



Pengaruh Energi Input *Micro-Plasma Arc Welding* Terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Sambungan Baja DIN 2311

Richard Shan Yota¹, Widodo Widjaja Basuki^{2*}, Ferry Rippun Gideon Manalu³, Sandra Octaviani B. Widiarto³

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Biosains, Teknologi, dan Inovasi,
Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya

²Program Studi Magister Teknik Mesin, Fakultas Biosains, Teknologi, dan Inovasi,
Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya

³Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Biosains, Teknologi, dan Inovasi,
Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya

E-mail: widodo.basuki@atmajaya.ac.id

ABSTRAK

Cetakan merupakan komponen yang penting pada proses cetakan injeksi plastik. Walaupun cetakan umumnya terbuat dari baja yang kuat dan tahan panas, akan tetapi ketika digunakan secara berulang-ulang dan terus menerus, cetakan akan mengalami kerusakan seperti goresan dan lekukan yang diakibatkan oleh pembebanan termal dan mekanis secara dinamis. Pembuatan cetakan baru membutuhkan biaya yang sangat tinggi. Perbaikan cetakan dengan pengelasan tradisional seperti pengelasan laser dan pengelasan *Tungsten Inert Gas* disamping membutuhkan biaya yang relatif tinggi juga membutuhkan keterampilan yang terjamin. Permasalahan tersebut dapat diatasi dengan *Micro-Plasma Arc Welding* (MPAW). Dengan metode pengelasan ini, proses peleburan material dan filler menjadi terpusat pada satu titik yang menyebabkan tidak terjadinya penyebaran panas berlebih pada material induk. Pengelasan pada baja paduan rendah DIN 2311, yang merupakan material cetakan injeksi plastik, dilakukan dengan energi pengelasan sebesar 120, 132, dan 144 J. Hasil pengelasannya diuji untuk mengetahui perubahan struktur mikro, distribusi nilai kekerasan dan kekuatan dari masing-masing spesimen. Dari pengujian terhadap material yang diproses melalui MPAAW dapat disimpulkan bahwa spesimen yang dihasilkan dengan energi pengelasan sebesar 132 J memiliki stuktur mikro dan distribusi kekerasan yang paling optimal sehingga dapat memiliki kekuatan yang setara kekuatan material asal sebelum pengelasan, dengan keuletan yang relatif tinggi yang terbukti dengan kemampuannya melakukan deformasi plastis sebesar 7,8% atau 3,2% lebih rendah dari kemampuan material asal.

Kata kunci :

Baja Paduan Rendah; DIN 2311; Energi Pengelasan; *Micro-Plasma Arc Welding*; *Plastic Injection Molding*.

ABSTRACT

Molds are important components in the plastic injection molding processes. Even though molds are generally made of strong and heat-resistant steel, but when used repeatedly and continuously, the mold will also experience damage such as scratches and dents caused by dynamic thermal and mechanical loading. Making new molds requires very high costs. Mold repairs using traditional welding such as laser welding and Tungsten Inert Gas welding, apart from requiring relatively high costs, also require sophisticated skills. This problem can be overcome with Micro-Plasma Arc Welding (MPAW). With this welding method, the process of melting the material and filler is concentrated at one point which prevents the

spread of excess heat to the parent material. Welding on DIN 2311 low alloy steel, which is often chosen as a plastic molding material, was carried out with weld energies of 120, 132 and 144 J. The welding results were tested to determine the microstructure evolution, hardness distribution and strength values of each specimen. From the test results of materials processed through MPAW, it can be concluded that the specimen produced with a weld energy of 132 J has the most optimal microstructure and hardness distribution so that it can have strength equivalent to the strength of the original material before welding, with relatively high ductility as proven by its ability to perform plastic deformation of 7.8% or just 3.2% lower than the ability of the original material.

Keywords :

DIN 2311; Low Alloy Steels; Micro Plasma arc Welding; Plastic Injection Molding; Weld Energy.

1. PENDAHULUAN

Pengelasan merupakan salah satu metode proses manufaktur yang sangat penting di industri. Metode ini dapat dikatakan efisien, fleksibel, ramah lingkungan dan efektif khususnya dalam hal biaya produksi. Dengan pengelasan, semua jenis metal dapat dilakukan penyambungan. Geometri-geometri yang sangat kompleks dan rumit dengan berbagai dimensi yang bervariasi dapat dihasilkan dengan baik dalam waktu yang relatif singkat dan penggunaan material yang efisien dan optimal [1].

Tingginya efisiensi, efektifitas dan fleksibilitas dari metode pengelasan sangat didukung oleh jenisnya yang sangat beragam, yang dimulai dari pengelasan lebur [2],[3],[4], seperti pengelasan *Tungsten Inert Gas* (TIG/GMAW welding), *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW), *Micro-Plasma Arc Welding* (MPAW), pengelasan laser, dsb hingga pada pengelasan padat [5],[6],[7], seperti pengelasan difusi, pengelasan eksplosif, *Friction Stir Welding* (FSW), dan sebagainya.

Disamping digunakan sebagai suatu metode yang sangat dapat diandalkan dalam proses manufaktur, kemampuan proses pengelasan untuk menghasilkan integritas struktur yang sangat bagus dengan biaya yang rendah juga menjadikannya sebagai suatu metode yang diprioritaskan untuk memperbaiki struktur yang rusak selama pemakaian.

Kolasa, *et al.* [8] melakukan penelitian tentang kemungkinan menggunakan metode pengelasan untuk meregenerasi permukaan

komponen mesin yang aus karena pemakaian yang intensif. Pada percobaannya, menurut A. Kolasa [8], melakukan pengukuran terhadap jumlah material yang aus pada mata rantai sekop ekskavator yang digunakan di tambang batu bara. Hasil pengukuran ini kemudian digunakan selanjutnya untuk melakukan pelapisan terhadap daerah yang aus tersebut dengan menggunakan metode TIG/GMAW.

Menurut S. Nowotny [9] melakukan studi terkait kepresisian menggunakan pengelasan laser untuk memperbaiki dan melapisi permukaan material serta mendeposisi metal secara tiga dimensi. Dibandingkan dengan TIG/GMAW, pengelasan laser hanya membutuhkan input energi ke benda kerja yang lebih sedikit untuk menjamin kekuatan pengelasan yang sama. Disamping itu, karakteristik yang menguntungkan pada pengelasan laser adalah kemampuannya mendeposisi material yang tepat bahkan pada bagian area yang sangat kecil sehingga dapat menghasilkan struktur tiga dimensi hingga kisaran 0,1 mm. Karena keakuratannya yang sangat tinggi pengelasan laser sangat sering digunakan untuk reparasi bilah dan cakram mesin pesawat serta turbin gas yang rusak.

Menurut S. Batool [10] melakukan penelitian yang berfokus pada perbandingan geometri las, distorsi, struktur mikro, dan sifat mekanis lembaran tipis SS 304 L (ketebalan 0,8 mm) yang dilakukan pengelasan menggunakan MPAW dan TIG/GMAW. Eksperimen awal dilakukan untuk mengidentifikasi parameter pemrosesan yang sesuai untuk MPAW dan

TIG/GMAW. Hasil MPAW menunjukkan ukuran struktur mikro yang lebih kecil dengan HAZ (*Heat Affected Zone*) yang sempit. Hal ini menyebabkan kekuatan dan keuletan yang lebih tinggi dibandingkan dengan pengelasan TIG/GMAW. Disamping itu, sampel hasil MPAW memiliki distorsi yang lebih rendah. Pengelasan MPAW terbukti menjadi proses yang sesuai untuk pengelasan lembaran tipis 304L dikarenakan kecepatan pengelasannya yang lebih tinggi dan sifat las yang lebih baik dibandingkan dengan pengelasan TIG/GMAW.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan untuk memperbaiki cetakan injeksi plastik yang mengalami kerusakan kecil pada permukaan kaviti dengan memanfaatkan metode pengelasan busur. Agar cetakan tersebut dapat berfungsi kembali dan memiliki performa yang baik, maka pengelasan harus dilakukan dengan menggunakan parameter yang optimal. Parameter yang dibahas di penelitian ini adalah energi pengelasan dalam hubungannya dengan struktur mikro, kekerasan dan kekuatan hasil pengelasan.

Sebagai metode pengelasan digunakan MPAW dengan *filler* material berupa baja DIN 2311 (P20), dikarenakan MPAW bisa dikatakan merupakan perpaduan antara TIG/GMAW dengan pengelasan laser. Keuntungan MPAW adalah konsentrasi busur yang tinggi sehingga bisa menghasilkan pengelasan yang presisi dan dapat mudah di kontrol dengan energi yang relatif kecil dibandingkan dengan TIG/GMAW, serta memiliki HAZ yang relatif sempit. Ditambah lagi, MPAW merupakan proses yang lebih murah dibandingkan dengan pengelasan laser dan proses yang kompatibel untuk banyak material cetakan mulai dari paduan aluminium, beragam jenis baja, paduan tembaga, paduan titanium hingga pada paduan nikel. Parameter pengelasan yang divariasikan adalah energi input yang sebesar 120 J, 132 J dan 144 J.

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah DIN 2311 yang

merupakan baja paduan rendah yang sangat sering digunakan untuk membuat cetakan injeksi plastik. Komposisi DIN 2311 dapat dilihat di Tabel 1. Untuk dapat memahami struktur mikro dan sifat mekanik hasil MPAW, maka dilakukan pengamatan metalografi, pengujian kekerasan dan pengujian tarik. Spesimen untuk pengamatan metalografi di bagian *base metal*, HAZ, dan *fusion zone* dipreparasi sedemikian rupa melalui proses pengamplasan dan pemolesan. Setelah kehalusan permukaan yang diinginkan tercapai, spesimen kemudian di etsa dengan menggunakan larutan Nital selama 4 detik untuk selanjutnya dilakukan pengamatan struktur mikro dengan menggunakan mikroskop cahaya.

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode Vickers Mikro dengan beban tekan sebesar 1 kgf. Spesimen yang telah disiapkan dilakukan MPAW. Ekses material filler yang melebihi permukaan spesimen diratakan terlebih dahulu menggunakan mesin frais. Kemudian agar mencapai permukaan yang sesuai untuk pengujian kekerasan Vickers Mikro, maka permukaan spesimen dihaluskan dengan menggunakan *Surface Grinding Kuroda*. Pengujian Vickers Mikro dilakukan dalam bentangan di daerah *base metal*, HAZ hingga mencapai *fusion zone* sebanyak 3 bentangan (*lines*) untuk setiap spesimen. Setiap bentangan dilakukan pengujian kekerasan sebanyak 20 titik.

Agar performa mekanis global hasil MPAW yang berupa kekuatan dan keuletan dapat dikuantifikasi dengan baik, maka dilakukan pengujian tarik dengan menggunakan spesimen dengan geometri sesuai standar ASTM E8. Mesin uji tarik yang digunakan adalah *Hung Ta HV 9501*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Spesimen hasil MPAW menunjukkan struktur mikro yang sangat berbeda di daerah *base metal*, HAZ hingga *fusion zone* seperti yang terlihat pada Gambar 1 untuk tiga jenis energi pengelasan yang berbeda.

Tabel 1. Komposisi Kimia dari DIN 2311 [11]

Fe	C	Cr	Mn	Si	S	P	Ni/V	Mo
Bal.	0,33-0,45	1,8-2,1	Max. 1,5	Max 1.0	0,03	0,03	Max. 1,0	0,15-0,25

Pada gambar tersebut terlihat secara keseluruhan butiran kristal yang relatif besar di daerah *base metal* jika dibandingkan dengan ukuran kristal yang berada di *fusion zone*. Transisi kristal dari ukuran besar yang berada di *base metal* ke arah ukuran yang jauh lebih kecil di *fusion zone* terlihat di daerah HAZ.

Di berbagai proses pengelasan lebur, seperti TIG/GMAW, ukuran kristal di *fusion zone* umumnya lebih besar dibandingkan daerah *base metal*, dimana di HAZ ukuran kristal berada diantara ukuran kristal di *fusion zone* dan *base metal*. Ukuran butiran yang sangat besar tersebut pada pengelasan TIG disebabkan oleh energi panas yang tinggi yang menyebabkan laju pendinginan yang rendah. Hal ini memberikan akibat negatif terhadap sifat mekanik dari hasil lasan sehingga terjadi penurunan kekuatan, keuletan dan ketangguhan material yang signifikan. Akan tetapi, pada MPAW ini, kerapatan energi yang sangat tinggi yang disebabkan karena busur plasma yang terfokus menyebabkan kebutuhan energi panas total yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan pengelasan TIG sehingga terbentuknya struktur kristal dengan ukuran yang semakin kecil dari *base metal* ke arah *fusion zone* seperti yang terlihat pada Gambar 1. Ukuran kristal seperti demikian sangatlah menguntungkan disebabkan karena defek 2 dimensi yang banyak menyebabkan dislokasi yang berada di dalam kristal sulit untuk bergerak merambat sehingga memberikan efek penguatan pada material secara keseluruhan. Disamping itu, rasio yang besar antara batas kristal terhadap volume material menyebabkan pembelokan yang intensif terhadap jalur perambatan retakan. Pembelokan yang intensif tersebut menyebabkan penyerapan energi yang besar yang meningkatkan energi regangan (*strain energy*) dalam material. Oleh karenanya, disamping memiliki kekuatan (*strength*)

yang baik, material hasil MPAW dengan energi pengelasan yang tepat juga memiliki ketangguhan (*toughness*) yang relatif tinggi.

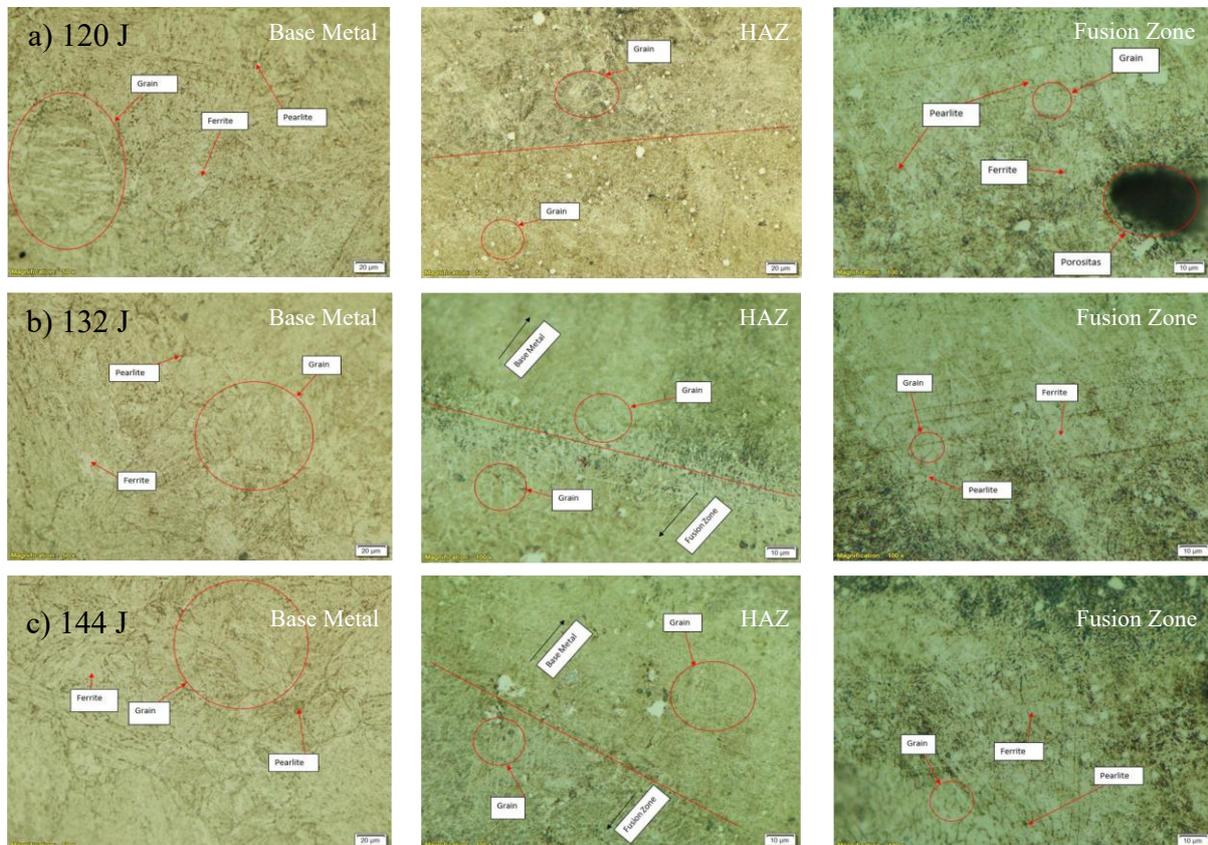
Pengaruh energi yang digunakan pada proses MPAW terhadap struktur mikro hasil pengelasan terlihat pada Gambar 1a) hingga 1c). Dengan energi pengelasan sebesar 120 J (Gambar 1a)), kristal-kristal di HAZ relatif lebih besar dibandingkan dengan kristal-kristal di daerah yang sama yang dihasilkan dengan energi pengelasan yang lebih tinggi (Gambar 1b dan 1c). Fenomena ini terjadi dikarenakan energi pengelasan yang terlalu rendah menyebabkan panas yang dihantarkan melalui HAZ juga tidak terlalu tinggi sehingga rekristalisasi di HAZ tidak homogen. Kristal-kristal dengan energi regangan yang rendah tidak membentuk kristal baru sehingga memiliki ukuran yang masih relatif besar. Rekristalisasi yang tidak homogen ini merupakan penyebab utama terbentuknya terganggan sisa yang dapat menurunkan kekuatan dan keuletan material hasil MPAW. Meningkatnya energi pengelasan menjadi 132 J menyebabkan peningkatan panas di HAZ sehingga rekristalisasi yang homogen dengan terbentuknya kristal-kristal kecil seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1b dapat terjadi. Peningkatan energi pengelasan selanjutnya menjadi 144 J tidak lagi memberikan manfaat, bahkan sebaliknya memberikan efek negatif, dimana panas yang berlebihan di HAZ menyebabkan tumbuhnya butiran kristal yang lebih besar (Gambar 1c) yang tentunya kembali dapat menurunkan kekuatan dan keuletan material di daerah tersebut.

Hal ini sangat berbeda dengan kristal-kristal di daerah *fusion zone*, dimana makin tingginya energi pengelasan, makin lama pula waktu yang diperlukan oleh leburan metal untuk proses solidifikasi yang menyebabkan tumbuhnya kristal-kristal yang semakin besar seperti yang terlihat di *fusion zone* pada Gambar 1a-c).

Selain permasalahan struktur mikro terlihat juga terbentuknya porositas di *fusion zone* pada spesimen hasil MPAW dengan energi pengelasan 120 J. Pembentukan porositas ini dapat disebabkan karena adanya gas yang terlarut di dalam *base metal* pada saat proses produksi. Seperti yang terjadi pada proses MPAW Ti6Al4V yang dilakukan oleh F. Karimzadeh [12], porositas pada hasil MPAW disebabkan oleh gas hidrogen yang larut dalam *base metal*, dimana sebelum pengelasan, kadar gas hidrogen adalah sebesar 90 ppm dan setelah pengelasan kadar berkurang di daerah *fusion zone* menjadi sebesar 55 ppm. Penurunan kadar tersebut dikarenakan terjadinya aglomerasi gas hidrogen di daerah leburan metal, dimana gaya angkat aglomerasi gas dapat menyebabkan gas meninggalkan leburan metal apabila terdapat waktu yang mencukupi sebelum proses solidifikasi dimulai. Pada penelitian ini, energi pengelasan sebesar 120 J sepertinya terlalu rendah sehingga menyebabkan proses

solidifikasi yang terlalu cepat. Aglomerasi gas yang terbentuk tidak mendapatkan waktu yang cukup untuk menghasilkan gaya angkat yang memadai untuk meninggalkan leburan metal. Aglomerasi gas tersebut kemudian terperangkap dan membentuk porositas di daerah *fusion zone*. Seiring dengan ditingkatkannya energi pengelasan menjadi 132 J dan 144 J, waktu untuk solidifikasi menjadi diperlambat sehingga memberikan kesempatan kepada aglomerasi gas yang terbentuk untuk memiliki ukuran yang cukup besar untuk dapat meninggalkan leburan metal sehingga porositas dapat dihindari. Porositas yang berjumlah banyak dengan ukuran yang relatif besar tentunya akan mempengaruhi kekuatan dan ketangguhan dari material hasil MPAW.

Seperti halnya kekerasan pada hasil pengelasan TIG, kekerasan hasil MPAW memiliki distribusi yang tersebar dari *base metal*, HAZ hingga *fusion zone*, dimana terdapat peningkatan kekerasan yang relatif tinggi di daerah HAZ.



Gambar 1. Struktur Mikro Spesimen yang Dilakukan Pengelasan dengan Menggunakan Energi Sebesar a) 120 J, b) 132 J, dan c) 144 J

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2, untuk semua proses MPAW dengan energi pengelasan dari 120 J hingga 144 J, daerah HAZ memiliki kekerasan yang umumnya sekitar 30% hingga 50% lebih tinggi dibandingkan daerah *base metal* dan *fusion zone*. Hanya terdapat 1 bentangan distribusi yang menunjukkan kelainan, dimana nilai kekerasan di HAZ yang 100% lebih besar dari *base metal* (Gambar 2b).

Peningkatan kekerasan seiring dengan pengelasan busur khususnya MPAW ini sering terjadi dikarenakan densitas energi panas yang tinggi terfokus pada jalur pengelasan yang sempit di *fusion zone*. Panas yang tersalur melalui HAZ juga relatif singkat, sehingga dapat menyebabkan laju pendinginan yang tinggi yang dapat menyebabkan terbentuknya fasa-fasa metastabil di daerah tersebut.

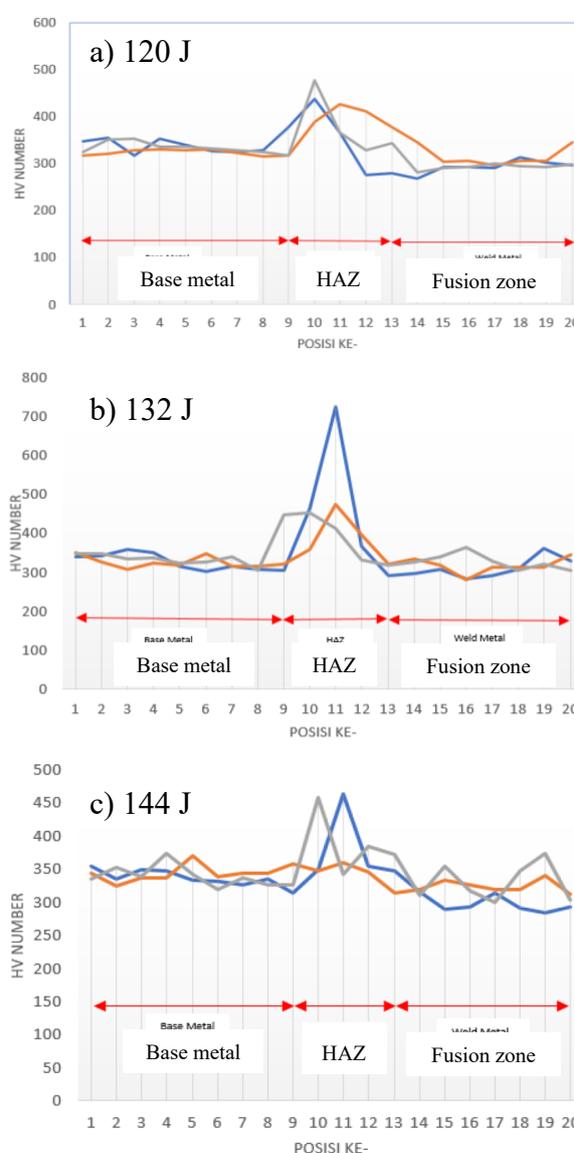
Terlalu tingginya peningkatan kekerasan yang disebabkan oleh terbentuknya fasa-fasa metastabil yang mungkin juga dibarengi dengan terbentuknya tegangan sisa di HAZ selama proses pengelasan dapat menyebabkan turunnya keuletan dan meningkatnya kemungkinan kegagalan pada komponen hasil pengelasan.

Walaupun perbedaan nilai kekerasan maksimum di HAZ untuk tiga energi pengelasan yang berbeda tidak terlalu signifikan, seperti yang terlihat di Gambar 2, lebar daerah di HAZ dan sekitarnya yang memiliki kekerasan lebih tinggi dari *base metal* dan *fusion zone* ternyata memiliki perbedaan, dimana untuk hasil MPAW dengan energi pengelasan 120 J (Gambar 2a), daerah eksek kekerasan tersebut lebih lebar dibandingkan dengan hasil MPAW dengan energi pengelasan lainnya yang lebih tinggi (Gambar 2b dan 2c). Semakin lebarnya daerah eksek kekerasan tentunya tidak terlalu diinginkan karena akan menyebabkan turunnya fleksibilitas material hasil pengelasan dan menurunkan ketangguhan material khususnya di daerah tersebut.

Struktur mikro dan nilai kekerasan yang terlokalisasi di daerah *base metal*, HAZ dan *fusion zone* yang berbeda-beda

untuk setiap energi pengelasan yang bervariasi tentunya akan menghasilkan sifat mekanik material secara global yang berbeda pula. Pada penelitian ini, sifat mekanik hasil MPAW secara global diperoleh melalui pengukuran tegangan dan regangan material saat dilakukan pengujian tarik (*tensile tests*).

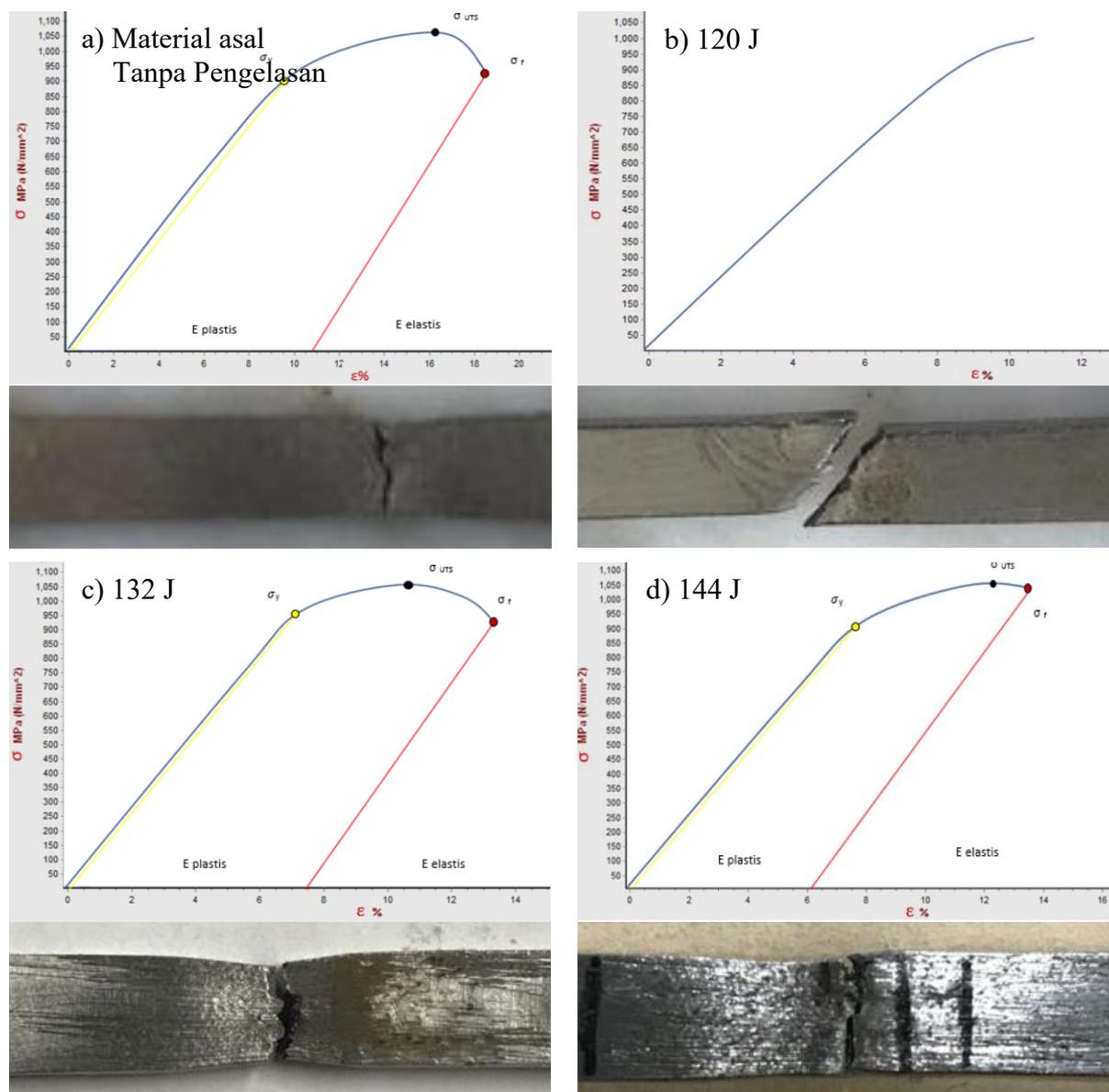
Hasil pengukuran material proses MPAW dan material asal tanpa pengelasan ditunjukkan pada diagram tegangan-regangan yang terlihat di Gambar 3 yang disertai juga foto spesimen setelah pengujian selesai dilakukan.



Gambar 2. Distribusi Kekerasan dari *Base Metal* Hingga *Fusion Zone* untuk Spesimen Hasil MPAW dengan Energi Sebesar a) 120 J, b) 132 J, dan c) 144 J

Pengujian tarik tersebut menunjukkan bahwa energi pengelasan 132 J dan 144 J dapat menghasilkan pengelasan yang memiliki kekuatan maksimum yang sama atau sedikit lebih tinggi dari material asal tanpa pengelasan yang sebesar 1052 MPa. Penggunaan energi pengelasan sebesar 120 J dapat dikatakan terlalu rendah sehingga kekuatan maksimum yang dapat dicapai hanya sebesar 1005 MPa. Penurunan

kekuatan yang hanya sekitar 4,5% dari material asal tidak dapat diabaikan. Hal ini disebabkan menurunnya kekuatan tersebut juga dibarengi dengan turunnya kemampuan spesimen melakukan deformasi plastis. Regangan plastis pada spesimen pengelasan dengan energi 120 J yang hanya sekitar 1% dapat dikatakan sangat rendah jika dibandingkan dengan material asal yang regangan plastisnya mencapai 11%.



Gambar 3. Kurva Tegangan-Regangan (σ - ϵ) Material Asal Tanpa Pengelasan dan Spesimen Hasil MPAW untuk Setiap Energi Pengelasan yang Berbeda (Atas), Disertai Foto Kondisi Spesimen Setelah Dilakukan Uji Tarik (Bawah)

Pada foto yang berada dibawah Gambar 3b terlihat jelas daerah patahan yang getas yang ditunjukkan dengan hampir

tidak terlihat adanya pengecilan luas penampang di sekitar daerah patahan tersebut. Seperti penjelasan di atas terkait

struktur mikro dan nilai kekerasan material hasil pengelasan, rendahnya kekuatan dan keuletan pada spesimen pengelasan dengan energi 120 J sangat mungkin disebabkan oleh rekristalisasi yang tidak homogen di HAZ yang mengakibatkan ukuran kristal yang sangat berbeda dan terbentuknya tegangan sisa yang relatif besar. Disamping itu, fleksibilitas daerah HAZ yang rendah dan porositas di daerah fusion zone juga sangat berperan dalam menurunkan keuletan dan kekuatannya.

Berbeda dengan spesimen MPAW yang dihasilkan dengan energi 120 J, pengelasan dengan energi sebesar 132 J dapat meningkatkan keuletan material pengelasan dengan bertambahnya regangan plastis menjadi 7,8%. Akan tetapi dengan lebih ditingkatkannya lagi energi pengelasan menjadi 144 J, keuletan hasil lasan mulai kembali turun dengan regangan plastis menjadi sekitar 6%. Penurunan keuletan dengan meningkatnya energi pengelasan terlihat dengan membandingkan foto-foto yang berada di bawah Gambar 3c dan 3d, dimana daerah patahan pengelasan dengan energi 132 J terlihat memiliki penyempitan luas penampang yang sangat jelas dibandingkan dengan daerah patahan pengelasan dengan energi 144 J. Hal ini sejalan dengan struktur mikro yang terbentuk di HAZ dan *fusion zone* dengan ukuran butiran kristalnya yang lebih besar dibandingkan dengan hasil pengelasan dengan energi yang lebih rendah.

SIMPULAN

Penelitian ini berfokus pada proses MPAW terhadap baja paduan rendah DIN 2311 yang umumnya digunakan sebagai material cetakan injeksi plastik. Proses MPAW ini menggunakan *filler* dengan komposisi yang sama dengan DIN 2311.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa proses MPAW dengan energi pengelasan sekitar 132 J dapat menghasilkan struktur mikro yang optimal dimana terjadi rekristalisasi yang homogen di HAZ yang tidak menyebabkan terbentuknya tegangan sisa yang terlalu tinggi. Disamping itu,

dengan energi pengelasan sebesar itu, panas yang terdapat pada leburan metal cukup menyebabkan gas yang terlarut dalam metal terangkat dan meninggalkan larutan metal sehingga tidak membentuk porositas di daerah *fusion zone*. Terlebih lagi, panas tersebut tidak cukup untuk menyebabkan butiran kristal di *fusion zone* dan HAZ membesar. Pengujian kekerasan di daerah *base metal*, HAZ dan *fusion zone* menunjukkan kekerasan yang meningkat di HAZ akan tetapi dengan energi pengelasan sebesar 132 J, lebar daerah di HAZ dan sekitarnya yang mengalami eksese kekerasan lebih kecil dibandingkan dengan pengelasan dengan energi 120 J dan sama apabila dibandingkan dengan penggunaan energi pengelasan sebesar 144 J.

Hasil yang didapatkan dari pengamatan struktur mikro dan pengujian kekerasan sangat sesuai dengan kekuatan dan keuletan material hasil MPAW secara global yang diperoleh dari pengujian tarik. Hasil MPAW dengan energi pengelasan sebesar 132 J menunjukkan kekuatan yang sama dengan material asal tanpa pengelasan dan lebih tinggi sekitar 4,5% dibandingkan hasil MPAW dengan energi 120 J. Keunggulan dari hasil MPAW dengan energi pengelasan 132 J terlihat di keuletannya yang masing-masing 6,8% dan 1,8% lebih tinggi dibandingkan dengan hasil MPAW dengan energi pengelasan 120 J dan 144 J. Jika dibandingkan dengan keuletan material asal tanpa pengelasan yang sebesar 11%, maka keuletan dari hasil MPAW dengan energi 132 J lebih rendah sekitar 3,2%. Tingginya keuletan material hasil MPAW dengan energi pengelasan 132 J teridentifikasi juga melalui pengamatan langsung pada spesimen yang telah patah, dimana terlihat jelas terdapatnya pengecilan luas penampang (*necking*) yang sangat tinggi di sekitar daerah patahan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Schmidt, H. Dorner, and E. Tenckhoff, "Manufacture of complex parts by shape welding," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 171, no. 1, pp.

- 120-127, 1990, doi:
[https://doi.org/10.1016/0022-3115\(90\)90356-R](https://doi.org/10.1016/0022-3115(90)90356-R).
- [2] K. Kumar, Ch. S. Kumar, M. Masanta, and S. Pradhan, "A review on TIG welding technology variants and its effect on weld geometry," *Materials Today: Proceedings*, vol. 50, no. 5, pp. 999-1004, 2022, doi:
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.308>.
- [3] V. Kumar, S.K. Yadav, K. Vijetha, et al., "An investigation of the effect of GMAW and SMAW processes on mechanical and microstructural properties of welded E350 grade steel," *Sci Rep* 15, 36338, 2025, doi:
<https://doi.org/10.1038/s41598-025-20140-4>.
- [4] A. R. Biswas, N. Banerjee, P. Mondal, S.R. Maity, B. Sen, A. Bhowmik, and M. I. Ammarullah, "A critical review of laser welding of steel with titanium alloys for biomedical applications: challenges, developments, and properties" *Philosophical Magazine Letters*, vol. 105, no. 1, pp. 1-25, 2025, doi:
<https://doi.org/10.1080/09500839.2025.2537089>.
- [5] W.W. Basuki, and J. Aktaa, "Diffusion bonding between W and EUROFER97 using V interlayer", *Journal of Nuclear Materials*, vol. 429, No. 1–3, pp. 335-340, 2012, doi:
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2012.05.049>.
- [6] B.B. Sherpa, and R. Rani, "Advancements in explosive welding process for bimetallic material joining: A review", *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*, vol. 6, 100078, 2024, doi:
<https://doi.org/10.1016/j.jalmes.2024.100078>.
- [7] W.W. Basuki, E.D. Ginting, H-B.N. Hudaya, H. Sutanto, A. De Fretes, dan S-O.B. Widiarto, "Friction Stir Welding pada Paduan Aluminium 6061 dan HDPE menggunakan Mesin Frais" *Cylinder: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, vol. 10, no. 1, pp. 1-10, 2024, doi:
<https://doi.org/10.25170/cylinder.v10i1.5497>.
- [8] A. Kolasa, T. Sarnowski, and P. Cegielski, "Regeneration of Worn Out Machine Parts Surfaces by Automatic Welding", *Weld. Tech. Rev.*, vol. 87, no. 1, pp. 50-57, 2015, doi:
<https://doi.org/10.26628/wtr.v87i1.25>.
- [9] S. Nowotny, S. Scharek, E. Beyer, et al., "Laser Beam Build-Up Welding: Precision in Repair, Surface Cladding, and Direct 3D Metal Deposition", *J. Therm. Spray Tech.*, vol. 16, pp. 344–348, 2007, doi:
<https://doi.org/10.1007/s11666-007-9028-5>.
- [10] S. Batool, M. Khan, S.H.I. Jaffery, and A. Khan, "Analysis of weld characteristics of micro-plasma arc welding and tungsten inert gas welding of thin stainless steel (304L) sheet", *Journal of Materials Design and Applications*, vol. 230, no. 6, pp. 1-13, 2015, doi:
[doi:10.1177/1464420715592438](https://doi.org/10.1177/1464420715592438).
- [11] Thyssenkrupp Steel, "Thyssenkrupp 2311 Mould Steel", 2019. <https://thyssenkruppsteel.wordpress.com/tag/din-2311-steel/> (accessed Oct. 31, 2025).
- [12] F. Karimzadeh, M. Salehi, A. Saatchi, and M. Meratian, "Effect of Microplasma Arc Welding Process Parameters on Grain Growth and Porosity Distribution of Thins Sheet Ti6Al4V Alloy Weldment," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 20, no. 2, pp. 205–219, 2005, doi:
<https://doi.org/10.1081/AMP-200041857>.