

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Hasil *Thixoforming*

Setelah diperoleh *ingot* material komposit Al 6061 dengan penguat SiC, dilakukan proses *thixoforming* untuk meningkatkan kekuatan material komposit. Peningkatan kekuatan material disebabkan karena adanya ikatan yang lebih baik antara matriks dan penguat sebagai hasil dari penggabungan proses pengecoran dan penempaan sehingga menghasilkan komponen struktural dengan bentuk yang kompleks [31]. Selain itu, harapan dilakukannya *thixoforming* adalah untuk mengurangi porositas hasil *stir casting*, sebagai akibat dari paduan matriks dan penguat yang mungkin terpisah saat proses pendinginan. Hasil *thixoforming* akan menyebabkan tereduksinya ketebalan dari komposit hasil *stir casting*, sebagai akibat pemberian tekanan kepadanya dalam kondisi *semi-solid*. Adapun hasil proses *thixoforming* dapat dilihat pada tabel berikut,

**Tabel 4.1** Ketebalan Komposit Hasil *Thixoforming*

Sampel Komposit ke-	Ketebalan (mm)		Total Reduksi (mm)	Rata-Rata Reduksi (mm)
	Sebelum	Sesudah		
1	17,5	14,5	3	3,5
2	15	11,5	3,5	
3	16,5	12,5	4	

Dapat dilihat dari hasil *thixoforming* yang telah dilakukan, terdapat pengurangan ketebalan dari komposit, hal ini menunjukkan proses *thixoforming* berhasil dilakukan dan tekanan yang diberikan sudah cukup optimal. Berikut adalah gambar sampel setelah mengalami proses *thixoforming*,



**Gambar 4.1** Material Komposit Setelah *Thixoforming*

#### 4.2 Hasil *Rolling*

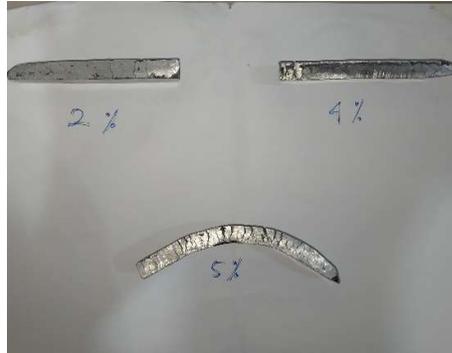
Setelah proses *thixoforming* dan *artificial aging* dilakukan pada komposit, dilakukan proses *rolling* bertujuan untuk mereduksi ketebalan dan membantu mengurangi porositas yang masih ada di dalam struktur mikro komposit hasil *stir casting* dan *thixoforming*, serta membuat penyebaran penguat menjadi lebih merata. Karena proses *thixoforming* dan *artificial aging* menghasilkan dimensi sampel yang kurang proporsional, maka dilakukan preparasi sampel terlebih dahulu. Selain untuk merapikan dimensi setiap sampel, proses ini juga bertujuan untuk menghilangkan lapisan oksidasi yang terbentuk selama proses pembentukan dan *heat treatment* sebelumnya. Preparasi ini dilakukan dengan manual menggunakan alat gerinda. Adapun dimensi sampel komposit hasil proses *rolling* dapat dilihat pada tabel berikut,

**Tabel 4.2** Ketebalan Komposit Hasil *Rolling*

Sampel Komposit ke-	Ketebalan (mm)		Total Reduksi (%)
	Sebelum	Sesudah	
1	10	9,8	2
2	10,1	9,6	4
3	10	9,5	5

Setelah dilakukan proses *rolling* pada material komposit dengan beberapa variasi persen reduksi, didapatkan hasil ketebalan komposit yang

lebih tipis dan diasumsikan bahwa struktur mikro pada komposit telah menguat. Namun, pada persen reduksi 5%, diperoleh hasil sampel komposit yang rapuh hingga pecah. Hal ini disebabkan karena reduksi ketebalan yang terlalu besar pada material, serta masih terdapatnya porositas yang menyebabkan konsentrasi tegangan yang menyebabkan *crack* pada sampel komposit [32]. Berikut adalah gambar sampel komposit hasil *rolling*,



**Gambar 4.2** Sampel Komposit setelah *Rolling*



**Gambar 4.3** Sampel Komposit yang Pecah Akibat *Rolling*

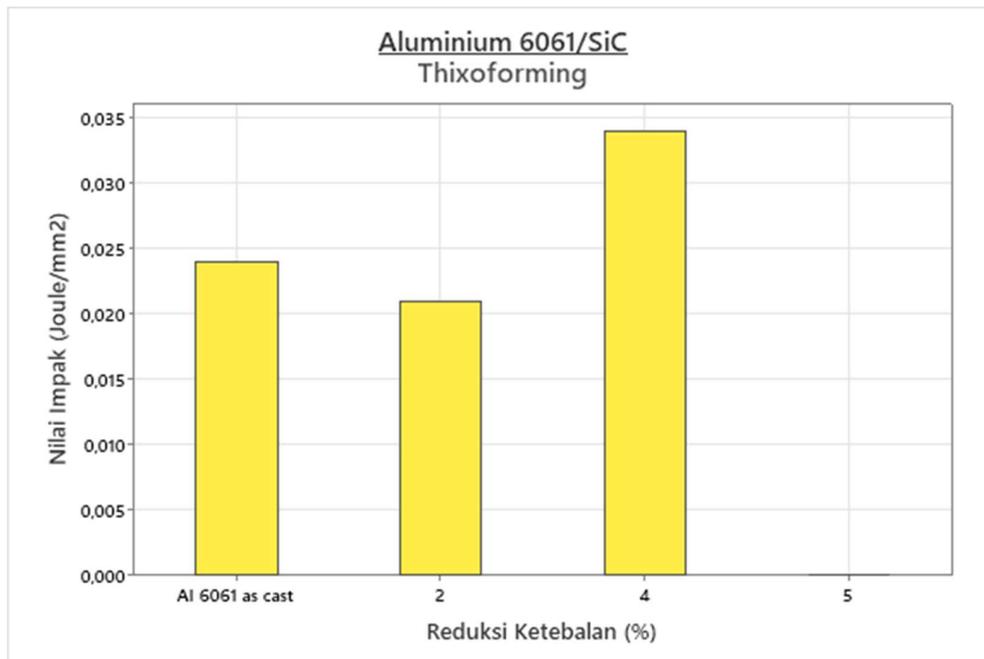
### 4.3 Hasil Pengujian Impak

Dilakukan pengujian impak pada komposit untuk mengetahui tingkat ketangguhan material komposit. Setelah dilakukan pengujian impak, didapatkan hasil nilai ketangguhan dari material komposit yang dapat dilihat sebagai berikut,

**Tabel 4.3** Nilai Hasil Uji Impak Komposit dengan Variabel Reduksi Ketebalan

Variabel Sampel	Sampel ke-	Luas Penampang (l x t)	Energi Diserap (Joule)	Nilai Impak (Joule/mm <sup>2</sup> )	Rata-Rata (Joule/mm <sup>2</sup> )
Al 6061 as cast	1	100	2,7	0,027	0,024
	2	100	2,1	0,021	
	3	100	2,3	0,023	
Sampel reduksi 2%	1	100	1,9	0,019	0,021
	2	100	2,2	0,022	
	3	100	2,1	0,021	
Sampel reduksi 4%	1	100	3,7	0,037	0,034
	2	100	3,5	0,035	
	3	100	2,9	0,029	

Nilai-nilai yang telah diperoleh dari hasil pengujian, kemudian di sajikan dalam bentuk grafik yang dapat dilihat sebagai berikut,

**Gambar 4.4** Grafik Nilai Impak Komposit dengan Variabel Reduksi Ketebalan

Berdasarkan grafik nilai impak komposit dapat dilihat bahwa tingkat ketangguhan dari komposit meningkat seiring dengan penambahan persen reduksi yang diberikan. Namun sampel dengan reduksi ketebalan 2% memiliki nilai yang lebih rendah daripada Al 6061 murni hasil *casting*. Ini disebabkan oleh daya rekat yang lemah antara pengisi logam dan bahan matriks, yang dapat menyebabkan transfer beban yang buruk dan peningkatan kerentanan terhadap keretakan saat terjadi benturan [33]. Adanya peningkatan ketangguhan disebabkan karena deformasi plastis yang terjadi, dan menyebabkan densitas dislokasi meningkat, atau disebut juga dengan *work hardening*. Sampel komposit dengan reduksi ketebalan 4% memiliki nilai tertinggi dari semua sampel yang diujikan. Sedangkan sampel komposit dengan persen reduksi sebesar 5% dianggap gagal karena tidak dapat diujikan, mengingat sampel tersebut mengalami kegagalan setelah dilakukan proses *rolling*.

Adapun bentuk patahan yang dihasilkan oleh komposit ini adalah termasuk patahan getas, yang dapat dilihat pada gambar berikut,



**Gambar 4.5** Patahan Sampel dengan Reduksi Ketebalan 2%



**Gambar 4.6** Patahan Sampel dengan Reduksi Ketebalan 4%

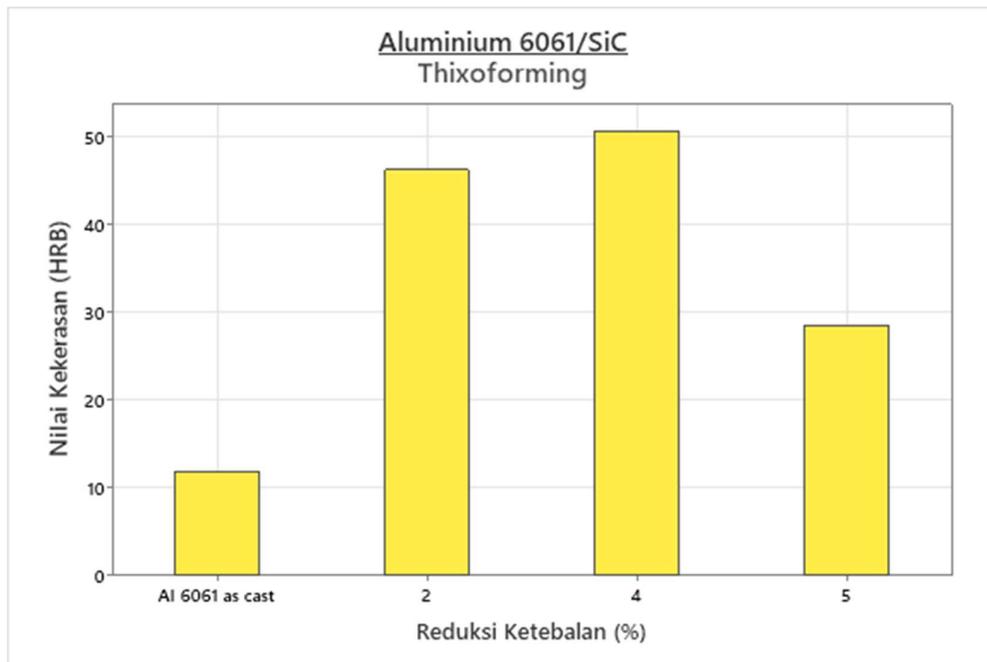
#### 4.4 Hasil Pengujian Kekerasan

Dilakukan pengujian kekerasan pada material komposit untuk menganalisis tingkat kekerasan dari material komposit yang dihasilkan dari variasi reduksi ketebalan. Adapun hasil pengujian kekerasan ini memiliki satuan HRB (*hardness rockwell B*). Berikut nilai kekerasan setiap sampel dapat dilihat pada tabel berikut,

**Tabel 4.4** Hasil Uji Kekerasan dengan Variabel Reduksi Ketebalan

Sampel Komposit	Titik 1 (HRB)	Titik 2 (HRB)	Titik 3 (HRB)	Rata-Rata (HRB)
Al 6061 <i>as cast</i>	12,7	9,3	13,3	11,8
Sampel reduksi 2%	49,6	45,7	43,3	46,2
Sampel reduksi 4%	50,3	51,6	50,0	50,6
Sampel reduksi 5%	26,3	29,3	30,0	28,5

Nilai-nilai yang telah diperoleh dari hasil pengujian, kemudian di sajikan dalam bentuk grafik yang dapat dilihat sebagai berikut,

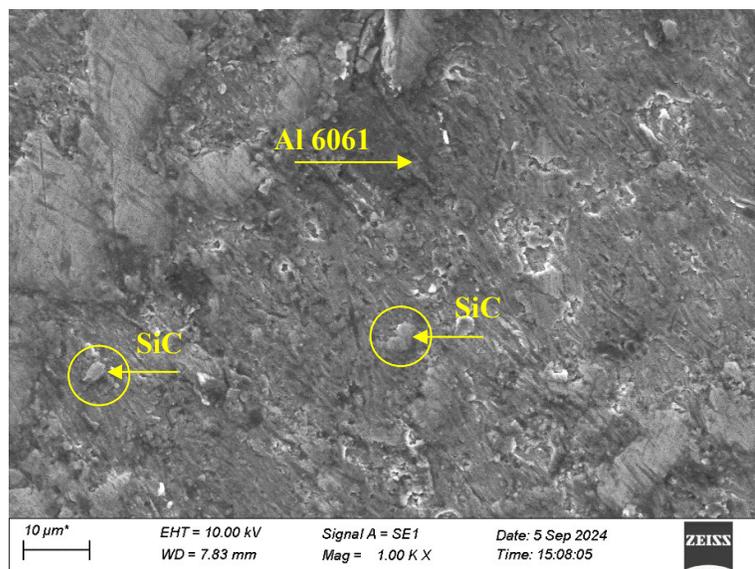


**Gambar 4.7** Grafik Nilai Kekerasan Komposit dengan Variabel Reduksi Ketebalan

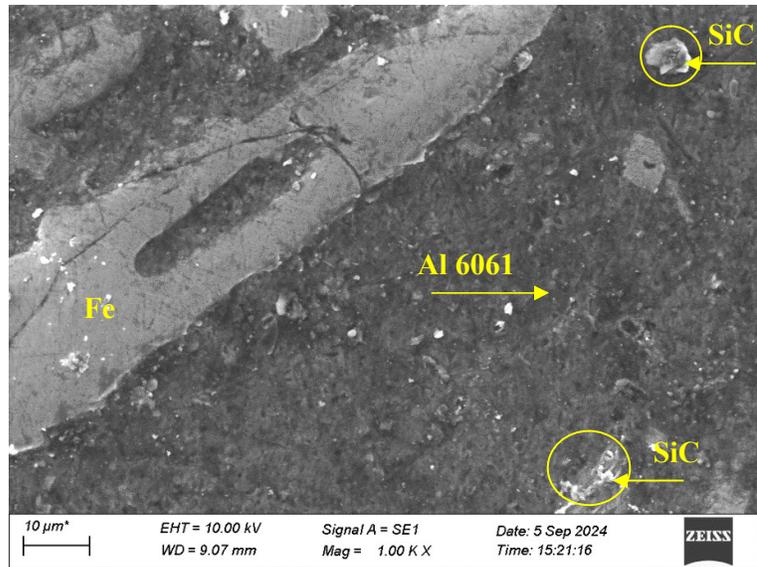
Berdasarkan grafik nilai hasil pengujian kekerasan yang dilakukan pada sampel komposit, dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan kekerasan seiring dengan penambahan persen reduksi ketebalan. Proses *rolling* menghasilkan nilai kekuatan dan kekerasan yang lebih tinggi karena distribusi dislokasi yang tinggi dan heterogen yang diperlukan secara geometris di seluruh ketebalan material [34]. Meskipun tingkat kekerasan komposit cenderung meningkat seiring dengan peningkatan persen reduksi ketebalan, pada sampel dengan persen reduksi ketebalan 5%, nilai kekerasan menurun drastis. Hal ini masuk akal karena sebelumnya sampel reduksi ketebalan 5% mengalami kegagalan saat proses *rolling*, sehingga dapat dipastikan sampel komposit ini mengalami penurunan kekuatan.

#### 4.5 Hasil Pengamatan Metalografi

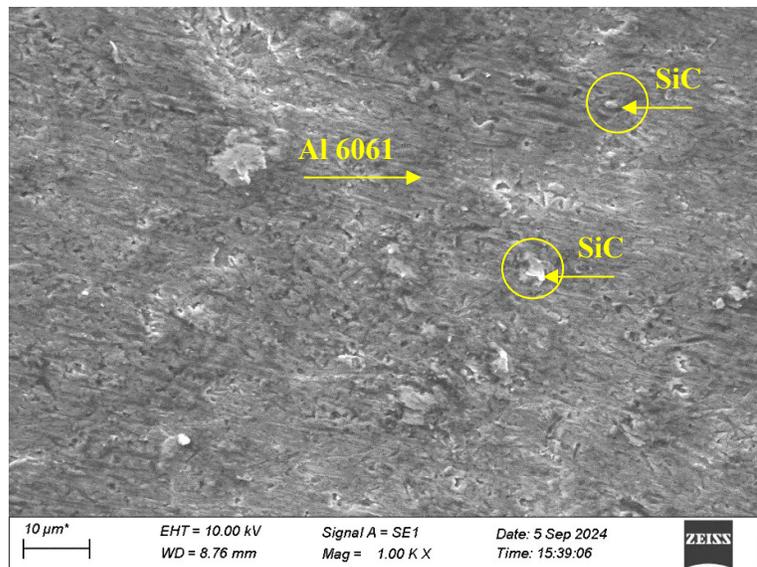
Selain dilakukan pengujian *destructive* pada beberapa sampel komposit dengan variasi reduksi ketebalannya masing-masing, dilakukan juga pengamatan metalografi dengan menggunakan SEM (*scanning electron microscopy*). Pengamatan dilakukan pada bagian permukaan sampel komposit. Hasil yang didapatkan dari pengamatan ini di antaranya: gambar struktur mikro komposit, dan komposisi dari setiap atom penyusun komposit. Berikut adalah gambar struktur mikro dari setiap variasi reduksi ketebalan komposit dengan perbesaran 1000x,



**Gambar 4.8** Sampel Komposit dengan Reduksi Ketebalan 2%



**Gambar 4.9** Sampel Komposit dengan Reduksi Ketebalan 4%

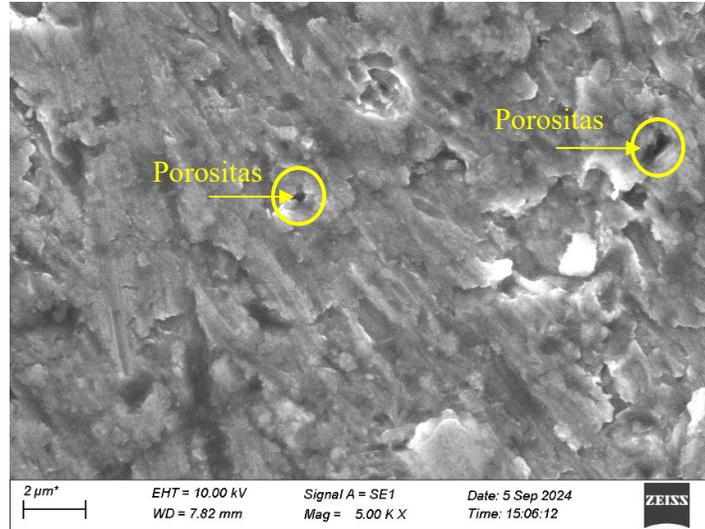


**Gambar 4.10** Sampel Komposit dengan Reduksi Ketebalan 5%

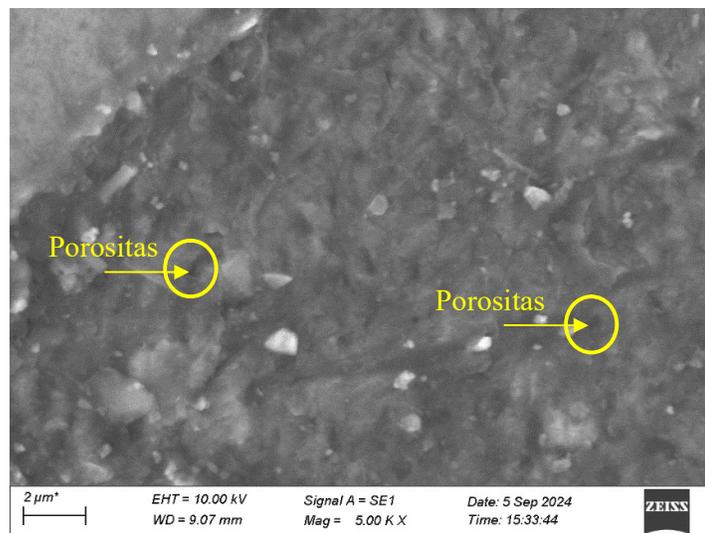
Pada gambar struktur mikro setiap sampel komposit di atas, diasumsikan SiC telah membentuk presipitat dengan Mg, sehingga menjadi  $Mg_2Si$  (*Magnesium Silicide*) yang telah tersebar di seluruh permukaan komposit. Hal tersebut berdasarkan penelitian sebelumnya yang membuktikan bahwa Pendinginan dan pemanasan ulang secara terus menerus pada paduan

aluminium 6061 menyebabkan terbentuknya endapan  $Mg_2Si$ , yang memengaruhi kekuatan dan rekristalisasi selama pembentukan dan perlakuan panas yang diberikan [35]. Presipitat ini dapat dilihat pada area yang dilingkari dengan ciri-ciri: bentuk yang tidak beraturan, tampak lebih menonjol dibandingkan permukaan sekitarnya, dan berwarna lebih cerah. Presipitat ini berperan sangat penting dalam komposit, karena akan meningkatkan kekuatan material. Presipitat akan meningkatkan modulus elastisitas komposit dan menghambat pergerakan dislokasi. Sesuai dengan literatur yang ada, presipitat ini dihasilkan dari proses pembentukan sebelumnya yaitu: *stir casting* dan *thixoforming*, serta *heat treatment* berupa *artificial aging*.

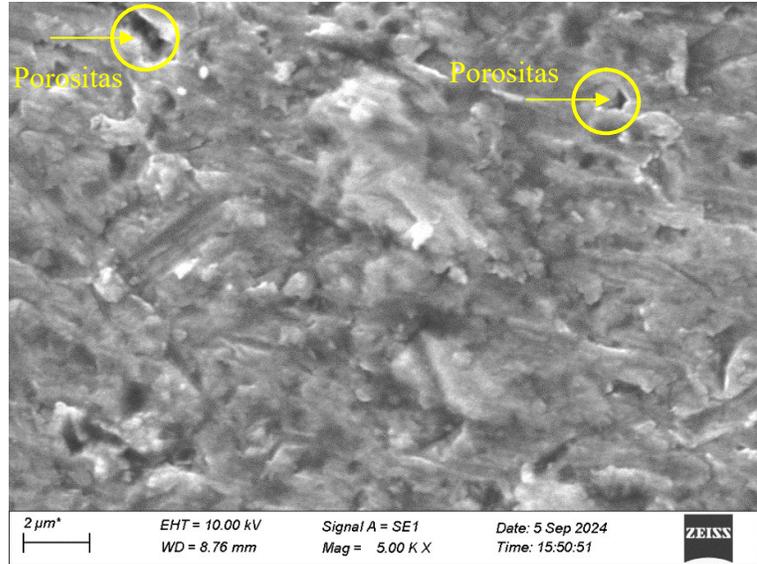
Dari ketiga gambar struktur mikro hasil SEM, dapat dilihat bahwa semakin besar persentase reduksi ketebalan yang diberikan pada komposit, maka akan semakin luas area penyebaran dari presipitat yang ada. Pada sampel dengan reduksi ketebalan 2%, presipitat masih tergolong berukuran besar dan berada pada jarak yang saling berdekatan. Kemudian pada sampel reduksi 4%, presipitat mulai tersebar ke seluruh permukaan. Pada akhirnya di sampel reduksi 5%, penampakan presipitat sudah memiliki ukuran yang jauh lebih kecil dari sebelumnya, dan tersebar di seluruh permukaan sampel. Pengerolan dingin pada paduan Al-Mg-Si memperpanjang distribusi butiran dan meningkatkan dislokasi [36]. Proses *rolling* juga memiliki kerugian, yaitu dapat memicu pembentukan porositas baru pada material, karena adanya konsentrasi tegangan yang melebihi kekuatan ikatan antar atom. Pembentukan porositas dalam material dapat ditingkatkan melalui *debonding* partikel akibat gaya tekan selama deformasi kondisi padat [37]. Penelitian ini menemukan bahwa meningkatnya keberadaan porositas disebabkan karena peningkatan persen reduksi ketebalan yang dilakukan pada komposit. Porositas sendiri dicirikan secara visual, memiliki bentuk mulai dari: bulat, memanjang, hingga tak beraturan. Porositas juga memiliki warna yang lebih gelap dibandingkan dengan permukaan yang lainnya. Berikut contoh porositas yang dapat dilihat pada gambar berikut,



**Gambar 4.11** Cacat pada Sampel dengan Reduksi 2%



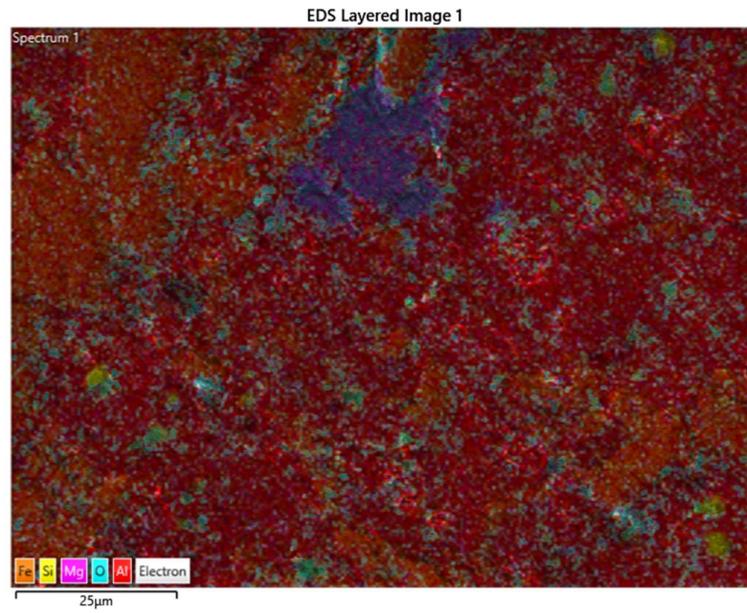
**Gambar 4.12** Cacat pada Sampel dengan Reduksi 4%



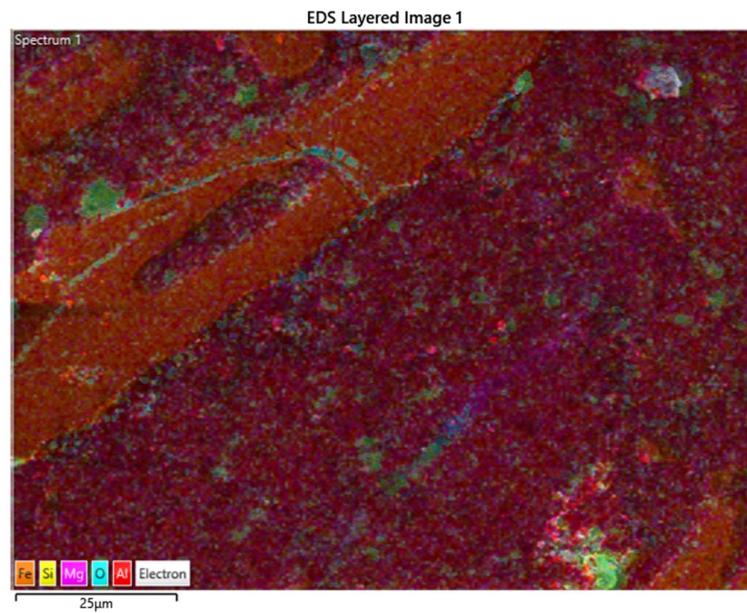
**Gambar 4.13** Cacat pada Sampel dengan Reduksi 5%

Pada hasil SEM ketiga sampel dengan perbesaran 5000x, dapat terlihat perkembangan kemunculan porositas sebagai akibat dari hasil reduksi ketebalan dengan proses *rolling*. Porositas pada sampel dengan 2% reduksi ketebalan sudah mulai muncul, ditandai dengan area hitam pada gambar namun masih tergolong kecil dan sedikit. Kemudian pada sampel dengan 4% reduksi ketebalan, meskipun porositas terlihat lebih samar, jumlah dari porositas ini sendiri semakin banyak. Pada akhirnya, di sampel dengan 5% reduksi ketebalan, porositas terlihat menjadi semakin banyak dan memanjang. Porositas inilah yang menjadi pemicu utama dari kegagalan material komposit, dibuktikan dengan rusaknya sampel dengan 5% reduksi ketebalan.

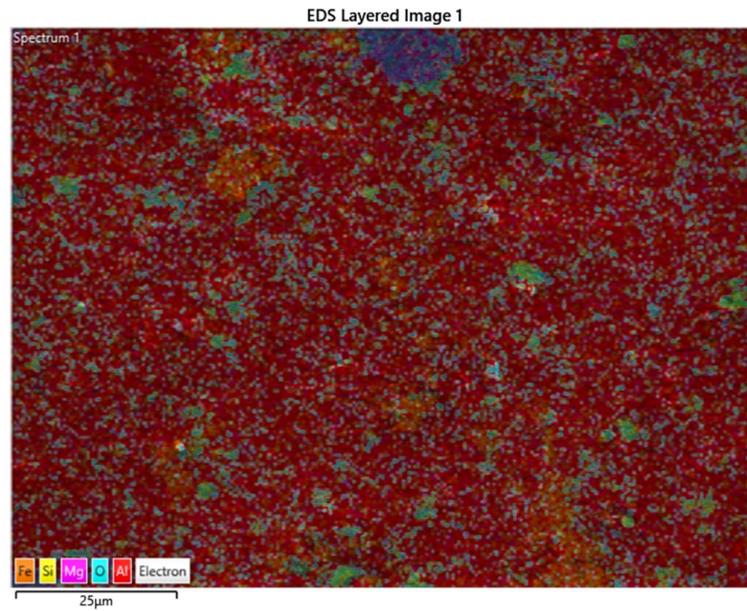
Presipitat yang ada pada sampel komposit merupakan hasil pembentukan fasa baru dari partikel SiC dan Mg sehingga menghasilkan  $Mg_2Si$ . Selain kedua partikel tersebut, terdapat juga beberapa jenis partikel lain yang ada dalam komposit. Berikut adalah gambar gabungan mapping EDS (*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*) dari setiap komposisi partikel penyusun komposit,



**Gambar 4.14** EDS *Mapping* Sampel Komposit Hasil Reduksi 2%

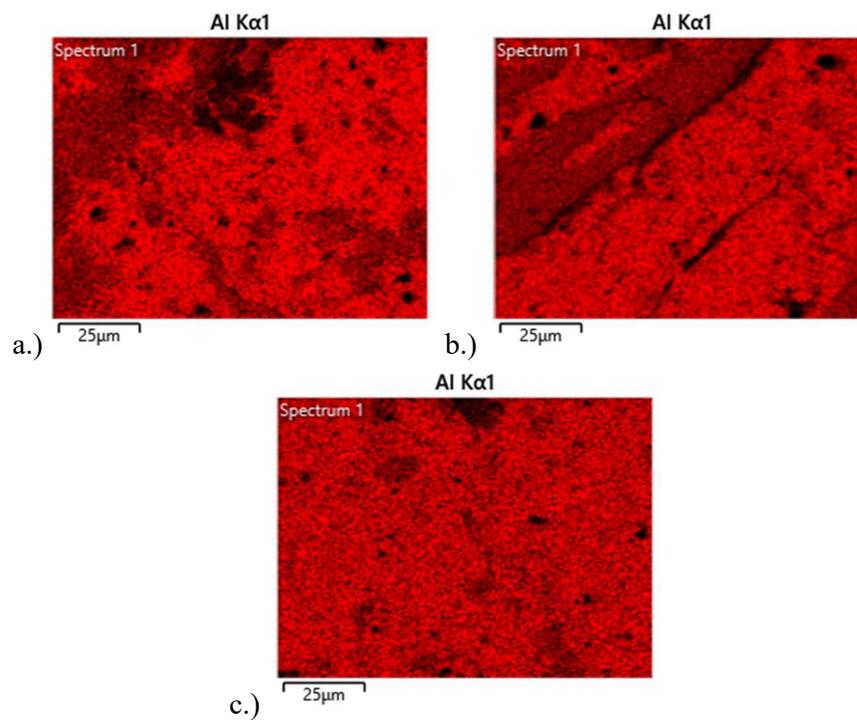


**Gambar 4.15** EDS *Mapping* Sampel Komposit Hasil Reduksi 4%

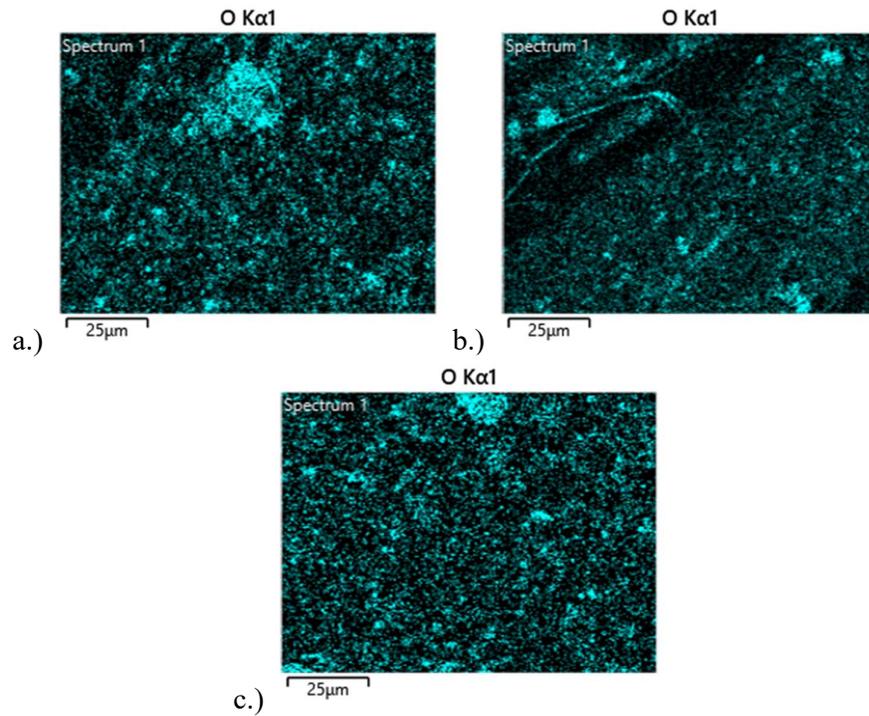


**Gambar 4.16** EDS *Mapping* Sampel Komposit Hasil Reduksi 5%

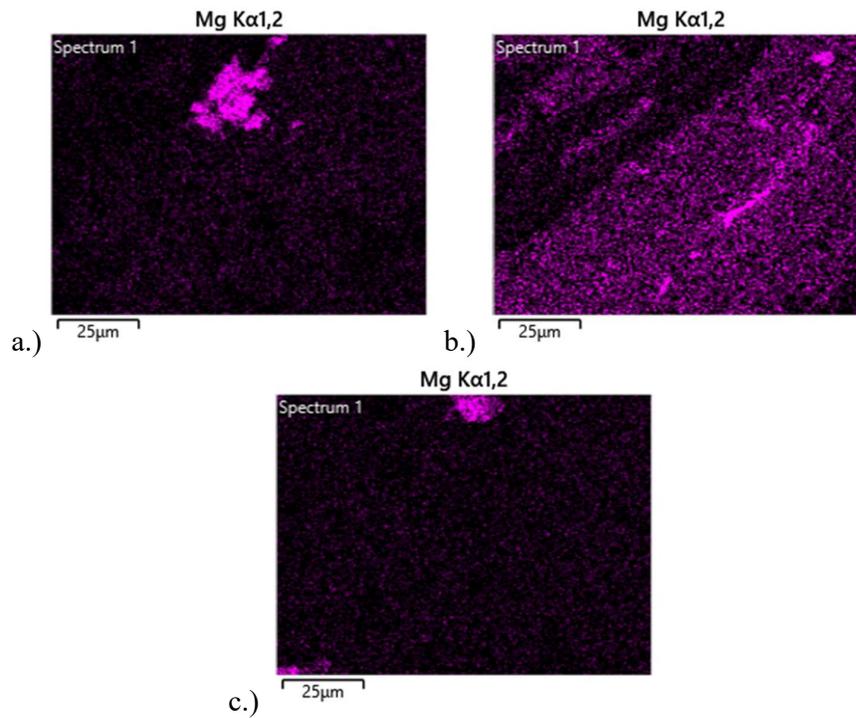
EDS mapping dari setiap partikel penyusun komposit, dapat dilihat pada gambar-gambar berikut,



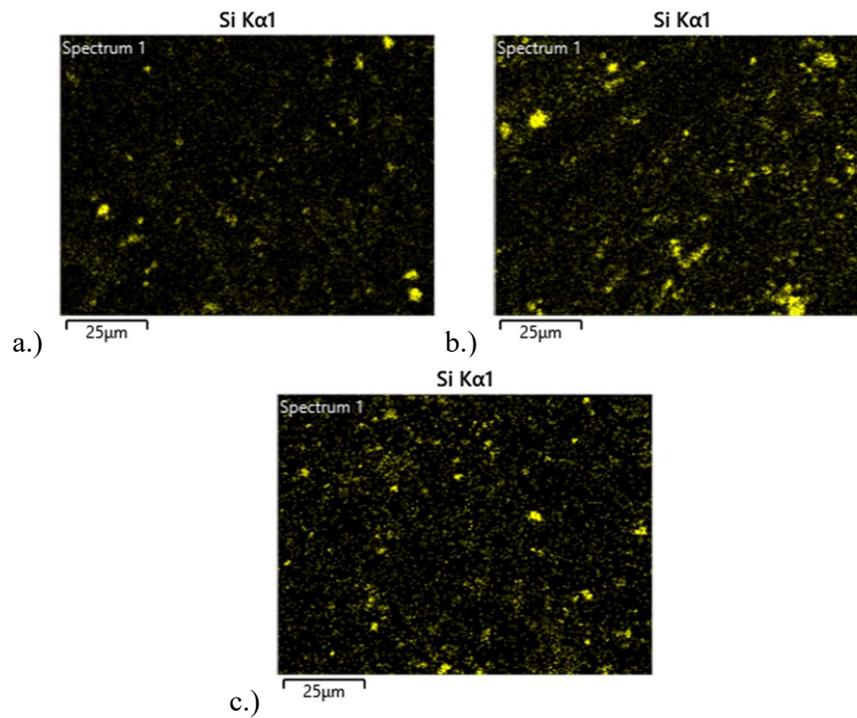
**Gambar 4.17** Unsur Al pada Komposit (a. Reduksi 2%; b. Reduksi 4%; c. Reduksi 5%)



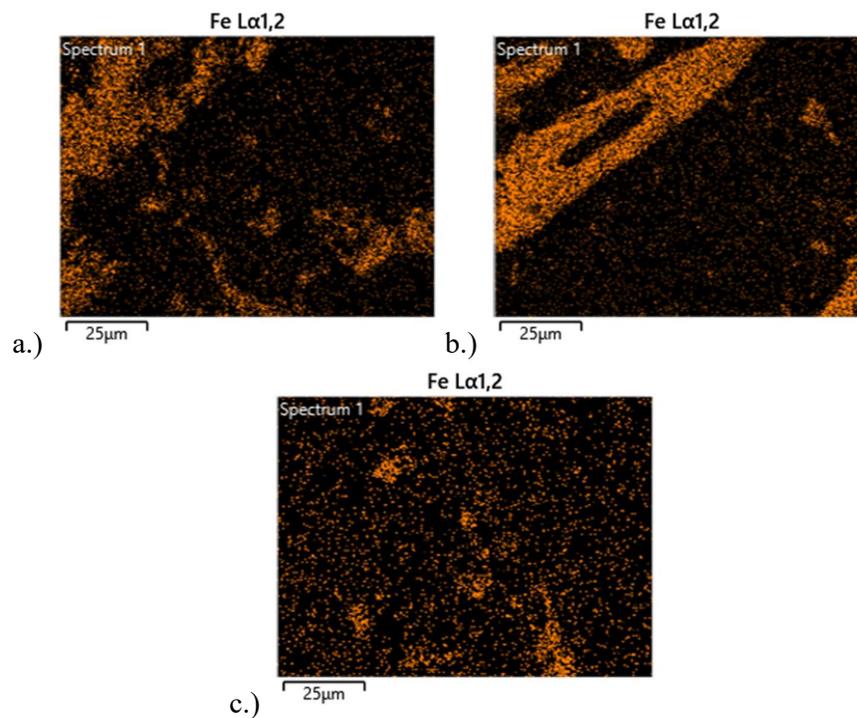
**Gambar 4.18** Unsur O pada Komposit (a. Reduksi 2%; b. Reduksi 4%; c. Reduksi 5%)



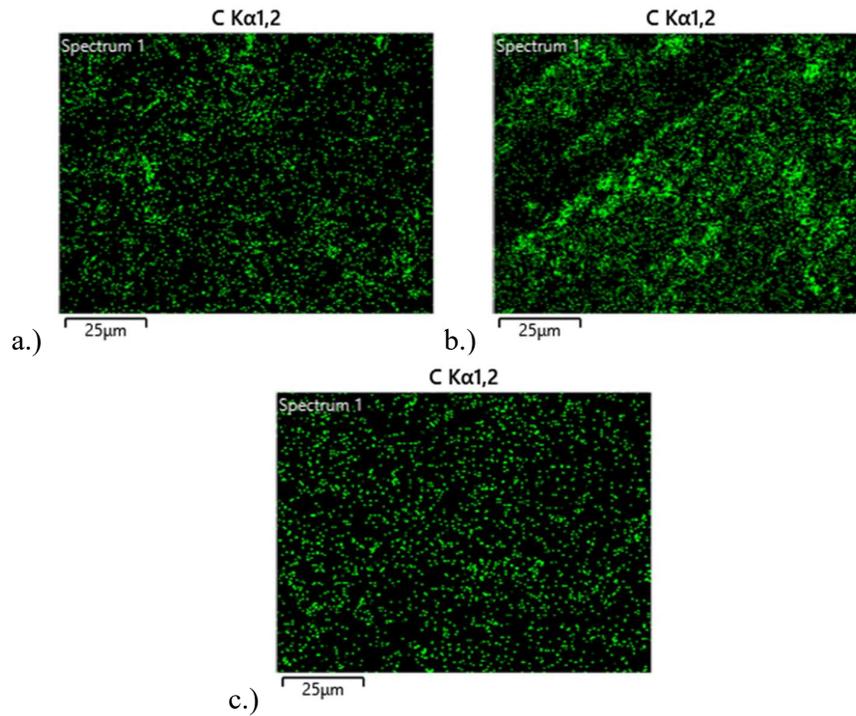
**Gambar 4.19** Unsur Mg pada Komposit (a. Reduksi 2%; b. Reduksi 4%; c. Reduksi 5%)



**Gambar 4.20** Unsur Si pada Komposit (a. Reduksi 2%; b. Reduksi 4%; c. Reduksi 5%)

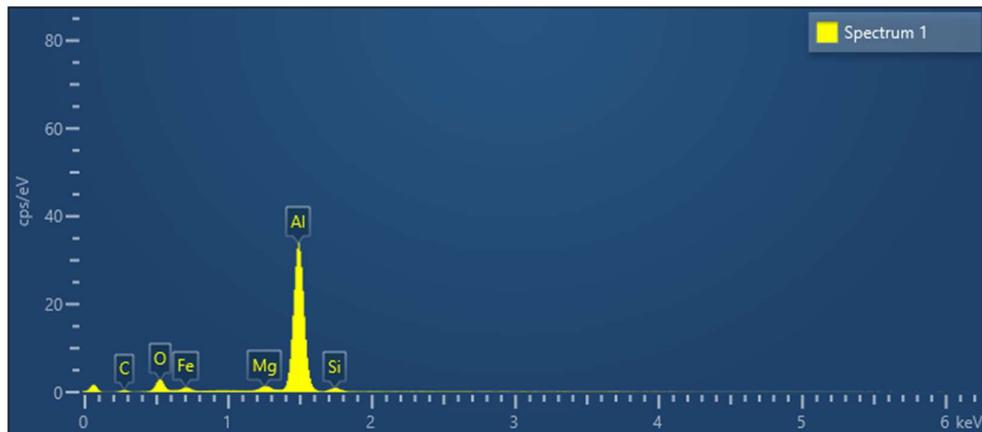


**Gambar 4.21** Unsur Fe pada Komposit (a. Reduksi 2%; b. Reduksi 4%; c. Reduksi 5%)



**Gambar 4.22** Unsur C pada Komposit (a. Reduksi 2%; b. Reduksi 4%; c. Reduksi 5%)

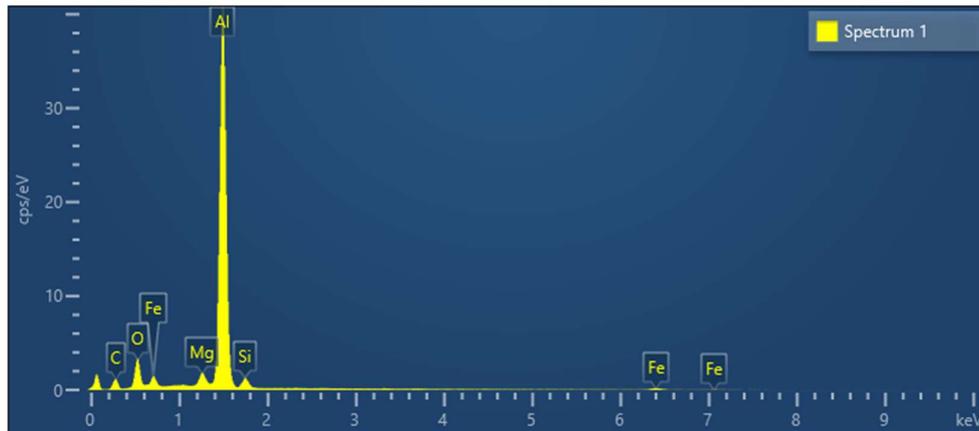
Spektrum dan komposisi dari setiap partikel penyusun sampel komposit dapat dilihat pada gambar-gambar berikut,



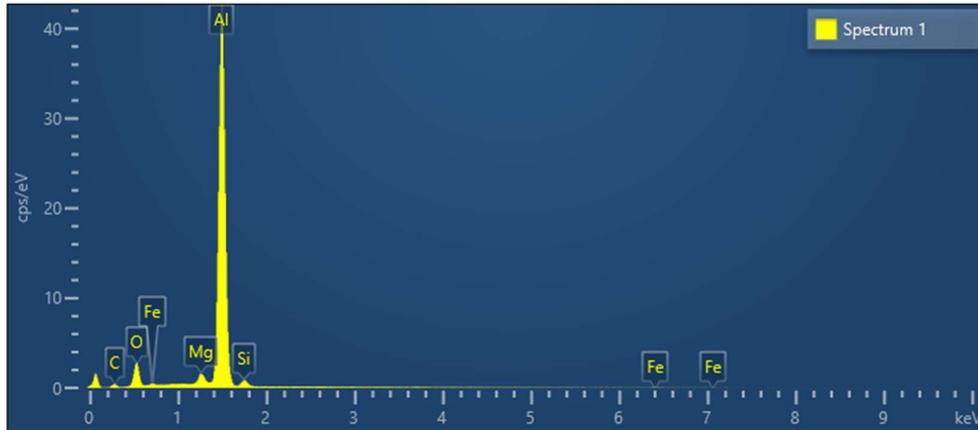
**Gambar 4.23** Spektrum EDS Sampel dengan Reduksi 2%

**Tabel 4.5** Komposisi Unsur Sampel Komposit dengan Reduksi 2% Hasil EDS

Spectrum 1				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
C	K series	8.56	0.37	17.22
O	K series	9.39	0.14	14.19
Mg	K series	1.73	0.06	1.72
Al	K series	67.04	0.42	60.05
Si	K series	2.50	0.08	2.15
Fe	L Series	10.78	0.39	4.66
Total		100.00		100.00

**Gambar 4.24** Spektrum EDS Sampel dengan Reduksi 4%**Tabel 4.6** Komposisi Unsur Sampel Komposit dengan Reduksi 4% Hasil EDS

Spectrum 1				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
C	K series	14.69	0.36	27.80
O	K series	8.48	0.12	12.05
Mg	K series	1.78	0.05	1.66
Al	K series	61.97	0.37	52.22
Si	K series	2.34	0.07	1.90
Fe	L Series	10.75	0.34	4.38
Total		100.00		100.00



**Gambar 4.25** Spektrum EDS Sampel dengan Reduksi 5%

**Tabel 4.7** Komposisi Unsur Sampel Komposit dengan Reduksi 5% Hasil EDS

Spectrum 1				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
C	K series	7.80	0.37	15.27
O	K series	8.85	0.14	13.00
Mg	K series	1.78	0.06	1.72
Al	K series	77.45	0.42	67.45
Si	K series	2.00	0.07	1.67
Fe	L Series	2.12	0.34	0.89
Total		100.00		100.00

Berdasarkan hasil EDS yang telah dilakukan pada sampel komposit, diperoleh hasil bahwa kandungan unsur SiC yang berperan sebagai penguat dan membentuk presipitat  $Mg_2Si$  menjadi lebih tersebar dan memiliki butir yang lebih kecil dikarenakan meningkatnya persentase reduksi ketebalan pada sampel. Ukuran butir dan penyebaran presipitat yang luas ini penting untuk menghambat terjadinya pergerakan dislokasi di dalam material komposit, sehingga akan meningkatkan kekuatan dan kekerasan material. Pada hasil EDS sampel komposit, dapat dilihat pula keberadaan unsur oksigen (O) yang cukup banyak. Penyebab munculnya unsur oksigen karena adanya oksidasi yang terjadi selama proses pembentukan dan perlakuan sampel. peristiwa oksidasi dipicu akibat proses-proses yang dilakukan pada udara terbuka, seperti: *stir casting*, *thixoforming*, bahkan *rolling*. Permukaan material akan kontak langsung dengan oksigen dari udara terbuka sehingga akan

menciptakan lapisan oksidasi. Munculnya oksidasi dapat memberikan kerugian yaitu menyebabkan material menjadi rapuh karena adanya porositas yang memicu *crack*. Namun, oksidasi juga dapat meningkatkan nilai kekerasan dari material. Hal itu terbukti dengan hasil pengujian kekerasan yang menghasilkan nilai cukup tinggi.

#### 4.6 Diskusi Hasil

Setelah diperoleh beberapa data hasil pengujian terhadap sampel komposit dengan masing-masing variasi persen reduksi ketebalan yang diberikan, dapat dilihat bahwa kenaikan persen reduksi ketebalan yang diberikan kepada komposit, akan meningkatkan sifat mekanik dari komposit, seperti ketangguhan dan kekerasan. Berdasarkan hasil uji impak yang dilakukan pada beberapa variasi sampel aluminium, menunjukkan peningkatan hasil dari setiap pemberian persentase reduksi ketebalan. Nilai tertinggi dihasilkan oleh sampel komposit dengan persen reduksi 4%, yaitu sebesar 0,034 Joule/mm<sup>2</sup>. Namun, sebelum memperoleh nilai tertinggi tersebut, sampel komposit dengan reduksi ketebalan sebesar 2% memiliki nilai ketangguhan yang lebih kecil daripada sampel Al 6061 murni hasil casting, yaitu 0,024 Joule/mm<sup>2</sup> untuk Al 6061 as cast, dan 0,021 Joule/mm<sup>2</sup> untuk sampel komposit dengan reduksi ketebalan sebesar 2%. Hal ini diasumsikan terjadi karena interaksi antara matriks dan penguat hasil dari proses reduksi ketebalan sebanyak 2%, masih belum optimal. Kemudian karena distribusi partikel penguat SiC yang belum merata pada sampel komposit, baik hasil dari proses *stir casting* maupun *thixoforming*, yang menyebabkan adanya agregasi partikel yang menjadi titik konsentrasi tegangan, sehingga menurunkan nilai ketangguhan. Hal ini disebabkan agregasi pengisi dapat meningkatkan konduktivitas termal tetapi dapat merusak sifat mekanik seperti kekuatan dan ketangguhan[38].

Selanjutnya, pada sampel komposit dengan reduksi ketebalan 4% memiliki nilai ketangguhan yang lebih tinggi dibandingkan dengan sampel uji lainnya. Hal ini diasumsikan karena butir yang terdapat pada komposit sudah berubah menjadi lebih halus, sehingga dapat mengisi porositas lebih baik dan

menghambat pergerakan dislokasi. Selain itu, asumsi lainnya adalah, distribusi partikel SiC menjadi lebih merata karena peningkatan reduksi ketebalan yang dilakukan pada sampel komposit. Ukuran butiran yang lebih halus dari penguat mempengaruhi ketangguhan retak, karena defleksi meningkatkan ketangguhan retak pada komposit dengan butiran matriks halus[39]. Tidak dilakukan pengujian impak pada sampel dengan reduksi 5% karena sampel mengalami kegagalan berupa pecah saat proses *rolling*. Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, kegagalan ini disebabkan karena pemberian reduksi ketebalan yang terlalu besar, dan adanya porositas yang mendorong kemunculan *crack*. Selain hal tersebut, kegagalan ini diasumsikan juga karena adanya cacat permukaan sampel akibat dari preparasi yang kurang sempurna sebelum dilakukannya proses *rolling*. Retak permukaan selama permesinan dapat mengakibatkan kegagalan fatik selama dilakukannya *rolling*[40].

Pengujian kekerasan pada sampel komposit Al 6061-SiC dengan variasi persen reduksi memberikan hasil yang menunjukkan adanya peningkatan nilai kekerasan seiring dengan peningkatan persen reduksi pada sampel komposit. Peningkatan ini disebabkan karena adanya *work hardening* selama pemberian reduksi ketebalan, sehingga meningkatkan densitas dislokasi dan tingkat kekerasan komposit. Selain itu, peningkatan kekerasan juga diperkirakan akibat pengecilan ukuran butir penguat, serta distribusi yang semakin merata dari penguat seiring dengan peningkatan reduksi, sehingga membantu menghambat pergerakan dislokasi dan ikut membantu mengisi porositas yang ada pada komposit. Hal ini berdasarkan penelitian pada material nanokristalin, dimana pelunakan ukuran butir pada material nanokristalin menyebabkan peningkatan kekerasan dengan penurunan ukuran butir[41]. Nilai kekerasan sampel komposit dengan reduksi ketebalan sebesar 5%, menunjukkan penurunan nilai yang drastis dari sampel yang lainnya. Hal ini diasumsikan karena terjadinya deformasi yang berlebihan pada komposit, sehingga menurunkan densitas dislokasi dan kekerasan dari material. Selain itu, persen reduksi ketebalan yang berlebihan ini, juga dapat menyebabkan *crack* pada komposit. hal itu juga menjadi penyebab menurunnya nilai

kekerasan. Pengerasan regangan yang berlebihan meningkatkan beban penghancuran rata-rata hingga 100% dan dapat menyebabkan perubahan mode deformasi dan hilangnya stabilitas[42].

Setelah dilakukan pengamatan metalografi pada komposit Al 6061-SiC, ditemukan cukup banyak unsur penyusun dari komposit tersebut, di antaranya adalah: karbon (C), Magnesium (Mg), Aluminium (Al), Oksigen (O), Silikon (Si), dan Besi (Fe). Variasi komposisi yang ada pada sampel komposit diasumsikan karena proses pembentukan yang kurang sempurna. Ada kemungkinan sampel terkontaminasi dengan bahan lain yang menyebabkan kemunculan unsur yang berlebih, seperti contohnya Fe. Penampakan Fe yang cukup besar ini kemungkinan disebabkan karena adanya kontaminasi dari cetakan terhadap sampel komposit ataupun ikut meleburnya pengaduk stir casting saat dilakukannya proses pengecoran komposit. Selain itu, kontaminasi juga disebabkan oleh oksigen, yang akan menyebabkan terjadinya oksidasi pada komposit. Kontaminasi oksigen ini terjadi mulai dari proses pembentukan, hingga *heat treatment*, dikarenakan setiap proses dilakukan pada ruang dengan udara terbuka.