

KARAKTERISASI KEKUATAN GESER DAN STRUKTUR MIKRO HASIL SPOT WELDING PELAT BAJA KARBON RENDAH

CHARACTERIZATION OF SHEAR STRENGTH AND MICRO STRUCTURE OF SPOT WELDED RESULTS OF LOW CARBON STEEL PLATES

P.D. Setyawan*, I.M. Suniartha, Sugiman, Sinarep

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.v3i2.5374>

Received 9 September 2024; Received in revised form 23 October 2024; Accepted 25 October 2024

ABSTRACT

Spot welding is a joining method that utilizes thermal energy generated by the resistance of electric current. Research was conducted to determine the effect of plate thickness, current and welding time on the characteristics of spot welding results. Spot welding was performed on low carbon steel plates of 0.8 mm, 1.5 mm and 1.8 mm thickness with current (50, 60, 70, 80 amperes) and welding time (10, 15, 20 seconds). Characterization of the spot welds was done by shear test (ASTM D1002-10) and observation of macro and micro structure (ASTM E3-11) and failure surface of the specimens. From the research conducted, it is known that the average shear strength increases with decreasing plate thickness, increasing welding current and decreasing welding time. The highest average shear strength of 502,772 N/mm² was obtained with a plate thickness of 0.8 mm, a welding current of 70 A, and a welding time of 10 seconds. For thin plates, most of the shear test specimens failed in the area of the heat affected zone, while for thick plates, most of the shear test specimens failed in the area of the nugget spot weld.

Keywords: Shear strength, Microstructure, Parameter process, Spot welding, Low carbon steel

1. Pendahuluan

Kebutuhan metode penyambungan yang lebih baik dalam aplikasi struktural telah meningkatkan penggunaan sambungan metode tradisional seperti sambungan las (*welding*), *brazing*, baut (*bolt*) dan paku keling (*rivet*). Las titik (*spot welding*) merupakan metode penyambungan logam dengan memanfaatkan arus listrik antara dua plat yang disambung sehingga permukaan kontak menjadi panas dan mencair karena adanya resistansi listrik yang terkonsentrasi. Proses *spot welding* ini banyak digunakan dalam industri otomotif, manufaktur alat rumah tangga, serta konstruksi kapal dan pesawat terbang [1]. Selain itu, metode pengelasan titik banyak digunakan dalam pembuatan *body* gerbong kereta api, konstruksi kapal, dan *body* mobil [2]. Keuntungan utama dari *spot welding* adalah proses yang cepat dan efisien, mudah digunakan dan tidak memerlukan keterampilan khusus, serta relatif murah dibandingkan dengan metode penyambungan lainnya [3].

Penelitian pendahuluan mengemukakan bahwa faktor besar kecilnya arus listrik akan mempengaruhi ukuran diameter *nugget* (manik las) dan panas yang ditimbulkan [4]. Ketebalan pelat yang digunakan akan mempengaruhi kecepatan rambatan panas yang terjadi baik pada saat pengelasan maupun sesudah pengelasan (pendinginan). Hal ini akan mempengaruhi pembentukan fase akhir yang

terbentuk, sehingga akan menentukan kekuatan sambungan las. Selain itu waktu lasan dan jenis bahan yang mudah menghantarkan listrik (konduktor) juga mempengaruhi intensitas panas yang masuk. Pemilihan parameter las titik yang tepat akan berpengaruh pada kekuatan lasan dan perubahan sifat mekanis.

Las titik (*spot welding*) baik diterapkan pada plat tipis dengan sambungan *lap joint*. Secara umum, parameter pengelasan yang berpengaruh adalah arus listrik (*welding current*), tekanan elektroda (*electrode force*) dan siklus pengelasan. Siklus pengelasan tersebut terdiri dari waktu penekanan (*squeeze time*), waktu pengelasan (*welding time*), waktu pendinginan (*cooling time*) dan waktu penahanan (*hold time*)[5].

Spot welding baja karbon rendah adalah aplikasi yang umum dalam industri otomotif dan manufaktur, dimana baja karbon rendah banyak digunakan sebagai material dasar. Keuntungan *spot welding* baja karbon rendah adalah kecepatan proses, efisiensi yang tinggi, sangat murah dan hemat biaya serta kemampuan untuk menyambung banyak lembaran logam sekaligus [6]. Selain itu, *spot welding* menghasilkan sambungan logam yang kuat dan tahan lama proses ini juga tidak memerlukan penggunaan bahan tambahan seperti *solder* atau *flux* [7].

Penelitian mengenai pengaruh *welding time* terhadap struktur mikro dan kekerasan, sambungan lap baja tahan karat feritik AISI 430 dengan metode *resistance spot welding*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin bertambahnya waktu pengelasan membuat ukuran nugget semakin membesar. Gaya geser terbesar yang dibutuhkan untuk mematahkan benda uji adalah 4,34 kN dan terjadi pada spesimen dengan waktu pengelasan 1,25 detik. Struktur mikro nugget las terdiri dari ferit dan martensit, sedangkan struktur mikro pada base metal dan HAZ terdiri dari *ferrite* dan *pearlite*[8].

Penelitian mengenai pengaruh variasi arus listrik terhadap kekuatan tarik dan struktur mikro sambungan las titik (*spot welding*) logam dissimilar stainless steel dan baja karbon rendah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan arus listrik dari 60 A ke 70 A berdampak pada kenaikan kekuatan tarik, sedangkan peningkatan arus listrik dari 70 A ke 80 A memperlihatkan penurunan kekuatan tarik. Kondisi terbaik terjadi pada arus listrik 70 A yang memberikan kekuatan tarik sebesar 190,920 kN/mm². Pengamatan struktur mikro pada sambungan las titik logam dissimilar antara *stainless steel* dan baja karbon rendah memiliki *fusion zone* yang tidak simetris [9].

Analisa pengaruh ketebalan plat baja karbon rendah dan lama penekanan pada pengelasan titik (*spot welding*) terhadap nilai kekuatan tarik telah diteliti [10]. Pada hasil pengujian didapat hasil terjadinya penurunan nilai kekuatan tarik dengan meningkatnya ketebalan pelat dan lama penekanan. Untuk kekuatan tarik terbesar rata-rata yang didapat adalah 67,69 N/mm² pada ketebalan plat 0,6 mm dengan lama tekan 3 detik.

Dalam penelitian ini sambungan las titik (*spot welding*) dilakukan pada pelat baja karbon rendah untuk menghasilkan sambungan yang lebih baik. Kinerja hasil sambungan las titik (*spot welding*) dipengaruhi oleh variabel sambungan las (tebal pelat, arus dan waktu penyambungan *spot welding*). Karakterisasi hasil sambungan las titik (*spot welding*) dilakukan dengan pengujian geser dan pengamatan stuktur makro dan mikro dari hasil sambungan dan permukaan kegagalan spesimen.

2. Bahan dan Metode

Baja karbon adalah material yang paling cocok untuk proses las titik (*spot welding*), karena tahanan yang tinggi terhadap listrik dan konduktivitas termal yang lebih rendah daripada elektroda tembaga yang digunakan untuk menghasilkan arus listrik yang dibutuhkan. Material yang digunakan pada penelitian ini adalah pelat Baja Karbon Rendah (kadar karbon 0,07 %) dengan ketebalan 0,8 mm, 1,5 mm dan 1,8 mm. Pada penelitian ini dipergunakan mesin las titik (*spot welding*) Merk Bron-Gouda B.V. *Lastechnik*. Rancangan dimensi benda uji dan sambungan las titik (*spot welding*) pada penelitian ini berdasarkan *Standard ISO 14273* [11]. Pengelasan titik (*spot welding*) dilakukan dengan variasi arus : 50, 60, 70, 80 Ampere dan waktu : 10, 15, 20 detik.

Pengujian geser dilakukan untuk mengevaluasi kekuatan sambungan hasil proses penyambungan *spot welding*. Pengujian ini dilakukan dengan cara menerapkan beban pada sambungan secara lateral (geser) untuk menguji kekuatan geser sambungan. Standar pengujian geser yang digunakan adalah *ASTM D1002-10 Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading* dan *ISO 4587 Adhesives - Determination of Shear*

Strength of Adhesively Bonded Joints [12, 13]. Pengamatan struktur makro dan mikro dilakukan untuk mengetahui karakteristik makrostruktur dan mikrostruktur pada sambungan hasil penyambungan *spot welding*. Dalam hal ini, digunakan mikroskop optic di Laboratorium Material Universitas Mataram. Standar pengamatan yang digunakan adalah ASTM E3-11 *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens* dan ASTM E407-07(2013) *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*. Melalui pengujian dan pengamatan tersebut, dapat dievaluasi kualitas sambungan dan karakteristik *nugget* hasil proses penyambungan *spot welding* [14,15].

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Kekuatan Geser Sambungan

Kekuatan geser rata-rata sambungan *spot welding* hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 1. Kode spesimen terdiri atas 6 digit angka; 2 digit pertama menunjukkan ketebalan pelat Baja Karbon Rendah; 2 digit ditengah menunjukkan besarnya arus pengelasan dalam Ampere; dan 2 digit terakhir menunjukkan waktu penekanan pegelasan dalam detik. Berdasarkan tabel 1, dibuat grafik hubungan antara arus pengelasan terhadap kekuatan geser rata-rata (gambar 1) dan grafik hubungan antara waktu pengelasan terhadap kekuatan geser rata-rata (gambar 2).

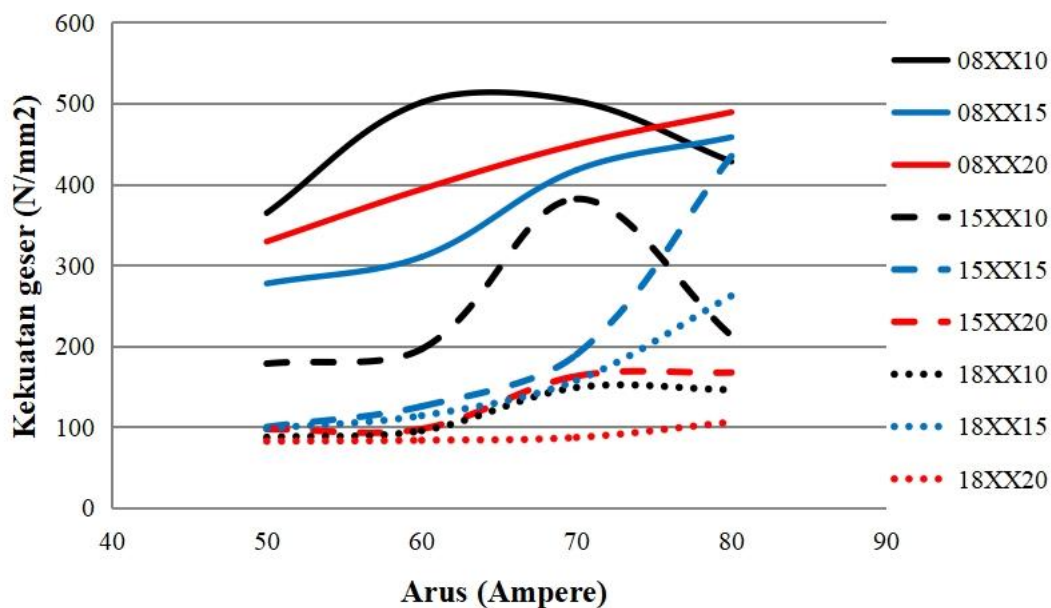
Tabel 1 Kekuatan geser rata-rata sambungan *spot welding*

Spesimen	Kekuatan Geser rata-rata (N/mm ²)	Spesimen	Kekuatan Geser rata-rata (N/mm ²)	Spesimen	Kekuatan Geser rata-rata (N/mm ²)
085010	364.351	155010	178.185	185010	87.175
085015	277.199	155015	99.906	185015	98.043
085020	329.086	155020	97.272	185020	82.217
086010	501.098	156010	196.235	186010	95.271
086015	310.112	156015	125.314	186015	113.895
086020	393.820	156020	97.532	186020	83.458
087010	502.772	157010	381.712	187010	148.666
087015	417.508	157015	189.485	187015	157.438
087020	448.995	157020	162.729	187020	86.957
088010	427.942	158010	212.611	188010	145.874
088015	458.072	158015	434.657	188015	262.008
088020	488.996	158020	167.204	188020	105.893

Gambar 1 menunjukkan grafik hubungan antara arus pengelasan terhadap kekuatan geser rata-rata hasil penyambungan dengan *spot welding*. Gambar 1 menunjukkan bahwa pada arus dan waktu pengelasan yang sama, dengan semakin menurunnya ketebalan pelat diperoleh kekuatan geser rata-rata yang semakin meningkat. Secara umum kekuatan geser rata-rata pelat dengan ketebalan 0,8 mm paling tinggi, diikuti ketebalan pelat 1,5 mm dan 1,8 mm. Hal ini juga teramati pada hasil penelitian [10]. Kekuatan geser rata-rata tertinggi ditunjukkan pada ketebalan pelat 0,8 mm, arus pengelasan 70 A dan waktu pengelasan 10 detik (spesimen 087010) sebesar 502.772 N/mm².

Pada tebal pelat 0,8 mm, grafik pada gambar 1 menunjukkan bahwa dengan bertambahnya arus pengelasan (sampai 80 A) akan menghasilkan peningkatan kekuatan geser sambungan. Pada ketebalan pelat 0,8 mm dengan waktu pengelasan 10 detik, kekuatan geser rata-rata sambungan optimum diperoleh pada arus pengelasan 70 A (spesimen 087010) sebesar 502.772 N/mm². Hal ini juga teramati pada hasil penelitian [9]. Pada tebal pelat 1,5 mm terlihat bahwa dengan bertambahnya arus pengelasan (sampai 80 A) akan menghasilkan peningkatan kekuatan geser sambungan. Tren yang serupa pada tebal pelat 0,8 mm, pada tebal pelat 1,5 mm menunjukkan bahwa kekuatan geser rata-rata sambungan optimum diperoleh pada waktu pengelasan 10 detik dan arus pengelasan 70 A (spesimen 157010) sebesar 381.712 N/mm². Sedangkan kekuatan geser rata-rata sambungan tertinggi diperoleh pada waktu pengelasan 15 detik dan arus pengelasan 80 A (spesimen 158015) sebesar 434.657 N/mm². Grafik pada Gambar 1 juga menunjukkan bahwa, pada tebal pelat 1,8 mm, dengan bertambahnya arus pengelasan (sampai 80 A) akan menghasilkan peningkatan kekuatan geser sambungan. Kekuatan geser rata-rata sambungan tertinggi diperoleh pada waktu pengelasan 15 detik dan arus pengelasan 80 A (spesimen 188015) sebesar

262.008 N/mm². Tren serupa pada tebal pelat 0,8 mm dan 1,5 mm, pada tebal pelat 1,8 mm menunjukkan bahwa kekuatan geser rata-rata sambungan optimum tercapai pada waktu pengelasan 15 detik dan arus pengelasan 70 A (spesimen 187015) sebesar 157.438 N/mm².



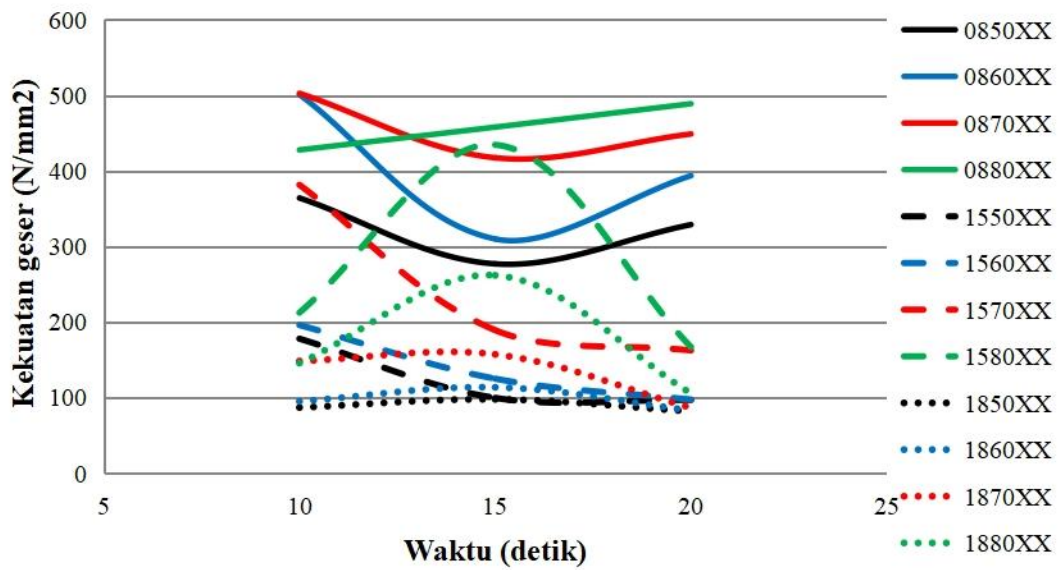
Gambar 1 Hubungan arus pengelasan terhadap kekuatan geser rata-rata sambungan

Menurut [16], dengan meningkatnya arus pengelasan didapatkan kekuatan geser yang semakin rendah, hal ini dikarenakan arus pengelasan yang semakin besar akan menghasilkan daerah logam las yang lebar serta penembusan yang dalam sehingga menghasilkan kekuatan geser yang rendah dan menambahkan kerapuhan. Hal ini sesuai dengan diameter logam las (*nugget*) yang terbentuk, dimana seiring dengan meningkatnya arus pengelasan maka diameter *nugget* semakin besar. Semakin besar arus yang digunakan maka panas yang terjadi juga semakin besar. Tetapi tidak selamanya sambungan menjadi lebih baik, pada sambungan las titik logam *dissimilar* ada suatu kondisi dimana semakin besar arus tetapi hasil lasnya rusak, hal ini terjadi karena titik lebur pada setiap material berbeda-beda, jika panas yang dihasilkan melebihi titik lebur material yang digunakan maka hasil pengelasan akan rusak.

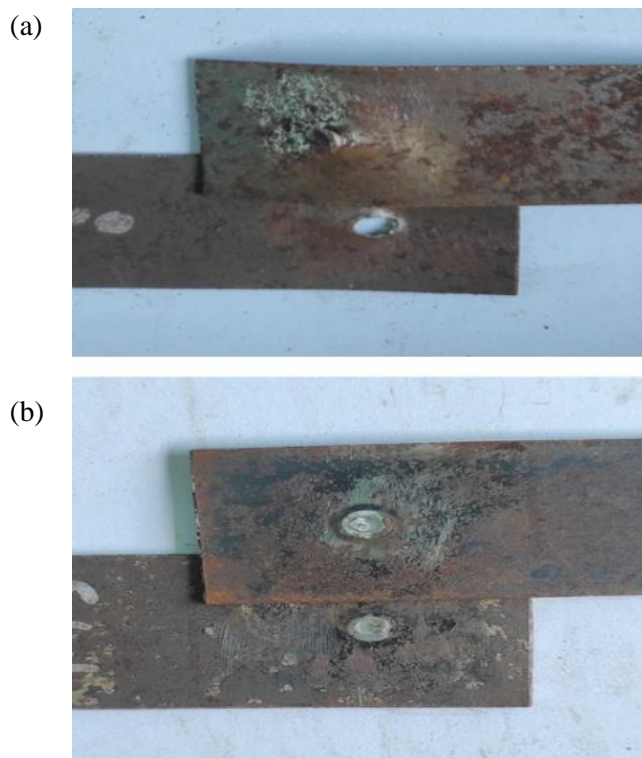
Gambar 2 menunjukkan grafik hubungan antara waktu pengelasan terhadap kekuatan geser rata-rata hasil penyambungan dengan *spot welding*. Seperti dijelaskan sebelumnya, gambar 2 menunjukkan bahwa pada arus dan waktu pengelasan yang sama, dengan semakin menurunnya ketebalan pelat diperoleh kekuatan geser rata-rata yang semakin meningkat. Hal ini juga teramati pada hasil penelitian [10]. Kekuatan geser rata-rata tertinggi ditunjukkan pada ketebalan pelat 0,8 mm, arus pengelasan 70 A dan waktu pengelasan 10 detik (spesimen 087010) sebesar 502.772 N/mm².

Pada ketebalan pelat 0,8 mm, kekuatan geser rata-rata sambungan menurun dengan meningkatnya waktu pengelasan (sampai 20 detik). Kekuatan geser rata-rata sambungan tertinggi diperoleh pada arus pengelasan 70 A dan waktu pengelasan 10 detik (spesimen 087010) sebesar 502.772 N/mm². Namun, hal sebaliknya ditunjukkan pada arus pengelasan 80 A, dimana kekuatan geser rata-rata sambungan meningkat dengan meningkatnya waktu pengelasan (sampai 20 detik). Kekuatan geser rata-rata sambungan tertinggi diperoleh pada arus pengelasan 80 A dan waktu pengelasan 20 detik (spesimen 087020) sebesar 488.996 N/mm². Hal ini juga teramati pada hasil penelitian [8] dan [10]. Pada tebal pelat 1,5 mm menunjukkan tren yang serupa terjadi pada ketebalan pelat 0,8 mm dimana kekuatan geser rata-rata sambungan menurun dengan meningkatnya waktu pengelasan (sampai 20 detik). Namun, pada arus pengelasan 80 A, kekuatan geser rata-rata sambungan mencapai titik optimum pada waktu pengelasan 15 detik. Kekuatan geser rata-rata sambungan tertinggi diperoleh pada arus pengelasan 80 A dan waktu pengelasan 15 detik (spesimen 158015) sebesar 434.657 N/mm². Pada tebal pelat 1,8 mm menunjukkan tren yang serupa terjadi pada tebal pelat 0,8 mm dan 1,5 mm dimana kekuatan geser rata-rata sambungan menurun dengan meningkatnya waktu pengelasan (sampai 20 detik). Namun, pada arus

pengelasan 80 A, kekuatan geser rata-rata sambungan mencapai titik optimum pada waktu pengelasan 15 detik dimana kekuatan geser rata-rata sambungan mencapai titik tertinggi (spesimen 188015) sebesar 262.008 N/mm².



Gambar 2 Hubungan waktu pengelasan terhadap kekuatan geser rata-rata sambungan



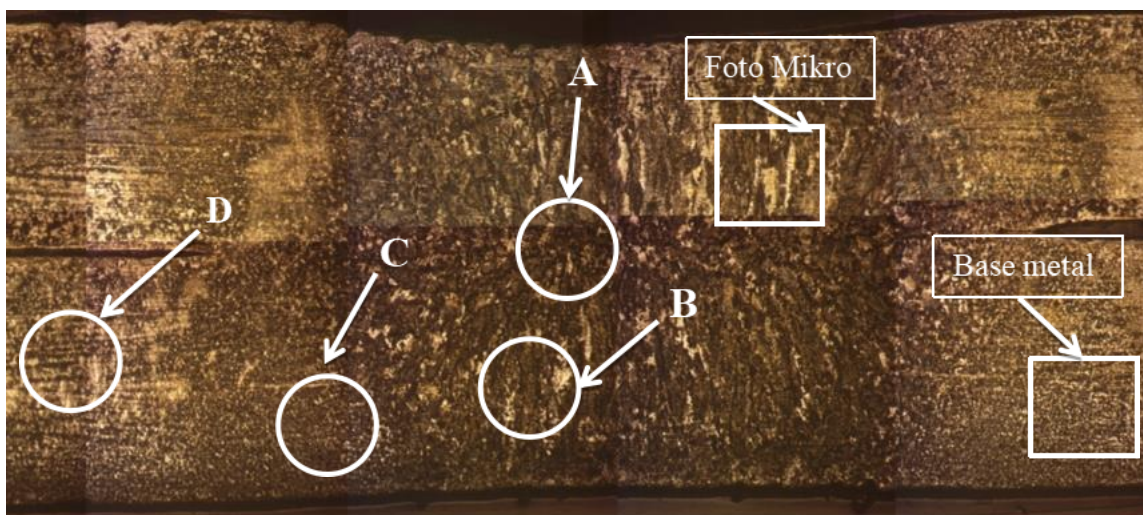
Gambar 3 Mode kegagalan pada pengujian geser hasil penyambungan *spot welding*
 (a) daerah HAZ (*heat affected zone*) (b) daerah *nugget*

3.2 Fraktografi Patahan

Secara umum kegagalan pada pengujian geser hasil penyambungan *spot welding* terdiri atas kegagalan pada daerah HAZ (*heat affected zone*) dan kegagalan pada *nugget spot welding*. Mode kegagalan ini sangat dipengaruhi ketebalan pelat. Pada pelat tipis, ketebalan pelat 0,8 mm, sebagian besar spesimen pengujian geser mengalami kegagalan pada daerah HAZ (*heat affected zone*), sedangkan pelat tebal, ketebalan pelat 1,5 mm dan 1,8 mm, sebagian besar spesimen pengujian geser mengalami kegagalan pada daerah *nugget* hasil *spot welding*.

Gambar 3 menunjukkan mode kegagalan pada pengujian geser hasil penyambungan *spot welding* yang terdiri atas kegagalan pada daerah HAZ (*heat affected zone*) (Gambar 3a) dan mode kegagalan pada daerah *nugget spot welding* (gambar 3b). Mode kegagalan yang terjadi pada daerah HAZ (*heat affected zone*) (Gambar 3a) disebabkan karena pada bagian *nugget spot welding* memiliki kekuatan yang lebih tinggi dan perambatan retak terjadi di sekeliling *nugget* yang menyebabkan terjadinya sobekan. Fenomena ini sesuai dengan penelitian [17]. Mode kegagalan yang terjadi pada daerah *nugget spot welding* (Gambar 3b) disebabkan karena pada daerah *nugget* mempunyai kekuatan yang lebih rendah dibandingkan dengan daerah logam induk (*base metal*). Waktu pengelasan yang lebih lama menyebabkan diameter *nugget* semakin besar sehingga gaya yang dibutuhkan untuk memutuskan sambungan semakin besar pula. Pada daerah ini terdapat tegangan sisa akibat proses pengelasan yaitu karena indentasi oleh elektroda dan siklus termal. Menurut peneliti [18], tegangan sisa pada daerah ini adalah tegangan tekan dan disini retakan pada saat penarikan terjadi.

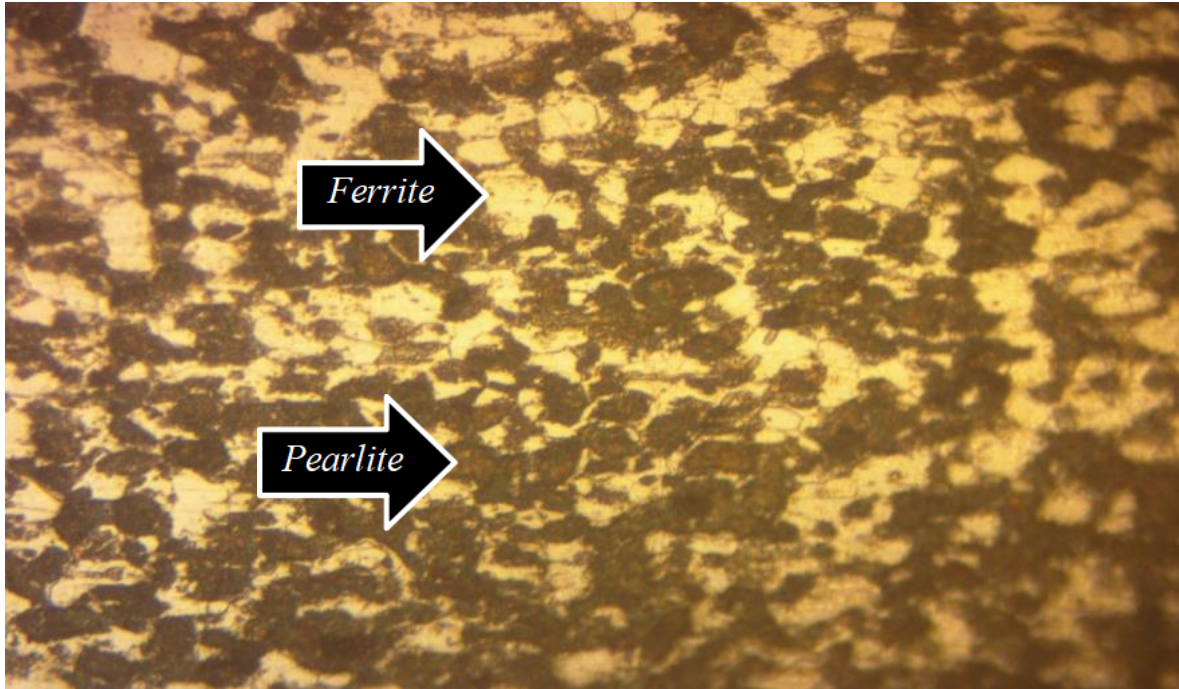
3.3 Pengamatan Struktur Makro dan Mikro



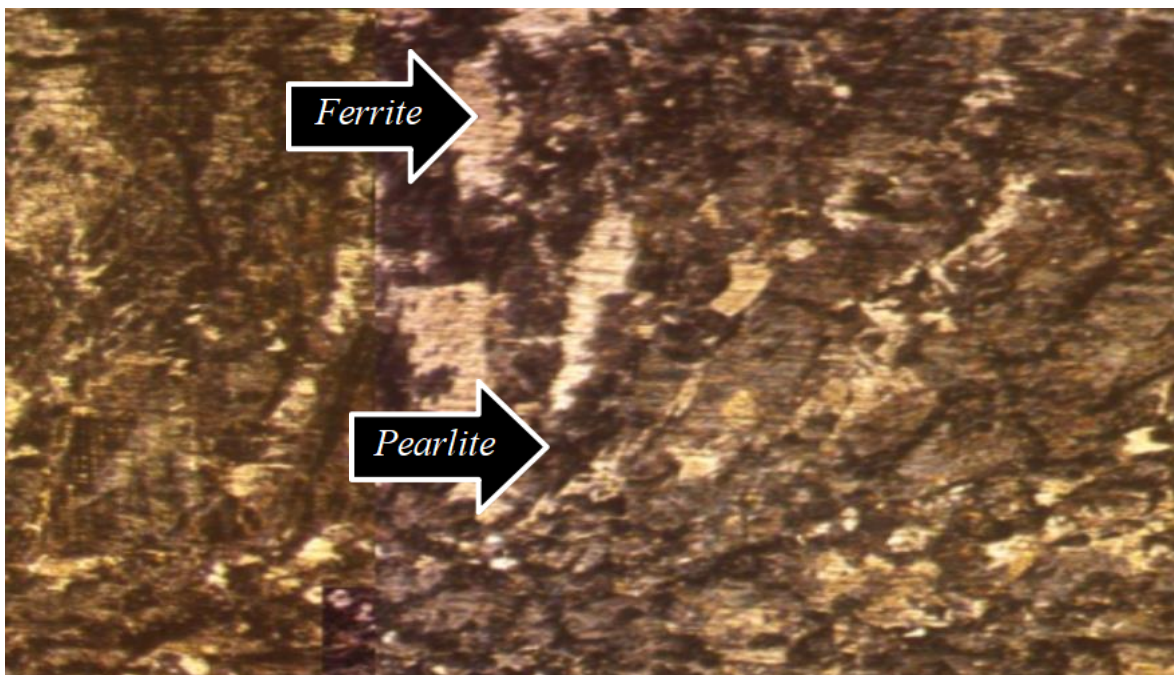
Gambar 4 Pengamatan struktur makro hasil penyambungan *spot welding* (spesimen 158020)

Pengamatan struktur makro hasil dari proses *spot welding* baja karbon rendah (spesimen 158020) dapat dilihat pada Gambar 4. Secara garis besar, struktur hasil *spot welding* terdiri atas empat daerah, yaitu : Daerah pusat sambungan (*center*), daerah A, daerah pusat (*center*) merupakan titik tengah /pusat pada *spot welding* dimana elektroda posisi atas dan bawah sejajar. Daerah kolom (*columnar*), daerah B, daerah yang memiliki struktur kristal atau mikrostruktur yang menghasilkan butiran atau struktur menyerupai kolom atau batang. Daerah ini menunjukkan arah pembekuan logam yang mengalami pencairan karena pemanasan karena resistansi / hambatan (*spot welding*). Daerah pengecilan butir (*finer grain*), daerah C, merupakan daerah yang memiliki butiran atau struktur kristal yang lebih kecil karena pengaruh panas pengelasan (*spot welding*) atau disebut daerah terpengaruh panas (*heat affected zone*). Serta daerah logam induk (*base metal*), daerah D, daerah dimana panas dan suhu pengelasan tidak menyebabkan terjadinya perubahan-perubahan struktur dan sifat.

Gambar 5 menunjukkan hasil pengamatan struktur mikro pada baja karbon rendah yang merupakan *base metal* pada *spot welding*. Pada Gambar 5 terlihat *base material* mempunyai kombinasi fasa *ferrite* yang berwarna terang dan fasa *pearlite* yang berwarna lebih gelap. Kombinasi fasa yang sama juga terlihat pada gambar 6 yang merupakan struktur mikro dari *nugget* hasil *spot welding*. Selain itu, Gambar 6 menunjukkan struktur butir yang memanjang, yang menunjukkan pengamatan dilakukan pada daerah kolom (*columnar*).

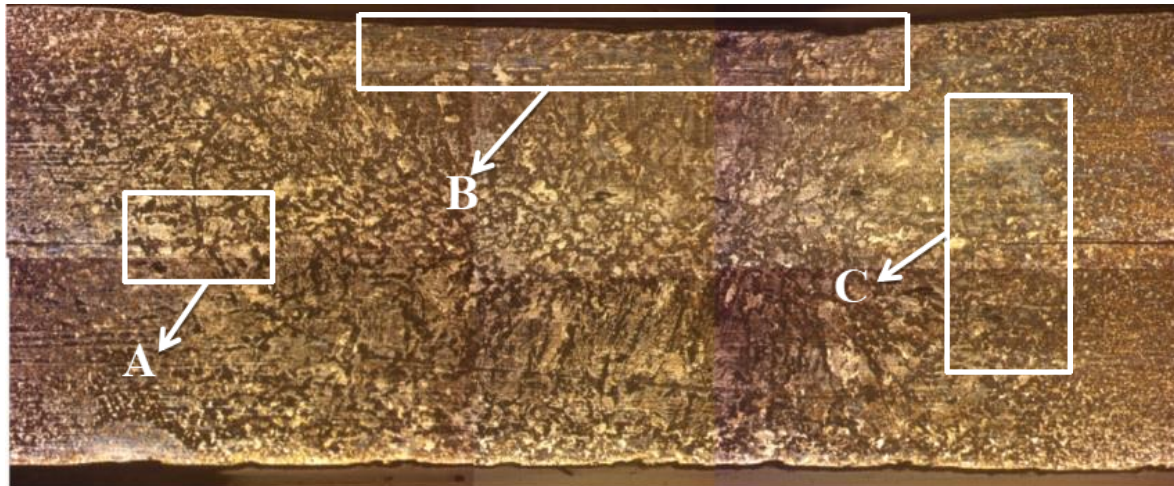


Gambar 5 Struktur mikro baja karbon rendah (*base metal*)



Gambar 6. Struktur mikro *nugget* hasil pengelasan *spot welding* pada spesimen 158020

Gambar 7 menunjukkan beberapa jenis cacat yang terjadi pada hasil las titik (*spot welding*) yang teramati pada spesimen 156015, antara lain retakan (*crack*), daerah A, yang disebabkan karena daerah pengelasan terlalu banyak mendapatkan tekanan dari elektroda pada sehingga muncul tanda-tanda keretakan. Retakan pada daerah las titik mungkin menunjukkan kekuatan geser las yang rendah, karena kedua pelat tidak tersambung dengan benar. Cacat *indented surfaces*, daerah B, merupakan bentuk las yang tidak presisi sehingga menunjukkan lekukan dari hasil lasan. Ketika terlalu banyak tekanan yang diterapkan, resistensi terhadap arus listrik berkurang dan logam tidak mencapai suhu pengelasan yang tepat. Cacat *asymmetrical spot weld marks*, daerah C, merupakan cacat dimana bentuk *nugget* yang asimetris yang disebabkan karena ketidaksempurnaan pada lasan, seperti elektroda yang tidak sejajar atau adanya kontaminan asing dilokasi lasan, hal ini menciptakan lapisan las yang lebih lemah sehingga lebih besar kemungkinan untuk putus di bawah tekanan [19].



Gambar 7. Cacat hasil *spot welding* pada spesimen 156015

4. Kesimpulan

Dari penelitian karakterisasi kekuatan geser dan struktur mikro hasil *spot welding* pelat baja karbon rendah yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa dengan semakin menurunnya ketebalan pelat diperoleh kekuatan geser rata-rata yang semakin meningkat. Kekuatan geser rata-rata tertinggi ditunjukkan pada ketebalan pelat 0,8 mm, arus pengelasan 70 A dan waktu pengelasan 10 detik sebesar 502.772 N/mm². Dengan bertambahnya arus pengelasan (sampai 80 A) akan menghasilkan peningkatan kekuatan geser sambungan. Pada ketebalan pelat 0,8 mm dan 1,5 mm, kekuatan geser rata-rata sambungan optimum diperoleh pada waktu pengelasan 10 detik dan arus pengelasan 70 A. Sedangkan pada tebal pelat 1,8 mm, kekuatan geser rata-rata sambungan optimum tercapai pada waktu pengelasan 15 detik dan arus pengelasan 70 A. Kekuatan geser rata-rata sambungan menurun dengan meningkatnya waktu pengelasan (sampai 20 detik). Namun, pada arus pengelasan 80 A, kekuatan geser rata-rata sambungan mencapai titik optimum pada waktu pengelasan 15 detik. Pada pelat tipis, sebagian besar spesimen pengujian geser mengalami kegagalan pada daerah HAZ (*heat affected zone*), sedangkan pelat tebal, sebagian besar spesimen pengujian geser mengalami kegagalan pada daerah *nugget* hasil *spot welding*. Selain teramati fasa *ferrite* dan *pearlite*, pada pengamatan struktur mikro hasil *spot welding* juga teramati daerah *center*, *columnar*, dan *finer grain*. Pada pengamatan struktur makro teramati keberadaan cacat pengelasan berupa *crack*, *indented surfaces* dan *asymmetrical spot weld marks*.

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

1470/UN18.L1/PP/2023. 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] H. Watanabe, *Fundamentals of Welding*, Woodhead Publishing, 2006.
- [2] Sinarep, Pengaruh perbedaan gaya elektroda terhadap kekerasan dan kekuatan tarik dengan metode spot welding pada pelat baja SUS 301 dan SUS 304, *Rekayasa*, 4 (2003) 56-63.
- [3] R. Ruffini, *Welding and Joining of Aerospace Materials*, Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [4] H. Wiryosumarto, *Teknologi Pengelasan Logam*, PT. Pradya Paramita, Jakarta, 2004.
- [5] Messler, *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*, John Willey, 1999.
- [6] Y. Lu, L. Xiong, X. Du, Spot welding and solid-state welding: A comparative study on mechanical and microstructural properties of aluminum alloys, *Materials & Design*, 160 (2019) 81-89.
- [7] T. Yamasaki, H. Kokawa, K. Tsumura, Resistance spot welding of high-strength steel sheets, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 25 (1) (2007) 40-46.
- [8] W.P. Raharjo, Pengaruh welding time terhadap struktur mikro dan kekerasan, sambungan lap baja tahan karat feritik AISI 430 dengan metode resistance spot welding, *Mekanika*, 3 (2005).
- [9] Amin, Ahmadil, Pengaruh variasi arus listrik terhadap kekuatan tarik dan struktur mikro sambungan las titik (spot welding) logam dissimilar stainless steel dan baja karbon rendah, *Jurnal Teknik Mesin UNISKA*, 2 (2) (2017).
- [10] E. Nugroho, U.S. Dharma, S. Kurniawan, Analisa pengaruh ketebalan plat baja karbon rendah dan lama penekanan pada pengelasan titik (spot welding) terhadap nilai kekuatan tarik, *Jurnal Teknik Mesin Univ. Muhammadiyah Metro*, 7 (1) (2018) 101-107.
- [11] ISO 14273 Second Edition, International Standard, Resistance Welding - Destructive Testing of Welds - Specimen Dimensions and Procedure for Tensile Shear Testing Resistance Spot and Embossed Projection Welds, 2016.
- [12] ASTM D1002-10, Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- [13] ISO 4587, Adhesives — Determination of Shear Strength of Adhesively Bonded Joints, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2015.
- [14] ASTM E3-11, Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- [15] ASTM E407-07, Standard Practice for Microetching Metals and Alloys, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- [16] S. Arifin, *Las listrik dan Otogen.*, Jakarta: Ghalia Indonesia, 1997.
- [17] Y.J. Chao, *Ultimate Strength and Failure Mechanism of Resistance Spot Weld Subjected to Tensile, Shear, or Combined Tensile/Shear Loads*, 2003.
- [18] Anastassiou, *Residual Stress and Microstructure Distribution Internasional Spot Weld Steel Sheet: Relation with fatigue Behaviour*, 1990.
- [19] Kianersi, Daniasl, A. Mostafei, A.A. Amadeh, Resistance spot welding joints of AISI 316L austenitic stainless steel sheets: phase transformations, *Mechanical*, 2014.