SINERGI *Polmed*: JURNAL ILMIAH TEKNIK MESIN
Homepage jurnal: http://ojs.polmed.ac.id/index.php/Sinergi/index

KARAKTERISTIK DAERAH TERPENGARUH PANAS DAN KEKUATAN TARIK SAMBUNGAN BAJA SM490 HASIL PENGELASAN GMAW UNTUK APLIKASI RANGKA BOGIE

Nur Syahidah Aini[a], Richardo Serafim[a], Siti Maulidina[a], Nurmagita Pamursari[a], Arif Setyaji[a], Farid Nanda Syanur[b], Nurwanda Sari[a], Muhammad Rizki Arif[a]

[a]*Program Studi Teknik Perkeretaapian, Fakultas Infrastruktur dan Kewilayahan, Institut Teknologi Sumatera, Jl. Terusan Ryacudu, Lampung, 35365, Indonesia*
[b]*Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera, Jl. Terusan Ryacudu, Lampung, 35365, Indonesia*

**Penulis korespondensi: nur.aini@ka.itera.ac.id; nursyahidahainun@gmail.com, (N.S. Aini), Tel.: +62856-5867-5850*

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:
Diajukan pada 25 April 2026
Direvisi pada 14 September 2026
Disetujui pada 14 Oktober 2026
Tersedia daring pada 31 Oktober 2026

Kata kunci:
Pengelasan GMAW; baja SM490; daerah terpengaruh panas; kuat arus; kekuatan tarik.

Keywords:
Gas metal arc welding; SM490 steel; heat-affected zone; welding current; tensile strength.

ABSTRAK

Rangka bogie kereta api memerlukan sambungan las yang andal karena menerima beban statis dan dinamis selama operasi. Penelitian ini mengevaluasi lebar daerah terpengaruh panas (HAZ), hasil pemeriksaan tak merusak, dan kekuatan tarik sambungan baja SM490 yang dilas dengan proses *Gas Metal Arc Welding* (GMAW). Pengujian dilakukan pada pengaturan arus utama 190, 220, dan 260 A serta satu konfigurasi arus bertingkat. Parameter pengelasan dicatat, kemudian sambungan diperiksa menggunakan pengujian ultrasonik, penetran cair, dan partikel magnetik, dilanjutkan pengamatan makro serta uji tarik. Lebar HAZ pada kelompok 190, 220, dan 260 A masing-masing sebesar 3,0; 2,5; dan 2,0 mm, sedangkan kelompok arus bertingkat mencapai 4,0 mm dan menunjukkan indikasi penetrasi akar yang tidak lengkap. Kekuatan tarik maksimum berturut-turut sebesar 548,5; 533,9; 549,5; dan 541,7 MPa. Kelompok 260 A menghasilkan HAZ tersempit dan kekuatan tarik tertinggi pada kondisi yang diuji. Namun, perubahan tegangan dan kecepatan pengelasan serta belum tersedianya data pengulangan membatasi penarikan kesimpulan kausal maupun penetapan parameter optimum. Hasil ini memberikan dasar evaluasi awal pengendalian mutu sambungan baja SM490 untuk aplikasi rangka bogie.

ABSTRACT

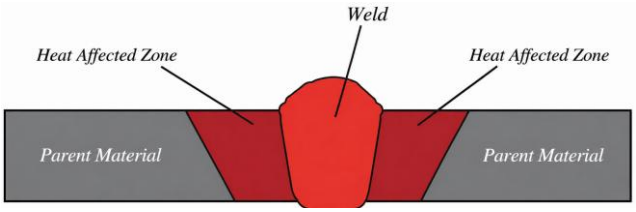
Railway bogie frames require reliable welded joints to withstand static and dynamic loads during service. This study evaluated heat-affected zone (HAZ) width, non-destructive testing findings, and tensile strength of SM490 steel joints produced by gas metal arc welding (GMAW). Three nominal welding-current settings (190, 220, and 260 A) and one mixed-current configuration were investigated. Welding parameters were recorded, followed by ultrasonic, liquid penetrant, and magnetic particle testing, macrostructural examination, and tensile testing. The measured HAZ widths were 3.0, 2.5, and 2.0 mm for the 190, 220, and 260 A groups, respectively. The mixed-current group exhibited a HAZ width of 4.0 mm and a reported indication of incomplete root penetration. Maximum tensile strengths were 548.5, 533.9, 549.5, and 541.7 MPa for the four groups, respectively. Among the tested configurations, the 260 A group exhibited the narrowest HAZ and the highest tensile strength. However, concurrent changes in welding voltage and travel speed, together with the absence of independent replicate measurements, limit causal interpretation and prevent a definitive optimum from being established. These findings provide preliminary evidence to inform quality control of welded SM490 joints intended for railway bogie-frame applications.

1. PENGANTAR

Keandalan rangka bogie merupakan salah satu aspek penting dalam keselamatan operasi kereta api. Komponen ini menopang badan kereta, meneruskan beban vertikal dan lateral, serta menerima gaya dinamis selama kereta bergerak. Sambungan las pada rangka bogie harus memiliki kekuatan yang memadai karena cacat lokal dapat menjadi titik awal retak akibat pembebanan berulang. Oleh sebab itu, penentuan parameter pengelasan perlu mempertimbangkan mutu sambungan dan karakteristik material setelah mengalami siklus termal (Seo dkk., 2023).

Baja struktural SM490 digunakan pada berbagai konstruksi yang memerlukan kombinasi kekuatan dan kemampuan las.

Meskipun relatif mudah dilas, pemanasan dan pendinginan selama proses pengelasan dapat mengubah kondisi daerah di sekitar logam las, yang disebut daerah terpengaruh panas atau *heat-affected zone* (HAZ). Perubahan ini dapat memengaruhi sifat setempat, terutama ketika masukan panas dan laju pendinginan tidak terkendali (Setiawan dkk., 2023; Yang dkk., 2025). Secara skematis, posisi logam las, HAZ, dan logam induk ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1: Skema daerah terpengaruh panas (HAZ) pada sambungan las

Lebar HAZ ditentukan oleh siklus termal yang dialami material. Arus dan tegangan pengelasan, kecepatan gerak, geometri kampuh, serta urutan lintasan las bersama-sama menentukan besarnya masukan panas per satuan panjang. Arus yang lebih tinggi tidak selalu menghasilkan HAZ yang lebih lebar apabila disertai kenaikan kecepatan pengelasan. Oleh karena itu, hasil pengukuran HAZ perlu ditafsirkan sebagai respons terhadap kombinasi parameter operasi, bukan arus semata.

Liu dkk. (2021) dan Qi dkk. (2024) menjelaskan bahwa variasi masukan panas dapat mengubah pertumbuhan butir dan sifat mekanik daerah HAZ pada baja yang diteliti. Tegangan sisa akibat siklus termal juga perlu diperhatikan karena dapat memengaruhi kecenderungan pembentukan retak (Bian dkk., 2022). Namun, perubahan ukuran butir, kekerasan lokal, maupun tegangan sisa tidak dapat dinyatakan terjadi pada spesimen penelitian ini tanpa pengukuran mikrostruktur atau pengujian yang sesuai.

Dalam aplikasi perkeretaapian, mutu sambungan perlu dievaluasi secara menyeluruh, bukan hanya berdasarkan penampilan permukaan. Pemeriksaan tak merusak dapat membantu mengidentifikasi indikasi diskontinuitas, sedangkan pengamatan makro dan uji tarik memberikan informasi mengenai penetrasi, dimensi HAZ, dan respons mekanik sambungan. Pendekatan tersebut relevan untuk struktur yang menerima pembebanan berulang seperti rangka bogie (Seo dkk., 2023; Sword dkk., 2024).

Penelitian terdahulu telah membahas hubungan parameter pengelasan dengan perubahan HAZ maupun kekuatan mekanik pada berbagai baja. Akan tetapi, data eksperimen yang menghubungkan variasi arus GMAW, lebar HAZ, hasil pemeriksaan tak merusak, dan kekuatan tarik sambungan SM490 untuk konteks fabrikasi rangka bogie masih perlu diperkuat. Penelitian ini bertujuan membandingkan karakteristik sambungan baja SM490 yang dilas dengan pengaturan arus 190, 220, dan 260 A serta satu konfigurasi arus bertingkat. Kontribusinya adalah penyajian hasil pengamatan HAZ dan uji tarik pada kondisi pengelasan yang digunakan, sebagai masukan awal untuk pengendalian kualitas sambungan.

2. METODE

Penelitian dilakukan secara eksperimental di fasilitas pengelasan PT INKA (Persero), Madiun, menggunakan pelat baja SM490. Kegiatan mencakup persiapan material, pembuatan kampuh, pengelasan GMAW dengan beberapa pengaturan arus, pemeriksaan tak merusak, pengamatan makro daerah HAZ, dan pengujian tarik. Variabel yang dicatat selama pengelasan meliputi arus, tegangan, dan kecepatan pengelasan. Rancangan ini digunakan untuk membandingkan respons sambungan antarspesimen, dengan memperhatikan bahwa beberapa parameter proses berubah secara bersamaan.

2.1. Identifikasi Material dan Pengumpulan Data Teknis

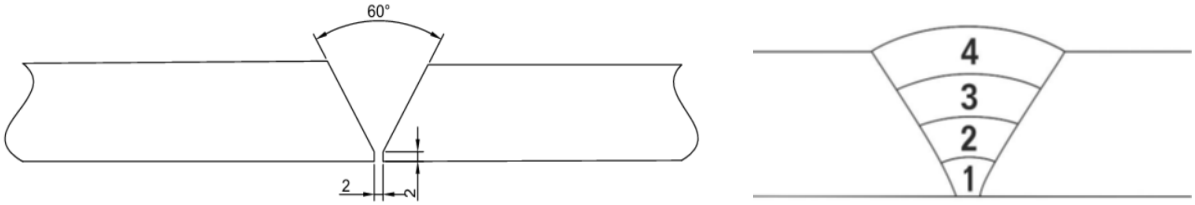
Informasi material dan prosedur diperoleh melalui studi pustaka, observasi di fasilitas pengelasan, serta konsultasi teknis dengan personel terkait. Material yang digunakan adalah baja SM490 dengan kadar karbon yang dilaporkan sebesar 0,18–0,22 %, sedangkan logam pengisi berupa kawat ER70S-6. Sebelum pengelasan, permukaan pelat dibersihkan dan disiapkan dengan peralatan pemotong serta gerinda. Untuk memperlihatkan batas daerah las dalam pengamatan makro, spesimen kemudian dipreparasi dan dietsa menggunakan larutan berbasis HCl, HNO_3, dan H_2O. Hasil pengamatan digunakan untuk mengukur lebar HAZ, sedangkan hasil uji tarik digunakan untuk membandingkan kekuatan mekanik sambungan. Material awal ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2: Pelat baja SM490 sebelum pengelasan

2.2. Perancangan Spesimen dan Prosedur Eksperimen

Pelat SM490 dipotong dengan dimensi awal 12 × 200 × 400 mm menggunakan mesin pemotong otomatis. Selanjutnya, sisi sambungan dipreparasi menjadi kampuh V tunggal sesuai geometri yang ditunjukkan pada Gambar 3(a). Geometri kampuh dipertahankan sebagai kondisi rancangan spesimen, kemudian pelat dirakit untuk pengelasan bertahap sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3(b).



(a) (b)

Gambar 3: (a) Geometri kampuh V tunggal dan (b) skema lintasan pengelasan

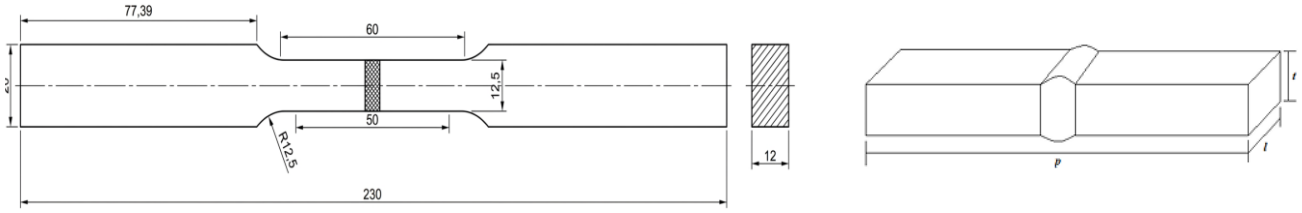
2.3. Pengelasan

Pengelasan dilakukan menggunakan metode *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) yang mengacu pada standar *Welding Procedure Specification* (*WPS*). Prosedur pengelasan terdiri dari lima lapisan, meliputi *root pass* (lapisan 1), lapisan tengah (lapisan 2-4) dan lapisan penutup (*capping*). Eksperimen ini menerapkan variasi kuat arus sebesar 190A, 220A dan 260A. Selain variasi tunggal, dilakukan pengelasan campuran dengan mendistribusikan kuat arus pada tiap lapisan: 190A untuk *root pass*, 220A untuk lapisan 2-3 dan 260A untuk lapisan 3-4 guna menganalisis pengaruh distribusi panas terhadap hasil pengelasan. Urutan penumpukan lapisan las serta skema pembagian parameter arus pada tiap tahapan tersebut diilustrasikan secara mendetail pada gambar 3

2.4. Metode Pengujian dan Analisis Data

Rangkaian pengujian diawali dengan evaluasi visual menggunakan metode Non-Destructive Test (NDT) untuk memastikan integritas hasil pengelasan sebelum dilakukan pengujian destruktif. Tahapan NDT ini dilakukan secara menyeluruh guna mendeteksi adanya cacat las atau kegagalan struktur melalui tiga teknik utama, yaitu ultrasonic test untuk mendeteksi cacat bagian dalam, penetrant test untuk diskontinuitas permukaan serta magnetic test untuk memeriksa area feromagnetik pada sambungan. Proses pengelasan dilakukan secara berulang hingga diperoleh hasil sambungan yang memenuhi kriteria penerimaan (Acceptable/ACC) berdasarkan hasil pemeriksaan NDT. Pengulangan tersebut merupakan proses penyesuaian dan verifikasi kondisi pengelasan, bukan pengulangan pengukuran HAZ. Sambungan yang telah memenuhi kriteria ACC kemudian dipilih sebagai sampel untuk pengujian makro dan uji tarik. Setelah dinyatakan lolos uji visual, material diproses menjadi spesimen uji makro-etsa dan uji tarik melalui beberapa tahapan preparasi. Pertama, permukaan material dibersihkan secara mekanis menggunakan sikat besi dari sisa oli, karat dan kotoran lainnya. Selanjutnya, dibuat sketsa ukuran pada permukaan material sebagai acuan pemotongan menggunakan mesin gergaji otomatis, yang kemudian diikuti dengan proses penghalusan tepi menggunakan gerinda untuk mencapai dimensi presisi yang diinginkan. Pada tahapan pengujian makro, spesimen melalui proses metalografi yang meliputi penggerindaan dan buffing untuk menghilangkan goresan kasar hingga mencapai permukaan yang mengilap. Permukaan tersebut kemudian diberi larutan etsa kimia berupa campuran HCl dan HNO3 yang dilarutkan dalam air (H2O). Pemberian zat kimia ini bertujuan untuk memunculkan kontras visual yang membedakan antara logam pengisi, logam induk dan daerah Heat Affected Zone (HAZ). Pengamatan daerah Heat Affected Zone (HAZ) dilakukan pada penampang melintang spesimen hasil pengelasan. Spesimen terlebih dahulu dipotong pada daerah sambungan las, kemudian dilakukan preparasi permukaan dan etsa makro untuk memperjelas perbedaan antara logam induk, daerah HAZ dan logam las. Dimensi dan struktur HAZ tersebut kemudian diamati secara teliti menggunakan kaca pembesar lipat folding magnifier dengan diameter diameter 28 mm dan perbesaran 10x (optical magnifier). Lebar HAZ diukur dari batas antara logam induk dan daerah yang mengalami perubahan struktur akibat siklus panas pengelasan hingga batas daerah logam las. Pengukuran dilakukan pada sisi kiri dan kanan sambungan dan hasil pengukuran digunakan untuk menentukan nilai lebar HAZ spesimen. Kriteria batas HAZ ditentukan berdasarkan perubahan struktur/kontras makro yang terlihat setelah proses etsa. Nilai HAZ yang disajikan merupakan hasil pengukuran pada spesimen pengujian dan dinyatakan dalam satuan milimeter (mm).

Selanjutnya, dilakukan pengujian tarik untuk menentukan kekuatan mekanik sambungan. Prosedur ini dimulai dengan kalibrasi instrumen dan pemasangan spesimen pada chuck mesin uji tarik secara sentris. Parameter pengujian, seperti kecepatan penarikan dan tampilan gambar, diatur sesuai standar sebelum mesin dijalankan hingga spesimen mengalami perpatahan. Data akhir yang mencakup beban maksimum dan perilaku material dicatat secara otomatis, kemudian dikonversi menjadi data grafis untuk dianalisis sebagai hasil akhir penelitian. Pada Gambar 4 di paparkan visualisasi dari uji tarik (4a) dan uji makro (4b).



(a) (b)

Gambar 4: (a) Geometri spesimen uji tarik dan (b) spesimen pengamatan makro

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Parameter arus, tegangan, dan kecepatan pengelasan

Pengelasan baja SM490 dilakukan oleh operator yang berpengalaman dalam fabrikasi komponen perkeretaapian. Arus, tegangan, dan kecepatan gerak dicatat pada setiap lintasan karena ketiganya berkontribusi terhadap energi panas yang diberikan sepanjang jalur las.

Rincian pengukuran untuk kelompok arus 190, 220, dan 260 A serta konfigurasi arus bertingkat disajikan berturut-turut pada Tabel 1-4.

Selama pengelasan diamati fluktuasi arus sekitar 1-10 A. Pengukuran tambahan dilakukan menggunakan alat ukur eksternal, sedangkan kecepatan pengelasan ditentukan dari pengamatan proses. Secara umum, kelompok 260 A menunjukkan kecepatan rata-rata pengelasan yang lebih tinggi dibandingkan kelompok 190 A, tetapi hubungan antara arus dan lebar HAZ tidak dapat dijelaskan hanya dari angka arus. Analisis masukan panas per lintasan memerlukan pemakaian data tegangan, arus, kecepatan, dan asumsi efisiensi proses yang konsisten. Tabel 4 juga memuat percobaan ulang dan sejumlah nilai yang tidak tersedia (N/A), sehingga hanya data yang lengkap yang dapat dibandingkan secara langsung.

Tabel 1: Parameter Pengelasan Kelompok Spesimen 1 (Arus Utama 190 A)

Spesimen	*Passes*	*Welding Process*	*Filler*		*Current*	*Voltage*	*Travel Speed* (cm/menit)
			Class (AWS)	*Size* (mm)	*Polarity*	*Ampere*	Volt	
	1 (*Root Pass*)					130	18,25	18,15
1 (Percobaan Pertama)	2	GMAW	ER70S-6	1.2	DC+	190	27,7	16,97
	3					193,5	25,53	20,01
	4					193,5	25	16,57
	Rata-Rata *Travel Speed*							17,85
	1 (*Root Pass*)					126	18,25	15,21
2 (Percobaan Kedua)	2	GMAW	ER70S-6	1.2	DC+	190	26	16,36
	3					190	26	12,97
	4					191	26	11,33
	Rata-Rata *Travel Speed*							13,55

Tabel 2: Parameter Pengelasan Kelompok Spesimen 2 (Arus Utama 220 A)

Spesimen	*Passes*	*Welding Process*	*Filler*		*Current*	*Voltage*	*Travel Speed* (cm/menit)
			Class (AWS)	*Size* (mm)	*Polarity*	*Ampere*	Volt	
	1 (*Root Pass*)					130	18,25	19,4
2	2	GMAW	ER70S-6	1.2	DC+	223	27	29,36
	3					216	27	24,98
	4					220	27	17,68
	Rata-Rata *Travel Speed*							24

Tabel 3: Parameter Pengelasan Kelompok Spesimen 3 (Arus Utama 260 A)

Spesimen	*Passes*	*Welding Process*	*Filler*		*Current*	*Voltage*	*Travel Speed* (cm/menit)
			Class (AWS)	*Size* (mm)	*Polarity*	*Ampere*	Volt	
	1 (*Root Pass*)					130	20	23,52
3	2	GMAW	ER70S-6	1.2	DC+	260	26,78	34,6
	3					259,9	26,7	26,8
	4					259	26,7	19,2
	Rata-Rata *Travel Speed*							26,86

Tabel 4: Parameter Pengelasan Kelompok Spesimen 4 (Variasi Arus Bertingkat)

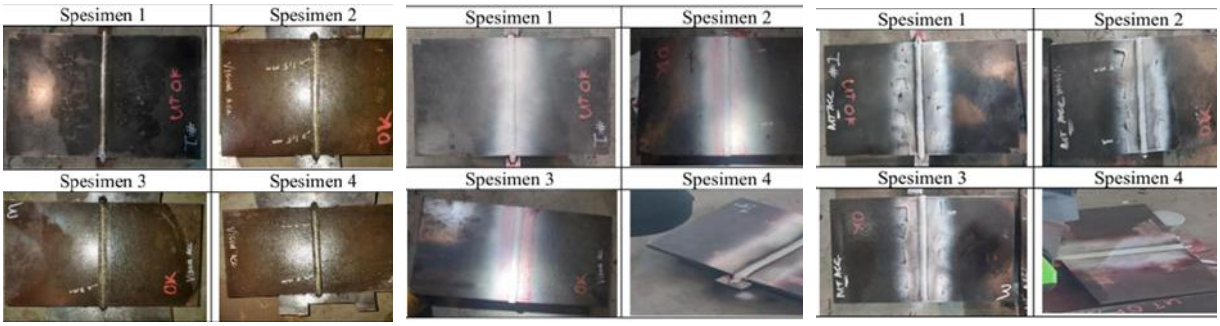
Spesimen	*Passes*	*Welding Process*	*Filler*		*Current*	*Voltage*	*Travel Speed* (cm/menit)
			Class (AWS)	*Size* (mm)	*Polarity*	*Ampere*	Volt	
	1 (*Root Pass*)					192	15	22,14
4 (Percobaan Pertama)	2	GMAW	ER70S-6	1.2	DC+	223	26	26,67
	3					224	26	25,86
	4					263	27	24,31

Spesimen	*Passes*	*Welding Process*	*Filler*		*Current*		*Voltage*	*Travel Speed* (cm/menit)
			Class (AWS)	*Size* (mm)	*Polarity*	*Ampere*	Volt	
Rata-Rata *Travel Speed*								25,61
4 (Percobaan Kedua)	1 (*Root Pass*)	GMAW	ER70S-6	1.2	DC+	190	22	13,48
	2					220	27	25,19
	3					220	27	22,55
	4					260	30	16,08
Rata-Rata *Travel Speed*								21,27
4 (Percobaan Ketiga)	1 (*Root Pass*)	GMAW	ER70S-6	1.2	DC+	190	24	15
	2					N/A	N/A	N/A
	3					N/A	N/A	N/A
	4					N/A	N/A	N/A
Rata-Rata *Travel Speed*								15
4 (Percobaan Keempat)	1 (*Root Pass*)	GMAW	ER70S-6	1.2	DC+	192	19	22,14
	2					220	27	26,67
	3					220	27	25,86
Rata-Rata *Travel Speed*								25,61

3.2. Hasil pemeriksaan tak merusak

Pemeriksaan tak merusak digunakan untuk menilai ada tidaknya indikasi diskontinuitas pada sambungan sebelum pengujian lanjutan. Metode yang digunakan meliputi UT untuk pemeriksaan internal, PT untuk indikasi terbuka pada permukaan, dan MT untuk indikasi permukaan atau dekat permukaan pada material feromagnetik (Deepak dkk., 2021). Dokumentasi pemeriksaan ditunjukkan pada Gambar 5.

Berdasarkan hasil pengujian pada spesimen 1 (190 A), spesimen 2 (220 A) dan spesimen 3 (260 A), seluruh sambungan las memenuhi kriteria (*accepted*), yang ditunjukkan oleh penetrasi logam las yang baik serta tidak terdeteksi adanya diskontinuitas permukaan seperti retak maupun indikasi pori yang terbuka ke permukaan (*surface porosity*). Namun, hasil yang berbeda diperoleh pada spesimen 4 yang menggunakan variasi arus bertingkat. Pada spesimen ini teridentifikasi cacat berupa *incomplete root penetration* (ketidakmampuan penetrasi pada akar sambungan) dengan indikasi kedalaman sekitar 11–12 mm. Cacat tersebut diduga terjadi akibat ketidakseimbangan antara parameter tegangan dan kecepatan kawat (*wire feed speed*), sehingga *heat input* yang dihasilkan tidak cukup untuk melelehkan daerah akar sambungan secara merata. Hal ini sejalan dengan penelitian lain, dimana *lack of penetration* disebabkan oleh *heat input* rendah, arus yang tidak cukup dan *travel speed* yang tinggi (Torres dkk., 2026). Dokumentasi visual terkait identifikasi cacat internal dan kondisi fisik hasil pengelasan ditampilkan pada gambar 5.



(a) (b) (c)

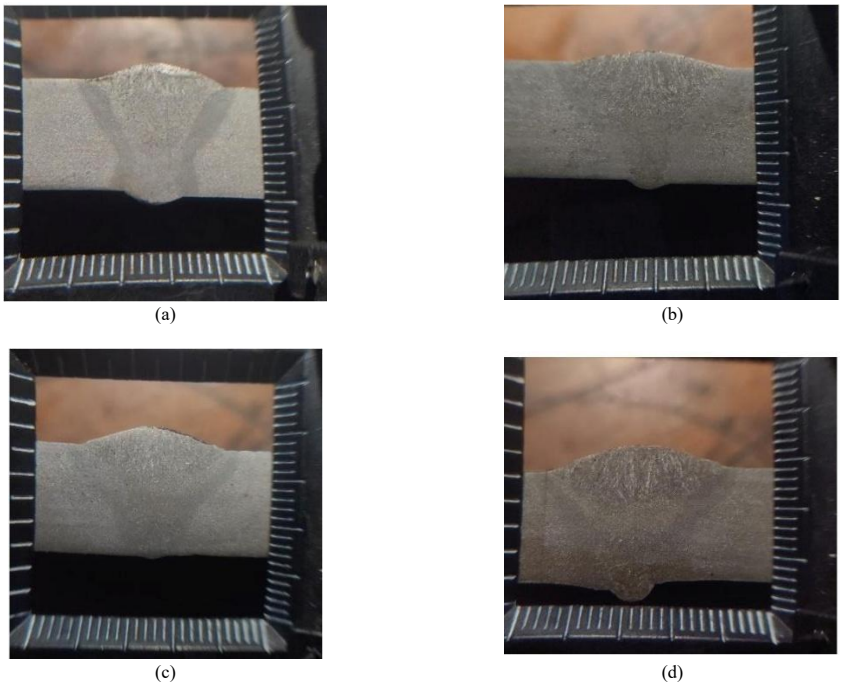
Gambar 5: Dokumentasi pemeriksaan (a) ultrasonik, (b) penetran cair, dan (c) partikel magnetik

3.3. Hasil pengamatan struktur makro dan lebar HAZ

Pengamatan makro dilakukan pada penampang melintang sambungan las untuk memperjelas logam las, daerah HAZ, dan logam induk. Nilai lebar HAZ yang dilaporkan adalah 3,0 mm pada spesimen 1 (190 A), 2,5 mm pada spesimen 2 (220 A), dan 2,0 mm pada spesimen 3 (260 A). Spesimen 4 dengan variasi arus bertingkat memiliki lebar HAZ 4,0 mm dan menunjukkan indikasi penetrasi akar yang tidak lengkap. Ringkasan hasil disajikan pada Tabel 5 dan dokumentasi makro pada Gambar 6. Dalam rentang pengujian ini, HAZ terukur cenderung lebih sempit pada spesimen dengan arus utama lebih tinggi. Akan tetapi, kecepatan gerak dan tegangan juga berbeda di antara kelompok, sehingga data belum cukup untuk menyimpulkan hubungan sebab-akibat arus secara tunggal. Analisis mikrostruktur atau kekerasan belum dilakukan; oleh karena itu, perubahan ukuran butir maupun sifat lokal di HAZ tidak ditetapkan berdasarkan pengamatan makro saja.

Tabel 5: Lebar Daerah Terpengaruh Panas (HAZ) Pada Setiap Spesimen

Spesimen Pengujian	Lebar HAZ
Spesimen 1	3 mm
Spesimen 2	2,5 mm
Spesimen 3	2 mm
Spesimen 4	4 mm



(a) (b) (c) (d)

Gambar 6: Hasil pengamatan makro pada (a) spesimen 1, (b) spesimen 2, (c) spesimen 3, dan (d) spesimen 4

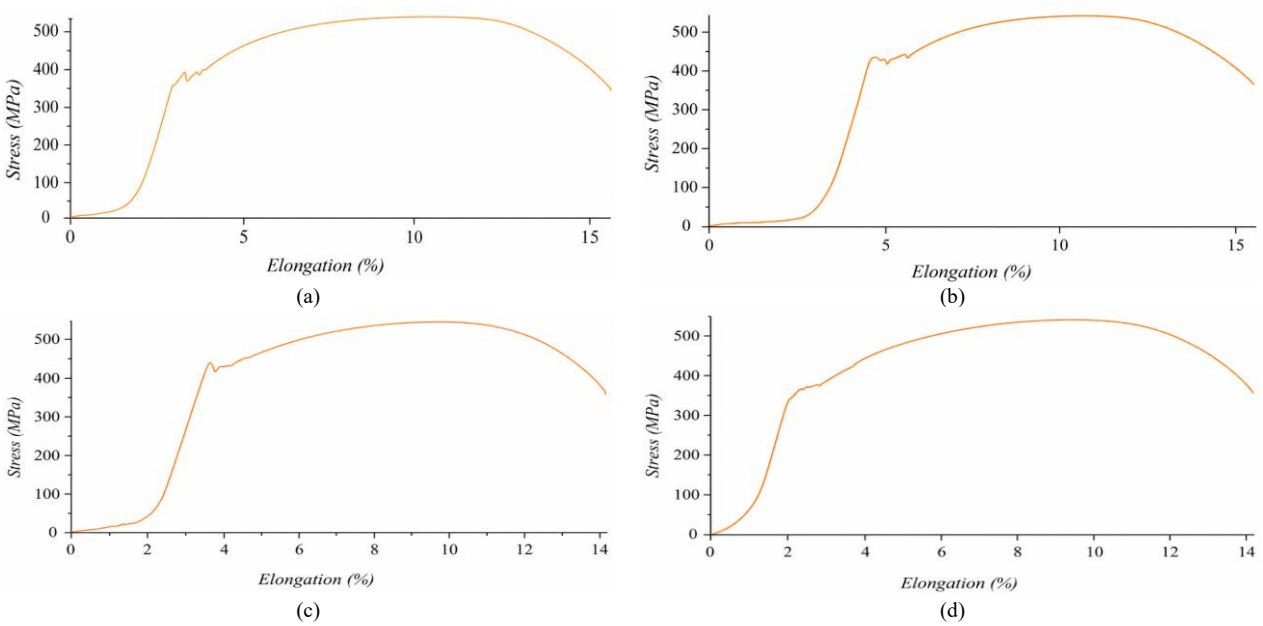
3.4. Analisis sifat mekanik berdasarkan pengujian tarik

Pengujian tarik dilakukan untuk membandingkan kekuatan tarik maksimum spesimen sambungan baja SM490 yang dibuat dengan berbagai pengaturan arus GMAW. Bentuk dan posisi patahan spesimen setelah pengujian ditunjukkan pada Gambar 7. Kurva tegangan–regangan dan nilai kekuatan tarik yang dilaporkan selanjutnya dianalisis pada Gambar 8 dan Gambar 9.



Gambar 7: Kondisi spesimen setelah pengujian tarik

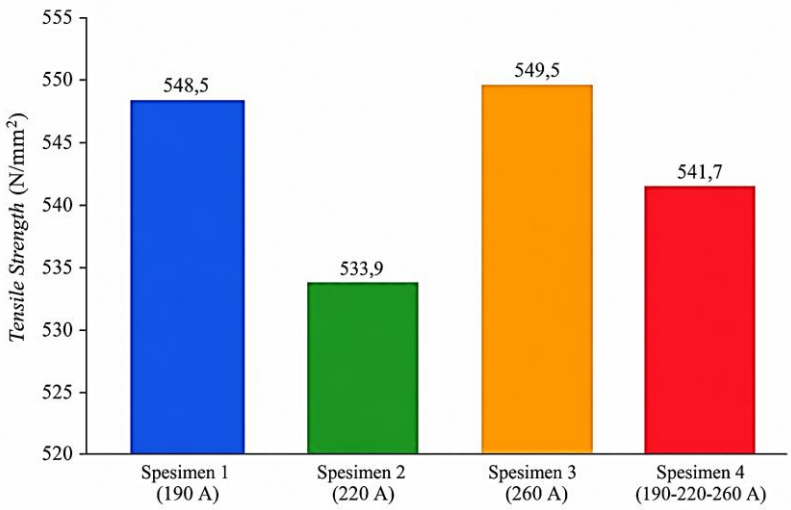
Berdasarkan kurva tegangan–regangan pada Gambar 8, seluruh spesimen memperlihatkan deformasi plastis sebelum patah. Regangan putus yang ditunjukkan berada pada kisaran sekitar 14–16 %, dengan spesimen 260 A cenderung memiliki perpanjangan lebih rendah daripada beberapa kondisi lain. Perbedaan ini bersifat deskriptif karena naskah belum menyajikan ulangan independen atau pengujian statistik. Nilai regangan tersebut juga tidak dapat digunakan untuk menyimpulkan perubahan mikrostruktur HAZ tanpa data kekerasan dan metalografi pendukung.



Gambar 8: Kurva tegangan–regangan (a) spesimen 1, (b) spesimen 2, (c) spesimen 3, dan (d) spesimen 4

Masukan panas selama pengelasan dapat memengaruhi siklus termal dan sifat mekanik sambungan, sebagaimana dibahas dalam penelitian Doredla dkk. (2025) dan Guo dkk. (2025) pada material serta prosedur yang berbeda. Namun, arus tidak identik dengan masukan panas, karena nilai tegangan dan kecepatan gerak ikut menentukan energi per satuan panjang. Oleh karena itu, penjelasan perubahan kekuatan tarik dan keuletan dalam penelitian ini perlu diperlakukan sebagai kemungkinan mekanisme, bukan sebagai bukti langsung terjadinya pertumbuhan butir atau peningkatan kekerasan.

Perbandingan hasil juga menunjukkan perlunya memisahkan pengaruh variasi prosedur dari variasi sifat material. Keberadaan cacat pada spesimen arus bertingkat dapat memengaruhi hasil mekanik, sedangkan perbedaan antarspesimen dengan arus utama tetap dapat dipengaruhi kondisi pengelasan masing-masing. Hasil pengamatan ini berguna sebagai evaluasi awal parameter proses, tetapi belum cukup untuk menetapkan nilai optimum yang berlaku umum tanpa pengulangan dan pengendalian faktor lain.



Gambar 9: Perbandingan kekuatan tarik maksimum pada tiap spesimen

Gambar 9 memperlihatkan kekuatan tarik maksimum sebesar 548,5 MPa pada spesimen 1 (190 A), 533,9 MPa pada spesimen 2 (220 A), 549,5 MPa pada spesimen 3 (260 A), dan 541,7 MPa pada spesimen 4 (arus bertingkat). Spesimen 3 menunjukkan nilai terbesar dalam rangkaian pengujian, tetapi perbedaannya terhadap spesimen 1 hanya 1,0 MPa. Semua spesimen dilaporkan patah pada logam induk. Temuan lokasi patahan ini menunjukkan bahwa bagian yang mengalami kegagalan tarik bukan berada di jalur las pada konfigurasi pengujian tersebut. Namun, hal itu tidak otomatis membuktikan bahwa sambungan bebas cacat atau memiliki ketahanan fatik yang memadai untuk penggunaan jangka panjang pada rangka bogie.

Nilai kekuatan tarik maksimum kelompok yang diuji berkisar antara 533,9 dan 549,5 MPa. Rentang yang relatif sempit ini perlu dianalisis dengan mempertimbangkan jumlah ulangan, sebaran hasil, dan spesifikasi material SM490 yang digunakan. Tanpa ukuran variasi atau uji statistik, perbedaan hasil sebaiknya dijelaskan sebagai kecenderungan dalam data pengujian, bukan sebagai peningkatan yang telah terbukti signifikan.

3.5. Sintesis hubungan parameter pengelasan dan kinerja sambungan

Secara keseluruhan, pengamatan NDT, struktur makro, dan pengujian tarik memberikan informasi yang saling melengkapi. Spesimen 3 dengan arus utama 260 A memiliki lebar HAZ terkecil (2,0 mm) dan kekuatan tarik maksimum tertinggi (549,5 MPa) pada data yang tersedia. Pada saat yang sama, kecepatan pengelasannya lebih tinggi daripada kelompok arus yang lebih rendah. Dengan demikian, hasil tersebut lebih tepat diinterpretasikan sebagai kinerja terbaik di antara konfigurasi yang diuji, bukan bukti bahwa arus 260 A merupakan kondisi optimum secara universal.

Spesimen 4 memperlihatkan lebar HAZ terbesar (4,0 mm) dan indikasi penetrasi akar yang tidak lengkap pada pemeriksaan yang dilaporkan, meskipun nilai kekuatan tarik maksimumnya mencapai 541,7 MPa. Temuan ini menegaskan bahwa pengujian tarik saja belum cukup untuk menilai kelayakan sambungan las struktural. Diperlukan informasi tambahan mengenai parameter setiap lintasan, cacat yang terdeteksi, kriteria NDT, serta ulangan pengujian untuk memastikan keterulangan hasil dan mendukung rekomendasi proses pada fabrikasi rangka bogie.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi parameter pengelasan Gas Metal Arc Welding (GMAW) menghasilkan perbedaan lebar daerah terpengaruh panas (heat-affected zone, HAZ) dan kekuatan tarik sambungan baja SM490 yang ditujukan untuk aplikasi rangka bogie kereta api. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa lebar HAZ pada kelompok arus utama 190, 220, dan 260 A masing-masing sebesar 3,0; 2,5; dan 2,0 mm, sedangkan konfigurasi arus bertingkat menghasilkan HAZ terlebar sebesar 4,0 mm. Kekuatan tarik maksimum pada keempat kelompok berturut-turut mencapai 548,5; 533,9; 549,5; dan 541,7 MPa. Konfigurasi arus utama 260 A menghasilkan HAZ tersempit dan kekuatan tarik tertinggi di antara kondisi yang diuji, meskipun perbedaannya terhadap kelompok 190 A hanya sebesar 1,0 MPa. Pemeriksaan tak merusak menunjukkan bahwa tiga kelompok arus utama memenuhi kriteria penerimaan yang dilaporkan, sedangkan konfigurasi arus bertingkat menunjukkan indikasi penetrasi akar las yang tidak lengkap. Temuan ini menegaskan pentingnya penggabungan pengamatan makro, pemeriksaan tak merusak, dan pengujian tarik dalam mengevaluasi kualitas sambungan las. Namun, karena tegangan dan kecepatan pengelasan turut bervariasi serta belum tersedia pengujian berulang, pengaruh arus secara independen dan signifikansi perbedaan hasil belum dapat dipastikan. Dengan demikian, hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar evaluasi awal parameter pengelasan GMAW pada baja SM490, sedangkan penetapan parameter yang sesuai untuk fabrikasi rangka bogie memerlukan pengujian berulang, evaluasi masukan panas, dan verifikasi kualitas sambungan berdasarkan standar yang relevan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada pimpinan dan tim laboratorium pengelasan PT INKA (Persero), Madiun, atas fasilitas, bantuan teknis, dan dukungan selama pelaksanaan pengujian.

KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan finansial maupun pribadi yang dapat memengaruhi pelaksanaan, analisis, atau pelaporan hasil penelitian.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN BUATAN

Dalam penyusunan manuskrip, penulis menggunakan teknologi kecerdasan buatan atau berbantuan kecerdasan buatan untuk membantu penyuntingan bahasa dan keterbacaan serta penelusuran awal referensi. Seluruh keluaran telah ditinjau dan disunting oleh penulis. Penulis bertanggung jawab penuh atas ketepatan sitasi, interpretasi ilmiah, dan isi akhir artikel.

KONTRIBUSI PENULIS

Nur Syahidah Aini : Konseptualisasi, Metodologi, Investigasi, Kurasi Data, Visualisasi, Penulisan - Draf Awal.
Richardo Serafim : Metodologi, Investigasi, Kurasi Data, Visualisasi, Penulisan - Draf Awal.
Siti Maulidina : Konseptualisasi, Metodologi, Analisis Formal, Penulisan - Draf Awal.
Nurmagita Pamursari : Penulisan - Tinjauan dan Penyuntingan, Visualisasi, Kurasi Data dan Validasi Data.
Arif Setyaji : Investigasi, Validasi, Penyediaan Sumber Daya, Penulisan - Tinjauan dan Penyuntingan.
Farid Nanda Syanur : Penulisan - Tinjauan dan Penyuntingan, Visualisasi, Kurasi Data dan Validasi Data.
Nurwanda Sari : Investigasi, Kurasi Data, Validasi, Penulisan - Tinjauan dan Penyuntingan.
Muhammad Rizki Arif : Investigasi, Validasi, Kurasi Data, Penulisan - Tinjauan dan Penyuntingan.

Seluruh penulis telah memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pelaksanaan penelitian, penyusunan naskah, serta telah membaca, meninjau, dan menyetujui versi akhir naskah untuk dipublikasikan. Seluruh penulis juga bertanggung jawab atas integritas, keakuratan, dan keabsahan isi artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

Bian, S., Zhao, H., & Guo, J. (2022). Effect Of Alloy Element on Microstructure and Properties of Heat-Affected Zone. *Sage Journals*, 38.

Deepak, J. R., Raja, V.K.B., Srikanth, B., Surendan, H., & Nickolas, M.M. (2021). Non-destructive testing (NDT) techniques for low carbon steel welded joints: A review and experimental study. *Materials today: Proceedings*, 44(5), 3732-3737.

Doredla, N., & Kumar, N., S. (2025). Determination of heat input impact on residual stress, microstructure and mechanical characteristics of welded ferrite-pearlite (α-P) steel joints by using taguchi optimization approach. *Journal of Advanced Joining Processes*, 11, 100278.

Guo, W., Zhao, X., Zhao, Y., Liu, Y., Li, H., & Han, B. (2025). Research on optimal heat input parameter for TIG welding of thin plate 5083 aluminum alloy. *Nature Portofolio*, 15, 15593.

Liu, D., Yang, J., Zhang, Y., Qiu, Y., Cheng, G., Yao, M., & Dong, J. (2021). Effect of Welding Heat Input on the Microstructure and Impact Toughness of HAZ in 420 MPa-Grade Offshore Engineering Steel. *Frontline in Materials*, 8, 1-14.

Qi, H., Li, W., & Bian, S. (2024). Effect of High Welding Heat Input on The Microstructure and Low-Temperature Toughness of Heat Affected Zone in Magnesium-Treated EH36 Steel. *Nature Portofolio*, 14, 19459.

Seo, J., Hur, H., Kwon, S., & Moon, K. (2023). Effect of multiple weld repairs on fatigue strength of bogie frame of railroad vehicle. *Advances in Mechanical Engineering*, 15(11), 1-16.

Setiawan, M. D., Aji, I., & Umartono, A. S. (2023). Pengaruh VariasiArus Las SMAWterhadap KekuatanTarik Baja ASTM A36. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Industri Berkelanjutan IV (SENASTITAN IV)*, 3, 1-8.

Sword, J., Galloway, A., & Toumpis, A. (2024). The Effect Of Weld Heat Input on The Microstructure and Mechanical Properties of Wire Arc Additively Manufactured 15-5PH Stainless Steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 132, 5305–5314.

Yang, J., Dong, H., Wu, G., & Xiong, F. (2025). Experimental and numerical simulation study on microstructure, residual stress and mechanical properties of Fe–Mn–C–Cr cryogenic high-manganese steel arc-welded joint. *Journal of Materials Research and Technology*, 35, 1335-1347.