

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS BUNG HATTA

EXECUTIVE SUMMARY

Reg No: 01/SKRIPSI/TM/FTI/III-2026

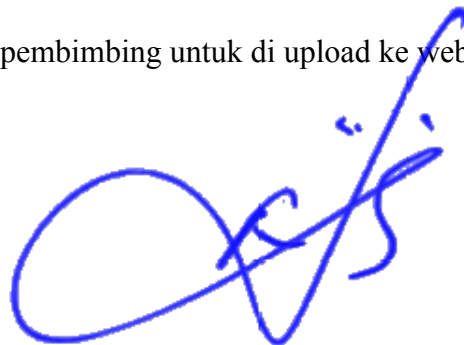
Nama : Apriansyah Sutan Hasibuan

NPM : 2410017211119

Program Studi : Teknik Mesin

Judul Skripsi : Analisis Crack Yang Terjadi Pada Sambungan Pengelasan Back
Gouging Pada Boom Structure Dengan Inspeksi Magnetic Particle
Test

Telah dikonsultasikan dan disetujui oleh pembimbing untuk di upload ke website.



Ir. Kaidir, M.Eng., IPM. (Pembimbing)

ANALISIS CRACK YANG TERJADI PADA SAMBUNGAN PENGELASAN BACK GOUGING PADA BOOM STRUCTURE DENGAN INSPEKSI MAGNETIC PARTICLE TEST

Apriansyah Sutan Hasibuan¹

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Bung Hatta, Padang
Jl. Sumatera Ulak Karang Padang, Sumatera Barat, Indonesia 25133

Email: apriansyahhasibuan@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini berfokus pada analisis kegagalan retakan Heat Affected Zone Crack (Haz Crack) yang terjadi pada sambungan pengelasan back gouging pada Boom Structure Excavator Hydraulic Mining Shovel 6015. Berdasarkan hasil inspeksi lapangan, ditemukan indikasi retakan linier pada daerah HAZ setelah proses back gouging yang berdampak pada penurunan integritas sambungan las, risiko kebocoran sistem hidrolik, serta potensi kegagalan struktural. Tujuan penelitian adalah mengidentifikasi penyebab terbentuknya Haz Crack, mengevaluasi kualitas preparasi kampuh setelah proses CAC-A (Air Carbon Arc Gouging), serta menilai efektivitas Magnetic Particle Inspection (MPI) tipe wet fluorescent (ASTM E1444) untuk deteksi cacat sebelum pengelasan ulang. Metode meliputi observasi visual, pengujian MPI, dan macro etching untuk menilai kualitas fusi logam induk-las. Selain itu dianalisis parameter GMAW (arus, tegangan, travel speed, heat input) dan kebersihan kampuh. Hasil menunjukkan sebagian besar retakan berasal dari HAZ akibat pendinginan cepat, transformasi mikrostruktur menjadi martensit getas, serta hidrogen terperangkap. Konsistensi proses back gouging memengaruhi terbentuknya notch tajam yang mempercepat inisiasi retak. Kesimpulannya, mikrostruktur HAZ yang rapuh, tegangan sisa tinggi, dan prosedur gouging yang tidak optimal merupakan faktor dominan. Rekomendasi: kontrol ketat parameter GMAW, penerapan preheat, standar kebersihan kampuh yang lebih tinggi, serta inspeksi MPI wajib sebelum pengelasan ulang.

Kata Kunci: HAZ Crack; Back Gouging; Magnetic Particle Inspection; Macro Etching; Boom Structure; Heat Affected Zone; Gas Metal Arc Welding

ABSTRACT

This study analyzes the failure of Heat Affected Zone (HAZ) cracking occurring on the welded joint of the Boom Structure 6015 after the back gouging process. Field inspection revealed linear cracks around the HAZ, reducing weld integrity, increasing the risk of hydraulic leakage, and potentially triggering structural failure. The objectives were to identify the root causes of HAZ cracking, evaluate groove preparation quality after Air Carbon Arc Gouging (CAC-A), and assess the effectiveness of wet fluorescent Magnetic Particle Inspection (MPI) per ASTM E1444 before re-welding. Methods included visual inspection, MPI, and macro etching to examine fusion quality between base and weld metal. Welding parameters in GMAW (current, voltage, travel speed, heat input) and groove cleanliness were also analyzed. Results indicate most cracks originated from the

HAZ due to rapid cooling, brittle martensitic transformation, and hydrogen entrapment. Inconsistent gouging produced rough grooves and sharp notches that accelerated crack initiation. Conclusions highlight brittle HAZ microstructure, high residual stress, and non-optimal gouging as dominant factors. Recommendations include strict GMAW control, implementation of preheating, enhanced groove cleaning, and mandatory MPI prior to re-welding.

Keywords: HAZ Crack; Back Gouging; Magnetic Particle Inspection; Macro Etching; Boom Structure; Gas Metal Arc Welding

PENDAHULUAN

Boom structure merupakan komponen utama pada Hydraulic Mining Shovel Excavator 6015 yang menerima beban kerja berulang, tekanan dinamis, dan kondisi lingkungan ekstrem. Pada area sambungan bawah (bottom weld joint), kerusakan kerap terjadi, khususnya berupa retakan pada Heat Affected Zone (HAZ) setelah proses back gouging.

Kualitas pengelasan pada *boom* sangat dituntut untuk memenuhi aspek keamanan dan kekuatan pada saat *Hydraulic Mining Shovel* mengalami pergerakan. Kualitas pengelasan *back gouging* pada *boom* sangat perlu diperhatikan karena akan mempengaruhi kekuatan dan ketahanan *boom* pada area yang *critical* terutama pada *bottom area boom*. Proses *back gouging* sangat perlu diperhatikan karena fusi dari kedua *joint* yang dipertemukan harus benar benar bersih dan tidak ada kotoran maupun *welding defect* dari proses *root* pengelasan sebelumnya, dengan cara melakukan penambahan inspeksi yaitu *Magnetic Particle Test*.

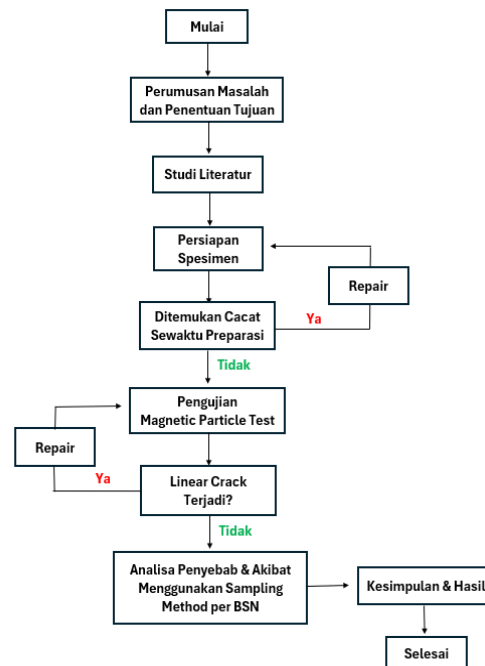
Retakan HAZ menurunkan integritas sambungan las, berpotensi menimbulkan kebocoran fluida hidrolik dan kegagalan struktural yang mengganggu operasi. Fenomena ini sering dipicu oleh kombinasi pendinginan cepat (fast cooling), tegangan sisa tinggi, perubahan mikrostruktur menjadi martensit yang getas, hidrogen terperangkap, serta kualitas preparasi gouging yang kurang optimal.

Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi faktor penyebab terbentuknya Haz Crack pasca CAC-A (Air Carbon Arc Gouging), mengevaluasi kualitas preparasi kampuh, dan menilai efektivitas inspeksi non-destruktif MPI dalam mendeteksi diskontinuitas sebelum pengelasan ulang. Secara praktis, hasilnya diharapkan menjadi dasar perbaikan prosedur pengelasan agar risiko kegagalan berulang dan downtime dapat ditekan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan kajian mendalam mengenai perbedaan kualitas hasil preparasi *back gouging* sebelum pengelasan ulang, dengan memanfaatkan metode inspeksi non-destruktif *Magnetic Particle Test* (MPI). Selain itu, penelitian ini juga diarahkan untuk mengidentifikasi potensi retakan (*crack*) yang mungkin terjadi setelah proses *back gouging*, sehingga dapat dideteksi secara dini melalui MPI. Deteksi dini ini diharapkan mampu meminimalkan cacat (*defect*) yang berpotensi muncul pada tahap pengujian lanjutan, khususnya *Ultrasonic Testing* (UT), sehingga kualitas sambungan las dapat terjaga dan risiko kegagalan struktural dapat ditekan. Dengan pendekatan ini, penelitian diharapkan memberikan kontribusi terhadap pengembangan prosedur pengelasan yang lebih aman, efisien, dan sesuai standar industri, serta mendukung peningkatan keandalan komponen dalam aplikasi nyata. Jenis penelitian adalah

studi kasus eksperimental pada Bottom Boom 6015 Structure di workshop PT. X. Objek yang dikaji adalah sambungan las area HAZ setelah preparasi CAC-A (Air Carbon Arc Gouging).



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

Tahapan penelitian: (1) pengumpulan data awal; (2) preparasi sampel dengan back gouging dan grinding; (3) pengujian—observasi visual, Magnetic Particle Inspection (MPI) tipe wet fluorescent mengacu ASTM E1444, serta macro etching; (4) analisis data korelatif.

Peralatan utama yang digunakan meliputi mesin las GMAW (Miller Dimension NT 500) dengan filler ER70S-6, portable yoke DA400 untuk MPI, white contrast paint & magnetic ink, carbon gouging rod, serta perlengkapan gerinda tangan. Ada beberapa parameter spesifik pada pengelasan GMAW yang dianalisis meliputi arus, tegangan, travel speed, heat input, dan wire speed.

Jumlah sampel lapangan terdiri dari beberapa body structure (terdapat BSN 263–268); hasil MPI diklasifikasi (linear/rounded indication) dan dibandingkan terhadap WPS serta hasil macro etching untuk memvalidasi lokasi dan sifat cacat. Berdasarkan korelasi data, mengidentifikasi faktor yang memengaruhi munculnya retakan setelah back gouging.

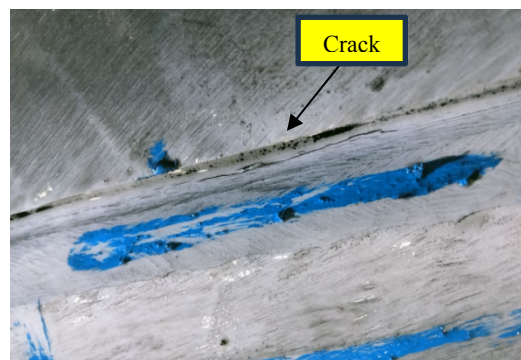
Analisis data nantinya digunakan dengan cara menggabungkan hasil inspeksi MPI dengan observasi visual untuk membentuk basis data kualitas preparasi. Data ini menjadi acuan untuk menentukan kelayakan pengelasan ulang juga untuk menyusun rekomendasi prosedur pengelasan ulang dan inspeksi untuk meminimalkan cacat sebelum *Ultrasonic Testing*, Meningkatkan keandalan sambungan las dan mengurangi biaya *rework* dan *downtime* produksi.

HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 2. Retakan Yang Terjadi Pada Back Gouging

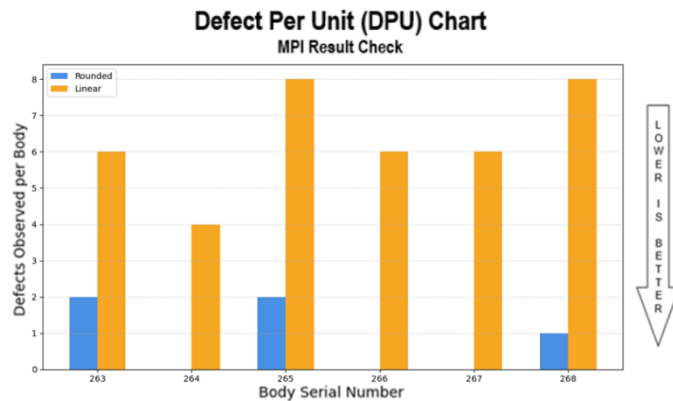
Secara keseluruhan observasi visual, terlihat pada Gambar 2 memperlihatkan retakan tampak terjadi mengikuti garis arah alur las dan berada tepat di daerah *Heat Affected Zone* (HAZ), yaitu zona kritis yang mengalami perubahan mikrostruktur akibat paparan panas pengelasan dan juga panas berlebih yang terjadi karna proses *back gouging*. Pola retakan yang sejajar dengan garis las menunjukkan bahwa proses inisiasi terjadi pada area dengan konsentrasi tegangan tinggi, di mana material mengalami penurunan ketangguhan akibat transformasi mikrostruktur. Pola retakan tersebut merupakan karakteristik khas *HAZ Crack*, yang sering dijadikan indikator utama dalam analisis kegagalan sambungan las karena mencerminkan interaksi kompleks antara faktor termal, mekanis, dan metalurgi. Observasi visual menunjukkan retakan linier dominan di HAZ, terutama pada garis fusi (fusion line) di area bottom weld joint. Pada beberapa lokasi terlihat jejak gouging yang kasar membentuk takik (notch) tajam yang berpotensi menjadi inisiator retak.



Gambar 3. Hasil Magnetic Particle Inspection

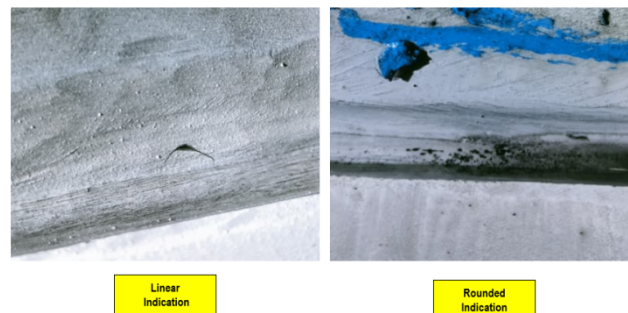
Hasil pengujian Magnetic Particle Inspection (MPI) yang ditunjukkan pada Gambar 3 menunjukkan adanya ketidakteraturan pola medan magnet pada permukaan. Distorsi pola partikel magnet tersebut merupakan tanda adanya gangguan kontinuitas material, sehingga menunjukkan bahwa retakan tidak hanya berada di permukaan, tetapi telah berkembang hingga mencapai area sub-permukaan. Ketidakkontinuan ini menyebabkan fluks magnet tidak mengalir secara merata, sehingga membentuk pola indikasi yang lebar dan kuat pada area yang mengalami kerusakan.

Keberadaan retakan sub-permukaan memiliki implikasi penting terhadap integritas struktural komponen. Pada *Boom Structure*, kerusakan semacam ini berpotensi melemahkan kemampuan komponen dalam menahan tekanan kerja internal, sehingga meningkatkan risiko terjadinya kebocoran fluida maupun kegagalan operasional dalam jangka panjang. Oleh karena itu, indikasi yang diperoleh dari pengujian MPI ini menjadi dasar penting dalam analisis kegagalan, serta menegaskan perlunya evaluasi lebih lanjut dan tindakan korektif untuk mencegah terjadinya kerusakan lanjutan.



Gambar 4. Defect Per Unit Chart

Dapat terlihat pada *Defect Per Unit (DPU) Chart* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4 mengindikasikan bahwa pada beberapa sampel *Body Serial Number* dari *Boom Structure* terdapat beberapa macam cacat yang terjadi dan muncul pada *structure* yang berbeda. Ada dua macam cacat atau *defect* yang terjadi setelah proses MPI dilakukan yaitu *rounded indication* dan juga *linear indication*. Pada beberapa sampel yang diambil sebagai bahan penelitian didapatkan bahwa *Body Serial Number* 265 ditetapkan sebagai *highest rate of defect*. Hasil memperlihatkan bahwa pada 6 sampel yang dijadikan bahan penelitian defect linear indication lebih sering terjadi pada setiap sampel.



Gambar 5. Linear Indication & Rounded Indication

Pengujian MPI (wet fluorescent, ASTM E1444) mengindikasikan linear indication sebagai cacat dominan walaupun rounded indication juga ditemukan. Defect Per Unit (DPU) tertinggi tercatat pada *Body Serial Number* (BSN) 265; BSN 268 juga menunjukkan tren serupa. Hasil ini menegaskan efektivitas MPI untuk penyaringan cacat sebelum re-welding.

Analisis parameter proses memperlihatkan deviasi travel speed aktual terhadap WPS (misalnya sampel BSN 265/268 > 6,8 mm/s) sehingga heat input menurun, penetrasi dangkal, laju pendinginan meningkat, dan risiko pembentukan martensit getas di HAZ naik. Faktor lain seperti hidrogen terperangkap dan tegangan sisa turut memperparah kondisi.

Secara mekanistik, kombinasi heat input rendah + fast cooling + notch tajam akibat gouging yang tidak konsisten mendorong inisiasi dan propagasi retak pada HAZ. Implementasi kontrol proses yang disiplin diharapkan menurunkan probabilitas crack berulang.

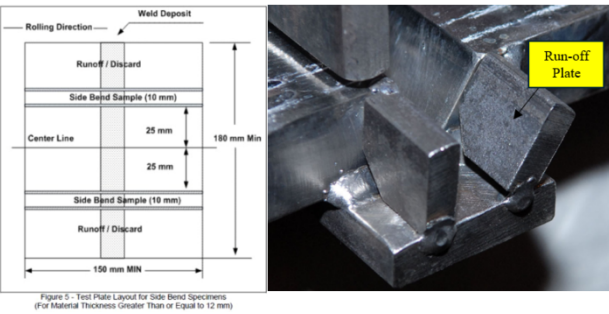
Tabel 1. WPS dan Actual Parameter Pada Setiap Sampel

No	WPS	#263	#264	#265	#266	#267	#268
Filler Wire	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32
Current	190-310	195-307	190-311	176-305	196-312	205-312	199-297
Voltage	22-32	21-30	22-33	18-35	22-30	24-30	26-30
Polarity	DC +	DC +	DC +	DC +	DC +	DC +	DC +
Wire Speed	6.5-8.5	7.0-8.8	7.2-7.9	7.3-81	7.4-85	6.9-8	7.1-8.4
Travel Speed	3.3-6.8	4.2-6.6	4.6-7	5.5-8.2	4.1-6.7	4.5-7.1	5.1-8.1
Heat Input	0.5-1.4	0.7-1.0	0.7-1.2	0.2-0.8	0.6-1.3	0.7-1.3	0.3-1.1
Position	1G	1G	1G	1G	1G	1G	1G

Dapat terlihat berdasarkan perbandingan parameter pengelasan antara *Welding Procedure Specification* (WPS) dan nilai aktual pada setiap sampel (Tabel 1), terlihat bahwa *Body Serial Number* 265 dan *Body Serial Number* 268 memiliki *travel speed* yang berada pada ambang batas atas bahkan melampaui rentang yang direkomendasikan. Pada *Body Serial Number* 265, *travel speed* tercatat sebesar 5.5–8.2 mm/s, sedangkan pada *Body Serial Number* 268 mencapai 5.1–8.1 mm/s, di mana nilai tersebut berada di atas batas maksimum WPS yaitu 6.8 mm/s.

Travel speed yang terlalu tinggi menyebabkan penurunan *heat input*, sehingga proses peleburan tidak berlangsung optimal dan menghasilkan penetrasi yang dangkal serta pendinginan yang lebih cepat. Kondisi ini dapat memicu pembentukan struktur mikro yang lebih getas, terutama pada zona HAZ, sehingga meningkatkan kerentanan terhadap inisiasi dan propagasi retakan

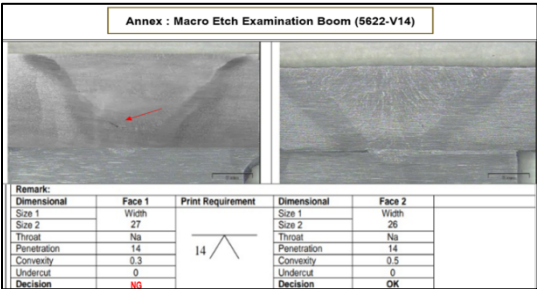
Hal ini sejalan dengan hasil pengujian MPI, di mana *Body Serial Number* 265 dan 268 menunjukkan jumlah indikasi retakan yang lebih tinggi dibandingkan sampel lainnya. Dan juga beberapa hasil *visual welding inspection* yang terlihat jelas pada Gambar 4.5 memperlihatkan beberapa cacat pengelasan yang terjadi seperti porositas, lack of fusion dan juga crack yang mana ini merupakan korelasi jika standard pengelasan tidak diikuti sesuai prosedur yang ditetapkan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa *travel speed* yang melebihi standar WPS memiliki kontribusi signifikan terhadap munculnya cacat retak pada kedua body tersebut, melalui mekanisme penurunan heat input dan peningkatan kegetasan material pada area pengelasan



Gambar 6. Layout Macro Etching

Pada penelitian ini, sampel *macro* diambil berdasarkan tata letak sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6. *Layout* tersebut mengacu pada standar pengambilan spesimen uji untuk material dengan ketebalan diatas 12 mm, di mana pemotongan *run-off plate* dilakukan terlebih dahulu setelah dilakukan proses *full weld* atau pengelasan penuh pada sambungan pengelasan. Area *run-off plate* dibuang untuk digunakan sebagai penstabil proses pemotongan agar hasil makro dapat menggambarkan kondisi sesungguhnya dari sambungan las.

Melalui hasil *macro etching*, diperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai kontinuitas metalurgi pada sambungan las. Karakteristik seperti ketidaksempurnaan penetrasi, ketidakseragaman lebar pengelasan, serta perubahan mikrostruktur pada HAZ dapat diamati secara jelas. Proses *sampling macro etching test* dilakukan hanya pada satu *Body Serial Number* (BSN) yang memiliki *defect offender* atau penyumbang cacat yang tertinggi, yaitu *Body Serial Number* (BSN) 265.



Gambar 7. Hasil Macro Etching

Berdasarkan hasil *macro etching* menunjukkan adanya ketidakaturan pada struktur makroskopis sambungan las, terutama pada penampang Face 1. Seperti terlihat pada Gambar 7, indikasi berupa retakan (*crack*) muncul secara jelas pada area *fusion line*, yang ditandai oleh garis gelap yang memanjang dari zona HAZ menuju logam las. Retakan ini mengindikasikan adanya gangguan kontinuitas metalurgi yang signifikan dan menunjukkan bahwa proses pengelasan tidak menghasilkan fusi yang sempurna. Secara visual, hasil etsa memperlihatkan bahwa penetrasi las berada pada nilai 14 mm, sesuai dengan ketentuan, namun struktur penggabungan antara logam las dan logam dasar tampak tidak homogen. Retakan yang teridentifikasi kemungkinan terbentuk akibat kombinasi antara *heat input* yang rendah dan *travel speed* yang melebihi batas WPS.

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa retakan yang muncul di area HAZ bukanlah fenomena tunggal, tetapi merupakan akibat dari interaksi simultan antara kondisi metalurgi, parameter proses, dan kualitas preparasi mekanis setelah gouging. Retakan yang ditemukan bersifat linier dan mengikuti kontur alur las, mengindikasikan adanya konsentrasi tegangan tinggi pada area tersebut, disertai perubahan mikrostruktur akibat pendinginan cepat. Fenomena ini diperkuat oleh hasil uji MPI yang menampilkan indikasi retakan baik di permukaan maupun sub-permukaan, serta temuan makro etsa yang menunjukkan ketidaksempurnaan fusi pada *fusion line*.

Berdasarkan analisis parameter las, khususnya pada sampel dengan *Body Serial Number* 265 dan 268, terlihat jelas bahwa *travel speed* yang melebihi standar WPS menyebabkan penurunan *heat input*, pendinginan yang terlalu cepat, dan pembentukan mikrostruktur getas berupa martensit di HAZ. Mikrostruktur getas ini sangat rentan terhadap retakan hidrogen maupun tegangan sisa, terlebih bila proses *back gouging* tidak menghasilkan kampuh yang halus dan bersih. Keberadaan *gouging marks*, takik tajam, serta sisa *slag* memperburuk kondisi ini karena bertindak sebagai titik konsentrasi tegangan dan memperbesar risiko inisiasi retak. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penyebab utama kegagalan berasal dari kombinasi faktor metalurgi (embrittlement), faktor proses (parameter las menyimpang), serta faktor mekanis (preparasi gouging yang tidak optimal).

Hasil uji *Macro Etching* semakin mempertegas bahwa ketidaksempurnaan pengelasan turut berkontribusi pada kegagalan, terutama pada area *fusion line* yang menunjukkan retakan makroskopik. Temuan ini membuktikan bahwa meskipun pengujian visual dan MPI sudah dilakukan, pemeriksaan tambahan melalui *macro etching* sangat penting untuk mengungkap cacat internal yang tersembunyi. Pola retakan dan struktur makro yang tidak homogen menunjukkan bahwa proses pengelasan harus dijalankan dengan kontrol yang lebih ketat dan berdasarkan standar WPS secara konsisten untuk memastikan integritas struktural komponen.

Berdasarkan temuan-temuan tersebut, beberapa rekomendasi dapat diberikan untuk memperbaiki kualitas pengelasan dan mencegah terjadinya HAZ Crack di masa mendatang. Pertama, parameter pengelasan harus dikendalikan dengan sangat ketat, terutama dalam memastikan *travel speed*, arus, dan tegangan tetap berada dalam rentang yang ditetapkan pada WPS. Penggunaan mesin las dengan kemampuan *data logging* sangat disarankan agar setiap deviasi dapat terpantau secara real-time. Kedua, proses *back gouging* perlu ditingkatkan dalam hal ketelitian dan prosedur pembersihannya. Hasil gouging harus menghasilkan kampuh yang halus, bersih dari *slag*, dan bebas takik untuk mengurangi konsentrasi tegangan yang dapat memicu retakan. Penggunaan *grinding* lanjutan wajib dilakukan secara merata hingga seluruh permukaan kampuh berada dalam kondisi optimal untuk pengelasan ulang.

Selain itu, penerapan *pre-heat* dan *Post-Weld Heat Treatment* (PWHT) sangat dianjurkan untuk mengurangi tegangan sisa, memperlambat laju pendinginan, serta menstabilkan mikrostruktur agar tidak terjadi perubahan fasa yang menyebabkan HAZ menjadi rapuh. Langkah ini terbukti efektif dalam mencegah pembentukan retakan hidrogen dan memberikan ketangguhan tambahan pada sambungan las, terutama pada material yang rentan mengalami pengerasan akibat pendinginan cepat.

Dari sisi inspeksi kualitas, metode *Magnetic Particle Inspection* (MPI) terbukti sangat efektif untuk mendeteksi retakan permukaan dan sub-permukaan setelah *back gouging*. Oleh karena itu, MPI sebaiknya dijadikan standar wajib sebelum pengelasan ulang dilakukan. Pengujian ini tidak hanya mencegah cacat terbawa ke proses selanjutnya, tetapi juga mengurangi potensi kegagalan pada tahap *Ultrasonic Testing*, sehingga biaya perbaikan dan *rework* dapat ditekan secara signifikan. Sebagai pelengkap, pengujian makro sebaiknya dilakukan secara sampling pada struktur dengan tingkat cacat tinggi untuk memastikan tidak ada cacat serius yang luput dari inspeksi berbasis permukaan.

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan penting, retakan HAZ pada sambungan las Bottom Boom 6015 Structure terutama dipicu oleh heat input yang tidak terjaga (*travel speed* tinggi), pendinginan cepat, transformasi martensit yang membuat HAZ getas, hidrogen terperangkap, serta kualitas *back gouging* yang menghasilkan notch tajam. Observasi visual serta pengujian *Non-Destructive Testing* (NDT) menunjukkan bahwa retakan berawal dari HAZ dan berkembang hingga ke sub-permukaan material. Hal ini menandakan bahwa retakan tidak bersifat dangkal, melainkan telah mengalami propagasi lanjutan yang berpotensi melemahkan integritas komponen MPI (*wet fluorescent*) efektif mendeteksi linear indication sebelum pengelasan ulang dan *macro etching* memverifikasi lokasi crack pada fusion line/HAZ. Diperlukan kontrol ketat parameter GMAW sesuai WPS, penerapan *preheat*, peningkatan standar kebersihan kampuh pasca *gouging*, dan kewajiban inspeksi MPI sebelum *re-welding* untuk meminimalkan risiko kegagalan berulang.

ACKNOWLEDGEMENTS

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada pembimbing Bapak Ir. Kaidir, M.Eng., IPM. dan juga kepada tim workshop PT. X yang telah membantu penyediaan data serta fasilitas pengujian selama proses pelaksanaan penelitian ini dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

- Atmojo, E. I. D. (2020). *Analisa Daya Pompa Elevating Cylinder yang Dibutuhkan Sebagai Penggerak Telescopic Boom dengan Variasi Sudut Kerja 10 ° , 30 ° , 50 ° , 70 ° Pada Unit Truck Crane XCMG 25 Ton*.
- Daffa Sofyan Taruna, dkk. (2024). *Analisa Pengaruh Variasi Kuat Arus Gouging Sambungan Pengelasan SMAW Pada Baja SS400 Terhadap Kekuatan Uji Tarik, Impak, dan Struktur Mikro*. *Jurnal Ilmiah Teknik Perkapalan* 2338-0322. (<https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>.)
- Feri Ardianto dan Ir. Sartono Putro, M.T (2019). *Analisa Kerusakan Sistem Hidraulik Pada Boom Cylinder Unit Excavator XGMA XG822EL*.

- Hareesha, N. G. (2017). *Kinematic and isotropic properties of excavator mechanism*. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). (<https://www.ijert.org/research/kinematic-and-isotropic-properties-of-excavatormechanism-IJERTCONV3IS17016.pdf>)
- Iskandar, dkk. (2021). *Analisa Kerusakan Hidrolik Boom Cylinder Excavator Komatsu PC200-8 Dengan Menggunakan Metode FMEA*. Jurnal Mesin Sains Terapan Vol 5 No 1, Februari Tahun 2021
- Leonardo Pardede, dkk. (2015). *Analisa Perbandingan Sensitivitas Metode Magnetic Particle Inspection (MPI) Menggunakan Metode Visible Dry, Visible Wet, dan Wet Fluorescent Terhadap Pendeteksian Panjang Retak pada Permukaan dan Toe Sambungan Las di Kapal yang Dilapisi Nonconductive Coating*. Jurnal Sains dan Seni ITS Vol. 4, No.1, (2015) 2337-3520
- Miao X, et al. (2023). *Fatigue and post-fatigue static crack characterisation of a wrinkled thick glass fibre laminate in a composite wind turbine blade*. International Journal of Fatigue (2023)176
- Muhammad Saleem Khan, et al. (2023). *Selection of Joint Preparation Procedure based on Cost-effectiveness and Defects analysis of Double-V SMAW Joint*.
- Muhsin, dkk. (2024). *Pengaruh Perlakuan Normalizing pada Baja Karbon Menengah Setelah Proses Pengelasan SMAW terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro*. Universitas Tridinanti Palembang. Kohesi : J. Multidisiplin Saintek 4(8):- . (<https://ejournal.warunayama.org/kohesi>)
- Retak, K., Api, H. A. Z., & Steel, P. (2017). *Jurnal Teknik Mesin S-1, Vol. 5, No. 2, Tahun 2017 Online: <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jtm> Kerentanan Retak dan Kekerasan*. 5(2), 137–142.
- Sutisna N. A. dan Azhar Z, (2021). *Analisis terhadap desain komponen boom pada mini excavator-Excava 50 menggunakan metode elemen hingga*.