

PENGARUH WELDING TIME TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN, SAMBUNGAN LAP BAJA TAHAN KARAT FERITIK AISI 430 DENGAN METODE RESISTANCE SPOT WELDING

Wahyu Purwo Raharjo¹, Dody Ariawan²

Abstract : Spot welding is one of plate joining technique, which is common used in automotive industries, railway coach bodies and ship construction. The objectives of this research were to find out microstructure and hardness value of lap joint of AISI 430 steel. The variable of this research was welding time. In this research, thickness of base metal was 0.8-mm. Variation of welding time values were 1, 2, and 3 second. The joint system type was used single lap joint JIS Z 3139. Two plates welded in 1.79 volt. These testing and examination include the hardness, macro and microstructure. The results of this research show that increasing spot welding time was increase hardness value and nugget size. In HAZ grain border, carbide ($Cr_{23}C_6$) precipitation was increase as the increasing of welding time. The hardness value raises with the increase of welding time. The weld metal hardness, in martensite, ferite δ and ferite α microstructure as the effect of air-cooling treatment, in range of 340.7-356.7 Kg/mm² and decrease at PMZ, HAZ and weld metal.

Keywords: Spot welding, lap joint, welding time, hardness

LATAR BELAKANG

Pengelasan titik (*spot welding*) merupakan salah satu jenis las tahanan (*resistance*) listrik. Pada proses pengelasan ini bagian yang disambung dipasang secara *lap*, selanjutnya dua buah elektroda menjepit bagian tersebut dengan gaya tertentu. Karena adanya aliran listrik antara kedua logam yang dijepit, timbul panas yang menyebabkan logam mencair sebagian, yang disebut *nugget*. Arus yang tinggi dibutuhkan untuk membuat logam induk mencair sehingga bagian yang dilas dapat melekat satu sama lainnya dalam waktu yang singkat.

Metode pengelasan titik banyak digunakan dalam pembuatan *body* gerbong kereta api, konstruksi kapal, dan *body* mobil. Kelebihan pengelasan titik adalah mampu menghasilkan sambungan yang rapi, relatif ringan, dan prosesnya lebih cepat dibanding metode pengelasan lain. Selain itu kualitas pengelasan yang dihasilkan tidak tergantung dari ketrampilan operator tetapi tergantung pada pengaturan peralatan dan tata cara pengelasan (Sinarep, 2003).

Faktor yang mempengaruhi kualitas pengelasan titik adalah gaya elektroda, waktu pengelasan, arus listrik, tebal, dan tahanan material. Dalam metode pengelasan titik, hal-hal di atas menentukan keberhasilan dalam proses pengelasan, dimana perubahan bentuk maupun struktur logam yang disambung diharapkan sekecil-kecilnya sehingga mutu las dapat tetap terjaga.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh waktu pengelasan (*welding time*) pada struktur mikro dan kekerasan sambungan las sehingga dapat diperoleh waktu

¹ Staff Pengajar Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik UNS

² Staff Pengajar Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik UNS

pengelasan yang ideal untuk mendapatkan karakteristik hasil pengelasan las titik yang optimum.

TINJAUAN PUSTAKA

Mara dan Nuarsa (2001) melakukan eksperimen pengelasan titik dengan spesimen baja karbon rendah AISI C1010 tebal 1,6 mm dengan jarak titik las dan waktu yang bervariasi. Dua buah plat dilas dengan dua titik dengan jarak 10 mm, 20 mm dan 30 mm dengan jarak tumpukan plat 50 mm, *setting* waktu pengelasan yaitu 60, 80, dan 100 detik. Dari hasil eksperimen dari analisis statistik untuk $\alpha = 5\%$, variabel yang berpengaruh signifikan adalah jarak titik las dan *weld time setting*. Semakin besar *weld time setting* kekuatan geser semakin meningkat. Jarak titik pengelasan yang berbeda juga menyebabkan tegangan geser yang terjadi pada sambungan las juga berbeda. Kekuatan geser meningkat pada jarak 10 mm dan jarak 30 mm.

Sinarep (2003) meneliti plat baja SUS 301 dan SUS 304 dengan mengubah besarnya gaya elektroda. Gaya elektroda yang digunakan adalah 800, 850, 900, 950 dan 1000 kgf. Dari penelitian tersebut diketahui bahwa penetrasi *nugget* baja SUS 301 berkisar 54,07% - 63,07% dan pada baja SUS 304 berkisar 55,87% - 64,87%. Besarnya indentasi pada plat baja SUS 301 berkisar 0,12 - 0,14 mm dan untuk plat baja SUS 304 berkisar antara 0,21 - 0,23 mm. Pada hasil pengujian kekerasan, terdapat perbedaan distribusi kekerasan antara baja SUS 301 dan SUS 304, dimana kekerasan plat baja SUS 301 lebih tinggi dibandingkan baja SUS 304. Dari pengujian tarik didapat besarnya gaya tarik yang mampu ditahan oleh *nugget* menurun dengan meningkatnya gaya elektroda. Gaya tarik rata-rata yang bekerja pada masing-masing gaya elektroda adalah 1711 N, 1677 N, 1664 N, 1633 N, dan 1524 N. Pada hasil pengujian tarik ini, sebagian besar patahan tidak terjadi di *nugget* tetapi berupa sobekan diluar *nugget*. Luas *nugget* meningkat dengan bertambahnya gaya elektroda.

Wibowo (2004) melakukan penelitian mengenai pengelasan titik pada baja karbon tebal 3,2 mm dengan baja *stainless steel* SUS 304 tebal 3 mm menggunakan variasi waktu pengelasan 20, 25, 30, 35 siklus dan waktu pendinginan variasi 0, 10 dan 20 siklus. Selanjutnya dilakukan pengujian korosi dengan pencelupan ke larutan FeCl_3 6%. Hasilnya menunjukkan bahwa penambahan waktu pengelasan akan meningkatkan kekuatan geser dan tarik lasan disertai peningkatan diameter las. Pada pengujian korosi diperlihatkan adanya korosi sumuran dan galvanik yang terpusat pada baja karbon.

Zhou dkk. (2003) meneliti hubungan antara kualitas dan *attributes* hasil las titik. Variabel geometri yang dipakai dalam penelitian ini adalah tebal plat, panjang dan lebar spesimen, diameter *nugget*, ukuran HAZ, dan indentasi elektroda. Sifat material yang diteliti yaitu modulus young (E), poisson's ratio (ν), yield strength (σ_y), ultimate tensile strength (σ_{uts}) dan perpanjangan (e). Sedangkan metode penelitian yang dipakai adalah metode elemen hingga. Hasil las yang diteliti berupa sambungan *lap* las titik dengan diameter *nugget* maksimum $5\sqrt{t}$, dimana t adalah ketebalan plat dalam mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengaruh *attributes* lasan, seperti diameter *nugget*, penetrasi, dan indentasi dapat dianalisa menggunakan *Integrated Numerical Analysis*. HAZ berperan penting dalam analisa kekuatan lasan karena konsentrasi tegangan yang tinggi di daerah ini. Tebal plat, diameter *nugget*, HAZ, dan kekuatan luluh logam dasar merupakan parameter yang menentukan kualitas hasil las.

Leman (2004) melakukan penelitian yang sama dengan Wibowo (2004) tetapi dalam penelitian ini menggunakan variasi arus yaitu berturut-turut 11, 12 dan 13 kA. Sedangkan waktu pengelasan bervariasi dari 25, 30, 35 dan 40 siklus. Hasil pengujian menunjukkan bahwa bertambahnya waktu pengelasan akan meningkatkan kekuatan geser, tarik, ukuran *nugget* dan umur fatik sambungan las. Pada arus 13 kA dan waktu pengelasan 35 siklus didapat kekuatan geser maksimum sebesar 42 kg/mm^2 , sedang kekuatan tarik maksimum pada variasi 13 kA dan waktu pengelasan 40 siklus yaitu 27 kg/mm^2 . Kekuatan fatik terbaik diperoleh pada arus 13 kA dan patah ulet terlihat dari pengamatan yang dilakukan dengan SEM. Kekerasan tertinggi pada logam las yaitu berkisar 350 - 400 VHN dan menurun pada daerah HAZ maupun logam induk. Dari

pengujian korosi didapat bahwa baja tahan karat SUS 304 lebih tahan terhadap korosi dibanding baja karbon.

LANDASAN TEORI

Cara pengelasan titik adalah bagian yang disambung dipasang secara *lap* kemudian dua buah elektroda mengapit bagian tersebut dengan gaya tertentu. Karena aliran listrik antara kedua logam yang dijepit, timbul panas yang menyebabkan logam mencair yang disebut *nugget* yang merupakan penyambung kedua plat tersebut. Biasanya penampang *nugget* berbentuk oval atau lingkaran tergantung dari bentuk elektroda. Luas *nugget* hampir sama dengan luas penampang elektroda (Sinarep, 2003).

Tekanan dari elektroda dan besarnya kerapatan arus yang mengalir harus cukup kuat untuk membentuk *nugget* dan waktu pengelasan harus cukup pendek. Ketika arus berhenti, tekanan dari elektroda harus dipertahankan sampai *nugget* dingin dan membeku.

Pada pengelasan *resistance* listrik ada beberapa faktor yang perlu diperhatikan ditinjau dari rumus-rumus :

$$H = I^2.R.t \quad \dots\dots\dots (1)$$

dimana,

H = Panas yang dibangkitkan (joule).

R = Total tahanan listrik (ohm).

I = Arus yang mengalir (ampere).

t = Waktu pengelasan (detik).

sedangkan untuk menghitung nilai arus, digunakan rumus sebagai berikut:

$$I = V/R \quad \dots\dots\dots (2)$$

dimana :

I = Arus listrik (ampere).

V = Tegangan listrik (voltase).

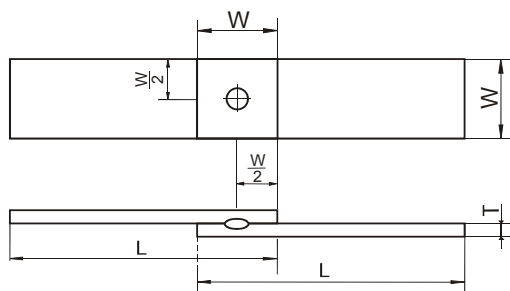
R = Tahanan listrik (ohm).

Waktu pengaliran arus sangat menentukan hasil lasan dan perlu ada tenggang waktu saat sambungan las mulai dibentuk. Arus mulai mengalir setelah mengatur waktu dan dibiarkan beberapa lama sampai sambungan las terbentuk. Setelah itu arus dihentikan, namun tekanan dipertahankan sampai sambungan las menjadi dingin, agar tidak terjadi busur antara elektroda dan sambungan. Tekanan pada sambungan dapat berasal dari tenaga manusia, tekanan mekanik, udara dan hidrolis (Amstead, 2000).

Pada las titik dijumpai tujuh daerah yang timbul panas yaitu pada batas permukaan diantara kedua lembaran logam, pada batas permukaan antara lembaran dan elektroda, masing-masing elektroda dan lembaran logam masing-masing. Tahanan kontak pada batas antara kedua lembaran logam merupakan tahanan yang paling besar, dan daerah ini mulai terbentuk sambungan las. Tahanan kontak pada titik ini tergantung pada permukaan, besarnya gaya elektroda dan ukuran elektroda. Bila kedua lembaran terbuat dari bahan dan tebal yang sama, berdasarkan keseimbangan energi, manik las akan terjadi tepat ditengah-tengah. Bila bahan atau ketebalan lembaran logam berbeda, maka untuk memperoleh keseimbangan panas diperlukan elektroda yang berbeda (Amstead, 2000).

METODE PENELITIAN

Dua plat baja tahan karat AISI 430 tebal 0,8 mm disambung menggunakan las titik. Spesimen dibuat berdasar pada standar uji JIS Z 3139. Bentuk dan dimensi spesimen dapat dilihat dalam gambar 1.



Gambar 1. Spesimen las titik (JIS Z 3139)

Ukuran material penelitian adalah sebagai berikut :

- Panjang (L) = 150 mm.
- Lebar (W) = 30 mm.
- Tebal (T) = 0,8 mm.

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi mikroskop metalurgi dan mesin uji keras mikro.

Mikroskop metalurgi digunakan untuk mengamati dan mengambil gambar struktur makro logam induk, logam las (*nugget*), daerah terpengaruh panas (HAZ), serta daerah cair sebagian (PMZ).

Mesin uji keras mikro digunakan untuk menguji distribusi kekerasan pada logam induk, *nugget*, HAZ, dan PMZ. Mesin yang dipakai adalah *Micro Hardness Vickers Tester* merk Shimadzu dengan spesifikasi sebagai berikut :

- Pembebanan : 200 gf.
- Waktu pembebanan : 5 detik.
- Catu daya : 220 volt, 50 Hz.

Proses Persiapan sebelum Pengelasan

Plat baja AISI 430 tebal 0,8 mm dipotong dengan ukuran panjang (L) = 150 mm dan lebar (W) = 30 mm. Selanjutnya dilakukan pembersihan permukaan plat untuk menghilangkan kotoran-kotoran pada permukaan logam.

Proses Pengelasan

Pengelasan dilakukan menggunakan peralatan las titik :

- Merek : Krisbow
- Nomor seri : 023075
- Jenis : AC Point Welder.
- *Rated Power* : 16 KVA.
- *Main input voltage* : 380 Volt.
- *Rated input current* : 42 A.
- *Second empty load voltage* : 1,6 – 3.2 volt.
- *Duty cycle rating* : 20 %.
- *Adjustable class number* : 6 class.
- *Max welding thickness low carbon stell* : 3+3 mm.

Tegangan listrik yang digunakan dalam pengelasan adalah 1,79 V dengan variasi waktu pengelasan adalah 1, 2, dan 3 detik. Pengelasan dilakukan 3kali untuk setiap variasi waktu pengelasan.

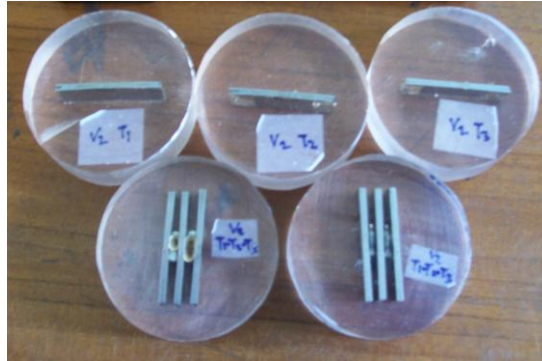
Sebelum digunakan, mesin las titik distandarisasi menurut *manual book* mesin tersebut. Adapun permukaan elektroda yang sesuai standar adalah diameter 4,6 mm *flat*.

Pembuatan Spesimen

Gambar 2 adalah spesimen uji struktur mikro yang di-*mounting* dengan resin *unsaturated polyester*, pengamplasan dengan amplas nomor 120, 240, 400, 800, 1000 dan 1200 serta pemolesan dengan *autosol*. Proses etsa dilakukan dengan larutan *Glyserol*

Regia dengan perbandingan Glycerol : HCL : HNO₃ adalah 3 : 3 : 1 (Metals Handbook, 1985).

Spesimen uji kekerasan mikro menggunakan spesimen yang sama dengan spesimen uji struktur makro dan mikro. Uji kekerasan mikro dilakukan setelah uji struktur makro. Pengujian dilakukan pada 3 titik untuk tiap daerah pada setiap spesimen.



Gambar 2. Spesimen uji struktur makro dan mikro

Pengujian

Pengujian struktur makro dilakukan untuk mengetahui struktur makro sambungan las. Uji struktur mikro dilakukan untuk mengetahui struktur mikro yang terbentuk pada *base metal*, HAZ, PMZ dan *nugget*. Pengujian dilakukan dengan mikroskop cahaya dengan perbesaran 40X untuk struktur makro dan 200X untuk struktur mikro.

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan pada *nugget*, HAZ, PMZ dan logam induk. Pengujian yang dilakukan dengan *Vickers mikro hardness tester* menggunakan beban 200 gf dengan lama pembebanan 5 detik. Penentuan titik-titik pengujian dilakukan secara acak karena sempitnya daerah *nugget*, PMZ dan HAZ.

DATA DAN ANALISIS

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja tahan karat AISI 430 dengan komposisi kimia yang dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Komposisi kimia logam induk (Wirjosumarto dan Okumura, 2000)

Unsur	C	Mn	Si	Cr	Ni
Kadar (%)	0,12	1	0,75	17	0,6
Unsur	P	S	Mo	Nb	
Kadar (%)	0,04	0,03	-	-	

Analisis Masukan Panas

Proses pengelasan titik menggunakan variasi waktu pengelasan 1, 2, dan 3 detik. Parameter lainnya yang digunakan dalam pengelasan ini adalah konstan, antara lain :

- Tahanan baja AISI 430 = $600 \times 10^{-9} \Omega m$.
- Voltase (V) = 1,79 volt.

Besarnya voltase yang digunakan dalam pengelasan ini adalah konstan, sehingga arus pada beberapa variasi waktu pengelasan di atas mempunyai nilai yang sama, sebagai berikut :

$$I_{1 \text{ detik}} = I_{2 \text{ detik}} = I_{3 \text{ detik}} = V/R$$

$$= 1,79V/600 \cdot 10^{-9} \Omega = 2,9 \times 10^6 \text{ ampere.}$$

Dari data di atas dapat dihitung :

$$H_{1 \text{ detik}} = (I_{1 \text{ detik}})^2 \cdot R \cdot T$$

$$\begin{aligned}
 &= (2,9 \times 10^6)^2 \cdot 600 \times 10^{-9} \cdot 1 \\
 &= 5,046 \text{ MJ} \\
 H_{2 \text{ detik}} &= (I_{2 \text{ detik}})^2 \cdot R \cdot T \\
 &= (2,9 \times 10^6)^2 \cdot 600 \times 10^{-9} \cdot 2 \\
 &= 10,092 \text{ MJ} \\
 H_{3 \text{ detik}} &= (I_{3 \text{ detik}})^2 \cdot R \cdot T \\
 &= (2,9 \times 10^6)^2 \cdot 600 \times 10^{-9} \cdot 3 \\
 &= 15,120 \text{ MJ}
 \end{aligned}$$

Perhitungan di atas menunjukkan waktu pengelasan 3 detik mempunyai nilai masukan panas yang paling besar.

Struktur Makro

Hasil pengujian struktur makro adalah foto makro penampang melintang sambungan logam las (*nugget*) dengan perbesaran 40X. Foto makro ini digunakan untuk mengetahui perbedaan ukuran diameter *nugget* antara variasi waktu pengelasan 1, 2, dan 3 detik.

Tabel 2 menunjukkan ukuran diameter *nugget* rata-rata untuk variasi waktu pengelasan 1, 2, dan 3 detik.

Tabel 2. Diameter nugget rata-rata untuk masing-masing variasi

Variasi waktu pengelasan	1 detik	2 detik	3 detik
Diameter rata-rata (mm)	3,9	4,2	4,9

Sesuai dengan rumusan awal yaitu $H=I^2.R.T$, dengan bertambahnya waktu pengelasan maka bertambah pula panas yang dibangkitkan. Selanjutnya panas tersebut akan mengakibatkan logam mencair dan terjadi penekanan oleh *upper electrode* dan *lower electrode* sehingga diameter *nugget* yang dihasilkan semakin besar.

Dari bentuk *nugget* pada foto makro (gambar 3), terlihat sedikit melengkung kebawah tidak simetris. Hal tersebut dikarenakan pada saat *nugget* dalam keadaan cair mendapat tekanan dari *upper electrode* yang bertindak sebagai penekan dan dari *lower electrode* yang bertindak sebagai penyangga yang bersifat statis sehingga saat logam telah membeku maka dihasilkan *nugget* yang melengkung ke bawah.

Hasil las yang baik adalah terbentuknya *nugget* yang besar tanpa adanya retak dan porositas (Zhou *et al.*, 2003). Dari pengamatan makro terdapat cacat internal hasil pengelasan berupa inklusi gas (*void*) dalam *nugget*. Secara umum cacat ini tidak berpengaruh signifikan terhadap hasil lasan, dengan catatan, cacat tersebut terletak ditengah-tengah *nugget* dan besarnya tidak lebih dari 25% dari luas *nugget* keseluruhan karena didalam pengelasan titik, tegangan mempunyai nilai nol pada pusat *nugget*, tetapi sebaliknya tegangan akan terkonsentrasi pada sekeliling batas luar *nugget* (Zhou *et al.*, 2003).



Gambar 3. Nugget pada waktu pengelasan 2 detik

Pada *nugget* spesimen 1 waktu pengelasan 1 detik terdapat *void* yang besarnya 1,25% luas *nugget* dan spesimen 3 waktu pengelasan 1 detik terdapat *void* 2,5% luas *nugget*. Pada *nugget* spesimen 1 waktu pengelasan 3 detik mempunyai besar *void* 5,7% dan spesimen 2 waktu pengelasan 3 detik terdapat *void* 2% luas *nugget*. Luas *void* rata-

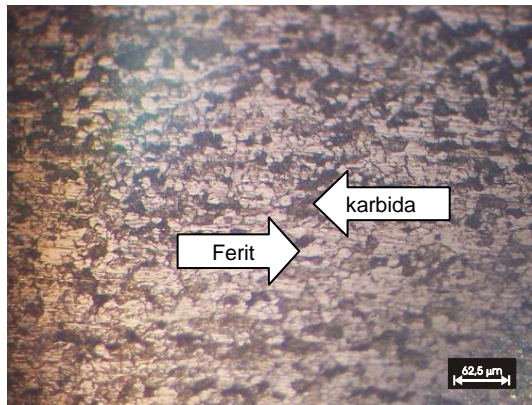
rata yang terbentuk pada waktu pengelasan 1 detik dan 3 detik berturut-turut adalah 1,87% dan 3,85%.

Wiryosumarto dan Okumura (2000), menyatakan bahwa *void* terjadi karena dua sebab berikut ini :

1. Pada saat paduan cair, kelarutan oksigen turun dengan adanya unsur *P*, *Si* dan *Al*, tetapi sebaliknya batas kelarutan hidrogen dalam paduan cair tersebut naik dan kemudian menurun dengan cepat selama proses pendinginan. Akibat turunnya batas kelarutan ini maka gas hidrogen keluar dari larutan dan membentuk *void*.
2. Adanya reaksi antara oksigen yang ada pada logam paduan dengan hidrogen dari atmosfer sehingga terjadi uap air. Uap air inilah yang selanjutnya akan membentuk *void*.

Struktur Mikro Logam Induk

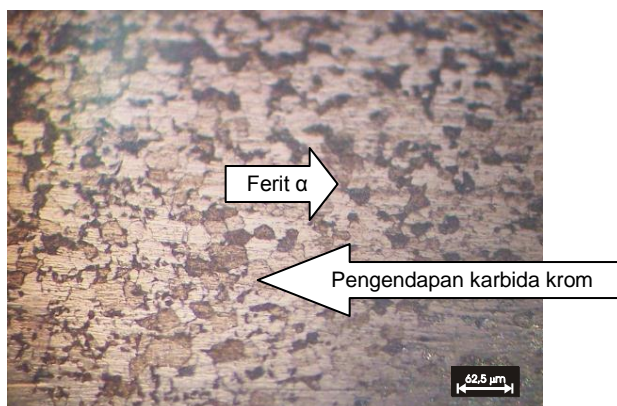
Struktur mikro logam induk (AISI 430) dapat dilihat pada gambar 4 yang terdiri atas ferit dan karbida. Komposisi ferit lebih banyak dibanding karbida karena logam induk merupakan baja tahan karat feritik ($C \leq 0,12\%$), sehingga dengan kadar C yang sangat rendah maka karbida yang terbentuk lebih sedikit. Karbida pada gambar di atas terlihat lebih gelap dari ferit (Budinski, 1996).



Gambar 4. Struktur mikro logam induk AISI 430

Struktur Mikro HAZ

Struktur daerah HAZ telah mengalami rekristalisasi, dimana temperatur rekristalisasi dimulai dari 500-550 °C dan berakhir pada temperatur cair logam (Folkhard, 1988). Sebagai contoh, gambar struktur mikro daerah HAZ pada variasi waktu pengelasan 1 detik dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Struktur mikro HAZ pada waktu pengelasan 1 detik.

Dari gambar terlihat bahwa struktur mikro daerah HAZ di atas mengalami perubahan bentuk butir. Hal ini terjadi karena pada saat siklus pemanasan cepat berlangsung, daerah ini mengalami rekristalisasi pada temperatur di atas 900 °C sehingga terbentuk butir kristal yang lebih besar dan kasar yang mengakibatkan penggetasan pada daerah HAZ (Folkhard, 1988).

Kromium merupakan unsur pembentuk karbida (Cr_{23}C_6) yang sangat kuat (Folkhard, 1988). Akibatnya struktur mikro daerah HAZ di atas banyak sekali terbentuk endapan karbida (Cr_{23}C_6) yang terdapat sepanjang batas butir dan hal ini terdapat pada semua variasi waktu pengelasan. Pada variasi waktu pengelasan 3 detik terdapat endapan karbida krom yang paling banyak, diikuti waktu pengelasan 2 dan 1 detik. Jadi semakin lama waktu pengelasan, semakin banyak juga endapan karbida yang terbentuk di daerah HAZ.

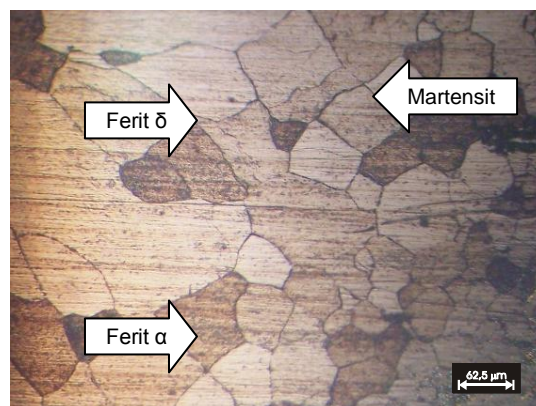
Kou (1987), menyatakan bahwa endapan karbida (Cr_{23}C_6) terbentuk karena pada saat pengelasan, batas butir mengalami proses pengurangan kadar Cr dan penambahan kadar C selama transformasi $\alpha\gamma$ dan saat pendinginan karbon belum dapat memisahkan diri sehingga terbentuklah endapan karbida (Cr_{23}C_6). Dengan menurunnya kadar Cr maka ketahanan korosi daerah ini juga menurun, sedangkan dengan kadar karbon (C) yang bertambah akan menyebabkan kegetasan dan mudah mengalami korosi batas butir. Temperatur sensitisasi ini terjadi sekitar 950 °C.

Tingkat difusi karbon dan kromium pada b.c.c. (ferit) lebih tinggi dari f.c.c. (austenit), sehingga pendinginan dibawah 925 °C selama proses pengelasan tidak bisa menekan presipitasi karbida (Cr_{23}C_6) di batas butir. Untuk alasan yang sama, kandungan karbon yang rendah tidak efektif mencegah presipitasi karbida, kecuali kandungan karbon sangat rendah (0,002% C pada *stainless steel* AISI 446). Hal ini dapat diatasi dengan melakukan pemanasan setelah pengelasan (PWHT) pada temperatur 650 – 815 °C dan selanjutnya dilakukan pendinginan anil. Proses ini akan menyeragamkan komposisi kromium sehingga daerah terpengaruh panas (HAZ) tahan terhadap korosi batas butir (Kou, 1987).

Struktur Mikro PMZ

Struktur mikro yang terjadi pada tiap variasi waktu pengelasan di daerah PMZ dapat dilihat pada gambar 6.

Pada daerah ini logam mencair sebagian sehingga yang terjadi adalah perubahan struktur mikro (perubahan fasa). Sedangkan butir pada daerah PMZ mempunyai ukuran yang lebih besar daripada daerah HAZ karena temperatur daerah ini lebih tinggi. Hal lainnya yang mendukung pembesaran butir adalah sifat dari *stainless steel* tipe feritik AISI 430 yang akan mengalami pembesaran dan pengasaran butir bila dipanaskan (Harsono dan Okumura, 2000).



Gambar 6. Struktur mikro PMZ pada waktu pengelasan 1 detik

Pada daerah PMZ tidak terdapat endapan karbida (Cr_{23}C_6) seperti yang terjadi pada daerah HAZ karena daerah ini mengalami siklus termal yang relatif lebih cepat

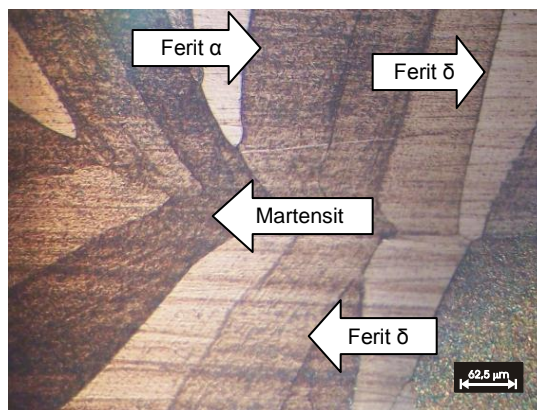
pada temperatur sensitisasi (950 °C) dibanding pada daerah HAZ sehingga unsur karbon (C) tidak cukup waktu untuk mengendap.

Fasa yang terbentuk pada daerah PMZ adalah ferit α , ferit δ dan martensit. Ferit δ yang terbentuk lebih kasar daripada ferit α karena adanya presipitasi karbida ($M_{23}C_6$) dalam strukturnya dan butir kasar ini dapat dikurangi dengan penambahan unsur titanium dan molibdenum (Folkhard, 1988).

Dari gambar di atas terlihat bahwa besar butir tiap variasi waktu pengelasan berbeda. Semakin lama waktu pengelasan, maka ukuran butir yang terbentuk semakin besar. Ukuran butir dapat ditunjukkan dengan menggunakan ASTM *grain size* (Vlack, 1994). Semakin besar nilai ASTM *grain size* maka semakin kecil ukuran butirnya. Daerah PMZ waktu pengelasan 1 detik mempunyai ASTM *grain size* = 4 kemudian PMZ waktu pengelasan 2 detik mempunyai ASTM *grain size* = 3 dan PMZ waktu pengelasan 3 detik mempunyai ASTM *grain size* = 2.

Struktur Mikro Nugget

Secara keseluruhan daerah *nugget* tiap variasi waktu pengelasan mempunyai struktur yang sama. Kesamaan itu terlihat dari strukturnya yang terdiri atas ferit α , ferit δ dan martensit dengan bentuk butir kolumnar yang sangat besar (gambar 7). Proses pembekuan butir daerah ini berorientasi ke bagian *upper electrode* dan *lower electrode* sehingga bentuk butirnya memanjang ke arah atas dan bawah (kolumnar).



Gambar 7. Struktur mikro *nugget* pada waktu pengelasan 1 detik

Dari gambar tersebut diperlihatkan adanya dua fasa BCC yaitu Ferit α dan ferit δ . Dua fasa BCC tersebut terbentuk karena adanya fenomena penggetasan 475 °C yang biasa terjadi pada baja tahan karat feritik. Fenomena tersebut mengakibatkan pemisahan ferit menjadi dua fasa BCC (Budinski, 1996)

Folkhard (1988) menyatakan bahwa ferit α dan ferit δ adalah struktur kristal yang bertipe sama yaitu *body center cubic* (BCC). Dalam pengelasan, ferit yang terbentuk oleh presipitasi primer (dari cair) disebut ferit δ . Sedangkan ferit α terbentuk oleh presipitasi sekunder selama transformasi $\gamma \rightarrow \alpha$ pada temperatur dibawah 911 °C.

Struktur ferit δ lebih kasar daripada ferit α karena dalam butir ferit δ terdapat presipitasi karbida ($M_{23}C_6$). Presipitasi karbida pada baja feritik 17% Cr (mengandung 50% ferit δ) terjadi selama transformasi $\gamma \rightarrow \delta$ dengan periode waktu yang sangat cepat 1-10 detik pada temperatur 800-900 °C (Folkhard, 1988).

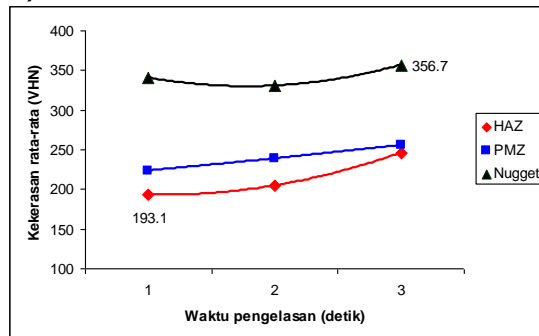
Selama pendinginan udara, fasa austenit pada baja feritik 17% Cr selalu menjadi martensit selama transformasi $\gamma \rightarrow \alpha$, karena fasa perlit dan bainit hanya terbentuk pada kandungan kromium yang sangat tinggi dan pendinginan yang lama (Folkhard, 1988).

Dari gambar di atas, terlihat bahwa ukuran butir pada waktu pengelasan 1 detik paling kecil (ASTM *grain size* = 3) dibanding waktu pengelasan 2 detik (ASTM *grain size* = 2) dan ukuran butir paling besar adalah waktu pengelasan 3 detik (ASTM *grain size* = 1). Hal ini dapat terjadi karena nilai masukan panas yang tinggi dan waktu pengelasan

paling lama sehingga butirnya mempunyai waktu yang lebih lama untuk tumbuh membesar.

Pengujian Kekerasan Micro Vickers

Pengambilan titik indentasi dilakukan secara acak. Hasilnya dapat dinyatakan dalam grafik (gambar 8).



Gambar 8. Grafik kekerasan rata-rata beberapa zona sebagai fungsi waktu pengelasan

Daerah logam induk memiliki kekerasan rata-rata 166,2 VHN. Daerah *nugget* pada waktu pengelasan 1 detik mempunyai kekerasan rata-rata 340,7 kg/mm² kemudian turun pada waktu pengelasan 2 detik dengan tingkat kekerasan rata-rata 330,5 kg/mm² dan meningkat lagi pada waktu pengelasan 3 detik dengan nilai kekerasan sebesar 356,7 kg/mm². Sedangkan untuk daerah PMZ nilai kekerasan paling rendah adalah waktu pengelasan 1 detik sebesar 223,5 kg/mm², kemudian waktu pengelasan 2 detik dengan nilai 238,7 kg/mm², dan paling tinggi adalah waktu pengelasan 3 detik sebesar 255,7 kg/mm². Daerah HAZ semakin meningkat dari waktu pengelasan 1 detik sebesar 193,1 kg/mm², kemudian waktu pengelasan 2 detik dengan nilai 204,4 kg/mm² dan kekerasan paling tinggi adalah waktu pengelasan 3 detik sebesar 245,9 kg/mm². Daerah logam induk tidak terjadi perubahan nilai kekerasan karena struktur daerah ini tidak terpengaruh oleh masukan panas.

Daerah HAZ yang telah mengalami proses rekristalisasi mempunyai nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan daerah logam induk. Hal ini dapat terjadi karena di daerah HAZ banyak terdapat endapan karbida krom (Cr₂₃C₆) yang membentuk butir-butir kristal kecil sehingga kekerasannya meningkat (Sinarep, 2003).

Dari peningkatan waktu pengelasan 1 detik s.d. 3 detik nilai kekerasan pada tiap daerah pengujian terus meningkat mencapai titik maksimum pada waktu pengelasan 3 detik dengan nilai kekerasan rata-rata di daerah *nugget* sebesar 356,7 kg/mm², daerah PMZ sebesar 255,7 kg/mm², dan daerah HAZ sebesar 245,9 kg/mm², sedangkan di daerah logam induk kekerasannya sama.

Kekerasan waktu pengelasan 3 detik pada tiap daerah pengujian mempunyai nilai yang paling tinggi dikarenakan masukan panas waktu pengelasan 3 detik paling besar sehingga dengan pendinginan udara yang relatif cepat struktur yang terbentuk juga lebih keras dibandingkan dengan waktu pengelasan 1 dan 2 detik.

Daerah *nugget* tiap variasi waktu pengelasan mempunyai butir paling besar bila dibandingkan dengan daerah lainnya. Dengan butir yang besar, seharusnya kekerasan *nugget* lebih rendah dibandingkan daerah lain yang mempunyai butir lebih kecil, tetapi daerah ini ternyata mempunyai nilai kekerasan paling besar. Hal ini mungkin terjadi karena pengujian kekerasan menggunakan micro Vickers sehingga indentasi hanya terkena pada satu butir saja. Bila titik indentasi pengujian micro Vickers terkena pada butir kecil dengan kekerasannya yang lebih rendah (ferit) dibanding butir besar yang kekerasannya lebih tinggi (martensit), maka hal ini dapat memberi penjelasan terhadap fenomena yang terjadi pada daerah *nugget* dan daerah lainnya yang mengalami hal serupa.

Hal lain yang menyebabkan daerah *nugget* mempunyai kekerasan tinggi adalah ketidakmurnian dan adanya elemen tambahan yang cenderung untuk memperendah waktu transformasi. Sedangkan hasil dari waktu transformasi yang rendah adalah martensit, terdiri dari dislokasi yang menyebabkan kekerasan dan kekuatan yang tinggi pada logam las (Easterling, 1983).

KESIMPULAN

1. Logam las (*nugget*) pada pengelasan titik tahanan listrik untuk material AISI 430 tiap variasi waktu pengelasan mempunyai nilai kekerasan paling tinggi, dengan struktur mikro martensit, ferit δ , dan ferit α sebagai akibat pendinginan udara, berkisar antara 340,7–356,7 kg/mm² dan menurun pada PMZ, HAZ maupun logam induk.
2. Endapan karbida (Cr₂₃C₆) yang terbentuk pada batas butir daerah HAZ semakin banyak seiring bertambahnya waktu pengelasan.

DAFTAR PUSTAKA

- Amstead, BH., 2000, *Teknologi Mekanik jilid 1*, Edisi Ketujuh, Erlangga.
- Budinski, K. G., 1996, *Engineering Materials Properties and Selection*, 5th Edition.
- De Garmo, 1988, *Materials and Processes in Manufacturing*, 7th Edition.
- Easterling, 1983, *Introduction to the Physical Metallurgy of Welding*, Butterworth & co ltd., London.
- Folkhard, Erich, 1988, *Welding Metallurgy of Stainless Steel*, Springer-Verlag Wine, New York.
- Japanese International Standard, 1996, *Method of Macro test for Section of Spot Welded Joint*, JIS Z 3139.
- Kou, Sindo, 1987, *Welding Metallurgy*, John Willey & Sons, New York.
- Krysiak, K. F. et al., 1990, *Selection of Wrought Ferritic SS*, ASM Handbook Vol. 6.
- Leman, A. S., 2004, *Pengaruh Waktu dan Arus Pengelasan Titik Antara Baja Tahan Karat SUS 304 dan Baja Karbon Rendah Terhadap Sifat Mekanis–Fisis dan Korosi*.
- Mara dan Nuarsa, 2001, *Pengetahuan Waktu dan Jarak Titik Pengelasan Las Titik Terhadap Kekuatan Geser Hasil Las*, Rekayasa, Vol. 2, Hal. 48-52.
- Sinarep, 2003, *Pengaruh Perbedaan Gaya Elektroda Terhadap Kekerasan dan Kekuatan Tarik dengan Metode Spot Welding Pada Plat Baja SUS 301 dan SUS 304*, Rekayasa, Vol. 4, Hal 56-63.
- Surdia dan Saito, 2000, *Pengetahuan Bahan Teknik*, Pradnya Paramita, Jakarta.
- Vandervoort dan James, 1985, *Wrought Satainless Steels*, ASM Handbook Vol. 9.
- Van Vlack, L.H., 1994, *Ilmu dan Teknologi Bahan*, Erlangga, Jakarta.
- Varney, C., 1962, *Physical Metallurgy For Engineer*, Litton Educational Publishing, Inc.
- Wibowo, H., 2004, *Pengaruh Waktu Pengelasan dan Pendinginan pada Spot Welding Baja Stainless Steel SUS 304 dengan Baja Karbon Rendah Terhadap Sifat Fisis, Mekanis dan Korosi*.
- Wirjosumarto dan okumura, 2000, *Teknologi pengelasan Logam*, Pradnya Paramita, Jakarta.
- Zhou et al., 2003, *Relationship Between Quality and Attributes of Spot Welds*, Welding Journal, April 2003, pp. 72-s – 77-s.