

Pengaruh Perlakuan Panas Pasca Las (Post Weld Heat Treatment) Terhadap Kekerasan Dan Struktur Mikro Baja Karbon

Luis Fernando Wedingi¹, Atus Buku², Karel Tikupadang³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Mesin Universitas Kristen Indonesia Paulus
Jl. Perintis Kemerdekaan Km 13 Daya Makassar, 90243
Email korespondensi: kareltikukip2000@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perlakuan panas pasca las (*Post Weld Heat Treatment/PWHT*) terhadap kekerasan dan struktur mikro baja karbon yang dilas dengan metode *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) menggunakan elektroda E6013. Proses *PWHT* dilakukan pada suhu 600 °C dan 650 °C dengan waktu tahan 90 menit, kemudian didinginkan di udara. Uji kekerasan dilakukan dengan metode *Rockwell (HRB)*, sedangkan pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik dengan pembesaran 200x. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa *PWHT* menurunkan nilai kekerasan seiring meningkatnya suhu perlakuan panas, dari kondisi struktur martensit pada spesimen tanpa *PWHT* menjadi campuran *ferit* dan *perlit* pada suhu 650 °C, yang berdampak pada peningkatan keuletan material. Perubahan pada struktur mikro ini membuktikan bahwa *PWHT* mampu mengurangi tegangan sisa pada baja karbon.

Kata kunci: *PWHT*, SMAW, baja karbon, kekerasan, struktur mikro.

1. PENDAHULUAN

Dalam dunia industri, terutama di bidang manufaktur dan konstruksi, proses pengelasan memegang peranan penting sebagai metode penyambungan logam yang efisien dan kuat. Pengelasan digunakan untuk menyatukan berbagai komponen logam menjadi satu kesatuan struktural yang mampu menahan beban mekanis dan termal. Namun, proses pengelasan tidak hanya menghasilkan sambungan logam yang kuat tetapi juga memicu perubahan signifikan pada sifat mekanik material akibat paparan suhu tinggi dan laju pendinginan yang cepat. Perubahan ini paling sering terjadi di tiga zona utama pada material yang dilas, yaitu logam las (*weld metal*), daerah pengaruh panas (*Heat Affected Zone* atau HAZ), dan logam induk (*base metal*) (Fathu Rohman et al., 2014).

Agar membuat logam berkesinambungan, logam pengisi serta logam induk disatukan, baik ataupun tanpa logam pengisi. Proses ini dikenal sebagai pengelasan. Pengelasan *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) yakni elektroda menjadi bahan tambahan serta listrik sebagai sumber panas dalam metode penyambungan logam (Azwinur, 2017)).

Daerah HAZ adalah zona kritis yang terletak di antara logam las dan logam induk. Dalam zona ini, material mengalami perubahan struktur mikro akibat pemanasan hingga suhu tertentu selama pengelasan tanpa mengalami peleburan. Perubahan tersebut dapat

berupa pertumbuhan butir, transformasi fasa, hingga pembentukan martensit pada baja dengan kadar karbon tinggi. Hal ini menyebabkan peningkatan kekerasan lokal yang dapat mengakibatkan sifat rapuh dan rentan terhadap retak. Selain itu, proses pendinginan cepat yang terjadi setelah pengelasan sering kali meninggalkan tegangan sisa yang tinggi. Tegangan sisa ini dapat memicu deformasi, retak mikro, atau kegagalan struktural jika material terpapar beban mekanis atau termal lebih lanjut (Soedarmadji, 2020).

Baja karbon mengandung karbon % C < 0,3 Baja ini lunak, sangat lentur, dan memiliki kekerasan yang relatif rendah. Baja karbon rendah terutama dipakai didalam bentuk pelat, sekrup, ulir serta baut. (Mohruni & Kembaren, 2013).

Untuk mengurangi dampak negatif tersebut, perlakuan panas setelah proses pengelasan (*Post Weld Heat Treatment* atau *PWHT*) menjadi salah satu metode yang umum digunakan. *PWHT* dilakukan dengan memanaskan material yang telah dilas hingga suhu tertentu, menahannya pada suhu tersebut untuk waktu tertentu, lalu mendinginkannya secara terkendali. Tujuan dari proses ini adalah untuk menurunkan tegangan sisa, menyempurnakan keseragaman struktur mikro, serta memperbaiki sifat mekanik dari material. Misalnya, dalam baja karbon, *PWHT* dapat menghilangkan martensit yang rapuh dan menggantikannya dengan struktur temper yang

Berdasarkan jenis baja karbon yang digunakan pengelasan menghasilkan efek yang berbeda pada struktur mikro dan sifat mekanik. Respon terhadap PWHT juga bervariasi tergantung pada temperatur, waktu tahan, dan media pendinginan yang digunakan. Oleh karena itu, penting untuk mengevaluasi pengaruh PWHT terhadap kekerasan dan struktur mikro baja karbon melalui pengujian kekerasan dan pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik atau SEM. Kekuatan sambungan las yang kurang optimal dapat menyebabkan dampak negatif dalam penerapannya, seperti menurunnya tingkat keamanan pada struktur konstruksi. Oleh karena itu, dilakukan perlakuan panas (*Heat Treatment*) dengan menggunakan media pendingin yang sesuai guna memperoleh kekuatan material yang lebih baik. Suhu pada perlakuan panas serta jenis media pendingin menjadi faktor penting yang berperan sebagai alternatif untuk memperbaiki dan meningkatkan sifat mekanik material setelah proses pengelasan (Muddin et al., 2021).

Penelitian dilakukan bertujuan untuk mengetahui kekerasan dan struktur mikro pada baja karbon sebelum dan sesudah perlakuan panas pasca las.

2. TINJAUAN PUSTAKA

A. Pengertian Baja

Baja adalah material yang banyak digunakan di pada industri otomotif. Komponen komponen otomotif seperti gear (roda gigi), noken as, pelatuk katup, dan poros roda biasanya dirancang berasal baja. Baja merupakan logam paduan yang tersusun dari besi (Fe) dan karbon (C), sehingga berbeda dengan logam murni seperti besi (Fe), aluminium (Al), seng (Zn), tembaga (Cu), dan titanium (Ti). Dalam paduan tersebut, besi berperan sebagai unsur utama, sedangkan karbon sebagai unsur nonlogam hadir dalam jumlah yang lebih sedikit. Kandungan karbon dalam baja umumnya berada dalam kisaran 0,2% hingga 2,1% dari total berat, tergantung pada jenis atau tingkat baja tersebut..

1) Baja Karbon

Baja karbon, yang termasuk dalam kategori baja struktural, banyak dimanfaatkan dalam pembuatan dan konstruksi komponen mesin. Untuk memperoleh sifat mekanik yang sesuai dengan kebutuhan, baja karbon merupakan hasil perpaduan beberapa unsur. Baja ini merupakan paduan antara besi (Fe) dan karbon (C) dengan kandungan karbon maksimal sebesar 1,7%. Di antara berbagai jenis baja, baja karbon menjadi salah satu jenis yang sifat-

sifatnya sangat dipengaruhi oleh kadar karbon yang dikandungnya (Nasution, 2018).

Berdasarkan kandungan karbonnya (C), baja karbon dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis sebagai berikut:

a) Baja Karbon Rendah

Baja karbon rendah, yang juga sering disebut sebagai baja lunak, mengandung kurang dari 0,3% karbon. Jenis baja ini biasanya digunakan untuk pembuatan ulir sekrup, baut, mur, dan berbagai komponen lainnya. Meskipun baja karbon rendah memiliki sifat yang lentur, mudah dibentuk dan ditempa, serta tidak terlalu keras, namun baja ini tidak dapat mengalami proses pengerasan permukaan karena kadar karbonnya yang rendah. (Permana, 2013).

b) Baja Karbon Sedang

Baja karbon sedang memiliki tingkat kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan baja karbon rendah, karena mengandung karbon antara 0,3% hingga 0,6%. Sebagian jenis baja ini dapat diperkeras melalui proses perlakuan panas. Umumnya, baja karbon sedang digunakan untuk membuat komponen seperti roda gigi, poros engkol, ragum, dan bagian mesin lainnya (Permana, 2013).

c) Baja Karbon Tinggi

Baja karbon tinggi mengandung karbon dalam kisaran 0,6% hingga 1,5%, menjadikannya sangat keras namun kurang lentur. Jenis baja ini biasanya digunakan untuk membuat alat pemotong seperti gergaji, pahat, kikir, dan sejenisnya. Karena tingkat kekerasannya yang tinggi, baja karbon tinggi harus diproses dalam kondisi panas selama tahap produksi (Permana et al., 2013).

B. Pengertian Shielded Metal Arc Welding (SMAW)

Shielded Metal Arc Welding (SMAW), yang juga dikenal sebagai *Manual Metal Arc Welding (MMAW)*, merupakan proses pengelasan dengan menggunakan elektroda untuk menghasilkan busur listrik yang melelehkan permukaan logam yang akan disambung. Proses penyambungan dua atau lebih logam ini memanfaatkan sumber panas yang berasal dari energi Listrik (Izral et al., 2018).

C. Pengaruh Perlakuan Panas Pasca Las (*Post Weld Heat Treatment*)

Proses perlakuan panas bertujuan untuk menghasilkan material yang memiliki sifat kekuatan, kelunakan, keuletan, serta menghilangkan tegangan sisa. Meskipun perlakuan panas sering dianggap sebagai metode untuk meningkatkan kekerasan bahan, sebenarnya proses ini juga digunakan untuk mengubah sifat material sesuai kebutuhan pengguna, seperti meningkatkan kemampuan deformasi,

mengembalikan elastisitas setelah proses kerja dingin (*cold work*), dan lain-lain.

Berikut ini adalah beberapa jenis proses perlakuan panas pada baja karbon rendah yang umum diterapkan dalam industri manufaktur untuk mencapai hasil yang diharapkan:

1. *Annealing*

Annealing adalah proses pemanasan baja dan paduannya hingga mencapai suhu *austenit* (A3 atau ACM), kemudian suhu tersebut dipertahankan agar fase yang terbentuk di permukaan dan bagian dalam material menjadi seragam.

2. *Normalizing*

Normalizing adalah proses pemanasan baja sampai mencapai temperatur *austenit* dan kemudian didinginkan di udara.

3. Pendinginan Cepat (*Quenching*)

Proses pendinginan cepat dimulai dengan memanaskan baja karbon dan paduannya hingga mencapai suhu *austenit*, kemudian dilakukan pendinginan secara cepat (*quenching*) ke suhu ruang menggunakan media pendingin seperti air, minyak, atau larutan garam..

4. Celup Cepat (*Tempering*)

Temperatur saat akan terbentuk *martensit* disebut *Martensite Start* (Ms) dan temperatur setelah seluruhnya *martensit* terbentuk disebut *Martensite Finish* (Mf). Pada baja karbon rendah, sulit untuk mendapatkan fasa *martensit* melalui proses pendinginan cepat. Mengingat *martensit* bersifat keras dan rapuh, diperlukan pengurangan kegetasan dengan pemanasan di bawah suhu eutektik, yang membuat material menjadi lebih tahan terhadap patah meskipun kekerasannya menurun. Proses ini disebut (*temperin*).

5. *Martempering*

Martempering, yang juga dikenal dengan istilah *marquenching*, dilakukan untuk mencegah terjadinya retak atau keretakan halus yang bisa muncul selama proses *quenching*. Perbedaan utama antara metode pendinginan cepat konvensional dan *martempering* terletak pada keseragaman kecepatan pendinginan antara permukaan dan bagian dalam benda kerja.

6. *Austempering*

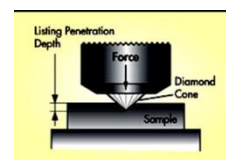
Austempering merupakan proses perlakuan panas isothermal yang menghasilkan struktur *bainit* pada baja karbon. Keunggulan *austempering* dibandingkan dengan metode *quenching* dan tempering konvensional adalah peningkatan keuletan (*ductility*) dan ketahanan

terhadap benturan yang tidak bisa dicapai dengan proses *quenching* dan *tempering* biasa, serta mengurangi distorsi pada material (Manurung et al., 2020).

D. Pengujian Kekerasan

Tujuan dari pengujian kekerasan adalah untuk menilai sejauh mana suatu material mampu menahan deformasi.

Pengujian kekerasan dengan metode *Rockwell* bertujuan untuk menentukan tingkat kekerasan suatu material melalui pengukuran ketahanannya terhadap penetrasi oleh benda uji. Pengujian ini dilakukan dengan menekan alat uji, yang berbentuk bola baja atau kerucut berlian, ke permukaan spesimen. Salah satu jenis penetrator yang umum digunakan adalah kerucut berlian dengan ujung tumpul dan sudut puncak sebesar 120°. Prinsip dasar metode *Rockwell* adalah dengan memberikan beban pada penetrator agar menekan ke dalam material uji. Nilai kekerasan diperoleh dari selisih kedalaman lekukan yang dihasilkan oleh beban awal dan beban utama (Setiawan, 2014).



Gambar 1. Uji Kekerasan *Rockwell*. (Setiawan, 2014).

E. Pengujian Metalografi Struktur Mikro

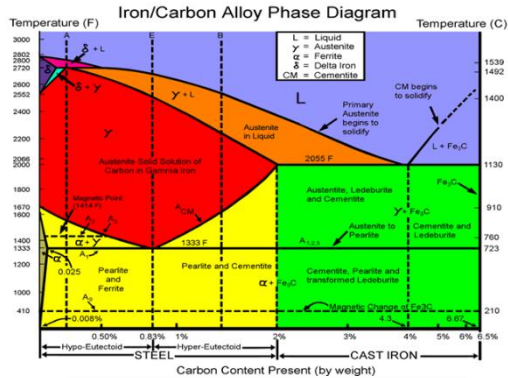
Pengujian metalografi merupakan salah satu Teknik utama dan ilmu material yang bertujuan untuk mengamati dan menganalisis struktur mikro suatu bahan logam, seperti baja, aluminium, tembaga, dan berbagai paduan logam lainnya

Tujuan dari pengamatan ini adalah untuk mengidentifikasi berbagai fasa yang terdapat dalam material. Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan *stereo mikroskop* atau mikroskop optik, yang juga dikenal sebagai "mikroskop cahaya". Mikroskop ini bekerja dengan memanfaatkan cahaya dan sistem lensa untuk memperbesar citra dari spesimen berukuran kecil. Mikroskop optik yang paling dasar memiliki desain yang sederhana, meskipun terdapat berbagai model yang lebih kompleks yang dirancang untuk meningkatkan tingkat ketajaman (resolusi) dan kontras gambar dari spesimen yang diamati (Fathu Rohman et al., 2014).



Gambar 2. *Optical Microscope* (Fathu Rohman et al., 2014).

F. Diagram Fasa



Gambar 3.Diagram Fasa.(Prayogi & Suhardiman, 2019)

Diagram fasa merupakan grafik yang menunjukkan keterkaitan antara suhu dan kandungan karbon, di mana perubahan fasa terjadi selama proses pemanasan maupun pendinginan (Prayogi & Suhardiman, 2019).

Berikut ini adalah penjelasan mengenai berbagai fasa yang terdapat dalam diagram fasa:

a) *Ferit*

Memiliki struktur kristal berbentuk BCC, fasa ini terbentuk selama proses pendinginan lambat dari austenit pada baja *hipoeutektod* (baja dengan kandungan karbon kurang dari 0,8%). Sifatnya lunak, ulet, memiliki tingkat kekerasan antara 70 hingga 100 BHN, serta memiliki konduktivitas termal yang tinggi.

b) *Cementit*

Cementit merupakan senyawa antara besi dan karbon, yang dikenal sebagai karbida besi dengan rumus kimia Fe_3C . Struktur sel satuannya berbentuk ortorombik dan memiliki sifat sangat keras, dengan tingkat kekerasan sekitar 65–68 HRC.

c) *Pearlit*

Pearlit merupakan kombinasi berlapis antara *ferit* dan *cementit* dalam suatu struktur butiran, dengan tingkat kekerasan berkisar antara 10 hingga 30 HRC. Pendinginan yang lambat menghasilkan *perlit* kasar, sementara pendinginan cepat menghasilkan struktur mikro *perlit* halus. Baja yang memiliki struktur mikro *perlit* kasar memiliki kekuatan yang lebih rendah dibandingkan dengan baja yang struktur mikro *perlit*nya halus.

d) *Martensit*

Martensit terbentuk akibat pendinginan cepat dari fasa *austenit*, yang menyebabkan struktur sel satuan FCC berubah dengan cepat menjadi BCC. Karbon yang terlarut dalam struktur BCC ini terperangkap dan tetap berada di dalam sel tersebut, sehingga menimbulkan distorsi yang mengubah sel BCC menjadi BCT. Struktur mikro *martensit* memiliki

bentuk seperti jarum-jarum halus, serta memiliki sifat keras dengan kekerasan antara 20 hingga 67 HRC, namun juga bersifat getas..

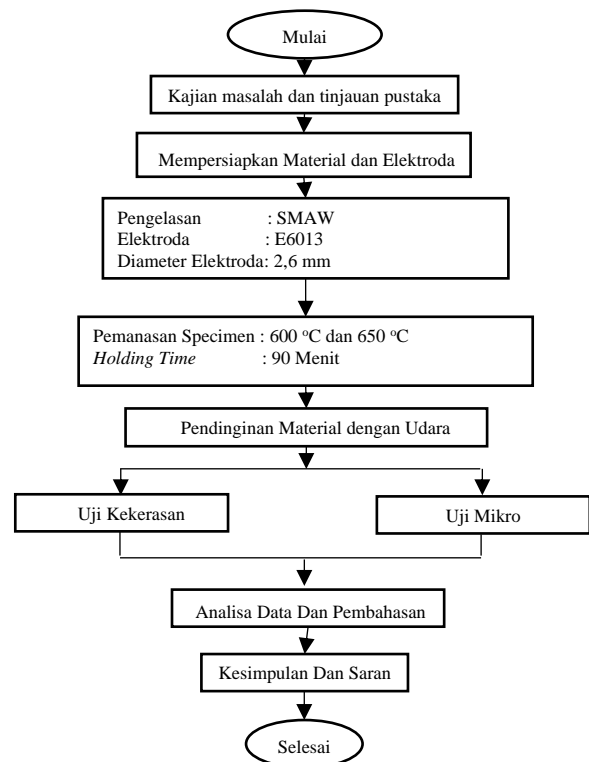
e) *Austenit*

Memiliki struktur sel satuan FCC yang mengandung karbon hingga kadar maksimal sebesar 1,7%.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Untuk pembuatan spesimen serta pengujian kekerasan dilakukam pada Laboratorium Metalurgi Fisik, Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Paulus Makassar dan untuk penelitian pengujian struktur mikro dilakukan pada Laboratorium Pengujian Material Politeknik Akademi Teknik Industri (ATI Makassar pada bulan Mei 2025 - July 2025.

Penelitian yang dilaksanakan digambarkan di diagram alir (flow chart) pada gambar 3 berikut:



Gambar 4. Diagram Alir Penelitian (Flow chart)

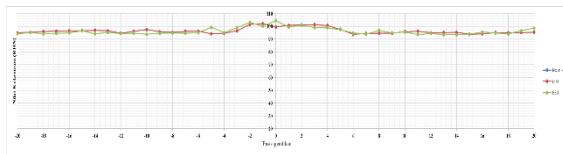
4. HASIL

A. Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan menggunakan metode Rockwell dilakukan pada setiap spesimen yang telah mengalami proses pengelasan serta perlakuan panas pada suhu 600 °C dan 650 °C. Pengujian ini difokuskan pada tiga area utama pada material, yaitu logam las (*filler metal*), zona pengaruh panas (HAZ), dan logam dasar (*base metal*). Masing-masing spesimen diuji pada 120 titik untuk mengetahui sejauh

mana perlakuan panas memengaruhi distribusi kekerasan di setiap bagian material.

Berdasarkan hasil pengujian, dapat diidentifikasi titik-titik penting pada spesimen, yaitu *Filler Metal*, *HAZ*, dan *Raw Material*.



Grafik 1.Hasil Pengujian Kekerasan

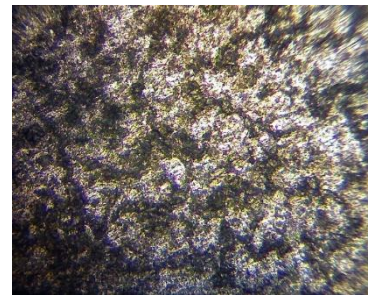
Berdasarkan kondisi pada tabel hasil pengujian dengan 41 kali penekanan di dapatkan daerah logam induk sebanyak 16 titik kiri dan 16 titik kanan di tandai dengan warna hijau dan daerah HAZ sebanyak 2 titik kiri dan 2 titik kanan di tandai dengan warna merah dan daerah las di dapatkan 5 titik di tandai dengan warna orans.

Berdasarkan grafik, di atas kekerasan di spesimen tanpa perlakuan panas memperoleh nilai rata-rata 104 RHN pada daerah las dan HAZ sedangkan pada daerah logam induk memiliki nilai rata-rata 98 RHN kondisi ini meningkatkan kekuatan material, tetapi berpotensi mengurangi ketangguhan dan meningkatkan risiko retak akibat tegangan sisa. pada suhu 600 °C, nilai kekerasan rata-rata di seluruh titik menurun dibanding kondisi normal, terutama pada daerah logam induk dengan nilai rata-rata 96 RHN sedangkan pada daerah las dan HAZ memperoleh nilai rata-rata 101 RHN kondisi ini disebabkan proses tempering martensit, sehingga tegangan sisa berkurang dan struktur menjadi lebih stabil. pada suhu 650 °C, kekerasan menurun lebih lanjut dibanding PWHT 600 °C rata-rata kekerasan di logam induk berada pada nilai rata-rata 95 RHN, sedangkan pada daerah las dan HAZ hanya mencapai 100 RHN kondisi ini lebih rendah dibanding kondisi normal. hal ini menunjukkan bahwa rekristalisasi telah berkembang lebih jauh, dan pertumbuhan butir mulai mendominasi. kekerasan yang lebih rendah menandakan bahwa struktur material telah menjadi lebih lunak dan ulet. penurunan kekerasan ini menunjukkan bahwa struktur mikro material mengalami perubahan sebagai akibat dari perlakuan panas, di mana struktur martensit mulai berubah menjadi struktur yang lebih lunak seperti *ferit* dan *pearlit*.

B. Pengujian Metalografi Struktur Mikro

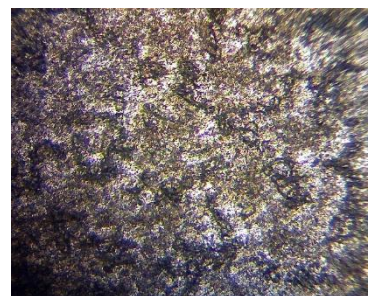
Pengamatan akibat uji metalografi (struktur mikro) di baja karbon menggunakan variasi *Post Weld Head Treatment* dilakukan dengan menggunakan mikroskop optic (OM) menggunakan pembesaran,

200x .pengamatan ini buat mengetahui struktur apa saja yang terbentuk pada spesimen akibat (*PWHT*). Berikut hasil pengamatan yang akan dibandingkan.



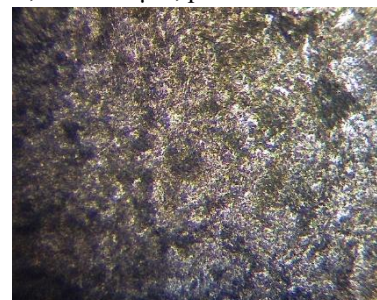
Gambar 5 Spesimen tanpa (*PWHT*), Daerah Las

,Lensa 20 µm, pembesaran 200x



Gambar 6.Spesimen tanpa (*PWHT*), Daerah HAZ

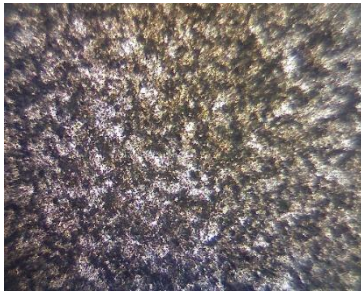
,Lensa 20 µm, pembesaran 200x



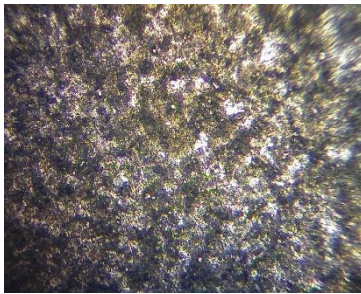
Gambar 7.Spesimen tanpa (*PWHT*), Daerah Logam

Induk, Lensa 20 µm, pembesaran 200x

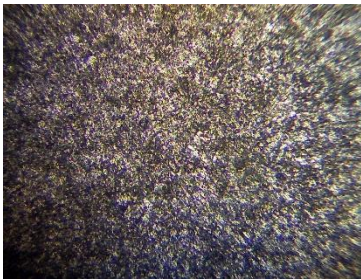
Struktur mikro pada spesimen daerah las tanpa pemanasan menunjukkan struktur *martensit* yang dominan terlihat menunjukkan alasan mengapa kekerasan pada kondisi ini tergolong tinggi. kehadiran sedikit *ferit* dan *perlit* turut berkontribusi dalam meningkatkan kekuatan material serta ketahanannya terhadap retak.



Gambar 8. Spesimen (PWHT 600 °C), Daerah Las,
Lensa 20 μm , pembesaran 200x

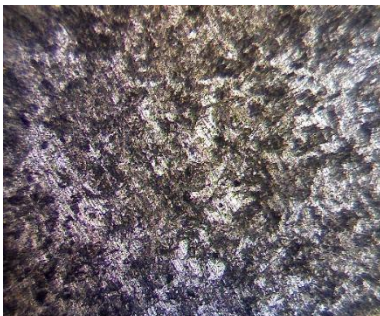


Gambar 9. Spesimen (PWHT 600 °C), Daerah HAZ,
Lensa 20 μm , pembesaran 200x

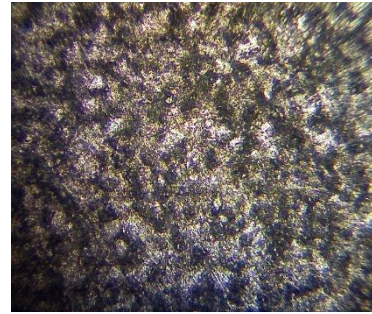


Gambar 10. Spesimen (PWHT 600 °C), Daerah
Logam Induk, Lensa 20 μm , pembesaran 200x

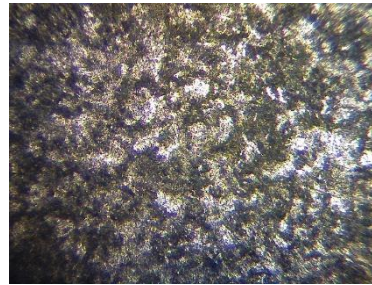
Pada spesimen perlakuan panas 600 °C, struktur mikro *martensit* yang tadinya besar sekarang mulai mengecil yang menjelaskan nilai kekerasan pada spesimen perlakuan panas 600 °C mulai menurun dan sebagian besar berubah menjadi *ferrit* dan *pearlit*



Gambar 11. Spesimen (PWHT 650 °C), Daerah Las,
Lensa 20 μm , pembesaran 200x



Gambar 12. Spesimen (PWHT 650 °C), Daerah
HAZ, Lensa 20 μm , pembesaran 200x



Gambar 13. Spesimen (PWHT 650 °C), Daerah
Logam Induk, Lensa 20 μm , pembesaran 200x

Pada spesimen pemanasan 650 °C menunjukkan struktur *ferit* dan *pearlit* lebih banyak, sementara struktur *martensit* sudah mulai terlihat mengecil dan menyatu dengan struktur *ferit*. hal ini menjelaskan nilai kekerasan pada spesimen pemanasan 650 °C menurun serta peningkatan keuletan..

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

1. Variasi sebelum dan sesudah Perlakuan Panas Pasca Las (*Post Weld Heat Treatment*) pada baja karbon berpengaruh pada penurunan kekerasan dimana kekerasan terendah diperoleh pada spesimen perlakuan panas 650 °C dengan nilai rata-rata di logam induk berada pada 95 RHN, sedangkan pada daerah las dan HAZ 100 RHN sedangkan kekerasan tertinggi diperoleh pada spesimen tanpa perlakuan panas dengan nilai rata-rata 104 RHN pada daerah las dan daerah HAZ sedangkan pada daerah logam induk memiliki nilai rata-rata 98 RHN.

2. Variasi sebelum dan sesudah Perlakuan Panas Pasca Las (*Post Weld Heat Treatment*) pada baja karbon berpengaruh pada perubahan struktur mikro dimana pada spesimen tanpa PWHT menghasilkan struktur *martensit* yang banyak dan besar sedangkan struktur *ferrit* dan *pearlit* terlihat sedikit yang menjelaskan nilai kekerasan yang tinggi dan keuletan yang rendah. sedangkan pada spesimen *PWHT* 600 °C dan 650 °C menghasilkan struktur *ferrit* dan *pearlit* yang lebih banyak dibandingkan struktur *martensit* yang menjelaskan nilai kekerasan yang rendah pada baja karbon

DAFTAR PUSTAKA

- Aminuddin, R. R., Santoso, A. wibawa B., & Yudo, H. (2020). JURNAL TEKNIK PERKAPALAN 37 sebagai Bahan Poros Baling-baling Kapal (Propeller Shaft) setelah Proses Tempering. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 8(3), 368–374. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>
- Bakhori, A. (2017). Perbaikan Metode Pengelasan Smaw (Shield Metal Arc Welding) Pada Industri Kecil Di Kota Medan. *Buletin Utama Teknik*, 13(1), 14–21.
- Fathu Rohman, H., Umardani, Y., & Tri Hardjuno, A. (2014). Pengaruh Proses Heat Treatment Annealing Terhadap Struktur Mikro Dan Nilai Kekerasan Pada Sambungan Las Thermite Baja Np-42. *Jurnal Teknik Mesin S-1*, 2(3), 195–203.
- Izral, Fadhil, M., & Syahrul. (2018). Pengaruh Posisi Pengelasan Dan Jenis Elektroda E 7016 Dan E 7018 Terhadap Kekuatan Tarik Hasil Las Baja Karbon Rendah Trs 400. *Jurnal Inarxiv*, 7(3), 1–7.
- Manurung, V., Tri, Y., & Yudi, S. (2020). Panduan metalografi. In LP2M Politeknik Manufaktur Astra.
- Metallurgy, W. (2003). *Welding Metallurgy*, September.
- Mohruni, A. S., & Kembaren, B. H. (2013). Struktur Mikro Baja Karbon Rendah Dengan Elektroda E6013. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 13(1), 1–8.
- Muddin, S., Jamaluddin, J., Eka Putra, R., & Sahrul, S. (2021). Analisis Kekuatan Tarik Pengaruh Perlakuan Panas Hasil Pengelasan Kampuh V Baja 42 Dengan Media Pendingin Air Dan Oli. *ILTEK : Jurnal Teknologi*, 16(1), 6–10. <https://doi.org/10.47398/iltek.v16i1.584>
- Nasution, M. (2018). Karakteristik Baja Karbon Terkorosi. *Buletin Utama Teknik*, 14(1), 68–76.
- Perdana, S., Budiarto, U., Wibawa, A., & Santosa, B. (2020). Pengaruh Variasi Waktu Penahanan (Holding Time) pada Perlakuan Panas Normalizing Setelah Pengelasan Submerged Arc Welding (SAW) pada Baja SS400 terhadap Kekuatan Tarik, Tekuk dan Mikrografi. *Teknik Perkapalan*, 8(1), 21–30.
- Permana, B., Badaruddin, M., & Zulhanif, Z. (2013). Karakterisasi Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Baja Carbon Rendah Untuk Cane Cutter Blade Pada Pt Gunung Madu Plantation. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin FEMA*, 1(3), 98891.
- Pranajaya, W., Santosa, A. W. B., & Budiarto, U. (2019). Analisa Pengaruh Variasi Kampuh Las dan Arus Listrik Terhadap Kekuatan Tarik dan Struktur Mikro Sambungan Las TIG (Tungsten Inert Gas) Pada Aluminium 6061. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 7(4), 286. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>
- Prayogi, A., & Suhardiman. (2019). Analisa pengaruh variasi media pendingin pada perlakuan panas terhadap kekerasan dan struktur mikro baja karbon rendah. *Jurnal Polimesin*, 17(2), 29–36.
- Salahudin, X., Ihza, Y., Pramono, C., & Widodo, S. (2021). Analisis Kekuatan Tarik Baja Karbon Rendah Hasil Pengelasan Smaw Dengan Variasi Bentuk Kampuh Las. *Journal of Mechanical Engineering*, 5(1), 8–14. <https://doi.org/10.31002/jom.v5i1.3941>
- Setiawan, H. (2014). Pengujian Kekerasan Dan Komposisi Kimia Produk Cor Propeler Alumunium. *Prosiding SNST Semarang*, 4(6), 31–36.
- Soedarmadji, W. (2020). Pengaruh Pengelasan Shielded Metal Arc Welding (SMAW) pada Mild Steel S45C di Daerah HAZ dengan Pengujian Metalografi. *Mechanical and Manufacture Technology*, 1(1), 12–17. <https://jurnal.yudharta.ac.id/v2/index.php/jmmt> %0AVolume
- Wahyudi, R., Nurdin., dan S. (2019). Analisa Pengaruh Jenis Elektroda Pada Pengelasan SMAW Penyambungan Baja Karbon Rendah Dengan Baja Karbon Sedang Terhadap TYensile Strenght. *Journal of Welding Technology*, 1(2), 43–47.