

PROSES HYBRID SPOT WELDING – EPOXY BONDING BAJA AISI 1008: PENGARUH JENIS EPOXY ADHESIVE

THE HYBRID SPOT WELDING – EPOXY BONDING PROCESS AISI 1008 STEEL: THE EFFECT OF EPOXY ADHESIVE TYPE

Paryanto Dwi Setyawan*, I W. Ogie Sabaniartha, Andi Maulana, Sugiman, Sujita, Suteja

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mataram,
Jl. Majapahit no. 62, Mataram, NTB, 83125, Indonesia.

*Corresponding author

E-mail addresses: paryanto.ds@unram.ac.id

<https://doi.org/10.29303/empd.v5n1.362-375>

Received 1 May 2026; Received in revised form 21 May 2026; Accepted 23 May 2026

ABSTRACT

Hybrid joining technologies are increasingly being explored to overcome the mechanical and durability limitations associated with conventional resistance spot welding (RSW) and adhesive bonding in lightweight steel structures. However, despite the growing interest in spot welding–epoxy bonding (SWEB), the combined influence of adhesive curing behavior and welding thermal input on joint integrity and microstructural evolution remains insufficiently understood. In this work, a comprehensive experimental study was conducted on 0.8 mm AISI 1008 steel sheets joined using three commercial epoxy systems with different curing characteristics, combined with varying welding currents (50–80 A) and welding times (10–20 s). The investigation integrated mechanical shear testing with metallographic and compositional analyses to establish direct correlations between process parameters, microstructural transformations, and failure behavior. The findings reveal that the hybrid joints exhibit a synergistic load-transfer mechanism capable of significantly improving joint strength and energy absorption compared with conventional spot welds. Superior performance was consistently obtained using slow-curing epoxy under moderate welding conditions (~60–70 A and ~15 s), where a more stable interfacial interaction was achieved. In addition, localized carbon enrichment within the weld nugget, attributed to epoxy pyrolysis during welding, was identified as a previously underexplored phenomenon influencing joint behavior. The study provides new insight into thermo-chemical coupling in SWEB systems and proposes a practical pathway for tailoring hybrid joining performance through integrated process design.

Keywords: Hybrid joining, Curing behavior, Load-transfer mechanism, Carbon enrichment, Epoxy pyrolysis

1. Pendahuluan

Upaya berkelanjutan dalam industri otomotif dan rekayasa struktur untuk mengurangi berat struktur, meningkatkan efisiensi energi, serta optimalisasi biaya produksi telah mendorong perkembangan metode penyambungan yang mampu menggabungkan performa mekanik yang tinggi dan fleksibilitas manufaktur. Dalam hal ini, kombinasi proses penyambungan dengan metode *resistance spot welding* (RSW) dan *epoxy bonding* muncul sebagai solusi yang menjanjikan karena mampu mengintegrasikan keunggulan dari kedua metode tersebut [1]. Metode *resistance spot welding* menghasilkan sambungan setempat secara metalurgi dengan kecepatan tinggi dan kemudahan otomasi,

sementara *epoxy bonding* berperan dalam redistribusi tegangan, peningkatan ketahanan lelah, serta mencegah konsentrasi tegangan di sekitar titik las [2].

Meskipun *resistance spot welding* telah digunakan dalam industri otomotif dan struktur secara luas, konsentrasi tegangan yang tinggi pada *nugget* las yang dihasilkan sering kali menjadi titik awal kegagalan, terutama di bawah pembebanan siklik dan multi-aksial [3]. Sementara, sambungan berbasis *epoxy bonding* mampu mendistribusikan tegangan secara lebih merata di area sambungan, namun memiliki keterbatasan dalam kekuatan dan sensitivitas lingkungan [4]. Oleh karena itu, kombinasi keduanya dalam bentuk proses penyambungan *hybrid spot welding-epoxy bonding* (SWEB) mampu meningkatkan kekakuan, kapasitas beban, serta umur kelelahan sambungan secara signifikan [2, 5]. Berbagai studi eksperimental dan numerik dalam satu dekade terakhir telah mengonfirmasi keunggulan sambungan *hybrid weld-bonding* dalam hal kekuatan tarik-geser, ketahanan kelelahan, dan penyerapan energi [2, 5, 6]. Namun demikian, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada evaluasi makroskopik tanpa mengkaji secara mendalam interaksi kompleks antara parameter proses *spot welding* dan karakteristik *epoxy* terhadap evolusi mikrostruktur dan fenomena termokimia selama proses penyambungan [6]. Selama proses *spot welding* pada penyambungan *hybrid spot welding – epoxy bonding* (SWEB), lapisan *epoxy* dapat mengalami degradasi termal, menghasilkan gas, serta mempengaruhi konduktivitas termal lokal, yang pada akhirnya berdampak pada proses pembentukan *nugget*, distribusi unsur, dan meningkatkan potensi cacat seperti porositas [7].

Lebih lanjut, pemilihan jenis *epoxy*, yang berkaitan erat dengan kinetika *curing*, viskositas, dan stabilitas termal, merupakan faktor kritis yang masih sering ditentukan secara empiris dalam praktik industri maupun penelitian [8]. Studi oleh Marques dkk. [9] menunjukkan bahwa sifat mekanik *epoxy* secara signifikan mempengaruhi distribusi tegangan dalam sambungan, sementara penelitian terbaru oleh Arumugam dkk. [7] mengindikasikan bahwa keberadaan *epoxy* mempengaruhi proses pembentukan zona fusi selama pengelasan titik. Namun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu masih mengisolasi variabel-variabel tersebut secara parsial, tanpa pendekatan parametrik terintegrasi yang menggabungkan jenis perekat, serta parameter energi pengelasan seperti arus dan waktu dalam satu kerangka eksperimental yang sistematis. Kesenjangan ini menjadi semakin relevan ketika dikaitkan dengan material baja karbon rendah seperti AISI 1008, yang digunakan sebagai material referensi dalam studi penyambungan karena kemudahan fabrikasi dan karakteristik metalurginya yang stabil. Meskipun beberapa studi telah mengevaluasi sambungan *weld-bonded* pada baja karbon rendah (misalnya JIS G3141) [7], penelitian tersebut umumnya terbatas pada satu jenis perekat tanpa parameter pengelasan, serta belum mengaitkan hasil mekanik dengan karakterisasi mikrostruktur dan komposisi secara komprehensif. Dengan demikian, pemahaman mekanistik tentang bagaimana interaksi simultan antara variabel proses memengaruhi performa sambungan masih belum berkembang secara memadai.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, penelitian ini mengusulkan pendekatan eksperimental faktorial yang terintegrasi pada proses penyambungan *hybrid spot welding – epoxy bonding* (SWEB) pelat baja AISI 1008 dengan ketebalan 0,8 mm. Ruang lingkup penelitian secara khusus dibatasi pada tiga jenis *epoxy* komersial, yaitu *Araldite 5 min*, *Araldite 90 min*, dan *Devcon 90 min*, yang mewakili variasi kinetika *curing* cepat dan lambat serta perbedaan stabilitas termal. Ketebalan *epoxy* dijaga konstan pada 0,6 mm, yang secara sengaja dipilih lebih tinggi dibandingkan rekomendasi industri umum (0,1–0,3 mm) untuk mengeksplorasi secara ekstrem pengaruh interaksi termal antara *epoxy* dan proses pengelasan *spot welding* [8]. Pendekatan ini juga didukung oleh studi optimasi sebelumnya yang menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan *epoxy* dapat meningkatkan kapasitas energi yang diperlukan, meskipun berpotensi memengaruhi pembentukan *nugget* [4, 8]. Parameter proses *spot welding* divariasikan pada arus 50 A, 60 A, 70 A, dan 80 A, serta waktu pengelasan 10 s, 15 s, dan 20 s. Rentang parameter dipilih berdasarkan praktik industri dan studi eksperimental sebelumnya yang menunjukkan bahwa rentang tersebut mewakili kecukupan energi yang dibutuhkan untuk pembentukan *nugget* yang stabil pada baja karbon rendah, sekaligus mampu menangkap efek degradasi *epoxy* akibat proses termal [5, 7]. Arus yang lebih tinggi meningkatkan input panas dan ukuran *nugget*, namun juga memperbesar kemungkinan dekomposisi *epoxy*, sedangkan waktu pengelasan memengaruhi difusi panas dan pertumbuhan zona terpengaruh panas (HAZ).

Kebaruan (*novelty*) utama penelitian ini terletak pada beberapa aspek seperti evaluasi komparatif tiga jenis *epoxy* komersial dengan kinetika *curing* berbeda, yang memungkinkan identifikasi peran stabilitas termal dan degradasi kimia *epoxy* dalam proses pengelasan *spot welding* dan performa

sambungan. Selain itu, mengkaji pengaruh jenis *epoxy*, arus pengelasan, dan waktu pengelasan *spot welding* secara sistematis dan komprehensif; menghubungkan respons makroskopik (kekuatan geser, mode kegagalan) dengan fenomena mikrostruktural dan kimia (melalui analisis morfologi *nugget* dan komposisi EDX), sehingga memberikan pemahaman yang lebih mendalam dibandingkan studi sebelumnya yang umumnya terbatas pada evaluasi mekanik saja. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengisi celah dalam literatur dengan analisis yang menghubungkan interaksi antara parameter proses, sifat material dan performa sambungan. Kontribusi ini diharapkan memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk optimasi proses *hybrid spot welding – epoxy bonding* pada aplikasi industri, khususnya dalam konteks desain struktur ringan pada lingkungan yang kompleks.

2. Bahan dan Metode

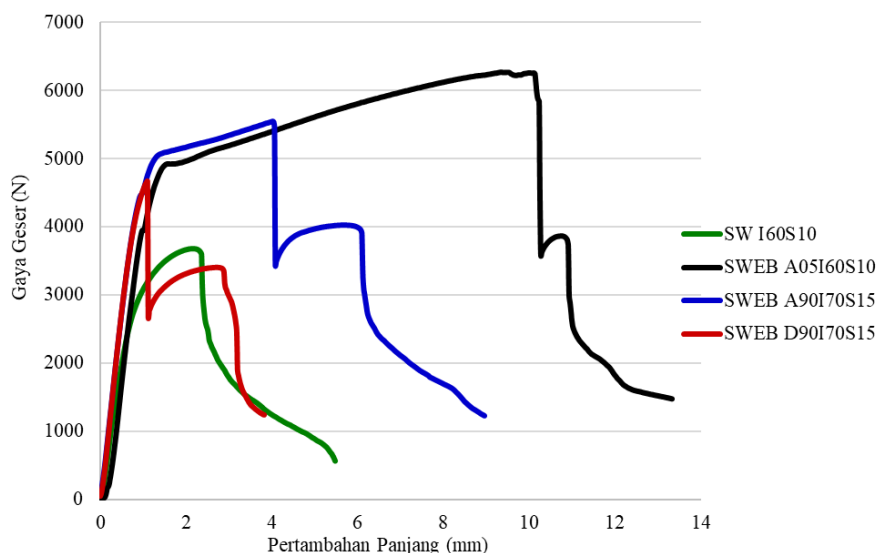
Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja karbon rendah AISI 1008 dalam bentuk lembaran dengan ketebalan 0,8 mm. Baja karbon rendah dipilih karena kemampuan las yang baik dan kompatibilitasnya terhadap proses *epoxy bonding*. Komposisi kimia baja karbon rendah diverifikasi menggunakan *energy dispersive spectroscopy* (EDS) sesuai ASTM E350-18 [10]. Tiga jenis *epoxy* digunakan, yaitu *araldite rapid* (waktu kerja ± 5 menit), *araldite standard* (± 90 menit), dan *devcon epoxy* (± 90 menit). Seluruh *epoxy* dicampur dengan rasio 1:1 (*epoxy:hardener*) sesuai rekomendasi pabrikan. Ketebalan lapisan *epoxy* dijaga konstan pada 0,6 mm. Parameter proses *spot welding* meliputi arus pengelasan (50, 60, 70, dan 80 A) dan waktu pengelasan (10, 15, dan 20 s). Parameter ini dipilih untuk menghasilkan variasi input panas yang memadai dalam pembentukan *nugget* dan interaksi termal dengan *epoxy*.

Spesimen pengujian geser (*single-lap joint*) sesuai ISO 14273 [11]. Dimensi spesimen adalah panjang total 175 mm, lebar 30 mm, dan panjang *overlap* 35 mm. Seluruh proses *hybrid spot welding - epoxy bonding* dilakukan dalam area *overlap* tersebut. Untuk setiap kondisi eksperimen dilakukan lima kali pengulangan. Penamaan spesimen dilakukan secara sistematis berdasarkan jenis sambungan, jenis *epoxy*, arus pengelasan, dan waktu pengelasan untuk memudahkan identifikasi dan analisis data. Persiapan permukaan baja dilakukan secara mekanis dan kimia. Permukaan *overlap* diamplas menggunakan kertas amplas silikon karbida dengan ukuran 220 mesh. Selanjutnya, permukaan dibersihkan menggunakan aseton ($\geq 90\%$) dengan kain bebas serat sebanyak dua kali. Permukaan yang telah dibersihkan dikeringkan pada suhu ruangan selama 10 menit. Proses *epoxy bonding* dilakukan dalam waktu kurang dari 20 menit setelah persiapan permukaan untuk meminimalkan oksidasi ulang.

Epoxy dicampur secara manual selama 60 detik hingga homogen, kemudian diaplikasikan secara merata pada permukaan *overlap* menggunakan spatula. Ketebalan *epoxy* dikontrol menggunakan *spacer* kawat *stainless steel* berdiameter 0,6 mm yang ditempatkan pada sisi *overlap*. Setelah penyusunan, spesimen dijepit menggunakan *jig* mekanis untuk memastikan keselarasan dan distribusi tekanan yang seragam. Proses *spot welding* dilakukan selama *fase curing* perekat. Setelah proses *spot welding*, spesimen dibiarkan *curing* penuh selama 7 hari pada kondisi lingkungan laboratorium (suhu kamar). *Spot welding* dilakukan menggunakan mesin *resistance spot welding* tipe *bron-gouda* B.V. dengan elektroda tembaga berbentuk *truncated cone* dengan diameter ujung 5 mm. Parameter proses yang dikontrol meliputi gaya elektroda sebesar 2,5 kN, waktu penekanan awal (*squeeze time*) 2 s, dan waktu penahanan (*hold time*) 3 s. Pendinginan elektroda dilakukan menggunakan air dengan laju aliran 4 l/min untuk menjaga stabilitas termal selama proses *spot welding*. Pengelasan dilakukan pada satu titik di pusat area *overlap*. Pengujian geser dilakukan menggunakan *universal testing machine* sesuai ASTM D1002 dan ISO 4587 [12, 13]. Kecepatan *crosshead* diatur sebesar 1,3 mm/min untuk memastikan kondisi pembebanan kuasi-statis. Besarnya beban dan pertambahan panjang diamati selama pengujian geser sambungan. Mode kegagalan diamati dengan observasi visual dan analisis mikroskopik untuk selanjutnya diklasifikasikan. Analisis mikrostruktur dilakukan pada penampang melintang sambungan untuk mengidentifikasi karakteristik *nugget*, *heat-affected zone* (HAZ), dan potensi cacat yang terbentuk. Persiapan sampel mengikuti ASTM E3-11 [14], dilanjutkan dengan etsa menggunakan larutan Nital 2% sesuai ASTM E407-23 [15]. Pengamatan mikrostruktur dilakukan menggunakan mikroskop optik. Analisis EDS dilakukan untuk mengevaluasi distribusi unsur dan kemungkinan kontaminasi pada *interface* sambungan [16].

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian geser spesimen sambungan berupa grafik hubungan antara gaya geser (F) dengan pertambahan panjang (ΔL) dapat dilihat pada Gambar 1. Berdasarkan kurva gaya geser–perpanjangan (F– ΔL) pada Gambar 1 terdapat perbedaan mendasar antara sambungan *spot welding* (SW) dan *hybrid spot welding–epoxy bonding* (SWEB). Spesimen *spot welding* (SW) memperlihatkan respons khas dengan satu puncak beban maksimum yang diikuti penurunan tajam, mencerminkan kegagalan dominan pada *nugget* las atau daerah sekitarnya secara relatif tiba-tiba. Sebaliknya, seluruh spesimen *hybrid spot welding–epoxy bonding* (SWEB) menunjukkan perilaku dua puncak (*double-peak response*), yang merupakan indikator kuat dari mekanisme kegagalan bertahap dan redistribusi beban.



Gambar 1 Hubungan antara gaya geser (F) dan pertambahan panjang (ΔL) pada spesimen *spot welding* (SW) konvensional dan *hybrid spot welding–epoxy bonding* (SWEB)

Fenomena dua puncak ini menjelaskan bahwa puncak pertama berkaitan dengan inisiasi dan propagasi retak pada lapisan *epoxy*. Setelah terjadi degradasi parsial pada *epoxy*, beban tidak langsung menyebabkan kegagalan total, melainkan dialihkan ke *nugget* las, yang kemudian menahan beban hingga mencapai puncak kedua sebelum kegagalan akhir. Mekanisme ini secara langsung menunjukkan adanya *load-sharing mechanism* antara *epoxy* dan sambungan metalurgi hasil *spot welding*. Hasil ini konsisten dengan temuan studi sebelumnya [2, 5, 9], yang menunjukkan bahwa sambungan *hybrid welding - bonding* mampu meningkatkan kapasitas penyerapan energi dan menunda kegagalan melalui mekanisme kegagalan progresif. Dibandingkan dengan sambungan *spot welding* (SW), *hybrid spot welding–epoxy bonding* (SWEB) memberikan kombinasi kekakuan awal (dari *epoxy*) dan kekuatan residual (dari *nugget* las). Secara kritis, hasil ini juga sejalan dengan simulasi numerik oleh Demiral dan Mamedov [17], yang menunjukkan bahwa kontribusi *adhesive* dalam meratakan distribusi tegangan secara signifikan mengurangi konsentrasi tegangan di sekitar *nugget*. Data hasil pengujian geser berupa gaya geser (F) maksimum rata-rata dan pertambahan panjang (ΔL) rata-rata sambungan *spot welding* (SW) dan *hybrid spot welding–epoxy bonding* (SWEB) dapat dilihat pada Tabel 1. Sedangkan, grafik hubungan antara arus pengelasan terhadap gaya geser maksimum rata-rata hasil penyambungan dengan *spot welding* (SW) dan *hybrid spot welding–epoxy bonding* (SWEB) seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Gambar 3 menunjukkan grafik hubungan antara pertambahan panjang rata-rata hasil penyambungan dengan *spot welding* (SW) konvensional dan *hybrid spot welding–epoxy bonding* (SWEB). Seluruh spesimen *hybrid spot welding–epoxy bonding* (SWEB) menunjukkan peningkatan gaya geser maksimum dibandingkan spesimen *spot welding* (SW), mengkonfirmasi adanya efek sinergistik antara *epoxy* dan *spot welding*. Namun, tingkat peningkatan ini sangat dipengaruhi oleh jenis *epoxy* yang digunakan. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa jenis *epoxy araldite* 90 menit menghasilkan gaya geser maksimum dan perpanjangan tertinggi, diikuti oleh *araldite* 5 menit dan *devcon* 90 menit. Temuan

ini menarik karena tidak hanya mencerminkan kekuatan statik, tetapi juga kemampuan deformasi (*ductility*) sambungan.

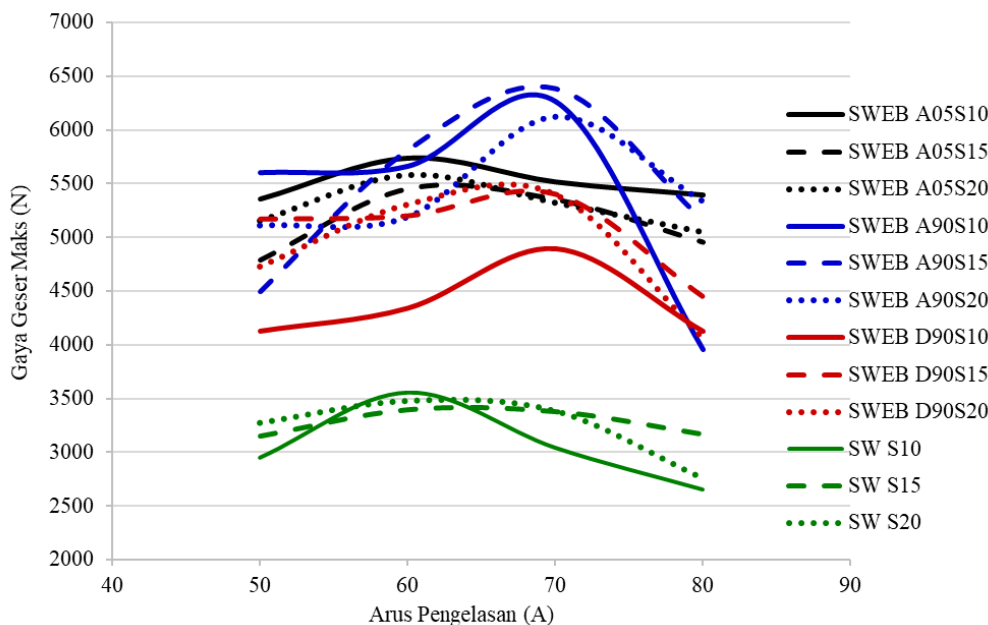
Tabel 1 Gaya geser (F) maksimum dan pertambahan panjang (ΔL) rata-rata spesimen sambungan *spot welding* (SW) dan *hybrid spot welding–epoxy bonding* (SWEB)

Kode spesimen	F maks rata-rata (N)	ΔL rata-rata (mm)	Kode spesimen	F maks rata-rata (N)	ΔL rata-rata (mm)
SW I50S10	2948.139	4.249	SWEB A05I50S10	5358.239	5.104
SW I60S10	3555.045	6.129	SWEB A05I60S10	5740.679	7.960
SW I70S10	3040.793	4.176	SWEB A05I70S10	5518.381	6.076
SW I80S10	2650.912	1.732	SWEB A05I80S10	5396.685	5.257
SW I50S15	3154.019	2.978	SWEB A05I50S15	4788.356	5.137
SW I60S15	3394.18	4.816	SWEB A05I60S15	5449.307	6.742
SW I70S15	3376.895	4.644	SWEB A05I70S15	5350.676	4.289
SW I80S15	3170.728	3.879	SWEB A05I80S15	4954.364	3.259
SW I50S20	3275.499	4.324	SWEB A05I50S20	5156.050	3.498
SW I60S20	3482.082	4.663	SWEB A05I60S20	5582.607	7.188
SW I70S20	3387.806	4.092	SWEB A05I70S20	5324.221	5.049
SW I80S20	2754.335	3.877	SWEB A05I80S20	5049.561	3.871

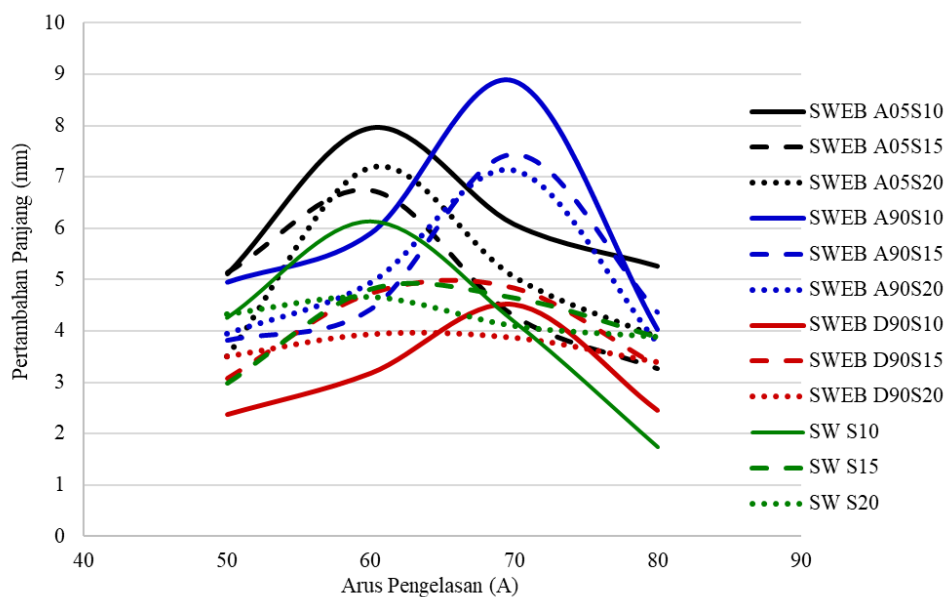
Kode spesimen	F maks rata-rata (N)	ΔL rata-rata (mm)	Kode spesimen	F maks rata-rata (N)	ΔL rata-rata (mm)
SWEB A90I50S10	5606.767	4.95	SWEB D90I50S10	4130.573	2.378
SWEB A90I60S10	5666.880	5.904	SWEB D90I60S10	4344.038	3.179
SWEB A90I70S10	6269.738	8.874	SWEB D90I70S10	4896.744	4.512
SWEB A90I80S10	3959.269	4.025	SWEB D90I80S10	4128.786	2.459
SWEB A90I50S15	4491.527	3.818	SWEB D90I50S15	5170.485	3.085
SWEB A90I60S15	5809.056	4.425	SWEB D90I60S15	5201.232	4.730
SWEB A90I70S15	6382.071	7.449	SWEB D90I70S15	5402.377	4.831
SWEB A90I80S15	5157.450	4.364	SWEB D90I80S15	4448.674	3.326
SWEB A90I50S20	5107.477	3.952	SWEB D90I50S20	4727.373	3.505
SWEB A90I60S20	5185.668	4.943	SWEB D90I60S20	5303.025	3.932
SWEB A90I70S20	6122.650	7.121	SWEB D90I70S20	5397.665	3.863
SWEB A90I80S20	5334.745	3.757	SWEB D90I80S20	4065.015	3.392

Keunggulan dari jenis *epoxy araldite* 90 menit dapat dikaitkan dengan kinetika *curing* yang lebih lambat, yang memungkinkan pembentukan jaringan polimer yang lebih homogen dan minim cacat. *Epoxy araldite* 90 menit mempunyai ketangguhan (*toughness*) yang lebih tinggi, sehingga mampu menahan propagasi retak lebih lama. Serta kemampuan disipasi energi yang lebih baik, yang terlihat dari peningkatan perpanjangan sebelum kegagalan. Fenomena ini konsisten dengan studi Carbas dkk. [18], yang menunjukkan bahwa *adhesive* mampu meningkatkan secara signifikan performa sambungan *hybrid welding - bonding*, terutama dalam hal ketangguhan (*toughness*) sambungan. Pada jenis *epoxy araldite* 5 menit menunjukkan performa optimum pada arus lebih rendah (60 A), yang mengindikasikan bahwa perekat ini lebih sensitif terhadap degradasi termal akibat proses pengelasan. Hal ini selaras dengan karakteristik *epoxy fast-curing* yang umumnya memiliki ketahanan termal lebih rendah dibandingkan *epoxy slow-curing* [19]. Pada jenis *epoxy devcon* 90 menit, meskipun memiliki waktu *curing* serupa dengan *araldite* 90 menit, menunjukkan performa lebih rendah, yang kemungkinan disebabkan oleh perbedaan viskositas dan kemampuan *wetting*, yang berpengaruh pada pembentukan *void* atau cacat internal selama proses *spot welding*. Dengan demikian, hasil ini mempertegas bahwa pemilihan *adhesive* dalam *hybrid spot welding–epoxy bonding* (SWEB) tidak dapat hanya didasarkan pada kekuatan intrinsik, tetapi harus mempertimbangkan interaksi kompleks antara kinetika *curing*, sifat termal, dan respons terhadap siklus panas pada *spot welding*. Variasi arus dan waktu pengelasan menunjukkan tren non-monotonik yang khas. Sesuai dengan Gambar 2, untuk sambungan *spot welding* (SW), gaya geser optimum tercapai pada arus 60 A, sedangkan pada *hybrid spot welding–epoxy bonding*

(SWEB) terjadi pergeseran kondisi optimum tergantung jenis perekat: 60 A untuk *araldite* 5 menit, dan 70 A untuk *araldite* 90 menit serta *devcon* 90 menit.



Gambar 2 Hubungan antara arus pengelasan terhadap gaya geser maksimum rata-rata spesimen *spot welding* (SW) dan *hybrid spot welding-epoxy bonding* (SWEB)

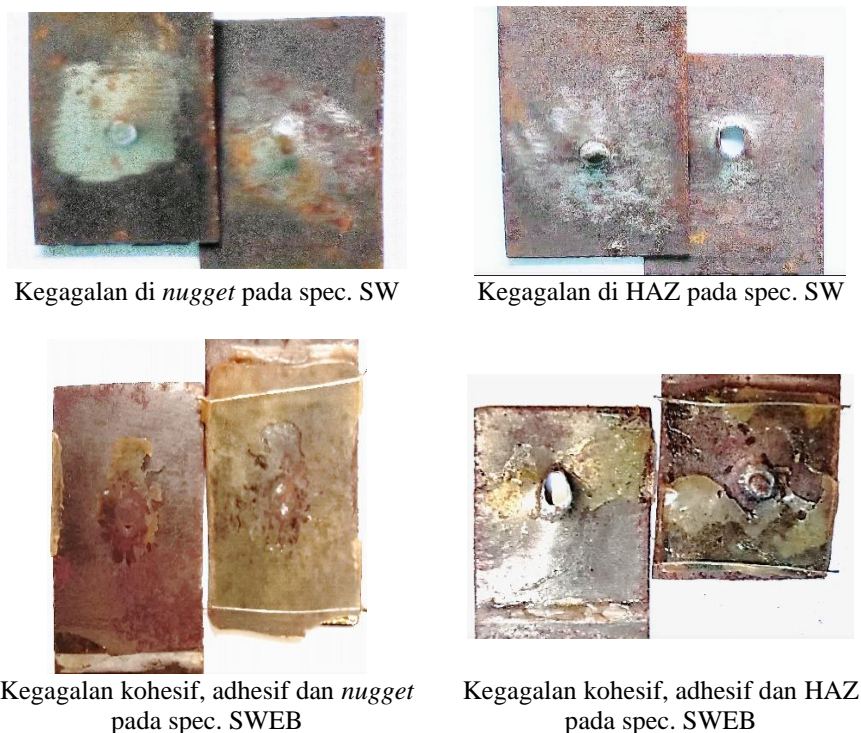


Gambar 3 Hubungan antara arus pengelasan terhadap pertambahan panjang rata-rata spesimen *spot welding* (SW) dan *hybrid spot welding-epoxy bonding* (SWEB)

Secara umum, peningkatan arus dari 50 A ke 60–70 A meningkatkan kekuatan sambungan karena pembentukan *nugget* yang lebih besar, fusi metalurgi yang lebih baik, sehingga meningkatkan area efektif transfer beban. Namun, pada arus lebih tinggi (80 A) atau waktu lebih lama (15–20 s), terjadi penurunan kekuatan yang diakibatkan terjadinya *expulsion* logam cair, pelunakan pada daerah *heat affected zone* (HAZ), indentasi elektroda, maupun degradasi termal *epoxy* di sekitar *nugget*. Fenomena ini telah banyak dilaporkan dalam literatur *resistance spot welding* (RSW), namun dalam konteks penyambungan *hybrid spot welding-epoxy bonding* (SWEB), efeknya menjadi lebih kompleks karena melibatkan interaksi termal dengan *epoxy*. Studi oleh Setyawan dkk. [5] dan Sun dkk. [20] menunjukkan

bahwa keberadaan *adhesive* dapat memodifikasi distribusi panas selama pengelasan, yang berdampak pada kualitas *nugget* dan degradasi *adhesive* secara simultan. Perbedaan arus optimum antara jenis *epoxy araldite 5* menit dan *Araldite 90* menit mengindikasikan bahwa *adhesive* dengan ketahanan termal lebih tinggi mampu mempertahankan integritasnya pada masukkan panas yang lebih besar, sehingga memungkinkan penggunaan arus yang lebih tinggi untuk meningkatkan kualitas *nugget* tanpa mengorbankan performa *adhesive*. Hal ini sejalan dengan temuan Cipriotti dkk. [19] mengenai stabilitas termal *epoxy* pada temperatur tinggi. Studi sebelumnya menekankan pentingnya karakterisasi mikrostruktur untuk menghubungkan parameter proses dengan sifat mekanik secara komprehensif [21]. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa hasil sambungan dari proses *hybrid spot welding-epoxy bonding* (SWEB) yang unggul berasal dari kombinasi *stress redistribution* oleh *epoxy*, yang mengurangi konsentrasi tegangan, dan *fail-safe mechanism* oleh *nugget* las, yang mempertahankan integritas setelah kegagalan *epoxy*. Temuan ini memiliki implikasi praktis yang signifikan, terutama dalam industri otomotif, di mana pemilihan *epoxy* sering kali didasarkan pada performa *epoxy* saja tanpa mempertimbangkan interaksi dengan proses pengelasan.

Gambar 4 menunjukkan mode kegagalan pada spesimen hasil pengujian geser sambungan *spot welding* (SW) dan *hybrid spot welding-epoxy bonding* (SWEB). Analisis morfologi patahan pada sambungan *hybrid spot welding-epoxy bonding* (SWEB) mengungkapkan bahwa mekanisme kegagalan bersifat hibrida dan dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara zona metalurgi hasil *spot welding* dan lapisan *epoxy*. Berdasarkan hasil pengamatan patahan pengujian geser, kegagalan pada sambungan las titik terlokalisasi pada daerah *nugget* dan *heat affected zone* (HAZ), sedangkan pada lapisan *epoxy* terjadi kombinasi kegagalan adhesi dan kohesi. Pola ini menunjukkan bahwa distribusi tegangan selama pembebanan tidak hanya bergantung pada satu mekanisme dominan, tetapi merupakan hasil kompetisi antara kapasitas deformasi plastis logam dan kemampuan transfer tegangan pada *interface epoxy*.

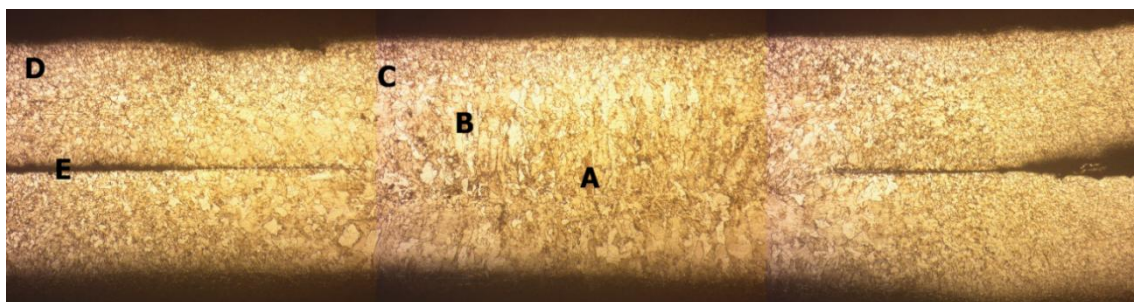


Gambar 4 Mode kegagalan pada spesimen hasil pengujian geser sambungan *spot welding* (SW) dan *hybrid spot welding-epoxy bonding* (SWEB)

Kegagalan pada *nugget* yang teramati pada sambungan *hybrid spot welding-epoxy bonding* (SWEB) mengindikasikan bahwa kekuatan metalurgi hasil *spot welding* belum melampaui kekuatan logam dasar secara konsisten. Fenomena ini terutama terjadi pada parameter arus rendah (50–60 A) dan waktu pengelasan singkat (10 s), yang menghasilkan ukuran *nugget* kecil dan distribusi tegangan yang

tidak homogen. Retak inisiasi pada *nugget* cenderung bersifat lokal dan menyebabkan dengan kekuatan mekanik dan keuletan yang terbatas. Hasil ini sejalan dengan temuan Nadimi dan Pouranvari [22], yang menunjukkan bahwa kegagalan *interfacial* pada *nugget* sering dikaitkan dengan ukuran *nugget* yang tidak memadai dan perubahan kekerasan yang tinggi. Dengan meningkatnya arus dan waktu pengelasan, terjadi peningkatan ukuran *nugget*, namun di sisi lain memperbesar risiko degradasi pada zona sekitarnya. Kegagalan pada *heat affected zone* (HAZ) yang ditandai dengan robekan lokal dan deformasi plastis menunjukkan adanya pelunakan mikrostruktur akibat siklus termal *spot welding*. Pada kondisi arus tinggi (70–80 A) dan waktu pengelasan lebih lama (15–20 s), input panas yang besar memperluas *heat affected zone* (HAZ) dan meningkatkan kecenderungan *grain coarsening*. Hal ini menyebabkan penurunan kekuatan lokal dan memicu inisiasi retak pada wilayah tersebut. Temuan ini konsisten dengan studi Tamizi dkk. [23] yang menegaskan bahwa pelunakan pada *heat affected zone* (HAZ) merupakan faktor kritis yang mengontrol kekuatan mekanik, khususnya dalam kondisi pembebanan siklik. Selain itu, penelitian Ghanbari dkk. [24] menunjukkan bahwa ketidakseragaman sifat mekanik antara *nugget*, *heat affected zone* (HAZ), dan logam dasar dapat mempercepat kegagalan karena *fatigue*.

Karakteristik utama sambungan *hybrid spot welding–epoxy bonding* (SWEB) adalah munculnya mode patahan campuran yang melibatkan kegagalan adhesi/kohesi pada perekat serta kegagalan metalurgi pada *nugget* dan *heat affected zone* (HAZ). Ketika kegagalan kohesif pada perekat mendominasi dan *nugget* tetap utuh, terjadi redistribusi tegangan yang lebih merata, sehingga meningkatkan kekuatan geser dan kemampuan penyerapan energi. Sebaliknya, kombinasi kegagalan adhesi dengan kegagalan dini pada *nugget* atau *heat affected zone* (HAZ) menghasilkan kegagalan yang lebih getas dan menurunkan kekuatan sambungan secara signifikan. Hasil ini sejalan dengan penelitian Yu dkk. [25], yang menunjukkan bahwa performa optimal sambungan *hybrid weld–bonding* dicapai pada kondisi *adhesive* mengalami kegagalan kohesif sementara sambungan las mempertahankan integritas strukturalnya. Mode patahan merupakan indikator dari efisiensi transfer beban dalam sambungan *hybrid spot welding–epoxy bonding* (SWEB). Kegagalan adhesi berkorelasi dengan kekuatan rendah dan perilaku getas, kegagalan kohesif meningkatkan ketangguhan, sementara kegagalan pada *nugget* dan *heat affected zone* (HAZ) mempengaruhi kekuatan metalurgi sambungan. Temuan ini menyoroti pentingnya optimasi simultan antara parameter pengelasan dan karakteristik *adhesive*. Variasi jenis epoxy memengaruhi perilaku kohesif, sedangkan arus dan waktu pengelasan mengontrol evolusi mikrostruktur pada *nugget* dan *heat affected zone* (HAZ). Oleh karena itu, pendekatan desain berbasis *failure mode engineering* diperlukan untuk mengarahkan mekanisme kegagalan menuju kombinasi yang lebih menguntungkan, yaitu dominasi kegagalan kohesif pada *adhesive* dan *nugget* yang kuat serta minimisasi pelunakan *heat affected zone* (HAZ). Hasil pengamatan struktur makro spesimen *hybrid spot welding–epoxy bonding* (SWEB A05I60S10) dapat dilihat pada Gambar 5.

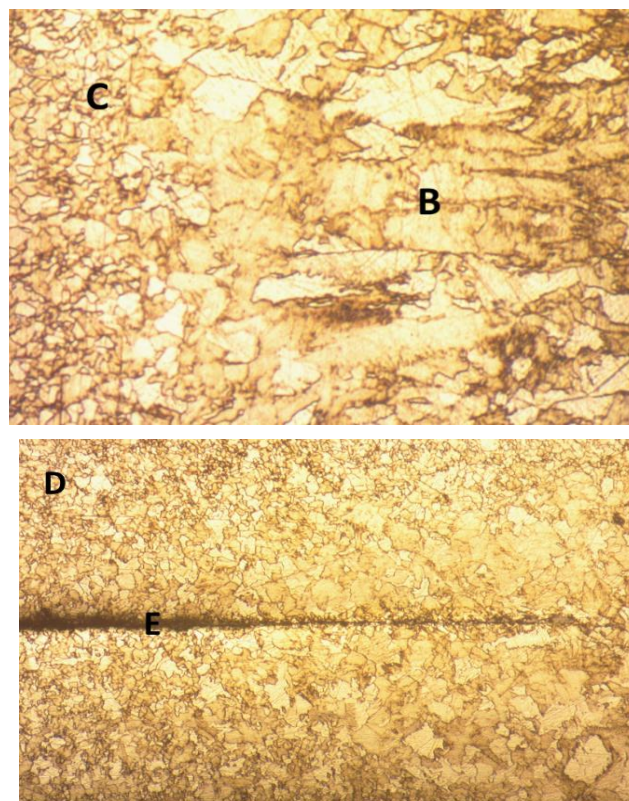


Gambar 5 Pengamatan struktur makro hasil penyambungan *hybrid spot welding–epoxy bonding* (SWEB A05I60S10)

Pengamatan makrostruktur pada sambungan *hybrid spot welding–epoxy bonding* (SWEB) dengan ketebalan perekat konstan 0,6 mm mengungkapkan morfologi sambungan yang secara signifikan berbeda dibandingkan *spot welding* (SW) konvensional. Zona makro yang teridentifikasi meliputi inti las (*fusion zone*) (daerah A pada Gambar 5), zona kolumnar (daerah B), zona butir halus (*fine-grained HAZ*) (daerah C), logam dasar (daerah D), serta lapisan perekat epoksi di antarmuka (daerah E). Keberadaan *epoxy* berperan sebagai penghalang termal parsial yang memodifikasi distribusi panas selama proses *spot welding*. Efek ini menghasilkan pertumbuhan *nugget* yang lebih lambat serta

morfologi yang cenderung asimetris. Fenomena ini konsisten dengan laporan oleh Lambiase dkk. [26] dan Arumugam dkk. [7], yang menunjukkan bahwa lapisan *adhesive* meningkatkan resistansi termal antarmuka sehingga menurunkan laju difusi panas. Secara spesifik, peningkatan arus pengelasan dari 50 A ke 80 A menunjukkan kecenderungan peningkatan diameter *nugget*, namun tidak linier akibat efek isolasi dari *epoxy*. Pada arus rendah (50–60 A), pembentukan *nugget* cenderung tidak sempurna (*undersized nugget*), terutama pada *epoxy* dengan waktu *curing* lebih lama (*araldite* 90 min dan *devcon* 90 min), yang memiliki stabilitas termal lebih tinggi. Sebaliknya, pada arus tinggi (70–80 A), terjadi peningkatan risiko cacat akibat degradasi termal *epoxy*. Waktu pengelasan juga menunjukkan pengaruh signifikan. Waktu pendek (10 s) menghasilkan ikatan yang tidak optimal, sedangkan waktu lebih lama (20 s) meningkatkan kemungkinan *overheating* lokal, yang berkontribusi terhadap pembentukan cacat seperti porositas dan retakan mikro akibat dekomposisi *epoxy*. Tiga jenis cacat utama teridentifikasi adalah retakan, indentasi permukaan, dan porositas [27].

Retakan umumnya terjadi pada kondisi kombinasi arus tinggi dan waktu pengelasan panjang, yang menghasilkan gradien termal tajam. Perak *epoxy* memperparah kondisi ini dengan menciptakan perbedaan pendinginan antara bagian penyambungan dan sekitarnya. Penurunan gaya geser pada spesimen dengan retakan sejalan dengan temuan Maggiore dkk. [28], yang menekankan peran retakan sebagai konsentrator tegangan. Indentasi permukaan terutama dipengaruhi oleh gaya elektroda dan resistansi kontak. Meskipun tidak secara langsung menurunkan kekuatan sambungan, keberadaannya berkontribusi terhadap penurunan umur *fatigue*, sebagaimana dilaporkan oleh Stavropoulos dkk. [29], dengan reduksi hingga 30% dalam kondisi lingkungan *fatigue*. Porositas merupakan cacat yang paling sensitif terhadap jenis *epoxy*. *Epoxy* dengan waktu *curing* cepat (*araldite* 5 min) cenderung menghasilkan lebih banyak gas volatil selama pemanasan, sehingga meningkatkan tingkat porositas. Hal ini mengindikasikan bahwa stabilitas termal *epoxy* menjadi parameter kritis dalam sambungan *hybrid spot welding–epoxy bonding* (SWEB). Penurunan kekuatan geser pada spesimen berpori tinggi konsisten dengan studi sebelumnya [26]. Hasil pengamatan struktur mikro *columnar* (daerah B), *heat affected zone* (HAZ) (daerah C), *base material* (daerah D) dan *epoxy* (daerah E) dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6 Pengamatan struktur mikro *columnar* (daerah B), *heat affected zone* (HAZ) (daerah C), *base material* (daerah D) dan *epoxy* (daerah E)

Analisis mikrostruktur menunjukkan distribusi khas antara logam dasar, *heat affected zone* (HAZ), dan *nugget* las. Logam dasar memperlihatkan struktur ferrite–pearlite ekuaksial, sedangkan *heat affected zone* (HAZ) menunjukkan gradien transformasi mikrostruktur yang bergantung pada jarak dari *fusion zone*. Pada *nugget* las, dominasi struktur kolumnar teramati jelas, dengan arah pertumbuhan mengikuti gradien termal. Kehadiran *epoxy* memperlambat perpindahan panas melalui *interface*, sehingga memperpanjang waktu solidifikasi dan memperkuat pertumbuhan kolumnar. Fenomena ini lebih menonjol dibandingkan *spot welding* (SW) konvensional [30, 32]. Variasi jenis *epoxy* menunjukkan pengaruh terhadap mikrostruktur. *Epoxy* dengan stabilitas termal tinggi (*devcon* 90 min) cenderung menghasilkan struktur yang lebih homogen dengan gradien termal lebih moderat, sedangkan *epoxy* dengan waktu *curing* cepat menghasilkan fluktuasi termal yang lebih besar. Dibandingkan dengan studi Li dkk. [32] pada baja AHSS, tidak ditemukan transformasi martensitik dalam penelitian ini karena material yang digunakan adalah baja karbon rendah. Hal ini menguntungkan dari sisi keuletan, namun menghasilkan kekerasan yang lebih rendah. Rajarajan dkk. [33] menekankan bahwa morfologi kolumnar dapat meningkatkan anisotropi sifat mekanik, yang juga terkonfirmasi dalam studi ini. Hasil pengujian komposisi *nugget* dari spesimen *hybrid spot welding - epoxy bonding* (SWEB) dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Komposisi *nugget* spesimen *hybrid spot welding - epoxy bonding* (SWEB)

Unsur	AISI 1008 (Mass %)	SWEB A05 (Mass %)	SWAB A90 (Mass %)	SWAB D90 (Mass %)
C	0,07 ± 0,02	0,25 ± 0,03	0,16 ± 0,02	0,19 ± 0,03
N	0,04 ± 0,02	0,15 ± 0,04	0,03 ± 0,03	0,03 ± 0,04
O	0,37 ± 0,04	0,55 ± 0,04	0,94 ± 0,06	0,37 ± 0,04
Mg	0,00 ± 0,02	0,01 ± 0,02	0,02 ± 0,02	0,03 ± 0,02
Al	0,13 ± 0,03	0,16 ± 0,03	0,18 ± 0,03	0,24 ± 0,04
Si	0,08 ± 0,02	0,11 ± 0,03	0,13 ± 0,03	0,18 ± 0,03
Mn	0,17 ± 0,05	0,26 ± 0,06	0,20 ± 0,06	0,20 ± 0,06
Ni		0,00 ± 0,06	0,01 ± 0,06	0,00 ± 0,06
P		0,10 ± 0,02	0,09 ± 0,02	0,05 ± 0,02
Cu		0,07 ± 0,08	0,43 ± 0,18	0,43 ± 0,18
Fe	99,14 ± 1,01	98,25 ± 1,01	98,23 ± 1,00	98,27 ± 0,98

Hasil analisis komposisi unsur menggunakan *energy dispersive X-ray spectroscopy* (EDS) pada daerah *nugget* menunjukkan adanya perubahan komposisi kimia akibat interaksi antara panas dari *spot welding* dan degradasi termal *epoxy*. Dibandingkan dengan logam dasar, *nugget* memperlihatkan peningkatan kandungan karbon. Variasi jenis *epoxy* memberikan pengaruh yang berbeda, di mana sistem dengan *fast-curing epoxy* (*araldite* 5 min) menunjukkan indikasi peningkatan kadar karbon yang lebih tinggi dibandingkan *araldite* 90 min dan *devcon* 90 min. Fenomena ini berkaitan dengan mekanisme pirolisis *epoxy* selama siklus termal pengelasan. Pada temperatur tinggi di *fusion zone*, jaringan polimer termoset mengalami depolimerisasi dan fragmentasi, menghasilkan senyawa volatil serta residu karbon (*carbonaceous char*). Studi termal oleh Cipriotti dkk. [19] menunjukkan bahwa stabilitas termal *epoxy* sangat bergantung pada struktur kimia dan derajat *cross-linking*, yang pada akhirnya menentukan jumlah residu karbon yang terbentuk. Pada penyambungan *hybrid spot welding-epoxy bonding* (SWEB), residu karbon dapat larut dalam logam cair selama fase peleburan atau mengendap sebagai lapisan tipis pada *interface nugget*–lembaran. Kedua mekanisme tersebut berkontribusi terhadap peningkatan konsentrasi karbon yang terdeteksi oleh EDS. Peningkatan kandungan karbon setempat mempunyai pengaruh penting terhadap perubahan mikrostruktur selama pendinginan cepat. Pada baja karbon rendah, peningkatan kadar karbon dapat meningkatkan *hardenability*, sehingga dapat memicu pembentukan martensit atau bainit halus di *fusion zone* dan *heat affected zone* (HAZ). Hal ini konsisten dengan literatur yang menunjukkan bahwa variasi kandungan karbon setempat mampu menghasilkan heterogenitas mikrostruktur yang signifikan [34]. Dalam penelitian ini, kondisi arus menengah (60–70 A) dan waktu 15 s cenderung menghasilkan kondisi optimum, di mana peningkatan kadar karbon cukup untuk memperkuat *nugget* tanpa memicu

terbentuknya fasa yang *brittle* secara berlebihan. Sebaliknya, pada kondisi input panas tinggi (80 A, 20 s), peningkatan kadar karbon yang signifikan, berpotensi menghasilkan struktur martensitik yang rentan terhadap retak [35].

Korelasi antara komposisi dan respons mekanik menunjukkan karakteristik yang bersifat *trade-off*. *Nugget* dengan kandungan karbon lebih tinggi umumnya menunjukkan peningkatan kekerasan lokal dan beban geser, yang menjelaskan peningkatan kekuatan sambungan *hybrid spot welding-epoxy bonding* (SWEB) dibandingkan *spot welding* konvensional. Namun demikian, peningkatan ini diiringi dengan penurunan ketangguhan akibat terbentuknya fasa yang keras dan potensi konsentrasi tegangan pada daerah heterogen. Selain itu, volatilisasi *epoxy* selama proses pengelasan dapat menghasilkan porositas mikro yang menurunkan luas penampang efektif dan berperan sebagai *crack initiation*. Kombinasi antara porositas, heterogenitas karbon, dan fasa yang rapuh menyebabkan peningkatan dispersi data kekuatan, terutama pada kondisi arus dan waktu tinggi. Temuan ini sejalan dengan laporan Maggiore dkk. [28], yang menekankan bahwa pada sambungan *hybrid welding-bonding*, degradasi *adhesive* merupakan faktor kunci yang tidak hanya mampu merubah komposisi namun dapat juga mempengaruhi *interface* dan mekanisme kegagalan. Dibandingkan dengan proses berenergi tinggi lainnya seperti *laser welding* [34], SWEB memiliki durasi pemanasan yang relatif lebih lama, sehingga memungkinkan difusi karbon dan pembentukan lapisan residu. Hal ini menjadikan pemilihan parameter proses dan jenis *epoxy* sebagai faktor penting dalam mengendalikan fenomena ini. Keberadaan daerah dengan peningkatan kadar karbon dan *interface* sangat mempengaruhi ketahanan *fatigue*. Daerah dengan kekerasan tinggi cenderung memiliki ketahanan retak yang lebih rendah, sementara porositas dan *interface* yang lemah dapat mempercepat inisiasi serta propagasi retak di bawah beban *fatigue*. Oleh karena itu, meskipun peningkatan kekuatan statis merupakan keuntungan utama SWEB, optimasi harus mempertimbangkan keseimbangan antara kekuatan dan ketangguhan, khususnya untuk aplikasi struktural. Sebagai catatan, hasil EDS terhadap unsur karbon memiliki keterbatasan. Sensitivitas yang rendah terhadap unsur ringan menyebabkan kesulitan tersendiri dalam membedakan antara karbon yang benar-benar terlarut dalam logam (*true carburization*) dengan karbon dari kontaminasi permukaan. Walther [36] merekomendasikan penggunaan teknik komplementer seperti WDS, EPMA, atau XPS untuk meningkatkan akurasi kuantifikasi. Dengan demikian, hasil yang diperoleh dalam penelitian ini harus dipandang sebagai indikasi tren komposisi, bukan sebagai kuantifikasi absolut.

Hasil penelitian ini menegaskan bahwa fenomena peningkatan kadar karbon pada *nugget* merupakan konsekuensi langsung dari interaksi kompleks antara degradasi *epoxy* dan siklus termal *spot welding*. Variabel jenis *epoxy* dan parameter proses (arus dan waktu) berperan dominan dalam mengontrol fenomena ini. Temuan ini memberikan dasar penting untuk optimasi proses, dengan menekankan bahwa pengendalian degradasi *epoxy* merupakan kunci untuk meminimalkan heterogenitas mikrostruktur dan meningkatkan keandalan sambungan dalam jangka panjang.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menegaskan bahwa proses *hybrid spot welding-epoxy bonding* (SWEB) memberikan peningkatan performa mekanik yang signifikan dibandingkan *spot welding* (SW) konvensional melalui mekanisme sinergistik antara ikatan adhesif dan fusi metalurgi. Respons dua puncak (*double-peak*) pada kurva gaya geser-perpanjangan mengonfirmasi adanya mekanisme *load-sharing* dan kegagalan progresif, dan *epoxy* berperan dalam meningkatkan kekakuan awal dan redistribusi tegangan, sementara *nugget* las mempertahankan struktural pada tahap akhir pembebanan. Variasi jenis *epoxy* terbukti menjadi parameter kunci yang mengontrol kekuatan dan ketangguhan sambungan. *Epoxy* dengan waktu *curing* lebih lambat (*araldite* 90 menit) menunjukkan performa optimum, yang dikaitkan dengan struktur polimer yang lebih homogen, ketangguhan tinggi, serta ketahanan terhadap degradasi termal. Sebaliknya, *epoxy fast-curing* lebih rentan terhadap degradasi selama siklus termal pengelasan. Selain itu, parameter proses pengelasan menunjukkan perilaku non-monotonik, dengan kondisi optimum pada arus menengah (60–70 A) dan waktu sedang (≈ 15 s), yang menghasilkan keseimbangan antara pembentukan *nugget* yang memadai dan minimisasi degradasi *epoxy* serta pelunakan *heat affected zone* (HAZ). Analisis mode patahan mengungkap bahwa performa optimum dicapai pada dominasi kegagalan kohesif pada *epoxy* yang dikombinasikan dengan *nugget* yang kuat, sementara interaksi kegagalan *adhesive*–metalurgi menjadi indikator efisiensi transfer beban.

Di sisi lain, hasil EDS menunjukkan adanya peningkatan kandungan karbon pada *nugget* akibat pirolisis *epoxy*, yang berkontribusi terhadap penguatan lokal namun berpotensi menurunkan ketangguhan dan meningkatkan heterogenitas mikrostruktur. Secara ilmiah, penelitian ini memperjelas keterkaitan antara parameter proses, sifat *adhesive*, evolusi mikrostruktur, dan mekanisme kegagalan dalam SWEB. Secara praktis, temuan ini menekankan pentingnya pendekatan optimasi terpadu berbasis *failure mode engineering* dalam desain sambungan *hybrid*, khususnya untuk aplikasi industri otomotif dan struktur ringan yang menuntut kombinasi kekuatan, ketangguhan, dan keandalan jangka panjang.

Ucapan Terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian Dan Pengabdian Kepada Masyarakat dan Fakultas Teknik Universitas Mataram yang telah mendukung penelitian ini dengan memberikan pendanaan lewat skema Hibah Pengembangan Kapasitas (PNBP) dengan nomor kontrak 3217/UN18.L1/PP/2025. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu baik berupa materi maupun pikiran sehingga penelitian dan paper ini dapat terselesaikan.

Daftar Pustaka

- [1] AHSS, Hybrid Welding Procedures – AHSS Guidelines, AHSS Insights, 2023.
- [2] S. Safaei, L.M. Martulli, A. Bernasconi, M. Carboni, Modelling the static and fatigue behavior of hybrid spot welded-adhesively bonded single lap joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 130 (2024) 103619.
- [3] P.D. Setyawan, I.M. Suniartha, Sugiman, Sinarep, Characterization of shear strength and micro structure of spot welded results of low carbon steel plates, *Energy, Materials and Product Design*, 3 (2) (2024) 198–206.
- [4] P. Golewski, T. Sadowski, The influence of dual adhesive in single lap joints on strength and energy absorption, *Materials Today: Proceedings*, 45 (5) (2021) 4280-4285.
- [5] P.D. Setyawan, I. Hakiki, Sugiman, Salman, Sinarep, A. Maulana, Hybrid spot welding-epoxy bonding of AISI 1008 steel: Shear and nugget analysis, *Jurnal Polimesin*, 23 (5) (2025) 66-76.
- [6] J. Weiland, S. Debruyne, D. Vandepitte, M. Pulm, A. Schiebahn, U. Reisgen, Stiffness and strength analysis of hybrid adhesive bonded – resistance spot welded sandwich samples by means of virtual fe testing, *The Journal of Adhesion* 95 (5–7) (2019) 543–57.
- [7] Arumugam, Aravinthan, C.P. Pagwiwoko, A. Pramanik, A.K. Basak, An experimental and simulation study on the effect of adhesive in weld bonded spot weld joints, *Metals* 15 (9) (2025) 938.
- [8] M. Li, Y. Wang, Z. Niu, Study on the weld-bonding process optimization and mechanical performance of aluminum alloy joints, *Automot. Innov.* 3 (2020) 221–230.
- [9] G.P. Marques, R.D.S.G. Campilho, F.J.G. da Silva, R.D.F. Moreira, Adhesive selection for hybrid spot-welded/bonded single-lap joints: experimentation and numerical analysis, *Composites Part B: Engineering*, 84 (2016) 248-257.
- [10] ASTM, ASTM E350-18: Standard Test Methods for Chemical Analysis of Carbon Steel, Low-Alloy Steel, Silicon Electrical Steel, Ingot Iron, and Wrought Iron, ASTM International, ASTM International, 2023.
- [11] ISO, ISO 14273, Second Edition, International Standard, Resistance Welding - Destructive Testing of Welds - Spesimen Dimensions and Procedure for Tensile Shear Testing Resistance Spot and Embossed Projection Welds, ISO, 2016.
- [12] ASTM, ASTM D1002-10, Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Spesimens by Tension Loading (Metal-to-Metal), ASTM International, 2019.
- [13] ISO, ISO 4587, Adhesives — Determination of Tensile Lap-Shear Strength of Rigid-to-Rigid Bonded Assemblies, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2003.

- [14] ASTM, ASTM E3-11, Standard Guide for Preparation of Metallographic Spesimens, ASTM International, 2017.
- [15] ASTM, ASTM E407-23, Standard Practice for Microetching Metals and Alloys, ASTM International, 2023.
- [16] ASTM, ASTM E1508-12a, Standard Guide for Quantitative Analysis by Energy-Dispersive Spectroscopy in Electron Microscopy, ASTM International, 2019.
- [17] M. Demiral, A. Mamedov, Comparison of the strength of resistance spot-welded, bonded, and hybrid single lap joints: a numerical investigation, *Results in Engineering*, 25 (2025) 103871.
- [18] R.J.C. Carbas, E.A.S. Marques, L.F.M. da Silva, The influence of epoxy adhesive toughness on the strength of hybrid laminate adhesive joints, *Appl Adhes Sci.*, 9 (1) 2021.
- [19] S.V. Cipriotti, M. Raimondo, L. Vertuccio, Multi-technique characterization and thermal degradation study of epoxy modified resins designed for multifunctional applications, *J. Therm. Anal Calorim*, 149 (2024) 11041–11055.
- [20] X. Sun, Q. Zhang, S. Wang, X. Han, Y. Li, S.A. David, Effect of adhesive sealant on resistance spot welding of 301L stainless steel, *Journal of Manufacturing Processes*, 51 (2020) 62-72.
- [21] Elitas, Muhammed, Effects of welding parameters on tensile properties and fracture modes of resistance spot welded DP1200 steel, *Materials Testing*, 63 (2) (2021) 124-130.
- [22] N. Nadimi, M. Pouranvari, Understanding interfacial failure mechanisms of advanced high strength automotive steels resistance spot welds under opening-mode loading, *Engineering Fracture Mechanics*, 313 (2025) 10627.
- [23] M. Tamizi, M. Pouranvari, M. Movahedi, The role of HAZ softening on cross-tension mechanical performance of martensitic advanced high strength steel resistance spot welds, *Metall Mater Trans A*, 52 (2021) 655–667.
- [24] H.R. Ghanbari, M. Shariati, E. Sanati, R.M. Nejad, Effects of spot welded parameters on fatigue behavior of ferrite-martensite dual-phase steel and hybrid joints, *Engineering Failure Analysis*, 134 (2022) 106079.
- [25] Yu, Guishen, X. Chen, B. Zhang, K. Pan, L. Yang, Tensile-shear mechanical behaviors of friction stir spot weld and adhesive hybrid joint: experimental and numerical study, *Metals*, 10 (8) (2020) 1028.
- [26] Lambiase, Francesco, S.I. Scipioni, C.J. Lee, D.C. Ko, F. Liu, A state-of-the-art review on advanced joining processes for metal-composite and metal-polymer hybrid structures, *Materials*, 14 (8) (2021) 1890.
- [27] W. Yang, P.P. Gao, X.D. Gao, Online evaluation of resistance spot welding quality and defect classification, *Measurement Science and Technology*, 34 (9) (2023).
- [28] S. Maggiore, M.D. Banea, P. Stagnaro, G. Luciano, A review of structural adhesive joints in hybrid joining processes, *Polymers*, 13 (22) (2021) 3961.
- [29] Stavropoulos, Panagiotis, K. Sabatakakis, Quality assurance in resistance spot welding: state of practice, state of the art, and prospects, *Metals*, 14 (2) (2024) 185.
- [30] S.A. David, S.S. Babu, J.M. Vitek, Welding: solidification and microstructure, *JOM*, 55 (2003) 14–20.
- [31] V.P.N. Samy, M. Schäfle, F. Brasche, U. Krupp, C. Haase, Understanding the mechanism of columnar-to-equiaxed transition and grain refinement in additively manufactured steel during laser powder bed fusion, *Additive Manufacturing*, 73 (2023) 103702.
- [32] Li, Yunzhao, H. Tang, R. Lai, Microstructure and mechanical performance of resistance spot welded martensitic advanced high strength steel, *Processes*, 9 (6) (2021) 1021.
- [33] C. Rajarajan, P. Sivaraj, V. Balasubramanian, Microstructural analysis of weld nugget properties on resistance spot-welded advanced high strength dual phase ($\alpha+\alpha'$) steel joints, *Materials Research Express*, 7 (1) (2020).
- [34] J. Hargreaves, S. Moore, G. Yuan, D. Liu, H. Tipping, R. Abbott, J. Tufnail, H. Dawson, T.L. Martin, Microstructural modelling and characterisation of laser-keyhole welded Eurofer 97, *Materials & Design*, 226 (2023) 111614.
- [35] Chabok, E. van der Aa, Y. Pei, A study on the effect of chemical composition on the microstructural characteristics and mechanical performance of DP1000 resistance spot welds,

- Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 788 (2020) 139501.
- [36] T. Walther, Recent improvements in quantification of energy-dispersive X-ray spectra and maps in electron microscopy of semiconductors, *Applied Spectroscopy*, 78 (2024) 1547–1562.