

## ANALISIS SAMBUNGAN LAS GMAW BAJA ASTM A36 YANG TERPAPAR PANAS TINGGI DAN PENDINGINAN CEPAT

Nurudin<sup>1</sup>, A. T. A. Salim<sup>2</sup>, I. Yuwono<sup>3</sup>, A. Rahmatika<sup>4</sup>, dan Suparman<sup>5</sup>

<sup>1,2,3</sup>Program Studi Perkeretaapian, Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Madiun

<sup>4</sup>Fakultas Vokasi Teknologi Pengelasan dan Fabrikasi, Institut Teknologi Sains Bandung

<sup>5</sup>Specialist Muda Welding Engineer, Technology Division, PT INKA

Email: <sup>1</sup>nurudin723@gmail.com, <sup>2</sup>alfitranggono@pnm.ac.id, <sup>3</sup>indarto@pnm.ac.id,

<sup>4</sup>amelia.rahmatika@gmail.com, <sup>5</sup>suparman@inka.co.id

### Abstrak

Kebakaran merupakan peristiwa kobaran api yang tidak disengaja dan timbul dari berbagai penyebab. Kebakaran pada konstruksi baja khususnya pada sambungan pengelasan mengakibatkan kerusakan, perubahan struktur kristal, dan sifat mekanik material. Efek lain dari fenomena kebakaran, material mengalami pendinginan cepat akibat pemadaman menggunakan air. Penelitian ini bertujuan mensimulasikan kebakaran pada material baja ASTM A36 untuk menganalisis dampak kebakaran. Metode penelitian ini adalah melakukan pengelasan GMAW pada material baja A36 dengan perlakuan panas temperatur 400 °C hingga 700 °C dan pendinginan cepat menggunakan air. Hasil penelitian adalah sifat mekanik material berupa struktur kristal, tingkat kekerasan dan ultimate tensile strength. Teramati struktur kristal ferit dan perlit, terjadi perubahan struktur yaitu ferit kasar, ferit halus, dan campuran bainit martensit. Nilai kekerasan tertinggi adalah *coupon* temperatur 550 °C hingga 700 °C, *coupon* pembandingan, dan *coupon* temperatur 400 °C hingga 550 °C yaitu 169,3 HV, 166,3 HV, dan 141,3 HV pada *weld zone*. Patahan uji tarik pada *base metal* dengan nilai *ultimate tensile strength coupon* temperatur 550 °C hingga 700 °C sebesar 481,75 N/mm<sup>2</sup>, *coupon* pembandingan 478,5 N/mm<sup>2</sup>, dan *coupon* temperatur 400 °C hingga 550 °C yaitu 456 N/mm<sup>2</sup>. Material bersifat ulet (*ductile*).

**Kata Kunci:** GMAW, ASTM A36, tensile test, hardness test, micro test

### Abstract

*Fires in steel construction, especially in welding joints, cause damage, changes in crystal structure, and mechanical properties of the material. Another effect of the fires, the material undergoes rapid cooling due to extinguishing using water. This research aims to simulate fires on ASTM A36 steel material to analyze the impact of fires. The method of this research is to perform GMAW welding on A36 steel material with heat treatment at 400 °C until 700 °C and rapid cooling using water. The results of the research are the mechanical properties of the material in the form of crystal structure, hardness level and ultimate tensile strength. The crystal structure of ferrite and pearlite was observed, there was a change in structure, namely coarse ferrite, fine ferrite, and a mixture of bainite martensite. The highest hardness values of coupons temperature is 550 °C until 700 °C, comparison coupons, and coupons temperature at 400 °C-550 °C, which value 169,3 HV, 166.3 HV, and 141,3 HV in the weld zone. Tensile test fractures on the base metal with the ultimate tensile strength coupon with temperature 550 until 700 °C of 481,75 N/mm<sup>2</sup>, the comparison coupon of 478,5 N/mm<sup>2</sup>, and the temperature coupon of 400 until 550 °C which is 456 N/mm<sup>2</sup>. The material is ductile.*

**Keywords:** GMAW, ASTM A36, tensile test, hardness test, micro test

### I. PENDAHULUAN

Kebakaran sering terjadi dengan berbagai penyebab pada hutan, bangunan, transportasi, dan

industri. Kebakaran berakibat bertambah panas khususnya daerah sambungan pengelasan dan dilakukan pendinginan cepat dari upaya pemadaman. Sambungan las adalah gabungan dua

logam atau lebih dengan cara mencairkan sebagian logam induk dan dengan atau tanpa logam pengisi yang memanfaatkan energi panas (Nugroho & Setiawan, 2018). Kebakaran mengakibatkan perubahan kualitas sifat mekanik berupa struktur mikro, tingkat kekerasan, dan kekuatan tarik material setelah mengalami kebakaran dan pendinginan (Baihaqi & Supomo, 2018). Pengaruh *PWHT* baja karbon ST 42 dengan pengelasan *SMAW* didapat hasil material mengalami penurunan kekuatan tarik dan kekerasan bila struktur mikronya semakin kasar begitu juga sebaliknya (Nasra & Kewas, 2020). Sambungan las material SA 387 *Grade 11 Class 1* akibat *PWHT* didapat hasil semakin tinggi temperatur dan *holding time* maka semakin menurun tingkat kekerasan material (Putra et al., 2019). Pembakaran di atas temperatur austenit terhadap material SA 36 dengan metode pengelasan *SMAW* dimana semakin tinggi temperatur pembakaran maka semakin rendah kekuatan tarik dan kekerasannya (Yusuf, 2016). Material pasca terbakar memiliki tegangan tarik dan luluh meningkat seiring dengan temperatur pembakaran, sedangkan nilai regangan cenderung menurun (Baihaqi & Supomo, 2018).

Berdasarkan tinjauan literatur didapat beberapa penelitian telah meneliti pengaruh pembakaran logam dengan variasi temperatur dengan metode pengelasan *SMAW*, akan tetapi kurang penelitian dengan metode pengelasan *GMAW*. Penggunaan pengelasan *GMAW* (*Gas Metal Arc Welding*) karena banyak digunakan dalam dunia industri (Prahastho, 2019). Perlakuan panas menggunakan *furnace*, tidak ditemukan proses pembakaran dengan paparan api secara langsung dengan *blander*. Penelitian ini akan dilakukan eksperimen terkait karakteristik sambungan las *GMAW* yang terpapar temperature 400 °C hingga 700 °C dengan pendinginan cepat pada material *ASTM A36*. Tujuan perlakuan panas dan pendinginan cepat untuk mengetahui akibat terjadinya kebakaran dengan menganalisis karakteristik sifat mekanik berdasarkan *bend test*, *micro test*, *hardness vickers test*, dan *tensile test*.

## II. METODE

Metode penelitian menggunakan metode eksperimen, proses pengelasan dilaksanakan di *workshop* PT INKA. Pengujian dilakukan di laboratorium Politeknik Negeri Madiun untuk memperoleh data tentang pengaruh perlakuan panas dengan pendinginan cepat. Perlakuan panas mengacu standar ISO 834 variasi temperatur mulai dari 200 °C hingga 1000 °C (Baihaqi & Supomo, 2018). Variabel penelitian dengan perlakuan panas

pada temperatur 400 °C hingga 550 °C, temperatur 400 °C hingga 550 °C, dan tanpa perlakuan panas.

Jumlah coupon setiap variabel pengujian sebanyak 3 kali untuk dirata rata dan dianalisis hasilnya.

### Baja ASTM A36

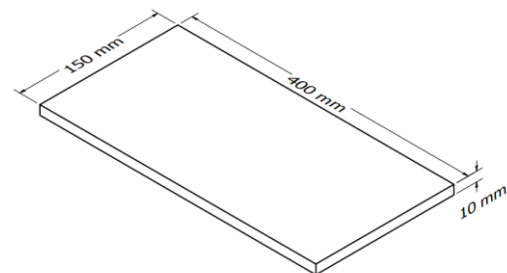
Baja *ASTM A36* merupakan baja karbon rendah yang memiliki sifat mampu dilas dengan baik, digunakan di berbagai bidang seperti industri, otomotif, rancang bangun dan transportasi (Faizal & Umam, 2018). Baja *ASTM A36* memiliki berbagai unsur dapat dilihat pada Tabel (Jordi et al., 2019).

Tabel 1. Unsur baja *ASTM A36*

Unsur	Kadar Persentase (%)
Karbon (C)	0,14
Silikon (Si)	0,244
Mangan (Mn)	0,64
Fosfor (P)	0,012
Sulfur (S)	0,0066
Tembaga (Cu)	0,01

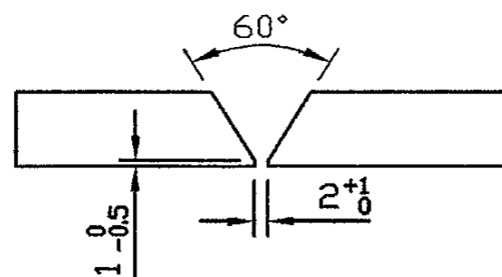
### Persiapan coupon

Pemotongan *coupon* menggunakan *CNC plasma cutting* sesuai Gambar dengan penambahan dimensi 3mm untuk menghindari efek panas pemotongan.



Gambar 1. Dimensi coupon

Sudut bevel sebesar 30° dan *root face* 1 mm sesuai Gambar 1.



Gambar 1. Bevel coupon

**Pengelasan**

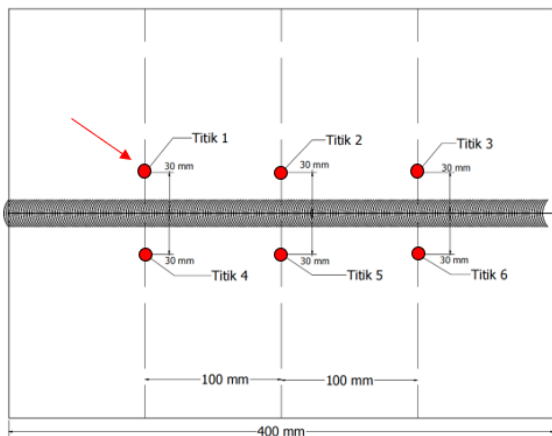
Pengelasan menggunakan *GMAW* dilakukan *welder* tersertifikasi di PT INKA (Persero). Tipe sambungan yaitu *V groove butt joint*, posisi 1G dengan *root gap* 2 hingga 3 mm serta dengan parameter pengelasan lainnya yang disesuaikan dengan *Welding Procedure Specification (WPS)* seperti parameter Tabel .

Tabel 2. Parameter pengelasan

Parameter	Keterangan
Gas	Argon Balance (Ar 82 % + CO <sub>2</sub> 18 % )
Tegangan	(Root = 21 hingga 23 V) dan (Filler/Cap = 26 hingga 28 V)
Arus	(Root = 120 hingga 140 A) dan (Filler/Cap = 235 hingga 255 A)
Wire	ER70S-6 (1.2 mm)
Aliran Gas	17 l/menit

**Perlakuan Panas**

Pemanasan *coupon* bertujuan untuk mensimulasikan terjadinya kebakaran. Temperatur perlakuan panas yaitu 400 °C hingga 550 °C dan 550 °C hingga 700 °C. Pemanasan yang dilakukan pada area *weld zone* dengan menggunakan mesin *blander* dengan gas *LPG (liquefied petroleum gas)* (Riyadi & Pratama, 2019), *holding time* 13 hingga 15 menit (Prabowo, 2019). Setelah mencapai waktu dan temperatur yang diinginkan maka dilakukan pendinginan dengan air mengalir hingga temperatur *coupon* kurang dari 100 °C (Prabowo, 2019). Gambar 2 merupakan titik pengukuran temperatur perlakuan panas.

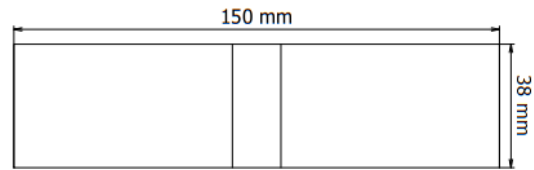


Gambar 2. Titik pengukuran perlakuan panas

**Bending Test**

Pengujian *bending* mengacu pada standar *ASME IX QW-462.3(a)* untuk pembentukan *coupon*,

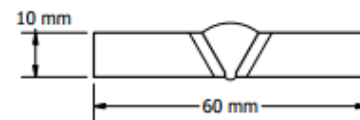
*ASME IX QW-466.1* untuk penentuan *mandrel* (*ASME, 2019*). Mesin yang digunakan yaitu *MTS Exceed E64*. Dimensi *coupon bending* sesuai Gambar 4.



Gambar 3. *Coupon bend test*

**Micro Test**

Pengujian mikro menggunakan mesin *Polisher Shapir 330* untuk pembuatan *coupon* pengujian dan *Mikroskop Olympus DP 22* untuk melakukan pengamatan pada *coupon* uji dengan mengacu pada standar *ASTM E407* sesuai Gambar (*ASTM A588, 2012*).



Gambar 5. *Coupon micro test*

**Hardness Vickers Test**

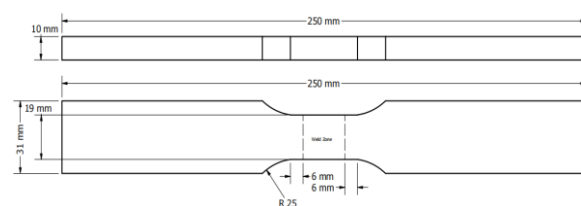
Pengujian kekerasan dengan metode *hardness vickers* mengacu pada standar *ASTM E92* (*ASME, 2017*). Mesin yang digunakan yaitu *Mitutoyo Hardness Tester*. Titik indentasi sesuai Gambar 4.



Gambar 4. *Coupon hardness vickers test*

**Tensile Test**

Pengujian tarik untuk mengetahui kekuatan luluh, daerah elastis, plastis dan sifat material. Standar uji tarik *ASME IX QW-462.1(a)* (*ASME, 2019*). Dimensi *coupon tensile test* sesuai Gambar 5.



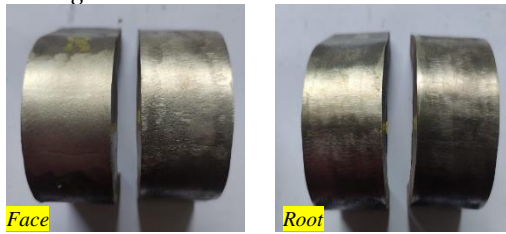
Gambar 5. *Coupon tensile test*

**III. HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Hasil bending test**

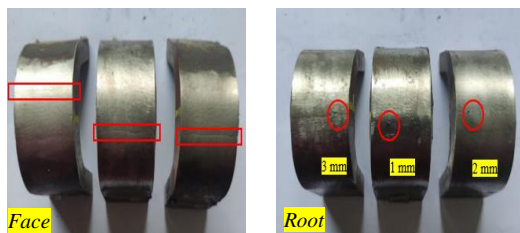
Hasil *bending test* dapat dilihat pada Gambar 8 hingga 10. Sebelum dilakukan uji *bending* telah

dilakukan *visual test* dan *penetrant test* dengan hasil *coupon* tidak terindikasi cacat, maka dapat dilakukan uji *bending*.



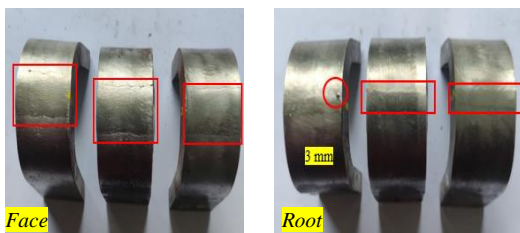
Gambar 6. *Bending test coupon* tanpa perlakuan panas

Hasil pada *coupon* tanpa perlakuan panas pada bagian *root* dan *face* tidak mengalami retakan sesuai Gambar 6.



Gambar 7. *Bending test coupon* 400 °C hingga 550 °C

Hasil pada *coupon* perlakuan panas temperatur 400 °C hingga 550 °C pada bagian *root* mengalami *crack* sebesar 1, 2, dan 3 mm pada bagian bulat berwarna merah. Bagian *face* terlihat perbedaan antara *weld metal* dengan *base metal* berupa garis melintang yang halus pada bagian kotak warna merah Gambar 7.



Gambar 8. *Bending test coupon* 550 °C hingga 700 °C

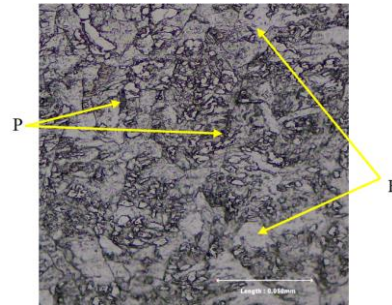
Hasil pada *coupon* perlakuan panas temperatur 550 °C hingga 700 °C pada bagian *root* mengalami *crack* sebesar 3 mm pada bagian bulat berwarna merah. Akibat perlakuan panas bagian *face* terlihat jelas perbedaan antara *weld metal* dengan *base metal* berupa garis melintang yang halus pada bagian kotak warna merah Gambar 8.

Hasil *bending test* memenuhi *acceptance criteria* ASME IX (QW-163) berdasarkan pengukuran retak *bending test* < 3,175 mm.

### Hasil Micro Test

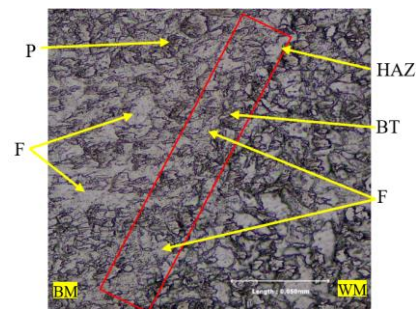
Hasil micro test dapat dilihat pada Gambar 11 hingga 16. Berikut merupakan struktur yang teramati yaitu :

- P = Perlit
- F = Ferit
- BG = Batas gainboundary
- MB = Martensit bainit
- S = Sapheroid
- BT = Batas transisis



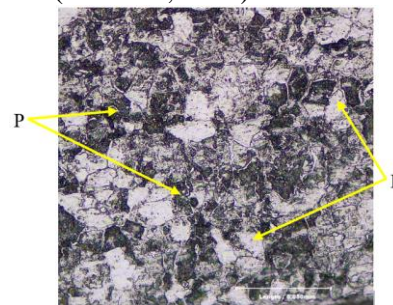
Gambar 9. *Base metal coupon* pembeding

Hasil struktur mikro *weld metal coupon* tanpa perlakuan panas adalah perlit dan ferit berdasarkan Gambar 9 akibat pengelasan. Perlit berwarna kehitaman dan ferit berwarna putih (Prabowo, 2019). Ferit bersifat lunak memiliki tingkat kekerasan antara 140 hingga 180 HV (Prabowo, 2019).



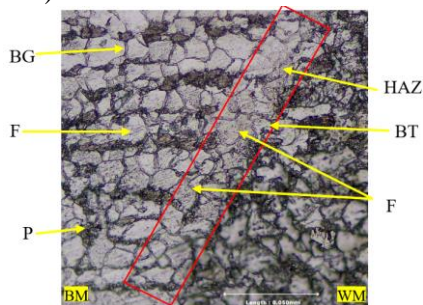
Gambar 10. *HAZ coupon* Pembeding

Struktur *HAZ* sesuai kotak warna merah. Terlihat batas antara *weld metal* dan *HAZ* dominan warna hitam fasa perlit. Fasa *HAZ* didominasi struktur ferit. Pada *base metal* terlihat perbedaan struktur hitam perlit dan ferit semakin rapat menunjukkan daerah *base metal* yang memiliki tingkat kekerasan dibawah *HAZ* (Prabowo, 2019).



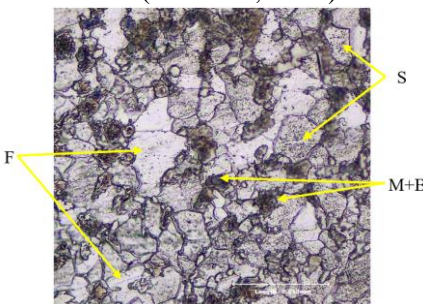
Gambar 11. *Base metal coupon* 400 °C hingga 550 °C

Fasa *weld metal* didominasi warna hitam dan putih dengan batas *grain boundary* yang terlihat jelas berbeda dengan hasil tanpa perlakuan panas. Fasa ferit terbentuk lebih kasar. Semakin kasar fasa ferit maka tingkat kekerasan menurun (Nasra & Kewas, 2020).



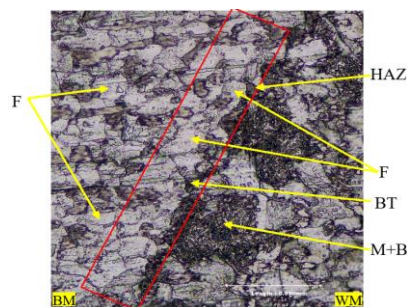
Gambar 12. HAZ coupon 400 °C hingga 550 °C

HAZ pada gambar 8 terlihat cukup jelas batas antara *weld metal* yang lebih hitam sedangkan *base metal* memiliki susunan kehitaman dan putih dengan batas *grain boundary* yang jelas. Fasa pada HAZ dominan berwarna putih memiliki struktur lebih halus dibanding *base metal*. Pada kotak merah HAZ terlihat memiliki struktur lebih besar dibanding *base metal*. Struktur *base metal* lebih kasar dibanding HAZ sehingga tingkat kekerasan *base metal* di bawah HAZ (Prabowo, 2019).



Gambar 13. Base metal coupon 550 °C hingga 700 °C

*Weld metal* perlakuan panas 550 hingga 700 °C didominasi warna abu-abu dan kehitaman. Struktur perlit terlihat jelas terdiri dari semenit dan ferit berbentuk pipih berlapis. Perlit memiliki tingkat kekerasan ± 180 hingga 250 HV (Prabowo, 2019). Struktur ferit yang terbentuk akibat perlakuan panas mengalami perubahan menjadi ferit halus dengan bentuk yang lebar. Berdasarkan diagram CCT hasil perlakuan panas 550 hingga 700 °C dengan *holding time* 840 s dan pendinginan selama 100 s hingga temperatur < 100 °C berakibat terbentuk struktur ferit menjadi campuran martensit bainit (Jordi et al., 2019). *Spheroid* merupakan struktur semenit berbentuk bulat berwarna terang terbentuk dari perlakuan panas dibawah titik A1 *eutectoid* (Ismail, 2015). Perubahan fasa mengakibatkan tingkat kekerasan *weld metal* dengan perlakuan panas 550 hingga 700 °C meningkat.

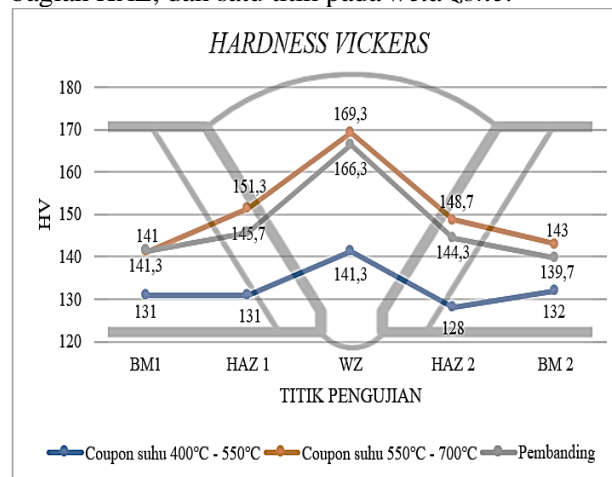


Gambar 14. HAZ coupon 550 °C hingga 700 °C

HAZ pada bagian warna merah struktur yang teramati ferit berwarna putih (Prabowo, 2019). Struktur *base metal* lebih rapat kasar berbeda dengan daerah HAZ lebih halus, mengakibatkan tingkat kekerasan HAZ lebih tinggi dibanding *base metal*. Terlihat BT (batas transisi HAZ dengan *weld metal*) berwarna hitam dengan bentuk jarum jarum pendek yang tidak sejajar merupakan struktur campuran bainit dan martensit. Susunan memanjang horizontal menunjukkan daerah *base metal* dengan pembentukan material dengan proses *rolling* (Prabowo, 2019).

**Hasil Hardness Vickers Test**

Uji *hardness vickers* dilakukan pada 15 titik untuk mengetahui tingkat kekerasan pada setiap *layer* pengelasan. Setiap *layer* terdiri dari 5 titik pengujian 2 titik pada bagian *base metal*, 2 titik bagian HAZ, dan satu titik pada *weld zone*.



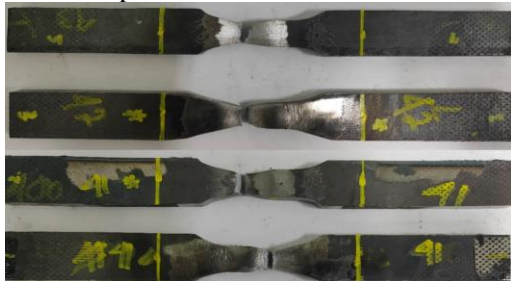
Gambar 15. Grafik perbandingan kekerasan perlakuan panas terhadap titik pengujian

Pengujian kekerasan *coupon* temperatur 400 hingga 550 °C nilai kekerasan pada ketiga daerah menurun dibandingkan dengan *coupon* tanpa perlakuan panas. Berdasarkan struktur fasa pada Gambar 11 terjadi perubahan struktur dari ferlit menjadi ferlit kasar berakibat penurunan tingkat kekerasan material. Ketika struktur mikro semakin kasar maka tingkat kekerasan material akan

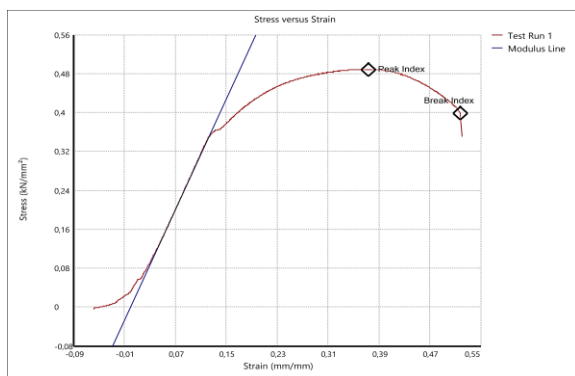
menurun karena ukuran butir besar berakibat kepadatan dislokasi merenggang (Mohamed, 2003). Pengujian *coupon* temperatur 550 hingga 700 °C didapat rata rata nilai kekerasan menyerupai hasil *coupon* tanpa perlakuan panas. Nilai tertinggi pada *weld zone* di atas nilai kekerasan *coupon* tanpa perlakuan panas, akibat struktur mikro semakin halus maka tingkat kekerasan material akan meningkat karena ukuran butir kecil mengakibatkan kepadatan dislokasi lebih tinggi (Mohamed, 2003). Fenomena dari hasil pengujian pada gambar 10 menyerupai segitiga, nilai kekerasan semakin tinggi dari *base metal*, *HAZ*, dan *weld zone* dan kembali pada *base metal*. Terdapat penyimpangan nilai pada titik *HAZ 2 coupon* temperatur 400 hingga 550 °C karena perlakuan panas yang diberikan tidak merata mengakibatkan fasa yang terbentuk berbeda berdampak tingkat kekerasan yang menurun (Prabowo, 2019).

**Hasil Tensile Test**

Hasil pengujian tarik pada *coupon* patahan berada pada bagian *base metal* sesuai dengan gambar 18. Sambungan las memiliki kualitas baik karena patahan tidak pada daerah *weld metal*.

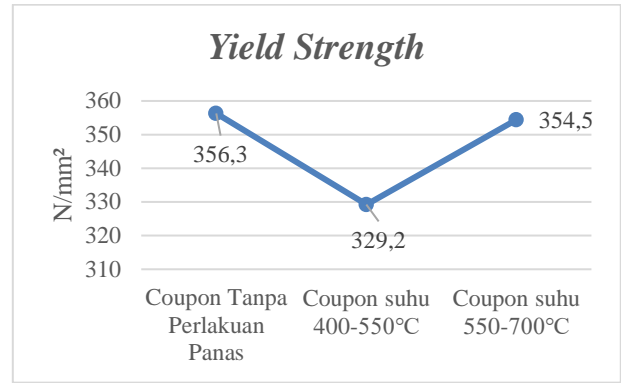


Gambar 16. Patahan *coupon* tensile test



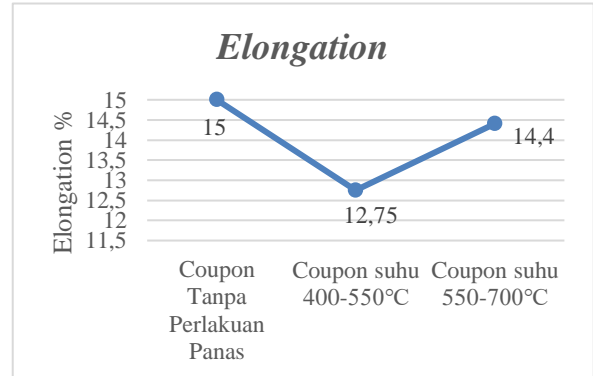
Gambar 17. Grafik uji tarik

Grafik pada gambar 19 adalah hasil dari uji tarik, perbandingan antara tegangan dan regangan. Dari grafik uji tarik di dapat data berupa *yield strength*, *elongation*, dan *ultimate tensile strength*.



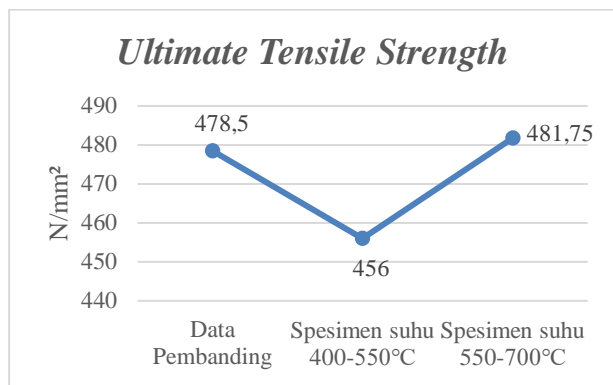
Gambar 18. Grafik *yield strength*

*Yield strength* adalah batas titik elastisitas material. Material akan mengalami pertambahan panjang secara permanen setelah melewati batas *yield strength* (Salindeho et al., 2018). Grafik *yield strength* menunjukkan fenomena *coupon* perlakuan panas menurun di bawah nilai *yield strength* material ASTM A36 yaitu 332 N/mm<sup>2</sup>. Material perlakuan panas 400 hingga 550 °C mengalami perubahan fasa ferit menjadi ferit kasar mengakibatkan tingkat elastisitas menurun. Material cepat mengalami pertambahan panjang dan *necking* sampai patah. Nilai *yield strength* mempengaruhi *elongation* dan hasil *ultimate yield strength* (Prabowo, 2019).



Gambar 19. Grafik *elongation*

Grafik *elongation* adalah pertambahan panjang material hingga patah. *Elongation coupon* ketiga variabel di bawah nilai *elongation data sheet* ASTM A36 yaitu 23 %. Penurunan tertinggi *coupon* perlakuan panas temperatur 400 hingga 550 °C. Pertambahan panjang material dipengaruhi oleh *yield strength*, semakin kecil nilai *yield strength* pertambahan panjang material kecil karena material lebih cepat mengalami *necking* dan patah (Baihaqi & Supomo, 2018). *Elongation coupon* temperatur 400 hingga 550 °C turun karena nilai *yield strength* turun sesuai Gambar 20. Nilai *elongation* mempengaruhi hasil *ultimate tensile strength* (Nasra & Kewas, 2020).

Gambar 20. Grafik *ultimate tensile strength*

Grafik *ultimate tensile strength* (UTS) menunjukkan nilai yang berbeda pada setiap variabel. Nilai UTS ketiga variabel diatas nilai UTS material ASTM A36 yaitu 449 N/mm<sup>2</sup>. UTS pada *coupon* perlakuan panas 400 hingga 550 °C terkecil, nilai tersebut linier dengan nilai *yield strength* dan *elongation* Gambar 20 dan Gambar 21 Nilai kekerasan *coupon* perlakuan panas 400 hingga 550 °C terendah, nilai tersebut linier dengan nilai *ultimate tensile strength*.

#### Pembahasan

*Coupon* perlakuan panas 400 hingga 550°C struktur mikro ferit bertransformasi menjadi ferit kasar. Struktur mikro kasar maka tingkat kekerasan material menurun karena ukuran butir besar berakibat kepadatan dislokasi renggang (Mohamed, 2003). Nilai kekerasan menurun di bawah *coupon* tanpa perlakuan panas. Ketika ukuran struktur kasar maka kekuatan tarik menurun karena tidak dapat mempertahankan pergerakan dislokasi akibat area batas butir lebih sempit (Heidarzadeh & Saeid, 2015). *Coupon* perlakuan panas 550 hingga 700 °C struktur mikro ferit bertransformasi menjadi ferit halus yang lebih keras (Nasra & Kewas, 2020). Terbentuk struktur campuran martensit bainit dan *shaperoid*. Struktur mikro semakin halus maka tingkat kekerasan material akan meningkat karena ukuran butir kecil berakibat kepadatan dislokasi lebih tinggi (Mohamed, 2003). Nilai *yield strength* lebih tinggi dibanding *coupon* perlakuan panas 400 hingga 550 °C. Ketika ukuran struktur halus maka kekuatan tarik akan semakin besar karena dapat mempertahankan pergerakan dislokasi lebih baik akibat area batas butir lebih luas (Heidarzadeh & Saeid, 2015). Nilai *ultimate tensile strength* ketiga variabel diatas nilai material ASTM A36, *coupon* mengalami penambahan kekuatan setelah mengalami perlakuan panas. Nilai *elongation* di atas 5% material masih bersifat ulet (*ductile*) setelah mengalami pengelasan dan perlakuan panas (Calister et al., 2018).

## IV. PENUTUP

### Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dan uraian pembahasan, maka dapat disimpulkan *coupon* perlakuan panas 550 hingga 700 °C mengalami peningkatan nilai kekerasan dan kekuatan tarik. Berbanding terbalik dengan *coupon* perlakuan panas temperatur 400 hingga 550 °C yang mengalami penurunan tingkat kekerasan dan kekuatan tarik dibanding dengan *coupon* tanpa perlakuan panas. Perlakuan panas baja ASTM A36 material masih bersifat *ductile*. Perubahan diakibatkan dari *chemical composition*, perlakuan panas, dan laju pendinginan sehingga terjadi perubahan struktur mikro dan berdampak pada sifat mekanik materials.

## V. DAFTAR PUSTAKA

- ASME (Ed.). (2019). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code* (2019 ed.). Library of Congress Catalog Card.
- ASME, I. (2017). *Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials: Vol. i* (hal. 1–27). <https://doi.org/10.1520/E0092-17.2>
- ASTM A588. (2012). Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. In *ASTM International*. (hal. 1–21).
- Baihaqi, I., & Supomo, H. (2018). Analisa Teknis Sambungan Butt-Joint pada Konstruksi Badan Kapal Pasca Terbakar dengan Material Baru berbasis Pendekatan Eksperimen. *Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan*, 15(2), 44–50. <https://doi.org/10.14710/kpl.v15i2.17534>
- Calister, Wiliam, D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials science and engineering* (Wiley (Ed.); Vol. 9).
- Faizal, M., & Umam, S. (2018). Analisis Kekuatan Dan Kualitas Sambungan Las Dengan Variasi Pendinginan Oli Dan Udara Pada Material Astm a36 Dengan Pengujian Ndt (Non Destructive Test). *Bina Teknika*, 14(2), 131. <https://doi.org/10.54378/bt.v14i2.338>
- Heidarzadeh, A., & Saeid, T. (2015). A comparative study of microstructure and mechanical properties between friction stir welded single and double phase brass alloys. In *Materials Science and Engineering A*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.10.012>
- Ismail, A. S. (2015). *Analisa Pengaruh Variasi Heat Input Analyze the Effect of Heat Input*

*Variation and Pwht Temperature Towards and Mechanical Properties At Low Alloy.**Keuletan Pada Pengelasan Material Sa 36 Dengan Menggunakan Metode Smaw. 92..pdf.*

- Jordi, M., Yudo, H., & Jokosisworo, S. (2019). Analisa Pengaruh Proses Quenching Dengan Media Berbeda Terhadap Kekuatan Tarik dan Kekerasan Baja St 36 Dengan Pengelasan SMAW. *Teknik Perkapalan*, 7(2), 152–160.
- Mohamed, F. A. (2003). A dislocation model for the minimum grain size obtainable by milling. *Acta Materialia*, 51(14), 4107–4119. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(03\)00230-1](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00230-1)
- Nasra, K. A., & Kewas, jemmy charles. (2020). Pengaruh Post Weld Heat Treatment Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Baja Karbon ST42 dengan Pengelasa SMAW (Shielded Metal Arc Welding). *ACTUATOR: Jurnal Teknik ...*, 1(1), 26–36. <http://ejurnal-mapalus-unima.ac.id/index.php/actuator/article/view/115>
- Nugroho, A., & Setiawan, E. (2018). Pengaruh Variasi Kuat Arus Pengelasan Terhadap Kekuatan Tarik Dan Kekerasan Sambungan Las Plate Carbon Steel Astm 36. *Jurnal Rekayasa Sistem Industri*, 3(2), 134–142.
- Prabowo, A. A. (2019). *Pengaruh Media Pendingin Pada Proses Quenching Terhadap Kekerasan, Struktur Mikro, Dan Kekuatan Bending Baja Aisi 1010*. <https://lib.unnes.ac.id/36151/>
- Prahastho, N. A. (2019). *Pengaruh Ampere Dan Diameter Elektroda Kawat ER70S-G KC26 Pada Gas Metal Arc Welding (GMAW) Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Sambungan Las JIS G3101 SS400 Sebagai Aplikasi Arm Excavator di PT. X*.
- Putra, M. ilham rakhmadana, Ari, M., & Rohmat, imam khoirul. (2019). Analisis Temperatur PWHT dan Holding Time pada Sambungan Las Material SA 387 Grade 11 Class 1 Terhadap Nilai Kekerasan dan Struktur Mikro. *Inovtek Polbeng*, 9(2), 395–401. <https://doi.org/10.35314/ip.v9i2.1175>
- Riyadi, E. S., & Pratama, D. P. (2019). Pengaruh Laju Kecepatan Potong Pada Proses Pemotongan Menggunakan Gas Cutting. *Jurnal TIARSIE*, 16(4), 107. <https://doi.org/10.32816/tiarsie.v16i4.65>
- Salindeho, R. D., Soukota, J., & Poeng, R. (2018). Pemodelan pengujian tarik untuk menganalisis sifat mekanik material. *Jurnal J-Ensitem*, 3(1), 1–11.
- Yusuf, M. A. (2016). *Yusuf, M. A.-Pengaruh Kebakaran Temperatur 700°C Dan 900°C Terhadap Perubahan Kekerasan Dan*