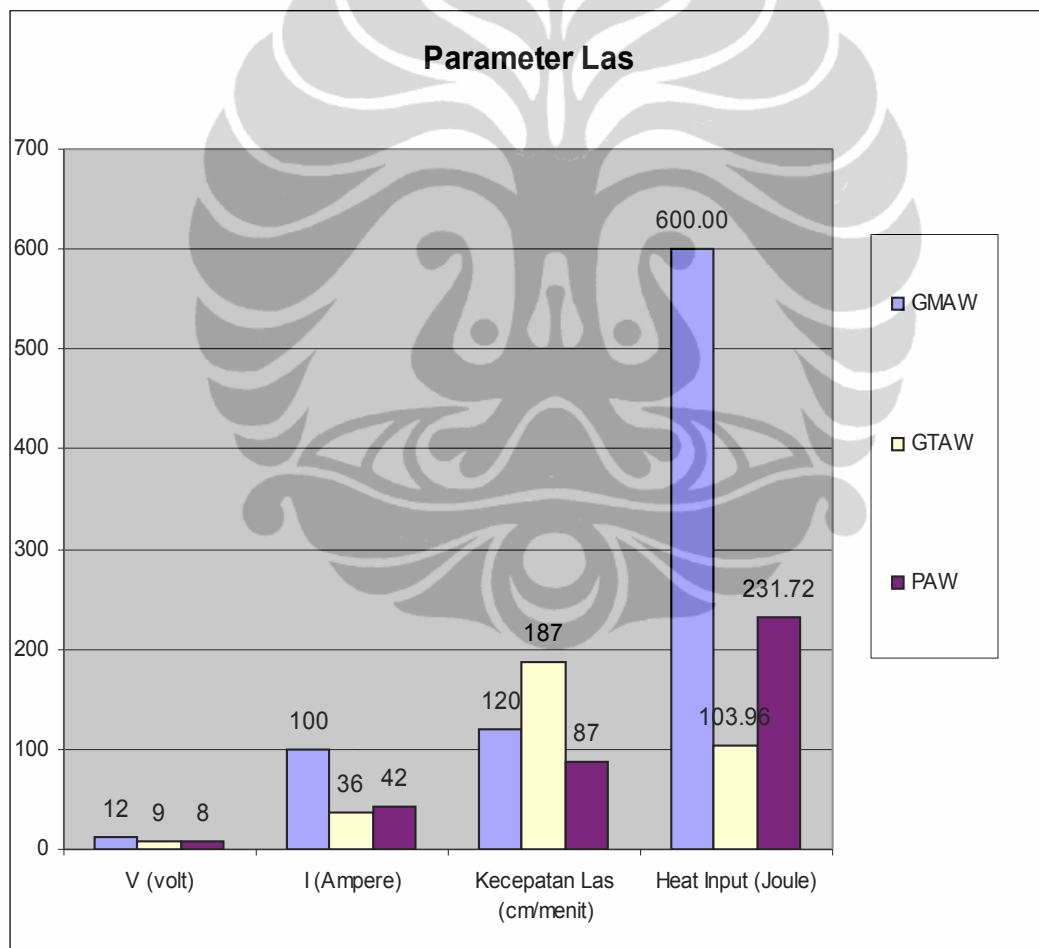


BAB 4

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 PARAMETER PENGELASAN

Parameter pengelasan yang dilakukan pada penelitian ini dapat dilihat lebih lengkap pada Lampiran 3. Dari data tersebut, dapat dibuat grafik perbandingan antara ketiga proses pengelasan tersebut, yang ditunjukkan oleh Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Grafik parameter pengelasan dari proses *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW), dan *Plasma Arc Welding* (PAW) pada Baja Lembaran Setebal 1mm Berlapis Seng

Dari grafik tersebut secara umum terlihat bahwa nilai *Heat Input* atau energi panas dari proses pengelasan yang dihasilkan oleh proses *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) adalah yang terbesar, sekitar 600 Joule, sementara yang terkecil dihasilkan oleh proses *Plasma Arc Welding* (PAW), sekitar 231,72 Joule.

Besarnya tegangan dan arus listrik pada semua metode pengelasan pada umumnya harus diimbangi oleh kecepatan las yang juga tinggi. Hal ini dilakukan untuk mencegah rusak atau bolongnya sampel baja lembaran yang dilas karena terlalu tipis.

Besarnya nilai *Heat Input* akan berbanding lurus terhadap besarnya daerah *Heat Affected Zone* (HAZ) yang terbentuk. Hal ini berlaku pada proses pengelasan yang dilakukan dengan metode *Gas Metal Arc Welding*, *Gas Tungsten Arc Welding*, dan *Plasma Arc Welding* pada penelitian ini. Hal ini akan dibahas lebih mendalam pada sub-bab 4.4.

4.2 PENGAMATAN VISUAL

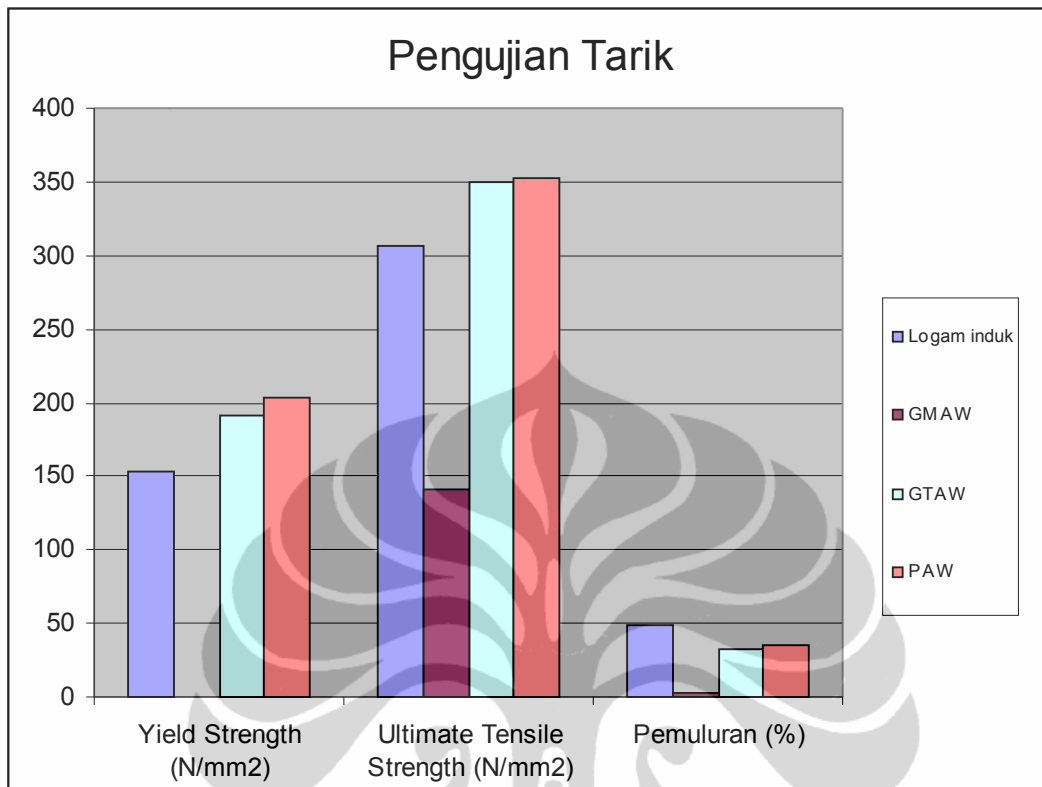
Data pengamatan visual sampel hasil pengelasan dalam penelitian ini berupa foto-foto ditunjukkan oleh Lampiran 4.

Hasil pengelasan dari sampel baja lembaran yang dihasilkan oleh metode *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) dan *Plasma Arc Welding* (PAW) secara umum adalah baik. Tidak ditemukan adanya pelendutan (*bending*) pada semua sampel. Hal ini disebabkan karena operator las yang melakukan serangkaian percobaan tersebut sudah profesional di bidangnya.

Secara kasat mata, yang terlihat adalah perbedaan daerah lapisan seng yang menguap ataupun rusak oleh pengaruh panas las. Hal ini akan dibahas pada sub-bab 4.6.

4.3 PENGUJIAN TARIK

Data hasil pengujian tarik berupa grafik batang dari penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 4.2. Dokumen lengkapnya dihadirkan pada Lampiran 5.



Gambar 4.2. Grafik Hasil Penguujian Tarik Pengelasan *Gas Metal Arc Welding*, *Gas Tungsten Arc Welding*, dan *Plasma Arc Welding* pada Baja Lembaran Setebal 1mm Berlapis Seng

Secara umum, proses pengelasan bertujuan untuk menghasilkan sambungan yang kekuatannya lebih baik daripada logam induknya. Hal ini dimungkinkan bila proses pengelasan dilakukan dengan memakai logam *filler* yang kekuatannya lebih tinggi daripada logam induknya. Penelitian ini menggunakan kawat las berstandar las berstandar AWS/ASME - SFA A5.18 : ER70S-6. Material kawat las tersebut memiliki kekuatan *yield strength* sebesar 410 MPa dan *ultimate tensile strength* 525 MPa, sementara logam induknya sendiri memiliki kekuatan *yield strength* sebesar 153 MPa dan *ultimate tensile strength* 306 MPa. Besaran dari nilai ini dapat dilihat pada Lampiran 1 dan Lampiran 2.

Dari Gambar 4.2 terlihat bahwa hasil pengelasan dengan metode *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) dan *Plasma Arc Welding* (PAW) memiliki nilai *yield strength* dan *ultimate tensile strength* yang lebih besar daripada logam induknya. Hal ini dibuktikan dengan perpatahan yang terjadi di daerah logam induk dan bukan di sambungan. Hal ini berbeda dengan metode *Gas Metal Arc*

Welding (GMAW), di mana *ultimate tensile strength* berada di bawah logam induk-nya. Bahkan sampel hasil pengelasannya tidak mengalami *yield*. Hal ini disebabkan karena terjadinya penggetasan di daerah HAZ sambungannya.

4.4 PENGAMATAN STRUKTUR BUTIR

4.4.1 Pengamatan Secara Makro

Pengamatan struktur butir secara makro dari material sampel yang dilas dengan metode *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) dan *Plasma Arc Welding* (PAW) ditunjukkan oleh Gambar 4.3, Gambar 4.4 dan Gambar 4.5. Lebar dari daerah HAZ (*Heat Affected Zone*) dari ketiga metode pengelasan tersebut disajikan pada Tabel 4.1.



Gambar 4.3. Struktur makro hasil las *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) pada baja lembaran setebal 1mm berlapis seng, pembesaran 7x, dengan etsa Nital 3%



Gambar 4.4. Struktur makro hasil las *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) pada baja lembaran setebal 1mm berlapis seng, pembesaran 7x, dengan etsa Nital 3%



Gambar 4.5. Struktur makro hasil las *Plasma Arc Welding* (PAW) pada baja lembaran setebal 1mm berlapis seng, pembesaran 7x, dengan etsa Nital 3%

Tabel 4.1. Lebar Daerah HAZ (*Heat Affected Zone*) Hasil Pengelasan *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW), dan *Plasma Arc Welding* (PAW) pada Baja Lembaran Setebal 1mm Berlapis Seng

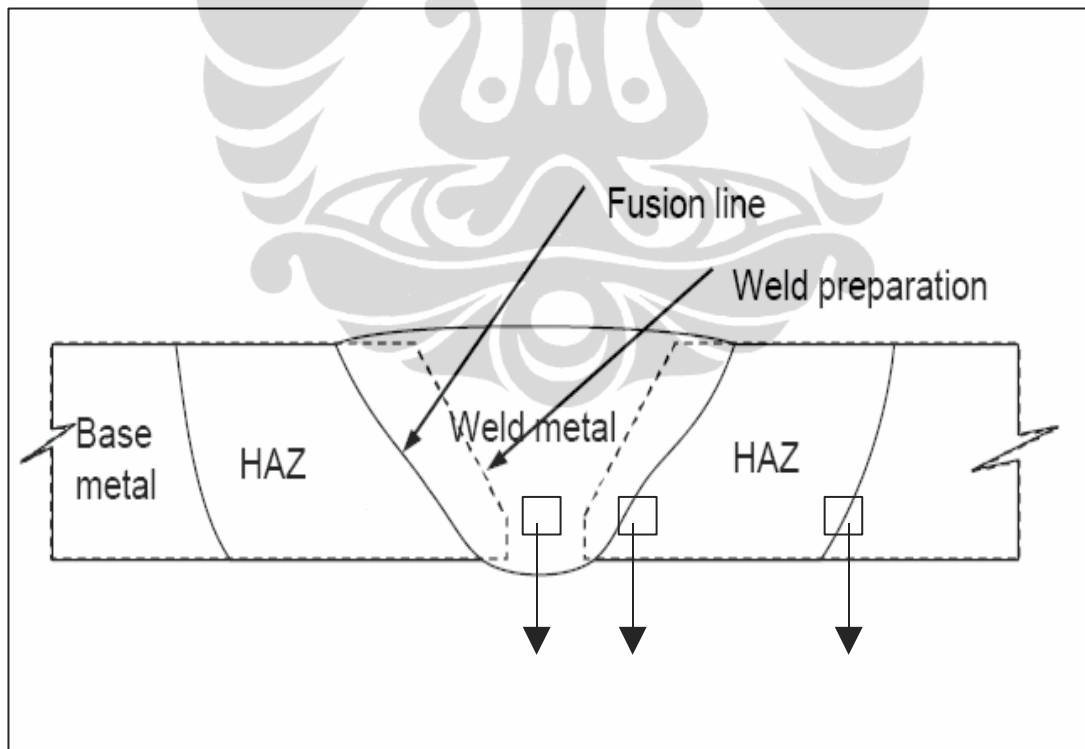
Metode Pengelasan	Lebar Daerah HAZ (mm)	Lebar Rata-rata Daerah HAZ (mm)
Gas Metal Arc Welding (GMAW)	5,127	5,241
	5,375	
	5,221	
Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)	4,691	4,632
	4,617	
	4,589	
Plasma Arc Welding (PAW)	4,105	4,225
	4,189	
	4,381	

Lebarnya daerah HAZ yang terbentuk oleh proses pengelasan sangat bergantung dari besarnya *Heat Input* atau panas yang diberikan dan bentuk dari busur pengelasan selama proses pengelasan berlangsung dan karakteristik dari busur las yang terjadi selama proses.

Pada penelitian ini, lebar daerah HAZ terbesar didapatkan dari proses pengelasan GMAW, sebagai akibat dari besarnya *heat input* yang terjadi selama proses pengelasan dan lebarnya busur las yang dihasilkan. Sementara lebar daerah HAZ tersempit dihasilkan oleh proses pengelasan PAW. Hal ini selain disebabkan karena kecilnya *heat input* yang terjadi, juga disebabkan oleh karakteristik busur las yang dihasilkan dari metode pengelasan PAW paling terfokus dan menyempit, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.11⁽²⁾.

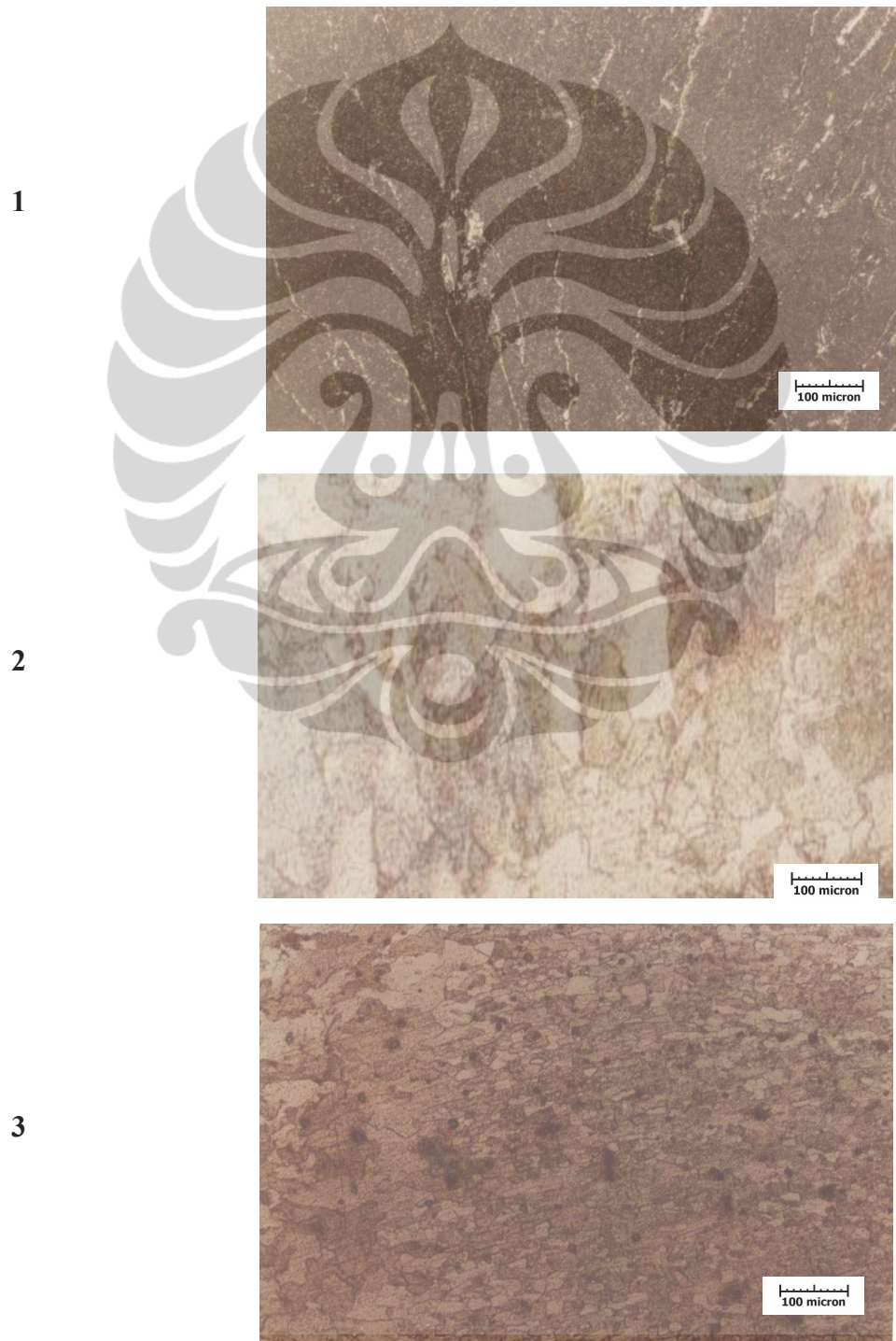
4.4.2 Pengamatan Secara Mikro

Pengamatan struktur butir logam hasil proses pengelasan dapat dibagi menjadi tiga daerah utama, yaitu daerah mencair (*fusion zone*), daerah terpengaruh panas (*Heat Affected Zone* atau HAZ) dan daerah logam dasar (*base metal zone*). Gambar 4.6 menunjukkan secara skematis letak dari ketiga daerah ini beserta bagian-bagian yang akan diambil untuk diamati struktur mikro-nya.



Gambar 4.6. Skema letak daerah (*fusion zone*), daerah terpengaruh panas (*Heat Affected Zone*) dan daerah logam dasar (*base metal zone*) beserta bagian yang akan diamati secara mikro (bagian 1, 2 dan 3)

Pengamatan struktur butir mikro pada tiga daerah utama ditunjukkan oleh Gambar 4.7, Gambar 4.8 dan Gambar 4.9. Ukuran besar butir yang dihasilkan di ketiga daerah tersebut disajikan pada Tabel 4.2.

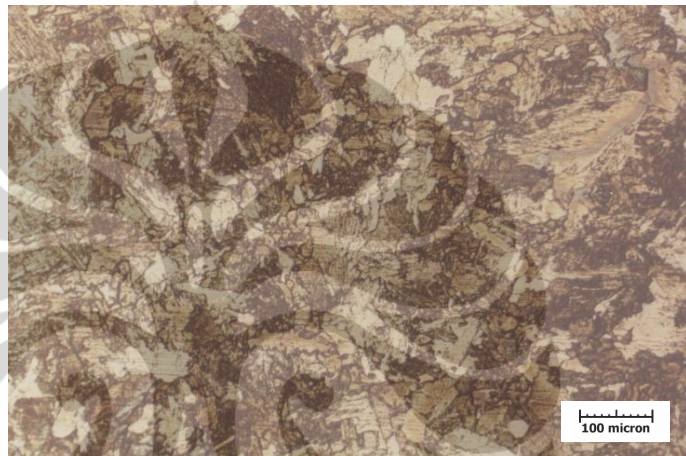


Keterangan:

- 1. Daerah mencair (fusion zone)*
- 2. Daerah mencair (fusion zone) & HAZ*
- 3. Daerah HAZ & Logam Dasar (base metal)*

Gambar 4.7. Struktur mikro hasil las *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) pada baja lembaran setebal 1mm berlapis seng, pembesaran 100x, etsa Nital 3%

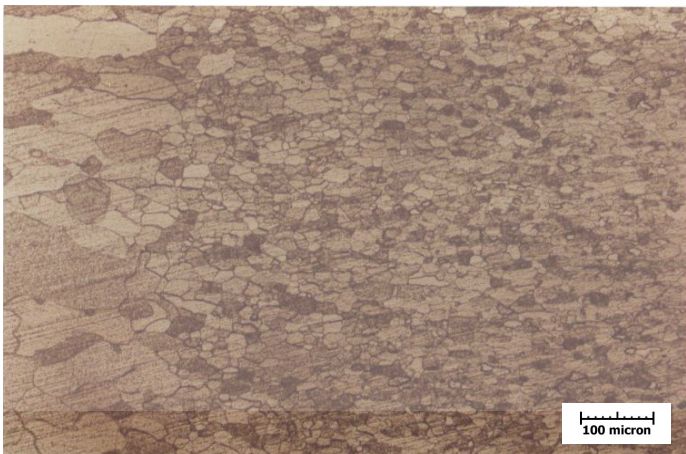
1



2



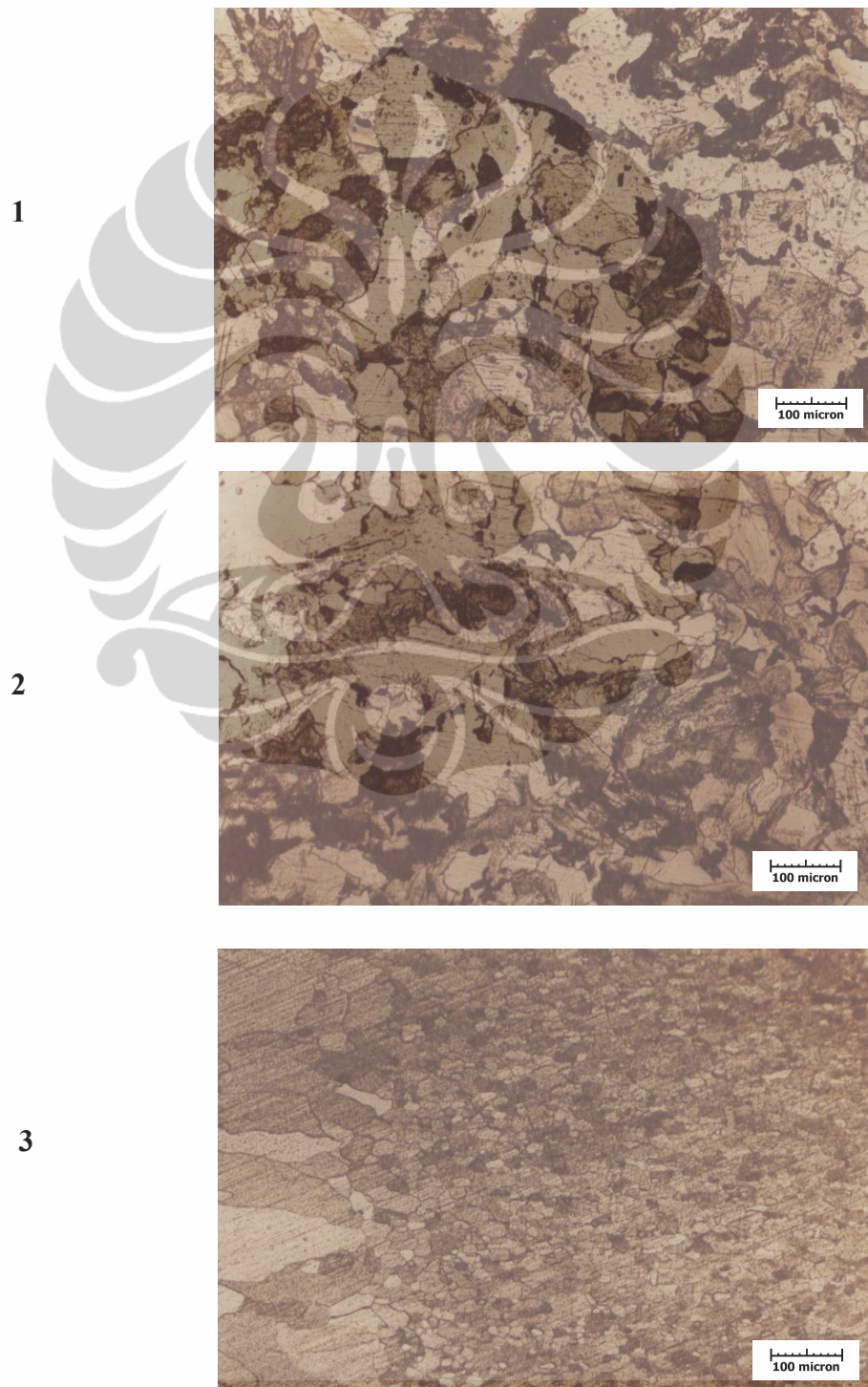
3



Keterangan:

- 1. Daerah mencair (fusion zone)*
- 2. Daerah mencair (fusion zone) & HAZ*
- 3. Daerah HAZ & Logam Dasar (base metal)*

Gambar 4.8. Struktur mikro hasil las *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) pada baja lembaran setebal 1mm berlapis seng, pembesaran 100x, etsa Nital 3%



Keterangan:

1. Daerah mencair (*fusion zone*)
2. Daerah mencair (*fusion zone*) & HAZ
3. Daerah HAZ & Logam Dasar (*base metal*)

Gambar 4.9. Struktur mikro hasil las *Plasma Arc Welding* (PAW) pada baja lembaran setebal 1mm berlapis seng, pembesaran 100x, etsa Nital 3%

Pada daerah mencair (*fusion zone*), struktur fasa yang terbentuk umumnya adalah struktur ferit proeutektoid, ferit asikular (dari austenit sisa), perlit dan bainit. Semakin cepat laju pembekuan, semakin banyak ferit asikular yang terbentuk dan semakin halus ukuran feritnya. Struktur ferit yang mengelilingi butir-butir perlit dan berbentuk plat atau jarum yang halus disebut struktur *Widmanstatten*. Struktur *Widmanstatten* ini memiliki keuletan yang lebih rendah dari logam dasar dan kekerasan yang sedikit lebih tinggi.⁽¹⁴⁾

Tabel 4.2. Besar Butir di Daerah *fusion zone*, HAZ dan logam induk Hasil Pengelasan *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW), dan *Plasma Arc Welding* (PAW) pada Baja Lembaran Setebal 1mm Berlapis Seng

Metode Pengelasan	Besar Butir Daerah <i>fusion</i>	Besar Butir Daerah HAZ	Besar Butir Daerah Logam Induk
<i>Gas Metal Arc Welding</i> (GMAW)	ASTM G 7 ($32 \pm 3 \mu\text{m}$)	ASTM G 4 ($90 \mu\text{m}$)	ASTM G 7 ($35 \mu\text{m}$)
<i>Gas Tungsten Arc Welding</i> (GTAW)	ASTM G 5 ($60 \pm 10 \mu\text{m}$)	ASTM G 3,7 ($95 \pm 5 \mu\text{m}$)	
<i>Plasma Arc Welding</i> (PAW)	ASTM G 4 ($90 \mu\text{m}$)	ASTM G 4,5 ($90 \pm 10 \mu\text{m}$)	

Besarnya butir dari pengelasan metode GMAW, GTAW dan PAW di daerah *fusion*, HAZ dan logam induk dihitung melalui Metode Intercept (Heyne) dan dibandingkan dengan tabel ASTM E-112. Hasilnya disajikan pada Tabel 4.2.

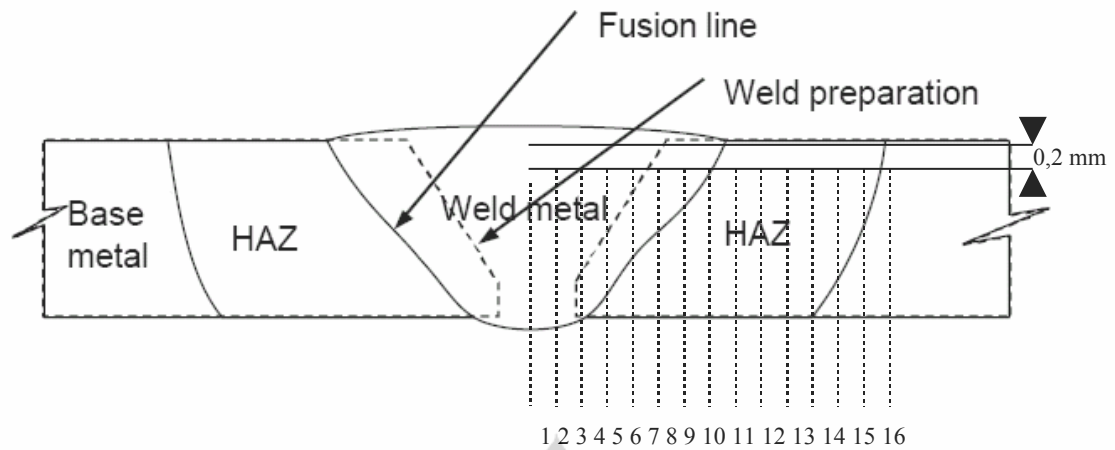
Dari tabel tersebut terlihat bahwa pada ketiga metode pengelasan akan menghasilkan penghalusan ukuran di daerah *fusion* dan diikuti dengan pembesaran butir kembali di daerah HAZ sampai ke arah logam induknya ⁽⁸⁾.

Perbedaan ukuran butir di daerah *fusion zone* dan HAZ pada sampel hasil pengelasan metode GMAW terlihat sangat besar, yaitu dari diameter 32 μm menjadi ke 90 μm . Hal ini diakibatkan karena besarnya *heat input* yang dihasilkan oleh proses GMAW bila dibandingkan dengan metode GTAW dan PAW di daerah *fusion zone*, sehingga pada suhu yang tinggi pada saat melebur akan diikuti oleh pendinginan yang sangat cepat. Akibatnya struktur butirnya tidak sempat mengalami pertumbuhan dan ukurannya menjadi sangat halus bila dibandingkan dengan metode GTAW dan PAW.

Perbedaan ukuran butir yang sangat besar antara daerah *fusion zone*, daerah HAZ dan logam induk pada pengelasan metode GMAW akan menghasilkan nilai kekuatan yang sangat berbeda pada ketiga daerah tersebut. Akibatnya, terjadilah perpatahan pada batas daerah *fusion zone* dan HAZ pada pengelasan GMAW, seperti yang ditunjukkan oleh Sub Bab 4.3 : Pengujian Tarik dan Sub Bab 4.7 : Pengujian Tekuk.

4.5 PENGUJIAN KEKERASAN MIKRO

Skema dari pengujian kekerasan pada material sampel yang dilas dengan metode *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) dan *Plasma Arc Welding* (PAW) ditunjukkan oleh Gambar 4.10, sementara hasilnya disajikan pada Tabel 4.3, Tabel 4.4 dan Tabel 4.5. Grafik hubungan antara jarak pengujian dari sumbu *fusion zone* dengan nilai kekerasan ditunjukkan oleh Gambar 4.11.



Gambar 4.10. Skema lokasi pengujian kekerasan

Tabel 4.3. Data Hasil Uji Kekerasan Hasil Pengelasan *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), pada Baja Lembaran Setebal 1mm Berlapis Seng

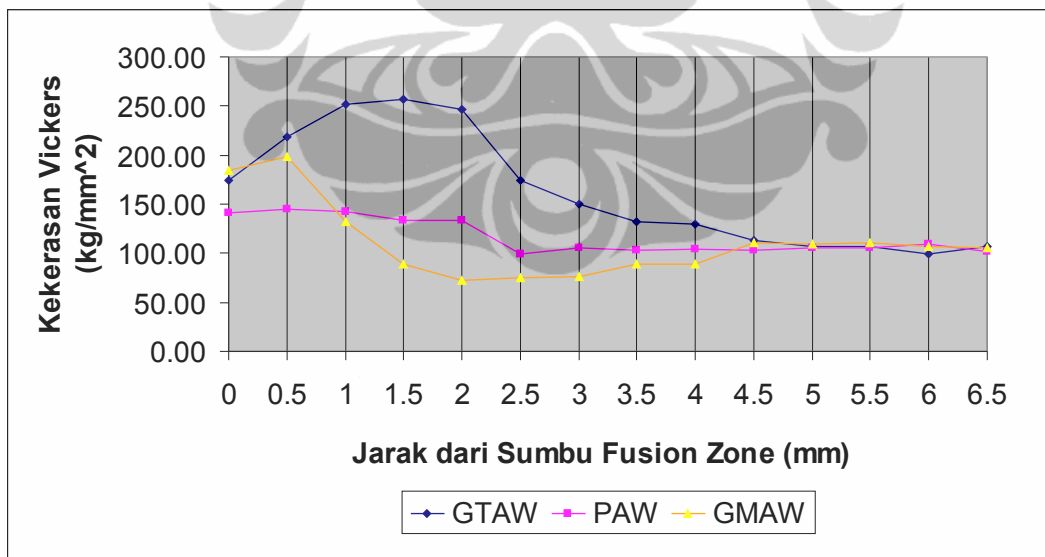
Jarak Uji (mm)	d (μm)	VHN (kg / mm^2)	Lokasi
0	55	183	<i>fusion zone</i>
0,5	55	198	<i>fusion zone</i>
1	66	131	<i>fusion zone</i>
1,5	77	89	<i>HAZ</i>
2	90	72	<i>HAZ</i>
2,5	84	75	<i>HAZ</i>
3	84	76	<i>HAZ</i>
3,5	80	89	<i>HAZ</i>
4	79	89	<i>HAZ</i>
4,5	71	110	<i>HAZ</i>
5	71	108	<i>Base Metal</i>
5,5	70	110	<i>Base Metal</i>
6	71	107	<i>Base Metal</i>
6,5	72	105	<i>Base Metal</i>

Tabel 4.4. Data Hasil Uji Kekerasan Hasil Pengelasan *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW), pada Baja Lembaran Setebal 1mm Berlapis Seng

Jarak Uji (mm)	d (μm)	VHN (kg / mm ²)	Lokasi
0	54	174	<i>fusion zone</i>
0,5	47	219	<i>fusion zone</i>
1	46	251	<i>fusion zone</i>
1,5	47	257	<i>fusion zone</i>
2	49	246	<i>fusion zone</i>
2,5	58	174	<i>HAZ</i>
3	60	149	<i>HAZ</i>
3,5	65	131	<i>HAZ</i>
4	62	130	<i>HAZ</i>
4,5	71	113	<i>HAZ</i>
5	72	107	<i>Base Metal</i>
5,5	72	107	<i>Base Metal</i>
6	75	98	<i>Base Metal</i>
6,5	72	107	<i>Base Metal</i>

Tabel 4.5. Data Hasil Uji Kekerasan Hasil Pengelasan *Plasma Arc Welding* (PAW), pada Baja Lembaran Setebal 1mm Berlapis Seng

Jarak Uji (mm)	d (μm)	VHN (kg / mm^2)	Lokasi
0	68	141	<i>fusion zone</i>
0,5	63	144	<i>fusion zone</i>
1	63	142	<i>fusion zone</i>
1,5	65	133	<i>fusion zone</i>
2	64	133	<i>HAZ</i>
2,5	74	98	<i>HAZ</i>
3	74	105	<i>HAZ</i>
3,5	75	103	<i>HAZ</i>
4	75	104	<i>HAZ</i>
4,5	75	103	<i>Base Metal</i>
5	74	105	<i>Base Metal</i>
5,5	73	105	<i>Base Metal</i>
6	72	108	<i>Base Metal</i>
6,5	76	101	<i>Base Metal</i>



Gambar 4.11. Grafik hubungan antara jarak dengan nilai kekerasan pada baja lembaran setebal 1 mm lapis seng yang dilas dengan metode *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) dan *Plasma Arc Welding* (PAW)

Secara umum daerah *fusion zone* memiliki tingkat kekerasan yang paling tinggi dibandingkan dengan daerah *Heat Affected Zone* (HAZ), baik itu dengan metode pengelasan *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) maupun *Plasma Arc Welding* (PAW). Hal ini disebabkan karena pada daerah ini terjadi proses peleburan yang dilanjutkan dengan proses pendinginan secara cepat, sehingga dihasilkan struktur butir yang relatif lebih halus dan berkekuatan lebih tinggi dibandingkan dengan daerah HAZ. Peristiwa pelarutan lapisan seng dari permukaan sampel ke dalam daerah *fusion zone* dan membentuk persenyawaan intermetalik juga memiliki peran untuk meningkatkan kekerasan pada daerah ini ⁽⁸⁾.

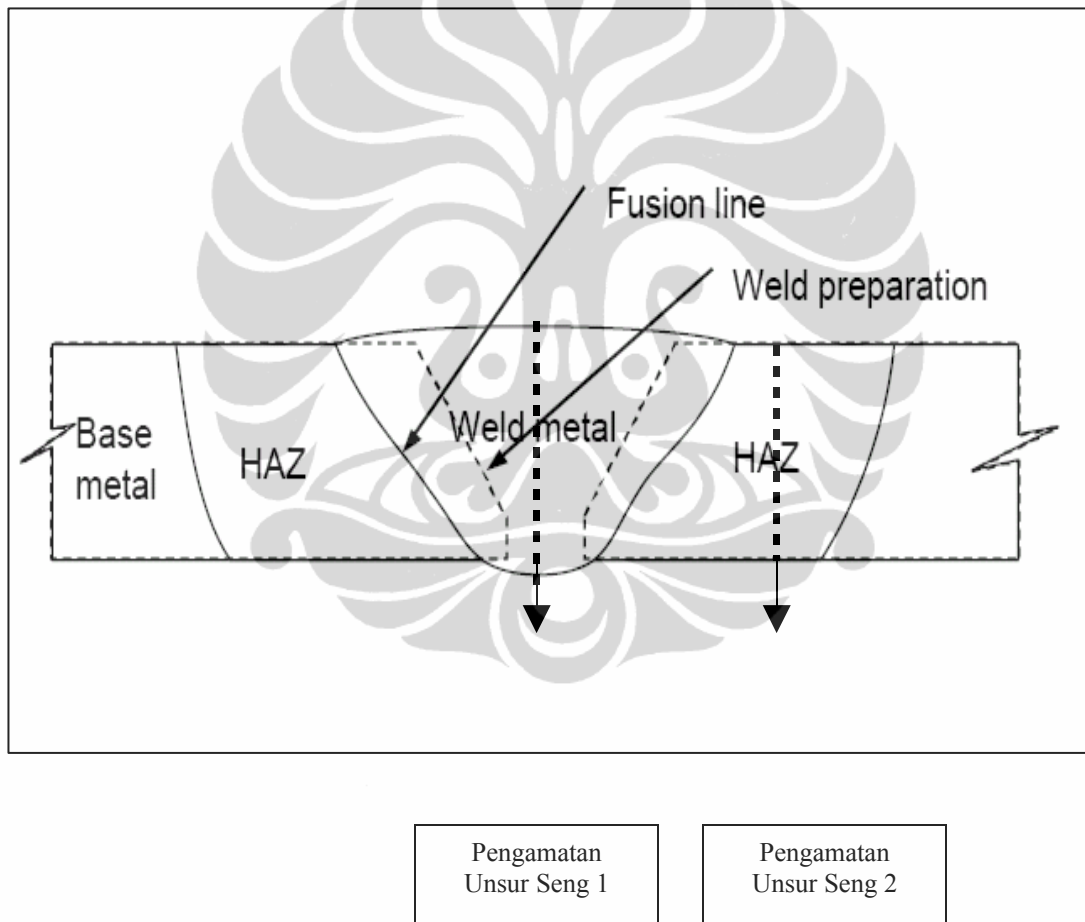
Nilai kekerasan yang paling tinggi pada daerah *fusion zone* diperoleh dari sampel hasil pengelasan dengan metode GTAW, diikuti dengan GMAW dan PAW. Hal ini disebabkan karena perbedaan struktur ferit yang dihasilkan, yaitu ferit yang lebih kasar pada metode GTAW, ferit yang berbentuk jarum-jarum halus pada metode GMAW, dan ferit yang relatif bulat pada metode PAW. Pada ketiga sampel juga ditemukan adanya pelarutan logam seng ke dalam *fusion zone*, sehingga membentuk senyawaan intermetalik dengan nilai kekerasan yang tinggi, bahkan sampai sekitar 251 VHN pada sampel pengelasan dengan metode GTAW.

Pada daerah HAZ, nilai kekerasan yang dihasilkan mengalami penurunan akibat adanya peristiwa rekristalisasi yang menghasilkan butiran yang lebih seragam dan teratur. Metode pengelasan dengan GTAW tetap memiliki nilai kekerasan yang paling tinggi dibandingkan dengan metode GMAW dan PAW.

Perbedaan nilai kekerasan yang sangat jauh di daerah *fusion zone*, yaitu 198 VHN, dan daerah HAZ, yaitu 89 VHN, pada metode pengelasan GMAW, akan menyebabkan kegagalan pada batas kedua daerah ini bila diberikan beban mekanis. Pembahasan lebih mendalam antara ukuran butir yang dihasilkan dari ketiga proses pengelasan dan sifat mekanisnya dibahas pada sub sub-bab 4.4.2.

4.6 PENGAMATAN UNSUR SENG

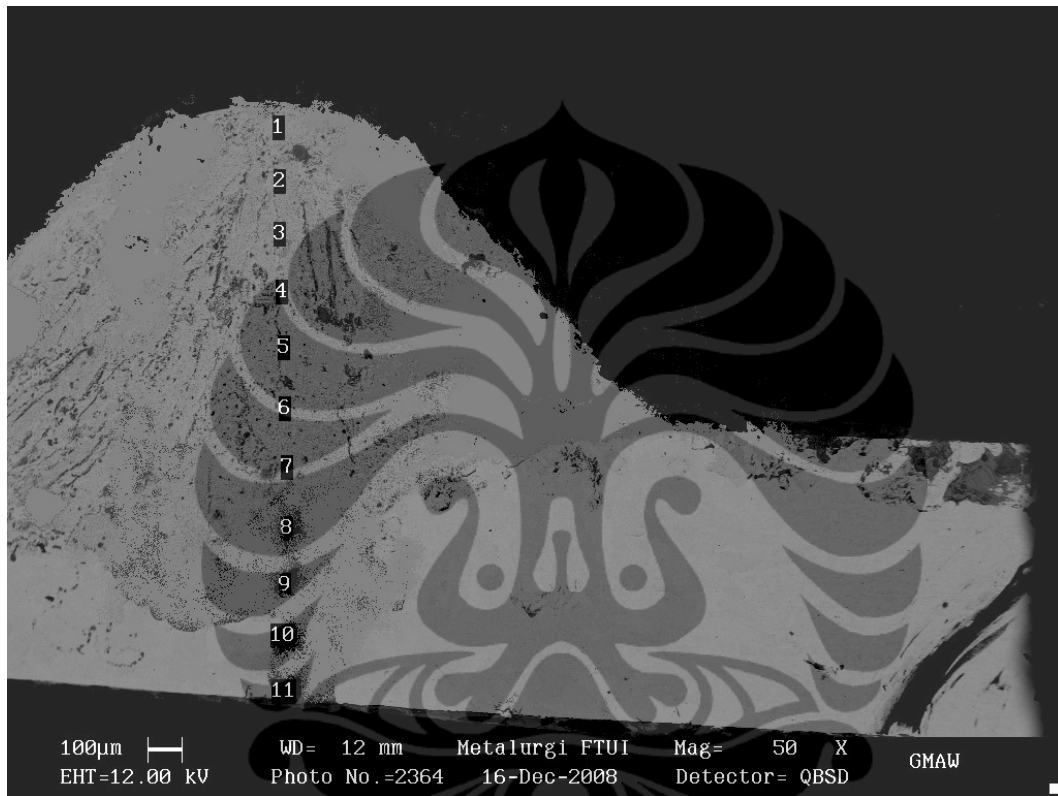
Pengamatan penyebaran unsur seng pada sampel hasil proses pengelasan pada penelitian ini dibagi menjadi 2 bagian utama, yaitu daerah mencair (*fusion zone*) dan daerah terpengaruh panas (*Heat Affected Zone* atau HAZ). Gambar 4.12 menunjukkan secara skematis letak dari kedua daerah ini beserta bagian-bagian yang akan diamati kondisi lapis sengnya. Persentase kadar unsur seng yang melebur ataupun berdifusi ke dalam sampel hasil proses pengelasan diamati secara melintang dari lapisan paling atas ke bawah dari kedua daerah tersebut dengan alat *Electron Scanning Microscope* (SEM). Data lengkap dari hasil pengujian dengan SEM dapat dilihat pada Lampiran 6 dan Lampiran 7.



Gambar 4.12. Skema letak daerah (*fusion zone*) dan daerah terpengaruh panas (*Heat Affected Zone*) yang diamati unsur sengnya

4.6.1 Pengamatan Unsur Seng di Daerah *Fusion Zone*

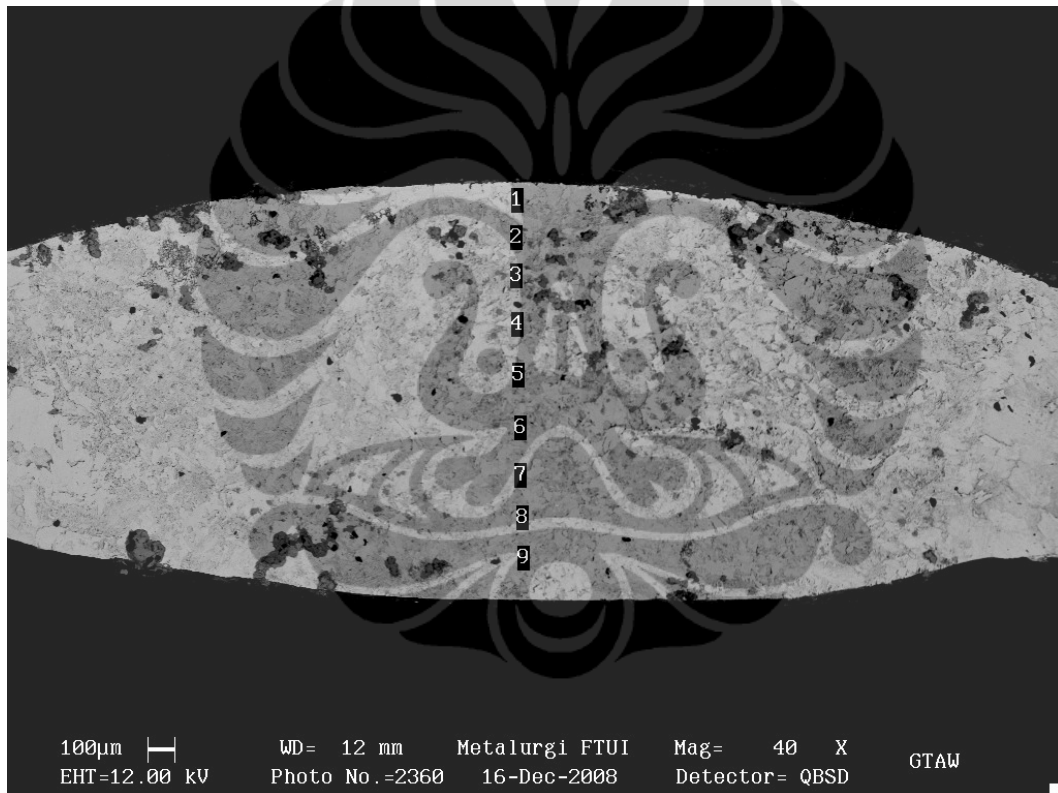
Pengamatan akan ikut meleburnya lapisan seng ke dalam daerah *fusion zone* dari pengelasan dengan metode *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) dan *Plasma Arc Welding* (PAW) pada baja lembaran setebal 1 mm lapis seng beserta nilai kekerasan mikronya disajikan pada Tabel 4.6, Tabel 4.7 dan Tabel 4.8. Gambar penyebaran seng yang terlarut di dalamnya dapat dilihat pada Gambar 4.13, Gambar 4.14 dan Gambar 4.15.



Gambar 4.13. Penyebaran unsur seng di daerah *fusion zone* dari proses pengelasan metode *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) pada baja lembaran setebal 1mm berlapis seng

Tabel 4.6. Persentase Unsur di Daerah *Fusion Zone* dan Nilai Kekerasannya dari Proses Pengelasan Metode *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), pada Baja Lembaran Setebal 1mm Berlapis Seng

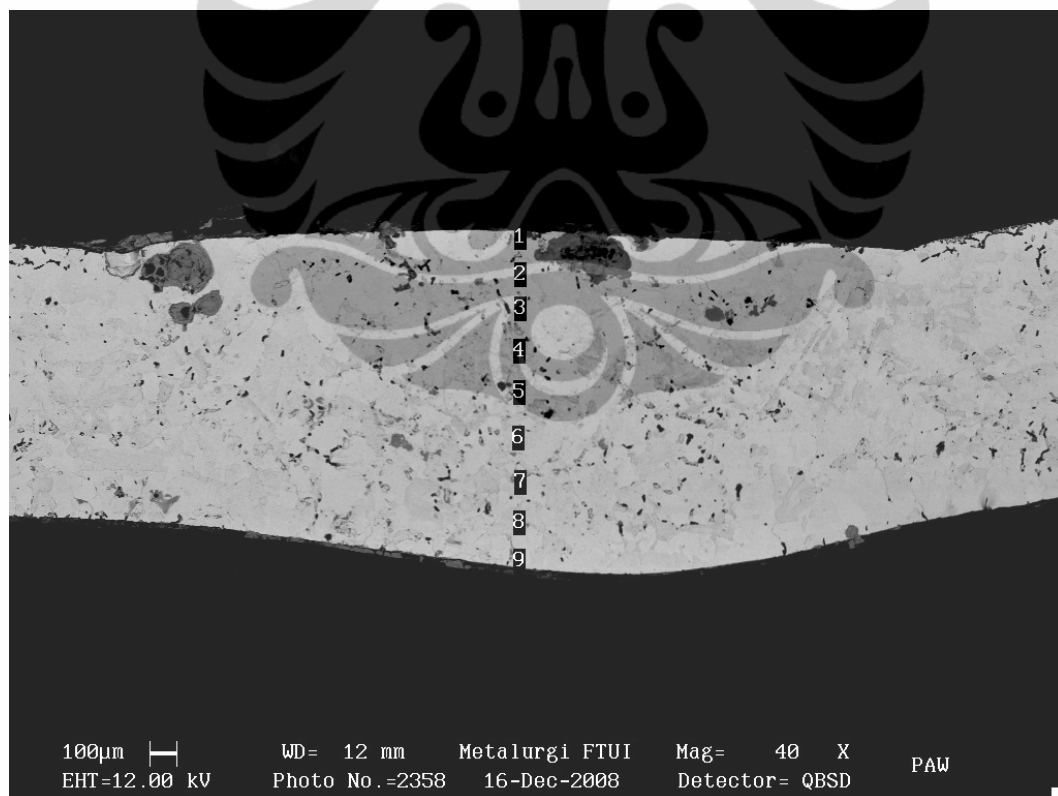
Jarak dari Permukaan Las (μm)	Titik	Zn (%)	Fe (%)	Mol Zn / (Zn + Fe)	Nilai Kekerasan (Vickers)
0	1	20,57	56,08	0,26	263.35
100	2	14,41	53,27	0,20	218.29
200	3	5,58	68,90	0,07	190.81
300	4	2,05	78,97	0,02	180.58
400	5	-	99,31	-	162.54
500	6	-	92,91	-	154.50
600	7	-	96,76	-	151.97
700	8	-	69,44	-	128.16
800	9	-	67,83	-	125.95
900	10	-	99,67	-	118.69
1000	11	-	99,67	-	108.80



Gambar 4.14. Penyebaran unsur seng di daerah *fusion zone* dari proses pengelasan metode *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) pada baja lembaran setebal 1mm berlapis seng

Tabel 4.7. Persentase Unsur di Daerah *Fusion Zone* dan Nilai Kekerasannya dari Proses Pengelasan Metode *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW), pada Baja Lembaran Setebal 1mm Berlapis Seng

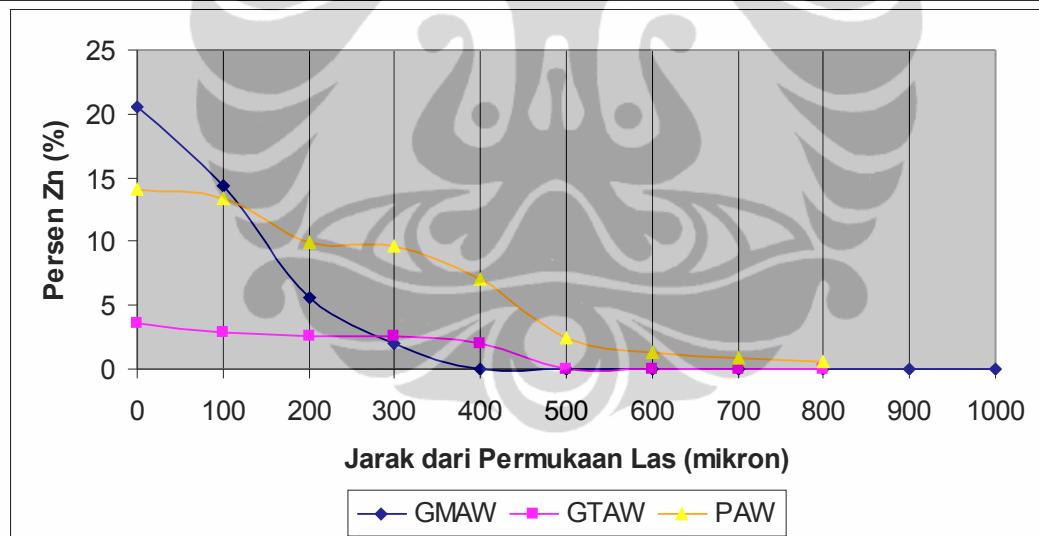
Jarak dari Permukaan Las (μm)	Titik	Zn (%)	Fe (%)	Mol Zn / (Zn + Fe)	Nilai Kekerasan (Vickers)
0	1	3,63	63,75	0,05	171.24
100	2	2,82	62,40	0,04	152.22
200	3	2,56	60,37	0,04	151.97
300	4	2,53	52,47	0,04	171.24
400	5	2,06	69,59	0,02	168.34
500	6	-	98,54	-	133.90
600	7	-	98,14	-	135.82
700	8	-	99,64	-	138.01
800	9	-	99,28	-	127.72



Gambar 4.15. Penyebaran unsur seng di daerah *fusion zone* dari proses pengelasan metode *Plasma Arc Welding* (PAW) pada baja lembaran setebal 1mm berlapis seng

Tabel 4.8. Persentase Unsur di Daerah *Fusion Zone* dan Nilai Kekerasannya dari Proses Pengelasan Metode *Plasma Arc Welding* (PAW), pada Baja Lembaran Setebal 1mm Berlapis Seng

Jarak dari Permukaan Las (μm)	Titik	Zn (%)	Fe (%)	Mol Zn / (Zn + Fe)	Nilai Kekerasan (Vickers)
0	1	14,07	79,41	0,14	141.02
100	2	13,41	78,65	0,14	119.05
200	3	9,88	80,15	0,10	109.06
300	4	9,58	79,63	0,10	110.36
400	5	7,07	68,98	0,09	115.16
500	6	2,51	91,27	0,02	118.85
600	7	1,33	91,00	0,01	115.20
700	8	0,87	95,64	0,00	116.92
800	9	0,60	92,50	0,00	115.30



Gambar 4.16. Grafik hubungan antara kandungan unsur Zn yang melebur dengan jarak dari permukaan las pada baja lembaran setebal 1 mm lapis seng yang dilas dengan metode *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) dan *Plasma Arc Welding* (PAW) di daerah *fusion zone*

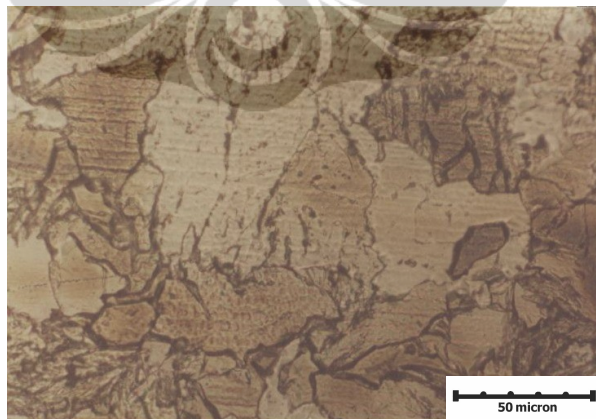
Grafik perbandingan antara hasil pengujian EDS pada sampel yang dihasilkan dari sampel hasil pengelasan dengan metode *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) dan *Plasma Arc Welding* (PAW) di daerah *fusion zone* disajikan pada Gambar 4.16. Dari grafik tersebut

menunjukkan bahwa seng yang berada di lapisan atas dari baja lembaran akan ikut melebur ke dalam daerah *fusion zone* selama proses pengelasan dengan ketiga metode tersebut. Hal ini diakibatkan karena energi panas yang dihasilkan oleh proses pengelasan akan menghasilkan proses meleburnya logam Zn dari lapisan permukaan atas yang kaya akan unsur seng ke bagian dalam sampel yang tidak memiliki unsur seng.

Pada data nilai kekerasan yang disajikan pada Tabel 4.6, Tabel 4.7 dan Tabel 4.8, terlihat bahwa pada daerah *fusion zone* yang mengandung unsur logam seng terlarut akan meningkat nilai kekerasannya menjadi sekitar 200 VHN. Hal ini memang dapat menyebabkan penggetasan pada daerah ini, tetapi hasil analisa metalografi menunjukkan bahwa perbedaan ukuran butir pada batas daerah *fusion zone* dan daerah HAZ-lah yang menyebabkan perpatahan uji tarik sampel pengelasan GMAW. Penjelasan lebih lengkap mengenai hal ini dibahas pada sub-bab 4.4.2.

Endapan fasa-fasa intermetalik yang bersifat getas baru akan terbentuk pada fraksi mol Zn dengan mol Zn dan Fe di atas 0,7. Hal ini tidak terjadi pada unsur seng yang berada di dalam daerah *fusion zone*, di mana besar fraksi molnya hanya berkisar antara 0 sampai dengan 0,6. Sebagai akibatnya, unsur seng akan terlarut sempurna membentuk struktur kristal FCC_A1 dan BCC_A2.⁽¹⁰⁾ Gambar struktur butir di daerah *fusion zone* ditunjukkan oleh Gambar 4.17.

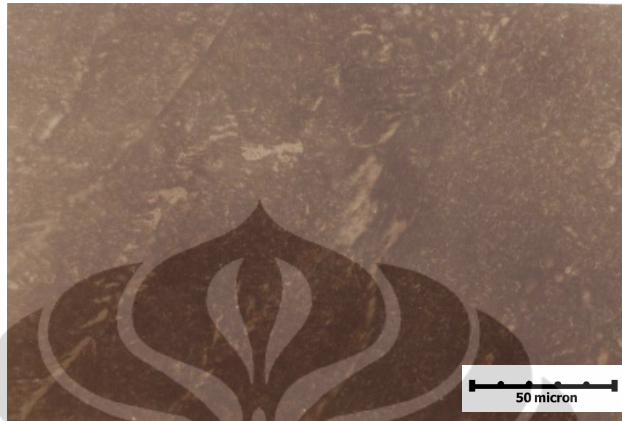
a



b



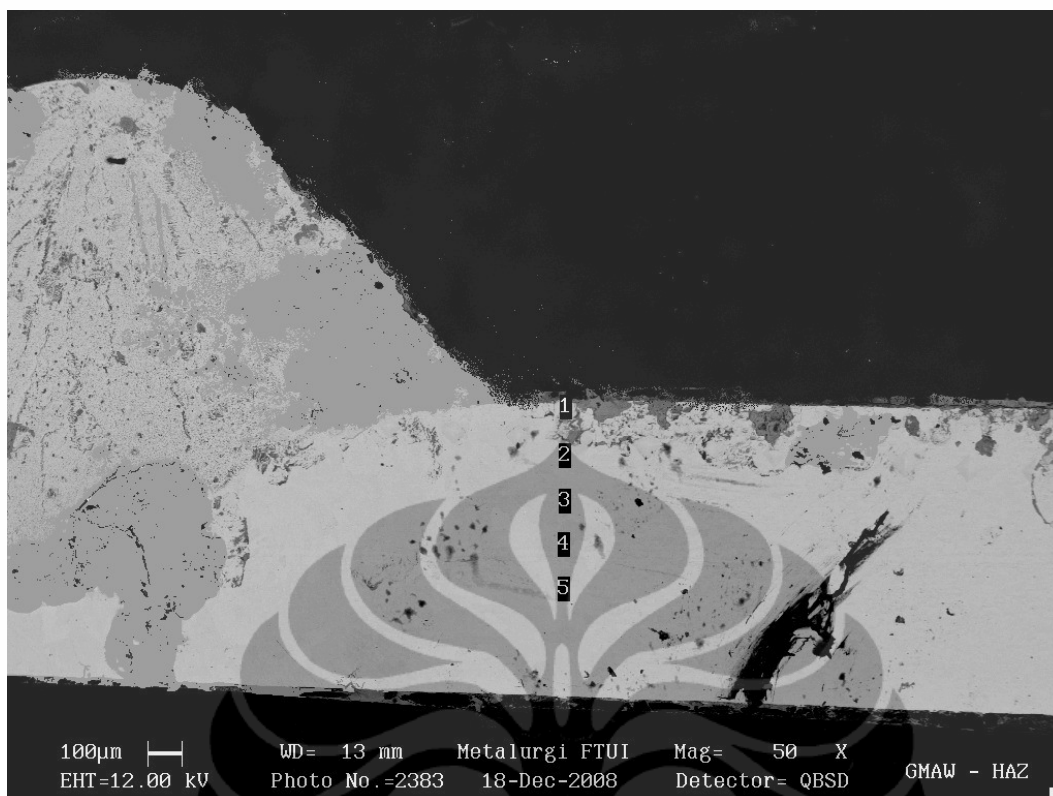
c



Gambar 4.17. Struktur mikro daerah *fusion zone* hasil pengelasan: (a). GMAW, (b). GTAW dan (c) PAW pada baja lembaran setebal 1mm berlapis seng, etsa Nital 3%

4.6.2 Pengamatan Unsur Seng di Daerah *Heat Affected Zone*

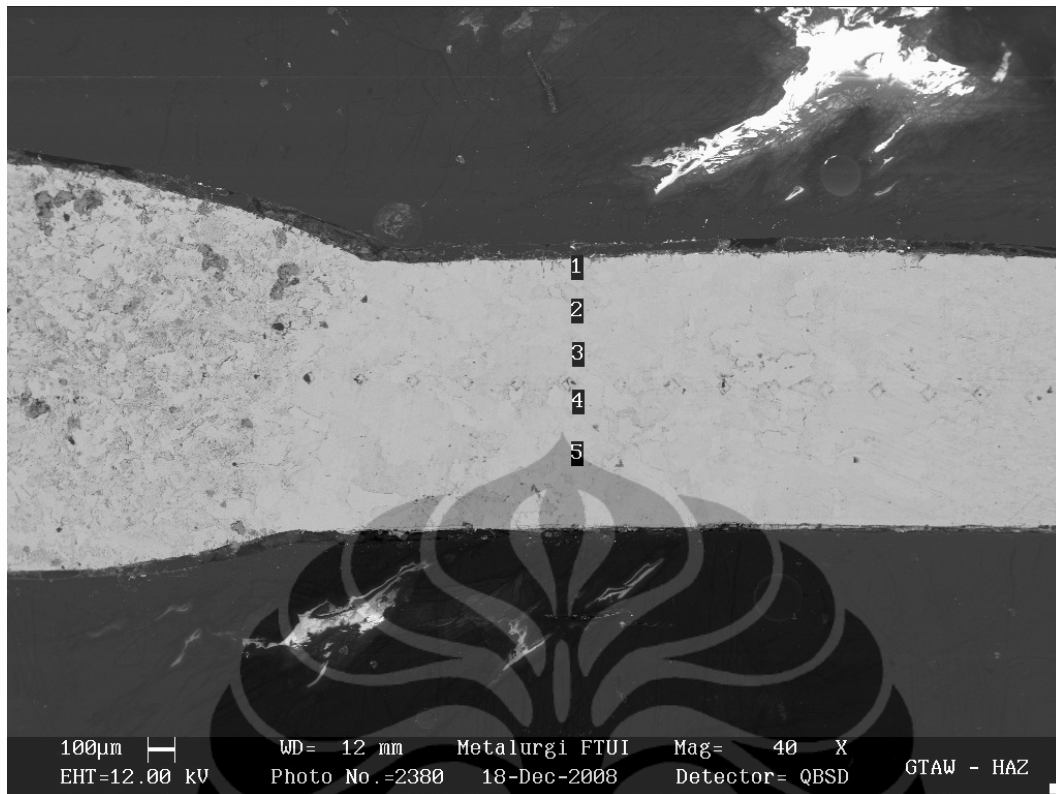
Pengamatan akan lapisan seng yang berdifusi ke dalam daerah *heat affected zone* (HAZ) dari pengelasan dengan metode *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) dan *Plasma Arc Welding* (PAW) pada baja lembaran setebal 1 mm lapis seng disajikan pada Tabel 4.9, Tabel 4.10 dan Tabel 4.11. Gambar difusi unsur seng yang terlarut di dalamnya dapat dilihat pada Gambar 4.18, Gambar 4.19 dan Gambar 4.20.



Gambar 4.18. Difusi unsur seng di daerah HAZ dari proses pengelasan metode *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) pada baja lembaran setebal 1mm berlapis seng

Tabel 4.9. Persentase Unsur di Daerah HAZ dari Proses Pengelasan Metode *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), pada Baja Lembaran Setebal 1mm Berlapis Seng

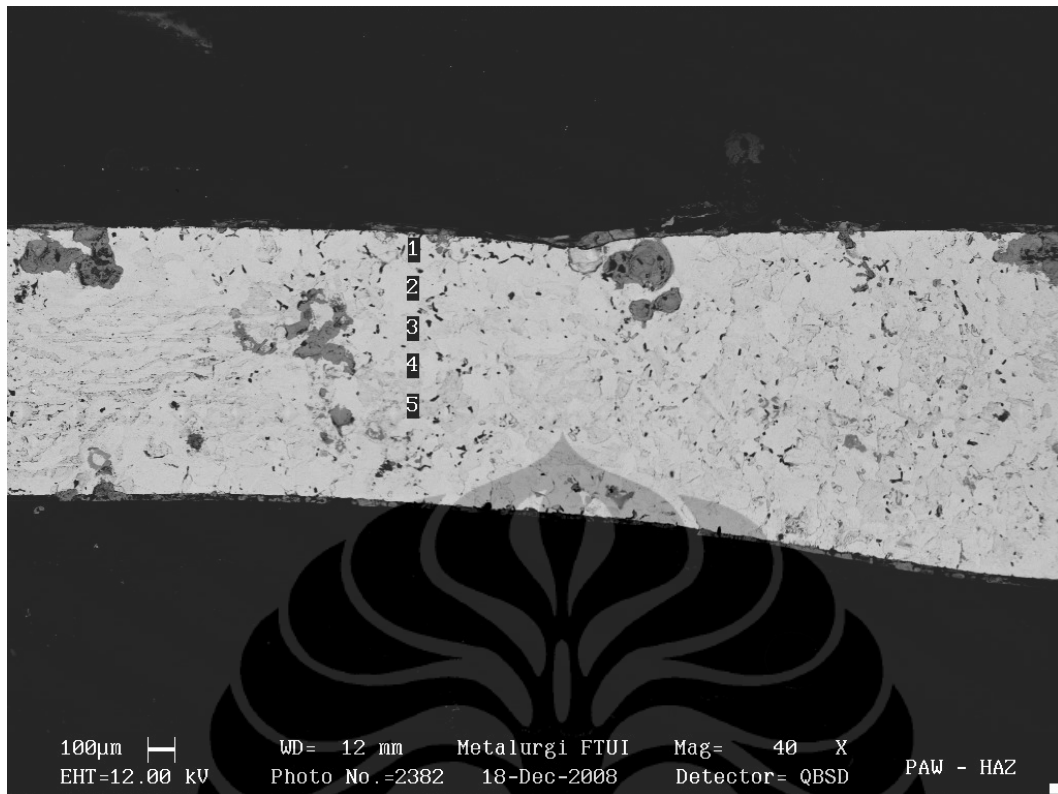
Jarak dari Permukaan Las (µm)	Titik	Zn (%)	Fe (%)	Mol Zn / (Zn + Fe)	Nilai Kekerasan (Vickers)
0	1	14,94	82,13	0,15	152
100	2	-	99,68	-	125
200	3	-	99,53	-	118
300	4	-	99,47	-	115
400	5	-	99,48	-	116



Gambar 4.19. Difusi unsur seng di daerah HAZ dari proses pengelasan metode *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) pada baja lembaran setebal 1mm berlapis seng

Tabel 4.10. Persentase Unsur di Daerah HAZ dari Proses Pengelasan Metode *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW), pada Baja Lembaran Setebal 1mm Berlapis Seng

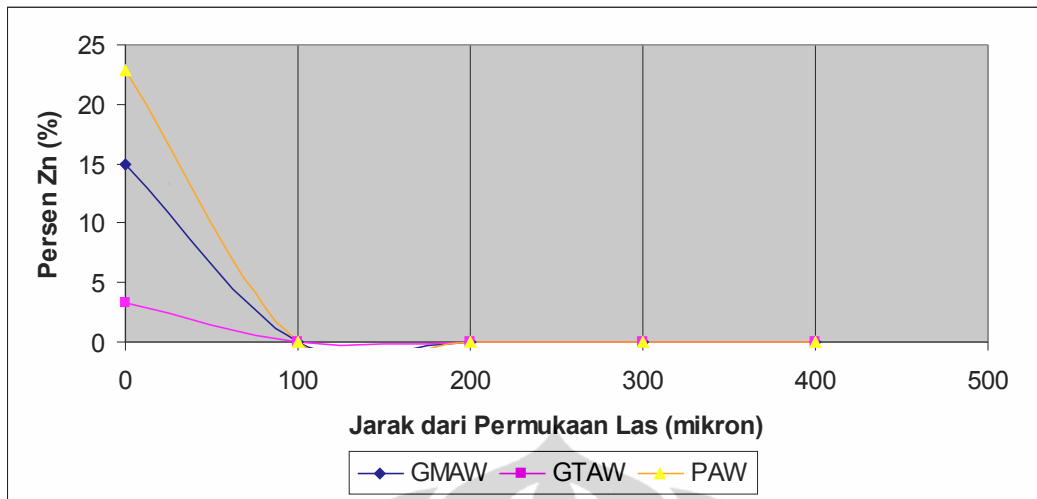
Jarak dari Permukaan Las (μm)	Titik	Zn (%)	Fe (%)	Mol Zn / (Zn + Fe)	Nilai Kekerasan (Vickers)
0	1	3,36	83,71	0,03	163
100	2	-	99,48	-	123
200	3	-	99,11	-	123
300	4	-	99,37	-	120
400	5	-	99,49	-	121



Gambar 4.20. Difusi unsur seng di daerah HAZ dari proses pengelasan metode *Plasma Arc Welding* (PAW) pada baja lembaran setebal 1mm berlapis seng

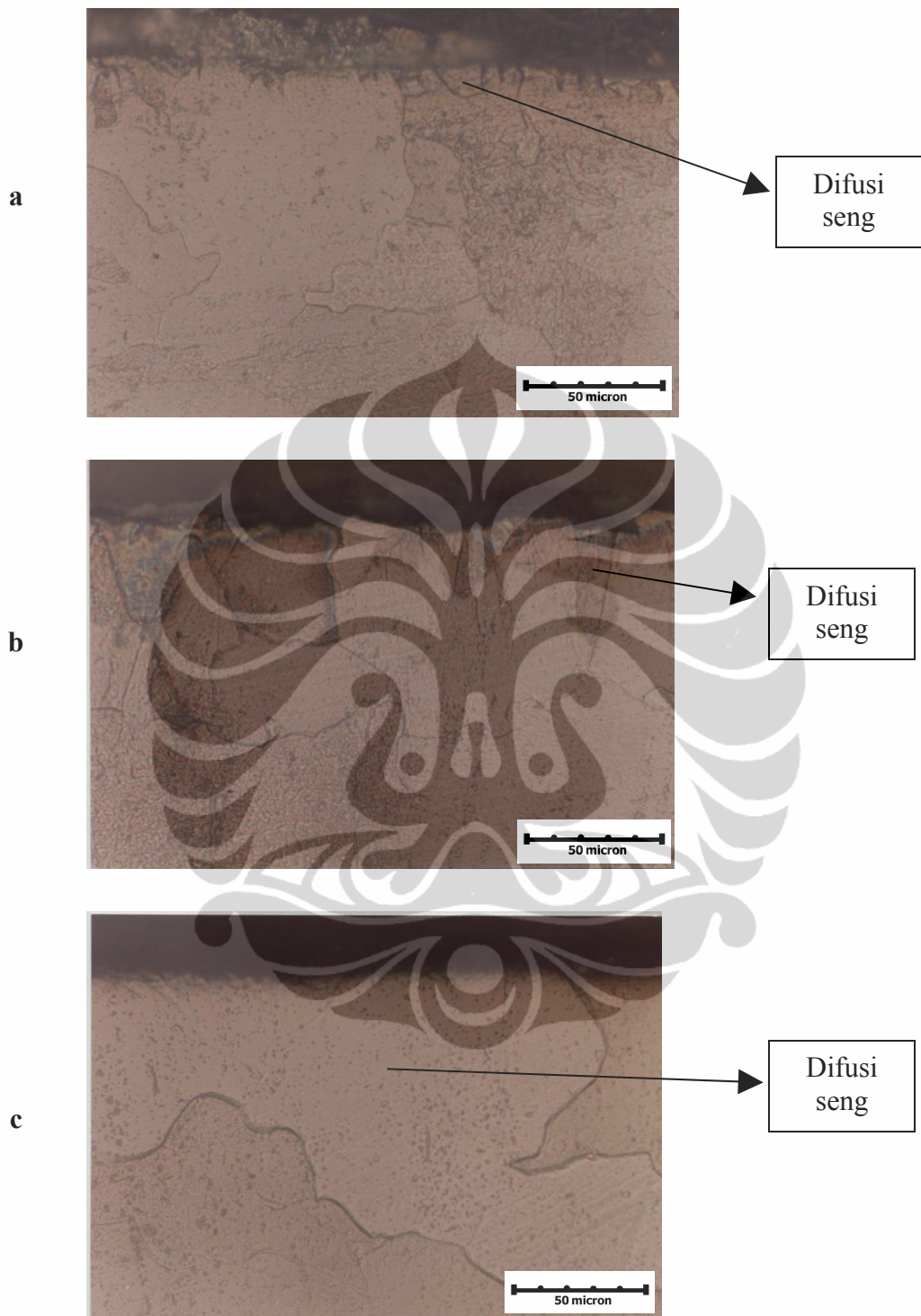
Tabel 4.11. Persentase Unsur di Daerah HAZ dari Proses Pengelasan Metode *Plasma Arc Welding* (PAW), pada Baja Lembaran Setebal 1mm Berlapis Seng

Jarak dari Permukaan Las (µm)	Titik	Zn (%)	Fe (%)	Mol Zn / (Zn + Fe)	Nilai Kekerasan (Vickers)
0	1	22,83	62,01	0,25	225
100	2	-	99,60	-	130
200	3	-	99,53	-	125
300	4	-	99,58	-	121
400	5	-	99,65	-	120



Gambar 4.21. Grafik hubungan antara kandungan unsur Zn yang berpenetrasi dengan jarak dari permukaan las pada baja lembaran setebal 1 mm lapis seng yang dilas dengan metode *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) dan *Plasma Arc Welding* (PAW) di daerah HAZ

Grafik perbandingan antara hasil pengujian EDS pada sampel yang dihasilkan dari sampel hasil pengelasan dengan metode *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) dan *Plasma Arc Welding* (PAW) di daerah HAZ disajikan pada Gambar 4.21. Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa seng yang berada di lapisan atas dari baja lembaran memang berdifusi, akan tetapi kedalamannya tidak lebih dari 100 mikron di daerah HAZ pada ketiga metode pengelasan tersebut. Hal ini disebabkan karena energi panas yang terjadi daerah ini tidak cukup untuk membuat seng berdifusi masuk lebih dalam lagi ke daerah HAZ. Gambar seng yang berdifusi pada struktur butir di daerah *fusion zone* ditunjukkan oleh Gambar 4.22.



Gambar 4.22. Struktur mikro daerah HAZ hasil pengelasan: (a). GMAW, (b). GTAW dan (c) PAW pada baja lembaran setebal 1mm berlapis seng, etsa Nital 3%

4.7 PENGUJIAN TEKUK

Data pengujian tekuk (*bending test*) yang dilakukan material sampel yang dilas dengan metode *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) dan *Plasma Arc Welding* (PAW) disajikan pada Tabel 4.12 dan hasil deformasinya pada sampel ditunjukkan oleh Gambar 4.23 Gambar 4.24 dan Gambar 4.25. Data lebih lengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 8.

Hasil pengujian tekuk pada sampel yang dilas dengan metode *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) dan *Plasma Arc Welding* (PAW) menunjukkan hasil yang memuaskan. Tidak ditemukan adanya cacat retak setelah proses pembebanan. Hal ini berbeda dengan sampel hasil las metode *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), di mana terjadi kegagalan di daerah HAZ. Ini menunjukkan bahwa di daerah ini terjadi penggetasan akibat perbedaan struktur butirnya pada daerah ini. Lebih jauh mengenai hal ini telah dibahas pada sub sub-bab 4.4.2.

Tabel 4.12. Data Hasil Uji Tekuk Hasil Pengelasan *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW), dan *Plasma Arc Welding* (PAW) pada Baja Lembaran Setebal 1mm Berlapis Seng

Metode Pengelasan	Beban Maksimum (kgf)	Keterangan
<i>Gas Metal Arc Welding</i> (GMAW)	480	180° retak
<i>Gas Tungsten Arc Welding</i> (GTAW)	620	180° tanpa retak
<i>Plasma Arc Welding</i> (PAW)	600	180° tanpa retak



Gambar 4.23. Struktur makro hasil uji tekuk dari hasil las *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) pada baja lembaran setebal 1mm berlapis seng



Gambar 4.24. Struktur makro hasil uji tekuk dari hasil las *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) pada baja lembaran setebal 1mm berlapis seng



Gambar 4.25. Struktur makro hasil uji tekuk dari hasil las *Plasma Arc Welding* (PAW) pada baja lembaran setebal 1mm berlapis seng