

## ANALISIS KEKERASAN, CACAT LAS, DAN STRUKTUR MIKRO PADA SAMBUNGAN T PADUAN ALUMINIUM 6061 T6511 HASIL GAS METAL ARC WELDING (GMAW) DENGAN VARIASI KUAT ARUS

Ahmad Jukliv Pandu Yoedhawan<sup>1</sup>, Sumarji<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Alumni Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember

<sup>2</sup> Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember  
Jl. Kalimantan 37 Jember 68121

Email: petroleum.qualified@gmail.com

### ABSTRACT

AA 6061 T6511 is an aluminum alloy with composition Al 96,61 Wt %, Cr 0,04 Wt %, Cu 0,15 Wt %, Fe 0,7 Wt %, Mg 1,15 Wt %, Mn 0,15 Wt %, Si 0,8 Wt %, Ti 0,15 Wt %, and Zn 0,25 Wt %. Gas Metal Arc Welding (GMAW) is a welding process that the energy obtained from an electric arc. Arc welding to occur between the surface of the workpiece with the electrode wire coming out of the nozzle together with the protective gas. GMAW AA 6061 T6511 using filler metal ER 5356 with composition of 0,2% Mn, 0,25% Si, 0,4% Fe, 5,5% Mg, 0,2% Cr, 0,1% Cu, 0,2% Ti, 0,1% Zn, and 0,0003% Be. From a visual test known GMAW process with strong currents 120 amperes generates heat input of 0,504 kJ/mm, GMAW process with strong currents of 150 amperes generates heat input of 0,837 kJ/mm, and the GMAW process with strong currents of 180 amperes generates heat input of 1,168 kJ/mm. From inspection of defects on the surface was found that the results of GMAW are undersize weld, excessive convexity, excessive undercut, overlap, and incomplete fusion. From inspection of surface defects in GMAW welding of AA 6061 T6511 are spherical porosity and wormholes porosity. The area has the highest hardness in the heat affected zone is located at GMAW AA 6061 T6511 180 amperes is equal to 51,33 BHN, the lowest hardness of 24 BHN which is located on the base metal area on GMAW AA 6061 T6511 120 amperes, and microstructure observations show an increase in diameter the highest point on the AA 6061 T6511 from 61  $\mu\text{m}$  after GMAW process 180 amperes becomes 21  $\mu\text{m}$ .

**Keywords:** AA 6061 T6511, Gas Metal Arc Welding, hardness, microstructure, weld defects.

### PENDAHULUAN

AA 6061 T6511 merupakan paduan aluminium dengan komposisi Al 96,61 Wt %, Cr 0,04 Wt %, Cu 0,15 Wt %, Fe 0,7 Wt %, Mg 1,15 Wt %, Mn 0,15 Wt %, Si 0,8 Wt %, Ti 0,15 Wt %, dan Zn 0,25 Wt %. AA 6061 T6511 memiliki sifat dapat diperlaku-panaskan, memiliki sifat yang baik dalam daya tahan korosi terutama korosi oleh air laut, ketangguhan baik, dan sifat mampu las yang sangat baik sehingga material jenis ini banyak sekali digunakan untuk diaplikasikan pada temperatur dibawah nol derajat (*cryogenic*), tangki-tangki LNG, bejana tekan temperatur rendah (*unfired pressure vessel*), peralatan kelautan (*marine component*), rig pengeboran, struktur rangka bangunan, pembangunan struktur pesawat seperti sayap dan badan pesawat, cano, gerbong kereta api, dan konstruksi kapal pesiar [1].

*Gas Metal Arc Welding* (GMAW) adalah proses pengelasan yang energinya diperoleh dari busur listrik. Busur las terjadi di antara permukaan benda kerja dengan ujung kawat elektroda yang keluar dari *nozzle* bersama-sama dengan gas pelindung [2]. Dalam pengelasan perlu diperhatikan prosedur-prosedur pengelasan dan menghindari segala bentuk yang dapat

menyebabkan cacat las. Terjadinya cacat las ini akan mengakibatkan banyak hal yang tidak diinginkan dan mengarah pada turunnya tingkat keselamatan kerja, baik keselamatan alat, pekerja/user/operator, lingkungan, dan perusahaan/industri/instansi. Di samping itu juga secara ekonomi akan mengakibatkan melonjaknya biaya produksi dan pada gilirannya industri/perusahaan/instansi tersebut mengalami kerugian atau penurunan laba.

Untuk mengetahui pengaruh variasi kuat arus terhadap *heat input*, cacat las, struktur mikro, dan kekerasan, maka pada penelitian ini dirancang sambungan T paduan aluminium 6061 T6511 hasil *Gas Metal Arc Welding* (GMAW). Dalam penelitian ini, variasi yang digunakan adalah kuat arus.

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana *heat input*, cacat las, pengamatan struktur mikro metode *planimetric*, dan kekerasan pada sambungan T paduan aluminium 6061 T6511 hasil *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) dengan variasi kuat arus. Batasan masalah pada penelitian ini adalah pengelasan menggunakan metode GMAW sambungan T dengan *single bevel* 45<sup>0</sup> dengan 2 *layer* menggunakan polaritas balik yaitu

120 A, 150 A, dan 180 A. *Filler* yang digunakan adalah ER 5356  $\phi$  1,2 mm. Gas pelindung busur (*shielding gas*) adalah argon 99%. Material yang digunakan adalah *aluminium alloy type 6061 T6511* dengan ketebalan 12 mm dan dimensi AA 6061 T6511 280 x 100 x 12 mm. Analisis cacat las menggunakan *visual test*. Pengujian sifat mekanik menggunakan uji kekerasan metode *brinell* menggunakan standar ASTM A 370. Pengamatan struktur mikro menggunakan *micro etsa test* (metode *planimetric*) menggunakan standar ASTM E 112 dan ASM volume 9. Kondisi lingkungan dianggap tidak berpengaruh. Penelitian ini tidak membahas tentang uji ketangguhan bahan (*impact*), uji kelelahan (*fatigue*), dan uji kepecahan (*fracture test*).

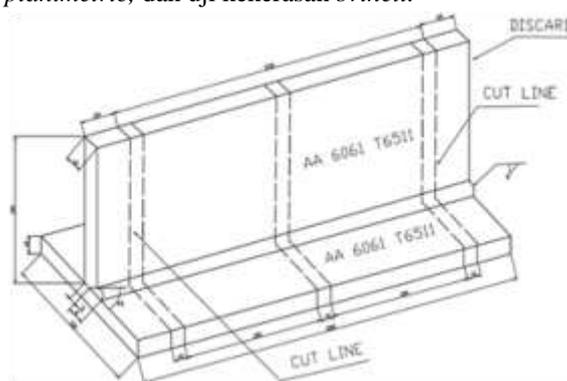
Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis dan mengetahui bagaimana pengaruh *heat input*, cacat las, pengamatan struktur mikro metode *planimetric*, dan kekerasan pada sambungan T paduan aluminium 6061 T6511 hasil *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) dengan variasi kuat arus. Manfaat dari penelitian ini adalah memperoleh informasi secara akademis akibat proses *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) dengan variasi kuat arus pada sambungan T paduan aluminium 6061 T6511 terhadap *heat input*, cacat las yang ditimbulkan, nilai kekerasan, dan pengamatan struktur mikro metode *planimetric*. Dan sebagai bahan referensi dalam proses produksi pembangunan konstruksi kapal dan struktur pesawat seperti sayap dan badan pesawat, khususnya yang berbahan AA 6061 T6511 dengan metode pengelasan GMAW.

### METODOLOGI PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental. Pengelasan dilakukan di Bengkel Las Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, pembuatan spesimen uji dilakukan di Laboratorium Kerja Bangku dan Pelat dan Laboratorium Permesinan Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember, pengujian cacat las, pengujian kekerasan (*brinell*), dan pengamatan struktur mikro dengan metode *planimetric* dilakukan di Laboratorium Desain dan Uji Bahan Fakultas Teknik Universitas Jember. Penelitian ini dilakukan selama 4 bulan. Alat yang digunakan pada penelitian ini antara lain mesin las GMAW, helm las, baju las/apron, kaca mata las, mesin uji kekerasan (*brinell*), mikroskop optik, kamera digital, komputer, penjepit (klem), mesin gerinda, mesin frais, alat kerja bangku (gergaji tangan, jangka sorong, ragum tangan, dan kikir), *stopwatch*, gelas ukur, *metallographic polishing table*, penggaris, dan penggaris busur. Sedangkan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah *aluminium alloy type 6061 T6511* dengan ketebalan 12 mm dimensi 280 x 100 x 12 mm, ER 5356  $\phi$  1,2 mm, resin, *catalyst*, cairan etsa (HCl, HNO<sub>3</sub>, HF, dan CH<sub>3</sub>OH), gas argon 99,9%, pasta pembersih (autosol), kertas amplas nomor 400, 600, 800, 1000, 1200, dan kain *selvyt* (beludru).

Material yang telah dilas dipotong untuk membuat spesimen uji seperti terlihat pada Gambar 1, dimensi dari material yang dipotong ini disesuaikan dengan dimensi dari spesimen uji yang akan dibuat. Pengujian diawali dengan Pemeriksaan visual yang dilakukan sebelum pengelasan, pada waktu pengelasan, dan

setelah pengelasan. Kemudian dilakukan proses pengambilan data yakni pengamatan *micro etsa test*, pengamatan struktur mikro (butir) dengan metode *planimetric*, dan uji kekerasan *brinell*.



Gambar 1 Spesimen uji

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Hasil Penelitian

Dari analisis data diperoleh bahwa terjadi peningkatan total *heat input*. Dari Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 3 dapat diketahui bahwa *heat input* dipengaruhi oleh kecepatan pengelasan (*travel speed*) dan kuat arus pengelasan.

Tabel 1 Hasil GMAW AA 6061 T6511 dengan arus 120 A

Layer	Voltage (V)	Time (s)	Speed (mm/min)	Heat Input (kJ/mm)
1	16	64	262,418	0,439
2	16	83	202,458	0,569
Rata-rata	16	73,5	232,438	0,504

Tabel 2 Hasil GMAW AA 6061 T6511 dengan arus 150 A

Layer	Voltage (V)	Time (s)	Speed (mm/min)	Heat Input (kJ/mm)
1	22	69	243,478	0,813
2	22	73	230,074	0,861
Rata-rata	22	71	236,776	0,837

Tabel 3 Hasil GMAW AA 6061 T6511 dengan arus 180 A

Layer	Voltage (V)	Time (s)	Speed (mm/min)	Heat Input (kJ/mm)
1	23	68	247,132	1,005
2	23	90	186,667	1,331
Rata-rata	23	79	216,900	1,168

Setelah dilakukan pengelasan dan dilihat tampilannya secara *visual* didapatkan cacat pengelasan seperti pada Tabel 4.

Tabel 4 Cacat pengelasan pada GMAW AA 6061 T6511

Kuat Arus Las (Ampere)	Cacat Pengelasan (mm)				
	Undersize Weld	Excessive Convexity	Excessive Undercut	Over lap	Incomplete Fusion
120	280	280	-	3	2
150	-	68	6	-	1
180	-	-	3	-	-

Data pengujian Kekerasan *Brinell* dari hasil proses pengelasan disajikan pada Tabel 5, Tabel 6, dan Tabel 7.

Tabel 5 Data pengujian kekerasan *Brinell* pengelasan GMAW AA 6061 T6511 dengan arus 120 A

Daerah uji	Harga kekerasan (BHN)			
	Spesimen 1	Spesimen 2	Spesimen 3	Rata-rata (BHN)
Logam induk	20	27	26	24,33
Daerah HAZ	36	38	37	37
Daerah lasan	24	25	24	24,33

Tabel 6 Data pengujian kekerasan *Brinell* pengelasan GMAW AA 6061 T6511 dengan arus 150 A

Daerah uji	Harga kekerasan (BHN)			
	Spesimen 1	Spesimen 2	Spesimen 3	Rata-rata (BHN)
Logam induk	24	25	23	24
Daerah HAZ	44	44	43	43,67
Daerah lasan	40	40	38	39,33

Tabel 7 Data pengujian kekerasan *Brinell* pengelasan GMAW AA 6061 T6511 dengan arus 180 A

Daerah uji	Harga kekerasan (BHN)			
	Spesimen 1	Spesimen 2	Spesimen 3	Rata-rata (BHN)
Logam induk	25	23	24	24
Daerah HAZ	57	48	49	51,33
Daerah lasan	53	47	47	49

Ada beberapa metode yang dapat dilakukan untuk mengukur besar butir dari struktur mikro suatu material salah satunya adalah metode *planimetric* yang dikembangkan oleh Jeffries. Dimana metode ini cukup sederhana untuk menentukan jumlah butir persatuan luas pada bagian bidang yang dapat dihubungkan pada

standar ukuran butir ASTM E 112. Dalam penggunaan metode Jeffries dapat dilakukan dengan menggambar sebuah lingkaran pada struktur mikro yang akan dianalisis. Jumlah butir yang utuh di dalam lingkaran dinamakan ( $n_1$ ) dan jumlah butir yang berpotongan dengan garis lingkaran dinamakan ( $n_2$ ). Data hasil perhitungan struktur mikro (butir) metode *planimetric* dari hasil proses pengelasan disajikan pada Tabel 8, Tabel 9, dan Tabel 10.

Tabel 8 Hasil pengamatan struktur mikro GMAW AA 6061 T6511 pada *base metal*

Logam Induk ( <i>Base Metal</i> ) GMAW AA 6061 T6511			
Jumlah Butir	Rata-rata Luas Butir (mm <sup>2</sup> )	Rata-rata Diameter Butir (mm)	Ukuran Butir
270,78	0,0037	0,061	5,13

Tabel 9 Hasil pengamatan struktur mikro GMAW AA 6061 T6511 pada *heat affected zone*

<i>Heat Affected Zone</i> GMAW AA 6061 T6511				
Kuat Arus (Ampere)	Jumlah Butir	Rata-rata Luas Butir (mm <sup>2</sup> )	Rata-rata Diameter Butir (mm)	Ukuran Butir
120	1150,82	0,00087	0,029	7,22
150	1669,81	0,00060	0,024	7,76
180	2279,07	0,00044	0,021	8,20

Tabel 10 Hasil pengamatan struktur mikro GMAW AA 6061 T6511 pada *weld metal*

<i>Weld Metal</i> GMAW AA 6061 T6511				
Kuat Arus (Ampere)	Jumlah Butir	Rata-rata Luas Butir (mm <sup>2</sup> )	Rata-rata Diameter Butir (mm)	Ukuran Butir
120	248,22	0,00403	0,063	5,01
150	1286,21	0,00078	0,028	7,38
180	2143,68	0,00047	0,022	8,12

### Pembahasan

Dari Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 3 dapat diketahui bahwa *heat input* dipengaruhi oleh kecepatan pengelasan (*travel speed*) dan kuat arus pengelasan. Peningkatan kuat arus akan mengakibatkan laju deposisi yang lebih tinggi dan penetrasi yang lebih dalam. Pada sistem pengelasan *current voltage*, kenaikan kecepatan kawat pengumpan dapat meningkatkan kuat arus listrik. Arus yang terlalu kecil akan menghasilkan penetrasi dan penguatan yang rendah, dan bila terlalu besar akan menghasilkan manik berbentuk buah pir dan akan mudah terjadi retak panas. Selain itu arus yang kecil akan menyebabkan sukarnya penyalan busur listrik dan busur listrik yang terjadi tidak stabil.

Panas yang terjadi tidak cukup untuk melelehkan elektroda dan bahan dasar sehingga hasilnya merupakan rigi-rigi las yang kecil dan tidak rata serta penetrasi yang kurang dalam. Sebaliknya bila arus terlalu besar maka elektroda akan mencair terlalu cepat dan menghasilkan permukaan las yang lebih lebar dan penetrasi yang dalam.

Kecepatan pengelasan berhubungan terbalik terhadap ukuran *weld bead*. Bila kecepatan pengelasan meningkat maka ukuran *weld bead* berkurang sehingga *heat input* juga berkurang. Kecepatan pengelasan yang rendah akan menyebabkan pencairan yang banyak dan pembentukan manik datar yang dapat menimbulkan terjadinya lipatan manik. Sedangkan kecepatan yang tinggi akan menurunkan lebar manik dan menyebabkan terjadinya bentuk manik yang cekung dan takik.

*Heat input* ini berbanding lurus dengan arus dan tegangan yang digunakan serta berbanding terbalik dengan kecepatan pengelasan. Bila menggunakan *heat input* yang rendah, mengharuskan kecepatan pengelasan yang relatif pelan, maka energi panas banyak menyebar kebagian logam, sehingga semakin banyak daerah yang dipanasi, berarti lebih banyak daerah yang mengalami perubahan struktur kristal. Sebaliknya dengan *heat input* yang tinggi, aluminium mencair dengan cepat, sehingga kecepatan pengelasan lebih besar, yang berarti daerah yang dipengaruhi panas las sempit. Semakin besar masukan panas makin besar pula perubahan bentuk atau distorsi yang terjadi. Apabila *heat input* dari suatu pengelasan terlalu tinggi maka daerah HAZ akan menjadi lebar sehingga mudah terjadi cacat seperti *undercut*. Akan tetapi apabila *heat input* terlalu kecil maka juga akan menimbulkan cacat las seperti *inclusion*. Efek dari *heat input* terhadap laju pendinginan hampir sama dengan temperatur pemanasan awal. Apabila *heat input* atau temperatur pemanasan awal dinaikkan maka laju pendinginan akan turun yang biasanya digunakan untuk *base metal* yang tebal. *Heat input* akan mempengaruhi *material properties* pada pengelasan. Pada pengelasan *multiple-pass*, bagian dari pengelasan *pass* sebelumnya akan dihaluskan oleh *pass* selanjutnya, sehingga ketangguhan material akan meningkat. Hal ini disebabkan karena panas dari suatu *pass* akan mengeraskan *weld metal* yang sebelumnya.

Keseluruhan *visual test* pada permukaan las tidak didapat adanya *slag*. Dikarenakan adanya gas mulia yang melindungi busur dan logam yang mencair terhadap atmosfer atau udara sekitar. Sehingga hasil pengelasan tidak menimbulkan *spatter*. Alur las yang didapatkan kurang baik karena pada GMAW menggunakan mesin *semi automatic* sehingga pengumpanan *filler metal* tidak dapat diatur kecepatannya oleh *welder*. Setelah dilakukan pengelasan dan dilihat tampilannya secara *visual* didapatkan cacat pengelasan seperti pada Tabel 4. Dari pemeriksaan cacat pada permukaan didapatkan bahwa hasil GMAW dengan kuat arus 120 ampere terdapat *undersize weld* disebabkan oleh ketidakstabilan arus dan arus listrik yang terlalu kecil. Cacat ini berdampak melemahkan sambungan, timbul takik (*notch*) yang berpotensi retak, mengawali karat permukaan, yang menonjol tampak buruk dan tidak efisien, dan timbul

kecurigaan bahwa sejumlah lajur las dilaksanakan dengan ampere rendah sehingga dapat mengakibatkan fusi antar bahan dasar dengan bahan las atau antar lajur tidak sempurna. Hasil GMAW dengan kuat arus 120 ampere dan 150 ampere terdapat *excessive convexity* disebabkan oleh arus las yang terlalu kecil, gerakan *filler*, dan sudut *filler* yang tidak tetap. Cacat ini berdampak timbulnya kecurigaan bahwa sejumlah lajur las dilaksanakan dengan ampere rendah sehingga jalur las ditolak dan kondisi internal jalur las cukup baik.

Hasil GMAW dengan kuat arus 150 ampere dan 180 ampere terdapat *excessive undercut* disebabkan oleh pengendalian busur dan *filler metal* yang kurang baik, teknik pengelasan yang salah, sudut pengelasan yang tidak tepat, penggunaan panas atau arus terlalu besar atau penentuan kecepatan pengelasan yang terlalu rendah. *Excessive undercut* dapat membahayakan daerah lasan karena mengurangi luasan penampang lasan dan menimbulkan konsentrasi tegangan pada sambungan, melemahkan sambungan, mengawali karat permukaan, dan menimbulkan tegangan geser (*displacement stress*) yang berpotensi retak.

Hasil GMAW dengan kuat arus 120 ampere terdapat *overlap* disebabkan fusi yang kurang pada ujung muka las, arus terlalu rendah, kecepatan pengelasan rendah, kesalahan teknik mengelas, kontaminasi sekitar, dan terdapat oksida yang menutupi permukaan bahan induk. *Overlap* dapat menimbulkan takik (*notch*) yang berpotensi retak dan merusak *cleaning pig*. Hasil GMAW dengan kuat arus 120 ampere dan 150 ampere terdapat *incomplete fusion* disebabkan pembersihan daerah lasan yang kurang baik, arus listrik kurang besar, *travel speed* berlebihan, penyimpangan posisi *filler* terhadap sumbu pengelasan, persiapan sisi yang tidak sempurna atau penggunaan teknik pengelasan yang salah. *Incomplete fusion* dapat menimbulkan takik (*notch*) yang berpotensi retak, melemahkan sambungan, dan mengawali erosi abrasi. Cara mengatasi cacat las yaitu menyesuaikan parameter pengelasan, usahakan gerakan/ayunan *filler* stabil, pertahankan sudut *filler* agar selalu tetap, menyesuaikan panjang busur, memperbaiki sudut *filler*, posisi *filler* harus tepat, menstabilkan nyala busur, kecepatan las sesuai dengan prosedur yang ditentukan, arus disesuaikan dengan prosedur yang ditentukan, mengurangi kelembaban dengan cara memberikan *pre heat*, meningkatkan kebersihan material dengan cara digerinda terlebih dahulu, dan menghindari pendinginan terlalu cepat.

*Weld metal* GMAW AA 6061 T6511 120 A dengan perbesaran 50x mempunyai porositas berupa *spherical porosity* dan *wormholes porosity* besar dan banyak. *Weld metal* GMAW AA 6061 T6511 150 A dengan perbesaran 50x mempunyai porositas berupa *spherical porosity* dan *wormholes porosity* kecil dan banyak. *Weld metal* GMAW AA 6061 T6511 180 A dengan perbesaran 50x mempunyai porositas berupa *spherical porosity* dan *wormholes porosity* kecil dan sedikit. Banyak faktor yang diketahui berkontribusi terhadap cacat porositas

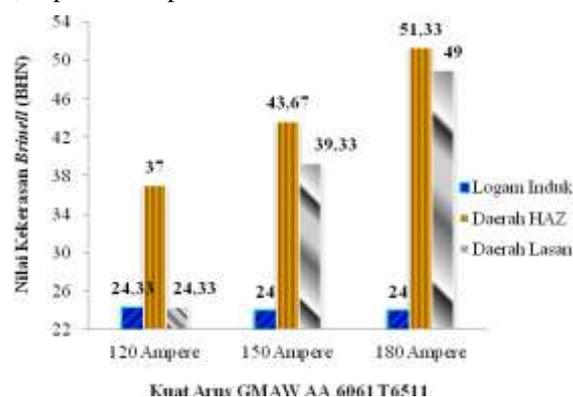
lasan aluminium. Salah satu faktor utama penyebab porositas adalah gas pelindung yang terkontaminasi oleh atmosfer udara [3]. Porositas atau lubang halus yang terjadi pada GMAW AA 6061 T6511 disebabkan nyala busur terlalu panjang, arus terlalu rendah, kecepatan las terlalu tinggi, pendinginan logam cair terlalu cepat, selang gas yang terjepit atau rusak sehingga tidak memberikan *suplay shielding gas* yang cukup, aliran gas terlalu tinggi, lapisan galvanisasi, dan gas hidrogen yang larut ke dalam ER 5356 cair. Karena batas kelarutan turun pada waktu pendinginan maka gas hidrogen keluar dari larutan dan proses pembekuan yang cepat menyebabkan gas ini terperangkap dan membentuk gelembung halus. Aliran gas yang terbuka lebar akan menghasilkan kecepatan aliran gas yang tinggi, menciptakan turbulensi, menarik udara luar ke zona lasan, pemborosan gas, dan menambah biaya yang tidak perlu untuk suatu pengelasan. Lapisan galvanisasi dapat membuat masalah. *Zinc* meleleh pada sekitar 420°C dan titik didih sekitar 920°C. Pada temperatur pengelasan jauh melebihi 2.000°C terjadi perubahan seng (*zinc*) dari solid menjadi gas dalam sepersekan detik.

Data pengujian Kekerasan *Brinell* dari hasil proses pengelasan disajikan pada Tabel 5, Tabel 6, dan Tabel 7. Dalam proses pengujian kekerasan di daerah *base metal* dari beberapa parameter arus 120 A, arus 150 A, dan arus 180 A tidak terjadi perubahan nilai kekerasan yang cukup signifikan, hal ini dikarenakan daerah *base metal* tidak terpengaruh panas secara langsung. Pada daerah *base metal* tidak terjadi perubahan yang besar karena pada daerah ini panas yang terjadi relatif kecil sehingga tidak sampai merubah struktur butiran pada material induk dan nilai kekerasan cenderung hampir sama atau mendekati.

Daerah HAZ sangat sensitif pada AA 6061 T6511 dan hal ini yang mengakibatkan nilai kekerasan pada daerah HAZ meningkat jika dibandingkan dengan daerah material induk dan daerah kampuh las. Hal ini disebabkan karena AA 6061 T6511 yang telah dilas memiliki struktur atom FCC (*Face Centered Cubic*). Fasa ini bersifat non magnetik dan ulet (*ductile*). Pada proses GMAW *heat affected zone* AA 6061 T6511 dengan kuat arus 120 ampere diameter butir adalah 0,029 mm, tetapi akibat proses GMAW *heat affected zone* AA 6061 T6511 dengan kuat arus 150 ampere diameter butir bertambah kecil yaitu 0,024 mm. Dan pada proses GMAW *heat affected zone* AA 6061 T6511 dengan kuat arus 180 ampere besarnya diameter butir juga bertambah kecil yaitu 0,021 mm, karena adanya panas (*heat*) yang diberikan pada AA 6061 T6511 akan merubah struktur metalurgi AA 6061 T6511.

Pada proses GMAW *weld metal* AA 6061 T6511 dengan kuat arus 120 A nilai kekerasannya adalah 24,33 BHN lebih kecil bila dibandingkan dengan arus 150 A yaitu 39,33 BHN yang mengalami kenaikan dan pada arus pengelasan 180 A nilai kekerasannya adalah 49 BHN dan terlihat bahwa pada arus 180 A mengalami kenaikan kekerasan paling tinggi. Semakin kecil ukuran butir berarti semakin banyak jumlah butir. Jumlah butir yang semakin banyak berarti area batas butir semakin luas sehingga semakin banyak terjadi mekanisme *pile up* atau penumpukan dislokasi pada batas butir

akibatnya material menjadi semakin keras. Dislokasi (cacat kristal) lebih dominan berperan dalam proses pengerasan (*strengthening*), hal ini karena batas butir (*grain boundary*) merupakan penghambat (*barier*) dalam pergerakan dislokasi. Akibatnya semakin banyak hambatan (batas butir) maka semakin sulit dislokasi untuk bergerak. Jadi untuk memperbanyak batas butir, maka AA 6061 T6511 harus diperhalus (diperkecil) butirnya. Namun sebaliknya di atas temperatur rekristalisasi seperti pada *single crystal*, maka proses difusi (perpindahan akibat beda konsentrasi *atomic*) lebih berperan dalam proses penguatan (*strengthening*). Untuk melihat perbandingan secara keseluruhan nilai kekerasan antara arus 120 A, 150 A, dan 180 A, dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Grafik perbandingan kekerasan dengan pengaruh arus GMAW 135 A, 150 A, dan 175 A pada AA 6061 T6511

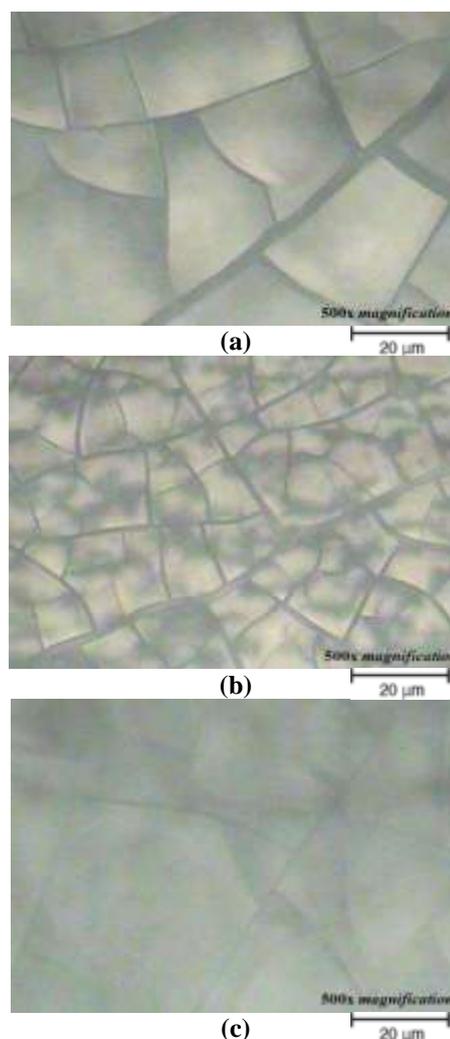
Menurut *Atlas Micro Structure of Aluminium*, AA 6061 T6511 terdiri dari senyawa  $Mg_2Al_3$  dan  $(Fe,Mn)_3SiAl_6$  yang menyatu dengan matrik aluminium. Kedua senyawa tersebut dapat menambah kekuatan dari campuran aluminium. Partikel hitam yang terdispersi merata pada matrik aluminium yang berwarna putih adalah  $Mg_2Si$  sedangkan partikel yang berwarna abu-abu adalah  $(Fe,Mn)_3SiAl_6$ . Untuk partikel berwarna kebiru-biruan merupakan  $Mg_2Al_3$ . Presipitasi partikel  $Mg_2Al_3$  menurun seiring dengan naiknya masukan panas pada logam las [3]. Sedangkan partikel  $(Fe,Mn)_3SiAl_{12}$  mengalami penurunan yang tidak terlalu besar. Dan partikel  $Mg_2Si$  mengalami kenaikan, namun tidak terlalu drastis [4].

Aluminium yang berisi silikon (Si) mempunyai kepekaan dalam membentuk formasi presipitat  $Mg_2Si$ , pembentukan  $Mg_2Si$  ini dapat meningkatkan kekuatan tarik dan kekerasan pada aluminium 6061 [5]. Pada GMAW AA 6061 T6511 terbentuk presipitat ( $Mg_2Si$ ), dengan adanya presipitat ini, pergerakan dislokasi akan terhambat. Presipitat ini ( $Mg_2Si$ ) sangat kecil, tidak tampak di mikroskop (*submicroscopic*), dan menyebabkan terjadinya tegangan pada lattis kristal  $\alpha$  di sekitar presipitat ini. Karena presipitat tersebar merata di dalam lattis kristal, maka dapat dikatakan seluruh lattis menjadi tegang dan ini mengakibatkan kekuatan dan kekerasan menjadi tinggi [6].

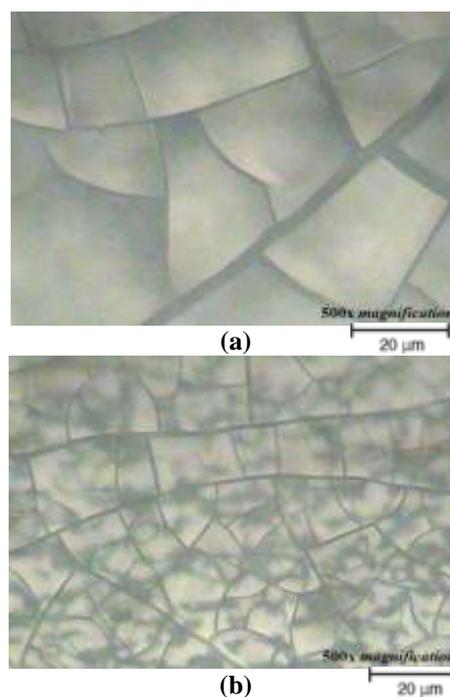
Naiknya kekerasan dipengaruhi banyaknya kandungan senyawa  $Mg_2Si$ , dimana  $Mg_2Si$  terbentuk adanya kombinasi antara magnesium dengan silikon.  $Mg_2Si$  adalah senyawa yang tidak dapat larut dan tampak sebagai partikel hitam yang terdispersi merata pada matrik aluminium yang berwarna putih. Pada daerah HAZ tampak butiran partikel yang berwarna hitam. Partikel ini mengandung unsur magnesium dan silikon. Daerah HAZ ini memiliki struktur dengan butir-butir yang lebih halus, hal ini disebabkan *base metal* yang menerima panas lebih akan melepaskan Mg, unsur Mg ini akan bersenyawa dengan Si yang merupakan unsur tambahan *filler metal*. Pada arus pengelasan 180 A kandungan  $(Fe,Mn)_3SiAl_{12}$  mengalami penurunan,  $Mg_2Si$  dan  $Mg_2Al_3$  mengalami kenaikan. Dengan adanya kandungan zirkonium (Zr) dan sedikit titanium (Ti) berperan sebagai paduan penghalus butir (*grain-refiner*), tingkat penghalusan butir meningkat dengan meningkatnya masukan panas dan kecepatan las. Jadi semakin tinggi *heat input* (arus las), maka kandungan partikel  $Mg_2Al_3$  dan  $Mg_2Si$  akan semakin banyak [7]. Semakin banyak kadar  $Mg_2Si$  kekerasan semakin meningkat [8].

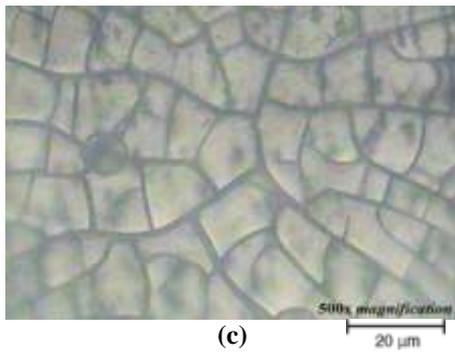
Pada *base metal* jika dilihat dengan perbesaran 500x maka persentase bintang hitam (magnesium silikat/ $Mg_2Si$ ) sebesar 0,0127%,  $(Fe,Mn)_3SiAl_{12}$  yang berwarna abu-abu sebesar 0,00818%,  $Mg_2Al_3$  yang berwarna kebiru-biruan sebesar 0,0097%, dan  $(FeMn)Al_6$  sebesar 0,017%. Pada *heat affected zone* jika dilihat dengan perbesaran 500x maka persentase bintang hitam (magnesium silikat/ $Mg_2Si$ ) sebesar 0,0147%,  $(Fe,Mn)_3SiAl_{12}$  yang berwarna abu-abu sebesar 0,0088%,  $Mg_2Al_3$  yang berwarna kebiru-biruan sebesar 0,0139%, dan  $(FeMn)Al_6$  sebesar 0,023%. Pada *weld metal* jika dilihat dengan perbesaran 500x maka persentase bintang hitam (magnesium silikat/ $Mg_2Si$ ) sebesar 0,0189%,  $(Fe,Mn)_3SiAl_{12}$  yang berwarna abu-abu sebesar 0,0089%,  $Mg_2Al_3$  yang berwarna kebiru-biruan sebesar 0,017%, dan  $(FeMn)Al_6$  sebesar 0,025% [9]. Pada GMAW AA 6061 T6511 terbentuk presipitat ( $Mg_2Si$ ), dengan adanya presipitat ini, pergerakan dislokasi akan terhambat.

Pengujian metallografi dilakukan terhadap benda uji pada seluruh kondisi pengelasan. Dalam penelitian ini spesimen dicelupkan ke dalam larutan *keller's reagent* (1 drop HF, 30 mL HCl, 20 mL HNO<sub>3</sub>, dan 50 mL CH<sub>3</sub>OH) dan ditahan selama 10-60 detik dengan suhu 20-25 °C. Perhitungan diameter butiran menggunakan metode *planimetric* sesuai standar ASTM E-112 dan bentuk butiran diasumsikan *spherical*. *Heat input* dari kuat arus GMAW memengaruhi ukuran butiran. Butir kristal tidak sepenuhnya berbentuk *polyhedral*, tetapi dapat mempunyai bentuk yang berbeda, bergantung pada riwayat termal dan mekanik bahan utuh. Sifat mekanik turut ditentukan oleh ukuran butir. Makin halus butir, makin keras bahan, kekuatan luluh, keuletan, dan ketangguhan bahan juga lebih tinggi [10]. Data hasil pengamatan struktur mikro dari hasil proses pengelasan disajikan pada Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5.

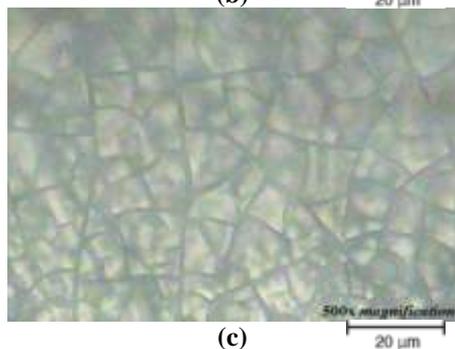
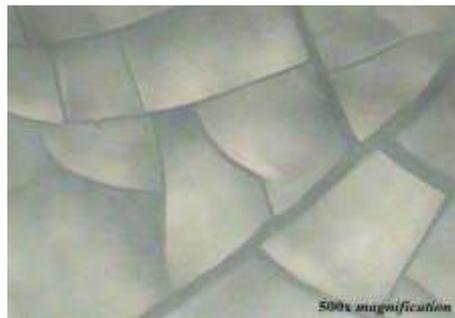


Gambar 3 Struktur mikro AA 6061 T6511 GMAW 120 A dengan perbesaran 500x (a) *base metal*, (b) *heat affected zone*, (c) *weld metal*



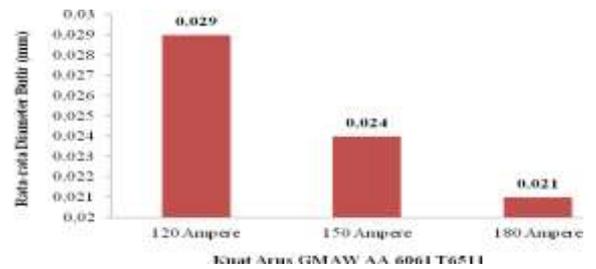


Gambar 4 Struktur mikro AA 6061 T6511 GMAW 150 A dengan perbesaran 500x (a) *base metal*, (b) *heat affected zone*, (c) *weld metal*



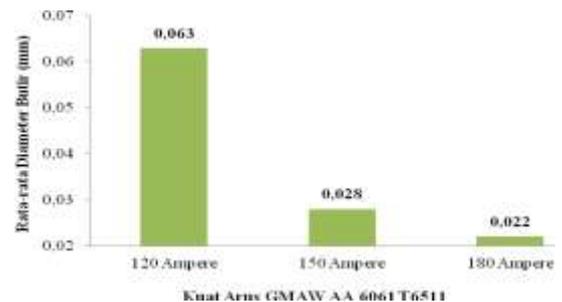
Gambar 5 Struktur mikro AA 6061 T6511 GMAW 180 A dengan perbesaran 500x (a) *base metal*, (b) *heat affected zone*, (c) *weld metal*

Bila logam induk direntangkan melampaui batas elastik dan mengalami deformasi tetap sebagian energi deformasi tertumpuk dalam butir sebagai distorsi kisi dan rangkaian dislokasi [11]. Pada proses GMAW *base metal* AA 6061 T6511 besarnya diameter butir adalah 0,061 mm. Pada daerah *base metal* tidak terjadi perubahan yang besar karena pada daerah ini panas yang terjadi relatif kecil sehingga tidak sampai merubah struktur butiran pada material induk.



Gambar 6 Grafik hubungan antara diameter butir dengan kuat arus GMAW pada *heat affected zone* AA 6061 T6511

Dari Gambar 6 dapat dilihat bahwa semakin besar kuat arus dan *heat input* GMAW, besarnya diameter butir dari *heat affected zone* AA 6061 T6511 bertambah kecil. Pada proses GMAW *heat affected zone* AA 6061 T6511 dengan kuat arus 120 ampere diameter butir adalah 0,029 mm, tetapi akibat proses GMAW *heat affected zone* AA 6061 T6511 dengan kuat arus 150 ampere diameter butir bertambah kecil yaitu 0,024 mm. Dan pada proses GMAW *heat affected zone* AA 6061 T6511 dengan kuat arus 180 ampere besarnya diameter butir juga bertambah kecil yaitu 0,021 mm, karena adanya panas (*heat*) yang diberikan ke AA 6061 T6511 akan merubah struktur metalurgi AA 6061 T6511.



Gambar 7 Grafik hubungan antara diameter butir dengan kuat arus GMAW pada *weld metal* AA 6061 T6511

Dari Gambar 7 dapat dilihat bahwa semakin besar kuat arus dan *heat input* GMAW, besarnya diameter butir dari *weld metal* AA 6061 T6511 bertambah kecil. Pada proses GMAW *weld metal* AA 6061 T6511 dengan kuat arus 120 ampere diameter butir adalah 0,063 mm, tetapi akibat proses GMAW *weld metal* AA 6061 T6511 dengan kuat arus 150 ampere diameter butir bertambah kecil yaitu 0,028 mm. Dan pada proses GMAW *weld metal* AA 6061 T6511 dengan kuat arus 180 ampere besarnya diameter butir juga bertambah kecil yaitu 0,022 mm, karena adanya panas (*heat*) yang diberikan ke AA 6061 T6511 akan merubah struktur metalurgi AA 6061 T6511, selaras dengan persamaan *Hall and Petch* dimana semakin besar diameter butir maka kekerasan menurun. Semakin kecil ukuran diameter butir, semakin tinggi nilai kekerasan, kekuatan luluh, kekuatan fatik, dan perambatan retak pada butir yang lebih besar berlangsung lebih cepat dibanding pada butir-butir yang lebih kecil. Ini dikarenakan dengan

mengcilnya diameter butir maka batas butir yang terbentuk akan semakin bertambah. Batas butir yang banyak ini akan mengakibatkan gerakan dislokasi semakin sulit karena semakin sedikit hambatan sehingga bahan jadi semakin keras akibat adanya *heat input* yang besar dari GMAW AA 6061 T6511.

#### KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian proses pengelasan paduan aluminium 6061 T6511 dengan proses *gas metal arc welding* (GMAW) dengan arus 120 A, 150 A, dan 180 A dan setelah melakukan *visual test*, kekerasan *brinell*, dan *metalography test* maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari hasil *visual test*, GMAW AA 6061 T6511 dengan kuat arus 120 ampere terdapat cacat las berupa *undersize weld*, *excessive convexity*, *overlap*, *incomplete fusion*, *spherical porosity*, dan *wormholes porosity*. GMAW AA 6061 T6511 dengan kuat arus 150 ampere terdapat cacat las berupa *excessive convexity*, *excessive undercut*, *incomplete fusion*, *spherical porosity*, dan *wormholes porosity*. GMAW AA 6061 T6511 dengan kuat arus 180 ampere terdapat cacat las berupa *excessive undercut*, *spherical porosity*, dan *wormholes porosity*.
2. Daerah yang memiliki kekerasan tertinggi terletak pada *heat affected zone* pada GMAW AA 6061 T6511 180 ampere yaitu sebesar 51,33 BHN, kekerasan terendah sebesar 24 BHN yang terletak pada daerah *base metal* pada GMAW AA 6061 T6511 120 ampere, dan pengamatan struktur mikro memperlihatkan kenaikan diameter butir tertinggi pada AA 6061 T6511 dari 61  $\mu\text{m}$  setelah proses GMAW 180 ampere menjadi 21  $\mu\text{m}$ .
3. Jumlah butir yang semakin banyak pada *heat affected zone* dan *weld metal* hasil GMAW AA 6061 T6511 mengakibatkan area batas butir semakin luas sehingga semakin banyak terjadi mekanisme *pile up* atau penumpukan dislokasi pada batas butir akibatnya AA 6061 T6511 dan *weld bead* menjadi semakin keras.

#### SARAN

Beberapa saran yang dapat diberikan oleh penulis dari hasil penelitian ini antara lain:

1. Dalam pengujian struktur mikro hendaknya menggunakan *scanning electron microscope* (SEM) untuk mendapatkan data yang akurat dan tepat tentang presipitat AA 6061 T6511.
2. Untuk perkembangan penelitian selanjutnya, penulis menyarankan untuk diadakan penelitian lanjutan dari data hasil penelitian yang menyangkut sifat mekanis lainnya, seperti uji ketangguhan bahan (*impact*), uji kelelahan (*fatigue*), dan uji kepecahan (*fracture test*).
3. Sebaiknya dilakukan pengujian radiografi untuk mengetahui adanya cacat internal pada proses *gas metal arc welding* (GMAW).

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Pimpinan PT Penataran Angkatan Laut (PAL) yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk mendapatkan AA 6061 T6511.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sunaryo, H. 2008. *Teknik Pengelasan Kapal Jilid II*. Jakarta: Pusat Perbukuan Departemen Pendidikan Nasional.
- [2] Wiryo Sumarto, H & Okumura, T. 1996. *Teknologi Pengelasan Logam*. Jakarta: PT Pradnya Paramita.
- [3] Prasetyo, B. D. 2006. *Studi Variasi Pengelasan Ulang Terhadap Cacat Las dan Kekerasan Material Aluminium 5083*. Jurnal ITS. Surabaya: ITS.
- [4] Tranggono, A. C. 2009. *Analisis Pengaruh Pengelasan Ulang Gas Metal Arc Welding (GMAW) Terhadap Sifat Mekanik, Struktur Mikro dan Ketahanan Korosinya*. Jurnal ITS. Surabaya: ITS.
- [5] Mirihanage, W. 2004. *Modification Of Al 6061 Weld Joint Characteristics*. Moratuwa: Department of Materials Engineering, University of Moratuwa Sri Lanka.
- [6] Suherman, W. 1988. *Pengetahuan Bahan*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [7] Budi, S. G. K. 2009. *Analisa Pengaruh Variasi Kuat Arus Hasil Pengelasan Tungsten Inert Gas (TIG) pada Paduan Aluminium 5083 terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro*. Tidak Dipublikasikan. Skripsi. Jember: Jurusan Teknik Mesin Strata Satu Fakultas Teknik Universitas Jember.
- [8] Triawan, Y. I. 2010. *Analisis Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Paduan Al 5083 pada Hasil Pengelasan Metal Inert Gas (MIG) terhadap Pengaruh Variasi Preheat dan Post Heat*. Tidak Dipublikasikan. Skripsi. Jember: Jurusan Teknik Mesin Strata Satu Fakultas Teknik Universitas Jember.
- [9] Nafiyanto, A. V. 2009. *Analisa Perbandingan Kualitas Hasil Pengelasan dan Struktur Mikro Material Aluminium 5083 dan 6082 Menggunakan Metode Pengelasan GMAW dan GTAW*. Tidak Dipublikasikan. Skripsi. Surabaya: Jurusan Teknik Perkapalan Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [10] ASM Handbook. 1992. *Volume 9: Metallography and Microstructure*. Untited State Of America.
- [11] Murtiono, A. 2012. *Pengaruh Quenching dan Tempering terhadap Kekerasan dan Kekuatan Tarik serta Struktur Mikro Baja Karbon Sedang untuk Mata Pisau Pemanen Sawit*. Tidak Dipublikasikan. Skripsi. Medan: Jurusan Teknik Mesin Strata Satu Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara.