

Pengaruh Profil Sambungan Double Chamfer terhadap Mikrostruktur pada sambungan Rotary Friction Welding Baja AISI 304

Fatkhur Rokhman¹, Sri Hastuti^{1*}, Nurhadi¹, dan Adityo Noor Setyo Hadi Darmo¹

¹Program Studi S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tidar

Jl. KaptenSuparman No. 39 Potrobangsari, Kota Magelang, Jawa Tengah, Indonesia

*E-mail: hastutisrimelin@untidar.ac.id (corresponding author)

Abstrak

Pengaplikasian las fusi kerap menghadapi masalah pada pengelasan logam silinder pejal. Las gesek menjadi salah satu alternatif pengelasan dengan deformasi yang sangat minim. *Rotary Friction Welding* (RFW) merupakan metode pengelasan keadaan padat yang menghasilkan sambungan tanpa menggunakan logam pengisi melalui panas akibat gesekan dan tekanan aksial. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi sudut profil *double chamfer* terhadap karakteristik struktur mikro sambungan RFW baja AISI 304. Material yang digunakan berupa baja AISI 304 berdiameter 16 mm dengan variasi sudut *double chamfer* 25°, 35°, dan 55°. Proses pengelasan dilakukan menggunakan parameter konstan berupa kecepatan putar 1450 rpm, tekanan gesek 14 MPa, dan waktu gesek 6 detik. Pengujian yang dilakukan meliputi uji komposisi kimia menggunakan *Optical Emission Spectrometer* (OES) dan pengamatan struktur mikro berdasarkan standar ASTM E3. Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposisi kimia material telah sesuai dengan standar ASTM A240. Variasi sudut *chamfer* memengaruhi distribusi panas, deformasi plastis, dan homogenitas struktur mikro pada daerah sambungan las. Variasi sudut 25° menghasilkan struktur mikro paling homogen dengan dominasi fasa austenit dan butir halus akibat rekristalisasi dinamis, sedangkan sudut 55° menghasilkan struktur mikro yang kurang homogen akibat pembangkitan panas yang terlokalisasi. Berdasarkan hasil pengamatan, variasi sudut *double chamfer* 25° menghasilkan karakteristik struktur mikro sambungan las terbaik.

Kata kunci: Baja AISI 304, Double Chamfer, Rotary friction welding, Struktur mikro

1. Pendahuluan

Teknik pengelasan material sangat penting dalam industri manufaktur. Pengaplikasian las fusi masih menghadapi masalah, seperti kesulitan saat mengelas logam silinder pejal, pengelasan hanya dapat dilakukan pada sisi luar permukaannya, sedangkan pengelasan sisi dalamnya sulit terjangkau *filler* logam. *Friction welding*, menjadi salah satu solusi yang dapat diterapkan, karena pengelasan ini dilakukan pada fase padat di kedua materialnya atau disebut sebagai *solid state welding* [1]

Rotary Friction Welding (RFW) teknik pengelasan gesek yang menghasilkan panas dengan menciptakan gesekan antara dua permukaan logam. Panas pengelasan gesek berasal dari transformasi energi mekanik menjadi energi termal selama proses gesekan antar permukaan material yang akan meningkatkan suhu, sehingga benda mencapai temperatur plastis dalam arah aksial dengan jarak yang relatif pendek [2].

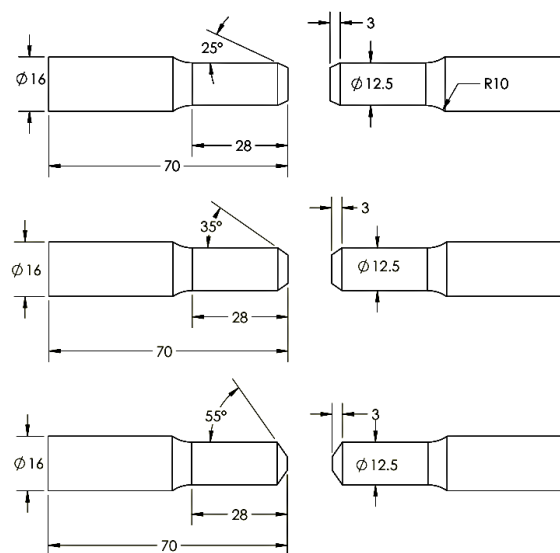
Baja tahan karat AISI 304 banyak digunakan di industri pengolahan makanan dan minuman, farmasi, kimia, minyak dan gas (migas). Namun pada kenyataannya, penyambungan baja AISI 304 dengan teknik pengelasan busur sering kali menimbulkan kesulitan, terutama terkait dengan perubahan struktur mikro yang dapat berdampak pada kualitas mekanik material. Keunggulan utama metode RFW yaitu efektivitasnya dalam menghasilkan sambungan las yang kuat dengan deformasi termal yang lebih sedikit. Selain itu, metode ini lebih hemat biaya dan menguntungkan, karena tidak membutuhkan material tambahan [3]. Namun, beberapa variabel, termasuk kecepatan rotasi, durasi gesekan, tekanan aksial, dan profil sambungan, harus dipertimbangkan untuk mencapai sambungan yang optimal. Elemen-elemen ini mempengaruhi kualitas lasan jika ditinjau dari struktur mikro sambungan dan kekuatan tariknya [4], [5].

Pemberian sudut *chamfer* merupakan salah satu inovasi yang sedang dikembangkan dalam proses pengelasan gesekan. Memberikan sudut kemiringan pada permukaan benda kerja berkontribusi terhadap kenaikan suhu selama pengelasan sehingga memengaruhi distribusi panas dan deformasi plastis serta implikasinya terhadap struktur mikro sambungan baja

AISI 304 hasil RFW [6]. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis komposisi kimia baja AISI 304 dan pengaruh variasi sudut double chamfer terhadap struktur mikro sambungan las. Evaluasi dilakukan melalui uji spektrometer OES untuk mengetahui komposisi kimia baja AISI 304, dan uji struktur mikro untuk mengidentifikasi struktur baja pada logam induk, HAZ, dan pusat las.

2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif, yaitu metode penelitian eksperimental yang melibatkan eksperimen langsung terhadap benda uji untuk mengamati hasil dari pengelasan yang diberikan pada spesimen. Spesimen las menggunakan material silinder baja AISI 304 ukuran $\varnothing 16$ mm x 70 mm, dengan profil sambungan *double chamfer* dengan panjang *chamfer* 3 mm, dan variasi sudut 25° , 35° , dan 55° . Sebanyak 3 benda uji dilas menggunakan metode *Rotary Friction Welding* (RFW). Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui komposisi kimia baja AISI 304, dan struktur mikro baja AISI 304 hasil sambungan las *rotary friction welding*. Dimensi ukuran ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Dimensi ukuran spesimen *friction welding*

Proses pembuatan sambungan las dilakukan melalui metode las gesek *rotary friction welding* (RFW). Tahapan awal dimulai dari membuat spesimen las seperti ditunjuk gambar 1, kemudian dilakukan pengelasan dengan parameter pengelasan kecepatan putar mesin 1450 Rpm, tekanan gesek 140 bar /14 MPa, dan waktu gesek 6 detik. Setelah dilakukan pengelasan hasil lasan dipotong memanjang kemudian dibuat *mounting* menggunakan campuran resin polyester dan katalis dengan perbandingan 100:1. *Mounting* kemudian di potong, lalu di haluskan menggunakan mesin *grinding and polishing* dengan amplas grit 100, 400, 800, 1000 dan 1200. Kemudian untuk mendapatkan permukaan yang mengkilap digunakan mesin *polishing* dan *polishing compound* [7].

Pengujian komposisi kimia baja dilakukan menggunakan alat uji *Optical Emission Spectrometer* (OES) FM Expert Hitachi. Pengujian struktur mikro dilakukan menggunakan *metallurgy microscope with inverted* (UNION 2900) dengan lensa perbesaran 50 $\times$, dengan mengacu pada standar pengujian ASTM E3. Spesimen uji struktur mikro dibuat sesuai standar tersebut, kemudian dilakukan pengetsaan mengacu pada standar ASTM E407-99 *microetching metal and alloy* nomor 186. Komposisi: 10 ml Asam fluorida(HF), 5 ml Asam nitrat (HNO₃), dan 85 ml air (*aquades*). Data yang diperoleh dari hasil pengujian berupa komposisi kimia baja AISI 304 dan foto struktur mikro baja AISI 304.

3. Hasil dan pembahasan

Pengujian dilakukan pada baja AISI 304 yang telah melalui pengelasan gesek *Rotary Friction Welding* dengan modifikasi geometri permukaan gesek yaitu variasi sudut *chamfer* 25°, 35° dan 55°. Pengelasan dilakukan dengan parameter las kecepatan putar mesin 1450 rpm, tekanan gesek 140 bar, dan waktu gesek 6 detik. Pengujian dilakukan yaitu uji komposisi kimia baja AISI 304 dan struktur mikro standar ASTM E3.



Gambar 2. Hasil sambungan las *rotary friction welding*



Gambar 3. Spesimen uji struktur mikro

3.1. Uji komposisi kimia baja AISI 304

Uji komposisi kimia logam dilakukan untuk mengetahui unsur-unsur yang terkandung pada material AISI 304, dan memastikan kesesuaian unsur yang diuji dengan nilai kandungan berada dalam rentang spesifikasi standar AISI 304 bukan grade lainnya.

Tabel 1. komposisi kimia baja AISI 304

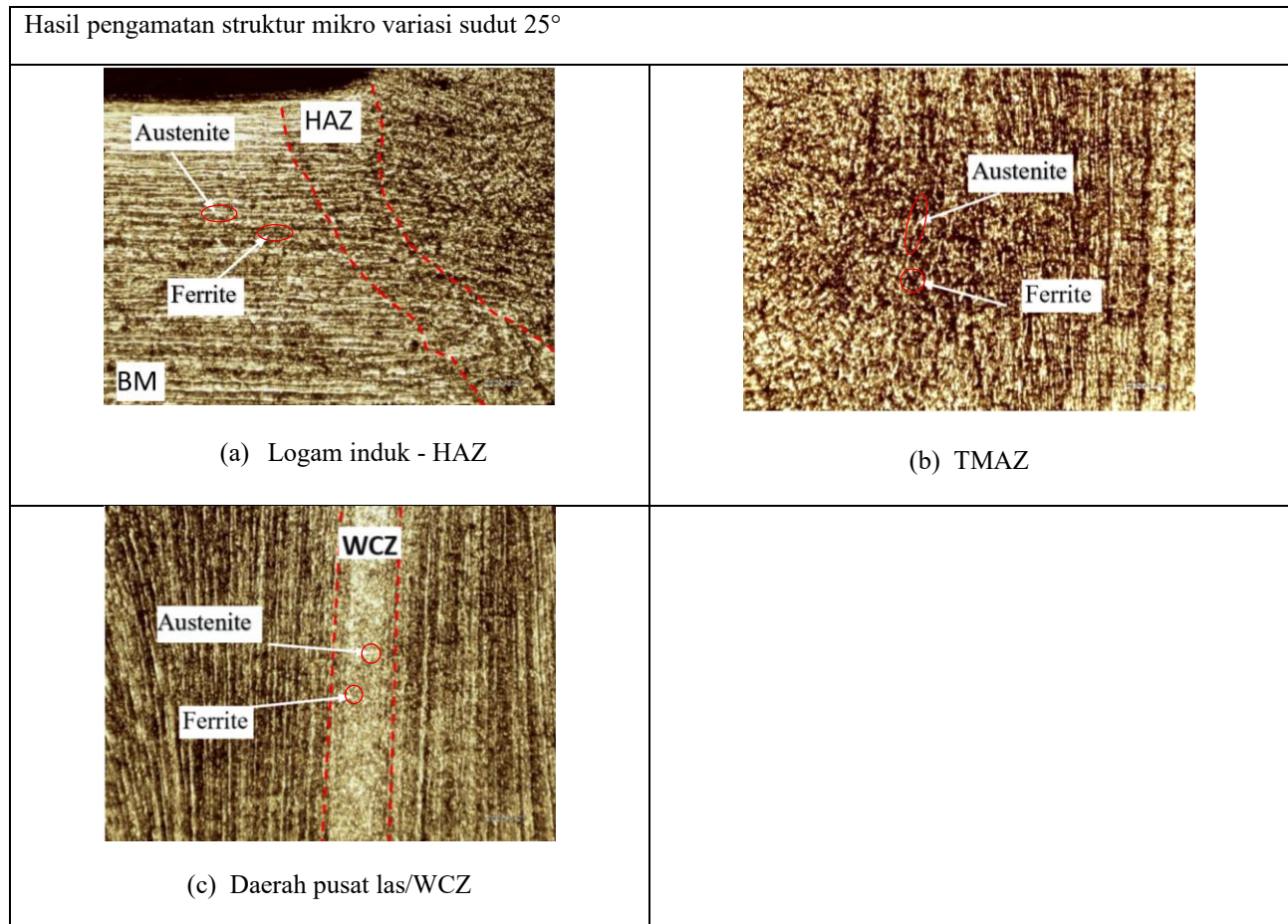
Fe	Cr	Ni	Mn	Cu	P	Mo	Co	Si	V	C	Sb
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
71,49	18,3	8.0	0,98	0,677	0,354	0,275	0.185	0,0789	0,0169	0,0123	0,0089

Berdasarkan hasil uji komposisi kimia logam yang tercantum pada tabel 1, dapat dilihat bahwa spesimen yang diuji mengandung unsur-unsur penyusun yaitu besi (Fe), kromium (Cr), nikel (Ni), mangan (Mn), tembaga (Cu), fosfor (P), molibdenum (Mo), kobalt (Co), silikon (Si), vanadium (V), karbon (C), dan antimon/*stibium* (Sb). Besi merupakan unsur utama pada baja AISI 304. Unsur kromium (Cr) sebesar 18,3% berada dalam rentang standar AISI 304 yaitu 18–20%. Unsur ini berperan penting dalam membentuk lapisan pasif yang meningkatkan ketahanan korosi. Sementara itu, kandungan nikel (Ni) sebesar 8,0% sesuai dengan spesifikasi standar AISI 304 yaitu 8–10,5% dan berfungsi menstabilkan struktur austenitik pada temperatur ruang. Kandungan karbon sebesar 0,0123% menunjukkan bahwa material ini termasuk dalam kategori baja tahan karat dengan kadar karbon rendah, sehingga memiliki sifat mampu bentuk yang baik serta ketahanan terhadap korosi [8] .

3.2. Uji struktur mikro

Zona las yang terdapat pada material AISI 304 setelah dilakukan pengelasan *rotary friction welding* (RFW) antara lain logam induk/*basemetal* (BM), zona terdampak panas/*heat affected zone* (HAZ), zona terdampak panas-deformasi plastis/*thermo mechanically affected zone* (TMAZ), dan zona pusat las/*weld center zone* (WCZ) [9].

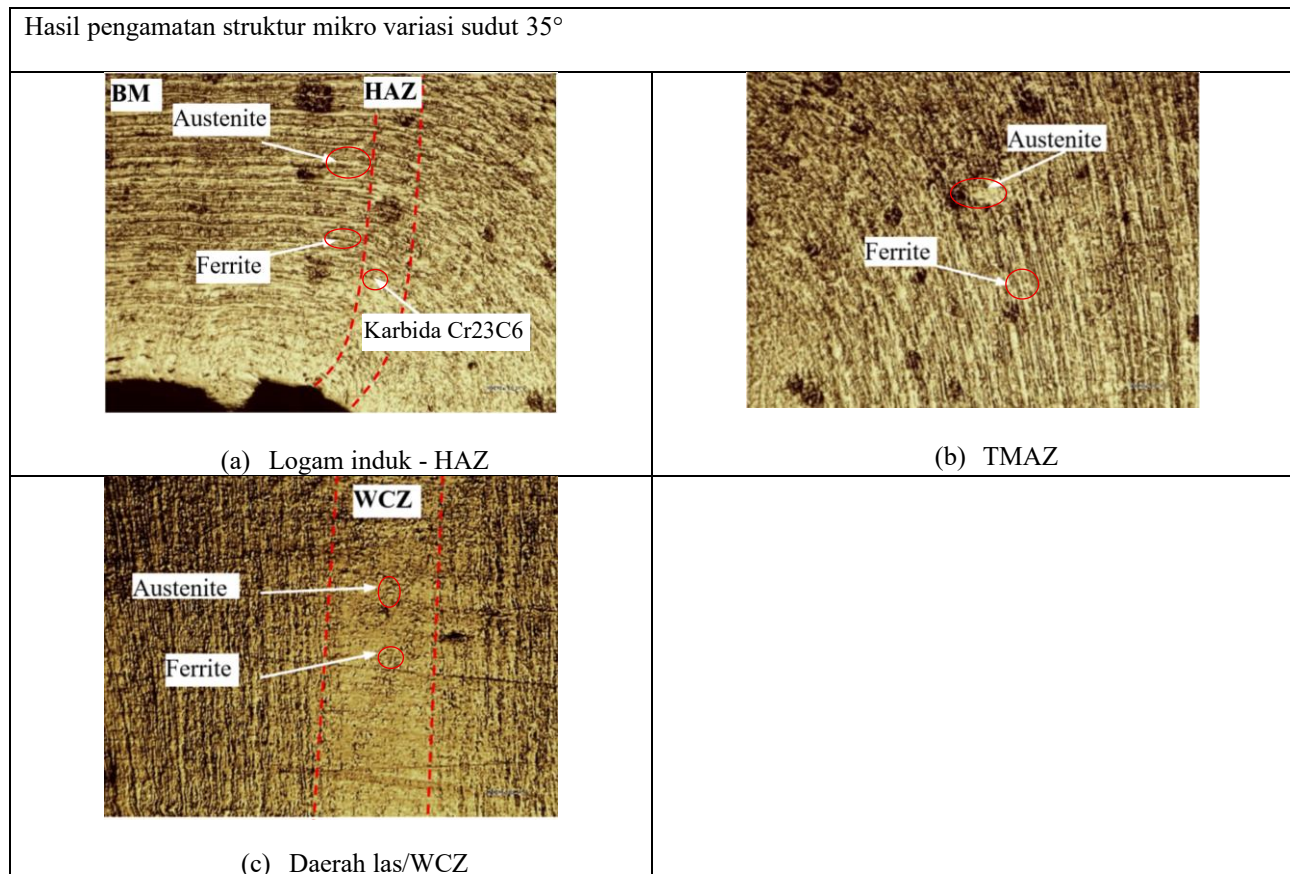
Hasil dari pengamatan ini digunakan untuk mengetahui fasa dari spesimen AISI 304 setelah dilakukan pengelasan *rotary friction welding* (RFW) dengan variasi sudut *double chamfer* 25°, 35°, dan 55°.



Gambar 4. Struktur mikro Variasi sudut 25°

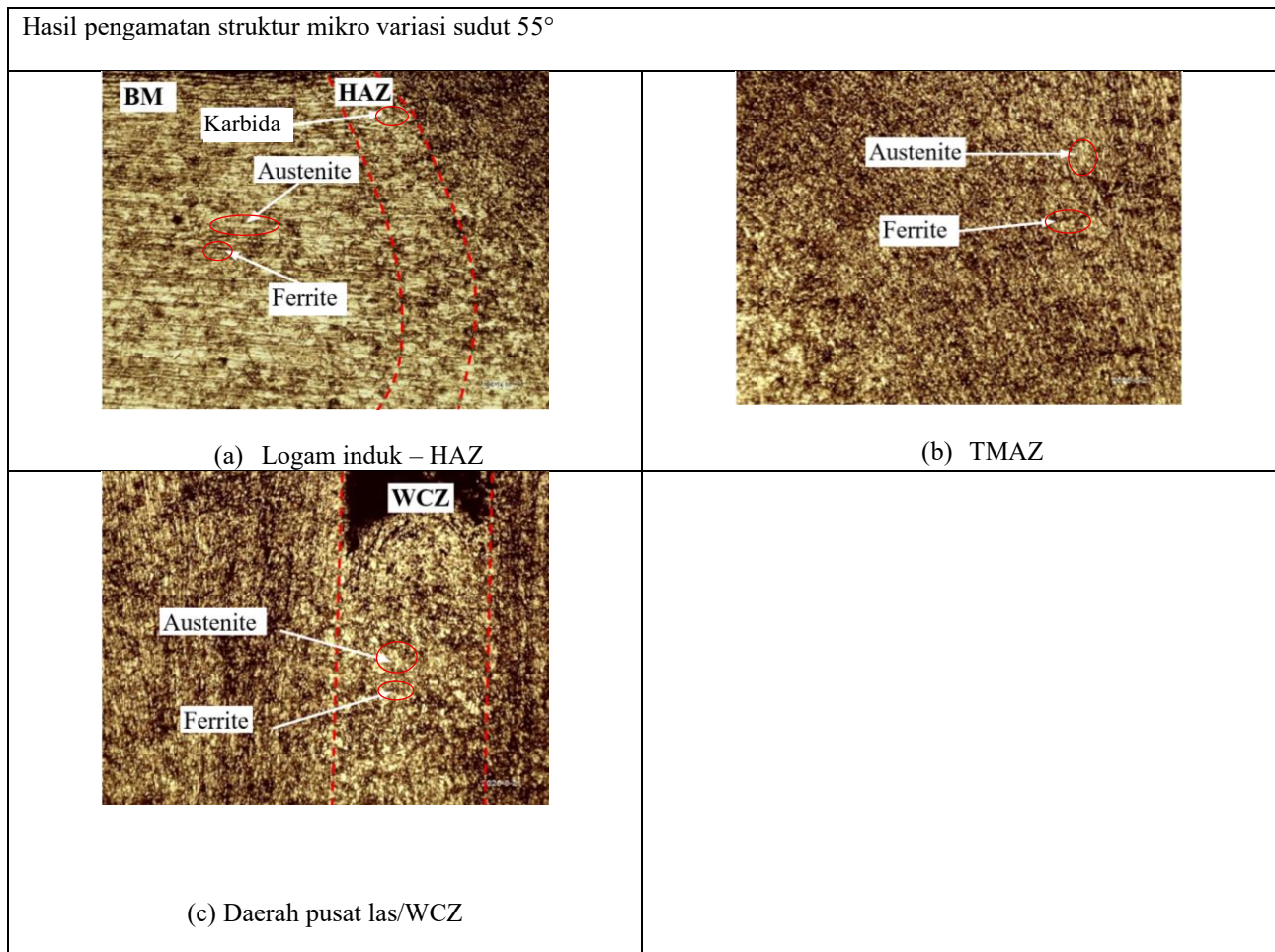
Pada gambar 4(a) terlihat bahwa struktur mikro yang terbentuk di logam induk/*basemetal* meliputi *austenite* dan *ferrite*. Gambar 4(a) ini juga menampilkan struktur butir halus yang seragam dari *basemetal* baja tahan karat 304. Struktur tersebut menunjukkan bagian material yang tidak terpengaruh oleh panas yang dihasilkan selama pengelasan. Pada daerah HAZ 1 yang ditunjukkan gambar 4(a) struktur yang terbentuk adalah *austenite*, *ferrite*, dan ditemukan sedikit karbida, butir mulai terdistorsi dan terlihat lapisan tipis gelap. Struktur terdeformasi pada sambungan ditunjukkan pada gambar 4(b) merupakan daerah TMAZ yang didominasi struktur *austenite* dengan butir yang lebih besar. Struktur ini telah mengalami deformasi lebih besar, ditandai dengan butir memanjang yang terdeformasi. Struktur terdeformasi tersebut secara bertahap berkurang mendekati antarmuka hingga menghasilkan butir seragam yang besar pada antarmuka. Batas antara antarmuka/*interface* dan awal struktur terdeformasi terlihat pada Gambar 4(c) daerah ini merupakan daerah pusat las/*weld centre zone* (WCZ). Tanda-tanda deformasi ditunjukkan sebagai lapisan tipis dan gelap di antara antarmuka dan struktur terdeformasi. Gradasi struktur ini menandakan terjadinya proses rekristalisasi. *Flash* panas yang tinggi mendorong terjadinya rekristalisasi, yang memungkinkan pertumbuhan butir dan menghasilkan butir kasar pada daerah

antarmuka [10]. Struktur mikro di daerah pusat las menunjukkan kondisi yang relatif homogen akibat pembangkitan panas yang berlangsung secara bertahap dan distribusi deformasi plastis yang merata. Kondisi termomekanik ini mendorong terjadinya rekristalisasi dinamis yang stabil tanpa panas berlebih, sehingga ukuran butir di pusat las cenderung lebih seragam dibandingkan HAZ [11].



Gambar 5. Struktur mikro Variasi sudut 35°

Daerah logam induk AISI 304 pada gambar 5(a), terlihat struktur *austenite*, dan *ferrite*, dengan fasa *austenite* yang sangat dominan. Hal itu terjadi karena sifat lunak dari fasa *austenite* yang memiliki struktur kristal *face-centered cubic* (FCC) dan paduan austenitik tetap elastis terlepas dari suhu atau laju regangan kecuali perubahan fasa terjadi. Daerah HAZ AISI 304 pada gambar 5(a) terlihat struktur *austenite*, *ferrite*, dan sedikit karbida, dengan fasa *ferrite* mulai terlihat lebih banyak, munculnya struktur karbida meningkatkan kekerasan logam namun menurunkan elastisitas logam [12]. Fasa karbida terbentuk akibat terjadinya laju difusi atom-atom Cr melewati volume butir dan selama batas butir yang jenuh dengan ketidaksempurnaan dari kisi kristal [13]. Pada gambar 5(b) merupakan daerah TMAZ AISI 304, struktur yang teridentifikasi yaitu *austenite* dan *ferrite* yang terdeformasi mulai dari garis antar muka hingga daerah HAZ. Pada gambar 5(c) merupakan daerah pusat las dengan struktur yang dominan *austenite* yang lebih besar dan struktur *ferrite*. Struktur mikro menunjukkan transisi yang lebih jelas antara logam induk, HAZ, dan WCZ. Daerah HAZ mengalami pertumbuhan butir akibat pemanasan, sedangkan di pusat las terjadi rekristalisasi dinamis yang lebih efektif karena kombinasi suhu tinggi dan deformasi plastis yang cukup. Kondisi ini menghasilkan struktur mikro daerah pusat las yang lebih halus dan seragam [14].



Gambar 6. Struktur mikro Variasi sudut 55°

Daerah logam induk AISI 304 pada gambar 6(a) terlihat struktur *austenite*, dan *ferrite*, dengan fasa *austenite* yang sangat dominan. Daerah HAZ AISI 304 pada gambar 6(a) terlihat struktur *austenite*, *ferrite*, dan sedikit karbida, dengan fasa *ferrite* mulai terlihat pertumbuhan butir lebih besar, munculnya struktur karbida meningkatkan kekerasan logam namun menurunkan elastisitas logam. Pada gambar 6(b) merupakan daerah TMAZ AISI 304, struktur yang teridentifikasi yaitu *austenite* dan *ferrite* yang terdeformasi mulai dari garis antar muka hingga daerah HAZ. Pada gambar 6(c) merupakan daerah pusat las dengan struktur yang dominan *austenite* hasil rekristalisasi dinamis yang lebih besar dari variasi sudut 25°, dan 35°, pada daerah pusat las juga teridentifikasi struktur *ferrite* dalam jumlah kecil. Variasi sudut *double chamfer* 55°, struktur mikro di pusat las menunjukkan indikasi pelunakan berlebih akibat pembangkitan panas yang sangat cepat dan terlokalisasi. Di sisi lain, pada area sekitar *flash* panas, deformasi plastis yang ekstrem dan pendinginan relatif cepat menghasilkan struktur mikro yang lebih terdeformasi, sehingga dapat meningkatkan nilai kekerasan lokal. Kondisi ini menyebabkan struktur mikro sambungan menjadi kurang homogen dibandingkan variasi sudut *chamfer* lainnya [15].

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian pengaruh profil sambungan *double chamfer* terhadap mikrostruktur pada sambungan *rotary friction welding* baja aisi 304, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil uji komposisi kimia, material memenuhi spesifikasi standar *stainless steel* baja AISI 304, kandungan unsur utama seperti Cr dan Ni yang berada dalam rentang standar, sehingga memiliki ketahanan korosi yang baik.

2. Variasi sudut *double chamfer* memengaruhi struktur mikro baja AISI 304 hasil *Rotary Friction Welding*, terutama pada bentuk dan ukuran butir. Pada sudut 25°, struktur austenit di daerah las tampak halus dan rapat akibat rekristalisasi dinamis yang stabil dan homogen. Pada sudut 35°, daerah las masih didominasi austenit halus dan seragam, namun ferrit di TMAZ melebar dengan jarak antarbutir yang lebih renggang. Sementara itu, sudut 55° menunjukkan deformasi plastis yang lebih ekstrem sehingga butir austenit membesar dan zona transisi menjadi lebih lebar. Dengan demikian, sudut 25° merupakan kondisi paling optimal karena menghasilkan distribusi struktur mikro yang paling homogen dibandingkan variasi 35° dan 55°, sehingga dapat diaplikasikan pada poros mesin blending pada industri pengolahan makanan.

Daftar Pustaka

- [1] Sugiarto, M. S. Ma'Arif, H. Purwanto, W. J. E. Mahendra, and H. Oswari, "Characteristic Of Friction Stir Welding Weld Joint Of Aa 6061 On Initial Temperature Difference", *MM Science Journal*, vol. 2023-March, pp. 6385–6392, Mar. 2023, doi: 10.17973/MMSJ.2023_03_2022094.
- [2] P. Haryanto, S. Suharto, H. Haryanto, and K. Purbono, "Peningkatan Ketrampilan Dalam Bidang Las Dengan Menggunakan Teknologi Las Gesek Bagi Masyarakat Pelaku Bidang Las Di Semarang", *Jurnal Hilirisasi Technology kepada Masyarakat (SITECHMAS)*, vol. 2, no. 1, Apr. 2021, doi: 10.32497/sitechmas.v2i1.2613.
- [3] Y. Purwaningrum, F. Fatha, and A. Data Pratama, "Optimasi Sambungan Rotary Friction Welding (RFW) pada Aluminium 4017 dengan Variasi Bentuk Profil Sambungan", *Simposium Nasional RAPI XXI-2022 FT UMS*, no. 2022: Prosiding Simposium Nasional Rekayasa Aplikasi Perancangan dan Industri, 165-170.
- [4] H. Purwanto, M. Dzulfikar, I. Syafaat, S. Imanu, and N. Kholis, "Effects of pressure in continuous drive friction welding on aisi 304 and a36," *MM Science Journal*, vol. 2020, no. November, pp. 4138–4142, Nov. 2020.
- [5] H. Firmanto, S. Candra, and M. A. Hadiyat, "Rotary friction welding of 304 stainless steel: parametric study, mechanical properties, and microstructure of the joint," *Disseminating Information on the Research of Mechanical Engineering-Jurnal Polimesin*, vol. 22, no. 2, 2024.
- [6] B. S. Penggalih, "Pengaruh Double Chamfer Terhadap Kekuatan Tarik Dan Struktur Mikro Pada Sambunganlas Gesek Aisi 304," *Gorontalo Journal of Infrastructure and Science Engineering*, no. 6(2), pp. 50–55, Oct. 2024.
- [7] D. L. I. Saputra and D. Luhur, "Pembuatan Spesimen Contoh Sampel Logam untuk Analisis Struktur Mikro", *Prosiding Hasil Penelitian dan Kegiatan Tahun 2018*, Pusat Teknologi Limbah Radioaktif, Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN), INIS Report INIS-ID--90, pp. 23–27, 2019.
- [8] A. Prastyo, F. Ibrahim, and M. Badaruddin, "Analysis of Mechanical Properties of CD 304 SS at High-Temperature Transient Conditions," *Disseminating Information on the Research of Mechanical Engineering-Jurnal Polimesin*, vol. 20, no. 2, p. 169, 2022, [Online]. Available: <http://e-jurnal.pnl.ac.id/polimesin>
- [9] A. R. McAndrew, P. A. Colegrove, C. Bühr, B. C. D. Flipo, and A. Vairis, "A literature review of Ti-6Al-4V linear friction welding," Mar. 01, 2018, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.003.
- [10] H. Firmanto, S. Candra, and M. A. Hadiyat, "Rotary friction welding of 304 stainless steel: parametric study, mechanical properties, and microstructure of the joint," *Disseminating Information on the Research of Mechanical Engineering-Jurnal Polimesin*, vol. 22, no. 2, 2024, [Online].
- [11] M. S. Anwar, R. R. Widjaya, L. B. A. Prasetya, A. A. Arfi, E. Mabruri, and E. S. Siradj, "Effect of Grain Size on Mechanical and Creep Rupture Properties of 253 MA Austenitic Stainless Steel," *Metals (Basel)*, vol. 12, no. 5, May 2022, doi: 10.3390/met12050820.

- [12] R. Ramadani, Darajat. Muhammad Wahyu, and Wijoyo, “Pengaruh Post Weld Heat Treatment (Pwht) Terhadap Struktur Mikro Dan Kekerasan Sambungan Las Stainless Steel,” *TRAKSI: Majalah Ilmiah Teknik Mesin*, vol. 20 No. 2, p. 72, 2020, Accessed: Apr. 30, 2026. [Online].
- [13] Z. V. Gambu, “*An Investigation of Welded 304 and 316L Stainless Steel Rods through Rotary Friction Welding Process*,” M.Tech thesis, Dept. Mechanical Engineering Science, Faculty of Engineering and the Built Environment, University of Johannesburg, Johannesburg, South Africa, Dec. 2020.
- [14] M. Nadya, Y. S. Irawan, and Moch. A. Choiron, “Pengaruh Double Chamfer terhadap Distribusi Suhu dan Daerah Zpl pada Sambungan Las Gesek AL6061 dengan Simulasi Komputer,” *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 12, no. 2, pp. 433–445, Aug. 2021, doi: 10.21776/ub.jrm.2021.012.02.20.
- [15] A. Priambudi, I. Dirja, and R. Hanifi, “Pengaruh Double Chamfer Terhadap Kekuatan Tarik Dan Struktur Mikro Pada Hasil Sambungan Las Gesek Al 6061,” *Quantum Teknika : Jurnal Teknik Mesin Terapan*, vol. 6, no. 1, pp. 1–5, Oct. 2024, doi: 10.18196/jqt.v6i1.23039.