

# **PENGARUH VARIASI WAKTU LAS TERHADAP BEBAN GESER MAKSIMUM DAN STRUKTUR MIKRO LASAN LAS TITIK TAHANAN LISTRIK PADA SAMBUNGAN LAP PLAT BAJA KARBON RENDAH AISI 1008**

**Wahyu Purwo Raharjo**

Jurusan Teknik Mesin Universitas Sebelas Maret Surakarta

*Resistance spot welding is a welding process using electrodes to apply both electrical current and pressure. Heat is generated by electrical resistance between two or more workpieces.*

*The objective of this research was to investigate the effect of welding time on AISI 1010 weld characteristic and maximum shear loading. Welding was done on AISI 1010 low carbon steel plates. The thickness of each plates was 0.8 mm. Welding time variation were 0.75, 1.0, and 1.25 seconds at constant voltage of 1.79 V. The material testing was set on tensile-shear test and microstructure.*

*The results shows that the welding time increase make the nugget size enlarged. The largest shear force required to break the specimen was 4.34 kN and occurred on specimen with welding time 1.25 seconds. That is due to the larger nugget of the two steel plate joint for 1.25 second than for 0.75 and 1.0 second.*

*The microstructure of the weld nugget consists of ferrite and martensite. In the PMZ, the microstructure contains ferrite and pearlite with presence of martensite. Meanwhile the microstructure in the base metal and HAZ consists of ferrite and pearlite.*

*Keywords : Resistant spot welding, welding time, low carbon steel, AISI 1010.*

## **PENDAHULUAN**

Las titik tahanan listrik telah digunakan secara luas untuk menyambung lembaran logam untuk bodi kendaraan sejak 1950-an dan merupakan metode penyambungan yang utama pada industri kendaraan darat. Kendaraan modern umumnya memiliki 2000 sampai 5000 lasan titik (Chao, 2003).

Kualitas las titik tahanan listrik dipengaruhi oleh beberapa parameter yang meliputi gaya tekan elektroda, diameter permukaan tekan elektroda, waktu las, arus dan waktu tenggang.

Pada proses pengelasan tahanan listrik, logam mencair sebagian dan terjadi pengaruh panas yang besar di sekitarnya, maka terjadi perubahan struktur mikro pada logam tersebut. Struktur mikro logam mempengaruhi sifat mekanik dari suatu logam sehingga perubahan struktur mikro juga akan mengubah sifat mekaniknya.

## **TINJAUAN PUSTAKA**

Metode pengelasan tahanan listrik dikembangkan pertama kali oleh Ellihu Thompson pada akhir abad XIX. Pada proses ini arus yang cukup besar dialirkan

melalui logam sehingga menimbulkan panas pada sambungan, dan dibawah pengaruh tekanan terbentuklah gel/*nugget*. Transformator yang terdapat dalam mesin las merubah tegangan arus bolak-balik dari 110 volt atau 220 volt menjadi 4 volt sampai 12 volt dan arusnya menjadi cukup besar sehingga dapat menimbulkan panas yang diperlukan. Bila arus mengalir dalam logam, panas timbul didaerah dengan tahanan listrik terbesar, yaitu pada batas permukaan kedua logam atau lembaran dan disinilah terjadi sambungan las. (Amstead,1979).

Pada proses las tahanan listrik sambungan mengalami tekanan selama proses pemanasan yang diatur dengan cermat dan prosesnya sendiri berlangsung dengan cepat. Hampir semua jenis logam dapat dilas dengan las tahanan listrik, meskipun beberapa logam seperti timah putih, seng dan timbel agak sulit dilas. (Amstead,1979).

Pada pengelasan tahanan listrik ada 3 faktor yang perlu diperhatikan yaitu arus, tahanan dan waktu ditinjau dari persamaan :

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

dimana :

H = Jumlah panas (joule)  
I = Arus (ampere)  
R = Tahanan (ohm)  
t = Waktu (detik)

sedangkan besarnya arus didapat dari rumus:

$$I = \frac{V}{R} \quad (2)$$

dimana:

I = Arus (ampere)  
V = Voltase (volt)  
R = Tahanan (ohm)

Arus sekunder ini diatur dengan mengatur jumlah lilitan dan kumparan primer. Untuk memperoleh sambungan las yang baik, ketiga variabel arus, tahanan dan waktu perlu diperhatikan dan ditentukan dengan cermat. Besaran ini tergantung pada tebal, jenis bahan serta ukurannya dan jenis elektroda yang dipergunakan. (Amstead,1979).

Waktu pengaliran arus sangat menentukan. Perlu ada tenggang waktu antara saat sambungan las mulai dibentuk. Arus mulai mengalir diatur oleh pengatur waktu dan dibiarkan beberapa lama sampai sambungan las terbentuk. 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, pegas, atau hidrolik. Penekanan harus dikendalikan dan diserasikan dengan arus pengelasan. (Amstead,1979).

Siklus las dimulai ketika elektroda bersinggungan dengan logam dibawah pengaruh tekanan sebelum arus dialirkan. Waktu yang singkat ini disebut *waktu tekan*. Kemudian arus bertegangan rendah dialirkan diantara elektroda, logam yang bersinggungan menjadi panas dan suhu naik sampai mencapai suhu pengelasan. Segera ketika suhu pengelasan tercapai, tekanan antara elektroda memaksa logam menjadi satu dan terbentuklah sambungan las. Periode ini biasanya berlangsung beberapa detik dan disebut waktu las. Kemudian arus dihentikan meskipun tekanan tetap ada, periode ini disebut waktu tenggang. Kekuatan logam pada

daerah las dan HAZ (*heat affected zone*) berangsur meningkat kembali setelah logam menjadi dingin. Tekanan ditiadakan dan benda kerja bisa dipindah. ( Amstead, 1979).

Pada las titik dijumpai lima daerah dimana timbul panas : pada batas permukaan diantara kedua lembaran logam ; pada batas permukaan antara lembaran dan masing-masing elektroda dan lembaran logam masing-masing.

Tahanan kontak pada batas antara kedua lembaran logam merupakan tahanan yang paling besar, dan disinilah 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, *nugget* las akan terjadi tepat ditengah-tengah. Bila bahan atau ketebalan lembaran logam berbeda, maka untuk memperoleh keseimbangan panas diperlukan elektroda yang berbeda. (Amstead,1979).

Prosedur standar untuk optimisasi las titik mengacu pada evaluasi beberapa sifat fisik las untuk menghasilkan kedalaman las atau ukuran *nugget* yang diinginkan. Untuk baja karbon, variabel proses seperti arus, waktu las, dan gaya penekanan dipilih berdasarkan ketebalan material [Santella, et. al.,2003].

Lasan titik yang bagus adalah lasan dengan *nugget* yang besar dan kekuatan tinggi tanpa ekspulsi atau *nugget* parsial [Spinella, 1994]. Newton dkk. (1994) menyatakan bahwa lasan dengan *nugget* ukuran penuh dan setidaknya dengan kekuatan minimum, dan tanpa retakan, *flash*,/ekspulsi, porositas adalah lasan yang bagus

Pada umumnya, karakteristik las mengacu pada kekuatan statik dan dinamik. Kekuatan geser, *peel strength* adalah contoh kekuatan statik, sedangkan kekuatan impak dan ketangguhan lelah adalah kekuatan dinamik. Namun demikian, karena alasan praktis, hanya pengujian geser yang biasanya dilakukan untuk las titik.[Zhou, 2003].

Kekuatan sambungan seringkali berhubungan dengan sifat fisik sambungan.

Sebagai tambahan, sifat lasan umumnya mengacu pada ukuran *nugget/button*, ukuran daerah terpengaruh panas/*heat affected zone* (HAZ), penetrasi, cekungan, dan sifat material (American Welding Society, 2003).

Zuniga dan Sheppard (1997) melakukan pengujian kegagalan las titik pada baja kekuatan tinggi dan mempelajari mekanisme kegagalan secara detail dari sampel sambungan *lap* dan *coach peel*. Salah satu penemuan mereka adalah bahwa mekanisme kegagalan dari sampel sambungan *lap* adalah *necking* terpusat (pergeseran terpusat) pada logam induk dan dekat batas antara daerah HAZ dan logam induk.

Sakuma dan Oikawa (2003) yang melakukan pengujian pada sambungan las titik pada plat baja kekuatan tinggi mengemukakan bahwa peningkatan diameter *nugget* berakibat pada naiknya kekuatan tarik geser / *tensile shear strength* (TSS) dan kekuatan tarik silang / *cross tensile strength* (CTS). Tetapi ketika arus terlalu besar yang menyebabkan terjadinya ekspulsi, TSS meningkat sampai tingkat tertentu tetapi CTS menurun. Sakuma dan Oikawa juga mengemukakan bahwa faktor yang mempengaruhi kekuatan lasan titik tahanan listrik adalah diameter *nugget*, kekuatan plat, ketebalan plat, komposisi kimia, dan terjadinya ekspulsi.

Anastassiou, dkk (1990) melakukan penyelidikan pada tegangan sisa lasan titik dan distribusi struktur mikro lasan titik pada plat baja dan menunjukkan distribusi tegangan sisa merupakan tegangan tarik pada pusat dan tegangan tekan pada takik dimana retakan sering dimulai.

## METODOLOGI

Bahan yang diteliti adalah plat baja karbon rendah AISI 1008 dengan ketebalan 0.8 mm. Kedua logam dasar tersebut dilas dengan menggunakan peralatan las titik tunggal stationer selanjutnya dilakukan pengujian struktur makro dan mikro serta pengujian kekuatan geser.

Pengelasan dilakukan dengan peralatan las titik :  
Merek : Krisbow

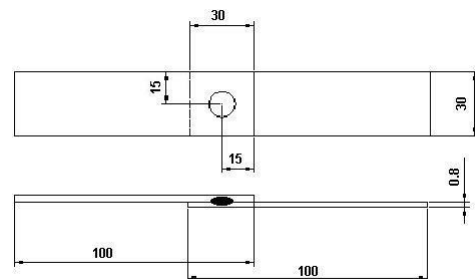
Nomor seri : 023075 tahun 2002  
Jenis : AC Point Welder  
Rated Power : 16 kVA  
Main input voltage : 380 V  
Rated input current : 42 Ampere  
Second empty load voltage: 1,6 V – 3.2 V  
Duty cycle rating : 20 %  
Adjustable class number: 6 class  
Max welding thickness for low carbon steel : 3+3 mm

Voltase yang dipakai adalah voltase 2 (1.79 volt) dan variasi waktu las adalah 0.75, 1.0, dan 1,25 detik.

Spesimen uji struktur mikro dibuat dari hasil pengelasan yang dipotong melintang pada pertengahan *nugget*, kemudian proses selanjutnya yang meliputi mounting dengan resin *unsaturated polyester*, pengamplasan dengan amplas nomor 320, 400, 600, 800, 1000 dan 1200 serta pemolesan dengan *autosol*. Pengetsaan dilakukan dengan larutan HNO<sub>3</sub> 3%.

Uji struktur makro dilakukan untuk mengetahui struktur makro sambungan las yang terdiri dari jumlah lapis las, luas daerah lebur, daerah batas las dan lebar daerah terpengaruh panas. Uji struktur mikro dilakukan untuk mengetahui struktur mikro yang terbentuk pada logam dasar (*base metal*/BM), daerah terpengaruh panas/HAZ), daerah cair sebagian (*partially melted zone*/PMZ) dan logam las (*weld metal*/WM). Pengujian dilakukan dengan mikroskop cahaya dengan perbesaran 40X untuk struktur makro dan 200X untuk struktur mikro.

Spesimen uji geser dibuat berdasarkan standard JIS Z 3139 (gbr. 1).



**Gambar 1.** Spesimen uji geser

Uji geser dilakukan untuk mengetahui beban maksimum yang mampu ditahan oleh sambungan las. Pengujian

dilakukan dengan menggunakan mesin uji universal (*universal testing machine/UTM*) untuk uji geser sambungan las dalam arah longitudinal. Kapasitas mesin yang digunakan adalah 1 ton. Jumlah spesimen masing-masing tiga spesimen untuk setiap jenis pengujian.

## HASIL DAN ANALISIS

### Masukan Panas

Tegangan listrik yang digunakan adalah sebesar 1.79 volt. Tahanan listrik baja karbon rendah AISI 1010 adalah  $1.244 \times 10^{-3} \Omega$  (Metals Handbook, 1990) maka besarnya arus dapat dihitung :

$$I = \frac{V}{R} = \frac{1.79v}{1.244 \times 10^{-3} \Omega} = 1439A$$

Dalam penelitian ini variasi waktu las yang digunakan adalah 0.75, 1.00 dan 1.25 detik. Masukan panas dapat dihitung :

$$\begin{aligned} H_1 &= I^2 R t_1 \\ &= (1439A)^2 \times 1.244 \times 10^{-3} \Omega \times 0.75 \text{ s} \\ &= 2,576 \times 10^3 \text{ Joule} \\ H_2 &= I^2 R t_2 \\ &= (1439A)^2 \times 1.244 \times 10^{-3} \Omega \times 1.00 \text{ s} \\ &= 3,435 \times 10^3 \text{ Joule} \\ H_3 &= I^2 R t_3 \\ &= (1439A)^2 \times 1.244 \times 10^{-3} \Omega \times 1.25 \text{ s} \\ &= 4,294 \times 10^3 \text{ Joule} \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan masukan panas diatas didapatkan bahwa semakin lama waktu las maka semakin besar masukan panas yang dihasilkan yang berakibat semakin banyak logam yang mencair. Hal ini menyebabkan semakin besar luasan nugget yang dihasilkan.

### Hasil Uji Geser

Hasil pengujian geser menunjukkan patahan tidak terjadi pada nugget melainkan berrupa sobekan pada bagian luar nugget. Ini menunjukkan bahwa bagian nugget mempunyai kekuatan lebih tinggi daripada bagian logam yang mengalami sobekan. Mekanisme terjadinya sobekan pada saat pengujian tarik geser dijelaskan pada gambar 2.

Ketika penarikan dilakukan, penampang melintang nugget berputar sehingga nugget lurus sejajar dengan garis beban (b). Pada tahap (c) terjadi konsentrasi tegangan pada logam sekitar nugget. Saat beban bertambah, terjadi

necking pada perbatasan antara nugget dengan logam induk (d). Perpatahan terjadi ketika beban sudah mencapai batas kekuatan material. Kemudian terjadi perambatan retak di sekeliling nugget yang akhirnya menyebabkan terjadinya sobekan. Fenomena ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Yuh J. Chao, 2003.

Sobekan dalam perpatahan ini terjadi pada batas sekeliling nugget, yaitu pada batas antara logam induk dan HAZ. Pada daerah ini terdapat tegangan sisa akibat proses pengelasan yaitu karena indentasi oleh elektroda dan siklus termal. Menurut penelitian oleh Anastassiou (1990) tegangan sisa pada daerah ini adalah tegangan tekan dan disini retakan pada saat penarikan terjadi

Data rata-rata hasil uji tarik geser berikut ukuran nugget diperlihatkan dalam tabel 1.

Dari data hasil uji tarik geser dapat dilihat bahwa gaya tarik maksimum semakin meningkat pada variasi waktu las yang lebih besar. Ini disebabkan oleh semakin besarnya ukuran nugget (gbr 3).

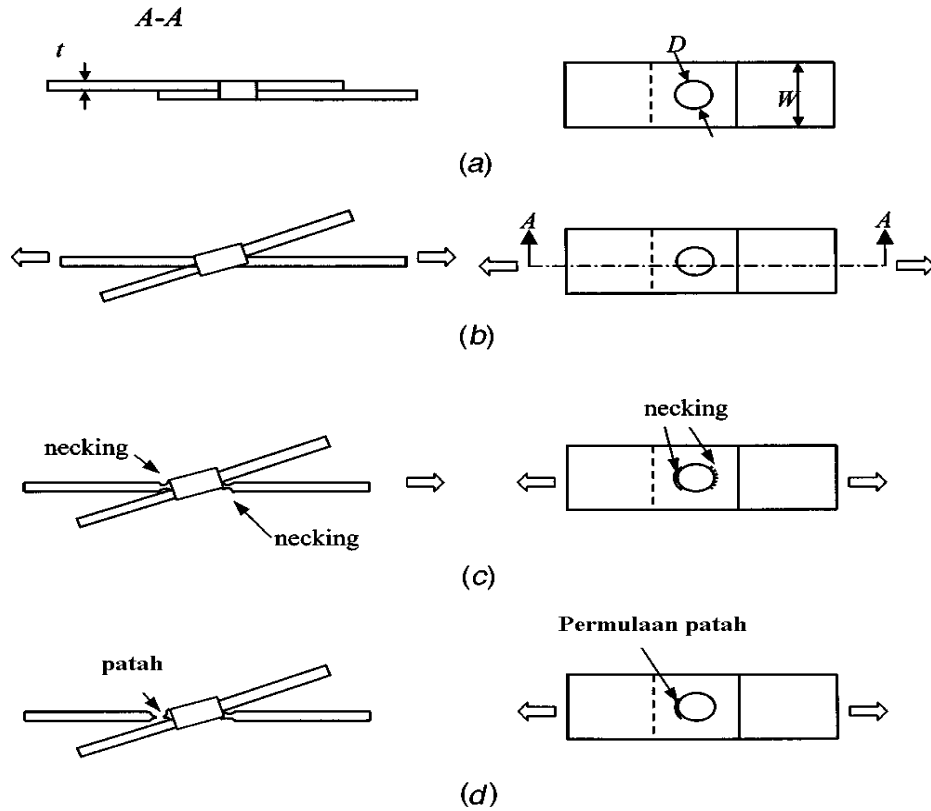
Dari foto perpatahan spesimen pada gambar 4. terlihat bahwa untuk spesimen dengan waktu las yang lebih tinggi (1.25 detik) perpatahannya berupa sobekan yang lebih luas sedangkan untuk waktu las 0.75 detik pepatahan berupa lepasnya *nugget* atau *buttoning*. Hal ini disebabkan karena dengan waktu las yang lebih lama yang menyebabkan keliling *nugget* lebih besar sehingga konsentrasi tegangan yang terjadi lebih luas dan saat gaya penarikan ditambah, terjadi sobekan yang lebih luas. Selain itu penetrasi *nugget* juga berpengaruh dimana dengan waktu las yang lebih singkat menyebabkan penetrasi berkurang. Hal ini menyebabkan ketebalan *nugget* berkurang sehingga *nugget* lebuah mudah lepas saat terjadi penarikan.

Waktu las yang lebih lama menyebabkan diameter *nugget* semakin besar sehingga gaya yang dibutuhkan untuk memutus sambungan semakin besar pula. Tetapi ketika waktu las melebihi 1.25 detik, maka akan mulai terjadi ekspulsi yang akan menurunkan kualitas lasan. Meskipun setelah terjadi ekspulsi beban maksimum

yang bisa ditahan lasan tetap meningkat tetapi menurut Sakuma dan Oikawa (2003) kekuatan tarik silangnya (*cross tensile strength*) akan turun.

Dari pengujian tarik hanya didapatkan gaya tarik maksimum

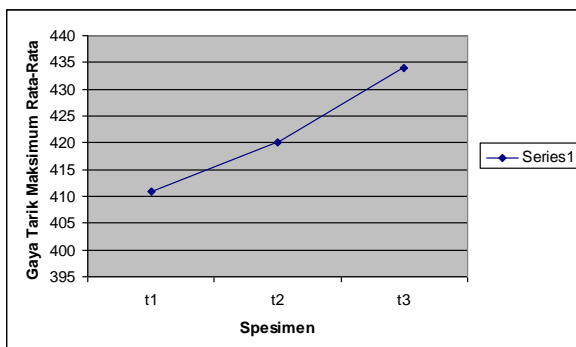
sedangkan kekuatan tarik pada nugget las tidak dapat dihitung sebab kekuatan tarik nugget adalah gaya tarik dibagi luas nugget, sedangkan pada pengujian ini tidak terjadi putus pada nugget melainkan sobekan pada bagian sekeliling nugget.



Gambar 2. Mekanisme perpatahan sambungan las titik

Tabel 4.3 Gaya geser maksimum rata-rata pada tiap spesimen

Variasi	Gaya tarik maksimum (kN)	Diameter nugget las (mm)	Luas nugget las (mm <sup>2</sup> )
t1	4.11	3.2	34.21
t2	4.20	3.5	45.36
t3	434	4.3	63.62



Gambar 3. Grafik gaya geser maksimum rata-rata



**Gambar 4.** Foto perpatahan spesimen

### Hasil Foto Struktur Makro

Hasil pengujian foto makro pada penampang melintang sambungan las dapat dilihat pada gambar 5. Pada gambar tersebut terdapat beberapa zona yaitu logam induk, HAZ (*heat affected zone*), PMZ (*partially melted zone*) dan *nugget*.

Dari gambar foto makro tersebut dapat dilihat bahwa *nugget* pada sambungan mempunyai diameter yang berbeda. Diameter *nugget* semakin besar pada spesimen dengan waktu pengelasan yang semakin lama. Berdasarkan pengukuran diameter *nugget* pada masing-masing spesimen, didapatkan diameter rata-rata *nugget* sebagai berikut:

- d *nugget* las t = 0.75 detik : 3,2 mm
- d *nugget* las t = 1.00 : 3,5 mm
- d *nugget* las t = 1.25 : 4,3 mm

Dari perbandingan diameter *nugget* terlihat bahwa semakin lama waktu las maka semakin besar diameter *nugget* yang dihasilkan. Ini disebabkan masukan panas yang semakin besar seiring dengan semakin lamanya waktu las sehingga logam yang mencair semakin banyak sehingga *nugget* semakin besar.

Daerah HAZ pada ketiga sambungan las titik diatas juga mempunyai luas yang berbeda dimana pada lasan dengan waktu las lebih lama daerah HAZ lebih luas. Ini juga disebabkan karena pengaruh besarnya masukan panas berbeda. Dimana dengan masukan panas yang lebih besar maka luas logam yang terpengaruh sehingga merubah strukturnya semakin luas.

Perbedaan luas *nugget* maupun HAZ nantinya akan berpengaruh terhadap kekuatan lasan, terutama pada kekuatan gesernya sebab berdasarkan penelitian oleh Anastassiou (1990) didapati bahwa putusannya sambungan las titik biasanya terjadi pada perbatasan antara HAZ dan logam induk. Sehingga semakin luas luasan *nugget* dan HAZ maka kekuatan las akan semakin besar.

Dari foto makro juga terlihat bahwa pada waktu las yang lebih lama menghasilkan penampang lasan yang lebih tipis. Jika waktu las ditambah lagi maka akan terjadi ekspulsi. Terjadinya ekspulsi akan menurunkan kualitas lasan baik dilihat dari penampilan karena lasan berbentuk cekung dan tidak rata maupun kekuatan.

### Hasil Foto Struktur Mikro

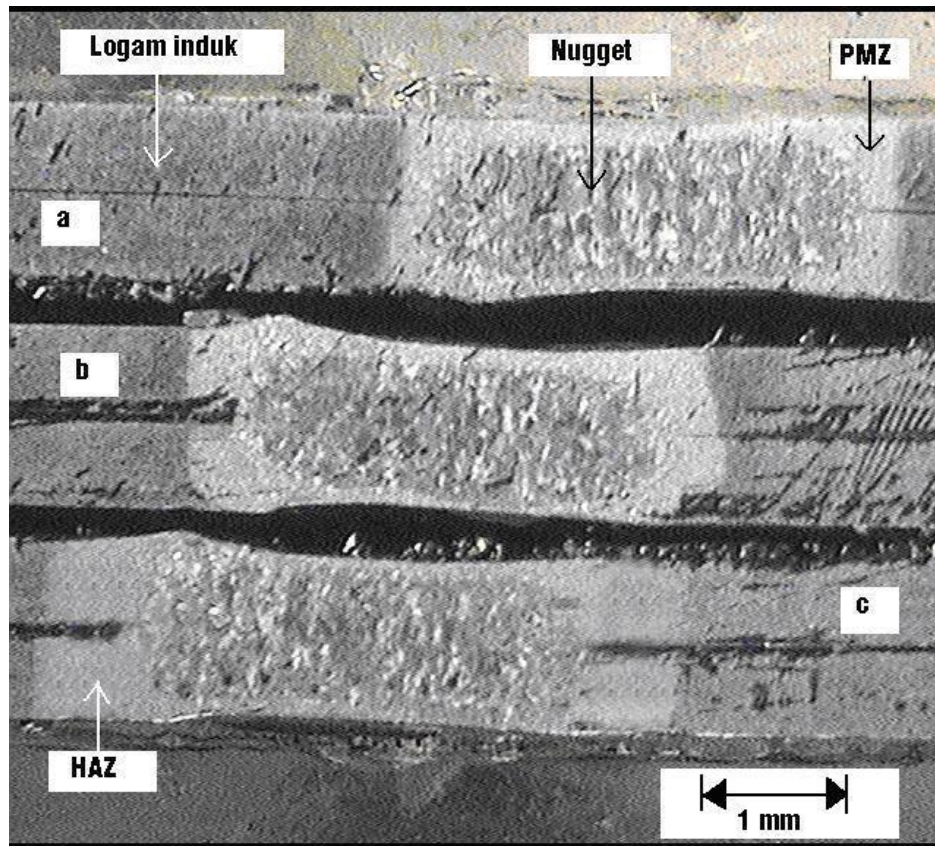
Struktur mikro dari logam induk dapat dilihat pada gambar 6. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa struktur mikro logam dasar terdiri dari ferit  $\alpha$  dan perlit dengan ferit lebih dominan karena logam induk merupakan baja karbon rendah ( $C=0.097$ ).

Foto struktur mikro daerah HAZ untuk lasan dengan waktu las 0.75 detik, 1.0 detik, dan 1.25 detik berturut turut dapat dilihat pada gambar 7(a), 7(b) dan 7(c).

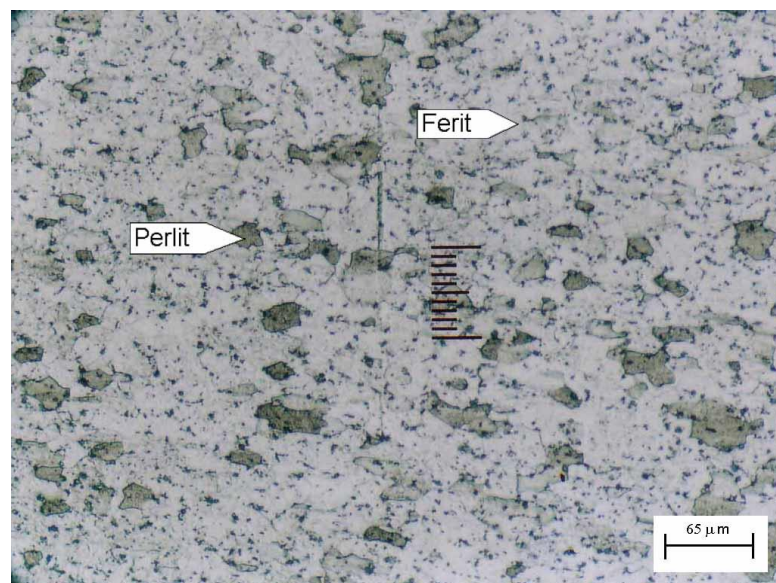
Ketiga foto tersebut menunjukkan kemiripan struktur daerah HAZ baik pada spesimen dengan waktu las 0,75 detik, 1,0 detik, maupun 1,25 detik. Secara umum struktur daerah haz masih terdiri atas ferit murni (*primary ferrite*) dan perlit. Jika dibandingkan dengan struktur mikro logam

induk, struktur mikro HAZ menunjukkan pola struktur yang lebih halus. Ini disebabkan karena masukan panas yang mempengaruhi daerah HAZ menyebabkan terjadinya penghalusan struktur.

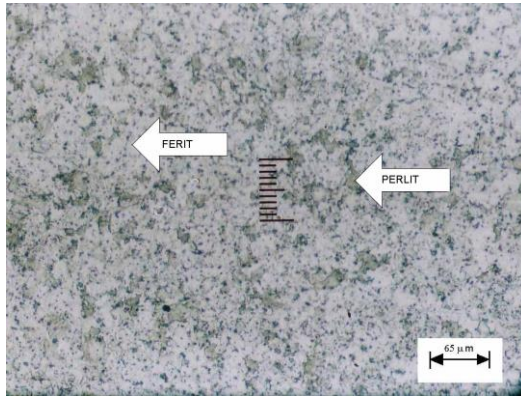
Penghalusan struktur ini terjadi oleh proses rekristalisasi. Karena pada daerah ini butir-butir menjadi semakin kecil maka daerah ini disebut sebagai zona penghalusan butir/*grain refined zone*.



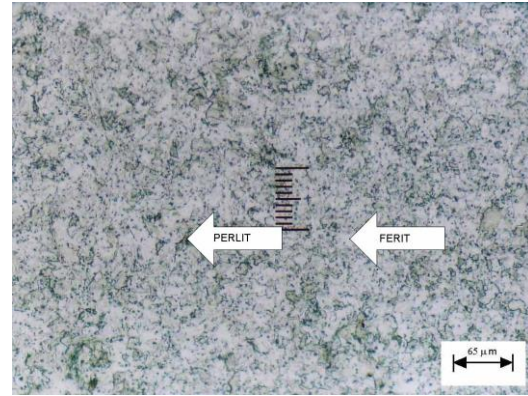
**Gambar 5.** Foto makro lasan dengan waktu las 0.75 detik (a), 1.0 detik(b) dan 1.25 detik(c)



**Gambar 6.** Struktur mikro logam induk



(a)

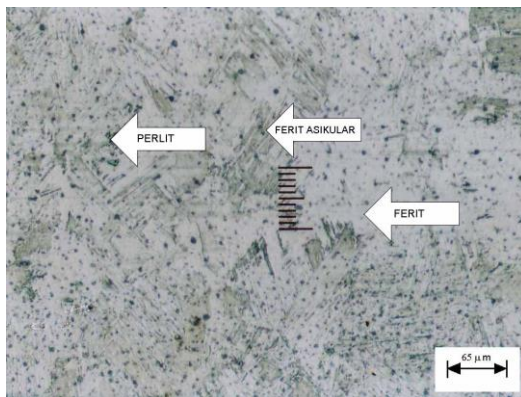


(b)

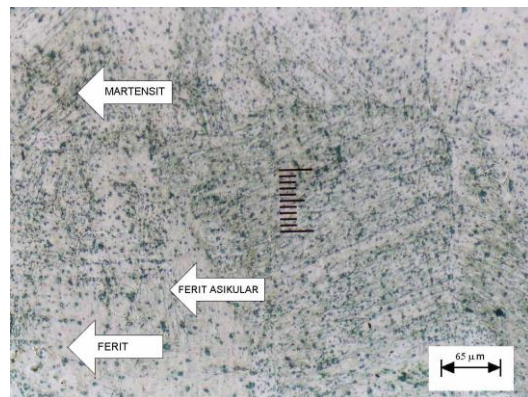


(c)

**Gambar 7.** Struktur mikro HAZ lasan dengan waktu las 0,75 detik (a), 1,0 detik (b) dan 1,25 detik (c)



**Gambar 8.** Struktur mikro PMZ lasan dengan waktu las 0,75 detik



**Gambar 9.** Struktur mikro *nugget* las dengan waktu las 0,75 detik

Zona penghalusan butir ini terjadi pada saat rekristalisasi, terjadi transformasi dari struktur ferit-perlit ke austenit. Tetapi karena kurangnya suhu puncak /*peak temperature* pada daerah ini, austenit yang terbentuk tidak tumbuh secara sempurna sehingga butir-butirnya tetap kecil. Karena ukuran butir yang kecil, maka terdapat lebih banyak permukaan untuk pengintian. Hal ini menyebabkan laju pengintian meningkat. Meningkatnya laju pengintian

ini akan menurunkan waktu untuk menyelesaikan pembentukan ferit dan perlit. Hasilnya adalah struktur ferit-perlit yang lebih halus dibandingkan pada daerah logam induk.

Dari pengukuran ukuran butir dengan standar *ASTM grain size* didapati bahwa daerah HAZ mempunyai nomor *ASTM grain size* lebih besar (ukuran butir lebih kecil) yaitu 7.5 dibandingkan dengan 5.5 pada logam induk. Ukuran butir yang



lebih halus ini akan meningkatkan kekuatan logam. Umumnya, pengurangan ukuran butir *primary ferrite* dengan faktor pengurangan 2 akan meningkatkan kekuatan luluh sekitar 50%. (Brooks, 1996).

Struktur mikro yang terbentuk pada PMZ dapat dilihat pada gambar 8. Struktur mikro PMZ menunjukkan struktur ferit yang terdiri dari ferit murni dan ferit asikular (*acicular ferrite*), dan terdapat sedikit struktur martensit.

Dibandingkan dengan daerah HAZ, pada daerah PMZ terdapat ferit dengan ukuran butir yang lebih besar. Hal ini disebabkan karena daerah PMZ mendapat masukan panas yang lebih tinggi daripada HAZ sehingga terjadi pertumbuhan butir.

Selain ferit murni/*primary ferrite*, pada PMZ juga terdapat ferit asikular/*acicular ferrite*. Ferit asikular terbentuk oleh rapatnya tempat nukleasi termasuk inklusi dalam butir. Ferit asikular juga bisa terbentuk jika reaksi *proeutectoid* ditekan, misalnya oleh pembentukan karbida pada batas austenit-ferit.

Terdapatnya ferit asikular pada PMZ akan meningkatkan ketangguhan daerah ini. Pada PMZ juga terlihat adanya martensit. Adanya struktur martensit ini menunjukkan pendinginan berlangsung cepat sehingga karbon yang terlarut dalam austenit tidak sempat berdifusi pada saat pendinginan dan akhirnya menghasilkan martensit. Pendinginan yang cepat ini disebabkan oleh bentuk plat baja yang tipis sehingga panas dengan mudah dilepaskan oleh logam. Martensit dapat terbentuk pada proses pengelasan dengan las titik tahanan listrik bahkan pada baja karbon rendah sekalipun.

Namun demikian masih ditemui struktur perlit dalam jumlah yang kecil. Ini menunjukkan pada beberapa bagian terjadi pendinginan yang cukup lambat sehingga ferit dan perlit yang telah bertransformasi menjadi austenit mempunyai cukup waktu untuk membentuk perlit.

Struktur mikro pada nugget las dapat dilihat pada gambar 9. Struktur mikro *nugget* las terdiri atas ferit dan martensit. Jika dibandingkan dengan

struktur mikro pada PMZ, struktur mikro pada *nugget* mengandung martensit yang lebih banyak.

Jumlah martensit yang lebih banyak pada daerah *nugget* las tersebut disebabkan oleh dua hal. Yang pertama adalah, kecepatan pendinginan. Daerah *nugget* las mengalami pendinginan yang lebih cepat daripada PMZ sebab pada saat pengelasan, daerah *nugget* bersentuhan dengan elektroda yang didinginkan dengan sirkulasi air sehingga daerah *nugget* las lebih cepat dingin dan akibatnya struktur martensit lebih banyak terbentuk. Penyebab kedua adalah martensit lebih mudah bernukleasi pada dislokasi atau kelompok dislokasi di dalam butir dimana energi tegangan dislokasi dapat digunakan untuk membantu pengintian. (Easterling, 1983). Pada daerah *nugget* las ini terjadi dislokasi akibat penekanan oleh elektroda saat proses pengelasan dan waktu tahan/*holding time*.

Semakin banyaknya martensit pada *nugget* las tersebut akan menyebabkan *nugget* las menjadi sangat keras.

Foto mikro *nugget* las juga menunjukkan struktur ferit yang terdiri dari ferit murni dan ferit asikular.

Dari foto mikro spesimen tidak ditemukan adanya retakan. Ini dikarenakan plat baja yang digunakan adalah plat baja karbon rendah.

## KESIMPULAN

1. Kekuatan geser paling tinggi untuk voltase pengelasan 1,79 V didapatkan pada waktu pengelasan 1,25 detik karena *nugget* las yang terbentuk paling besar.
2. Terdapat 4 zona pada logam yang dilas yaitu zona logam induk, HAZ, PMZ dan logam las atau *nugget*. Dari foto struktur mikro, struktur yang terbentuk adalah
  - Logam induk: ferit dan perlit dengan ferit yang lebih dominan.
  - HAZ : ferit dan perlit dengan butir yang lebih halus dibanding logam induk
  - PMZ : ferit, perlit dan martensit.
  - *Nugget* : ferit dan martensit.

## DAFTAR PUSTAKA

ASM Handbook, 1995, "Volume 6: *Welding, Brazing and Soldering*",

- ASM International Handbook  
Comitte, USA.
- Amstead, BH., 1997, "*Teknologi Mekanik jilid 1*", Edisi 7, Erlangga.
- Anastassiou, 1990, *Residual Stress and Microstructure Distribution Internasional Spot Weld Steel Sheet : Relation with fatigue Behaviour*.
- Brooks, Charlie R., 1996, *Principles of Heat Treatment of Plain Carbon and Low Alloy Steel*, ASM International, USA.
- Callister, W.D., 1994, *Materials Science and Engineering*, John Wiley and son, Canada.
- Chuko, W. L. and Gould, J. E., 1985, *Detailing Nugget Development Internasional Spot Welds*.
- Easterling, Kenneth, 1983, *Introduction to the Physical Metallurgy of Welding*, Butterworths, London.
- Kalpakjian, 1995, *Manufacturing Engineering and Technology*, Addison Wesley Publishing Company, USA
- Kou, Sindo, 1987, "*Welding Metalurgy*", John Willey & Sons, New York.
- Santella, M.L., Babu, S.S., Riemer, B.W., and Feng, Z., 2003, *Influence of Microstructure on the Properties of Spot Welds*.
- Sonawan, H dan Suratman, R, *Pengantar Untuk Memahami Proses Pengelasan Logam*, Alfabeta, Bandung.
- Surdia, T. dan Saito, S, 1994, *Pengetahuan Bahan Teknik*, Cetakan keempat, Pradnya Paramita, Jakarta.
- Van Vlack, Lawrence H.1992, *Ilmu dan teknologi Bahan (Ilmu Logam dan Bukan Logam)*, Erlangga, Jakarta.
- Wirjosumarto, H., Toshie Okumura, 2000, "*Teknologi Pengelasan Logam*", Pradnya Paramita, Jakarta.
- Yuh J. Chao, 2003, *Ultimate Strength and Failure Mechanism of Resistance Spot Weld Subjected to Tensile, Shear, or Combined Tensile/Sheare Loads*