

BAB IV

DATA HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1. Data dan Perhitungan Hasil Pengujian

4.1.1. Hasil Uji Kekerasan (Vickers) pada Sambungan Las Gesek

Pada pengujian kekerasan menggunakan mikro vickers yang telah dilakukan pada pengelasan gesek digunakan *test load* 0.98 kgf dengan *loading time* 15 detik dengan variasi sudut yaitu 11.5° , 15° , 30° dan 45° dengan variasi waktu 90, 120, 150 dan 180 detik. Pengambilan data kekerasan dibedakan dalam tiga daerah dengan tiga titik sampel tiap daerah, yaitu daerah las (Zpl), daerah HAZ (Zpd) yaitu daerah yang terpengaruh panas, daerah yang tidak terdeformasi (Zud). Di bawah ini adalah tabel nilai kekerasan dari nilai tertinggi (11.5° 180') dan terendah (45° 180').

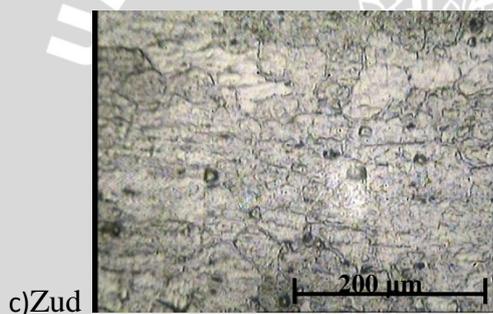
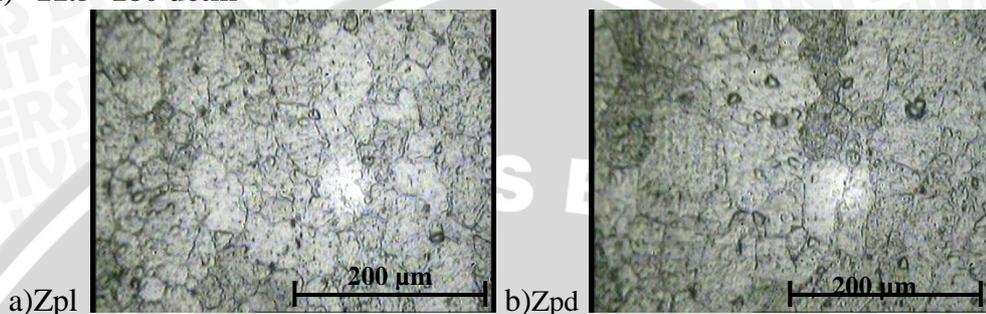
Tabel 4.1. Distribusi kekerasan

Sudut ($^{\circ}$)	Waktu (detik)	Daerah	Jarak (mm)	Kekerasan (HV)	Standar Deviasi
11.5	180	Zpl	0.05	80.92	2.66
			0.1	78.19	
			0.15	75.6	
		Zpd	0.25	77.74	0.78
			0.3	77.14	
			0.35	76.2	
		Zud	0.55	75.01	2.51
			1.55	72.39	
			2.55	69.99	
45	180	Zpl	0.05	59.6	1.68
			0.1	62.81	
			0.15	60.34	
		Zpd	0.25	74.24	1.30
			0.3	72.02	
			0.35	71.96	
		Zud	0.55	72	2.67
			1.55	71.69	
			2.55	67.22	

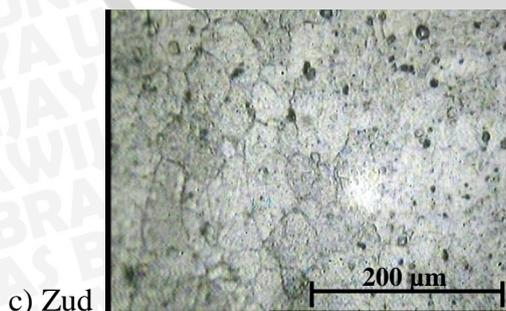
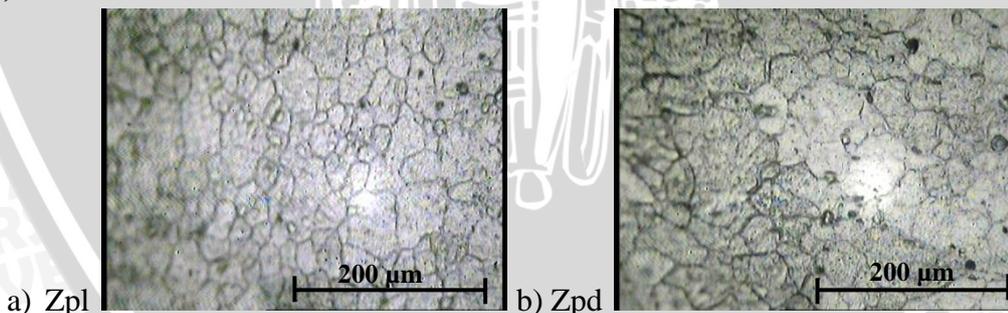
4.1.2. Hasil Foto Mikrostruktur

Pada hasil foto mikrostruktur dengan pembesaran 400x pada mikroskop didapatkan hasil seperti Gambar 4.1. Gambar di bawah ini adalah nilai kekerasan tertinggi dan terendah berdasarkan kecenderungan waktu. Untuk menghitung diameter butirannya digunakan metode planimetri.

1) 11.5⁰ 180 detik

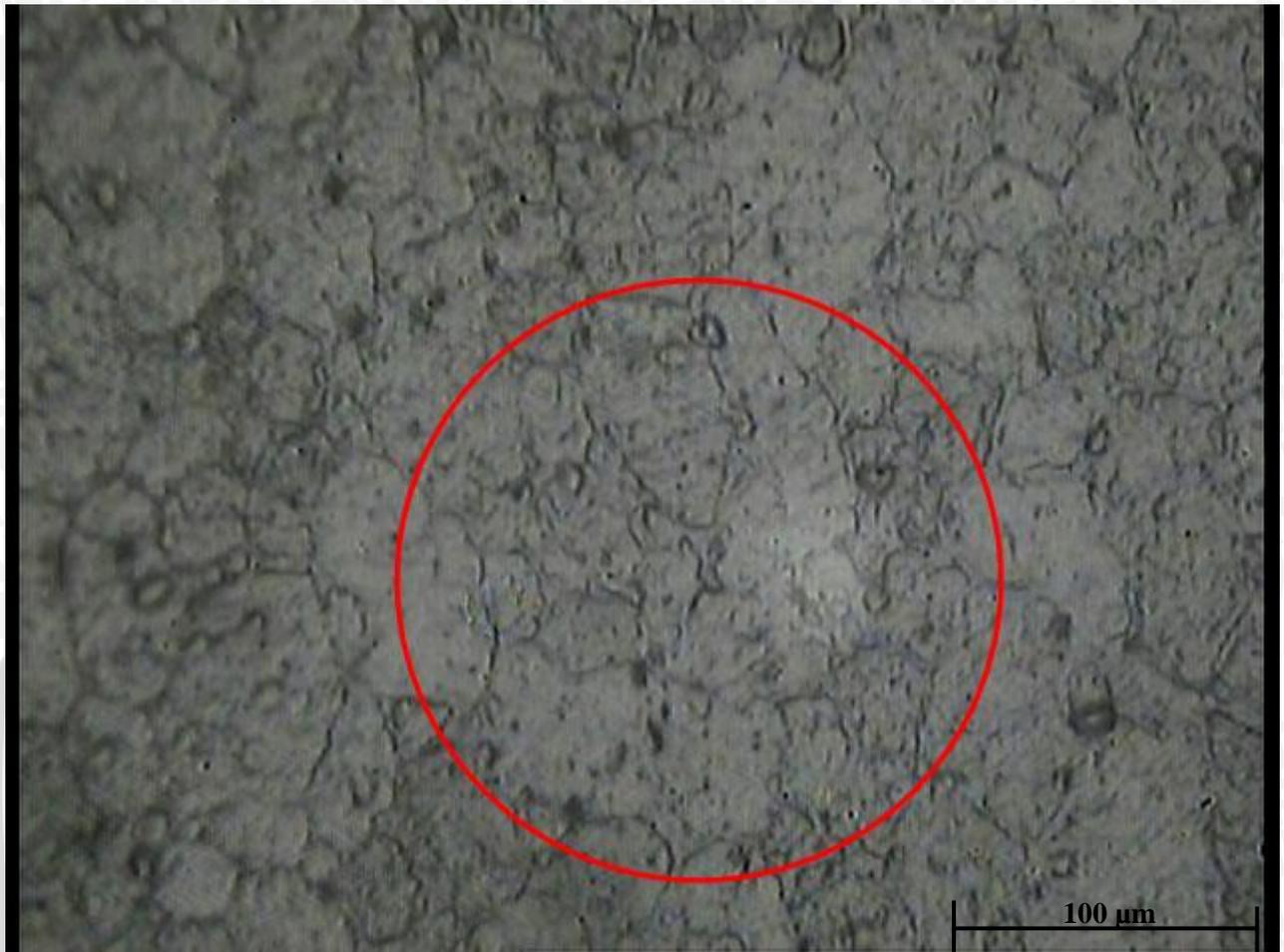


2) 45⁰ 180 detik



Gambar 4.1 hasil foto mikrostruktur 400x

Contoh perhitungan diameter butiran :



Gambar 4.2 Perhitungan Butiran (Zpl) pada variasi 11.5° 180 detik

$$N_{\text{intercept}} = 32$$

$$N_{\text{inside}} = 106$$

$$N_A = f(N_{\text{inside}} + \frac{1}{2}N_{\text{intercepted}})$$

$$N_A = 32(106 + \frac{32}{2})$$

$$N_A = 32(112 + 16)$$

$$N_A = 3904$$

$$G = 3.322 \log N_A - 2.954$$

$$G = 3.322 \log 3904 - 2.954$$

$$G = 9.079$$

Untuk diameter butir dapat dilihat pada tabel ASTM E112 (lampiran 4), untuk nilai $G = 8.976$ diameter rata-rata butiran adalah $0.016 \text{ mm} = 16.0 \mu\text{m}$

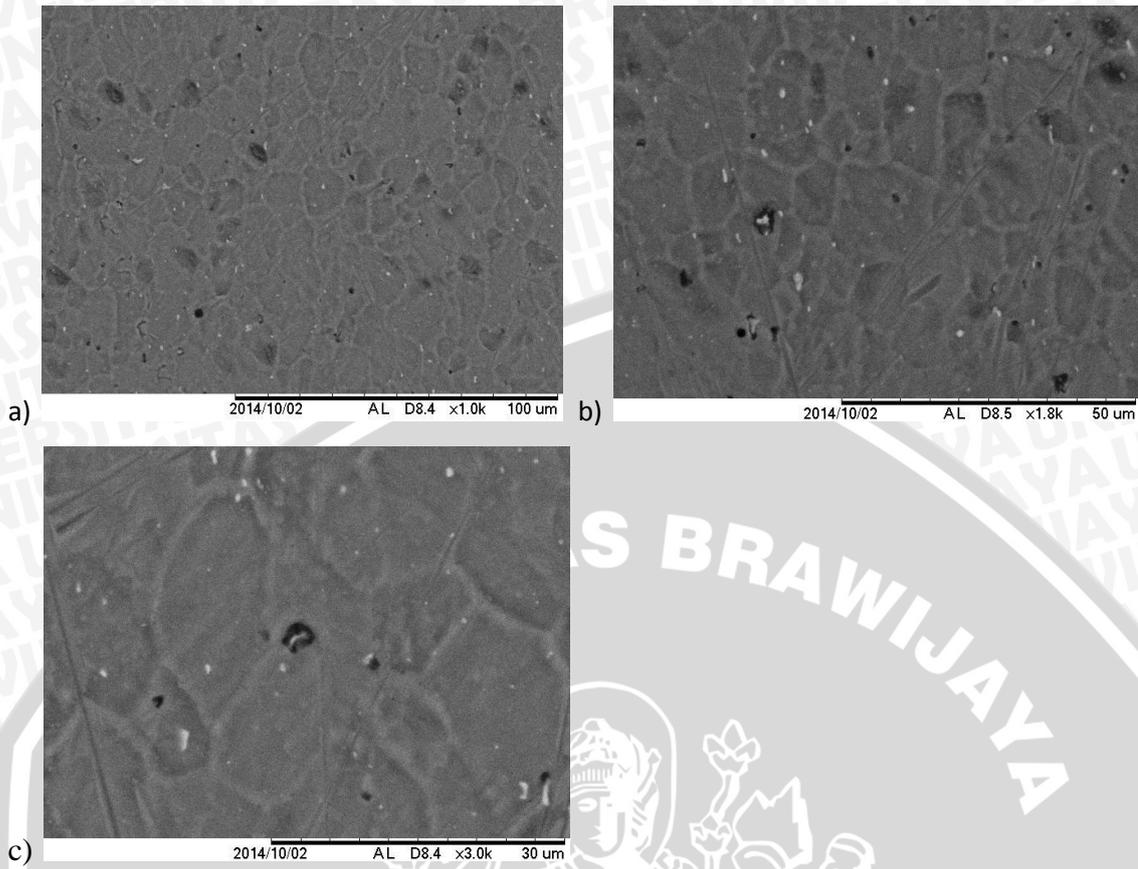
Tabel 4.2 Diameter butir tiap spesimen

Spesimen	Daerah	Diameter (μm)
11.5 ^o 180 detik (Hasil uji kekerasan tertinggi)	Zpl	16.0
	Zpd	17.9
	Zud	21.5
45 ^o 180 detik (Hasil uji kekerasan terendah)	Zpl	21.4
	Zpd	26.7
	Zud	33.3
Al 6061	-	20.3

4.1.3 Hasil Foto SEM-EDX

Scanning Electron Microscopy (SEM) digunakan untuk mengamati detail permukaan sel atau struktur mikroskopik lainnya dan mampu menampilkan pengamatan obyek secara tiga dimensi. *Scanning Electron Microscopy* (SEM) adalah elektron yang menggambarkan sampel dengan memindai seberkas elektron dalam pola scan raster. Elektron berinteraksi dengan atom yang menyusun sampel yang menghasilkan sinyal yang berisi informasi tentang topografi permukaan sampel, komposisi dan sifat-sifat lainnya seperti konduktivitas listrik.

EDX (*Energy-dispersive X-ray Spectroscopy*). Bila elektron dengan energi yang cukup besar menumbuk pada sampel, akan menyebabkan terjadinya emisi sinar-x yang energinya dan intensitasnya bergantung pada komposisi elemental sampel. Dengan menggunakan fenomena ini untuk menganalisa komposisi elemental dari volume-mikro (kasarnya satu sampai beberapa ratus kubik mikrometer) itulah yang disebut sebagai analisis mikro. Pada EDX di mana sinar-x yang diemisikan dikonversi dan disimpan secara elektronik dan bukan dengan difraksi kristal.



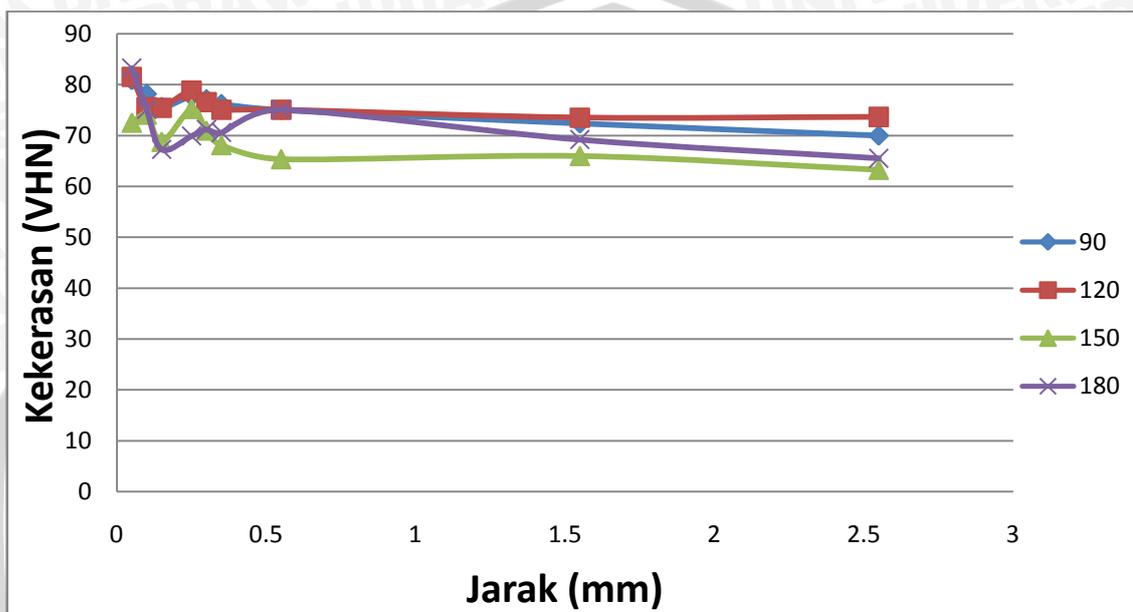
Gambar 4.3 Hasil foto *Scanning Electron Microscopy* (SEM) a. 1000X b. 1800X c. 3000X

4.2 Pembahasan

4.2.1 Pengaruh *Friction Time* dan Sudut *Chamfer* Terhadap Kekerasan

4.2.1.1 Sudut *Chamfer* 11.5° dengan *Friction Time* 90, 120, 150 dan 180 Detik

Pada grafik dibawah ini dapat dilihat besar kekerasan yang didapat pada berbagai titik pada tiap daerah.



Gambar 4.4 Grafik hubungan kekerasan terhadap jarak antar titik pengujian pada sudut *chamfer* 11.5° dengan *friction time* 90, 120, 150 dan 180 detik

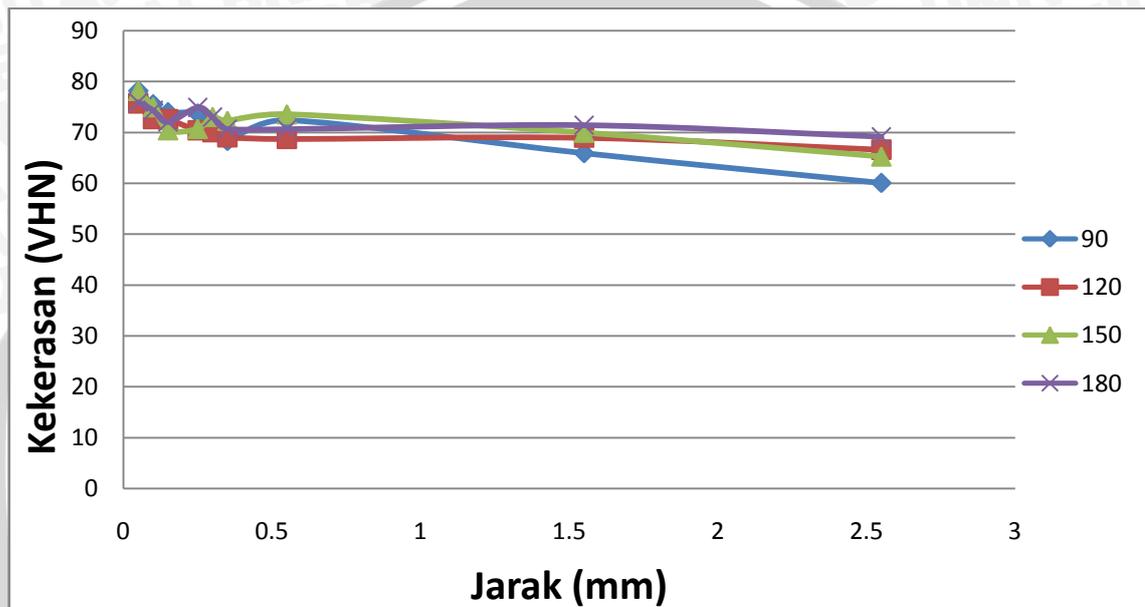
Pada grafik dapat dilihat nilai kekerasan pada tiap titik pengujian. Pengujian dilakukan sebanyak 9 titik pada tiap spesimen dengan 3 titik pengujian kekerasan pada masing – masing daerah *Fully Plasticized Zone* (Zpl), *Partly Deformed Zone* (Zpd) dan *Undeformed Zone* (Zud).

Nilai kekerasan tertinggi terletak pada spesimen dengan *friction time* 180 detik pada daerah *Fully Plasticized Zone* (Zpl) yaitu sebesar 83.28 VHN lokasinya terletak pada jarak 0.05 mm dari sambungan las dan nilai kekerasan terendah terletak pada jarak 2.55 mm dari sambungan las sebesar 65.55 VHN. Hal ini membuktikan bahwa pada daerah *Fully Plasticized Zone* (Zpl) yang mempunyai kekerasan tertinggi dibanding dengan daerah lain, sebab pada daerah ini yang langsung terdampak panas pada saat pengelasan berlangsung. Masukan panas yang terjadi juga dikarenakan lamanya *friction time* dan juga besar dari sudut *chamfer* yang telah ditentukan sebelumnya. Uji mikrostruktur pada spesimen dengan sudut 90° dan *friction time* 180 detik juga

membuktikan bahwa butirannya lebih kecil pada daerah *Fully Plasticized Zone* (Zpl) dibanding dengan daerah *Partly Deformed Zone* (Zpd) dan *Undeformed Zone* (Zud).

4.2.1.2 Sudut *Chamfer* 15° dengan *Friction Time* 90, 120, 150 dan 180 Detik

Pada grafik dibawah ini dapat dilihat besar nilai kekerasan pada pengujian yang telah dilakukan.

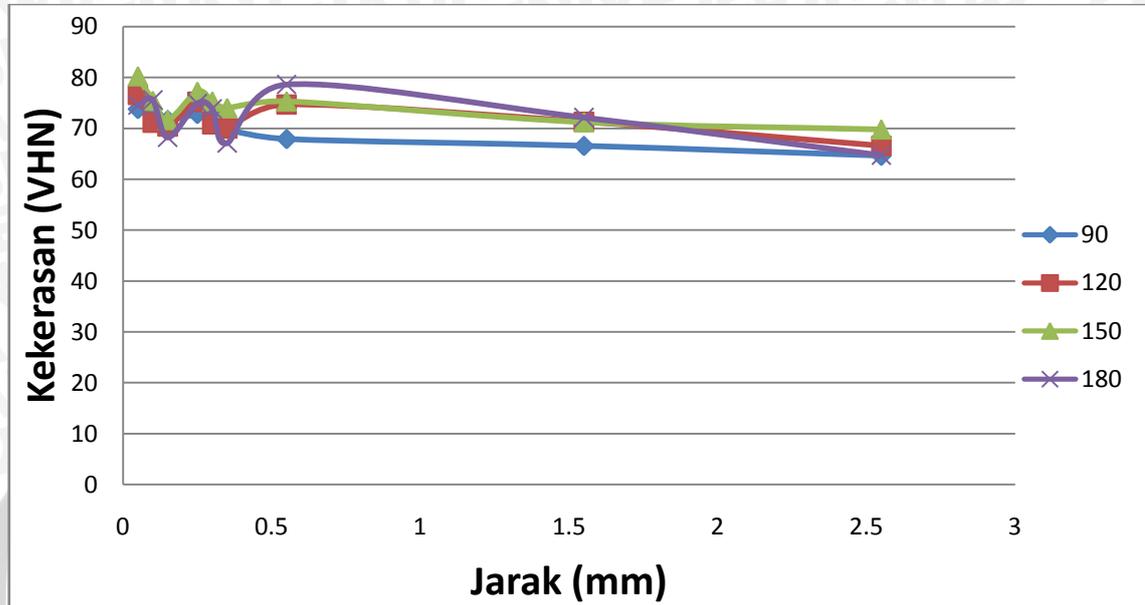


Gambar 4.5 Grafik hubungan kekerasan terhadap jarak antar titik pengujian pada sudut *chamfer* 15° dengan *friction time* 90, 120, 150 dan 180 detik

Pada grafik Grafik hubungan kekerasan terhadap jarak antar titik pengujian pada sudut *chamfer* 15° dengan *friction time* 90, 120, 150 dan 180 detik dapat dilihat nilai kekerasan tertinggi terdapat pada spesimen dengan *friction time* 90 detik dengan jarak titik pengujian 0.05 mm dari sambungan las dengan nilai kekerasan sebesar 78.23 VHN dan nilai kekerasan terendah pada spesimen ini terletak pada titik pengujian dengan jarak 2.55 mm dari sambungan las dengan nilai kekerasan sebesar 60.12 VHN. Struktur mikro pada tiap daerah dapat dilihat pada hasil uji mikrostruktur yang didapat dengan butirannya yang lebih rapat dan kecil terdapat pada daerah *Fully Plasticized Zone* (Zpl) dibanding dengan daerah *Partly Deformed Zone* (Zpd) dan *Undeformed Zone* (Zud) yang ukurannya yang lebih besar.

4.2.1.3 Sudut Chamfer 30⁰ dengan Friction Time 90, 120, 150 dan 180 Detik

Pada grafik dibawah ini dapat dilihat besar kekerasan yang didapat pada berbagai titik pada tiap daerah.

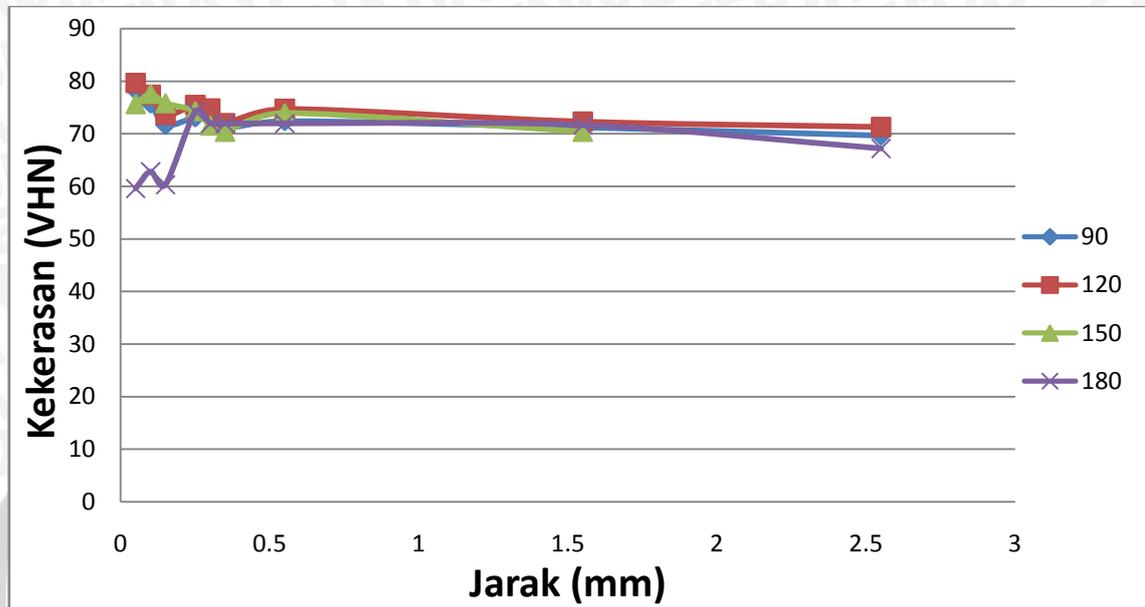


Gambar 4.6 Grafik hubungan kekerasan terhadap jarak antar titik pengujian pada sudut chamfer 30⁰ dengan friction time 90, 120, 150 dan 180 detik

Pada grafik Grafik hubungan kekerasan terhadap jarak antar titik pengujian pada sudut chamfer 30⁰ dengan friction time 90, 120, 150 dan 180 detik dapat dilihat nilai kekerasan tertinggi terdapat pada spesimen dengan friction time 150 detik dengan jarak titik pengujian 0.05 mm dari sambungan las dengan nilai kekerasan sebesar 80.28 VHN dan nilai kekerasan terendah pada spesimen ini terletak pada titik pengujian dengan jarak 2.55 mm dari sambungan las dengan nilai kekerasan sebesar 69.81 VHN.

4.2.1.4 Sudut Chamfer 45⁰ dengan Friction Time 90, 120, 150 dan 180 Detik

Pada grafik dibawah ini dapat dilihat besar nilai kekerasan pada pengujian yang telah dilakukan.



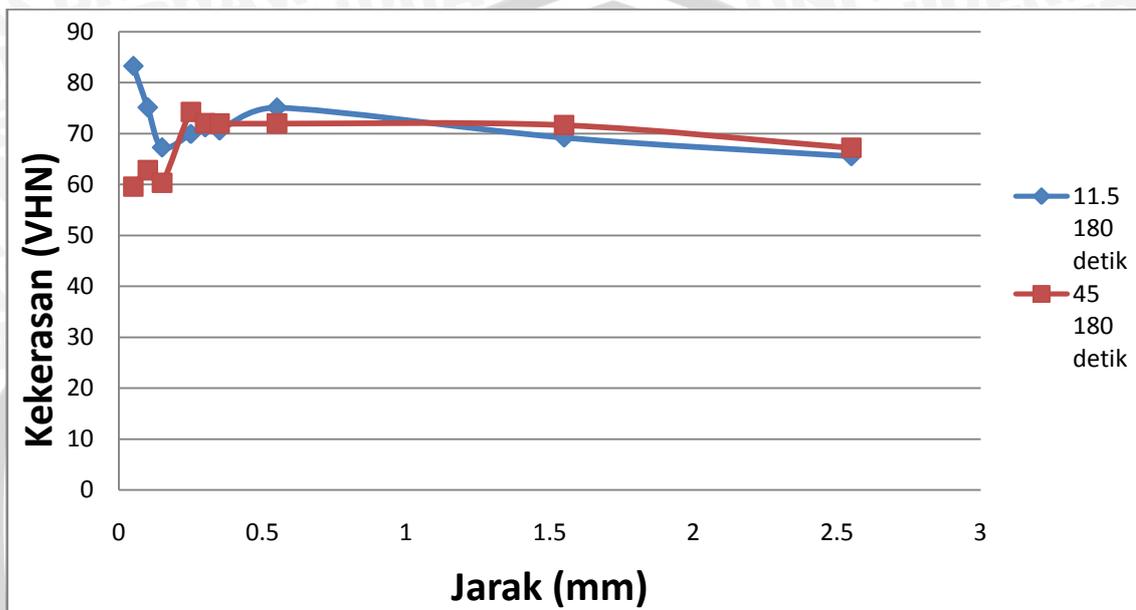
Gambar 4.7 Grafik hubungan kekerasan terhadap jarak antar titik pengujian pada sudut chamfer 45⁰ dengan friction time 90, 120, 150 dan 180 detik

Pada grafik dapat dilihat nilai kekerasan pada tiap titik pengujian. Pengujian dilakukan sebanyak 9 titik pada tiap spesimen dengan 3 titik pengujian kekerasan pada masing – masing daerah *Fully Plasticized Zone* (Zpl), *Partly Deformed Zone* (Zpd) dan *Undeformed Zone* (Zud).

Nilai kekerasan tertinggi terletak pada spesimen dengan *friction time* 120 detik pada daerah *Fully Plasticized Zone* (Zpl) yaitu sebesar 79.66 VHN lokasinya terletak pada jarak 0.05 mm dari sambungan las dan nilai kekerasan terendah terletak pada jarak 2.55 mm dari sambungan las sebesar 71.3 VHN. Hal ini membuktikan bahwa pada daerah *Fully Plasticized Zone* (Zpl) yang mempunyai kekerasan tertinggi dibanding dengan daerah lain, sebab pada daerah ini yang langsung terdampak panas pada saat pengelasan berlangsung. Masukan panas yang terjadi juga dikarenakan lamanya *friction time* dan juga besar dari sudut *chamfer* yang telah ditentukan sebelumnya. Uji mikrostruktur pada spesimen dengan sudut 45⁰ dan *friction time* 120 detik juga membuktikan bahwa butirannya lebih kecil pada daerah *Fully Plasticized Zone* (Zpl) dibanding dengan daerah *Partly Deformed Zone* (Zpd) dan *Undeformed Zone* (Zud).

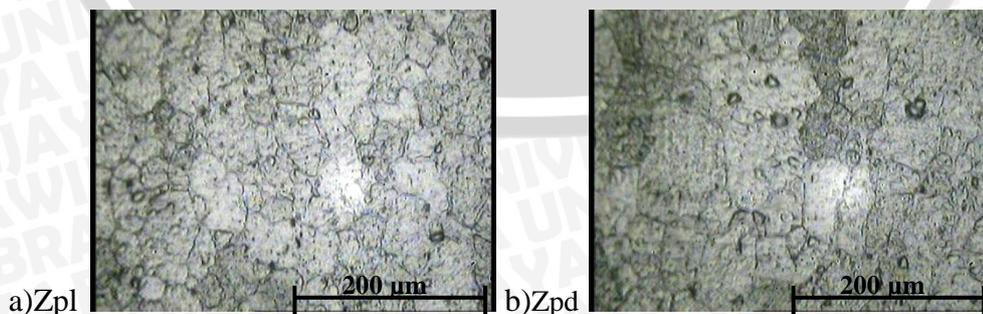
4.2.1.5 Sudut Chamfer 45° dengan Friction Time 90, 120, 150 dan 180 Detik

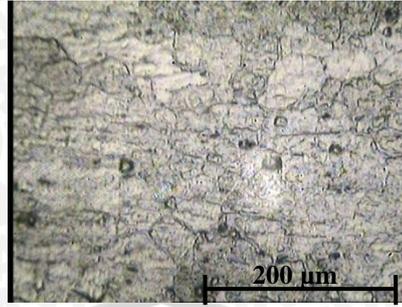
Hasil penelitian pengelasan gesek pada Al-Mg-Si dengan variasi waktu dan sudut chamfer didapat nilai kekerasan tertinggi dan terendah. Pada grafik di bawah ini dapat dilihat besar kekerasan yang didapat.



Gambar 4.8 Grafik hubungan kekerasan terhadap jarak antar titik pengujian dengan nilai kekerasan tertinggi pada spesimen dengan sudut chamfer 11.5° friction time 180 detik dan spesimen sudut chamfer 45° friction time 180 detik

Pada spesimen dengan sudut chamfer 11.5° dengan waktu friction 180 detik didapatkan nilai kekerasan tertinggi. Nilai kekerasan tertinggi terletak pada daerah Zpl, kekerasan kedua pada daerah Zpd, selanjutnya pada daerah logam induk Zud. Nilai kekerasan pada spesimen ini tertinggi dibanding dengan spesimen lain, nilai kekerasan tertinggi ini didukung dengan foto mikrostrukturnya.





c)Zud

Gambar 4.9 Foto mikrostruktur pada pengelasan gesek dengan sudut *chamfer* 11.5° dan *friction time* 180 detik

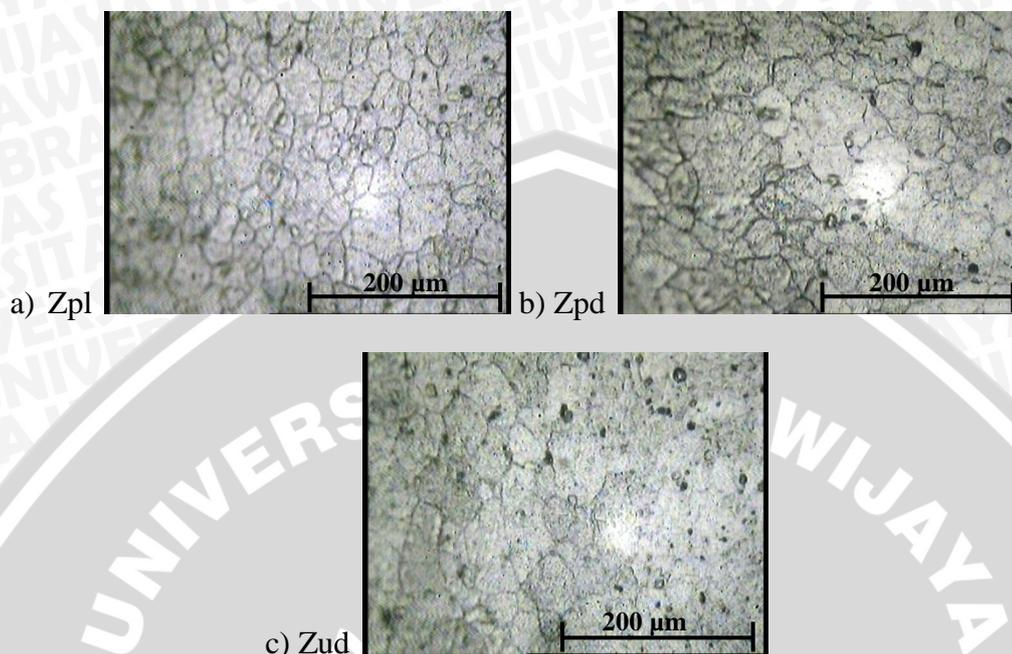
- Foto mikrostruktur pada daerah Zpl
- Foto mikrostruktur pada daerah Zpd
- Foto mikrostruktur pada daerah Zud

Pada foto mikrostruktur spesimen pengelasan gesek dengan sudut *chamfer* 11.5° dan *friction time* 180 detik, diameter butiran pada daerah Zpl didapatkan nilai sebesar $16.0\ \mu\text{m}$, di daerah Zpd didapatkan nilai sebesar $17.9\ \mu\text{m}$, di daerah Zud didapatkan nilai sebesar $21.5\ \mu\text{m}$. Pada daerah Zpl mempunyai nilai diameter butiran yang paling kecil, nilai terbesar kedua pada daerah Zpd, dan selanjutnya nilai diameter yang terbesar adalah pada daerah Zud. Hal ini disebabkan karena pada daerah ini mendapatkan masukan panas awal yang lebih tinggi dibanding daerah lain dikarenakan pada daerah ini yang langsung bergesekan pada saat pengelasan yang mengakibatkan pendinginan yang lebih cepat sehingga butiran yang terbentuk belum sempat berkembang sehingga dihasilkan butiran yang kecil dan rapat yang akan meningkatkan kekerasan di daerah ini disusul dengan nilai kekerasan pada daerah Zpd dengan struktur butir lebih besar dibanding dengan butiran pada daerah Zpl, dan diameter butiran yang paling besar adalah pada daerah Zud, sebab pada daerah ini tidak mengalami pengaruh panas langsung pada saat pengelasan sehingga struktur butiran tidak banyak berubah dan kekerasannya lebih kecil dibanding dengan daerah lainnya.

Pada spesimen pengelasan gesek dengan sudut *chamfer* 11.5° dan *friction time* 180 detik ini mempunyai kekerasan tertinggi dibanding dengan spesimen dengan sudut *chamfer* dan *friction time* lainnya. Hal ini dikarenakan pada spesimen pengelasan gesek dengan sudut *chamfer* 11.5° dan *friction time* 180 detik mempunyai struktur mikro dengan butiran yang rapat dan diameternya lebih kecil, butiran akan mengisi ruang kosong sehingga tidak ada *vacancy* yang dapat menurunkan nilai kekerasan, hal ini lah yang memungkinkan nilai kekerasannya tinggi.

Pada spesimen dengan sudut *chamfer* 45° dengan waktu *friction* 180 detik didapatkan nilai kekerasan terendah. Nilai kekerasan pada spesimen ini paling terendah

dibanding dengan spesimen lain, nilai kekerasan terendah ini didukung dengan foto mikrostrukturnya.



Gambar 4.10 Foto mikrostruktur pada pengelasan gesek dengan sudut *chamfer* 45⁰ dan *friction time* 180 detik

- d) Foto mikrostruktur pada daerah Zpl
- e) Foto mikrostruktur pada daerah Zpd
- f) Foto mikrostruktur pada daerah Zud

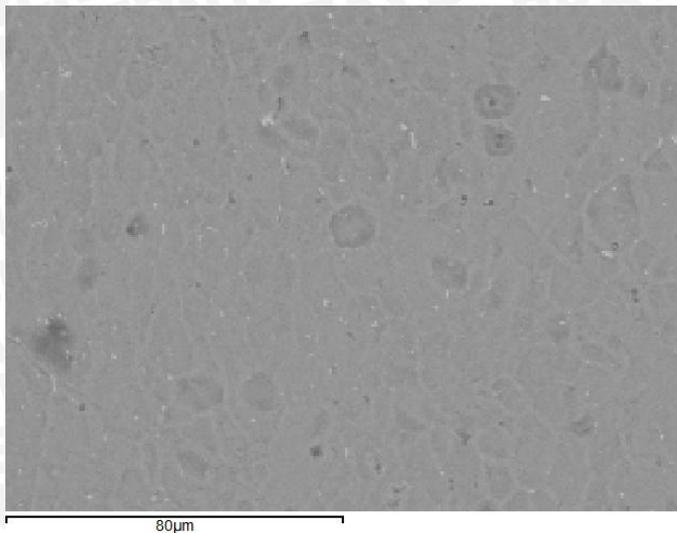
Pada foto mikrostruktur spesimen pengelasan gesek dengan sudut *chamfer* 45⁰ dan *friction time* 180 detik, diameter butiran pada daerah Zpl didapatkan nilai sebesar 21.4 µm, di daerah Zpd didapatkan nilai sebesar 26.7 µm, di daerah Zud didapatkan nilai sebesar 33.3 µm. Pada daerah Zpl mempunyai nilai diameter butiran yang paling kecil, nilai terbesar kedua pada daerah Zpd, dan selanjutnya nilai diameter yang terbesar adalah pada daerah Zud. Hal ini disebabkan karena pada daerah ini mendapatkan pemanasan yang paling tinggi dibanding daerah lain dikarenakan pada daerah ini yang langsung bergesekan pada saat pengelasan sehingga struktur butiran lebih kecil dan rapat sehingga pada daerah ini didapat nilai kekerasan yang lebih tinggi disusul dengan nilai kekerasan pada daerah Zpd dengan struktur butir lebih besar dibanding dengan butiran pada daerah Zpl, dan diameter butiran yang paling besar adalah pada daerah Zud, sebab pada daerah ini tidak mengalami pengaruh panas langsung pada saat pengelasan sehingga struktur butiran tidak banyak berubah dan kekerasannya lebih kecil dibanding dengan daerah lainnya. Tetapi dikarenakan tidak terjadi keseragaman butiran pada daerah Zpl sehingga mengurangi kekerasan pada daerah tersebut. Hal ini

disebabkan kecepatan peningkatan panas yang lebih cepat akan membentuk logam las lebih awal. Yang mana logam las masih bersifat lumer sehingga dengan adanya tekanan yang diberikan logam las keluar membentuk *flash*. Karena logam las keluar semua atau kosong yang diakibatkan celah sudut *chamfer* yang lebih sempit. Dengan adanya tekanan material akan membentuk logam las yang baru dengan waktu gesekan yang tersedia lebih sedikit.

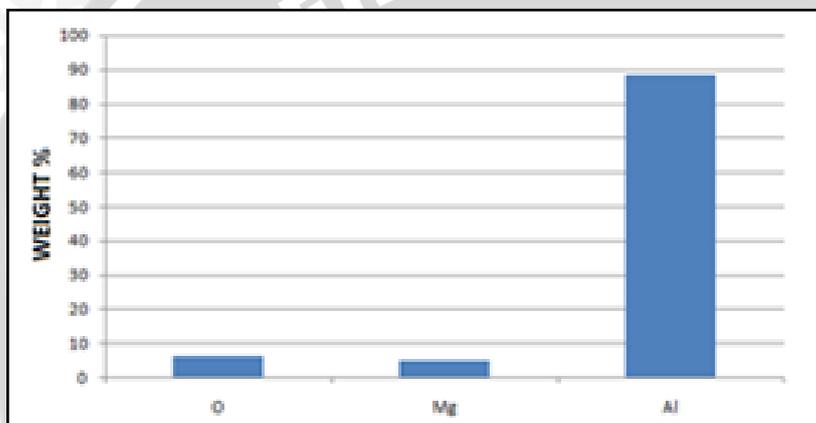
Kekerasan tertinggi terdapat pada daerah HAZ dikarenakan kondisi pelarut endapan Mg_2Si saat suhunya T_{max} dan terjadinya endapan kembali (*reprecipitation*) saat pendinginan. Hal ini menyebabkan profil kekerasan yang mana siklus pendinginan di daerah HAZ dekat logam las lebih tinggi dari pada pendinginan pada bagian yang agak jauh dari logam las. Hal ini dibuktikan dengan hasil pengujian EDX untuk mengetahui unsur Mg pada tiap daerah Zpl, Zpd dan Zud. Dari hasil EDX didapat hasil Mg pada daerah Zpl sebesar 7.7 %, pada daerah Zpd 9.6 % dan pada daerah Zud sebesar 10.8% (Lampiran 6). Dengan *holding* 2 menit dengan suhu kamar akan mengakibatkan unsur Mg dan Si pada aluminium paduan akan terbentuk GP zone (Guinier Preston) Mg_2Si dan di daerah *fusion line* sehingga kekerasannya naik. Adanya kekosongan atom dalam jumlah besar dapat membantu proses difusi atom pada temperatur ruang untuk membentuk zona Guinier - Preston (Zona GP). Guinier - Preston (Zona GP) adalah kondisi di dalam paduan dimana terdapat agregasi atom padat atau pengelompokan atom padat. (Surdia dan Saito, 1992). Seperti pada penjelasan di atas pada spesimen pengelasan gesek dengan sudut *chamfer* 45^0 dan *friction time* 180 detik sebagian besar logam las keluar menjadi *flash* oleh karena itu diduga sebagian besar endapan Mg_2Si terbawa keluar sehingga distribusi kekerasan Zpl pada spesimen pengelasan gesek dengan sudut *chamfer* 45^0 dan *friction time* 180 detik menjadi lebih rendah dari daerah Zpd.

4.2.2 Komposisi Butiran Berdasarkan Uji SEM-EDX

Pada pengujian ini dilakukan pengujian dengan foto SEM untuk lebih mengetahui struktur dan komposisi penyusun butir yang terdapat pada proses pengelasan gesek yang dilakukan dengan material Al-Mg-Si dengan variasi *friction time* dan sudut *chamfer*. Berdasarkan foto SEM yang telah dilakukan didapatkan foto seperti gambar di bawah ini.



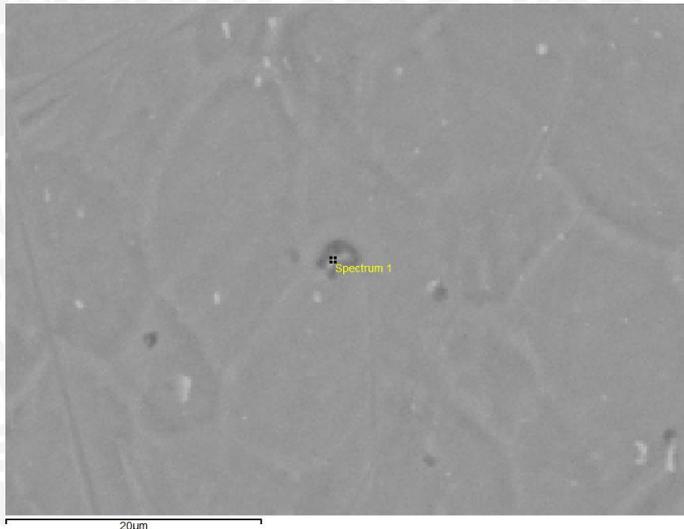
Gambar 4.11 Sum Spectrum pada daerah Zpl spesimen 15° 180'



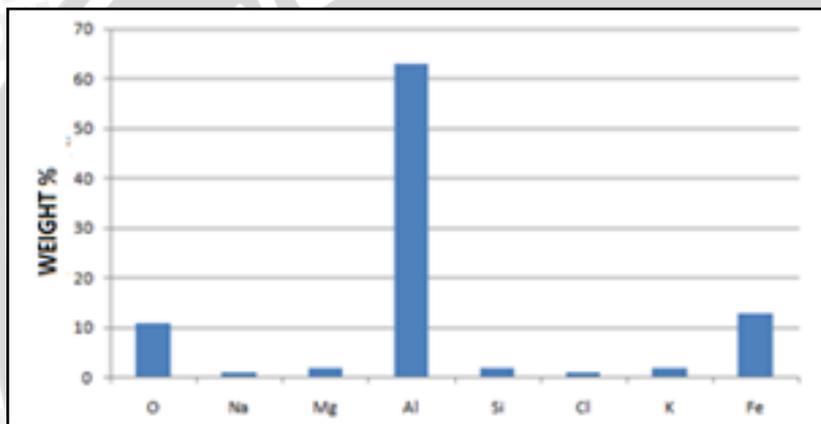
Gambar 4.12 Grafik Sum Spectrum

Dari Gambar 4.7 dan 4.8 di ketahui tabel dan grafik sum spectrum. Sum spectrum adalah foto yang diambil dengan keseluruhan permukaan butiran. Dari tabel di atas dapat diketahui komposisi pada butiran adalah Oxygen 6.33, Magnesium 5.3 dan aluminium 88.3. (Weight %). Pada sum spectrum ini aluminium sangat dominan pada komposisi butiran, dan selanjutnya terdapat oxygen dan magnesium.

pengujian selanjutnya difokuskan pada foto SEM dengan butiran berwarna hitam. Pada pengujian Spectrum 1 didapat hasil seperti di bawah ini.



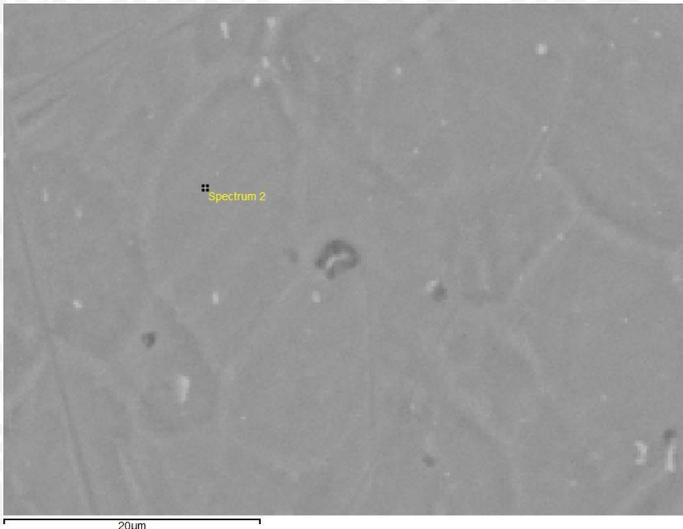
Gambar 4.13 Spectrum 1 pada daerah Zpl spesimen 15^o 180'



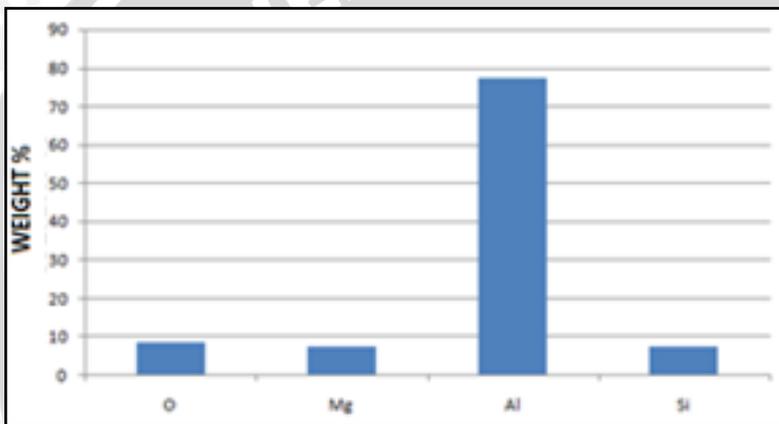
Gambar 4.14 Grafik Spectrum 1

Pada pengujian yang dilakukan pada sum spectrum 1 didapatkan hasil seperti pada Gambar 4.9 dan 4.10. Pada butiran berwarna hitam ketika di foto SEM sebab terdapat komposisi Fe pada salah satu unsur pembentuknya. Aluminium pada butiran ini sebesar 63, oxygen 11, dan kandungan unsur lain-lain sebesar 1. (Weight %). Unsur Fe inilah yang menyebabkan warna hitam pada titik tersebut.

Pengujian pada spectrum 2 yang diambil pada butiran berwarna putih didapatkan hasil seperti dibawah ini.



Gambar 4.15 Spectrum 2 pada daerah Zpl spesimen 15⁰ 180⁰



Gambar 4.16 Grafik Spectrum 2

Pengujian pada Gambar 4.11 dan 4.12 ini didapatkan hasil dengan kandungan komposisi pada butiran berwarna putih ke-abu-abu-an dengan urutan komposisi aluminium 77.5, oxygen 8.5, Magnesium 7.5 dan terdapat kandungan silicon 7.5 (Weight %), yang menjadikan warna menjadi ke-abu-abu-an, sebab alumina yang dominan yang terdapat pada titik tersebut.