

# Analisis Pengaruh Media *Quenching* terhadap *Mechanical Properties* dan *Intergranular Corrosion Stainless Steel 201* pada *Underframe* Kereta 612

Alfi Tranggono Agus Salim<sup>1</sup>, Vivi Aulia Husna Wahidah<sup>2</sup>, Masayu Nazar Surya Kencana<sup>3</sup>, Rohit Efendi Sapura<sup>4</sup>, Fadhel Muhammad Khadafi<sup>5</sup>, Nafisa Ramadhani Putri<sup>6</sup>, Dennis Priyanga<sup>7</sup>

Politeknik Negeri Madiun<sup>1,2,3,4,5,6</sup>,  
Divisi Quality Control Welding, PT INKA<sup>7</sup>  
Corresponding Author: viviaulia.skripsi@gmail.com

## ABSTRAK

*Quenching* merupakan metode pendinginan cepat pasca pengelasan yang bertujuan untuk meningkatkan *mechanical properties* dan ketahanan korosi material. Pada pengerjaan *underframe* kereta 612 di PT Industri Kereta Api (INKA), material *stainless steel 201* terindikasi mengalami *intergranular corrosion* setelah proses pengelasan *Gas Metal Arc Welding* (GMAW). Penelitian ini menerapkan tiga variasi media *quenching*, yaitu *non-quenching*, *quenching* udara bertekanan, dan *quenching* air, untuk menganalisis pengaruhnya terhadap kekuatan tarik, ketahanan leleh, kekerasan, ketahanan korosi, serta struktur makro dan mikro. Hasil riset menunjukkan bahwa *quenching* udara bertekanan menghasilkan *Ultimate Tensile Strength* (UTS) tertinggi sebesar 653,67 MPa dan *elongation* 35,90%, sedangkan *non-quenching* memiliki *yield strength* (YS) tertinggi sebesar 425,90 MPa. Nilai kekerasan tertinggi sebesar 228,4 HV diperoleh pada *quenching* udara bertekanan di zona HAZL. Pada *fatigue test*, semua variasi mampu menahan hingga 1.000.000 siklus pada *maximum stress* 0,024–0,081 GPa, namun *non-quenching* menunjukkan umur leleh lebih panjang pada tegangan tinggi. Hasil *corrosion test* menunjukkan *quenching* air memiliki laju korosi terendah sebesar 0,001 mm/bulan (0,008 mm/tahun), diikuti *quenching* udara bertekanan 0,012 mm/tahun, dan *non-quenching* 0,020 mm/tahun. Berdasarkan *micro examination*, *quenching* air menunjukkan *intergranular corrosion* paling minimal akibat berkurangnya presipitasi kromium karbida. Riset ini berkontribusi pada optimalisasi perlakuan pendinginan pasca pengelasan untuk mencegah *intergranular corrosion* pada *underframe* kereta guna meningkatkan keandalan dan keselamatan operasi.

**Kata kunci:** *Stainless steel 201, media quenching, mechanical properties, ketahanan korosi, intergranular corrosion.*

## ABSTRACT

*Quenching is a rapid cooling method after welding that aims to improve the mechanical properties and corrosion resistance of materials. In the fabrication of the 612 train underframe at PT Industri Kereta Api (INKA), stainless steel 201 was indicated to experience intergranular corrosion after the Gas Metal Arc Welding (GMAW) process. This study applied three quenching media variations—non-quenching, pressurized air quenching, and water quenching—to analyze their effects on tensile strength, fatigue resistance, hardness, corrosion resistance, and macro- and microstructures.*

*The results show that pressurized air quenching produced the highest Ultimate Tensile Strength (UTS) of 653.67 MPa and elongation of 35.90%, while non-quenching exhibited the highest Yield Strength (YS) of 425.90 MPa. The highest hardness value of 228.4 HV was obtained in the HAZL zone with pressurized air quenching. In the fatigue test, all variations withstood up to 1,000,000 cycles at a maximum stress of 0.024–0.081 GPa, though non-quenching demonstrated slightly longer fatigue life at higher stress levels. Water quenching showed the lowest corrosion rate of 0.001 mm/month (0.008 mm/year), followed by pressurized air quenching at 0.012 mm/year and non-quenching at 0.020 mm/year. Microstructural examination revealed that water quenching minimized intergranular corrosion due to reduced chromium carbide precipitation. This research contributes to optimizing post-welding cooling treatment to prevent intergranular corrosion and improve the reliability and safety of train underframe structures.*

**Keywords:** *Stainless steel 201, quenching medium, mechanical properties, corrosion resistance, intergranular corrosion.*

## 1 PENDAHULUAN

Riset ini dilatarbelakangi oleh permasalahan di Industri Kereta Api dalam proyek kereta 612 yang saat ini dikerjakan yaitu pembuatan *underframe* sebagai komponen utama penopang kereta. Ketahanan *underframe* dan kelayakan operasional

menjadi faktor krusial dalam menjamin keselamatan penumpang. Berdasarkan hasil observasi, material penyusun *underframe* pada *middle part* adalah *stainless steel 201* yang mengalami *intergranular corrosion* pasca pengelasan *Gas Metal Arc Welding* (GMAW). Hal

ini berpengaruh terhadap keandalan struktur dan keselamatan operasional kereta.

Berdasarkan permasalahan riset terdahulu, material *stainless steel* 201 dengan ketebalan 4,5 mm teridentifikasi mengalami *intergranular corrosion* disebabkan proses pendinginan perlahan pada suhu ruang pasca pengelasan GMAW arus listrik 125 A, sehingga material tertahan pada temperatur sensitisasi dan *Heat Affected Zone* (HAZ) terbentuk presipitasi karbida [1]. Sensitisasi terjadi apabila *austenitic stainless steel* dipanaskan pada temperatur 500-850°C dan didinginkan perlahan, sehingga mengakibatkan terbentuknya butir-butir yang menurunkan nilai kekerasan material [2].

Riset lain pada *stainless steel* 316 menunjukkan bahwa semakin lama material berada pada temperatur sensitisasi, semakin tinggi risiko terbentuknya kromium karbida yang mempercepat *intergranular corrosion* [3]. Fenomena serupa juga ditemukan pada *stainless steel* 304, di mana ukuran butir dan perubahan mikrostruktur secara signifikan mempengaruhi ketahanan leleh, mekanisme deformasi, dan laju penyebaran retak [4].

Sejalan dengan temuan tersebut, untuk mengatasi permasalahan *intergranular corrosion* pada *stainless steel* 201 pasca pengelasan, diusulkan melalui penerapan variasi media *quenching* pada setiap lapisan pengelasan [1], [5]. Media *quenching* berpotensi meningkatkan nilai kekerasan dengan membentuk struktur martensit, sehingga menghambat presipitasi karbida dan mengurangi potensi *intergranular corrosion*. Media *quenching* yang umum digunakan adalah air dan udara bertekanan [6]. Dalam konteks ini, *State of the Art* (SOTA) riset adalah bahwa studi ini merupakan riset pertama kali yang dilakukan di PT INKA terkait proses *quenching* pasca pengelasan GMAW yang bertujuan untuk mengurangi risiko terjadinya *intergranular corrosion* pada material *stainless steel* 201 *middle part underframe* kereta 612.

Berdasarkan kajian tersebut, *theoretical research gap* riset ini adalah belum adanya penerapan variasi media *quenching* di setiap lapisan pengelasan *stainless steel* 201. Selain itu, riset terdahulu belum melakukan pengujian untuk mengidentifikasi terjadinya *intergranular corrosion* yang tidak terdeteksi secara langsung melalui *corrosion test*. Oleh karena itu, keterbaruan riset ini adalah penerapan variasi media *quenching* terhadap *mechanical properties* dan pembentukan *intergranular corrosion stainless steel* 201, dengan keterbaruan metode uji yaitu *corrosion test*.

Berdasarkan *gap analysis* tersebut, tujuan riset ini untuk menganalisis pengaruh variasi media

*quenching* terhadap *mechanical properties* dan ketahanan korosi *stainless steel* 201 pada *middle part underframe* kereta 612. Hasil riset diharapkan memberikan kontribusi berupa pengembangan metode pencegahan *intergranular corrosion* pada *stainless steel* 201, serta rekomendasi teknik untuk *Process Instruction* (PI) di PT INKA.

## 2 KAJIAN LITERATUR

### 2.1 Underframe Kereta 612

*Underframe* adalah komponen utama penopang beban kereta, yang berfungsi menahan beban statis dan beban dinamis, karena ketidakrataan permukaan lintasan [7]. *Underframe* kereta 612 pada *middle part* menggunakan material *austenitic stainless steel* 201 menjadi objek analisis riset ini.

### 2.2 Austenitic Stainless Steel 201

*Austenitic stainless steel* memiliki komposisi 18% kromium (Cr) dan 8% nikel (Ni), sehingga sering disebut baja tahan karat [8]. *Austenitic stainless steel* tipe 201 menjadi material/bahan yang dikarakterisasi berdasarkan *mechanical properties* dan pembentukan *intergranular corrosion*.

### 2.3 Gas Metal Arc Welding (GMAW)

GMAW adalah metode pengelasan yang menyambung dua permukaan logam kawat las (*wire*). Proses GMAW menggunakan *shielding gas* untuk menjaga busur las dari paparan langsung udara luar, sehingga mencegah masuknya partikel asing ke area lasan yang menimbulkan kontaminasi [9].

### 2.4 Sensitisasi

Sensitisasi adalah proses terbentuknya endapan krom karbida ( $Cr_{23}C_6$ ) pada batas butir logam yang mengakibatkan *intergranular corrosion* dan menurunkan *mechanical properties* material. Proses ini terjadi saat *austenitic stainless steel* dipanaskan pada temperatur antara 500-850°C, kemudian didinginkan secara perlahan pada suhu ruang [2]. Berdasarkan literasi, sensitisasi mengakibatkan fenomena *intergranular corrosion* yang berpotensi memengaruhi *mechanical properties*.

### 2.5 Intergranular Corrosion

*Intergranular corrosion* terjadi pada bagian pengelasan dengan temperatur antara 500-850°C pada baja tahan karat. *Intergranular corrosion* terjadi karena deplesi kromium pada batas butir yang disebabkan kromium karbida ( $Cr_{23}C_6$ ) [10]. Rencana penyelesaian *intergranular corrosion* adalah dengan penerapan *quenching*.

### 2.6 Quenching

*Quenching* adalah metode pendinginan yang bertujuan memodifikasi *mechanical properties*

baja. Pada baja tahan karat, *quenching* meningkatkan nilai kekerasan dan ketahanan korosi dengan menghasilkan struktur kristal martensit, struktur ini terbentuk ketika baja tahan karat didinginkan dengan cepat dari temperatur tinggi ke temperatur rendah [6]. *Quenching* pada setiap lapisan pengelasan diterapkan sebagai rencana penyelesaian permasalahan.

### 2.7 Mechanical Properties

*Mechanical properties* adalah respon suatu material terhadap beban mekanis yang menunjukkan hubungan antara beban yang diberikan dan deformasi yang terjadi [11]. *Mechanical properties* dalam riset ini berfokus pada nilai kekuatan tarik, kelelahan, dan kekerasan. *Mechanical properties* menjadi variabel terikat yang dipengaruhi *quenching* sebagai variabel bebas.

### 2.8 Tensile Test

*Tensile test* adalah pengujian material dengan memberikan gaya tarik hingga material mencapai batas maksimum tegangan dan regangannya, hingga mengalami deformasi [12]. *Tensile test* menjadi metode pengujian riset, berdasarkan literatur hipotesis nilai kekuatan tarik mengalami penurunan setelah proses *quenching* pada setiap lapisan pengelasan tetapi masih memenuhi *acceptance criteria*.

### 2.9 Fatigue Test

*Fatigue test* menunjukkan diagram hubungan antara tegangan siklik dan jumlah siklus fraktur. Batas ketahanan ditandai dengan tegangan maksimum yang diberikan pada material hingga gagal pada siklus yang tidak terbatas [13]. *Fatigue test* menjadi metode pengujian riset, berdasarkan literatur hipotesis nilai kelelahan material mengalami penurunan setelah proses *quenching* pada setiap lapisan pengelasan tetapi masih memenuhi *acceptance criteria*.

### 2.10 Vickers Hardness Test

*Vickers hardness test* adalah metode pengujian kekerasan menggunakan indentor intan berbentuk piramida dengan alas bujur sangkar [14]. *Hardness test* menghasilkan nilai kekerasan (HV). *Vickers hardness test* menjadi metode pengujian riset ini, berdasarkan literatur hipotesis nilai kelelahan material mengalami peningkatan setelah proses *quenching* pada setiap lapisan pengelasan.

### 2.11 Corrosion Test

*Corrosion test* dengan merendam spesimen dalam larutan asam sulfat mendidih yang mengandung tembaga sulfat dalam waktu tertentu sesuai ASTM Practice F pada ASTM A262. *Corrosion test* menjadi metode pengujian riset ini, berdasarkan literatur hipotesis nilai kelelahan

material mengalami penurunan setelah proses *quenching* pada setiap lapisan pengelasan.

### 2.12 Macro dan Micro Examination

*Macro examination* adalah metode visual untuk mengukur *weld zone*, HAZ, dan *base metal* spesimen uji, menggunakan lensa untuk memperjelas area yang diukur. Sedangkan, *micro examination* (pengamatan struktur mikro) adalah metode untuk mengidentifikasi bentuk struktur mikro menggunakan mikroskop optik [15]. *Macro* dan *micro examination* adalah metode pengamatan struktur material riset ini pasca *corrosion test*.

## 3 METODE RISET

Metode riset ini menggunakan metode kuantitatif eksperimental dengan tujuan untuk menganalisis pengaruh variasi media *quenching* terhadap sifat mekanik dan ketahanan korosi material *stainless steel 201* pada *middle part underframe* kereta 612. Objek riset berupa *stainless steel 201* yang disambung dengan metode *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) menggunakan arus 125 A. Setelah proses pengelasan, setiap lapisan las dikenakan perlakuan *quenching* dengan variasi media *quenching* air, udara bertekanan, dan *non quenching*. Alat dan bahan yang digunakan dalam riset ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Alat dan Bahan

Alat	Bahan
Material <i>stainless steel 201</i>	Mesin las GMAW
Elektroda ER 308 LSi	Computer Numerical Control (CNC) milling machine
<i>Macro cutting disc blande</i>	Mesin gerinda tangan
Mata gerinda	Metmechallurgical cutting machine
<i>Shielding gas</i>	Polishing machine
<i>Polishing cloth</i>	Universal Testing Machine (UTM)
<i>Polishing paper</i>	Fatigue test machine
Pasta poles logam	Vickers hardness test machine
Copper sulfate-sulfuric acid	Apparatus corrosion test
Aquades	Microscope optic micro and macro examination

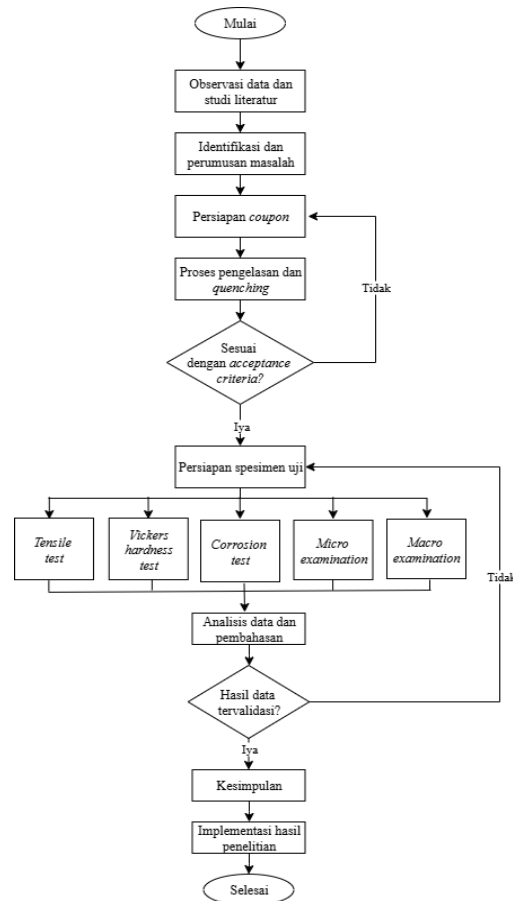
Tahapan riset ini diawali dengan persiapan *coupon*, pengelasan dengan parameter yang ditentukan, serta perlakuan variasi *quenching* pada setiap lapisan las. Setelah spesimen hasil pengelasan sesuai dengan *acceptance criteria*,

dilakukan pengujian. Tahap berupa pengujian *Non-Destructive Test* (NDT) untuk memastikan kualitas awal sambungan. Spesimen selanjutnya diproses melalui beberapa tahapan fabrikasi: pemotongan menggunakan *gap shear* untuk membentuk spesimen uji, pengerjaan detail dengan *CNC milling machine*, pemotongan tambahan menggunakan mesin gerinda potong, dan pemolesan dengan *polishing machine* untuk menghasilkan permukaan sesuai standar pengujian.

Pengujian dilakukan dengan 6 metode, meliputi:

1. *Tensile test* (ASTM E8/E8M) untuk mendapatkan nilai *Ultimate Tensile Strength* (UTS) dan *Yield Strength* (YS),
2. *Fatigue test* (ASTM E606) untuk menentukan *maximum stress* (GPa) dan *number of cycles* hingga kegagalan,
3. *Vickers hardness test* (ASTM E92) untuk memperoleh nilai kekerasan (HV) pada area *weld metal*, *HAZ*, dan *base metal*,
4. *Corrosion test* (ASTM A262 Practice F) dengan larutan  $\text{CuSO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ , dilakukan selama 120 jam untuk memperoleh *corrosion rate* (mm/bulan),
5. *Macro examination* (ASTM E381) untuk identifikasi zona las (*weld zone*, *HAZ*, *base metal*), dan
6. *Micro examination* (ASTM E3) untuk menganalisis struktur mikro dan indikasi *intergranular corrosion*.

Variabel riset ini ada 3 jenis, variabel bebas yaitu variasi *quenching* media air, media udara bertekanan, dan *non-quenching*, variabel terikat yaitu nilai *tensile test*, *fatigue test*, *vickers hardness test*, *corrosion test*, hasil *macro examination*, dan *micro examination*, variabel kontrol yaitu material *stainless steel 201* dengan ketebalan 4,5 mm, menggunakan mesin las jenis GMAW dengan arus listrik 125 A. Data hasil pengujian dianalisis menggunakan metode statistik *Analysis of Variance* (ANOVA) menggunakan software SPSS untuk menilai signifikansi perbedaan antar perlakuan *quenching*. Tahapan riset dapat dilihat pada Gambar 1.

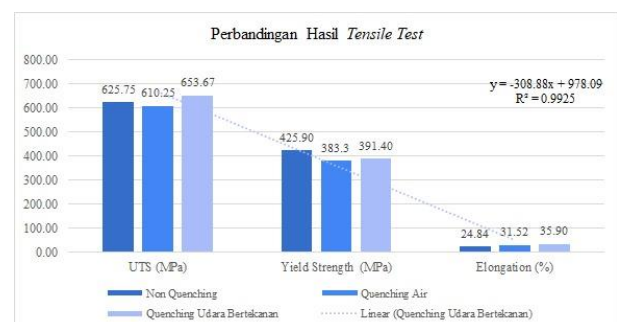


Gambar 1. Flowchart Tahapan Riset

## 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Tensile Test

Pada *tensile test* variasi *quenching* menghasilkan perbedaan yang signifikan terhadap *mechanical properties stainless steel 201*. *Tensile test* merupakan pengujian spesimen dengan memberikan gaya tarik hingga spesimen mencapai batas maksimum tegangan dan regangannya, hingga mengalami deformasi [12]. *Tensile test* bertujuan untuk mengetahui nilai *ultimate tensile strength* (Mpa), *yield strength* (Mpa), dan *elongation* (%). Hasil *tensile test* dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Grafik Ultimate Tensile Strength

Berdasarkan grafik hasil uji tarik, perlakuan *quenching* dengan media udara bertekanan menghasilkan sifat mekanik terbaik. Nilai *Ultimate Tensile Strength* (UTS) yang diperoleh sebesar 657,3 MPa dengan *elongation* mencapai 41,2%, lebih tinggi dibandingkan *quenching* air dengan UTS 642,8 MPa dan *elongation* 38,5%, serta *non-quenching* dengan UTS 621,4 MPa dan *elongation* 36,7%. Hubungan linear antara UTS dan *elongation* menunjukkan bahwa semakin tinggi *elongation*, maka pertambahan panjang material semakin besar sehingga memengaruhi kekuatan mekaniknya [17].

Untuk memperkuat hasil pengamatan secara visual pada grafik *Ultimate Tensile Strength*, dilakukan analisis statistik menggunakan SPSS untuk mengetahui tingkat signifikansi pengaruh variasi media *quenching* terhadap sifat mekanik material. Analisis ini dilakukan dengan metode *One Way ANOVA* karena terdapat satu variabel bebas (media *quenching*: udara, air, dan tanpa perlakuan) dan satu variabel terikat (*UTS* dan *elongation*). Hasil uji ANOVA disajikan pada Gambar 3.

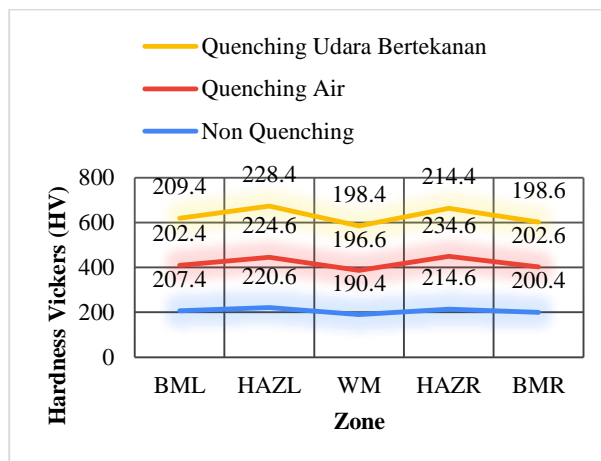
ANOVA					
VickersHardnessTest	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1977.856	4	494.464	13.399	<.001
Within Groups	369.040	10	36.904		
Total	2346.896	14			

Gambar 3. Hasil Uji ANOVA *Tensile Test*

Berdasarkan hasil uji ANOVA, nilai signifikansi untuk *Yield Strength* (<0,001) dan *Elongation* (0,011) menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan antar variasi media *quenching*. Artinya, perlakuan pendinginan memberikan pengaruh nyata terhadap kekuatan dan keuletan stainless steel 201. Riset pada austenitik stainless steel 304 terhadap mekanisme deformasi dan propagasi retak menunjukkan bahwa ukuran butir berpengaruh pada ketahanan fisik dan mekanika patahan, sehingga hasil *tensile* ini konsisten dengan literatur terbaru [18].

#### 4.2 Vickers Hardness Test

Hasil *vickers hardness test* diperoleh nilai kekerasan pada area pengelasan setiap variasi media *quenching*. *Vickers hardness test* merupakan metode pengujian kekerasan menggunakan indentor intan dengan alas bujur sangkar [19]. Perbandingan nilai kekerasan tersebut terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik Perbandingan Nilai *Hardness Vickers*

Berdasarkan grafik hasil uji kekerasan *Vickers*, perlakuan *quenching* udara bertekanan menghasilkan nilai kekerasan rata-rata tertinggi pada sebagian besar zona pengelasan, yaitu sebesar 225,3 HV pada HAZL kiri (HAZL), 189,64 HV pada *weld metal* (WM), dan 221,36 HV pada HAZ kanan (HAZR). Nilai ini lebih tinggi dibandingkan *non quenching* dengan kekerasan rata-rata 215,7 HV (HAZL), 184,84 HV (WM), dan 215,16 HV (HAZR). Adapun *quenching* air menunjukkan nilai kekerasan tertinggi secara keseluruhan, yaitu 230,5 HV pada HAZL, 195,82 HV pada WM, dan 234,22 HV pada HAZR, meskipun peningkatan ini disertai risiko retak mikro akibat pendinginan cepat. Fenomena ini disebabkan karena udara tidak memiliki viskositas, tetapi hanya memiliki massa jenis, sehingga laju pendinginannya lambat namun dapat memberikan pendinginan lebih seragam dan stabil. Sedangkan air memiliki laju pendinginan cepat, sehingga menimbulkan *thermal shock*, menyebabkan distorsi dan retak yang dapat menurunkan nilai kekerasan [20].

Hal ini membuktikan bahwa *quenching* udara bertekanan mampu meningkatkan kekerasan material secara signifikan dibandingkan *non quenching*. Untuk mengetahui pengaruh variasi media *quenching* terhadap nilai kekerasan material, dilakukan analisis statistik menggunakan SPSS dengan metode *One Way ANOVA*. Analisis ini bertujuan menguji apakah terdapat perbedaan yang signifikan antar perlakuan *quenching* terhadap hasil uji kekerasan (*Vickers Hardness Test*). Hasil analisis ditampilkan pada Gambar 5.

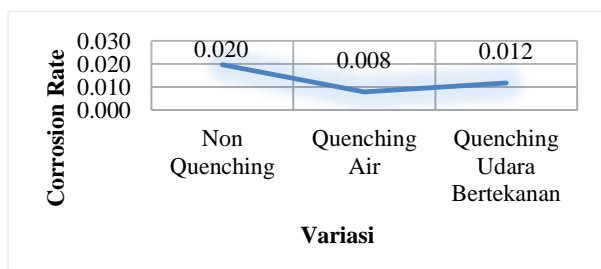
ANOVA					
VickersHardnessTest					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1977.856	4	494.464	13.399	<.001
Within Groups	369.040	10	36.904		
Total	2346.896	14			

Gambar 5. Hasil Uji ANOVA *Vickers Hardness Test*

Berdasarkan hasil uji ANOVA, diperoleh nilai signifikansi (Sig. < 0,001) yang lebih kecil dari 0,05. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan antar variasi media *quenching* terhadap nilai kekerasan stainless steel 201. Dengan demikian, perlakuan pendinginan memberikan pengaruh nyata terhadap perubahan kekerasan material.

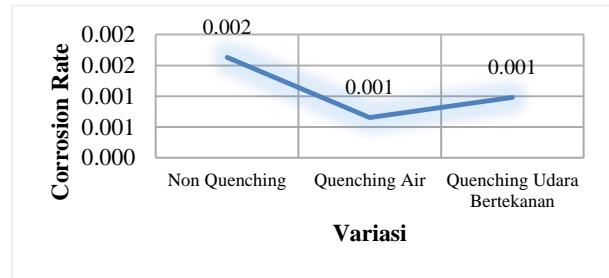
#### 4.3 Corrosion Test

*Corrosion test* dilakukan dengan merendam spesimen dalam larutan asam sulfat panas yang mengandung tembaga sulfat dalam waktu tertentu sesuai ASTM Practice F pada ASTM A262. Dari hasil *corrosion test* diperoleh nilai *corrosion rate* untuk setiap variasi media *quenching* yang menunjukkan seberapa besar tingkat ketahanan material terhadap serangan korosif. Nilai *corrosion rate* dalam satuan milimeter (mm) per bulan dan per tahun terlihat pada grafik di dibawah ini.



Gambar 6. Grafik Nilai *Corrosion Rate* (mm/year)

Berdasarkan Grafik Nilai *Corrosion Rate* (mm/year), aju korosi tertinggi diperoleh pada spesimen *non-quenching* dengan nilai sekitar 0,020 mm/tahun, sedangkan nilai terendah terdapat pada *quenching udara bertekanan* dengan sekitar 0,008 mm/tahun. Hasil ini menunjukkan bahwa perlakuan *quenching* berpengaruh signifikan terhadap penurunan laju korosi *stainless steel* 201. Proses *quenching* udara bertekanan mampu menghasilkan struktur mikro yang lebih seragam dan stabil, sehingga mengurangi kecenderungan terjadinya korosi batas butir.



Gambar 7. Grafik Nilai *Corrosion Rate* (mm/month)

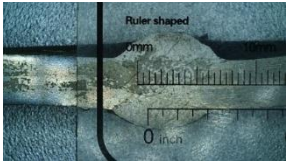
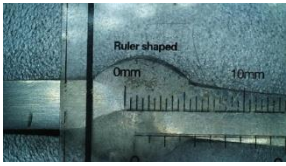
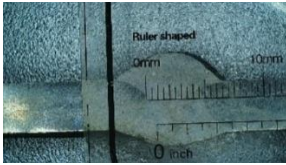
Grafik nilai *Corrosion Rate* (mm/month) menunjukkan pola penurunan signifikan akibat variasi media *quenching*, dengan kisaran nilai antara 0,0020–0,0008 mm/bulan. Spesimen *non-quenching* memiliki laju korosi tertinggi, sedangkan *quenching* air menunjukkan laju korosi terendah. Hal ini membuktikan bahwa *quenching* air memberikan ketahanan korosi terbaik dibandingkan *quenching* udara bertekanan maupun *non-quenching*, karena proses *quenching* menghasilkan struktur mikro yang lebih halus dan padat.

Berdasarkan grafik *corrosion test* tersebut, diketahui bahwa variasi media *quenching* memberikan pengaruh signifikan terhadap ketahanan korosi pada *stainless steel* 201. *Quenching* air paling efektif menurunkan *corrosion rate*, diikuti *quenching* udara bertekanan, sedangkan *non quenching* menghasilkan ketahanan korosi paling rendah. Hal ini disebabkan oleh perubahan yang terjadi pada struktur mikro *stainless steel* 201 akibat laju pendinginan air yang cepat, sehingga akan menghasilkan perkembangan bentuk struktur yang halus serta rapat [21]. Dengan demikian, penggunaan metode *quenching* terutama media air menghasilkan nilai ketahanan korosi lebih efektif dalam perlindungan jangka panjang komponen kereta terhadap degradasi lingkungan.

#### 4.4 Macro Examination

*Macro examination* diketahui untuk mengetahui lebar *fusion weld* dengan menggunakan *microscope digital* 1600X 12MP, di mana spesimen uji yang digunakan sebanyak 3 spesimen (1 spesimen per variasi *quenching*) dengan standar ASTM E381. Hasil *micro examination* dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil *Macro Examination*

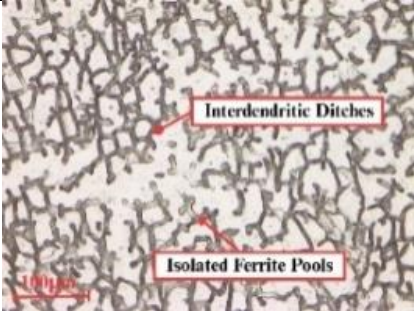
Hasil <i>Macro Examination</i>	Keterangan
	Lebar <i>fusion zone</i> sekitar 5 mm, kontur sambungan halus dan seragam tanpa cacat makroskopis, termasuk kategori <i>good weld quality</i> .
	Lebar <i>fusion zone</i> sekitar 4,5 mm, terdapat sedikit perubahan warna akibat oksidasi ringan namun tidak ditemukan cacat, sehingga masih termasuk <i>acceptable weld</i> .
	Lebar <i>fusion zone</i> sekitar 3,5 mm, bentuk bead merata dengan transisi halus antar daerah fusi, tidak terdapat retak maupun porositas, dikategorikan <i>sound weld quality</i> .


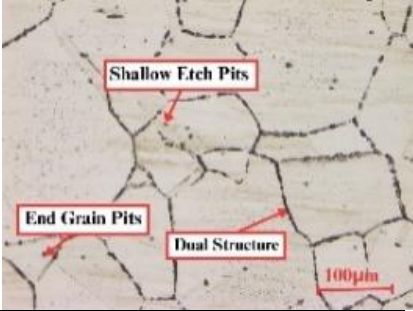
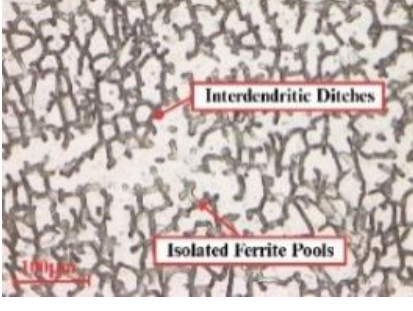
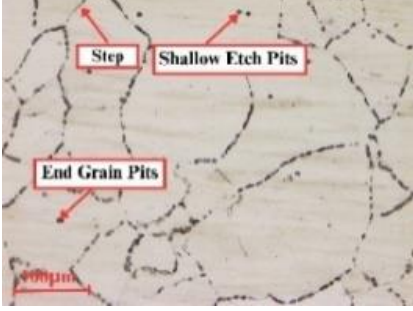
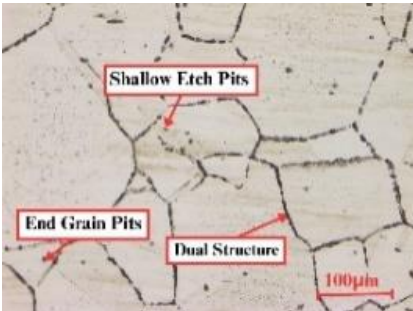
Berdasarkan tabel di atas dianalisis bahwa setiap jenis variasi memiliki sambungan las yang baik tanpa cacat makroskopis.

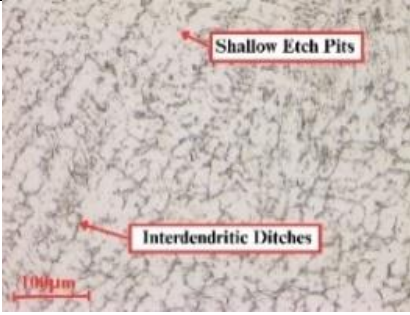
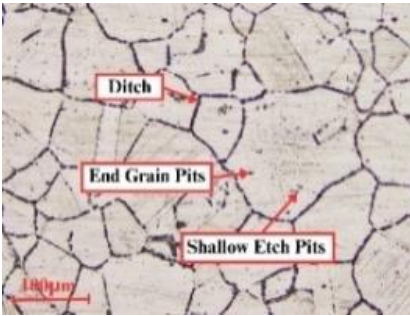
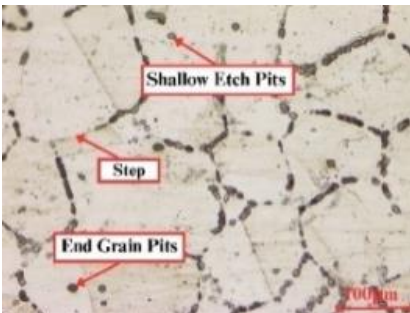
4.5 *Micro Examination*

*Micro examination* (pengamatan struktur mikro) adalah metode untuk mengidentifikasi bentuk struktur mikro menggunakan mikroskop optik [15]. Hasil *macro examination* terlihat pada gambar di bawah ini.

Tabel 3. Hasil *Micro Examination*

Media	Hasil <i>Micro Examination</i>
Air	

Media	Hasil <i>Micro Examination</i>
Udara Bertekanan	
	
	
	
	

Media	Hasil <i>Micro Examination</i>
Non- Quenching	
	
	

Variasi media *quenching* memengaruhi pembentukan *intergranular corrosion* secara signifikan pada *base metal*, HAZ, dan *weld zone*. Pada *non quenching* korosi antar butir cukup parah, ditandai terbentuknya *ditch* dan *step structure* akibat presipitasi kromium karbida ( $Cr_{23}C_6$ ) di batas butir. Pada *quenching* udara, korosi masih terjadi namun intensitasnya lebih rendah dibanding *non quenching*, dengan *ditch* yang lebih dangkal dan distribusi kerusakan yang tidak merata. Sementara itu, material *quenching* air memperlihatkan ketahanan korosi terbaik, dengan minimnya indikasi *intergranular corrosion* serta permukaan batas butir yang relatif bersih. Perbedaan ini menunjukkan *quenching* air mampu menghambat presipitasi kromium karbida, sehingga mempertahankan kandungan kromium di batas butir dan meningkatkan ketahanan terhadap korosi antar butir.

#### 4.6 Sintesis Hasil

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, variasi media *quenching* memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat mekanik,

ketahanan korosi, serta karakteristik mikrostruktur material *stainless steel 201* pada sambungan las *underframe* kereta. Pada uji tarik (*tensile test*), *quenching* udara bertekanan menghasilkan kekuatan tarik (*ultimate tensile strength*) dan keuletan (*elongation*) tertinggi dibandingkan media lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa *quenching* udara bertekanan mampu menghasilkan keseimbangan antara kekuatan dan keuletan akibat pembentukan struktur butir yang lebih seragam dan stabil. Sedangkan pada uji kekerasan (*Vickers hardness test*), *quenching* air menunjukkan nilai kekerasan tertinggi pada seluruh zona pengelasan, disebabkan oleh laju pendinginan cepat yang membentuk struktur mikro lebih rapat. Namun, laju pendinginan yang terlalu tinggi berpotensi menimbulkan *thermal shock* dan retak mikro, sehingga secara keseluruhan *quenching* udara bertekanan dianggap lebih stabil dan efektif.

Hasil uji korosi menunjukkan bahwa variasi media *quenching* berpengaruh nyata terhadap ketahanan korosi. *Quenching* air memiliki *corrosion rate* terendah, diikuti oleh udara bertekanan, sedangkan *non-quenching* menghasilkan ketahanan paling rendah. Hal ini disebabkan struktur mikro hasil *quenching* air yang lebih halus dan homogen, menghambat terbentuknya presipitasi kromium karbida di batas butir yang memicu korosi antar butir. Temuan ini diperkuat oleh *macro* dan *micro examination*, di mana semua spesimen menunjukkan kualitas sambungan las yang baik tanpa cacat makroskopis. Namun, secara mikroskopis, *non-quenching* memperlihatkan korosi antar butir yang parah dengan terbentuknya *ditch structure*, sedangkan *quenching* udara bertekanan menunjukkan intensitas korosi lebih rendah, dan *quenching* air menghasilkan permukaan batas butir yang bersih serta indikasi korosi paling minimal. Secara integratif, dapat disimpulkan bahwa proses *quenching* berperan penting dalam menentukan performa akhir *stainless steel 201*. Media air memberikan ketahanan korosi terbaik, sedangkan udara bertekanan menghasilkan kombinasi paling seimbang antara kekuatan mekanik dan stabilitas struktur. Dengan demikian, pemilihan media *quenching* harus disesuaikan dengan kebutuhan performa. Secara ilmiah, riset ini memberikan kontribusi baru berupa hubungan empiris antara media *quenching* dan penurunan presipitasi kromium karbida pada *stainless steel 201* hasil GMAW. Temuan ini memperkaya literatur *quenching* seri 200 dengan pendekatan integratif antara sifat mekanik, korosi, dan mikrostruktur

## 5 KESIMPULAN

Riset ini menunjukkan bahwa variasi media *quenching* berpengaruh signifikan terhadap perubahan karakteristik mekanik dan ketahanan korosi pada *stainless steel* 201 hasil pengelasan GMAW. Proses *quenching* dengan media air menghasilkan laju korosi terendah sebesar 0,001 mm/bulan (0,008 mm/tahun), menunjukkan peningkatan ketahanan terhadap *intergranular corrosion* akibat penurunan presipitasi kromium karbida pada batas butir. Sementara itu, *quenching* dengan udara bertekanan menghasilkan kombinasi paling seimbang antara *ultimate tensile strength* (653,67 MPa), *elongation* (35,90%), dan kekerasan (228,4 HV) di zona HAZL. Kondisi ini disebabkan oleh mekanisme pendinginan cepat yang membatasi waktu tinggal pada temperatur sensitisasi (500–850 °C), sehingga menghambat difusi karbon dan pembentukan fasa karbida yang menjadi inisiasi korosi batas butir. Sebaliknya, *non-quenching* menghasilkan ketahanan leleh tertinggi pada tegangan tinggi karena struktur austenitik lebih stabil, namun lebih rentan terhadap korosi antar butir akibat presipitasi karbida yang tidak terhambat. Secara ilmiah, hal ini menunjukkan bahwa laju pendinginan berperan sebagai variabel kunci yang memengaruhi sensitisasi dan distribusi fasa mikro, yang secara langsung menentukan sifat mekanik dan ketahanan korosi material. Untuk deteksi *intergranular corrosion* yang lebih presisi dan kuantitatif pada riset mendatang, disarankan untuk menggunakan ASTM A262 Practice B.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT INKA (Persero), Laboratorium Manufaktur, Laboratorium Uji Bahan, serta Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Madiun yang telah memberikan izin dan memfasilitasi kegiatan riset ini. Tak lupa penulis mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan, khususnya tim bimbingan teknis riset mahasiswa, yang turut bersinergi dalam melaksanakan penelitian hingga tuntas.

Sebagai tambahan, sebagian hasil penelitian ini telah dipublikasikan sebelumnya dalam artikel internasional berjudul “*Effect of Quenching Media on Mechanical Properties and Intergranular Corrosion of GMAW-Welded Stainless Steel 201 in Train 612 Underframe*”, yang diterbitkan pada *International Research Journal of Advanced Engineering and Science (IRJAES)*, Volume 10, Issue 4, halaman 104–108, tahun 2025 [21]. Naskah ini merupakan versi pengembangan dan penyesuaian dalam Bahasa Indonesia untuk

keperluan publikasi di Jurnal Perkeretaapian Indonesia (JPI).

## REFERENSI

- [1] M. N. S. Kencana, T. A. O. Awan, M. D. Priantoro, and K. N. Sabrina, “Analisis Variasi Arus Pengelasan GMAW terhadap Korosi Batas Butir Material SUS 201 pada *Underframe* Kereta 612,” *Laporan Akhir PKM RE 2025*, Politeknik Negeri Madiun 2024.
- [2] G. Priyotomo, I. N. G. P. Astawa, and F. Rokhmanto, “The Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties of J4 Series Stainless Steel Metals,” *Teknik*, vol. Vol 42, no. No. 2, p. Hal. 117-122, Aug. 2021, doi: 10.14710/teknik.v42i2.36461.
- [3] M. A. Hidayat, “Pengaruh *Heat Treatment* dan Variasi Pendinginan terhadap Korosi Batas Butir pada Baja *Stainless Steel* 316,” Sarjana, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia, 2020. [Accessed: Sept. 28, 2025]. [Online]. Available: <https://repository.ub.ac.id/id/eprint/183335/>
- [4] H. Duan, Z. Zhang, Y. Zhao, Y. Liu, S. Yue, and H. He, “Effect of Grain Size on Fatigue Strength of 304 Stainless Steel,” *High Temperature Materials and Processes*, vol. 43, no. 1, p. 20220314, Mar. 2024, doi: 10.1515/htmp-2022-0314.
- [5] D. Priyanga, “Komunikasi Pribadi - Proses Observasi Permasalahan Industri pada PT INKA (Persero),” May 01, 2025.
- [6] D. Leni, Islahudiin, Mulyadi, Hendra, and R. Sumiyati, “Analisis Perbandingan Metode Quenched Terhadap Sifat Mekanik Baja Tahan Karat Austenitik Berbasis Big Data,” *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, vol. Vol. 7, no. No. 2, p. Hal. 220-228, July 2024, doi: <https://doi.org/10.30596/rmme.v7i2.18025>.
- [7] W. D. Kurniawan, N. K. A. Fahmi, and T. Tarmuji, “Perancangan Universal Jig Rotary *Underframe* Kereta PT. Industri Kereta Api Madiun,” *INAJET*, vol. Vol. 3, no. No. 1, p. Hal. 10-16, Sept. 2020, doi: 10.26740/inajet.v3n1.p10-16.
- [8] S. H. Siahaan, “Kajian Laju Korosi terhadap Stainless Steel dalam Larutan HNO<sub>3</sub>,” *IND TECH*, vol. Vol. 1, no. No. 1, p. Hal. 108-133, June 2021, doi: 10.46306/tgc.v1i1.9.
- [9] P. Fadilah, Riswanda, and H. Kadir, “Pengaruh Variasi Arus terhadap Sifat Mekanik Sambungan Las GMAW Material Tidak Sejenis ASS 304L dengan AISI 1015,” 2021.

- [10] A. Setiawan, P. Pribadhi, and M. Ari, "Analisis Pengaruh Heat Treatment Terhadap Sifat Mekanik dan Ketahanan Korosi Intergranular SA-240 TP316L," *j. St. terap*, vol. Vol. 6, no. No. 1, p. Hal. 53-59, Apr. 2020, doi: 10.32487/jst.v6i1.803.
- [11] Saripuddin, *Mengenal Logam sebagai Bahan Teknik*, 1st ed., vol. 1. Yogyakarta: Yogyakarta : Deepublish., 2021.
- [12] Y. Amalia and S. Rahmatillah, "Analisis Sambungan Las Baja S355 J2 Sebagai Penyusun Welding Procedure Specification di PT Industri Kereta Api," *JUSTER*, vol. Vol. 1, no. No. 2, p. Hal. 1-6, May 2022, doi: 10.55784/juster.v1i2.62.
- [13] N. Muhayat, Y. A. Matien, H. Sukanto, Y. C. N. Saputro, and Triyono, "Fatigue Life of Underwater Wet Welded Low Carbon Steel SS400," *Heliyon*, vol. Vol. 6, no. No. 2, p. Hal. 1-9, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03366.
- [14] B. K. S. Handaru, "Pengaruh Proses Quenching Berulang Hasil Pengelasan SMAW pada Pipa Kilang ASTM A 106 Grade B terhadap Kekuatan Tarik dan Kekerasan," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. Vol. 10, no. No. 2, p. Hal. 91-96, 2022.
- [15] B. Sulistiyo and H. Purwanto, "Analisis Pengaruh Arus Pengelasan GMAW Terhadap Struktur Makro, Mikro dan Sifat Mekanik Pada Material Baja Karbon ASTM A36," *JIM*, vol. Vol. 17, no. No. 1, p. Hal. 36-42, Apr. 2021, doi: 10.36499/mim.v17i1.4346.
- [16] N. Nurudin, A. T. A. Salim, I. Yuwono, A. Rahmatika, and S. Suparman, "Analisis Sambungan Las GMAW Baja ASTM A36 yang Terpapar Panas Tinggi dan Pendinginan Cepat," *JTT*, vol. 8, no. 2, p. 166, Oct. 2022, doi: 10.31884/jtt.v8i2.436.
- [17] X. Zhang, J. Wang, and Q. Li, "Effect of twin-related boundaries distribution on carbide precipitation and intergranular corrosion behavior in nuclear-grade higher carbon austenitic stainless steel," *Corrosion Science*, vol. 212, p. 112120, 2023, doi: 10.1016/j.corsci.2023.112120.
- [18] B. K. S. Handaru and Yunus, "Pengaruh Proses *Quenching* Berulang Hasil Pengelasan SMAW pada Pipa Kilang ASTM A 106 Grade B Terhadap Kekuatan Tarik dan Kekerasan," vol. 10, no. 02, 2022.
- [19] Maulana, "Analisis Pengaruh Feeding Pada Proses Grinding Journal Terhadap Nilai Kualitas Camshaft Type 2TNV70 Pasca IQT," *MESIN*, vol. 19, no. 2, pp. 32–46, Feb. 2023, doi: 10.61488/kalpika.v19i2.47.
- [20] J. Aldo and H. Hariyono, "Pengaruh Temperatur Media Pendingin terhadap Perubahan Struktur Mikro Baja Karbon Sedang," *Sebatik*, vol. 26, no. 2, pp. 718–724, Dec. 2022, doi: 10.46984/sebatik.v26i2.2081.
- [21] Wahidah, V. A. H., Kencana, M. N. S., Saputra, R. E., Khadafi, F. M., Putri, N. R., Salim, A. T. A., & Priyanga, D. (2025). *Effect of Quenching Media on Mechanical Properties and Intergranular Corrosion of GMAW-Welded Stainless Steel 201 in Train 612 Underframe. International Research Journal of Advanced Engineering and Science*, 10(4), 104–108.