

Pengaruh Perlakuan PWHT terhadap Sifat Mekanis Sambungan Las TIG pada Baja Grade 91

Halman^{1,*}, Ismail Ramly¹, Yusuf Rizal Fauzi²

¹Jurusan Teknik Alat Berat, Politeknik Negeri Nunukan, Jalan Ujang Dewa, Ujang Dewa, Nunukan Selatan, Kabupaten Nunukan, Kalimantan Utara, 77482.

²Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Banjarmasin, Jalan Brigadir Jenderal Hasan Basri, Pangeran, Kecamatan Banjarmasin Utara, Kota Banjarmasin, Kalimantan Selatan, Indonesia, 70124.

*halman@pnn.ac.id

Diterima: 04 03 2025

Direvisi: 08 04 2025

Disetujui: 03 07 2025

ABSTRAK

Baja *Grade 91* merupakan baja paduan yang banyak digunakan di industri pembangkit listrik dan petrokimia karena ketahanannya terhadap suhu tinggi, oksidasi, dan korosi. Namun, proses pengelasan pada baja ini memerlukan perlakuan panas pasca-pengelasan atau *post-weld heat treatment* (PWHT) untuk mengurangi tegangan sisa dan meningkatkan kekuatan sambungan las. Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi waktu tahan PWHT (0, 4, 8, dan 12 jam) terhadap sifat mekanis hasil lasan baja *Grade 91* menggunakan metode pengelasan *Tungsten Inert Gas* (TIG) dengan kawat pengisi ER90S-B9. Pengujian tarik dan kekerasan dilakukan untuk mengevaluasi perubahan kekuatan dan ketahanan material akibat perlakuan panas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tanpa PWHT, daerah *heat affected zone* (HAZ) mengalami peningkatan kekerasan yang signifikan hingga 328 HV dan semakin meningkat mendekati daerah lasan akibat terbentuknya martensit, yang meningkatkan risiko retak dan kerapuhan. Penerapan PWHT dengan waktu tahan yang lebih lama efektif menurunkan kekerasan di zona HAZ hingga mencapai 203 HV dan pada zona lasan hingga mencapai 253 HV, sehingga meningkatkan ketangguhan material. Namun, waktu tahan PWHT yang terlalu lama dapat menyebabkan penurunan kekuatan tarik, pada logam induk turun hingga mencapai 684 MPa pada PWHT 12 jam dan pada logam lasan turun hingga mencapai 667 pada PWHT 8 jam. Oleh karena itu, pemilihan parameter PWHT yang optimal sangat penting untuk memastikan keandalan struktur lasan dalam aplikasi industri.

Kata kunci: Baja *Grade 91*, pengelasan TIG, PWHT, kekerasan, kekuatan tarik.

ABSTRACT

Grade 91 steel is a high-alloy steel widely used in power and petrochemical industries due to its resistance to high temperatures, oxidation, and corrosion. However, welding this steel requires post-weld heat treatment (PWHT) to reduce residual stresses and enhance toughness. This study analyzes the effect of varying PWHT holding times (0, 4, 8, and 12 hours) on the mechanical properties of TIG-welded Grade 91 steel using ER90S-B9 filler metal. Tensile and hardness tests were conducted to evaluate changes in strength and material resistance due to heat treatment. The results indicate that without PWHT, the heat-affected zone (HAZ) experiences a significant increase in hardness due to martensitic formation, which the risk of cracking and brittleness. Applying PWHT with a longer holding time effectively reduces hardness in the HAZ and weld zone, improving material toughness. However, excessive PWHT duration may lead to a reduction in tensile strength. Therefore, selecting optimal PWHT parameters is crucial to ensuring the reliability of welded structures in industrial applications.

Keywords: *Grade 91 steel, PWHT, TIG welding, hardness, tensile strength.*

PENDAHULUAN

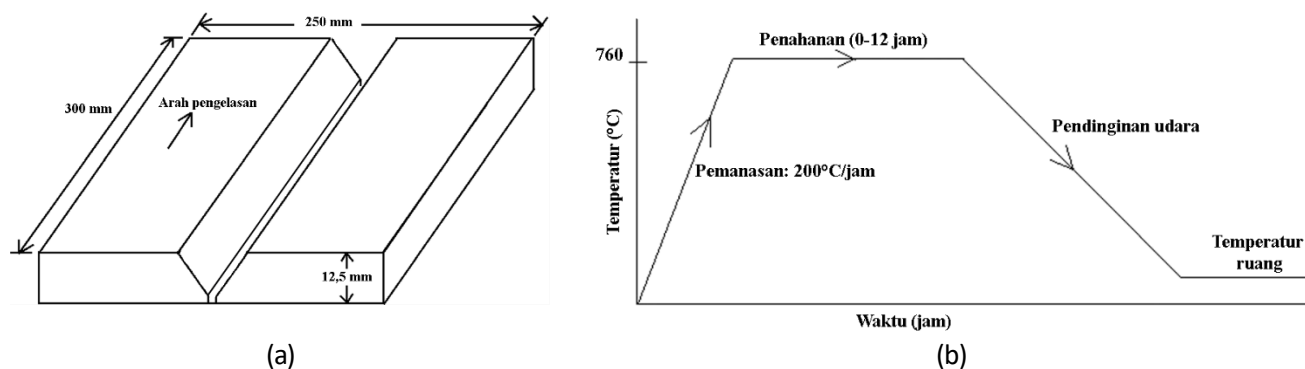
Baja *grade* 91 merupakan baja paduan yang dikembangkan dari baja 9Cr-1Mo dengan tambahan elemen vanadium (V), niobium (Nb), dan nitrogen (N). Kombinasi elemen ini meningkatkan kekuatan mekanis serta ketahanan terhadap oksidasi dan korosi pada suhu tinggi, menjadikannya material unggulan dalam aplikasi industri pembangkit listrik dan petrokimia. Dalam lingkungan kerja dengan temperatur tinggi, baja ini memiliki stabilitas struktur mikro yang baik, memungkinkan umur pakai yang lebih panjang dibandingkan baja konvensional [1]. Namun, karakteristik mekanis unggul baja *grade* 91 juga menuntut metode penyambungan yang cermat, khususnya dalam proses pengelasan, untuk menghindari risiko degradasi sifat mekanis dan munculnya retak akibat faktor hidrogen, yang dikenal sebagai *hydrogen-assisted cracking* (HAC). Fenomena HAC ini sering terjadi pada daerah lasan dan *heat affected zone* (HAZ) karena adanya diferensiasi struktur mikro akibat pemanasan dan pendinginan yang cepat selama proses pengelasan [2].

Metode pengelasan *tungsten inert gas* (TIG) sering digunakan untuk menyambung baja *grade* 91 karena memberikan kendali yang lebih baik terhadap penetrasi dan kualitas lasan. Namun, tantangan utama dalam pengelasan baja ini adalah potensi munculnya retakan akibat distribusi tegangan sisa dan perubahan struktur mikro pada daerah HAZ [3]. Oleh karena itu, proses perlakuan panas pasca pengelasan atau *post-weld heat treatment* (PWHT) menjadi sangat penting dalam memastikan integritas sambungan las [4]. PWHT bertujuan untuk mengurangi tegangan sisa, meningkatkan ketahanan terhadap retak, serta menormalkan kembali struktur mikro yang mengalami transformasi akibat panas pengelasan [5]. Parameter PWHT, terutama suhu dan durasi perlakuan panas, berpengaruh langsung terhadap sifat mekanis akhir dari sambungan las. Jika waktu PWHT terlalu singkat, pengurangan tegangan sisa tidak optimal. Sementara PWHT yang terlalu lama dapat menyebabkan pertumbuhan butir yang berlebihan, mengurangi kekuatan dan ketahanan terhadap deformasi material [6].

Penelitian mengenai pengaruh PWHT terhadap pengelasan baja *grade* 91 dengan metode TIG menjadi penting untuk memahami bagaimana durasi perlakuan panas dapat mempengaruhi sifat mekanis lasan. Studi ini menganalisis kekuatan tarik dan kekerasan material lasan yang telah dilakukan PWHT untuk menghindari retak akibat HAC pada pengelasan baja *grade* 91. Dengan memahami hubungan antara parameter PWHT dan kualitas sambungan las, dapat ditentukan kondisi perlakuan panas yang optimal guna memaksimalkan performa baja *grade* 91 dalam aplikasi industri temperatur tinggi. Hasil dan penemuan dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dan menjadi rekomendasi teknis bagi industri dalam mengembangkan prosedur pengelasan yang lebih andal.

METODE PENELITIAN

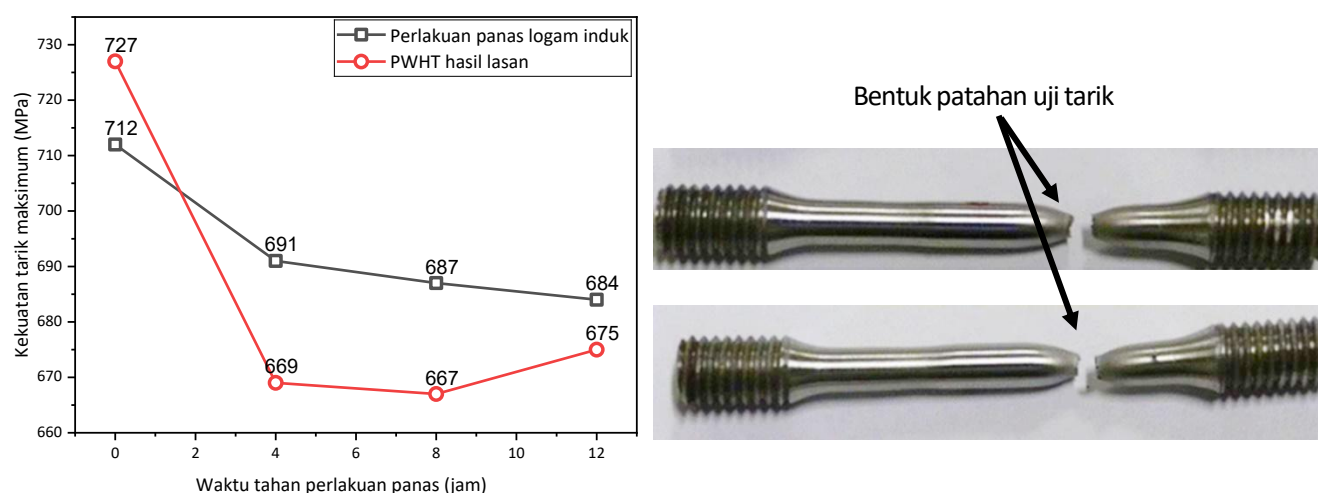
Penelitian ini menggunakan pelat baja paduan *Grade* 91 dengan ketebalan 12,5 mm. Pelat baja disambung menggunakan metode pengelasan TIG dengan kawat pengisi ER90S-B9. Kampuh las berbentuk bevel “V” dengan sudut 70°, memastikan penetrasi pengelasan yang optimal. Setelah proses pengelasan, sampel dilakukan proses PWHT dengan pemanasan pada suhu 760°C, kemudian ditahan dengan variasi waktu 0, 4, 8, dan 12 jam sebelum didinginkan menggunakan udara sekitar. Skema pengelasan dan proses PWHT ditunjukkan pada Gambar 1. Semua sampel uji kemudian diproses menjadi spesimen untuk uji tarik dan uji kekerasan. Pengujian tarik menggunakan alat *Universal Testing Machine* (UTM) mengikuti standar ASTM E8 dengan diameter 5 mm dan panjang 25 mm [7]. Sedangkan pengujian kekerasan menggunakan metode dan alat uji microhardness Vickers dengan pembebanan 500 kgf selama 15 detik [8]. Pengujian kekerasan diambil pada beberapa titik di 3 zona material (logam induk, HAZ, dan zona las). Hasil dari kedua uji tersebut dianalisis untuk mengevaluasi pengaruh PWHT terhadap sifat mekanis sambungan las.



Gambar 1. Ilustrasi pengelasan: (a) Skema pengelasan, dan (b) siklus perlakuan panas paska pengelasan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses pengelasan TIG pada baja *Grade 91* telah dilakukan, diikuti dengan proses PWHT dengan variasi waktu tahan sebagai upaya untuk meningkatkan kualitas lasan dengan menghindari retak akibat fenomena HAC. Pengujian tarik dan pengujian kekerasan dilakukan untuk menganalisis pengaruh waktu tahan pada proses PWHT terhadap kekuatan mekanis logam. Kekuatan tarik logam induk tanpa lasan mengalami penurunan dari 712 MPa, 691 MPa, 687 MPa, hingga 684 MPa pada perlakuan panas dengan waktu penahanan 0 jam, 4 jam, 8 jam, dan 12 jam secara berurutan, sedangkan kekuatan tarik pada logam hasil lasan menurun dari 727 MPa, 669 MPa, hingga 667 MPa pada PWHT dengan waktu tahan 0 jam, 4 jam, dan 8 jam secara berurutan, dan meningkat kembali hingga 675 MPa pada PWHT dengan waktu tahan 12 jam. Gambar 2 menunjukkan grafik nilai kekuatan tarik maksimum terhadap waktu penahanan PWHT serta bentuk patahan spesimen uji tarik. Grafik uji tarik memperlihatkan perbedaan respon antara perlakuan panas pada material induk dan PWHT pada material hasil lasan.

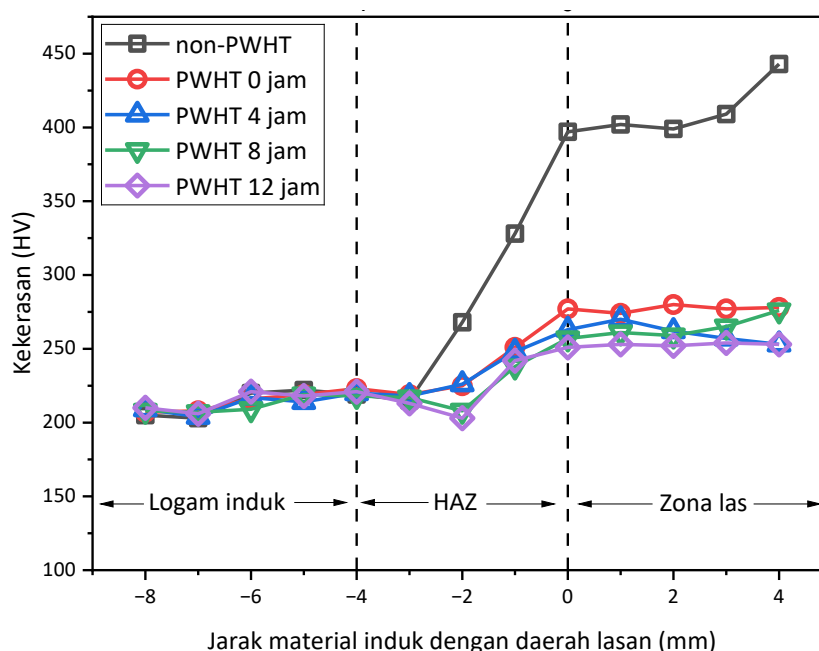


Gambar 2. Grafik nilai kekuatan tarik maksimum dan bentuk patahan hasil pengujian

Kekuatan tarik maksimum dari material induk yang diberi perlakuan panas yang sepadan dengan PWHT, mengalami sedikit penurunan seiring bertambahnya waktu tahan perlakuan panas, tetapi tetap berada dalam kisaran yang relatif tinggi. Sebaliknya, kekuatan tarik hasil lasan mengalami penurunan signifikan setelah PWHT 4 jam, mencapai nilai terendah hingga

667 MPa sebelum sedikit meningkat pada PWHT 12 jam. Hal ini menunjukkan bahwa proses PWHT mempengaruhi redistribusi tegangan sisa dan transformasi mikrostruktur di daerah lasan, yang dapat mengurangi ketahanan terhadap deformasi plastis [9]. Pada gambar patahan spesimen uji tarik untuk perlakuan 0 dan 12 jam, menunjukkan patahan yang lebih seragam dengan perpanjangan leher (*necking*), yang mengindikasikan jenis patahan ulet (*ductile*) terjadi pada daerah HAZ. Hal ini mengkonfirmasi bahwa PWHT juga memberikan pengaruh terhadap keuletan dan ketangguhan material hasil lasan [10].

Pengujian kekerasan Vickers spesimen non-PWHT menunjukkan nilai kekerasan untuk logam induk 205 HV, 203 HV, 220 HV, 223 HV, dan 219 HV; PWHT 0 jam nilai kekerasan 207 HV, 208 HV, 216 HV, 219 HV, dan 223 HV; PWHT 4 jam nilai kekerasan 209 HV, 204 HV, 217 HV, 214 HV, dan 220 HV; PWHT 8 jam nilai kekerasan 208 HV, 207 HV, 209 HV, 219 HV, dan 218 HV; dan untuk PWHT 12 jam nilai kekerasan 210 HV, 206 HV, 221 HV, 218 HV, dan 221 HV. Pengujian kekerasan Vickers spesimen non-PWHT menunjukkan nilai kekerasan untuk daerah HAZ 215 HV, 268 HV, 328 HV, dan 397 HV; PWHT 0 jam nilai kekerasan 219 HV, 225 HV, 251 HV, dan 277 HV; PWHT 4 jam nilai kekerasan 218 HV, 226 HV, 248 HV, dan 263 HV; PWHT 8 jam nilai kekerasan 217 HV, 208 HV, 238 HV, dan 257 HV; dan untuk PWHT 12 jam nilai kekerasan 213 HV, 203 HV, 242 HV, dan 251 HV. Pengujian kekerasan Vickers spesimen non-PWHT menunjukkan nilai kekerasan untuk daerah las 402 HV, 399 HV, 409 HV, dan 443 HV; PWHT 0 jam nilai kekerasan 274 HV, 280 HV, 277 HV, dan 278 HV; PWHT 4 jam nilai kekerasan 270 HV, 262 HV, 257 HV, dan 253 HV; PWHT 8 jam nilai kekerasan 261 HV, 259 HV, 265 HV, dan 276 HV; dan untuk PWHT 12 jam nilai kekerasan 253 HV, 252 HV, 254 HV, dan 253 HV. Gambar 3 menunjukkan grafik distribusi kekerasan terhadap jarak material induk menuju daerah lasan, dengan variasi waktu tahan dalam proses PWHT. Dari grafik terlihat bahwa material non-PWHT menunjukkan peningkatan kekerasan yang signifikan di daerah HAZ, dengan nilai mencapai lebih dari 400 HV. Kekerasan yang tinggi ini disebabkan oleh terbentuknya martensit hasil pendinginan cepat selama proses pengelasan, yang membuat material rentan terhadap retak dan kerapuhan [11]. Sebaliknya, sampel yang melalui proses PWHT menunjukkan distribusi kekerasan yang lebih merata dibandingkan non-PWHT. Seiring bertambahnya waktu tahan PWHT, kekerasan di daerah HAZ mengalami penurunan yang signifikan, mendekati kekerasan logam induk. Hal ini menunjukkan bahwa PWHT efektif dalam mereduksi fasa martensit dan memungkinkan terjadinya *tempering*, yang meningkatkan ketangguhan material [12].



Gambar 3. Grafik distribusi kekerasan pada 3 zona berbeda

Secara keseluruhan, hasil pengujian mekanis menunjukkan bahwa PWHT memiliki dampak signifikan terhadap sifat mekanis baja *Grade 91*, terutama dalam mengurangi tegangan sisa tetapi juga dapat menyebabkan penurunan kekuatan tarik jika

tidak dioptimalkan. Disisi lain, penerapan PWHT dengan waktu tahan yang lebih lama membantu menurunkan kekerasan di daerah HAZ dan zona las, sehingga mengurangi risiko retak akibat kerapuhan. Berdasarkan alasan tersebut, pemilihan parameter PWHT yang tepat menjadi faktor utama dalam aplikasi industri untuk memastikan keandalan struktur lasan [13].

KESIMPULAN

PWHT berperan penting dalam meningkatkan keandalan baja *Grade 91* dengan mengurangi tegangan sisa dan menurunkan kekerasan di daerah HAZ , sehingga mengurangi risiko retak. Penerapan PWHT dengan waktu tahan yang lebih lama efektif menurunkan kekerasan di zona HAZ hingga mencapai 203 HV dan pada zona lasan hingga mencapai 253 HV, sehingga meningkatkan ketangguhan material. Namun, waktu tahan yang tidak optimal dapat menurunkan kekuatan tarik. waktu tahan PWHT yang terlalu lama dapat menyebabkan penurunan kekuatan tarik, pada logam induk turun hingga mencapai 684 MPa pada PWHT 12 jam dan pada logam lasan turun hingga mencapai 667 pada PWHT 8 jam. Oleh karena itu, pemilihan parameter PWHT yang tepat sangat dibutuhkan untuk memastikan kualitas dan ketahanan struktur lasan dalam aplikasi industri. Dalam penelitian ini, PWHT dengan waktu tahan 0 jam adalah yang paling optimum untuk kekuatan tarik, sedangkan PWHT dengan waktu tahan 12 jam adalah yang paling optimum untuk ketangguhan material.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Abe, F. (2014). Grade 91 heat-resistant martensitic steel. In *Coal power plant materials and life assessment* (pp. 3-51). Woodhead Publishing.
- [2]. Dai, T., & Lippold, J. C. (2018). The effect of postweld heat treatment on hydrogen-assisted cracking of 8630/Alloy 625 overlay. *Welding in the World*, 62, 581-599.
- [3]. Budiyanto, E., Nugroho, E., & Masruri, A. (2017). Pengaruh diameter filler dan arus pada pengelasan TIG terhadap kekuatan tarik dan struktur mikro pada baja karbon rendah. *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 6(1).
- [4]. Sidiq, R. A. (2024). *Optimasi Sifat Fisik Dan Mekanik Sambungan Las TIG (Tungsten Inert Gas) Baja SS400 dengan Variasi Temperatur Pwht (Post Welding Heat Treatment)* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Indonesia).
- [5]. Fauzi, Y. R., & Arsyad, M. (2024). Pengaruh Post Weld Heat Treatment Proses Pengelasan MIG Terhadap Kekuatan Tarik Baja Karbon AISI 1045. *Journal of Energy, Materials, & Manufacturing Technology*, 3(02), 9-14.
- [6]. Yahya, H. M. (2024). Analisis Multiple Repair dan Holding Time Post Weld Heat Treatment Material SA 335 Grade P91 dengan Proses Pengelasan SMAW Terhadap Nilai Kekerasan dan Metalografi. In *CWEA-Conference on Welding Engineering and Its Application* (Vol. 1, No. 1, pp. 7-14).
- [7]. Mawahib, M. Z., Jokosisworo, S., & Yudo, H. (2017). Pengujian Tarik Dan Impak Pada Pengerjaan Pengelasan SMAW Dengan Mesin Genset Menggunakan Diameter Elektroda Yang Berbeda. *Kapal*, 14(1), 26-32.
- [8]. Budiyanto, E. (2020). *Pengujian Material*. Laduny Alifatama.
- [9]. Restu, E. W., Wahyudi, M. T., Karim, M., Anggara, D., Kusminah, I. L., & Wibowo, A. T. (2025). Pengaruh Variasi Temperatur dan Waktu Tahan Post Weld Heat Treatment pada Kekerasan Material A335 Grade P92 untuk Aplikasi Pembangkit Listrik. *Jurnal Teknologi Maritim*, 8(1), 42-48.
- [10]. Mansjur, Z., & Suharto, M. F. (2024). Pengaruh Media Pendingin Post-Weld Heat Treatment (PWHT) Terhadap Karakteristik Mekanik dan Struktur Mikro Baja Karbon Hasil Pengelasan Shielded Metal Arc Welding (SMAW). *Jurnal Mesin Nusantara*, 7(1), 126-137.
- [11]. Rusdi, F. M., & Istiqlaliyah, H. (2023). Study of the Effect of Welding Current Variations on Joint Strength and Microstructure of Cracker Lontongan Chopper Machine. *SINTEK JURNAL: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 17(2), 120-129.
- [12]. Arrochman, A. F. (2024). PENGARUH VARIASI MEDIA PENDINGIN SETELAH PWHT PENGELASAN SMAW BAJA ST37 TERHADAP KETANGGUHAN DAN STRUKTUR MIKRO. *Jurnal Teknik Mesin*, 13(02), 75-82.
- [13]. Fitrah, M. A., Balfas, M., Utami, H. H., Thahir, M. T., & Hafid, H. (2024). Karakterisasi Inklusi Terak Pada Pengelasan Pipa SA 106 Grade B Menggunakan Mikroskop Elektron Pemindai. *Journal of Chemical Process Engineering*, 9(1), 52-59.