

Analisis *Multiple Repair* pada Pengelasan Material HARDOX 400 Menggunakan Proses FCAW terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro

Kukilo Edy Sasongko^{1*}, Hendri Budi Kurniyanto¹, Alvalo Toto Wibowo¹

¹ Program Studi D4-Teknik Pengelasan, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya
Jalan Teknik Kimia Kampus ITS, Keputih Sukolilo Surabaya, Jawa Timur 60111, Indonesia

*Penulis korespondensi; E-mail: kukiloedy@student.ppns.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh *multiple repairs* terhadap sifat mekanik dan struktur mikro material HARDOX 400 yang digunakan sebagai *liner* pada *hopper* di industri pertambangan. HARDOX 400 dipilih karena ketahanan ausnya yang tinggi, namun material ini memiliki *weldability* rendah sehingga rawan mengalami cacat saat pengelasan. Studi dilakukan menggunakan proses pengelasan FCAW dengan variasi jumlah *repair* yang dilakukan meliputi kondisi tanpa *repair*, serta *repair* yang dilakukan sebanyak satu, dua, dan tiga kali. Pengujian mencakup kekerasan, ketangguhan (*impact*), struktur mikro, dan ketahanan aus. Hasil menunjukkan kekerasan tertinggi terdapat pada HAZ *repair* tiga kali (249,76 Kgf/mm²), sementara kekerasan terendah ada pada *weld metal repair* dua kali (182,70 Kgf/mm²). Ketangguhan tertinggi ditemukan di HAZ tanpa *repair* (1,84 J/mm²), dan yang terendah di *weld metal repair* tiga kali (1,12 J/mm²). Struktur mikro didominasi *ferrite* dan *pearlite*, dengan peningkatan dominasi *pearlite* seiring bertambahnya *repair*. Ketahanan aus terbaik dimiliki tiga kali *repair* (0,004004770 mm³/N.m), sedangkan terburuk pada dua kali *repair* (0,006970926 mm³/N.m). Kesimpulan dari penelitian ini menyatakan bahwa *multiple repairs* cenderung meningkatkan kekerasan namun menurunkan ketangguhan material.

Kata Kunci : *multiple repairs*, FCAW, HARDOX 400, sifat mekanik, struktur mikro.

ABSTRACT

This study aims to analyze the effect of multiple repairs on the mechanical properties and microstructure of HARDOX 400 material used as a liner in mining industry hoppers. HARDOX 400 was selected due to its high wear resistance, but its low weldability makes it prone to welding defects. The study employed the FCAW welding process with repair variations of none, once, twice, and three times. The tests conducted include hardness, impact toughness, microstructure, and wear resistance. The highest hardness was recorded in the HAZ of the three-times repair (249.76 Kgf/mm²), while the lowest was in the weld metal of the two-times repair (182.70 Kgf/mm²). The highest toughness was found in the HAZ without repair (1.84 J/mm²), and the lowest in the weld metal with three-times repair (1.12 J/mm²). The microstructure was dominated by ferrite and pearlite, with increased pearlite content as the number of repairs increased. The best wear resistance was shown by the three-times repair specimen (0.004004770 mm³/N.m), while the poorest was observed in the two-times repair specimen (0.006970926 mm³/N.m). In conclusion, multiple repairs tend to increase hardness and wear resistance but reduce the toughness of the material.

Keywords: *multiple repairs, FCAW, HARDOX 400, mechanical properties, microstructure.*

PENDAHULUAN

Industri modern terus mengalami perkembangan pesat, seiring meningkatnya kebutuhan terhadap material dengan sifat mekanik unggul, terutama pada aplikasi yang membutuhkan ketahanan aus dan kekuatan tinggi. Salah satu sektor yang sangat membutuhkan material semacam ini adalah industri pertambangan, di mana peralatan seperti *hopper*, *chute*, *launder*, *konveyor*, dan alat penghancur bekerja dalam kondisi ekstrem dan terpapar material abrasif secara terus-menerus. *Hopper* merupakan komponen penting dalam sistem transportasi material di industri pertambangan, berfungsi untuk mengambil, menyimpan, dan mengalirkan material

seperti bijih, batu bara, dan mineral [1]. Untuk melindungi *hopper* dari abrasi, digunakan *liner* sebagai lapisan pelindung dibagian dalamnya. *Liner* biasanya terbuat dari material yang tahan aus, seperti baja keras HARDOX 400. HARDOX 400 sering kali dipilih untuk proses fabrikasi dikarenakan material ini mampu ditekuk dengan radius penekukan yang sempit tanpa masalah, sedangkan grade Hardox yang lebih keras biasanya memiliki kemampuan pembentukan yang lebih terbatas, dari segi biaya, Hardox 400 relatif lebih murah dibandingkan dengan *grade* Hardox yang lebih tinggi seperti Hardox 450 atau Hardox 500. Karena produksi Hardox 400 sudah sangat besar dan mapan, hal ini membuatnya ekonomis sekaligus tetap memenuhi syarat teknis untuk banyak aplikasi industri [2]. Meski demikian, pemasangan *liner* tidaklah sederhana, mengingat bentuk *hopper* yang kompleks serta karakteristik HARDOX 400 yang keras dan relatif getas, sehingga menyulitkan proses fabrikasi maupun pengelasan.

HARDOX 400 memiliki nilai kekerasan kisaran sebesar 370–430 HBW, namun memiliki tingkat *weldability* yang relatif rendah apabila dibandingkan dengan baja karbon rendah (*mild steel*) [3], namun masih lebih baik dibandingkan dengan baja tahan aus dengan tingkat kekerasan lebih tinggi, seperti HARDOX 500 atau HARDOX 600. Hal ini disebabkan oleh nilai *carbon equivalent* (CE) yang cukup tinggi, yakni maksimal 0,47 untuk ketebalan 8–20 mm [4]. Karakteristik tersebut menyebabkan HARDOX 400 cenderung rentan terhadap cacat las, seperti *crack* [5]. Kualitas sambungan las dipengaruhi oleh sifat logam dasar dan logam pengisi, bentuk alur sambungan, keterampilan juru las, serta kondisi peralatan pengelasan. Masalah utama yang sering muncul pada baja jenis ini, terutama pada benda kerja dengan ketebalan besar, adalah kemungkinan terjadinya retak dingin [6]. Masalah ini membuat sambungan pengelasan rentan terjadi proses perbaikan berulang (*multiple repairs*) dikarenakan hasil pengelasan tidak memenuhi *acceptance criteria* dari *standard* pengelasan yang digunakan. Dalam perusahaan fabrikasi, seringkali ditetapkan batas jumlah perbaikan (*repair*) pada sambungan las untuk menghindari penurunan kualitas di area tersebut. Namun, jika penetapan batas perbaikan dilakukan tanpa dasar teknis yang kuat, hal ini dapat menyebabkan perusahaan mengalami kerugian. Untuk itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh jumlah perbaikan pengelasan terhadap nilai kekerasan, nilai ketangguhan, struktur mikro, dan nilai ketahanan aus material HARDOX 400. Penelitian dilakukan terhadap empat spesimen dengan variasi jumlah perbaikan yang dilakukan meliputi kondisi tanpa perbaikan, serta perbaikan yang dilakukan sebanyak satu, dua, dan tiga kali.

METODE

Material HARDOX 400

HARDOX adalah produk *wear resistance steel* yang dipasarkan dan dibuat oleh perusahaan asal Swedia, SSAB. Material ini khusus dikembangkan untuk menahan keausan akibat gesekan, benturan, serta tekanan eksternal lainnya. Komposisi kimia dari baja HARDOX 400 memainkan peran penting dalam menentukan sifat mekanik, ketahanan aus, dan daya tahan terhadap beban kerja berat, komposisi kimia baja HARDOX 400 akan ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi kimia baja HARDOX 400

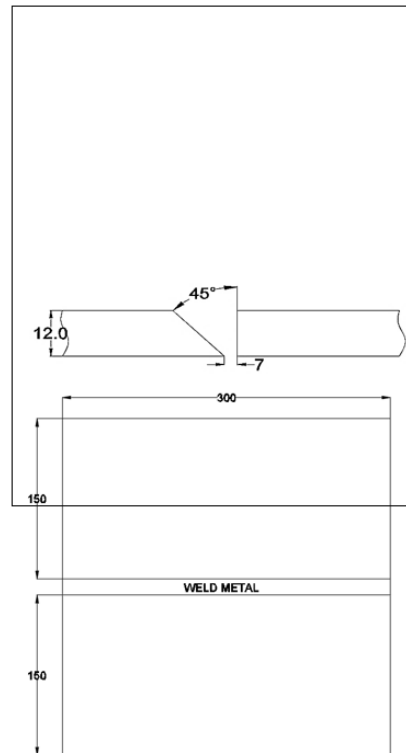
Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
	[%wt]								
HARDOX 400	0,32	0,70	1,6	0,025	0,01	2,50	1,50	0,06	0,004

Unsur-unsur kimia yang terkandung di dalamnya saling berinteraksi untuk membentuk struktur mikro yang kuat dan stabil, struktur mikro baja HARDOX 400 yang padat dan keras membuatnya sangat tahan terhadap kondisi kerja yang berat dan menuntut daya tahan tinggi [7]. Berikut ini adalah rincian komposisi kimia baja HARDOX 400 yang ditampilkan pada Tabel Dalam penelitian ini material yang digunakan adalah pelat baja tahan aus HARDOX 400 dengan ukuran 300x150x12 mm sebanyak empat sambungan (*joint*). *Design joint* yang digunakan adalah *single bevel* dengan kemiringan 45°. Untuk design joint akan di tampilkan pada Gambar 1.

Proses Pengelasan

Proses pengelasan menggunakan metode *flux core arc welding* (FCAW) dengan posisi pengelasan

1G. Pemilihan proses pengelasan ini didasarkan pada pertimbangan bahwa dalam industri manufaktur, metode FCAW mampu menghasilkan volume deposit las yang besar, sehingga mendukung proses pengelasan yang lebih cepat, efisien, dan sesuai dengan kebutuhan produksi. Proses pengelasan FCAW adalah proses pengelasan busur listrik semi-otomatis yang menggunakan elektroda kawat berinti serbuk *flux* sebagai bahan pengisi dan pelindung lasan. Energi listrik menghasilkan busur yang melelehkan elektroda dan logam dasar, sementara *flux* di dalam inti kawat las menghasilkan gas pelindung dan terak yang melindungi kolam las dari oksidasi dan kontaminasi udara. FCAW menggabungkan prinsip pengelasan *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) dan *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) dengan keunggulan efisiensi dan perlindungan ekstra dari *flux* [8]. Pada penelitian ini pemilihan spesifikasi *filler metal* didasarkan pada buku panduan pengelasan baja HARDOX dimana menggunakan spesifikasi E71T-1C [9]. Untuk komposisi kimia dari *filler metal* ditampilkan pada Tabel 2.



Gambar 1. Ilustrasi sambungan pengelasan

Tabel 2. Komposisi kimia *filler metal* E71T-1C

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
[%wt]									
0,12	1,75	0,90	0,03	0,03	0,50	0,20	0,30	0,008	0,35

Proses pengelasan dilakukan menggunakan mesin las merek Huayuan NB-350 dengan menggunakan gas pelindung CO₂ murni sebanyak 99%. Parameter pengelasan yang diaplikasikan dapat dilihat pada Tabel 3.

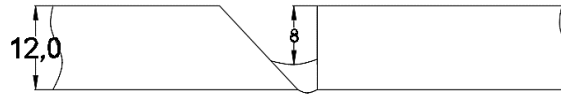
Tabel 3. Parameter las

Amper [I]	Voltase [V]	Diameter <i>filler metal</i> [mm]	<i>Min. preheat temperature</i> [°C]	<i>Max. interpass temperature</i> [°C]
178 – 215	20 – 30	1,2	125	250

Proses Perbaikan (*Repairs*)

Setelah proses pengelasan selesai, tahap berikutnya adalah melakukan perbaikan atau penggerindaan pada hasil las menggunakan metode penggerindaan manual. Dalam penelitian

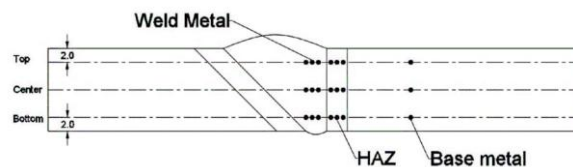
ini, variasi jumlah perbaikan yang diterapkan mencakup kondisi tanpa perbaikan, serta satu, dua, dan tiga kali perbaikan. Proses perbaikan dilakukan sampai kedalaman 8 mm dari permukaan logam dasar, kemudian dilanjutkan dengan pengulangan pengelasan menggunakan parameter yang tertera pada Tabel 1. Ilustrasi proses penggerindaan dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Ilustrasi penggerindaan

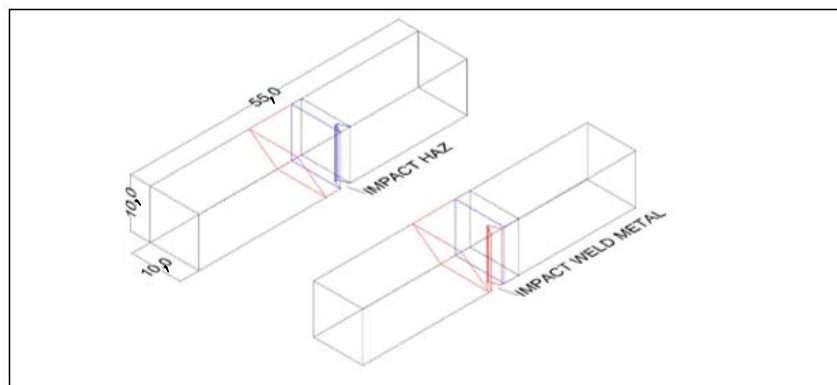
Proses Uji Nilai Kekerasan

Pengujian kekerasan merupakan proses untuk menilai kemampuan suatu material dalam menahan deformasi plastis yang timbul akibat tekanan atau goresan pada permukaannya. Metode yang digunakan adalah uji kekerasan *Vickers*, di mana spesimen ditekan menggunakan indenter berbentuk piramida dengan alas bujur sangkar dan sudut puncak 136° antar dua sisi yang saling berhadapan [10]. Pengujian dilakukan di Laboratorium Uji Bahan PPNS dengan merek mesin *hardness vickers* adalah Future Tech FLC-50VX. Pengujian dilakukan dengan pemberian beban sebesar 10 Kgf selama 15 detik. Setelah beban dilepaskan, panjang diagonal dari jejak indentasi yang terbentuk diukur menggunakan alat pengujian yang tersedia. Pengujian ini dilakukan pada tiga area berbeda, yakni logam las (*weld metal*), HAZ, dan logam dasar (*base metal*). Lokasi pengambilan titik uji kekerasan ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Ilustrasi lokasi uji nilai kekerasan

Proses Pengujian Ketangguhan



Gambar 4. Skema dan ukuran spesimen uji ketangguhan

Pengujian ketangguhan merupakan metode yang digunakan untuk menilai kemampuan suatu material dalam menyerap energi ketika menerima beban kejut atau tumbukan secara mendadak tanpa mengalami keretakan atau patah. Ketangguhan ini berbeda dengan pengujian kekerasan atau tarik yang biasanya memakai pembebanan secara perlahan. Tujuan utama pengujian ini adalah mengetahui bagaimana material bisa tahan terhadap beban dinamis yang datang mendadak serta untuk mengetahui apakah material tersebut bersifat ulet (*ductile*) atau getas (*brittle*) [11]. Metode yang digunakan adalah *Charpy*, di mana spesimen diposisikan secara horizontal dengan kedua ujungnya bertumpu pada landasan. Pembuatan takik (*V-notch*) dan

pengujian ketangguhan dilakukan di Laboratorium Uji Bahan PPNS dengan merek mesin uji ketangguhan adalah WOLPERT PW 15. Takikan (*notch*) ditempatkan tepat di tengah spesimen, sementara pemukulan dilakukan dari sisi belakang takikan tersebut [10]. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan material dalam menahan beban benturan, dengan penilaian didasarkan pada jumlah energi yang dibutuhkan untuk mematahkan spesimen menggunakan ayunan. Pada penelitian ini, uji *impact* dilakukan pada area *base metal*, HAZ, dan logam las pada suhu ruang yaitu 27°C, menggunakan spesimen berukuran 10x10x55 mm, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 4.

Uji Mikrostruktur

Pengujian mikrostruktur adalah pengujian menggunakan mikroskop untuk melihat dan menganalisis struktur kecil dalam bahan, terutama logam, yang berpengaruh langsung pada sifat dan performa material tersebut [12]. Dalam penelitian ini, pengujian mikrostruktur dilakukan untuk menganalisis kondisi struktur mikro pada beberapa area hasil pengelasan, yaitu logam dasar (*base metal*), zona terpengaruh panas HAZ, dan logam las (*weld metal*). Pengamatan dilakukan menggunakan mikroskop optik dengan pembesaran 200x untuk melihat secara detail perubahan struktur mikro yang disebabkan oleh proses pengelasan dan perbaikan (*repair*). Pengamatan struktur mikro dilakukan di Laboratorium Uji Bahan PPNS menggunakan mikro optik dengan merek OLYMPUS BX51M. Foto mikrostruktur untuk area HAZ diambil dari bagian tengah spesimen, karena hasil pengamatan pada bagian atas, tengah, dan bawah HAZ menunjukkan hasil yang relatif serupa, sehingga satu titik pengamatan dianggap mewakili. Sebaliknya, untuk area *weld metal*, pengambilan gambar dilakukan pada tiga lokasi berbeda yaitu bagian atas, tengah, dan bawah spesimen. Pendekatan ini bertujuan untuk mengidentifikasi perubahan fasa antara logam las baru (hasil proses *repair*) dan logam las lama yang tidak terpengaruh oleh proses perbaikan.

Pengujian Ketahanan Aus

Keausan adalah kerusakan pada permukaan suatu benda padat yang biasanya terjadi akibat kehilangan material secara bertahap karena gesekan antara permukaan-permukaan tersebut. Keausan bukanlah sifat bawaan material itu sendiri, melainkan merupakan respons material terhadap interaksi dengan lingkungan eksternal, khususnya kontak permukaan [13]. Pengujian ketahanan aus dilakukan di Laboratorium Korosi (Analisa Material) dan Baterai, Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Prinsip pengujian ini adalah mengukur tingkat keausan yang terjadi setelah spesimen terkena kontak dengan piringan abrasif yang berputar pada kecepatan sekitar 2400 rpm selama 1 menit. Parameter pengujian ketahanan aus akan diruliskan pada Tabel 4 berikut ini.

Tabel 4. Parameter uji ketahanan aus

Parameter	Nilai
Beban uji	10,65 N
<i>Distance radius</i>	94,60 mm
Koefisien gesek kertas abrasif	Grit 60
Kecepatan putaran	2409,3 RPM
Waktu pengujian	1 menit
Berat jenis baja	0,00785 g/mm ³
Jarak yempuh	1431,33 m

Pada penelitian ini pengujian ketahanan aus dilakukan pada permukaan (*capping*) dari hasil pengelasan. Pengujian ketahanan aus dilakukan mengacu pada standar ASTM G132 (*Standard Test Method for Pin Abrasion Testing*), yaitu metode standar yang digunakan untuk menguji seberapa tahan suatu material terhadap keausan akibat gesekan dengan membandingkan berat awal sebelum pengujian dan berat akhir setelah pengujian selesai dilakukan [14]. Perhitungan dilakukan menggunakan rumus yang ditunjukkan pada persamaan (1)-(4).

$$\text{Berat Keausan} = \text{Berat Spesimen awal (g)} - \text{Berat Spesimen akhir (g)} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Volume Keausan} &= \frac{\text{Berat Keausan Spesimen (g)}}{\text{Berat Jenis (g/mm}^3\text{)}} & (2) \\ \text{Jarak Tempuh} &= \text{Around track (mm}^2\text{)} \times \text{putaran mesin (rpm)} \times \text{Waktu uji (menit)} & (3) \\ \text{Faktor Keausan} &= \frac{\text{Volume Keausan Spesimen (mm}^3\text{)}}{(\text{Beban (N)} \times \text{Jarak Tempuh (m)})} & (4) \end{aligned}$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Kekerasan

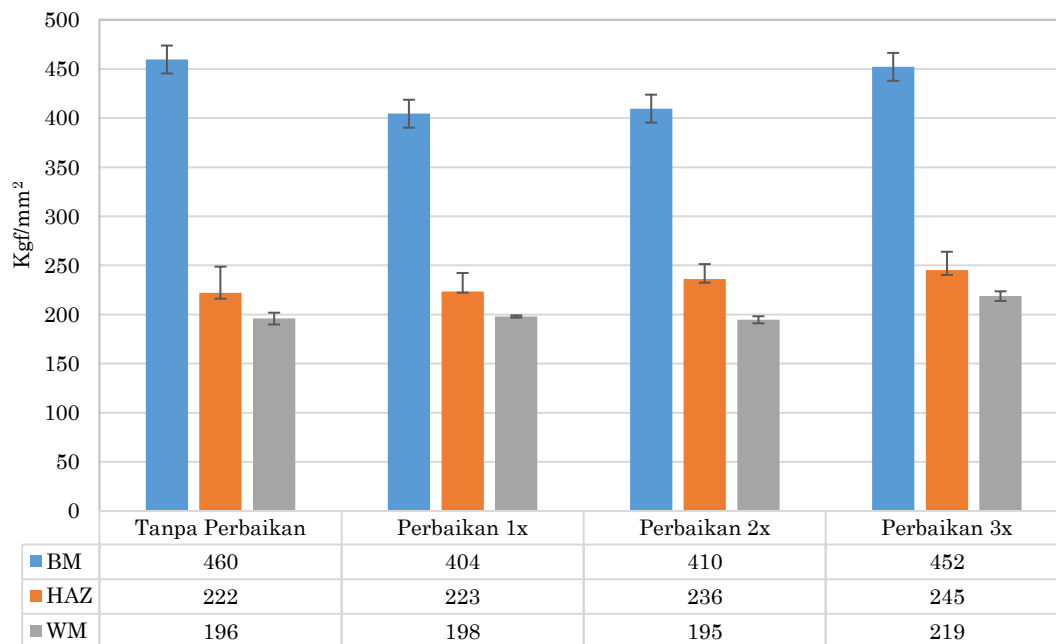
Uji kekerasan menggunakan metode *Vickers* pada total 21 titik pengukuran untuk setiap variasi. Pengujian mencakup tiga area yaitu *base metal*, *HAZ*, dan *weld metal*, dengan pengambilan sampel di tiga posisi berbeda: bagian *top*, tiga titik di *center*, serta tiga titik di bagian *bottom specimen*. Pada daerah BM, pengambilan data dilakukan sebanyak tiga titik, pada daerah HAZ sebanyak sembilan titik dan WM sebanyak sembilan titik.

Tabel 5. Hasil uji nilai kekerasan

Spesimen	Area	Lokasi	Hardness Vickers Number (Kgf/mm ²), 15s			
			1	2	3	Rata – Rata
Tanpa perbaikan	<i>Base metal</i>	<i>Top</i>	459,59	-	-	-
		<i>Center</i>	435,83	-	-	-
		<i>Bottom</i>	420,81	-	-	-
	<i>HAZ</i>	<i>Top</i>	194,68	223,68	247,94	222,10
		<i>Center</i>	190,58	186,08	204,29	193,65
		<i>Bottom</i>	195,95	207,66	204,63	202,75
	<i>Weld metal</i>	<i>Top</i>	202,61	191,07	193,99	195,89
		<i>Center</i>	195,63	199,50	195,82	196,98
		<i>Bottom</i>	186,79	190,21	181,85	186,28
Perbaikan 1x	<i>Base metal</i>	<i>Top</i>	404,46	-	-	-
		<i>Center</i>	451,68	-	-	-
		<i>Bottom</i>	409,61	-	-	-
	<i>HAZ</i>	<i>Top</i>	208,98	216,48	244,80	223,42
		<i>Center</i>	211,32	208,01	179,42	199,58
		<i>Bottom</i>	203,21	201,48	212,47	205,72
	<i>Weld metal</i>	<i>Top</i>	196,91	199,17	197,87	197,98
		<i>Center</i>	200,29	197,55	199,37	199,07
		<i>Bottom</i>	200,48	207,45	197,42	201,78
Perbaikan 2x	<i>Base metal</i>	<i>Top</i>	409,61	-	-	-
		<i>Center</i>	423,02	-	-	-
		<i>Bottom</i>	439,88	-	-	-
	<i>HAZ</i>	<i>Top</i>	222,44	232,89	252,64	235,99
		<i>Center</i>	210,89	214,86	232,15	219,30
		<i>Bottom</i>	233,63	232,07	234,05	233,25
	<i>Weld metal</i>	<i>Top</i>	193,99	198,52	191,44	194,65
		<i>Center</i>	181,22	186,73	180,15	182,70
		<i>Bottom</i>	202,61	207,87	199,83	203,44
Perbaikan 3x	<i>Base metal</i>	<i>Top</i>	452,13	-	-	-
		<i>Center</i>	423,63	-	-	-
		<i>Bottom</i>	412,71	-	-	-
	<i>HAZ</i>	<i>Top</i>	260,07	224,22	251,33	245,21
		<i>Center</i>	235,64	235,39	251,89	240,97
		<i>Bottom</i>	239,03	237,67	272,58	249,76
	<i>Weld metal</i>	<i>Top</i>	213,11	221,06	222,06	218,74
		<i>Center</i>	196,46	208,63	232,64	212,58
		<i>Bottom</i>	221,52	236,23	238,18	231,98

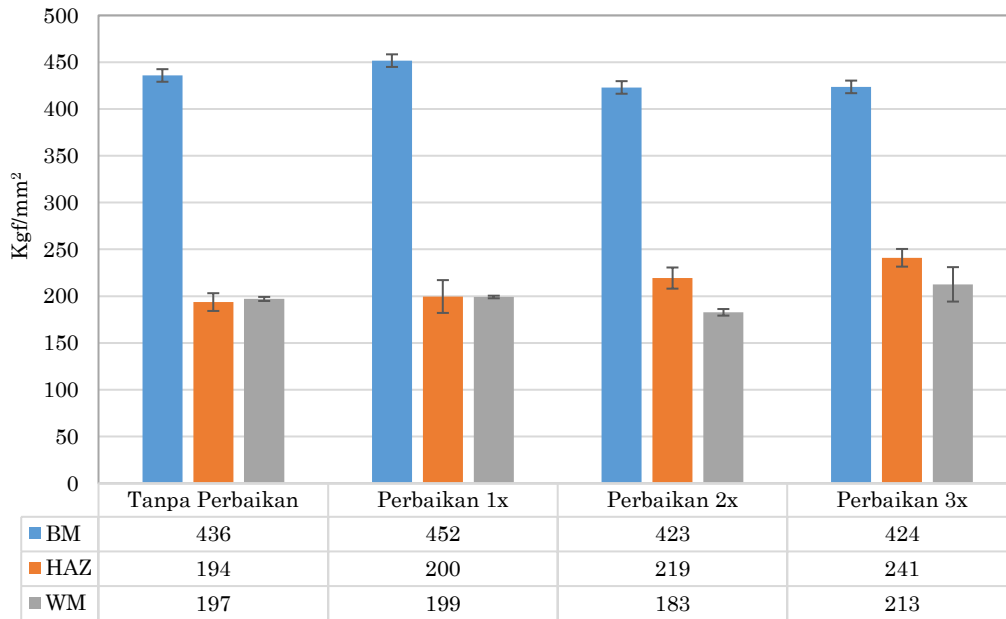
Hasil pengujian nilai kekerasan akan ditampilkan pada Tabel 5. Berdasarkan hasil uji kekerasan yang ditampilkan pada Tabel 3, penulis menyajikan data dalam bentuk grafik perbandingan untuk setiap area pengujian, yaitu bagian atas, tengah, dan bawah. Penyajian grafik ini bertujuan untuk mempermudah analisis terhadap data yang diperoleh. Grafik perbandingan nilai kekerasan disajikan secara berurutan, yaitu Gambar 5 untuk bagian atas, Gambar 6 untuk bagian tengah, dan Gambar 7 untuk bagian bawah.

Berdasarkan grafik perbandingan nilai kekerasan pada bagian atas, tengah, dan bawah, terlihat bahwa rata-rata nilai kekerasan tertinggi terdapat pada area *base metal*. Perbedaan nilai kekerasan antara base metal, HAZ, dan logam las disebabkan oleh perubahan struktur mikro pada baja HARDOX 400 saat mengalami proses pengelasan. Struktur mikro yang semula didominasi oleh *tempered martensite* mengalami transformasi menjadi *ferrite* dan *pearlite* dapat dilihat pada Gambar 8-9. Selain itu, nilai kekerasan pada HAZ menunjukkan peningkatan seiring dengan bertambahnya jumlah perbaikan yang dilakukan. Tren peningkatan ini konsisten terjadi pada ketiga lokasi pengujian, yaitu bagian atas, tengah, dan bawah. Diduga fenomena ini disebabkan oleh paparan panas (*heat input*) yang diterima oleh area HAZ selama proses pengelasan dan perbaikan secara berulang-ulang yang menyebabkan meningkatnya nilai masukan panas yang diterima HAZ. Dimana semakin tinggi nilai masukan panas (*heat input*) yang diterima material, maka nilai kekerasannya akan cenderung meningkat [15].

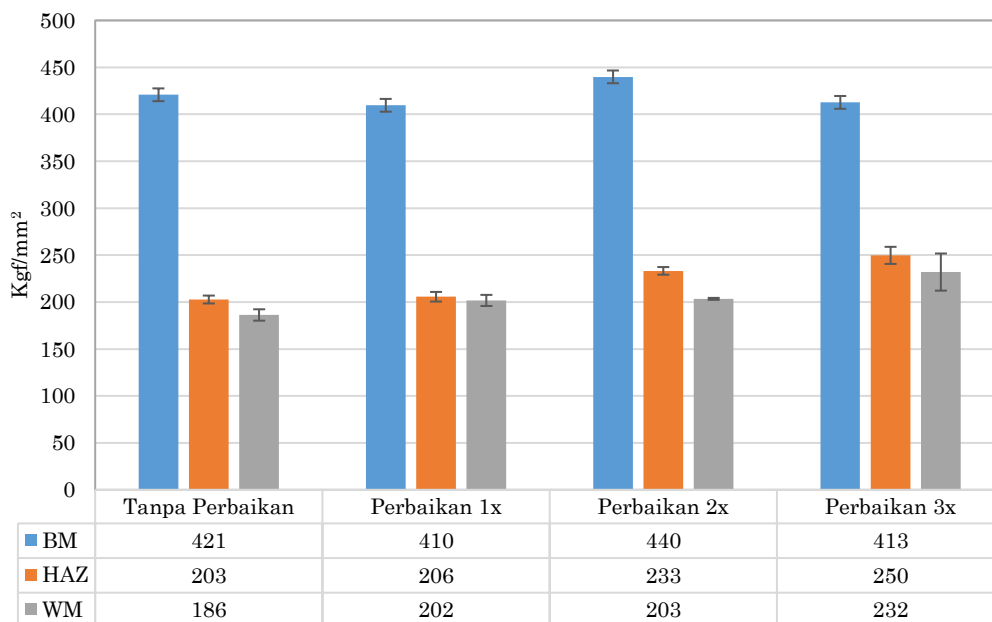


Gambar 5. Grafik perbandingan nilai kekerasan pada bagian atas

Pembahasan berikutnya akan difokuskan pada nilai kekerasan di daerah logam las. Pada bagian atas dan tengah spesimen, nilai kekerasan yang diperoleh cenderung stabil meskipun jumlah perbaikan bertambah. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh proses perbaikan yang secara berulang menggantikan bagian lasan lama dengan logam lasan baru. Namun, kondisi berbeda terlihat pada bagian bawah spesimen, di mana area tersebut terus-menerus terpapar panas tanpa penggantian logam lasan, sehingga terjadi akumulasi zona terpengaruh panas (HAZ) akibat setiap proses perbaikan las yang diaplikasikan pada benda kerja [16]. Akibatnya, nilai kekerasan pada area ini cenderung meningkat secara konstan seiring dengan bertambahnya jumlah perbaikan.



Gambar 6. Grafik perbandingan nilai kekerasan pada bagian tengah



Gambar 7. Grafik perbandingan nilai kekerasan pada bagian bawah

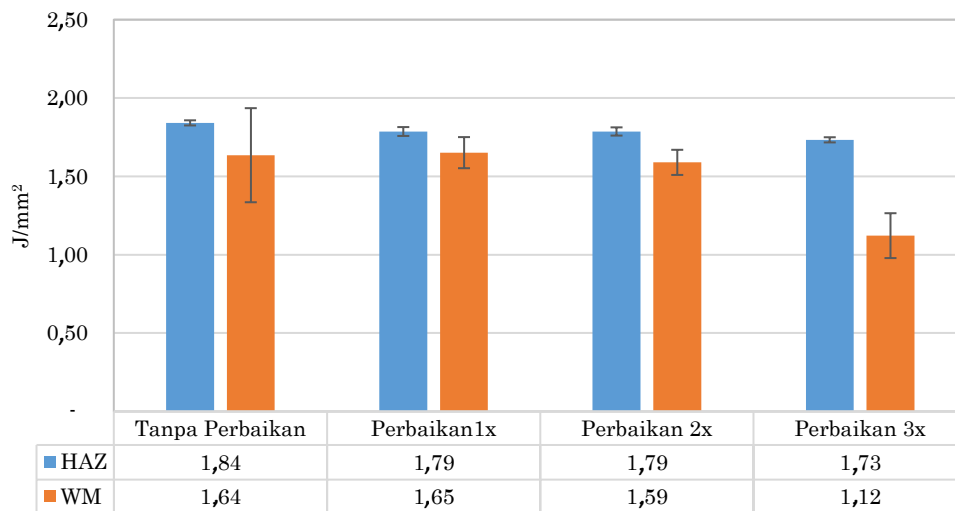
Hasil Pengujian Kekuatan Impak

Pengujian ketangguhan dilakukan dengan metode *Charpy* pada dua area hasil pengelasan, yaitu *base metal*, HAZ dan *weld metal*, masing-masing sebanyak tiga spesimen. Dari ketiga spesimen tersebut, diambil nilai rata-rata untuk analisis. Hasil rata-rata pengujian ketangguhan dapat dilihat pada Tabel 6. Nilai kekuatan impak yang diperoleh dari Tabel 6 akan digunakan untuk analisis lebih lanjut. Nilai-nilai tersebut kemudian disajikan dalam bentuk grafik perbandingan guna mempermudah proses analisis. Grafik perbandingan nilai *impact strength* pada area HAZ dan *weld metal* (WM) ditampilkan pada Gambar 8. Berdasarkan grafik perbandingan nilai ketangguhan (*impact strength*) di atas, hasil kekuatan tumbukan pada daerah HAZ dan logam las mengalami penurunan seiring bertambahnya jumlah perbaikan. Penurunan ini diduga disebabkan oleh peningkatan nilai *heat input* serta penumpukan zona terpengaruh panas (HAZ)

akibat proses perbaikan yang dilakukan berulang kali. Dengan bertambahnya jumlah perbaikan, terjadi penurunan signifikan dalam kemampuan material menyerap energi pada pengujian *impact* [17]. Selain itu, bertambahnya jumlah perbaikan menyebabkan peningkatan *heat input* yang masuk ke dalam material, sehingga proses perbaikan yang dilakukan berulang kali dapat menurunkan kekuatan dan ketangguhan material tersebut.

Tabel 6. Hasil pengujian kekuatan impact

<i>Base Metal</i>	Lokasi	$E_{teori}[J]$	Kekuatan impact [J/mm^2]
	<i>Base metal</i>		71,84
Tanpa Perbaikan	HAZ	141,69	1,84
	<i>Weld metal</i>	129,75	1,64
Perbaikan 1x	HAZ	144,20	1,79
	<i>Weld metal</i>	130,11	1,65
Perbaikan 2x	HAZ	140,54	1,79
	<i>Weld metal</i>	126,22	1,59
Perbaikan 3x	HAZ	140,14	1,73
	<i>Weld metal</i>	91,73	1,12

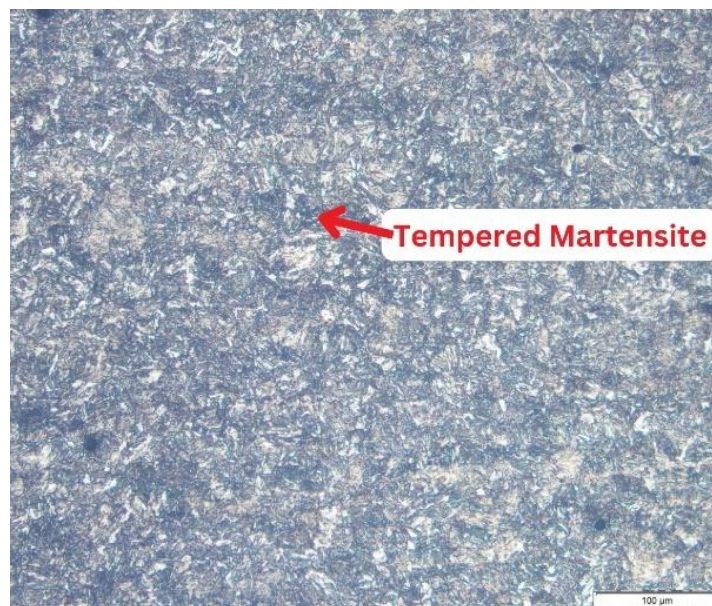


Gambar 8. Grafik perbandingan nilai ketangguhan

Dalam penelitian ini, nilai rata-rata *impact strength* di daerah HAZ terbukti lebih tinggi dibandingkan dengan *weld metal*, meskipun rata-rata nilai kekerasan di daerah HAZ juga lebih tinggi dari pada logam lasan. Dalam beberapa kasus, peningkatan nilai kekerasan tidak selalu berbanding terbalik dengan penurunan ketangguhan. Faktor lain yang harus dipertimbangkan adalah komposisi materialnya yang dapat memengaruhi hasil pengujian. *Impact strength* yang lebih tinggi di zona HAZ dipengaruhi oleh kandungan *nickel* yang cukup tinggi pada logam dasar, dapat dilihat pada Tabel 1-2. Sebaliknya, *Impact strength* yang lebih rendah pada logam las disebabkan oleh kadar *nickel* yang lebih sedikit dalam *filler metal* yang digunakan, sehingga menurunkan *Impact strength* di area tersebut [17]. Hal ini juga membuat *impact strength* logam las dapat mengalami penurunan yang lebih tinggi ketika melalui perbaikan 3 kali dibandingkan pada daerah HAZ. Penambahan kandungan *nickel* pada baja karbon meningkatkan *impact strength* dengan cara memperbaiki struktur mikro, mengurangi karbida rapuh, dan menstabilkan fasa austenit sehingga baja menjadi lebih tahan benturan dan tidak mudah retak pada kondisi beban kejutan [18]. Dapat disimpulkan bahwa baja karbon dengan kandungan *nickel* yang lebih tinggi akan memiliki ketangguhan lebih baik terhadap perlakuan perbaikan.

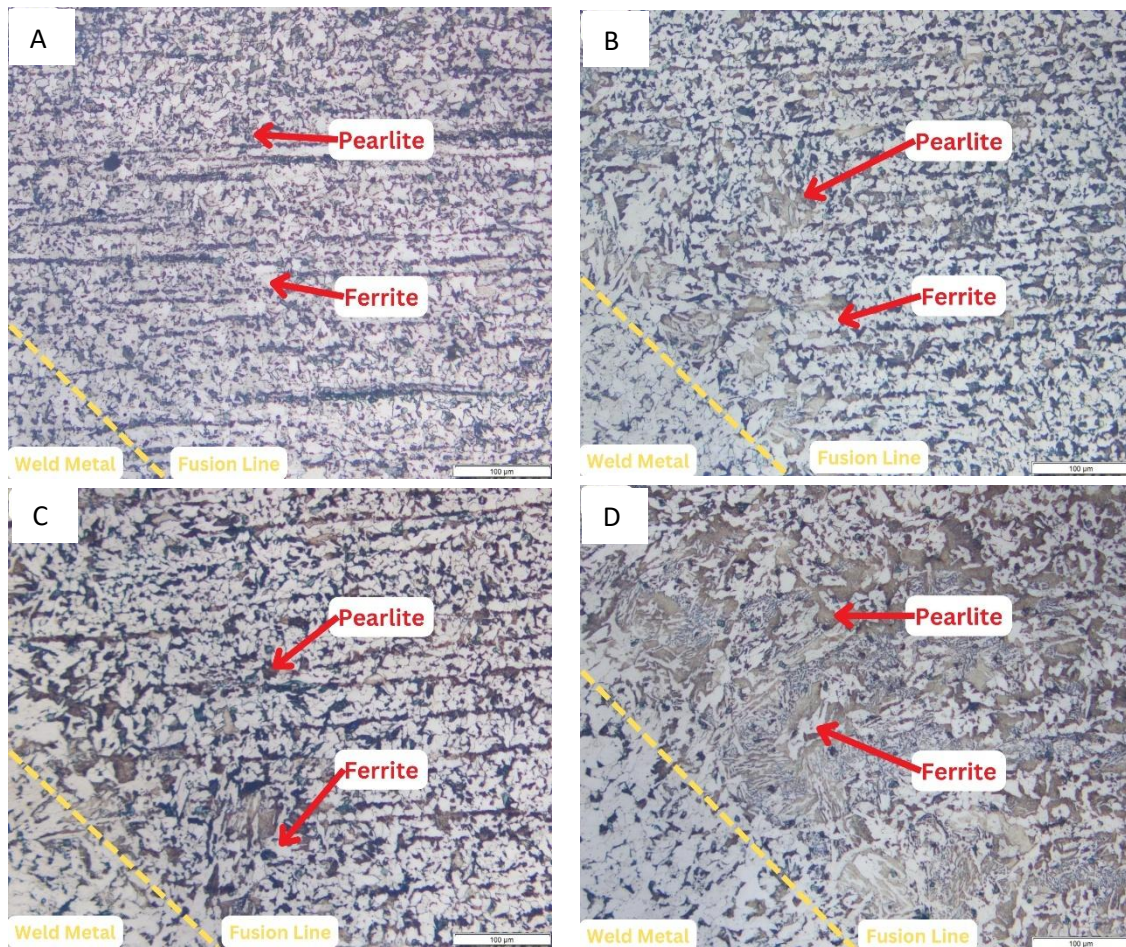
Hasil Uji Mikrostruktur

Hasil Pengujian mikrostruktur pada *raw material* baja tahan aus HARDOX 400 akan ditampilkan pada Gambar 9. Berdasarkan Gambar 8, hasil penelitian menunjukkan bahwa material HARDOX 400 terdiri dari struktur mikro *tempered martensite*. *Martensite* membentuk tingkat kekuatan tertinggi pada baja dibandingkan dengan semua struktur yang dihasilkan oleh perlakuan panas. Namun, karena tegangan internal yang besar akibat transformasi *martensite*, fase ini jarang digunakan dalam kondisi tanpa perlakuan tambahan. Proses *tempering* meningkatkan keuletan dan ketangguhan, yang penting untuk meningkatkan kemampuan material dalam menyerap energi benturan. Oleh karena itu, struktur *tempered martensite* juga memberikan kekuatan dinamis terbaik pada baja [19]. Selanjutnya adalah hasil pengujian mikrostruktur pada *heat affected zone* (HAZ) yang akan ditampilkan pada Gambar 10.



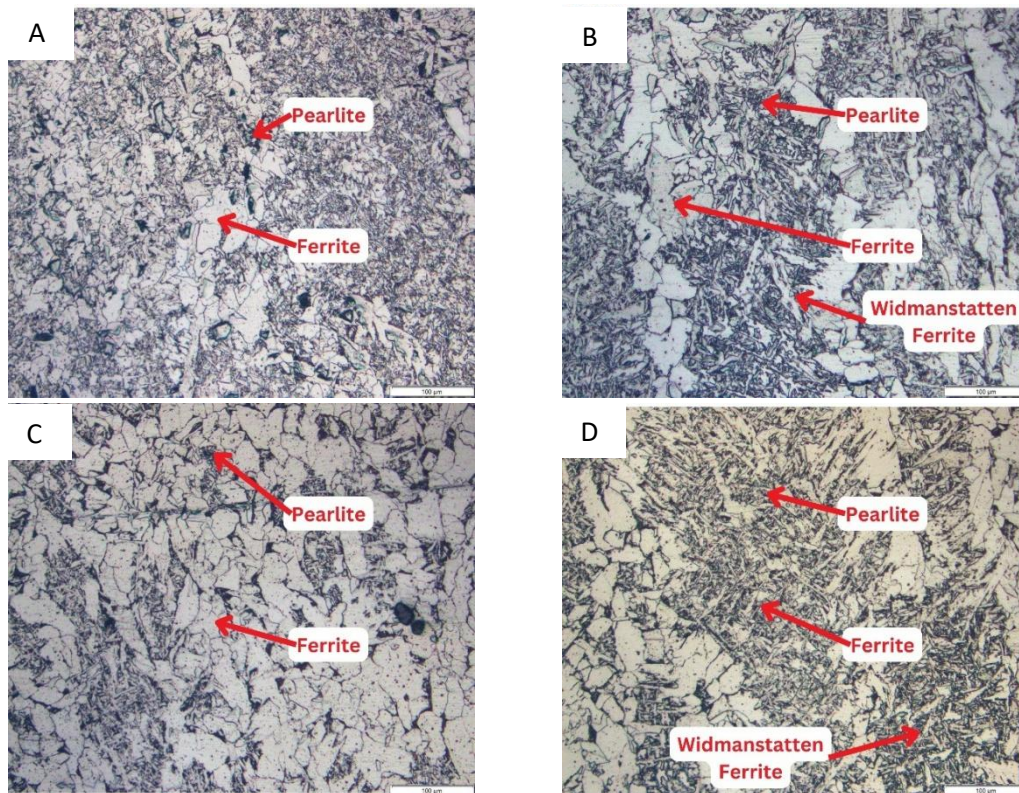
Gambar 9. Struktur mikro baja HARDOX 400

Gambar 10 menunjukkan struktur mikro pada daerah HAZ material HARDOX 400 dengan perlakuan tanpa perbaikan, perbaikan 1x, perbaikan 2x, dan perbaikan 3x. Pada hasil pengujian mikrostruktur di atas menunjukkan bahwa fasa yang terbentuk adalah *ferrite* dan *pearlite*. Struktur *pearlite* ditandai dengan warna gelap dan warna terang merupakan struktur *ferrite* [20]. Setiap variasi menunjukkan perbedaan struktur mikro, di mana seiring bertambahnya jumlah perbaikan, penyebaran struktur mikro yang terbentuk cenderung didominasi oleh fasa *pearlite*, *pearlite* memiliki nilai kekerasan lebih tinggi dibandingkan fasa *ferrite*, hal ini dapat menyebabkan meningkatnya nilai kekerasan dikarenakan fasa *pearlite* memiliki sifat mekanik yang lebih keras dan getas dari pada fasa *ferrite*. Semakin banyak jumlah perbaikan, dominasi *ferrite* akan semakin menurun, sehingga nilai kekerasan meningkat akibat karakter fasa *ferrite* yang lebih lunak dibandingkan *pearlite* [17]. Dalam prinsip pengelasan, daerah *heat affected zone* (HAZ) cenderung menerima masukan panas (*heat input*) yang lebih besar dibandingkan daerah lainnya yang menyebabkan struktur mikro di area tersebut mengalami perubahan. Pengelasan ulang pada area yang sama dapat memengaruhi pembentukan struktur mikro di zona HAZ. Proses perbaikan berulang ini cenderung memperbesar ukuran butir, khususnya pada spesimen dengan butir berukuran sedang, yang pada akhirnya dapat menurunkan ketangguhan material seiring meningkatnya jumlah perbaikan yang dilakukan [21]. Selanjutnya akan ditampilkan hasil uji struktur mikro pada daerah logam las bagian atas spesimen yang akan ditampilkan pada Gambar 11.

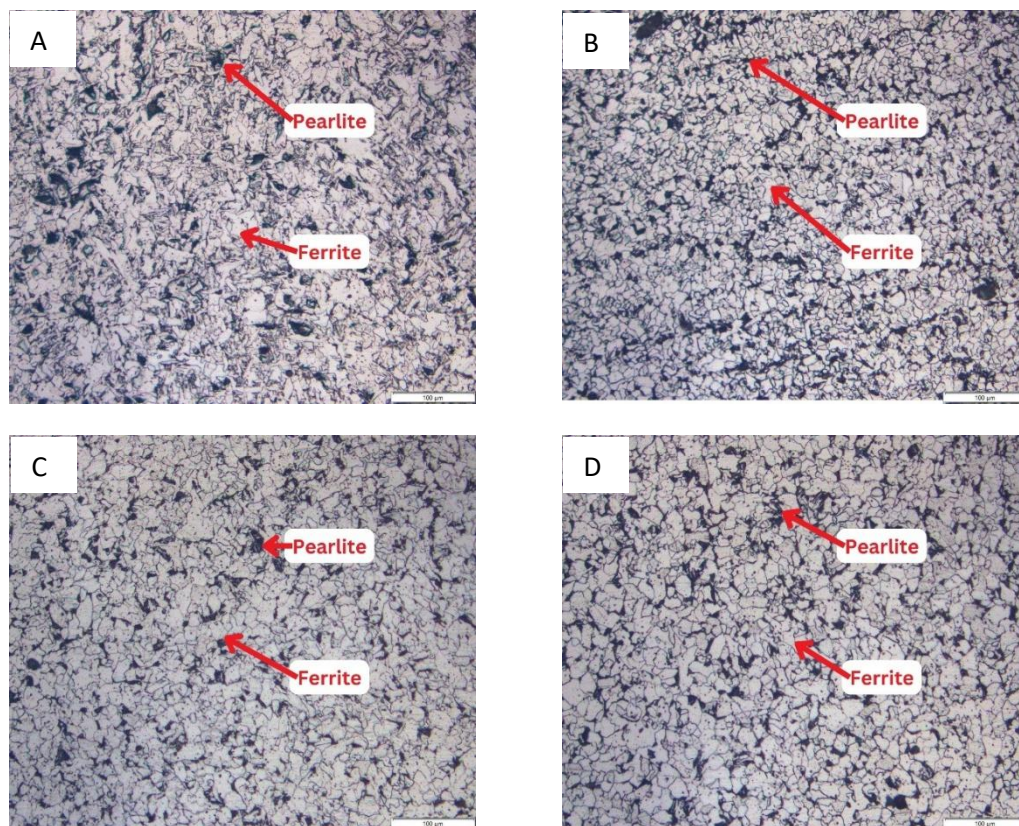


Gambar 10. Hasil pengujian *microstructure* pada HAZ HARDOX 400: A) tanpa perbaikan, B) 1x perbaikan, C). 2x perbaikan, D). 3x perbaikan

Hasil pengujian struktur mikro pada bagian atas logam las menunjukkan perbedaan yang relatif kecil antar spesimen. Pada tiap variasi fasa yang terbentuk adalah *ferrite* dan *pearlite*. Proses solidifikasi yang terjadi pada *weld metal* membentuk struktur dendritik akibat pendinginan logam las yang membeku. Arah pertumbuhan butir terlihat mengarah ke bagian tengah, seiring dengan pendinginan yang lebih dulu terjadi di bagian tepi, sementara bagian tengah membeku terakhir. Di area tepi, struktur dendritik tampak jelas dengan pola pertumbuhan menuju pusat, dan ukuran butir menjadi semakin halus ke arah tengah [16]. Pada spesimen D, penyebaran struktur mikro didominasi oleh fasa *pearlite*, yang berpotensi meningkatkan nilai kekerasan pada area tersebut. Dominasi *pearlite phase* ini diduga disebabkan oleh proses penggerindaan yang lebih luas, sehingga memperbesar area *groove* yang terkena proses perbaikan. Kondisi ini berdampak pada peningkatan volume deposit logam las dan luas permukaan *capping*. Permukaan yang lebih luas menyebabkan laju pendinginan menjadi lebih cepat, yang pada akhirnya menghasilkan nilai kekerasan yang lebih tinggi [22]. Selanjutnya adalah hasil pengujian mikrostruktur pada *weld metal* bagian tengah yang akan ditampilkan pada Gambar 12.

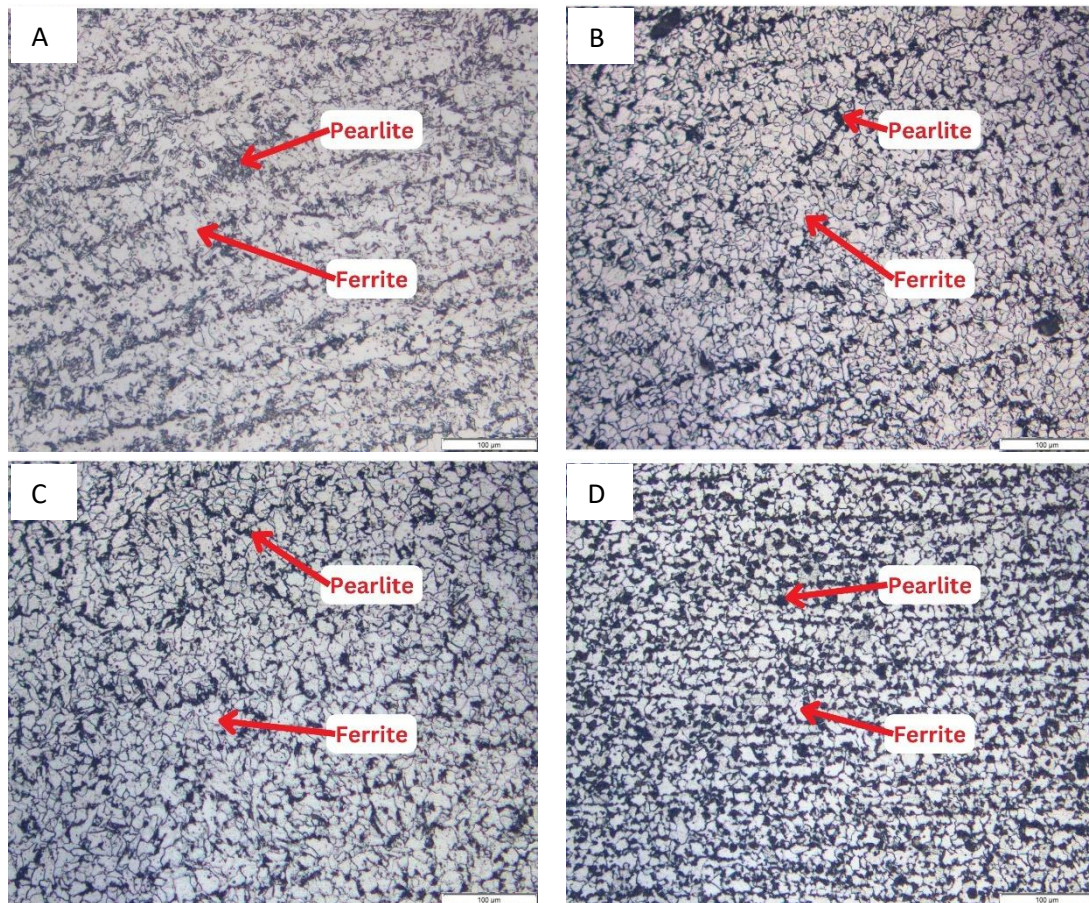


Gambar 11. Hasil pengujian *microstructure* pada logam las bagian atas: A) tanpa perbaikan, B) 1x perbaikan, C) 2x perbaikan, D) 3x perbaikan



Gambar 12. Hasil pengujian *microstructure* pada logam bagian tengah: A) tanpa perbaikan, B) 1x perbaikan, C) 2x perbaikan, D) 3x perbaikan

Berdasarkan hasil pengamatan mikrostruktur pada area logam las bagian tengah yang merupakan logam las baru hasil pengelasan setelah proses penggerindaan atau *repair*, terlihat bahwa fase yang terbentuk terdiri atas *ferrite* dan *pearlite*. Pada setiap variasi, area ini tidak menunjukkan perubahan struktur mikro yang terlalu jelas. Hal ini disebabkan oleh pembaruan terus-menerus oleh *weld metal* baru setiap proses penggerindaan atau perbaikan selesai dilakukan [23]. Selanjutnya akan ditampilkan hasil pengamatan mikrostruktur pada area *weld metal* bagian tengah pada Gambar 13.



Gambar 13. Hasil pengujian *microstructure* pada logam las bagian bawah: A) tanpa perbaikan, B). 1x perbaikan, C). 2x perbaikan, D). 3x perbaikan

Berdasarkan Gambar 13, hasil pengujian mikrostruktur pada logam las bagian bawah menunjukkan bahwa fase yang terbentuk adalah *ferrite* dan *pearlite*. Namun, Seiring dengan meningkatnya jumlah perbaikan (*repair*), fase *pearlite* menunjukkan dominasi penyebaran yang lebih tinggi, hal ini dapat diketahui berda lebih banyaknya fasa yang berwarna gelap pada area tersebut. Kasus pada area ini serupa dengan yang terjadi pada HAZ, di mana proses perbaikan dan pengelasan yang dilakukan secara berulang (*multiple repair*) memberi perubahan yang cukup besar terhadap struktur mikro di daerah *weld metal* lama. Perubahan tersebut disebabkan oleh peningkatan nilai *heat input* selama proses perbaikan, yang menghasilkan struktur mikro yang berbeda dibandingkan dengan hasil pengelasan tanpa perbaikan [17].

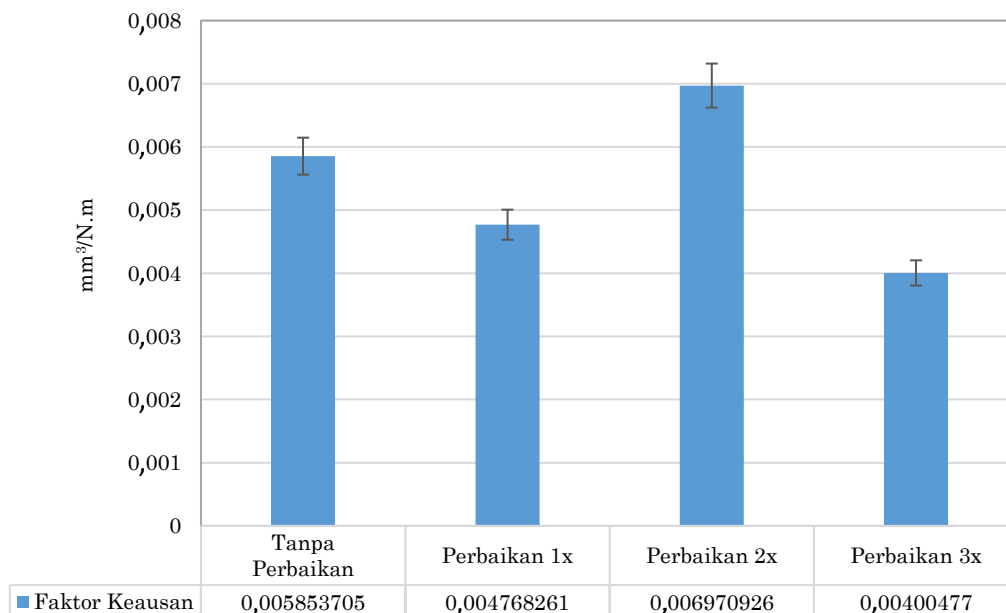
Hasil Pengujian Ketahanan Aus

Hasil dari perhitungan ketahanan aus pada setiap spesimen, yang dibuat dengan variasi jumlah perbaikan pengelasan akan ditampilkan pada Tabel 7 dan Gambar 14. Berdasarkan grafik perbandingan faktor keausan diatas, nilai faktor keausan tertinggi terjadi pada spesimen dengan dua kali perbaikan, sedangkan nilai terendah terdapat pada spesimen dengan tiga kali perbaikan. Kondisi pada dua kali perbaikan disebabkan oleh penyebaran fasa *pearlite* yang relatif lebih sedikit dibandingkan variabel lainnya, sehingga kekerasan pada area atas material mengalami penurunan. Penurunan kekerasan ini juga dapat dipengaruhi oleh proses penggerindaan yang

kurang merata, sehingga sudut kampuh menjadi lebih sempit dari kondisi normal yang menyebabkan *cooling rate* dari area tersebut lebih rendah karena area yang terpapar udara menjadi lebih kecil. Pada variabel perbaikan tiga kali, penggerindaan yang lebih lebar menyebabkan area permukaan las yang terkena proses pengelasan menjadi lebih luas. Kondisi ini berdampak pada meningkatnya volume deposit las serta luas permukaan capping. Luas permukaan yang lebih besar mempercepat laju pendinginan, sehingga menghasilkan nilai kekerasan yang lebih tinggi [22]. Semakin tinggi nilai kekerasan suatu material, maka faktor keausan yang dihasilkan akan semakin rendah [24]. Tentu kondisi ini diakibatkan oleh teknik penggerindaan dan metode *repair* yang dilakukan, dan dapat disimpulkan bahwasannya proses perbaikan tidak memiliki efek yang berarti dengan faktor keausan pada area *capping weld metal* dikarenakan pada area ini terus mengalami pembaruan hasil pengelasan.

Tabel 7. Hasil pengujian ketahanan aus

Spesimen	Mass awal	Massa akhir	Mass keausan	Volume keausan	Faktor keausan
	[g]			[mm ³]	[mm ³ /N.m]
Tanpa Perbaikan	39,06	38,36	0,70	89,17	0,005853705
Perbaikan 1x	39,78	39,21	0,57	72,64	0,004768261
Perbaikan 2x	36,24	35,41	0,83	106,19	0,006970926
Perbaikan 3x	38,44	37,96	0,48	61,00	0,004004770



Gambar 14. Perbandingan faktor keausan

KESIMPULAN

Hasil uji kekerasan pada pengelasan material HARDOX 400 yang telah mengalami proses *multi repair* adalah nilai kekerasan di daerah HAZ dan *weld metal* menunjukkan pola yang berbeda. Pada daerah HAZ, terjadi peningkatan kekerasan yang cukup jelas seiring bertambahnya jumlah *repair*, dengan nilai tertinggi mencapai 249,76 kgf/mm² pada *repair* tiga kali di bagian bawah spesimen dan terendah 193,65 kgf/mm² pada kondisi tanpa *repair* di bagian tengah tengah. Sementara itu, di daerah *weld metal* peningkatan kekerasan hanya terjadi di bagian bawah spesimen dengan nilai puncak 231,98 kgf/mm² pada *repair* tiga kali, sedangkan area tengah spesimen menunjukkan nilai terendah 182,70 kgf/mm² pada *repair* dua kali.

Hasil uji ketangguhan pada pengelasan material HARDOX 400 yang telah mengalami proses *multi repair* adalah semakin banyak proses *repair* yang dilakukan, maka nilai ketangguhan material cenderung mengalami penurunan. Pada daerah HAZ, diperoleh bahwa nilai *impact strength* tertinggi terdapat pada variasi no *repair* adalah sebesar 1,84 J/mm², sedangkan nilai

terendah terdapat pada variasi *repair* tiga kali adalah 1,73 J/mm². Pada daerah *weld metal*, nilai *impact strength* tertinggi diperoleh pada variasi *repair* satu kali tercatat sebesar 1,65 J/mm², sedangkan nilai terendah ditemukan pada variasi *repair* tiga kali sebesar 1,12 J/mm². Apabila dilihat dari nilai *impact strength* pada base material HARDOX 400 yaitu sebesar 0,90 J/mm², maka hasil perbaikan hingga 3 kali masih dibawah batas aman material. Pada pengujian mikrostruktur jumlah *repair* menyebabkan dominasi penyebaran fasa *pearlite* di daerah HAZ dan bagian bawah *weld metal* yang disebabkan paparan panas berulang, sementara bagian atas dan tengah *weld metal* hanya mengalami sedikit perubahan. Hasil uji keausan pada pengelasan material HARDOX 400 yang telah mengalami proses *multi repair* adalah nilai ketahanan aus tertinggi terdapat pada variasi *repair* tiga kali sebesar 0,004004770 mm³/N·m, sedangkan nilai terendah terdapat pada variasi *repair* dua kali sebesar 0,006970926 mm³/N·m.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L.S. Ramadani, "Kajian teknis produktifitas stone crusher terhadap target produksi pt. sinarbali binakarya, desa mujur kecamatan praya timur kabupaten Lombok Tengah," *Repository.Ummat.Ac.Id*, 2021, [Daring]. Tersedia pada: <https://repository.ummat.ac.id/662/1/nush> PDF 1.pdf
- [2] B.P. Najamudin, "Peningkatan kualitas kekuatan bahan plat dinding corong tuang (hopper) melalui proses chromizing untuk meningkatkan jumlah produksi batu bara," 2016.
- [3] M. Alhassan dan Y. Bashiru, "Carbon equivalent fundamentals in evaluating the weldability of microalloy and low alloy steels," *World J. Eng. Technol.*, vol. 09, no. 04, hal. 782–792, 2021, doi: 10.4236/wjet.2021.94054.
- [4] D.U. Produk, "Hardox® 400," vol. 43, 2023, [Daring]. Tersedia pada: https://www.ssab.com/api/download?file=/api/sitecore/Datasheet/Get?key=a97fbc613fa848258076c4eb0e8acf7b_id-id&_gl=1*117v0i0*_up*MQ..*_gs*MQ..&gclid=EAIAIQobChMIu96HuZimkAMVVKRmAh1Yqyd1EAAAYAiAAEgJHhPD_BwE&gbraid=0AAAAApD_yEdmNDhzb-a1xxZqe7m4gWYUe
- [5] A.P. Silva, T. Węgrzyn, T. Szymczak, B. Szczucka-Lasota, dan 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.
- [6] S. Frydman, Konat, dan G. Pekalski, "Structure and hardness changes in welded joints of Hardox steels," *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 8, no. 4, hal. 15–27, 2008, doi: 10.1016/s1644-9665(12)60118-6.
- [7] C.B. Makmur, "Plat Tahan Aus Hardox: Penjelasan Mendalam," CV Baja Makmur. Diakses: 12 Agustus 2015. [Daring]. Tersedia pada: <https://bajamakmur.co.id/pelat-tahan-aus-hardox-penjelasan-mendalam/>
- [8] bumiteknik, "Pengertian Pengelasan FCAW Flux Core Arc Welding," bumiteknik. Diakses: 15 Juli 2025. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.bumi.info/pengertian-pengelasan-fcaw-flux-core-arc-welding/>
- [9] Hardox, "Welding of Hardox®," 2023, [Daring]. Tersedia pada: ssab.com/support/steel-handbooks
- [10] M.M. Munir, ST., M. M. Thoriq Wahyudi, ST., M. Hendri Budi Kurniyanto, S.ST., dan M. Dika Anggara, S.ST., *Modul Praktik DT NDT*, no. April. 2019. [Daring]. Tersedia pada: <http://eprints.stikes-aisyiyah.ac.id/773/1/28>. Modul Praktik Komunitas.pdf
- [11] A.R.L. Francisco, "Pengujian impact," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, hal. 1–20, 2016, [Daring]. Tersedia pada: https://repositori.uma.ac.id/bitstream/123456789/119/5/11.813.0011_file5.pdf
- [12] A. Saputra, "Pengujian Struktur Mikro," Scribd. Diakses: 12 Agustus 2025. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.scribd.com/document/436063982/pengujian-struktur-mikro>
- [13] M.A. Athif, "Uji kuat tekan dan keausan bahan kampas rem dari komposisi tempurung kemiri dan serat bambu," *JFT J. Fis. dan Ter.*, vol. 5, no. 1, hal. 29–38, 2018, [Daring]. Tersedia pada: <http://journal.uin-alauddin.ac.id/index.php/jft/article/view/15930>

- [14] I. ASTM, "Astm-G132," *Int. ASTM*, no. 1, hal. 1–8, 2017, [Daring]. Tersedia pada: <https://www.scribd.com/document/366051315/Norma-Abrasion-G132>
- [15] M.T. Wahyudi, M.S. Amri, M. Ari, dan F. Hamzah, "Analisis variasi multiple repair pengelasan FCAW Material HSLA SM490YA," vol. 13, no. 2, 2023.
- [16] D. O. TJAHAJANTO, "Analisa pengaruh multiple repair welding pada material properties weld joint material gs-32 pada aplikasi komponen alat berat Idler PC3000," vol. 11, no. 1, hal. 92–105, 2017.
- [17] 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, hal. 15–22, 2022.
- [18] M.R. Afandi dan A. Akbar, "Pengaruh variasi kadar karbon baja terhadap kekuatan tarik," vol. 9, hal. 942–947.
- [19] P.K. Jena *dkk.*, "Effect of heat treatment on mechanical and ballistic properties of a high strength armour steel," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 37, no. 3, hal. 242–249, 2010, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2009.09.003.
- [20] C.A.I. Handbook, "ASM Metals Handbook, Volume 09 Metallography and Microstructures Handbook," *ASM Int.*, vol. 9, hal. 2733, 2005, [Daring]. Tersedia pada: <http://www.worldcat.org/oclc/42469467>
- [21] O.E. Vega, J.M. Hallen, A. Villagomez, dan A. Contreras, "Effect of multiple repairs in girth welds of pipelines on the mechanical properties," *Mater. Charact.*, vol. 59, no. 10, hal. 1498–1507, 2008, doi: 10.1016/j.matchar.2008.01.011.
- [22] R. Ramadani, H. Pratikno, dan M.Z. Yuliadi, "Analisa pengaruh variasi sudut bevel akibat kombinasi pengelasan FCAQ dan SMAW terhadap kekuatan impact butt joint pada Spesimen pipa api 5l Grade X42," *J. Tek. ITS*, vol. 5, no. 2, 2017, doi: 10.12962/j23373539.v5i2.18650.
- [23] N. CheLah dan M.H. Hussin, "Repeated Weld repair and its influence on welded carbon steel," *Int. J. Eng. Adv. Technol.*, vol. 9, no. 3, hal. 714–722, 2020, doi: 10.35940/ijeat.b3234.029320.
- [24] A. Wijaya, "52586-Article Text-105596-1-10-20230606," *Anal. Kekerasan Dan Ketahanan Aus Baja AISI 1045 Akibat Heat Treat. Untuk Apl. Sprocket Gear*, vol. 11, hal. 75–80, 2023.