

**Studi Proses *Submerged Arc Welding* dan *Post Weld Heat Treatment* pada Perbaikan
Crane Running Wheel: Pengaruh terhadap Kekerasan dan Dimensi**

Jihan Mutiara Martha, Agung Prasetyo Dwi Nugroho, Liman Hartawan

Jurusan Teknik Mesin , Fakultas Teknologi Industri Itenas Bandung

Jl. PHH. Mustafa No.23 Bandung 40124

e-mail : jmutiara02@gmail.com

Received 17 Juli 2025 | Revised 18 September 2025 | Accepted 1 Juni 2026

ABSTRAK

Crane Running Wheel pada grab ship unloader mengalami keausan akibat beban berulang dan gesekan tinggi selama operasi bongkar muat. Salah satu metode restorasi yang efektif adalah Submerged Arc Welding (SAW), yang dikombinasikan dengan Post Weld Heat Treatment (PWHT) untuk meningkatkan performa hasil las. Studi ini menganalisis pengaruh proses SAW dan PWHT terhadap dimensi akhir dan kekerasan permukaan crane running wheel. Proses dimulai dari pengukuran awal, roughing, pre-heating, SAW multi-layer, PWHT pada 620°C selama dua jam, dan finishing. Evaluasi dilakukan berdasarkan perubahan dimensi dan distribusi kekerasan setelah proses. Hasil menunjukkan bahwa dimensi berhasil dikembalikan ke standar, sementara kekerasan meningkat dari 28,2–32 HRC menjadi 44–51.1 HRC namun masih berada di bawah spesifikasi operasional sebesar 50–60 HRC. Diperlukan optimalisasi terhadap parameter SAW dan strategi PWHT lanjutan untuk memenuhi standar performa material.

Kata kunci: Crane Running Wheel, Shield Metal Arc Welding, Post Weld Heat Treatment, Dimensi, Kekerasan

ABSTRACT

Crane Running Wheel on grab ship unloader experiences wear due to repetitive loads and high friction during loading and unloading operations. One of the effective restoration methods is Submerged Arc Welding (SAW), which is combined with Post Weld Heat Treatment (PWHT) to improve the performance of the weld results. This study analyzes the effect of SAW and PWHT processes on the final dimensions and surface hardness of the crane running wheel. The process starts from initial measurement, roughing, pre-heating, multi-layer SAW, PWHT at 620°C for two hours, and finishing. Evaluation is carried out based on changes in dimensions and hardness distribution after the process. The results show that the dimensions are successfully restored to standard, while the hardness increases from 28.2–32 HRC to 44–51.1 HRC but is still below the operational specification of 50–60 HRC. Optimization of SAW parameters and advanced PWHT strategies are needed to meet material performance standards.

Keywords: Crane Running Wheel, Shield Metal Arc Welding, Post Weld Heat Treatment, Dimensions, Hardness

1. Pendahuluan

Grab ship unloader merupakan alat untuk bongkar muat di pelabuhan yang menggunakan *crane* dan *clamshell bucket* untuk memindahkan material curah dari kapal ke darat. Salah satu komponen vital yaitu *crane running wheel*, yang memiliki fungsi sebagai penyalur beban dan gerakan translasi [1]. *Crane running wheel* digunakan kurang lebih 10 bulan sejak *repair* terakhirnya dengan beban rata-rata 1.500 ton per jam setiap harinya mengakibatkan timbul gesekan dengan lintasannya secara terus menerus [2]. Selain itu, *crane running wheel* merupakan *driven* dimana komponen ini didorong oleh tenaga mekanik (sistem internal) dari sumber lain untuk bekerja. Dapat juga dikategorikan sebagai roda penggerak atau roda dorong pula, sehingga menurunkan efisiensi dan keselamatan operasional. Selain itu, diindikasikan pula terjadi *rail biting* dimana *crane running wheel* bersentuhan dengan rel secara terus menerus, menyebabkan keausan signifikan pada roda dan rel [3]. Akibat pemakaian terus – menerus dan timbulnya keausan, diperlukanlah perbaikan agar umur pakai komponen tetap optimal dan operasi *crane* berjalan lancar [4].

Proses perbaikan yang umum digunakan adalah dengan metode *Submerged Arc Welding* (SAW). Proses ini mampu menghasilkan lapisan pengelasan yang dalam, homogen, dan berkualitas tinggi pada permukaan roda *crane* yang aus [5]. Namun, proses SAW dapat meninggalkan tegangan sisa dan memengaruhi struktur mikro material, sehingga perlu penanganan lanjutan agar sifat mekanik roda tidak menurun. Post Weld Heat Treatment (PWHT) diterapkan sebagai prosedur lanjutan setelah pengelasan untuk meredakan tegangan sisa, mengoptimalkan struktur mikro, dan memperbaiki sifat mekanik seperti kekerasan dan ketahanan material pada *crane wheel* [6][7]. PWHT ini penting untuk menjaga keseimbangan antara kekerasan dan daya tahan dari roda *crane* agar tidak terjadi deformasi dimensi atau retak selama operasi.

Terdapat berbagai penelitian terdahulu mengenai perbaikan *crane running wheel*. Seperti Perbaikan roda *crane* yang mengalami keausan dapat dilakukan dengan metode perawatan berkelanjutan (*maintenance*) yang melibatkan pemeriksaan visual, pembersihan bagian bearing, pelumasan, dan penggantian komponen bearing yang sudah aus. Prosedur ini bertujuan mencegah kerusakan lebih lanjut dan memperpanjang umur roda *crane* agar dapat berfungsi optimal tanpa gangguan operasional [8].

Selain itu, terdapat pula perbaikan roda *crane* yang aus dilakukan dengan teknik *corrective maintenance*, yang mencakup penggantian komponen aus seperti seal, bearing, dan gear yang mengalami kebocoran atau kerusakan akibat beban kerja berat. *Predictive maintenance* juga diterapkan dengan melakukan pengecekan rutin oli dan seal untuk mencegah terjadinya kerusakan serius dan menjaga kondisi roda *crane* tetap prima [9]. Ada pula roda *crane* yang mengalami keausan akibat gesekan berkelanjutan dapat diperbaiki melalui proses *welding* dan *hardfacing* menggunakan material tahan aus. Teknik pengelasan ini mengembalikan dimensi dan kekerasan roda sehingga meningkat daya tahan terhadap keausan di masa datang, dan meminimalkan biaya penggantian komponen secara keseluruhan [10].

Penelitian lainnya ada pula yang menganalisis kegagalan yang terjadi pada roda dan rel *crane* dengan beban berat. Proses keausan yang meningkat dianalisis menggunakan metode eksperimen dan simulasi. Disarankan metode pengelasan ulang permukaan roda dengan bahan tahan aus sebagai solusi efektif memperbaiki keausan dan memperpanjang masa pakai roda *crane* [11]. Selain itu, terdapat penelitian yang mengevaluasi perbaikan roda *crane* yang aus dengan teknik *hardfacing* pula menggunakan dua jenis baja martensitik tahan aus, menghasilkan peningkatan kekerasan dan ketahanan aus roda *crane* secara signifikan [12].

Apabila komponen terpenting *crane running wheel* tidak diperbaiki, dapat mengganggu produktivitas pengerjaan. Sebagai contoh yang terjadi pada sebuah perusahaan di Sidoarjo. Dimana tercatat total downtime *crane* mencapai 157 jam dalam setahun pada 15 unit *crane* yang digunakan dalam proses produksi. Penyebab utama downtime tinggi ini adalah kerusakan pada tiga komponen kritis, yaitu kontrol hover, sistem pengereman, dan kabel trolley. Biaya yang dikeluarkan untuk pemeliharaan preventif mencapai sekitar Rp 382 juta, meningkat dibandingkan biaya pemeliharaan korektif yang sebelumnya sekitar Rp 196 juta. Pendekatan penjadwalan pemeliharaan menggunakan metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM) menghasilkan interval pemeliharaan untuk komponen kontrol

hover setiap 250 jam, sistem pengereman setiap 397 jam, dan kabel trolley setiap 1460 jam, dengan keandalan mesin mencapai 60%. Data ini menunjukkan bahwa tanpa perbaikan dan pemeliharaan yang tepat, downtime dan biaya operasional crane dapat meningkat signifikan, yang berdampak negatif terhadap produktivitas perusahaan [13].

Studi ini difokuskan pada pengaruh proses submerged arc welding dan post weld heat treatment terhadap perubahan sifat mekanik, khususnya kekerasan dan dimensi pada roda crane. Tujuan utama penelitian adalah mengevaluasi dampak kombinasi kedua proses tersebut terhadap dimensi akhir serta distribusi kekerasan pada running wheel crane. Dengan hasil evaluasi ini, diharapkan dapat dirumuskan rekomendasi teknis yang berbasis data lapangan untuk perbaikan roda crane secara optimal.

2. Metodologi

Metodologi penelitian mencakup tahapan proses perbaikan *crane running wheel*, serta evaluasi hasil terhadap dimensi dan kekerasan komponen tersebut.

2.1 Material Crane Running Wheel

DIN 1681 GS-70. Jika disetarakan, material ini akan setara dengan ASTM A148 Grade 90-60 yang termasuk ke dalam *cast steel* dengan struktur mikroskopik ferit dan perlit, serta mengandung grafit nodular. Material ini termasuk baja cor dengan grafit nodular dan memiliki fasa ferit dan perlit. Biasa digunakan untuk komponen yang memerlukan kekuatan dan keuletan yang baik. Penyetaraan komposisi dari kedua material seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kandungan Material *Crane Running Wheel*[14]

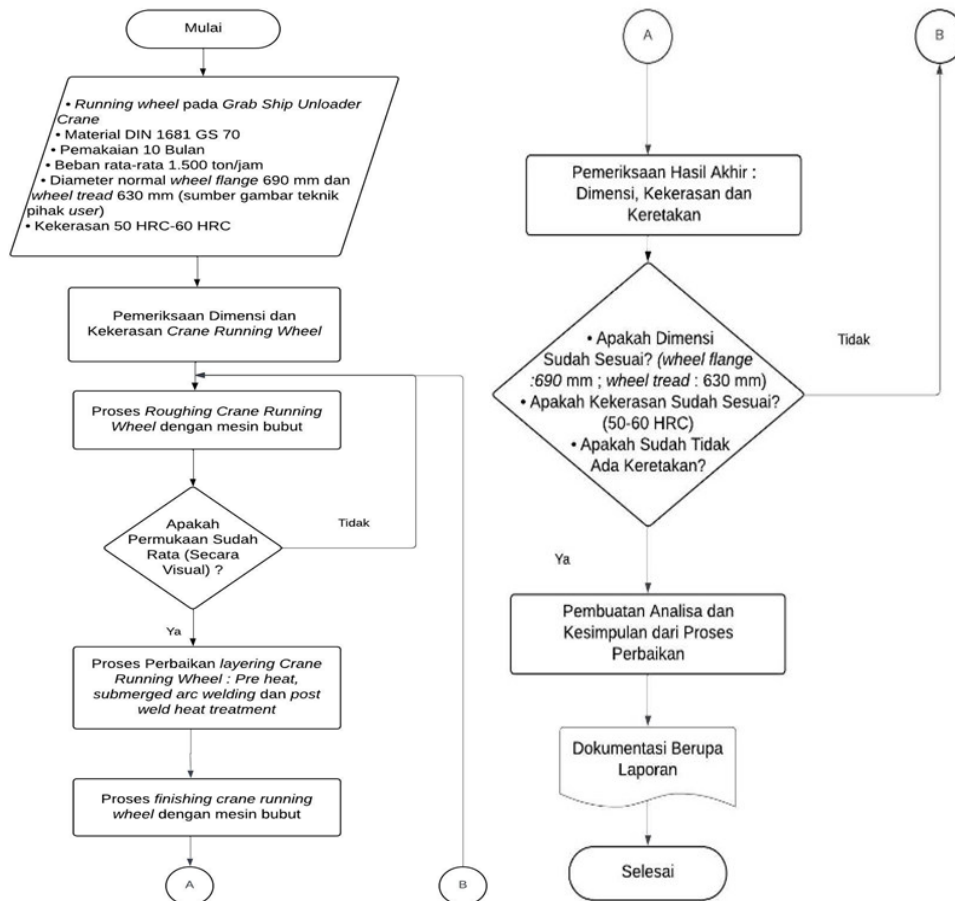
Kandungan Material	ASTM A148 Grade 90-60 Cast Steel (%)	DIN 1681 GS-70 (%)
C	0.2-0.3	0,5-0,6
Fe	96.2-98.3	97,1
Si	0.3-0.6	0,2-0,6
Mn	0.6-0.9	0,6-0,9
P	0.05	0,05
S	0.06	0,05
Cr	0.4-0.8	0,15-0,3
Ni	0.4-0.8	0,15-0,3
V	-	0,02-0,1
Mo	0.15-0.3	0,02.0,1

2.2 Tahapan Proses Perbaikan

Proses perbaikan dilakukan berdasarkan tahapan sebagai berikut:

1. Data pemakaian dan spesifikasi didapatkan dari pemilik *crane running wheel*.
2. Inspeksi awal terhadap dimensi dan kondisi permukaan *running wheel*.
3. Proses *roughing* permukaan dengan mesin bubut untuk meratakan, memastikan kebersihan dan kekasaran yang tepat pada permukaan.
4. Proses *pre-heating* dilakukan untuk mengurangi risiko retak, meningkatkan ketangguhan sambungan las, mengurangi distorsi termal dan meningkatkan kualitas las.
5. Proses *layering crane running wheel* dengan *submerged arc welding*.
6. Proses *post weld heat treatment* untuk menghilangkan tegangan sisa akibat proses pengelasan yang dilakukan sebelumnya.
7. Proses *finishing* dengan mesin bubut untuk mengejar diameter.
8. Inspeksi akhir berupa pemeriksaan berupa kesesuaian dimensi dengan gambar teknik, kesesuaian kekerasan dengan data dari *user* serta keretakan pada permukaan.

Alur proses tersebut dapat digambarkan melalui *flowchart* pada gambar 1.



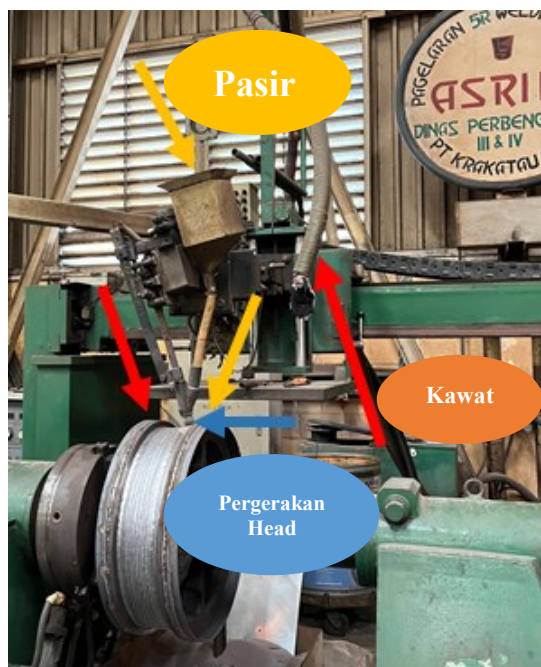
Gambar 1. Flowchart Perbaikan

2.3 Parameter Pengelasan Submerged Arc Welding

Pengelasan dilakukan menggunakan mesin Rolltech MUB-2-1250X2-NC dengan kawat pengisi berbasis baja karbon. Ketebalan masing-masing *layer* kurang lebih 4 mm per lapisan. Parameter pengelasan utama ditunjukkan pada Tabel 2. Proses ini dapat dilihat pada gambar 2. Dimana untuk garis warna merah menunjukkan pergerakan kawat las. Untuk garis warna kuning menunjukkan arah *flux*-nya. Sementara untuk garis warna biru menunjukkan posisi dan pergerakan dari *head* pengelasan.

Tabel 2. Parameter Pengelasan Submerged Arc Welding[15]

Parameter	Nilai
Jenis Mesin	Rolltech MUB-2-1250X2-NC
Tegangan	27 V
Arus	315 A
Wire Speed	4200 mm/min
Weld Speed	350 mm/min
Jenis Flux	Weldclad 08 (WLDC 08) [Fasa Martensit]
Size of Filler Metal (Wire)	3.2 mm
Welding Positions	Weld Overlay Cladding
Polaritas	DC+
Jumlah Layer	5 lapisan (Multiple Layer)



Gambar 2. Skema proses pengelasan SAW

2.4 Post Weld Heat Treatment (PWHT)

Post Weld Heat Treatment (PWHT) dilakukan untuk menurunkan tegangan sisa dan meningkatkan kekerasan melalui pengendalian struktur mikro. Proses ini menggunakan *furnace* industri dengan suhu target 620°C selama 2 jam, diikuti pendinginan lambat (*furnace cooling*). Proses ini akan menyebabkan transformasi signifikan dalam struktur mikro dan sifat mekanisnya. Hal ini disebabkan fasa yang dimiliki oleh *crane running wheel* adalah ferit dan perlit. Sementara fasa yang dimiliki oleh *weldclad 08* adalah martensit. Selain itu, diharapkan pula perubahan kekerasan permukaan yang umumnya fasa martensit memiliki kekerasan mencapai 63 HRC akan menurun menjadi sekitar 45-50 HRC. Ketangguhan dan keuletan material akan meningkat sebab pengurangan tegangan sisa dan perubahan struktur mikro yang telah disinggung sebelumnya. Proses ini dapat dilihat pada gambar 3.



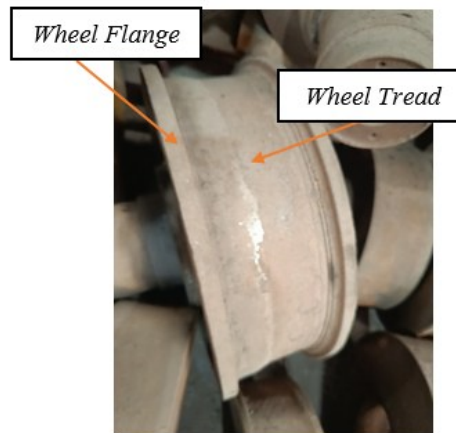
Gambar 3. Proses *Post Weld Heat Treatment* dengan *Furnace*

2.5 Pengukuran dan Evaluasi

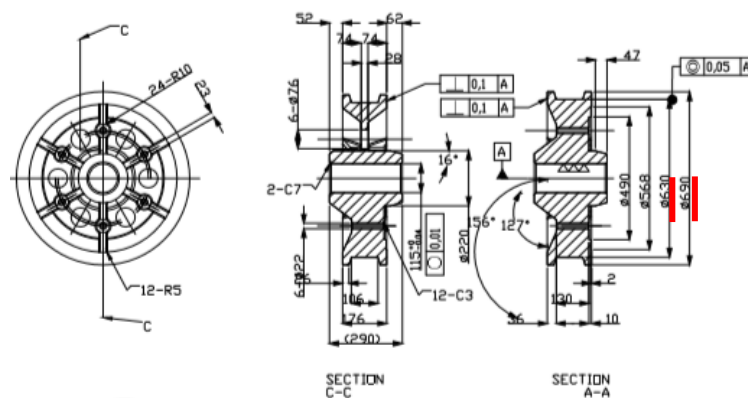
Evaluasi dilakukan terhadap dua aspek utama, yaitu:

1. Dimensi akhir, dibandingkan dengan spesifikasi teknis seperti pada gambar teknik *crane running wheel*. Ditergetkan dimensi yang dicapai untuk bagian *wheel tread* adalah 630 mm dan *wheel flange* pada 690mm, seperti pada gambar 5. Proses ini dapat dicapai dengan proses *finishing* berupa pengurangan atau penyesuaian dimensi akhir material yang dilakukan oleh mesin bubut dengan pahat berupa TNMG 220408 (beradius 0,8 mm). Kecepatan pahat yang digunakan adalah 0,438 mm/min dan kecepatan spindelsebesar 12 rpm. Diameter awal setelah proses pengelasan untuk proses ini adalah 707,6 mm untuk *wheel flange* dan 645,6 mm untuk *wheel tread* dengan kedalaman pemotongan sekitar 2 mm. Proses dengan pahat ini akan

disisakan 2 mm untuk selanjutnya disambung dengan pahat TNMG 220404 (beradius 0,4 mm) untuk menciptakan permukaan yang lebih halus. Proses ini dilakukan dengan *feed rate* dan kedalaman pemotongan yang sama seperti sebelumnya. Sementara kecepatan *spindle* dinaikan menjadi 33 rpm.



Gambar 4. Bagian Crane Running Wheel



Gambar 5. Gambar Teknik Crane Running Wheel

2. Kekerasan Permukaan, dilakukan beberapa titik menggunakan Equotip 2 Target kekerasan yang ingin dicapai adalah 50-60 HRC .



Gambar 6. Pengukuran Kekerasan

3. Hasil dan Pembahasan

Adapun hasil dan pembahasan untuk studi ini dibagi menjadi dua fokus, yaitu dimensi dan kekerasan yang dimiliki *crane running wheel* sebelum dan sesudah perbaikan. Selain itu, pemeriksaan secara visual diperlukan, sebab jika terdapat kecacatan maka proses perbaikan harus diulang kembali. Pemeriksaan ini dilakukan dengan melihat keseluruhan permukaan dari *crane running wheel*. Setelah diputar dan dipastikan tidak ada keretakan, maka dipastikan *crane running wheel* dalam kondisi baik dan tidak

diperlukan pemeriksaan lanjutan. Penampakan permukaan *crane running wheel* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Pemeriksaan Kecacatan Secara Visual

3.1 Evaluasi Dimensi

Pengukuran dimensi akhir dilakukan menggunakan jangka sorong tipe T 1000 mm. Pemakaian nya yaitu dengan mengukur diameter *wheel flange* terlebih dahulu dimana didapatkan 690 mm. Selanjutnya dilanjutkan dengan mengukur *wheel tread* menggunakan jangka sorong pula dengan ukuran yang didapatkan 630 mm. Dengan demikian, diameter yang didapatkan telah sesuai dengan yang diharapkan. Hal ini dapat terjadi karena proses *layering* dan proses *finishing* dengan mesin bubut berjalan dengan baik dan efektif. Sehingga menghasilkan dimensi yang diinginkan. Dimana dimensi sebelumnya saat *crane running wheel* datang adalah bagian *wheel flange* diameter yang tersisa adalah 684 mm berkurang sekitar 6 mm. Sementara untuk bagian *wheel tread* diameter yang dimiliki adalah 625 mm berkurang 5 mm dari seharusnya. Proses pengukuran data dilihat pada gambar 8.



Gambar 8. Proses Pengukuran Diameter Akhir

3.2 Evaluasi Kekerasan

Pengujian dilakukan di beberapa titik pada permukaan *crane running wheel* sehingga didapatkan kekerasan rata-rata untuk *wheel flange* adalah 51.1 HRC dan *wheel tread* adalah 44-47 HRC. Untuk kekerasan *wheel flange* sudah sesuai dengan yang ditargetkan, namun tidak dengan kekerasan *wheel tread*. Hal ini dapat disebabkan oleh terlalu banyaknya material bagian *wheel tread* yang terbuang pada proses *roughing* demi mengejar kerataan permukaan.

Selain itu, *filler metal* yang digunakan dapat mempengaruhi hasil pengelasan terutama pada kekerasannya. Hal ini dapat terjadi karena *filler metal* yang digunakan kandungannya mendekati dengan logam induk (komposisi *alloy* pada *filler metal* belum optimal). Hal ini dapat dibandingkan dan dilihat pada tabel 3.

Pada proses PWHT, filler metal WLDC 08 yang semula memiliki struktur martensit dengan kekerasan tinggi (60 HRC) akan mengalami transformasi fasa menjadi ferit dan perlit yang lebih lunak dan ulet. Transformasi ini bertujuan menyamakan fasa antara logam las dan logam induk untuk menghindari ketidakseragaman sifat mekanik yang dapat memicu retakan. Namun demikian, sifat mekanik akhir akan

tetap dipengaruhi oleh logam induk yang memiliki kekerasan awal hanya 28,2–32 HRC. Akibat proses homogenisasi ini, nilai kekerasan akhir tidak dapat mempertahankan tingkat maksimum martensit murni karena terjadi dilusi dan difusi unsur paduan antara *filler metal* dan *base metal*. Selain itu, distribusi kekerasan yang tidak merata juga dipengaruhi oleh laju pendinginan (*cooling rate*) yang terlalu lambat, sehingga memungkinkan terbentuknya variasi mikrostruktur lokal yang berbeda-beda.

Tabel 3. Kandungan Material *Crane Running Wheel* dan *Filler Metal* [16]

Kandungan Material	<i>Weldclad</i> (WLDC 08) (%)	<i>Crane Running Wheel</i> (ASTM A148 Grade 90-60 Cast steel) (%)
C	0.25	0.2-0.3
Fe	-	96.2-98.3
Si	0.5	0.3-0.6
Mn	0.9-1	0.6-0.9
P	<0.04	0.005
S	<0.04	0.06
Cr	12	0.4-0.8
Ni	-	0.4-0.8
V	0.15	-
Mo	0.75	0.15-0.3

Menurut standar AWS D1.1 untuk pengelasan baja karbon dan paduan, distribusi kekerasan yang seragam sangat penting untuk meningkatkan performa mekanik dan mencegah kegagalan retak pada sambungan las [17]. Selain itu, *cooling rate* yang lebih cepat dapat membantu mempertahankan tingkat kekerasan tinggi dan homogenitas mikrostruktur, Sementara proses PWHT yang tepat dapat mengoptimalkan distribusi kekerasan dengan mengurangi tegangan sisa sekaligus tetap menjaga keuletan material.

4. Kesimpulan

Crane running wheel yang mengalami keausan diperbaiki dengan cara *layering* menggunakan metode *submerged arc welding*. Proses ini tahapannya adalah memeriksa keadaan *crane running wheel* terlebih dahulu. Dilanjutkan dengan proses *roughing* permukaan *crane running wheel* yang dikerjakan diatas mesin bubut. Lalu, ketika permukaan sudah rata, *crane running wheel* akan mengalami *proses pre heating* selama 60 menit dan akan langsung berlanjut ke proses *layering* dengan metode *submerged arc welding* pada mesin Rolltech MUB-2-1250X2-NC. Setelah selesai, *crane running wheel* akan memasuki tahap *post weld heat treatment* yang dilakukan dengan bantuan *furnace* selama 120 menit. Selanjutnya, *crane running wheel* melakukan *finishing* di mesin bubut untuk mengejar diameter *wheel flange* sebesar 690 mm dan *wheel tread* sebesar 630 mm.

Perbaikan *crane running wheel* berhasil memulihkan dimensi *wheel flange* dari kondisi aus 684 mm menjadi 690 mm, serta *wheel tread* dari 625 mm menjadi 630 mm, sesuai spesifikasi desain. Namun, pengujian kekerasan menunjukkan nilai rata-rata hanya 44–51,1 HRC, yang masih di bawah target spesifikasi 50–60 HRC. Kondisi ini disebabkan oleh efek homogenisasi pada proses PWHT yang menyamakan struktur fasa *filler metal* WLDC 08 yang keras (60 HRC) dengan logam induk yang relatif telah melunak (28,2–32 HRC). Akibatnya, nilai kekerasan akhir cenderung tertarik mendekati logam indu, sehingga nilai kekerasan akhir tertarik mendekati logam induk.

Melalui pemeriksaan visual hasil lasan, tidak ditemukan adanya retakan atau cacat kritis lain sehingga tidak diperlukan pemeriksaan lanjutan. Namun, karena nilai kekerasan belum memenuhi target, aspek ini menjadi peluang untuk penelitian lanjutan guna mengoptimalkan proses perbaikan sehingga menghasilkan kekerasan ideal sekaligus menjaga integritas material roda crane..

5. Daftar Pustaka

- [1] Nugroho, I. 2024. *Penerapan manajemen perawatan sistem penggerak Grab Ship Unloader (GSU) menggunakan metode RCM pada PT. Krakatau Bandar Samudera* (Skripsi, Politeknik Negeri Jakarta). Repository Politeknik Negeri Jakarta.
- [2] PT Krakatau Bandar Samudera. 2025. *Operasional dermaga*. Diakses pada 28 Agustus 2025, dari <https://www.krakatauinternationalport.co.id/id/operasional-dermaga>
- [3] Zhang, Y., & Wang, X. 2018. *Investigation of wear behavior of crane wheels under different operational conditions*. *Wear*, 406-407, 123-131.
- [4] Tanasković, D., Tatić, U., Đorđević, B., Sedmak, S., & Sedmak, A. 2017. *The effect of cracks on stress state in crane wheel hard-surface under contact loading*. *Tehnički vjesnik*, 24(Suppl. 1), 169-175. <https://doi.org/10.17559/TV-20151227221434>
- [5] Abdel-Gawad, E. F. 2013. *Evaluation of the built-up weld formed component using submerged arc welding*. *Port Said Engineering Research Journal, Faculty of Engineering, Port Said University*, Volume 17 No. 1, pp. 8-18.
- [6] Martdiansyah. 2025. *Pengaruh Variasi Post Weld Heat Treatment (Pwht) Terhadap Sifat Mekanik Baja Aisi 1045 Hasil Pengelasan Gmaw*. *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin*, 13(2). <https://doi.org/10.23887/jptm.v13i2.96072>
- [7] Palguna, Y., et al. 2024. *Effect of post weld heat treatment on the microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded joints*. *Materials Science and Engineering: A*, 830, Article 142362. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.142362>
- [8] Hardianto, A. 2015. *Perawatan Hoist Crane dengan Metode Maintainability dan Costing untuk mengurangi Breakdown*. *JEMIS*. 5(1), 23-62. <https://jemis.ub.ac.id/index.php/jemis/article/view/165/165>
- [9] Setyawan, I. 2025. *Maintenance Crane: Analisa Preventive, Predictive, dan Corrective Maintenance pada Crane Lapangan*. *Jurnal 1 BKD*, June 2025. <https://id.scribd.com/document/547493441/Jurnal-1-BKD>
- [10] Nurroif, A., & Retnowati, D. 2022. *Perencanaan preventive maintenance mesin crane dengan pendekatan metode reliability centered maintenance (RCM)*. *Jurnal Teknik Industri*, 1(2), 111–119. <https://jurnal.unissula.ac.id/index.php/jurti/article/download/28281/7807>
- [11] Kula, J. 2016. *Failure analysis of increased rail wear of 200 tons foundry crane*. *Wear*, 372–373, 137-146. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.01.025>
- [12] Bakhshayesh, M. M., Farzadi, A., Kalantarian, R., & Zargarzadeh, A. 2023. *Evaluation of crane wheels restored by hardfacing two distinct 13Cr-4Ni martensitic stainless steels*. *Metals*, 2023. <https://doi.org/10.3390/met13071345>
- [13] Pratama, D. M. A., & Widiasih, W. 2024. *Usulan Jadwal Pemeliharaan Mesin Crane Dengan Metode Reliability Centered Maintenance*. *PROZIMA (Productivity, Optimization and Manufacturing System Engineering)*, 8(2), 104–114. <https://doi.org/10.21070/prozima.v8i2.1719>
- [14] Steel-Grades.com. (2025). *Germany DIN 1681 GS-70 / GS-70 datasheet, chemical composition analysis of GS-70, mechanical properties*. Diakses pada 28 Agustus 2025, dari <https://www.steel-grades.com/metals/85/218401/DIN-GS-70.html>
- [15] ROLLTECH. 2003. *Manual pengguna mesin las MUB-2-1250×2-NC: Twin head submerged arc roll welding machine*. Tangerang, Indonesia: PT Yontomo Sukses Abadi.
- [16] MakeItFrom.com. 2025. *ASTM A148 grade 90-60 or 620-415 (D50600) cast steel*. Diakses pada 28 Agustus 2025, dari <https://www.makeitfrom.com/material-properties/ASTM-A148-Grade-90-60-or-620-415-D50600-Cast-Steel>
- [17] American Welding Society. 2022. *AWS D1.1 Structural Welding Code—Steel* (ed. ke-23). Miami, FL: AWS Publishing.