
| G3-3        | 100       | 41.9       | 419                |                 |

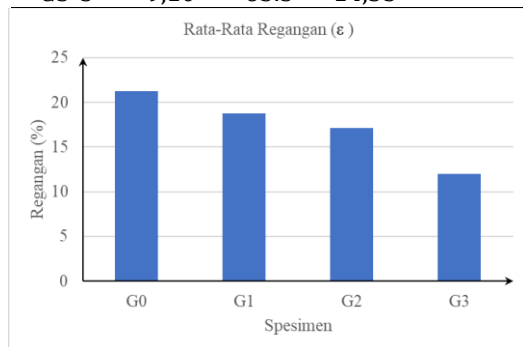


Standard BKI (Garis merah) : 400-560 N/mm<sup>2</sup>

**Gambar 6.** Grafik Rata-Rata Tegangan Tarik

**Tabel 8.** Hasil Regangan Tarik Baja SS400

| Test Pieces | ΔL (mm) | Lo (mm) | ε Max (%) | ε Rata-Rata (%) |
|-------------|---------|---------|-----------|-----------------|
| G0-1        | 12,70   | 63,5    | 20,00     | 21,23           |
| G0-2        | 14,50   | 63,5    | 22,83     |                 |
| G0-3        | 13,25   | 63,5    | 20,86     |                 |
| G1-1        | 12,70   | 63,5    | 20,00     | 18,77           |
| G1-2        | 11,45   | 63,5    | 18,03     |                 |
| G1-3        | 11,65   | 63,5    | 18,30     |                 |
| G2-1        | 10,70   | 63,5    | 16,85     | 17,12           |
| G2-2        | 11,20   | 63,5    | 17,63     |                 |
| G2-3        | 10,75   | 63,5    | 16,90     |                 |
| G3-1        | 8,60    | 63,5    | 13,54     | 12,02           |
| G3-2        | 5,20    | 63,5    | 8,20      |                 |
| G3-3        | 9,10    | 63,5    | 14,33     |                 |



**Gambar 7.** Grafik Rata-Rata Regangan Tarik



**Gambar 8.** Grafik Rata-Rata Modulus Elastisitas

Nilai rata-rata regangan tarik juga mengalami tren penurunan seiring dilakukannya penambahan jumlah *repair*. Hal ini dapat diartikan proses *repair* menyebabkan kemampuan sebuah material untuk meregang semakin mengecil. Nilai regangan tarik tertinggi didapatkan pada spesimen tanpa *repair* yaitu sebesar 21,23% sementara yang terkecil pada spesimen G3.

Hanya spesimen 3 kali *repair* (G3) yang tidak memenuhi standar regangan dari JIS yaitu sekitar 17,00% untuk jenis material SS400. Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan didapatkan rata-rata nilai modulus elastisitas pada **Error! Not a valid bookmark self-reference.** dan **Gambar 8** berikut. Nilai rata-rata modulus elastisitas atau kekakuan mengalami tren kenaikan seiring dilakukannya penambahan jumlah *repair*.

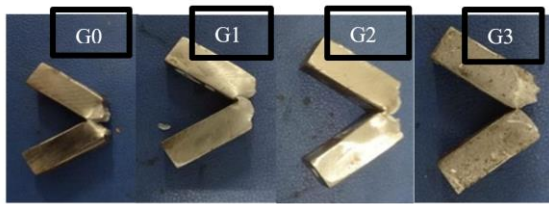
Hal ini dapat diartikan bahwa perlakuan *repair* yang berulang-ulang menyebabkan sebuah material semakin kaku. Nilai rata-rata modulus elastisitas paling tinggi didapat pada spesimen dengan perlakuan *repair* sebanyak 3 kali yaitu sebesar 219,3 GPa. Nilai rata-rata modulus terkecil didapat pada spesimen tanpa *repair* sebesar 192,1 GPa. Hanya spesimen 3 kali *repair* yang tidak memenuhi standar modulus young SS400 sebesar 190-210 GPa.

**Tabel 9.** Hasil Modulus Elastisitas Baja SS400

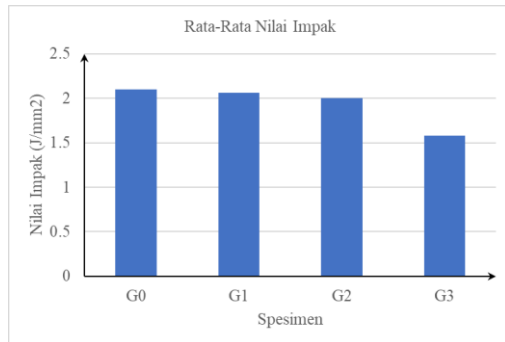
| Test Pieces | σy (MPa) | εy (%) | E (GPa) | E Rata-Rata (GPa) |
|-------------|----------|--------|---------|-------------------|
| G0-1        | 367      | 1,90   | 193,4   | 192,1             |
| G0-2        | 405      | 2,10   | 192,0   |                   |
| G0-3        | 366      | 1,90   | 190,8   |                   |
| G1-1        | 365      | 1,82   | 200,5   | 203,1             |
| G1-2        | 359      | 1,76   | 203,9   |                   |
| G1-3        | 360      | 1,76   | 205,0   |                   |
| G2-1        | 345      | 1,65   | 209,0   | 209,0             |
| G2-2        | 310      | 1,47   | 210,3   |                   |
| G2-3        | 328      | 1,58   | 207,8   |                   |
| G3-1        | 300      | 1,40   | 215,7   | 219,3             |
| G3-2        | 276      | 1,23   | 223,2   |                   |
| G3-3        | 283      | 1,30   | 219,0   |                   |

### 3.2 Hasil Uji Impak Charpy

Spesimen pengujian impak memiliki bentuk patahan dan mendapatkan nilai rata-rata kekuatan impak ditunjukkan pada **Gambar 9**, **Gambar 10**, dan **Tabel 10** berikut.



Gambar 9. Patahan Spesimen Impak



Standard BKI: 47 J/m<sup>2</sup> atau 47 x 10<sup>-6</sup> J/mm<sup>2</sup>

Gambar 10. Grafik Rata-Rata Nilai Impak Baja SS400

Patahan spesimen uji impact seperti terlihat pada Gambar 9 terjadi pada daerah *weld metal* setelah dilakukan pengujian impact terutama pada spesimen G3 yang terjadi patah paling getas. Hal ini kemungkinan dikarenakan perlakuan *repair* yang terlalu banyak menyebabkan spesimen keras dan getas.

Nilai rata-rata uji impact mengalami trens penurunan seiring dilakukannya penambahan jumlah proses *repair*. Dimana nilai paling tinggi didapat pada spesimen tanpa *repair* yaitu sebesar 2,10 J/mm<sup>2</sup>. Sedangkan rata-rata nilai impact paling rendah didapat pada spesimen dengan *repair* sebanyak 3 kali yaitu sebesar 1,58 J/mm<sup>2</sup>. Hal ini dapat diartikan bahwa proses *repair* menyebabkan kemampuan material terhadap beban kejut berkurang walaupun semua nilai impact masih memenuhi standard Biro Klasifikasi Indonesia (BKI).

### 3.3 Pengamatan Struktur Mikro

Baja karbon rendah seperti SS400 umumnya memiliki unsur dasar *ferrite* dan *pearlite* (*ferrite+cementite*). *Ferrite* merupakan unsur yang memiliki sifat lebih lunak namun cukup ulet. Sedangkan *pearlite* memiliki sifat yang cukup keras namun getas. Namun kandungan tadi bisa bertransformasi menjadi fasa yang lain ketika baja terkena suhu panas yang sangat tinggi dan pendinginan.

Maka dari itu perlu dilakukannya pengamatan mikro untuk menentukan bahan yang berkualitas guna mendukung operasi jangka panjang suatu konstruksi. Pengamatan

struktur mikro pada penelitian ini dilakukan untuk mendukung hasil pengujian mekanik. Pada pengujian struktur mikro kali ini dilakukan untuk melihat struktur mikro setelah baja mengalami perlakuan *gouging* dan pengelasan.

Tabel 10. Hasil Tegangan Tarik Baja SS400

| Test Pieces | Energi Impak (J) | Luas Area (mm <sup>2</sup> ) | Nilai Impak (J/mm <sup>2</sup> ) | Rata-Rata Impak (J/mm <sup>2</sup> ) |
|-------------|------------------|------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| G0-1        | 160              | 76,18                        | 2,10                             | 2,10                                 |
| G0-2        | 196              | 94,14                        | 2,08                             |                                      |
| G0-3        | 184              | 86,98                        | 2,12                             |                                      |
| G1-1        | 194              | 92,74                        | 2,09                             | 2,06                                 |
| G1-2        | 188              | 93,02                        | 2,02                             |                                      |
| G1-3        | 182              | 88,39                        | 2,06                             |                                      |
| G2-1        | 180              | 91,02                        | 1,98                             | 2,00                                 |
| G2-2        | 182              | 90,23                        | 2,02                             |                                      |
| G2-3        | 194              | 96,06                        | 2,02                             |                                      |
| G3-1        | 120              | 73,91                        | 1,62                             | 1,58                                 |
| G3-2        | 138              | 92,84                        | 1,49                             |                                      |
| G3-3        | 120              | 73,14                        | 1,64                             |                                      |

Beberapa daerah yang diamati dalam penelitian ini antara lain basemetal, HAZ, *weld metal* sambungan las. Adapun perbesaran yang dilakukan adalah 50X, 200X, dan 500X. Namun hasil yang dibandingkan hanya perbesaran 500X pada masing-masing spesimen tanpa *repair*, 1 kali *repair*, 2 kali *repair*, dan 3 kali pengulangan *repair*.

Pada bagian *base metal*, foto hasil mikro yang digunakan adalah dengan perbesaran 500X untuk masing-masing spesimen tanpa *repair* (G0), *repair* 1 kali (G1), *repair* 2 kali (G2), dan *repair* 3 kali (G3). Pada Gambar 11 terlihat pada daerah *base metal* struktur mikro *ferrite* dan *pearlite* cenderung tidak banyak berubah. Hal ini karena pada baja karbon rendah seperti SS400 struktur mikro yang terbentuk didominasi oleh *ferrite* dan *pearlite*.

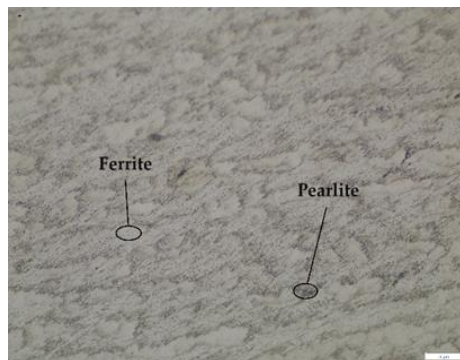
Daerah *base metal* tidak menerima perlakuan panas secara langsung yang dapat merubah struktur mikronya. Namun beberapa *base metal* mengalami sedikit penurunan ukuran dan jumlah fasa *ferrite* seperti spesimen G1, G2, dan G3, hal ini kemungkinan dikarenakan HAZ meluas akibat dari terlalu banyak dilakukan *repair* dan pengelasan.

*Heat Affected Zone* (HAZ) merupakan daerah kritis sambungan pengelasan. Gambar yang akan dibandingkan adalah dengan perbesaran 500X pada tiap spesimen G0, G1, G2, dan G3. Hasil pengamatan Gambar 12 pada struktur mikro spesimen tanpa *repair* terlihat masih didominasi oleh fasa *ferrite* dan *pearlite*.

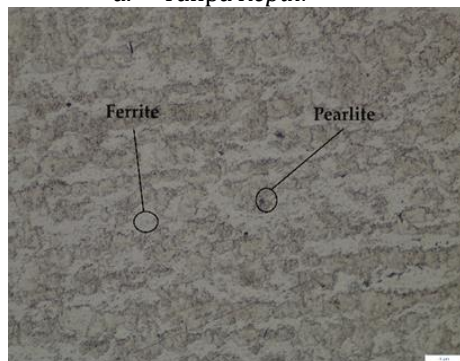
Sedangkan spesimen 1 kali *repair* fasa *austenite* mulai sedikit terbentuk diiringi terlihat jelasnya fasa *ferrite acicular* (dapat mengurangi laju keretakan).

Pada spesimen *repair* 2 kali fasa *austenite* mulai bertransformasi secara *displacive* menjadi fasa *martensite*. *Martensite* merupakan fasa yang bersifat keras dan getas. *Martensite* paling banyak ditemukan pada spesimen dengan *repair* sebanyak 3 kali. Hal ini menunjukkan jumlah *repair* yang banyak menyebabkan material semakin keras namun getas. **Gambar 13** foto mikro pada daerah *weld metal* juga diambil dari perbesaran 500X.

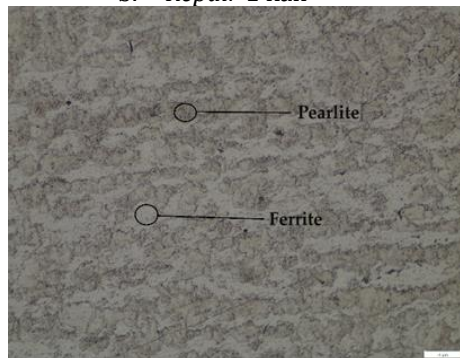
Sementara **Gambar 13** di daerah *weld metal*, pada spesimen tanpa *repair* terlihat mulai terbentuknya fasa *martensite* sebagai akibat dari transformasi *displacive* dari fasa *austenite* yang terkena suhu sangat tinggi.



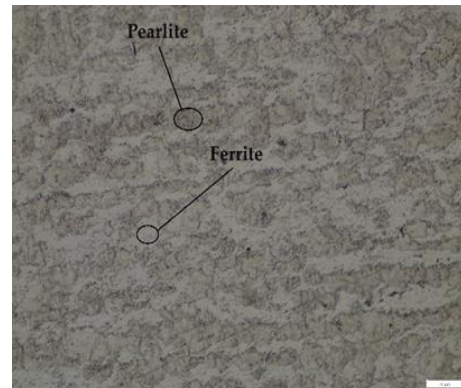
a. Tanpa Repair



b. Repair 1 kali

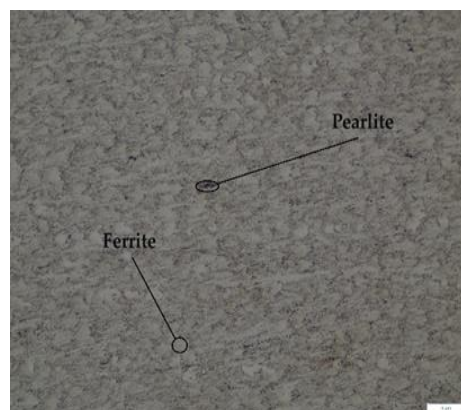


c. Repair 2 kali

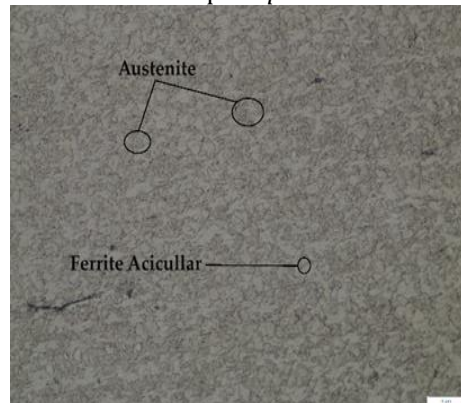


d. Repair 3 kali

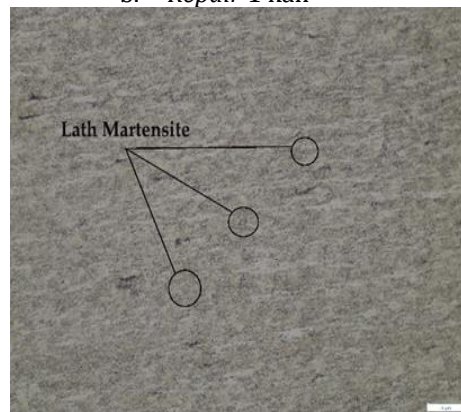
**Gambar 11.** Foto Mikro Base Metal Spesimen



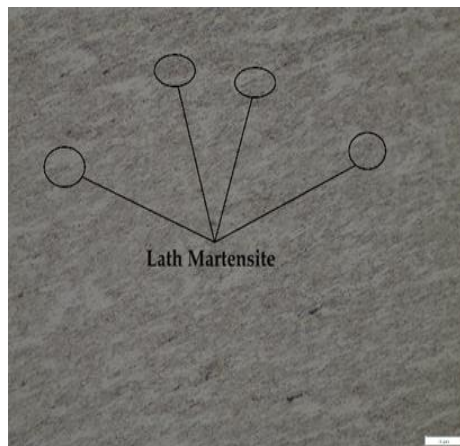
a. Tanpa Repair



b. Repair 1 kali

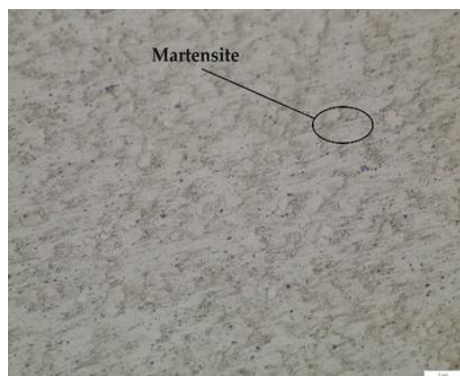


c. Repair 2 kali

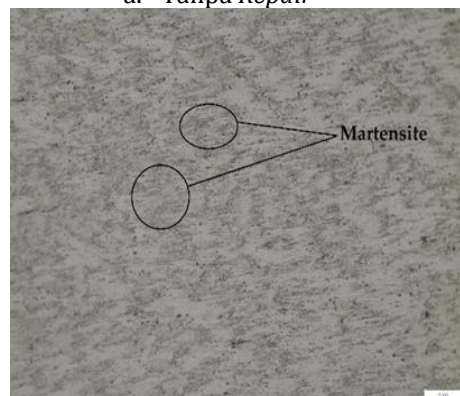


d. Repair 3 kali

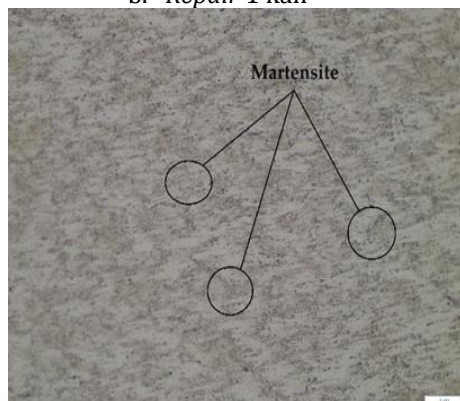
Gambar 12. Foto Mikro HAZ Spesimen



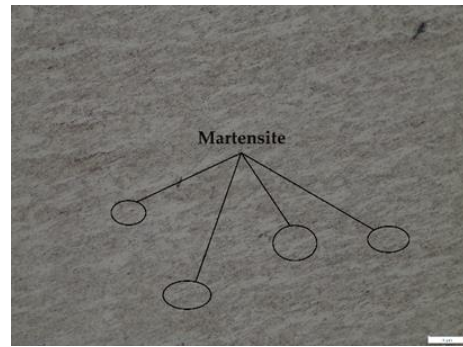
a. Tanpa Repair



b. Repair 1 kali



c. Repair 2 kali



d. Repair 3 kali

Gambar 13. Foto Mikro Weld metal Spesimen

Pada weld metal spesimen 1 kali *repair* fasa *martensite* bertambah banyak dibandingkan pada spesimen tanpa *repair*. Spesimen 2 kali *repair* dan spesimen yang terkena *multiple repair* sebanyak 3 kali mengalami kenaikan jumlah fasa *martensite* yang signifikan sehingga menyebabkan spesimen bersifat keras dan getas.

#### 4. SIMPULAN

Hasil analisis dari pengujian pada baja SS400 yang mengalami perlakuan *multiple repair* gouging menunjukkan bahwa kekuatan tarik dan kekuatan impak material cenderung menurun seiring dengan meningkatnya jumlah perbaikan yang dilakukan. Di sisi lain, nilai kekakuan material justru meningkat dengan bertambahnya frekuensi *repair*.

Pengamatan struktur mikro, terutama pada daerah *Heat Affected Zone* (HAZ) dan *weld metal*, mendukung temuan ini dengan terbentuknya fasa *martensite* yang semakin banyak pada spesimen yang mengalami perbaikan berulang kali, terutama pada spesimen dengan tiga kali *repair* (G3). Meskipun spesimen yang mengalami tiga kali *repair* masih memenuhi standar kekuatan tarik SS400, hal ini kurang direkomendasikan karena nilai regangan yang berada di bawah standar dan peningkatan kekakuan yang signifikan.

Oleh karena itu, perlakuan *repair welding* berulang perlu dipertimbangkan dengan hati-hati untuk menjaga kualitas dan keandalan material baja SS400.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada PT Yasa Wahana Tirta Samudera, Semarang, atas fasilitas untuk proses pengelasan dan gouging. Terima kasih juga kepada Laboratorium Struktur dan Konstruksi Kapal serta Laboratorium Las dan Material Teknik Mesin, Universitas Diponegoro Semarang, atas dukungannya dalam pelaksanaan pengujian mekanik.

## REFERENSI

- ASTM International. (2013). *E8/E8M - 13a Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. [https://doi.org/10.1520/E0008\\_E0008M-13A](https://doi.org/10.1520/E0008_E0008M-13A)
- ASTM International. (2016). *E23-16b: "Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials"*. <https://doi.org/10.1520/E0023-16B>
- AWS Committee on Arc Welding and Cutting. (1991). *Recommended Practices for Air Carbon Arc Gouging and Cutting*. American Welding Society.
- AWS Committee on Filler Metals and Allied Materials. (2012). *AWS A5. 1/A5. 1M-2012, Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding*. American Welding Society.
- AWS D1.1/D1.1M:2004. (1980). Structural Welding Code-Steel. In *American National Standards Institute, Standards*.
- Broido, V. L. (2015). Using welding in manufacture, repair and reconditioning of large castings of high-manganese steels. *Welding International*, 29(8), 650–653. <https://doi.org/10.1080/09507116.2014.960701>
- Budiarto, Turnip, K., & Hantariksa. (2018). The effect of current gouging arc welding analysis of A283 Gr C steel to the tensile strength, hardness and microstructure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 420(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/420/1/012055>
- Gorka, J. (2002). Welding technologies for the removal of defects in welded joints and iron-castings. *Welding International*, 16(5), 341–346. <https://doi.org/10.1080/09507110209549543>
- Japanese Standards Association. (2015). *JIS G 3101: Rolled steels for general structure*.
- Kalpajian, S., & Schmid, S. R. (2010). Manufacturing Engineering and Technology. In *Micro-Manufacturing Engineering and Technology*.
- Kanagawa, K., Cox, S. F., & Zhang, S. (2000). Effects of dissolution-precipitation processes on the strength and mechanical behavior of quartz gouge at high-temperature hydrothermal conditions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B5), 11115–11126. <https://doi.org/10.1029/2000JB900038>
- Kenigsberg, A. R., Rivière, J., Marone, C., & Saffer, D. M. (2019). The Effects of Shear Strain, Fabric, and Porosity Evolution on Elastic and Mechanical Properties of Clay-Rich Fault Gouge. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(11), 10968–10982. <https://doi.org/10.1029/2019JB017944>
- Kromm, A., Schasse, R., Xu, P., Mente, T., & Kannengiesser, T. (2017). Influence of Weld Repair by Gouging on the Residual Stresses in High Strength Steels. *Residual Stresses 2016*, 2, 169–174. <https://doi.org/10.21741/9781945291173-29>
- Liu, P., Ma, J., Fang, Y., Xu, B., & Qiu, L. (2022). Effect of Repeated Weld Repairs on Microstructure and Mechanical Properties of Heat-Affected Zone in CA6NM Stainless Steel. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2022/4527917>
- Łomozik, M., & Turyk, E. (2018). Mechanical Properties of Welded Joints in Steel S1100QL after Multiple Repair Welding. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 2018(3), 7–15. <https://doi.org/10.17729/ebis.2018.3/1>
- Mičian, M., Winczek, J., Koňár, R., Hlavatý, I., & Gucwa, M. (2018). The Repair of Foundry Defects in Steel Castings Using Welding Technology. *Archives of Foundry Engineering*. <https://doi.org/10.24425/122524>
- Moskvitin, G. V., Polyakov, A. N., & Birger, E. M. (2013). Application of laser welding methods in industrial production. *Welding International*, 27(7), 572–580. <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.715953>
- Nowotny, S., Scharek, S., Beyer, E., & Richter, K.-H. (2007). Laser Beam Build-Up Welding: Precision in Repair, Surface Cladding, and Direct 3D Metal Deposition. *Journal of Thermal Spray Technology*, 16(3), 344–348. <https://doi.org/10.1007/s11666-007-9028-5>

Wiryosumarto, H., & Okumura, T. (2000).  
Teknologi Pengelasan Logam. In *Teknologi  
Pengelasan Logam* (Vol. 8).

Zhao, Z. (2013). Gouge Particle Evolution in a  
Rock Fracture Undergoing Shear: a  
Microscopic DEM Study. *Rock Mechanics  
and Rock Engineering*, 46(6), 1461–1479.  
[https://doi.org/10.1007/s00603-013-  
0373-z](https://doi.org/10.1007/s00603-013-0373-z)