

Analisis Nilai Kekerasan, Nilai Ketangguhan dan Struktur Mikro pada *Multiple Repair* dan *Post Weld Heat Treatment (PWHT)* Pengelasan HARDOX 500

Rocky Andiana¹, Mukhlis², Daffa Ramadhan Arya Wiratama³, Zindhu Maulana Ahmad Putra⁴

^{1,2), 3)} Program Studi Teknik Pengelasan, Jurusan Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

⁴⁾ Program Studi Teknik Kelistrikan Kapal, Jurusan Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya
Jl. Teknik Kimia, Keputih, Kec. Sukolilo, Surabaya 60111, Indonesia

Email: rockyandiana@ppns.ac.id, mukhlis.adam@ppns.ac.id, daffawiratama@student.ppns.ac.id, zindhu@ppns.ac.id

ABSTRAK

Perbaikan berulang (*multiple repair*) pada baja HARDOX 500 menggunakan las berisiko menurunkan sifat mekanisnya. Penelitian menganalisis dampak dari jumlah *repair* dan durasi *Post-Weld Heat Treatment (PWHT)* terhadap sifat mekanis dan mikrostruktur. Metode penelitian adalah eksperimental dengan pengelasan *Shielded Metal Arc Welding (SMAW)* pada baja HARDOX 500. Variabel meliputi jumlah *repair* (tanpa *repair*, 1x, dan 2x) serta durasi *holding time* PWHT (30 dan 60 menit). Analisis dilakukan melalui uji kekerasan *Vickers*, uji dampak *Charpy*, dan pengamatan struktur mikro. Hasil penelitian menunjukkan penambahan jumlah *repair* dapat meningkatkan nilai kekerasan namun menurunkan nilai ketangguhan material. Fenomena ini diatribusikan pada peningkatan masukan panas kumulatif dan formasi fasa bainit. Sebaliknya, proses PWHT dengan durasi *holding time* yang lebih lama (60 menit) terbukti efektif menurunkan nilai kekerasan, yang konsisten dengan terjadinya pertumbuhan butir dan pembentukan fasa ferit asikular yang lebih lunak. PWHT disimpulkan dapat memulihkan sebagian ketangguhan yang hilang akibat proses *repair*.

Kata kunci: HARDOX 500, Kekerasan, Ketangguhan, *Multiple Repair*, PWHT

ABSTRACT

Welding HARDOX 500 steel through several repairs runs the danger of deteriorating its mechanical qualities. This study examines the mechanical characteristics and microstructure are affected by the quantity of repairs and the length of Post-Weld Heat Treatment (PWHT). Shielded Metal Arc Welding (SMAW) on HARDOX 500 steel was the experimental research technique utilized. PWHT holding times (30 and 60 minutes) and the number of repairs (none, one, and two) were among the factors. Microstructural observation, Charpy impact testing, and Vickers hardness testing were used in the analysis. The findings indicate that while more repairs result in a higher hardness rating, the toughness of the material is measurably reduced. This phenomenon is attributed to the cumulative heat input and the formation of the bainite phase. Conversely, the PWHT process with a longer holding time (60 minutes) was effective in reducing hardness, which is consistent with the occurrence of grain growth and the formation of a softer acicular ferrite phase. It is concluded that PWHT has the potential to be used to recover part of the toughness lost due to the repair process.

Keywords: Hardness, HARDOX 500, *Multiple Repair*, PWHT, Toughness

Pendahuluan

Seiring dengan kemajuan teknologi pengelasan terkini, terdapat beragam metode pengelasan yang telah diadopsi secara luas oleh sektor manufaktur. Penentuan metode ini didasarkan pada pertimbangan keunggulan serta keterbatasan dari setiap proses [1]. Prosedur pengelasan adalah proses yang kompleks yang menuntut perencanaan detail dan akurat [2]. Baja HARDOX dirancang secara khusus untuk menghasilkan struktur mikro, kekerasan dan ketahanan mekanis yang spesifik untuk melawan aus. Namun, variasi dalam komposisi kimia material dapat mempengaruhi tingkat kekerasan. Selain itu, selama proses manufaktur seperti pengelasan dan permesinan, material ini menerima masukan panas yang dapat mengubah sifat mekanis dan metalurginya [3]. Hardox 500 memiliki aplikasi yang luas sebagai plat tahan aus (*wear plate*) pada industri yang berhadapan dengan material keras dan abrasif. Penggunaannya mencakup komponen seperti *linear* bak *dump truck*, *crusher* serta pelapis pada peralatan tambang. HARDOX 500 merupakan baja yang memiliki tingkat kekerasan hingga 530 *Hardness Brinell (BHW)* atau dalam kekerasan *Vickers* sebesar 467 HVN. HARDOX 500 merupakan baja paduan rendah yang ditentukan oleh kandungan karbon dan unsur seperti Ni, Mn, Mo dan Cr yang secara langsung mempengaruhi tingkat durabilitas dan kekerasannya [1]. Pengelasan pada material HARDOX 500

dapat mengurai sifat mekanis yaitu kekerasan yang dimanfaatkan untuk ketahanan aus. Masukan panas selama proses pengelasan akan menentukan kualitas dan kekuatan akhir sambungan las [3].

Selama proses ini, logam mengalami siklus termal yang cepat yang menyebabkan deformasi dan mempengaruhi terbentuknya cacat, ketangguhan sambungan serta stuktur mikro [4]. Perlakuan pasca pengelasan yang umum digunakan adalah *Post Weld Heat Treatment* (PWHT). Teknik ini digunakan untuk mereduksi efek tegangan sisa akibat pengelasan serta meningkatkan sifat mekanis material. Untuk menghindari perubahan fasa yang tidak diinginkan, proses pengurangan tegangan sebagian dilakukan pada rentang temperatur di bawah batas kritis material [5]. *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) berfungsi untuk memulihkan sifat mekanis, mereduksi hidrogen difusi dan melakukan *tempering* pada struktur mikro di *Heat-Affected Zone* (HAZ) [6]. *Holding time* yang berlebihan berisiko menyebabkan *over-tempering*, pertumbuhan butir yang signifikan, dan penurunan kekuatan [7]. Baja HARDOX 500 diaplikasikan sebagai material utama *rock breaker* karena ketahanan aus dan kekerasannya yang tinggi. Namun, penggunaan secara kontinu menyebabkan keausan dan *fatigue* yang berisiko menimbulkan fraktur pada ujung *breaker*. Perbaikan dengan metode pengelasan menjadi solusi utama, terutama di lokasi proyek terpencil dimana penggantian komponen tidak praktis. Akan tetapi, proses perbaikan ini rentan menghasilkan cacat las yang sering terdeteksi melalui pengujian non destruktif. HARDOX 500 memiliki ketentuan yang ketat dari SSAB mengenai nilai maksimum *heat input* dikarenakan sensitifitas dari HARDOX 500 terhadap panas berlebih [10][11].

Pada penelitian sebelumnya mengenai efek proses pengelasan terhadap karakteristik mikrostruktur dan mekanik pada baja HARDOX 600 dapat diketahui bahwa pengelasan menyebabkan perubahan mikrostruktur yang bervariasi pada seluruh sambungan yang dapat menurunkan kekerasannya [12][13]. Selain itu, penelitian lain terkait analisis variasi *multiple repair* pada baja karbon mengakibatkan perubahan struktur mikro pada *Heat-Affected Zone* (HAZ) tiap spesimen. Spesimen dengan perbaikan tiga kali memiliki tingkat kekerasan tertinggi, sedangkan spesimen tanpa perbaikan memiliki tingkat kekerasan terendah [14]. Penelitian ini mengkaji analisis dampak dari jumlah *repair* dan durasi *holding time* pada *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) terhadap perubahan sifat mekanis (kekerasan dan ketangguhan) serta struktur mikro pada baja HARDOX 500. Variabel dalam penelitian ini menggunakan 6 spesimen sambungan las dengan variasi jumlah *repair* dan *Post-Weld Heat Treatment* (PWHT) yang berbeda, yaitu: *non-repair* dengan *holding time* 30 menit, *repair 1x* dengan *holding time* 30 menit, *repair 2x* dengan *holding time* 30 menit, *non-repair* dengan *holding time* 60 menit, *repair 1x* dengan *holding time* 60 menit, *repair 2x* dengan *holding time* 60 menit. Penelitian ini menggunakan *filler metal* E7016 dan E7018 dengan metode pengelasan *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW). Variabel-variabel pada penelitian ini penting untuk mengetahui batasan jumlah *repair* pada material lasan agar tidak melebihi batasan kekuatan dari material akibat proses *repair* yang dilakukan.

Dengan melakukan penelitian ini, penulis dapat mengidentifikasi nilai kekerasan, nilai ketangguhan, dan nilai stuktur mikro dari sambungan pengelasan pada HARDOX 500 yang telah melalui proses perbaikan berulang dan perawatan suhu pasca pengelasan (PWHT). Diharapkan hasil dari penelitian ini dapat menjadi referensi di masa depan bagi industri ketika melakukan *repair* pada peralatan yang menggunakan material tahan aus seperti HARDOX 500 dan lainnya.

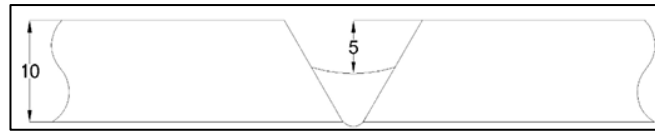
Metode Penelitian

Proses penelitian dimulai dengan mempersiapkan alat dan bahan yang dibutuhkan, proses pengelasan, *repair* material, *Post-Weld Heat Treatment* (PWHT) dan pengujian spesimen (pengujian kekerasan, pengujian stuktur mikro dan pengujian ketangguhan). Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah plat HARDOX 500 dengan panjang 200 mm, lebar 100 mm, tebal 100, *bevel double-V Butt Weld* dan sudut *bevel* 60°. Selain itu, penelitian ini menggunakan dua *filler metal*, E7016 dan E7018. E7018 sangat direkomendasikan untuk pengelasan baja berkekuatan tinggi untuk meminimalkan risiko retak dingin akibat hidrogen (*hydrogen-induced cracking*) [15]. Proses pengelasan menggunakan mesin las *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) yang relevansinya untuk aplikasi perbaikan di lapangan telah terbukti [16], dengan variasi jumlah *repair* dan *holding time* sebagai berikut:

Tabel 1. Variasi Spesimen

Spesimen	Jumlah <i>repair</i>	<i>Holding time</i>
RA1	Tanpa <i>repair</i>	30 menit
RA3	1x	30 menit
RA5	2x	30 menit
RB2	Tanpa <i>repair</i>	60 menit
RB4	1x	60 menit
RB6	2x	60 menit

Pengendalian *heat input* merupakan faktor krusial dalam pengelasan HARDOX untuk menjaga integritas HAZ [17]. Proses *repair* dilakukan dengan menggerinda material las sebelumnya hingga kedalaman yang ditentukan seperti Gambar 1.



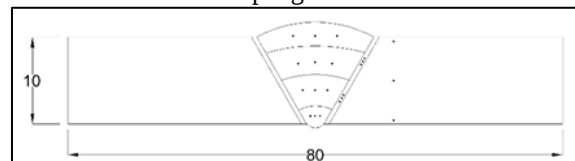
Gambar 1. Desain Kedalaman Repair

Selanjutnya melakukan *Post-Weld Heat Treatment* (PWHT), PWHT dengan waktu penahanan (*holding time*) yang spesifik sangat penting untuk memperbaiki struktur mikro sambungan las, misalnya melakukan *tempering* pada fasa martensit yang terbentuk akibat masukan panas tinggi, yang dapat memengaruhi sifat mekanis material [18]. Gambar 2 menunjukkan proses PWHT dengan elemen pemanas keramik.



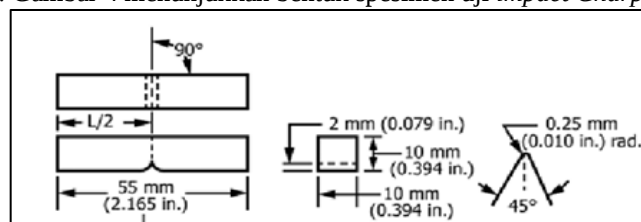
Gambar 2. Proses Post-Weld Heat Treatment (PWHT)

Metode pengujian kekerasan yang digunakan dalam penelitian ini adalah kekerasan *Vickers* yang dilakukan sesuai dengan standar ASTM E92. Metode *Vickers* dalam pengujian semua material hanya membutuhkan satu *setup* pengujian [19]. Penekanan uji kekerasan *Vickers* dengan beban 10 kgf dan pembebanan selama 15 detik. Titik-titik yang diambil yaitu 3 titik tiap *layer* las total sebanyak 4 *layer*, 6 titik pada HAZ, dan 3 titik pada *base metal*. Lokasi titik pengambilan nilai kekerasan dapat dilihat pada Gambar 3



Gambar 3. Lokasi Titik Pengambilan Nilai Kekerasan

Setelah pengujian kekerasan, pengujian impak *Charpy* dilakukan sesuai standar ASTM A370 pada suhu 27,8°C. Ini digunakan untuk mengukur ketangguhan pada area *weld metal* dan zona panas yang terpengaruh (HAZ) spesimen setelah perbaikan [20]. Pengujian dilakukan dengan mengayun bandul dengan ketinggian tertentu dan menumbuk spesimen yang diberi takikan (*notch*). Patah pada suatu material disebut sebagai *brittle* (getas) atau *ductile* (ulet). Gambar 4 menunjukkan bentuk spesimen uji *impact Charpy*.



Gambar 4. Bentuk Spesimen Uji Impact Charpy

Selanjutnya pengujian mikro, pengujian dilakukan pada area *base metal*, *weld metal*, dan HAZ untuk mengidentifikasi cacat mikro, menganalisis struktur butir, dan melakukan kuantifikasi ukuran butir menggunakan mikroskop optik (500x).

Hasil dan Pembahasan

Pengelasan

Proses pengelasan *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) dilakukan oleh seorang operator bersertifikat

untuk memastikan keseragaman pengerjaan. Penamaan spesimen untuk setiap sambungan pengelasan dapat dilihat pada Tabel 2. Parameter pengelasan dapat dilihat pada Tabel 3. Pada Tabel 3 proses pengelasan *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) pada material HARDOX 500 ketebalan 10 mm.

Tabel 2. Penamaan Spesimen

Spesimen	<i>Non-Repair</i>	<i>Repair 1x</i>	<i>Repair 2x</i>
<i>Holding time 30 menit</i>	RA 1	RA 3	RA 5
<i>Holding time 60 menit</i>	RB 2	RB 4	RB 6

Tabel 3. Parameter Pengelasan

Spesimen	<i>Pass</i>	Tegangan (V)	Arus (A)	Panjang Las (mm)	Waktu (menit)	<i>Travel Speed</i> (mm/min)	<i>Heat Input</i> (KJ/mm)
<i>Non-repair holding time 30 menit</i>	<i>Root</i>	21	68	200	3.0	66.7	1.3
	<i>Hotpass</i>	25	101	200	2.1	95.2	1.6
	<i>Fill</i>	25	108	200	2.1	95.2	1.7
	<i>Capping</i>	25	108	200	3.0	66.7	2.4
<i>Non-repair holding time 60 menit</i>	<i>Root</i>	22	67	200	3.0	66.7	1.3
	<i>Hotpass</i>	24	99	200	1.9	105.3	1.4
	<i>Fill</i>	30	106	200	2.1	95.2	2.0
	<i>Capping</i>	30	106	200	2.1	95.2	2.0
<i>Repair 1x holding time 30 menit</i>	<i>Root</i>	21	69	200	3.2	62.5	1.4
	<i>Hotpass</i>	25	71	200	1.9	105.3	1.0
	<i>Fill</i>	27	96	200	1.8	111.1	1.4
	<i>Capping</i>	27	104	200	1.7	117.6	1.4
	<i>Repair 1x</i>						
	<i>Fill</i>	22	115	200	1.7	117.6	1.3
	<i>Capping</i>	22	115	200	1.8	111.1	1.4
	<i>Root</i>	21	68	200	3.0	66.7	1.3
<i>Non-repair holding time 30 menit</i>	<i>Hotpass</i>	25	101	200	2.1	95.2	1.6
	<i>Fill</i>	25	108	200	2.1	95.2	1.7
	<i>Capping</i>	25	108	200	3.0	66.7	2.4
<i>Non-repair holding time 60 menit</i>	<i>Root</i>	22	67	200	3.0	66.7	1.3
	<i>Hotpass</i>	24	99	200	1.9	105.3	1.4
	<i>Fill</i>	30	106	200	2.1	95.2	2.0
	<i>Capping</i>	30	106	200	2.1	95.2	2.0
<i>Repair 1x holding time 30 menit</i>	<i>Root</i>	21	69	200	3.2	62.5	1.4
	<i>Hotpass</i>	25	71	200	1.9	105.3	1.0
	<i>Fill</i>	27	96	200	1.8	111.1	1.4
	<i>Capping</i>	27	104	200	1.7	117.6	1.4
	<i>Repair 1x</i>						
	<i>Fill</i>	22	115	200	1.7	117.6	1.3
	<i>Capping</i>	22	115	200	1.8	111.1	1.4
	<i>Root</i>	20	75	200	3.5	57.1	1.6
<i>Repair 1x holding time 60 menit</i>	<i>Hotpass</i>	25	78	200	1.9	105.3	1.1
	<i>Fill</i>	22	102	200	1.8	111.1	1.2
	<i>Capping</i>	22	102	200	2.0	100	1.3
	<i>Repair 1x</i>						
	<i>Fill</i>	22	114	200	1.9	105.3	1.4
	<i>Capping</i>	22	114	200	2.0	100	1.5
<i>Repair 2x holding time 30 menit</i>	<i>Root</i>	22	69	200	2.2	90.9	1.0
	<i>Hotpass</i>	24	79	200	2.1	95.2	1.2
	<i>Fill</i>	29	110	200	1.8	111.1	1.7
	<i>Capping</i>	29	110	200	1.8	111.1	1.7
	<i>Repair 1x</i>						
	<i>Fill</i>	22	115	200	1.9	105.3	1.4
	<i>Capping</i>	22	115	200	2.0	100	1.5
	<i>Repair 2x</i>						

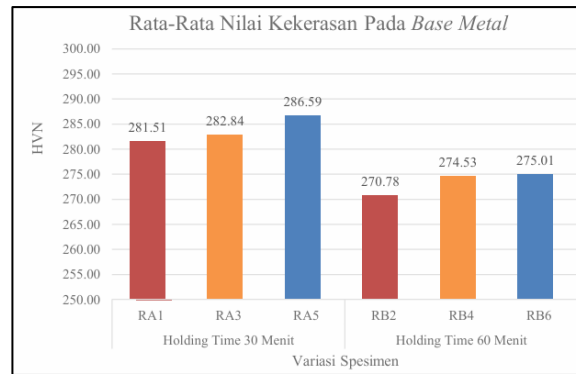
Repair 2x holding time 60 menit	Fill	23	113	200	1.8	111.1	1.4
	Capping	23	113	200	1.9	105.3	1.5
	Root	21	72	200	3.4	58.8	1.5
	Hotpass	26	103	200	1.9	105.3	1.5
	Fill	29	104	200	2.1	95.2	1.9
	Capping	29	104	200	1.7	117.6	1.5
	Repair 1x						
	Fill	22	114	200	3.3	60.6	2.5
	Capping	22	114	200	3.3	60.6	2.5
	Repair 2x						
	Fill	23	113	200	2.5	80	1.9
	Capping	23	113	200	2.9	69	2.3
Repair 1x holding time 30 menit	Root	20	75	200	3.5	57.1	1.6
	Hotpass	25	78	200	1.9	105,3	1.1
	Fill	22	102	200	1.8	111.1	1.2
	Capping	22	102	200	2.0	100	1.3
	Repair 1x						
	Fill	22	114	200	1.9	105.3	1.4
	Capping	22	114	200	2.0	100	1.5
	Root	22	69	200	2.2	90.9	1.0
	Hotpass	24	79	200	2.1	95.2	1.2
	Fill	29	110	200	1.8	111.1	1.7
	Capping	29	110	200	1.8	111.1	1.7
	Repair 1x						
	Fill	22	115	200	1.9	105.3	1.4
Repair 2x holding time 30 menit	Capping	22	115	200	2.0	100	1.5
	Repair 2x						
	Fill	23	113	200	1.8	111.1	1.4
	Capping	23	113	200	1.9	105.3	1.5
	Root	21	72	200	3.4	58.8	1.5
	Hotpass	26	103	200	1.9	105.3	1.5
	Fill	29	104	200	2.1	95.2	1.9
	Capping	29	104	200	1.7	117.6	1.5
	Repair 1x						
	Fill	22	114	200	3.3	60.6	2.5
	Capping	22	114	200	3.3	60.6	2.5
	Repair 2x						
	Fill	23	113	200	2.5	80	1.9
	Capping	23	113	200	2.9	69	2.3

Hasil Pengujian Kekerasan

Nilai kekerasan yang dihitung dalam penelitian ini diperoleh dari bahan yang *mill certification* dengan nilai kekerasan *Vickers Number* (HVN) sebesar 505. Hasil pengujian kekerasan *Vickers* pada daerah *base metal* ditunjukkan dalam Tabel 4. Berdasarkan Tabel 4, hasil pengujian kekerasan rata-rata pada *base metal* menunjukkan nilai tertinggi 286,59 HVN pada spesimen 3x *repair* dengan *holding time* 30 menit (RA5), dan nilai terendah 270,78 HVN pada spesimen *non-repair* dengan *holding time* 60 menit (RB2). Visualisasi data tersebut disajikan pada Gambar 5.

Tabel 4. Hasil Kekerasan Vickers pada Base Metal

Spesimen	Holding Time 30 Menit			Holding Time 60 Menit		
	RA 1	RA 3	RA 5	RB 2	RB 4	RB 6
Raw Material (HVN)	494.5					
Hasil (HVN)	278.88	283.69	288.74	270.90	272.41	279.18
	284.85	280.24	282.96	269.37	280.67	270.77
	280.81	284.24	288.08	272.07	270.52	275.07
Rata-rata (HVN)	281.51	282.84	286.59	270.78	274.53	275.01



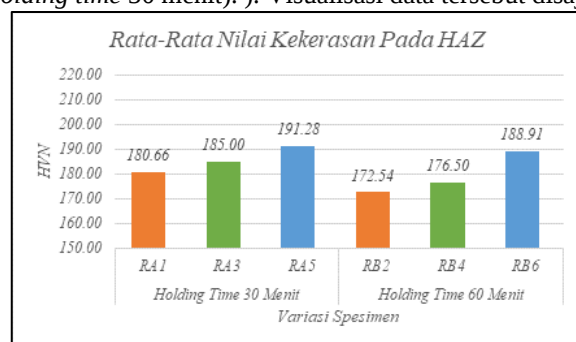
Gambar 5. Grafik Rata-Rata Nilai Kekerasan di Base Metal

Peningkatan jumlah siklus *repair* hanya menaikkan kekerasan *base metal* secara tidak signifikan, yang disebabkan oleh pengaruh termal residual dari HAZ di dekat titik pengujian. Sebaliknya, pengaruh yang lebih dominan terlihat pada perlakuan PWHT, di mana penambahan *holding time* hingga 60 menit secara efektif menurunkan kekerasan. Penurunan ini terbukti konsisten dengan hasil analisis mikrostruktur, yang menunjukkan adanya pertumbuhan butir dan dominasi fasa ferit-perlit pada spesimen dengan *holding time* lebih lama dibandingkan spesimen 30 menit. Selanjutnya hasil uji kekerasan pada daerah HAZ dapat dilihat pada Tabel 5

Tabel 5. Hasil Kekerasan Vickers pada HAZ

Spesimen		Holding Time 30 Menit			Holding Time 60 Menit		
		RA 1	RA 3	RA 5	RB 2	RB 4	RB 6
Hasil (HVN)	Raw Material (HVN)	494.5					
	Lower HAZ	170.97	179.65	86.08	166.49	173.55	172.33
		160.73	178.26	188.32	163.76	175.63	172.59
		168.70	181.79	186.37	171.25	174.29	176.83
	Upper HAZ	191.62	195.31	201.34	178.65	171.05	230.76
		200.42	189.97	192.24	181.22	180.47	191.32
		191.50	185.02	193.32	173.86	183.98	189.61
Rata-rata (HVN)		180.66	185.00	191.28	172.54	176.50	188.91

Pengujian kekerasan di area *Heat-Affected Zone* (HAZ) dilakukan dengan total enam titik indentasi yang terbagi rata pada sub-zona atas dan bawah. Dari pengujian ini, ditemukan rentang nilai kekerasan dari terendah 172,54 HVN pada spesimen RB2 (*non-repair, holding time* 60 menit) hingga tertinggi 191,28 HVN pada spesimen RA5 (*2X repair, holding time* 30 menit).). Visualisasi data tersebut disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Rata-Rata Nilai Kekerasan di HAZ

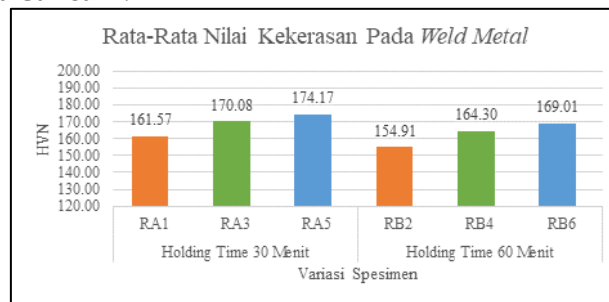
Analisis pada area HAZ menunjukkan dua tren yang kontras. Peningkatan jumlah siklus *repair* cenderung menaikkan kekerasan akibat masukan panas kumulatif, sedangkan penambahan *holding time* PWHT justru menurunkannya. Penurunan kekerasan akibat PWHT ini konsisten dengan hasil observasi mikrostruktur, yang menunjukkan adanya pertumbuhan butir yang lebih signifikan pada spesimen dengan *holding time* 60 menit dibandingkan 30 menit. Selanjutnya hasil uji kekerasan pada daerah *Weld Metal* dapat dilihat pada Tabel 6

Tabel 6. Hasil Kekerasan Vickers pada Weld Metal

Spesimen	Holding Time 30 Menit			Holding Time 60 Menit		
	RA 1	RA 3	RA 5	RB 2	RB 4	RB 6

Spesimen	Holding Time 30 Menit			Holding Time 60 Menit		
	RA 1	RA 3	RA 5	RB 2	RB 4	RB 6
<i>Raw Material</i> (HVN)	494.5					
Hasil (HVN)	<i>Root</i>	160.54	166.88	169.31	150.65	154.11
		165.80	161.05	166.79	159.30	158.46
		160.27	163.35	170.95	152.20	152.52
	<i>Hotpass</i>	158.61	163.42	168.31	160.28	153.19
		151.29	159.12	171.57	152.04	149.89
		159.63	162.21	170.24	158.40	160.28
	<i>Fillpass</i>	162.72	179.29	176.87	160.38	167.87
		167.85	174.75	179.11	155.32	166.66
		161.37	181.18	170.28	152.57	179.31
	<i>Capping</i>	166.11	176.23	186.81	151.24	171.96
		160.72	180.86	179.42	150.57	179.61
		163.72	174.67	180.33	155.96	177.71
	Rata-rata (HVN)	161.57	170.08	174.17	154.91	164.30

Hasil pengujian menunjukkan rentang nilai kekerasan dari 154,91 HVN (spesimen RB2) hingga 174,17 HVN (spesimen RA5). Data ini mengindikasikan bahwa kekerasan meningkat seiring bertambahnya jumlah siklus *repair*, sementara proses PWHT dengan *holding time* lebih lama cenderung menurunkannya. Visualisasi data tersebut disajikan pada Gambar 7.

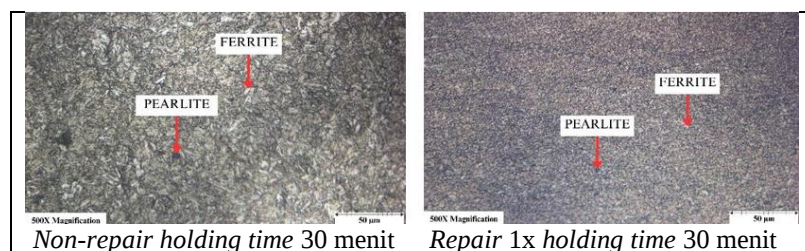


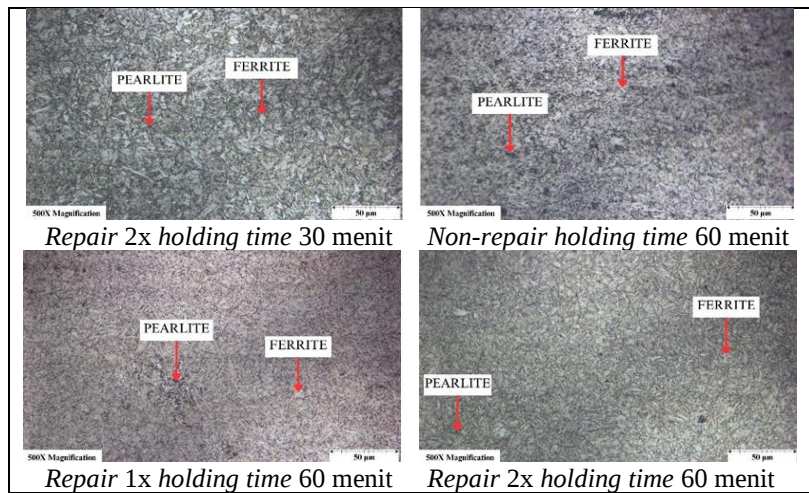
Gambar 7. Grafik Rata-Rata Nilai Kekerasan di Weld Metal

Serupa dengan zona lainnya, kekerasan *weld metal* meningkat seiring bertambahnya siklus *repair*. Sebaliknya, perlakuan PWHT dengan *holding time* 60 menit menurunkannya, yang konsisten dengan hasil analisis mikrostruktur yang menunjukkan terjadinya pertumbuhan butir (*grain growth*). Efek ini merupakan respons *tempering* klasik, di mana perlakuan panas yang lebih lama memungkinkan terjadinya proses difusi, pemulihan (*recovery*), dan pertumbuhan butir, yang melunakkan mikrostruktur [21]. Temuan ini sejalan dengan penelitian pada baja kekuatan tinggi lainnya yang menunjukkan bahwa durasi PWHT yang lebih lama dapat mengurangi kekerasan namun berpotensi meningkatkan ketangguhan [22].

Hasil Pengujian Struktur Mikro

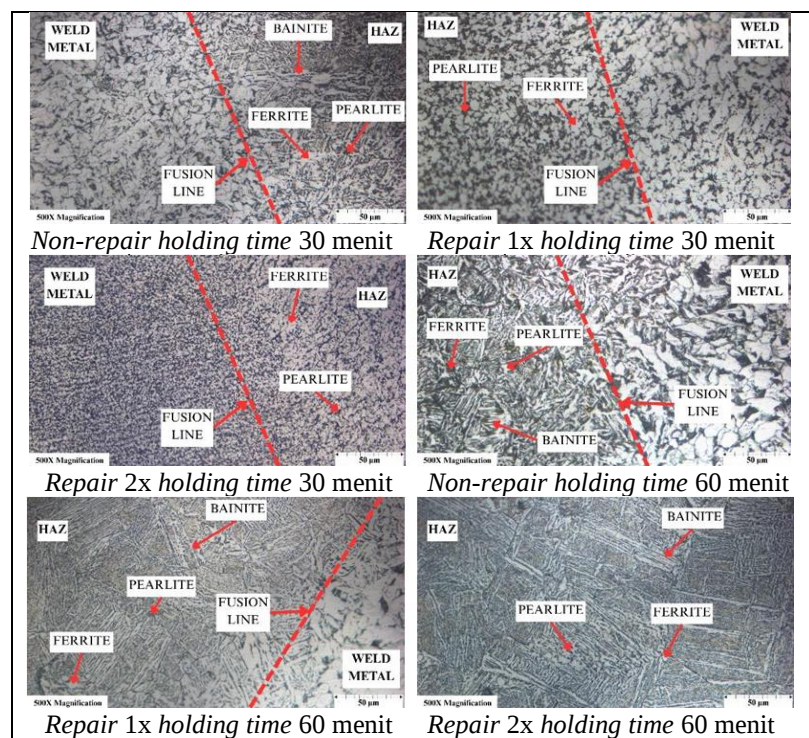
Pengujian mikrostruktur dilakukan menggunakan mikroskop optik dengan pembesaran 500x. Titik pengujian mikro diambil pada *base metal*, zona panas terpengaruh (HAZ), dan *weld metal*. Hasil pengujian struktur mikro pada *base metal* dapat dilihat pada Gambar 8.





Gambar 8. Struktur Mikro Base Metal pada Pembesaran 500x

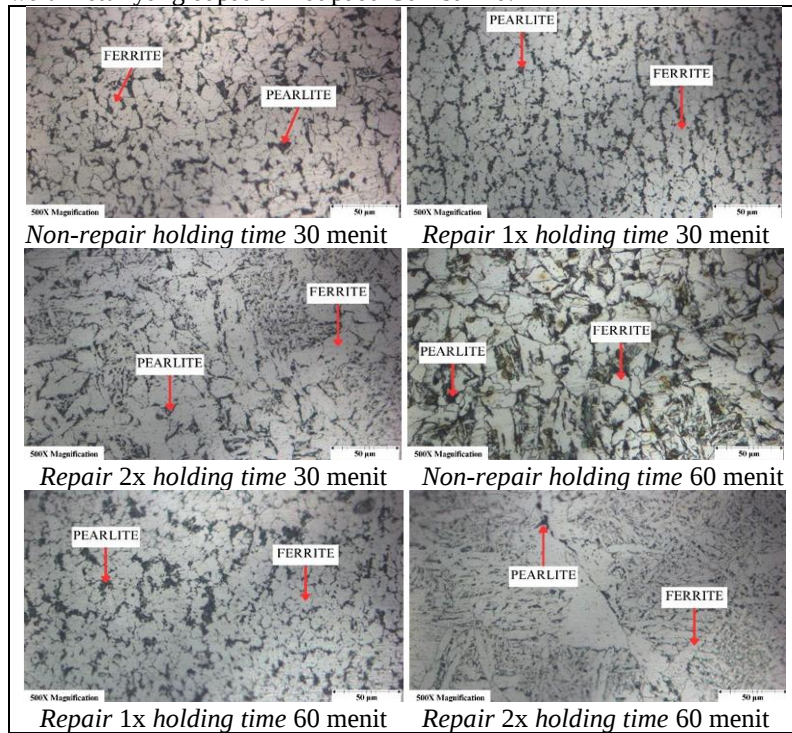
Berdasarkan Gambar 8, jumlah siklus *repair* tidak secara signifikan mengubah ukuran butir *base metal*—sebuah temuan yang didukung oleh Chaus karena pengaruh termal yang terbatas. Namun, pengaruh yang signifikan teramati pada durasi PWHT, di mana penambahan *holding time* hingga 60 menit mengakibatkan pertumbuhan butir yang menghasilkan struktur lebih kasar [23]. Sementara itu, pada *weld metal*, analisis mengidentifikasi fasa dominan ferit asikular (*acicular ferrite*), yang berkorelasi dengan sifat ketangguhan yang tinggi. Selanjutnya hasil pengujian mikro pada daerah *Heat Affected Zone* (HAZ) yang dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Struktur Mikro HAZ pada Pembesaran 500x

Gambar 9 menunjukkan peningkatan jumlah siklus *repair* secara signifikan memengaruhi fasa yang terbentuk. Pada spesimen dengan *holding time* 60 menit, peningkatan jumlah *repair* berkorelasi langsung dengan peningkatan fraksi volume bainit. Formasi bainit ini menjelaskan tren kenaikan kekerasan yang teramati pada spesimen tersebut. Sementara itu, durasi *holding time* PWHT menunjukkan pengaruh yang berbeda. Spesimen 30 menit didominasi oleh fasa ferit proeutektoid dan eutektoid yang lebih halus, sedangkan *holding time* 60 menit memfasilitasi pertumbuhan butir dan transformasi menjadi bainit, yang menyebabkan penurunan kekerasan secara umum. Peningkatan jumlah bainit pada daerah HAZ ini juga dapat ditemui pada penelitian yang dilakukan oleh Konat pada material HARDOX 600, di mana daerah HAZ mengalami peningkatan jumlah bainit yang menurunkan nilai kekerasan [13]. Penurunan kekerasan ini konsisten dengan temuan Harati, yang

mengaitkan penurunan kekerasan dengan peningkatan ketangguhan impact [18]. Selanjutnya hasil pengujian mikro pada daerah *weld metal* yang dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Struktur Mikro Weld Metal pada Pembesaran 500x

Analisis mikrostruktur pada area *weld metal* mengidentifikasi fasa dominan berupa ferit dan perlit. Perbedaan signifikan teramati pada spesimen dengan *holding time* PWHT 60 menit, yang menunjukkan fraksi volume ferit asikular (*acicular ferrite*) dengan morfologi menyerupai jarum yang lebih tinggi dibandingkan spesimen 30 menit. Penemuan ini juga sejalan dengan penelitian dari Konat pada material HARDOX 600, di mana daerah *weld metal* mengalami perubahan bentuk mikrostruktur menjadi ferit asikular menyerupai *tempering martensite* berbentuk jarum [13]. Peningkatan fraksi ferit asikular ini secara langsung menjelaskan hasil uji kekerasan. Mengingat ferit asikular memiliki ketangguhan yang baik namun kekerasan yang lebih rendah, formasinya konsisten dengan temuan bahwa area *weld metal* memiliki nilai kekerasan yang lebih rendah dibandingkan *base metal* dan HAZ [24].

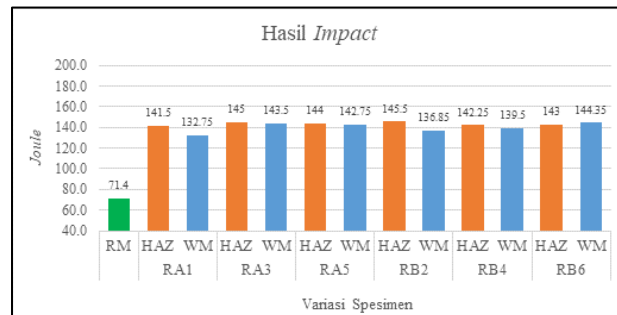
Hasil Pengujian Ketangguhan

Tiap variabel uji pada penelitian ini dilakukan pengujian ketangguhan *impact Charpy* sebanyak 4 spesimen, yang terdiri dari 2 spesimen pada HAZ, dan 2 spesimen pada *weld metal*. Pengujian menggunakan tipe *notch V* dan *temperature* 27.8°C. Hasil pengukuran spesimen *impact Charpy* dapat dilihat pada Tabel 7. Berdasarkan Gambar 12, hasil uji *impact* mengalami penurunan nilai ketangguhan seiring dengan bertambahnya jumlah *repair*. Penurunan ini berbanding terbalik dengan meningkatnya nilai kekerasan dari spesimen. Penurunan ini disebabkan oleh peningkatan *heat input* (masukan panas), yang disebabkan oleh proses *repair* secara berulang.

Tabel 7. Hasil Pengujian Impact Charpy

Spesimen	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Depth of Notch (mm)	Thickness at Notch	Cross Section at Notch (mm²)	Energi Impact (J)	Rerata Energi Impact (J)	Strength (J/mm²)	Average Strength (J/mm²)
Raw Material										
RM 1	55.3	9.9	9.9	1.97	7.93	78.51	71	71.3	0,90	0.93
RM 2	55.75	9	9.95	1.91	8.04	72.36	72.5		1	
RM 3	55.8	9.9	9.95	2.04	7.91	78.31	72		0,92	
RM 4	55.6	9.9	10	2.03	7.97	78.90	70		0,89	
RA 1										
HAZ 1	55.3	9.9	10	2.46	7.54	74.65	149	141.5	2	1.92
HAZ 2	55.25	9.5	10	2.34	7.66	72.77	134		1.84	

Spesimen	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Depth of Notch (mm)	Thickness at Notch	Cross Section at Notch (mm ²)	Energi Impact (J)	Rerata Energi Impact (J)	Strength (J/mm ²)	Average Strength (J/mm ²)
Raw Material										
WM 1	55.2	9.7	9.65	2.41	7.24	70.23	124	132.8	1.77	1.74
WM 2	55	10	10.25	2.01	8.24	82.40	141.5		1.72	
RB 2										
HAZ 1	55.05	9.75	9.7	2.09	7.61	74.20	140	145	1.89	1.91
HAZ 2	55.3	10.3	10.3	2.7	7.6	77.90	150		1.93	
WM 1	55	10.1	10.15	2.02	8.13	82.11	144.5	143.5	1.76	1.80
WM 2	55.25	9.75	10.1	2.17	7.93	77.32	142.5		1.84	
RA 3										
HAZ 1	55.2	10.1	10.2	2.41	7.79	78.68	143	144	1.82	1.83
HAZ 2	55.15	10	10.2	2.37	7.83	78.30	145		1.85	
WM 1	55.1	9.75	10	2.12	7.88	76.83	142	142.8	1.85	1.85
WM 2	55.1	9.9	10.1	2.23	7.87	77.91	143.5		1.84	
RB 4										
HAZ 1	55.1	9.9	9.7	2.22	7.48	74.05	145.5	145.5	1.96	1.94
HAZ 2	55.15	10.1	9.8	2.25	7.55	76.26	145.5		1.91	
WM 1	54.95	9.7	9.25	2.01	7.24	70.23	133.5	136.85	1.90	1.89
WM 2	55.15	9.9	9.65	2.14	7.51	74.35	140.2		1.89	
RA 5										
HAZ 1	54.8	10.1	9.8	1.75	8.05	81.31	141	142.25	1.73	1.79
HAZ 2	55.15	10	10	2.22	7.78	77.80	143.5		1.84	
WM 1	55	9.7	9.8	1.92	7.88	76.44	136	139.5	1.78	1.91
WM 2	55.2	9.6	9.5	2.18	7.32	70.27	143		2.03	
RB 6										
HAZ 1	55.1	10	9.8	2.37	7.43	74.30	145.5	143	1.96	1.80
HAZ 2	55.1	10	11	2.4	7.6	86	140.5		1.63	
WM 1	54.8	10	9.8	1.87	7.93	79.30	142.2	144.35	1.79	1.82
WM 2	54.95	10	10	2.07	7.93	79.30	146.5		1.85	



Gambar 11. Grafik Nilai Ketangguhan

Foto dari patahan dan klasifikasi apakah spesimen mengalami patahan *brittle* atau *ductile* disajikan pada Tabel 9. Analisis permukaan patahan menunjukkan bahwa semua spesimen yang dilas mengalami patah ulet (*ductile*), yang ditandai dengan adanya deformasi plastis (*lateral expansion*). Hal ini kontras dengan material awal (*raw material*) yang menunjukkan patah getas (*brittle*). Ini mengindikasikan bahwa meskipun terjadi perubahan sifat mekanis, proses pengelasan dan PWHT berhasil mengubah mode kegagalan dari getas menjadi ulet, yang lebih diinginkan dalam aplikasi struktural karena memberikan peringatan sebelum kegagalan total [25].

Tabel 8. Klasifikasi Patahan Pada Hasil Uji Impact

Patahan Spesimen	Lateral Expansion (mm)	Jenis Patahan	Patahan Spesimen	Lateral Expansion (mm)	Jenis Patahan
Raw Material	0	Brittle	RA 1	2,25	Ductile

Patahan Spesimen	Lateral Expansion (mm)	Jenis Patahan	Patahan Spesimen	Lateral Expansion (mm)	Jenis Patahan
	0 0 0	Brittle Brittle Brittle		1,9 1,6 1,4	Ductile Ductile Ductile
RB 2 	1,95 1,8 1,65 1,75	Ductile Ductile Ductile Ductile	RA 3 	1,55 1,5 1,25 1,8	Ductile Ductile Ductile Ductile
RB 4 	1,8 2,1 1,2 2,15	Ductile Ductile Ductile Ductile	RA 5 	1,95 1,8 2 2,05	Ductile Ductile Ductile Ductile
RB 6 	1,95 1,7 1,6 1,6	Ductile Ductile Ductile Ductile			

Simpulan

Sifat mekanis dan mikrostruktur pengelasan HARDOX 500 sangat dipengaruhi oleh perbaikan dan durasi penyimpanan *Post-Weld Heat Treatment* (PWHT). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan jumlah *repair* dapat meningkatkan nilai kekerasan namun secara simultan menurunkan nilai ketangguhan material, yang diatribusikan pada peningkatan masukan panas kumulatif dan formasi fasa bainit. Di sisi lain, proses PWHT dengan durasi *holding time* yang lebih lama (60 menit) terbukti efektif menurunkan nilai kekerasan, yang konsisten dengan terjadinya pertumbuhan butir dan pembentukan fasa yang lebih lunak seperti ferit asikular. Temuan ini mengindikasikan bahwa PWHT berpotensi digunakan untuk memulihkan sebagian ketangguhan yang hilang akibat proses *repair*. Hasil penelitian ini dapat menjadi acuan *repair* dan PWHT bagi industri yang menggunakan HARDOX 500 sebagai *wear plate* maupun jenis peralatan lainnya ketika mengalami kerusakan.

Daftar Pustaka

- [1] Z. Zuo *et al.*, "Microstructure, Fractography, and Mechanical Properties of Hardox 500 Steel TIG-Welded Joints by Using Different Filler Weld Wires," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 22, pp. 4–6, 2022, doi: 10.3390/ma15228196.
- [2] K. A. Nasra, Zuldesmi, and J. C. Kewas, "Pengaruh Post Weld Heat Treatment Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Baja Karbon ST42 dengan Pengelasan SMAW (Shielded Metal Arc Welding)," *ACTUATOR J. Tek. ...*, vol. 1, no. 1, pp. 26–36, 2020, [Online]. Available: <http://ejurnal-mapalus->

- unima.ac.id/index.php/actuator/article/view/115
- [3] B. Gallina, L. Volcanoglo Biehl, J. L. Braz Medeiros, and J. de Souza, "The Influence of Different Heat Treatment Cycles on the Properties of the Steels HARDOX 500 and STREX 700," *Rev. Lib.*, no. June, pp. 67–74, 2020, doi: 10.31514/rliberato.2020v21n35.p67.
- [4] Z. Ahmad, M. Shahid, and M. Abbas, "Effect of Multiple Repair Welding on Mechanical Performance and Corrosion Resistance of Quenched and Tempered 30CrMnSiA Steel," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 39, no. 4, pp. 1233–1243, 2017, doi: 10.1007/s40430-016-0535-5.
- [5] A. Arifah and S. Ruswanto, "Efek Post Weld Heat Treatment terhadap Sifat Mekanik AISI 316 Hasil Pengelasan GTAW," *J. Mek. Terap.*, vol. 1, no. 2, pp. 81–87, 2020, doi: 10.32722/jmt.v1i2.3354.
- [6] M. Miftachul Munir, M. Syaiful Amri, I. Khoirul Rahmat, B. Bachtar, and J. Victoria, "Analisis Metode Temper Bead Welding sebagai Alternatif Pengganti PWHT pada Pembuatan Sulphuric Acid Storage Tank," *J. Teknol. Marit.*, vol. 7, no. 1, pp. 13–24, 2024, doi: 10.35991/jtm.v7i1.6.
- [7] X. Wang *et al.*, "Study on the Grain Growth Behavior of Ultra-High Strength Stainless Steel," *Materials (Basel)*, vol. 18, no. 5, 2025, doi: 10.3390/ma18051064.
- [8] Hardox, *Welding of HARDOX*. 2023. [Online]. Available: ssab.com/support/steel-handbooks
- [9] M. Alhassan and Y. Bashiru, "Carbon Equivalent Fundamentals in Evaluating the Weldability of Microalloy and Low Alloy Steels," *World J. Eng. Technol.*, vol. 09, no. 04, pp. 782–792, 2021, doi: 10.4236/wjet.2021.94054.
- [10] A. P. Silva, T. Węgrzyn, T. Szymczak, B. Szczucka-Lasota, and B. Łazarz, "Hardox 450 Weld in Microstructural and Mechanical Approaches after Welding at Micro-Jet Cooling," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 20, 2022, doi: 10.3390/ma15207118.
- [11] SSAB, *Welding of HARDOX*. United States of America, 2024.
- [12] K. R. Carpenter *et al.*, "The Effects of Multiple Repair Welds on a Quenched and Tempered Steel for Naval Vessels," *Weld. World*, 2021, [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/10779/uow.27811338.v1%0A%0A>
- [13] Ł. Konat, B. Białobrzaska, and P. Białek, "Effect of Welding Process on Microstructural and Mechanical Characteristics of Hardox 600 Steel," *Metals (Basel)*, vol. 7, no. 9, 2020, doi: 10.3390/met7090349.
- [14] S. Amri, "Analisis Multiple Repair pada Material Baja Karbon SA 333 Grade 6 dengan Proses GTAW Terhadap Kekerasan , Ketangguhan , dan Struktur Mikro," *J. Inovtek Polbeng*, vol. 12, no. 1, pp. 15–22, 2022.
- [15] TWI Global, "Are Quenched and Tempered (Q&T) Steels Readily Weldable?," *TWI Global*. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-are-quenched-and-tempered-qt-steels-readily-weldable> (accessed Sep. 10, 2025).
- [16] S. F. Haider, M. M. Quazi, J. Bhatti, M. Nasir Bashir, and I. Ali, "Effect of Shielded Metal Arc Welding (SMAW) Parameters on Mechanical Properties of Low-Carbon, Mild and Stainless-Steel Welded Joints: A Review," *J. Adv. Technol. Eng. Res.*, vol. 5, no. 5, 2020, doi: 10.20474/jater-5.5.1.
- [17] A. I. Rudskoi and S. G. Parshin, "Advanced Trends in Metallurgy and Weldability of High-Strength Cold-Resistant and Cryogenic Steels," *Metals (Basel)*, vol. 11, no. 12, 2021, doi: 10.3390/met11121891.
- [18] E. Harati, E. Harati, and U. Onochie, "Effect of Post-Weld Heat Treatment on Mechanical and Microstructural Properties of High Strength Steel Weld Metal," *Weld. Int.*, vol. 38, no. 6, pp. 422–429, 2024, doi: 10.1080/09507116.2024.2348008.
- [19] D. Irawan and Herry Irawansyah, "The Effect of PWHT (Post Weld Heat Treatment) on SMAW on the Hardness and Bending Strength of St 37 Steel," *Rotary*, vol. 6, no. 1, pp. 2721–6225, 2024, doi: 10.20527/jtamrotary.v7i.
- [20] A. Ilić, L. Ivanović, B. Stojanović, D. Josifović, and E. Desnica, "Impact Toughness of High-Strength Low-Alloy Steel Welded Joints," *Appl. Eng. Lett.*, vol. 3, no. 3, pp. 98–104, 2018, doi: 10.18485/aeletters.2018.3.3.3.
- [21] S. Q. Moinuddin *et al.*, "Effect of Post-Weld Heat Treatment Cooling Strategies on Microstructure and Mechanical Properties of 0.3 C-Cr-Mo-V Steel Weld Joints Using GTAW Process," *Metals (Basel)*, vol. 15, no. 5, 2025, doi: 10.3390/met15050496.
- [22] K. Lamid, T. Akor, and L. Okan, "Influence of Additives on the Mechanical Characteristics of Hardox 450 Steel Welds," *Adeleke University J. Eng. Technol.*, vol. 16, no. 16, pp. 136–142, 2025.
- [23] A. S. Chaus, A. Kuhajdova, M. Marônek, and M. Dománková, "Effect of Multiple Local Repairs on Microstructure and Mechanical Properties of T24 Steel Welded Joint," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 27, no. 6, pp. 3024–3034, 2020, doi: 10.1007/s11665-018-3387-6.
- [24] J. Shi, Q. Pang, W. Li, Z. Xiang, and H. Qi, "Evolution of Inclusions in DH36 Grade Ship Plate Steel During High Heat Input Welding," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–10, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-69907-1.

- [25] A. dos R. de F. Neto, E. X. Dias, C. S. Fukugauchi, M. S. Martins, and M. dos S. Pereira, "Mechanical and Microstructural Characterization of Class 800 Complex Phase Steel before and after the Laser Welding Process," *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 8, no. 5, 2024, doi: 10.3390/jmmp8050232.