

## BAB IV

### HASIL PENELITIAN

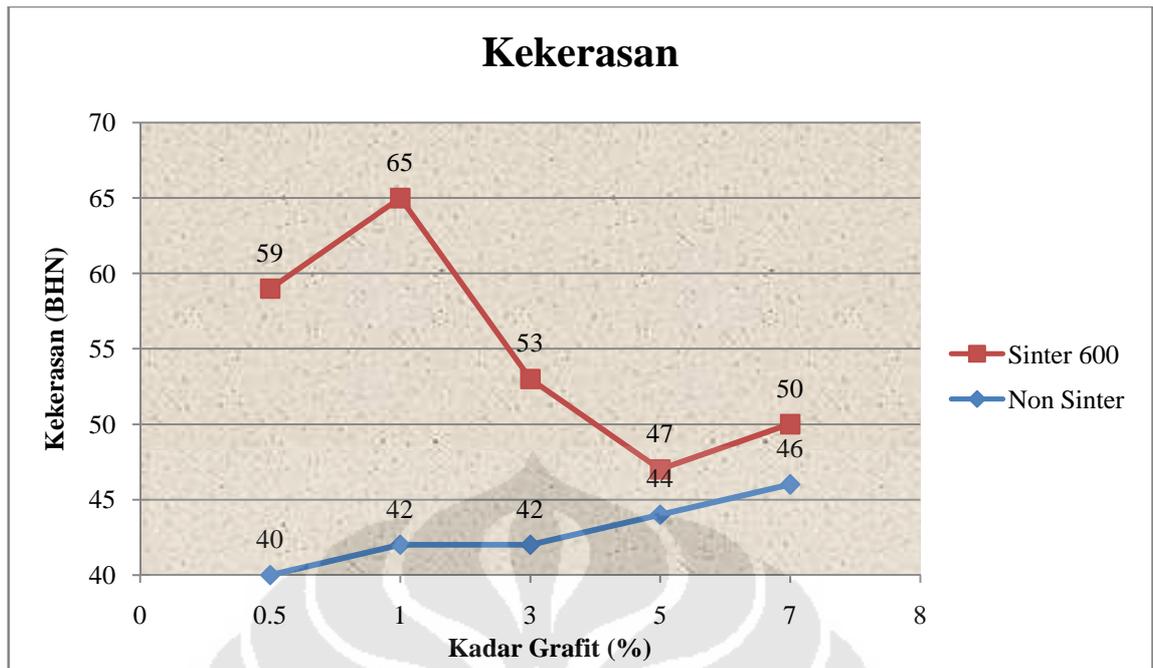
#### 4.1 PENGUJIAN KEKERASAN

Pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan 3 buah sample untuk setiap variable % Vf grafit yang hasilnya dirata-ratakan.

**Tabel 4.1.** Data pengujian kekerasan

Perlakuan Sample	Nilai kekerasan rata-rata (BHN)
0,5 % Vf Grafit Sinter	59
1 % Vf Grafit Sinter	65
3 % Vf Grafit Sinter	53
5 % Vf Grafit Sinter	47
7 % Vf Grafit Sinter	50
0,5 % Vf Grafit Non Sinter	40
1 % Vf Grafit Non Sinter	42
3 % Vf Grafit Non Sinter	42
5 % Vf Grafit Non Sinter	44
7 % Vf Grafit Non Sinter	46

Hubungan kekerasan terhadap variabel %Vf grafit dapat dilihat pada grafik dibawah ini. Dimana grafik 4.1 merupakan grafik perbandingan untuk sample komposit Al-C yang mengalami proses sinter dan non sinter.



**Gambar 4.1.** Grafik hubungan kekerasan terhadap variabel % Vf grafit

## 4.2 PENGUJIAN POROSITAS DAN DENSITAS

### 4.2.1 Pengujian Densitas

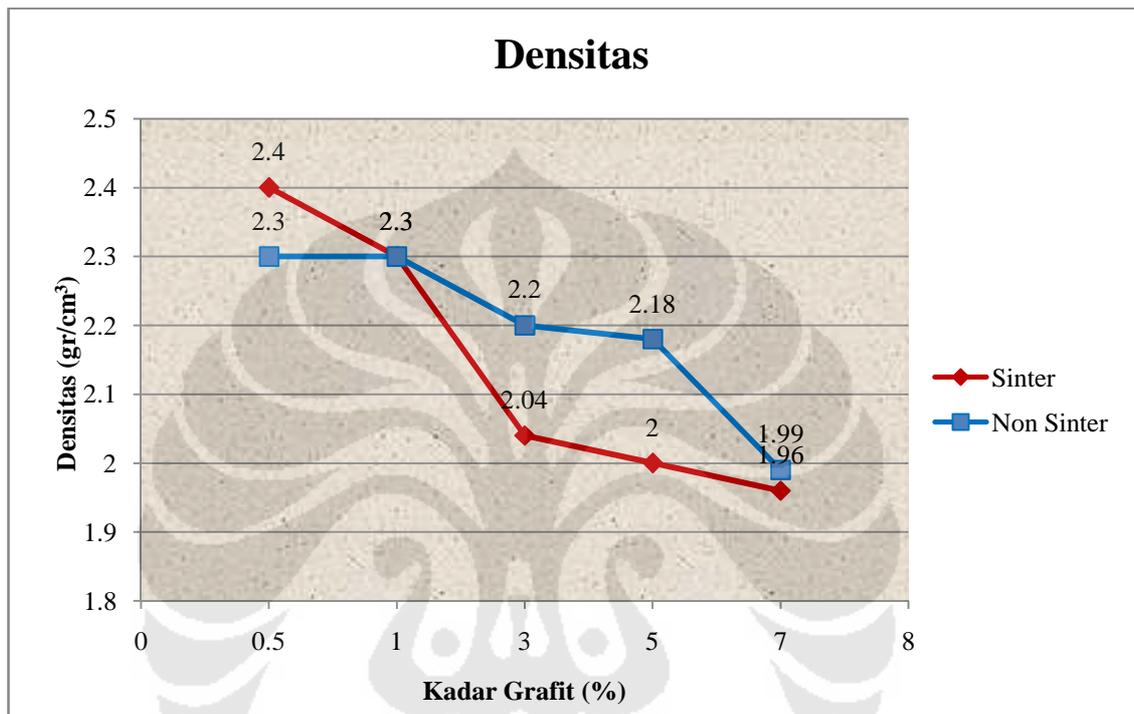
Pengujian densitas dilakukan dengan menggunakan 2 buah sample untuk setiap variabel % Vf grafit. Data pengujian yang didapatkan yaitu data berat kering sample, data berat sample dalam air ketika sample digantung mengambang dalam air dan volume sample.

**Tabel 4.2.** Data pengujian densitas

Perlakuan Sample	Nilai densitas rata-rata (gr/cm <sup>3</sup> )
0,5 % Vf Grafit Non Sinter	2,3
1 % Vf Grafit Non Sinter	2,3
3 % Vf Grafit Non Sinter	2,2
5 % Vf Grafit Non Sinter	2,18
7 % Vf Grafit Non Sinter	1,99
0,5% Vf Grafit Sinter	2,4
1 % Vf Grafit Sinter	2,3
3 % Vf Grafit Sinter	2,04

5 % Vf Grafit Sinter	2,00
7 % Vf Grafit Sinter	1,96

Hubungan densitas terhadap variabel % Vf grafit dapat dilihat pada grafik dibawah ini. Dimana grafik 4.2 merupakan grafik perbandingan untuk sample komposit Al-C yang mengalami proses sinter dan non sinter.



**Gambar 4.2.** Grafik hubungan densitas terhadap variabel % Vf grafit

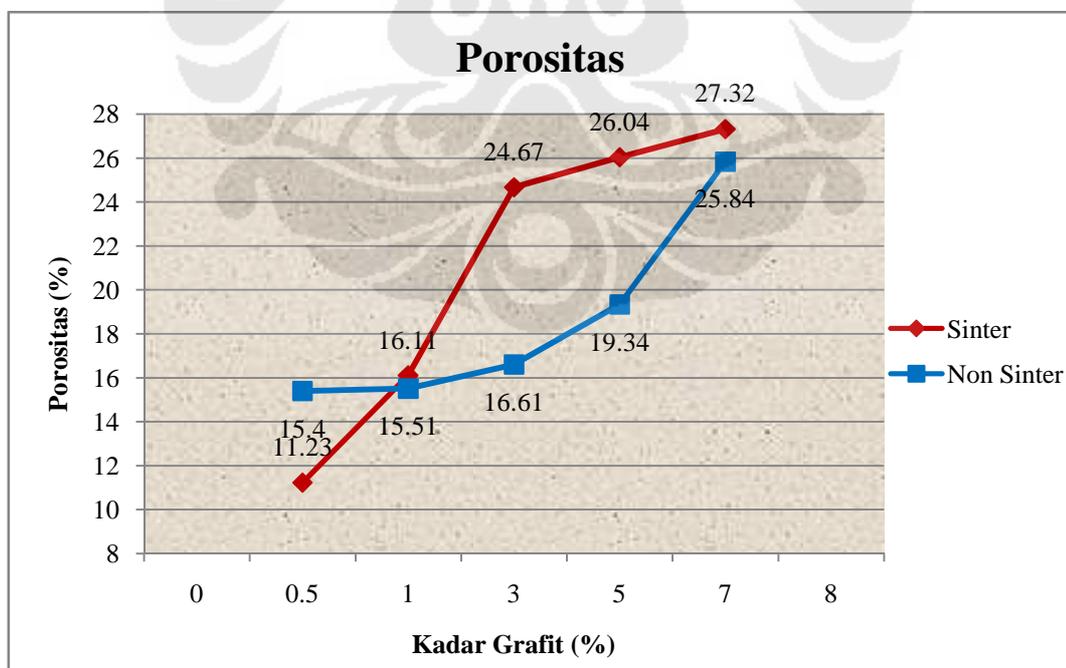
#### 4.2.2 Pengujian Porositas

Pengujian porositas juga dilakukan dengan menggunakan 2 buah sample untuk setiap variabel % Vf grafit. Pengujian untuk porositas ini dilakukan bersamaan dengan pengujian densitas sehingga data yang di dapatkan sama dengan data hasil pengujian densitas. Data pengujian yang didapatkan yaitu data berat kering sample, data berat sample dalam air ketika sample digantung mengambang dalam air dan volume sample, sehingga didapatkan nilai densitas percobaan yang telah dilakukan pada pengujian densitas sebelumnya. Data lain yang didapatkan untuk pengujian porositas adalah data densitas teoritis. Nilai porositas didapatkan dari perbandingan selisih nilai densitas percobaan dan densitas teoritis dibagi nilai densitas teoritisnya.

**Tabel 4.3.** Data pengujian porositas

Perlakuan Sample	Nilai porositas rata-rata (%)
0,5 % Vf Grafit Non Sinter	15,40
1 % Vf Grafit Non Sinter	15,51
3 % Vf Grafit Non Sinter	16,61
5 % Vf Grafit Non Sinter	19,34
7 % Vf Grafit Non Sinter	25,86
0,5% Vf Grafit Sinter	11,23
1 % Vf Grafit Sinter	16,11
3 % Vf Grafit Sinter	24,67
5 % Vf Grafit Sinter	26,04
7 % Vf Grafit Sinter	27,32

Hubungan porositas terhadap variabel %Vf grafit dapat dilihat pada grafik dibawah ini. Dimana grafik 4.3 merupakan grafik perbandingan untuk sample komposit Al-C yang mengalami proses sinter dan non sinter.



**Gambar 4.3.** Grafik hubungan porositas terhadap variabel % Vf grafit

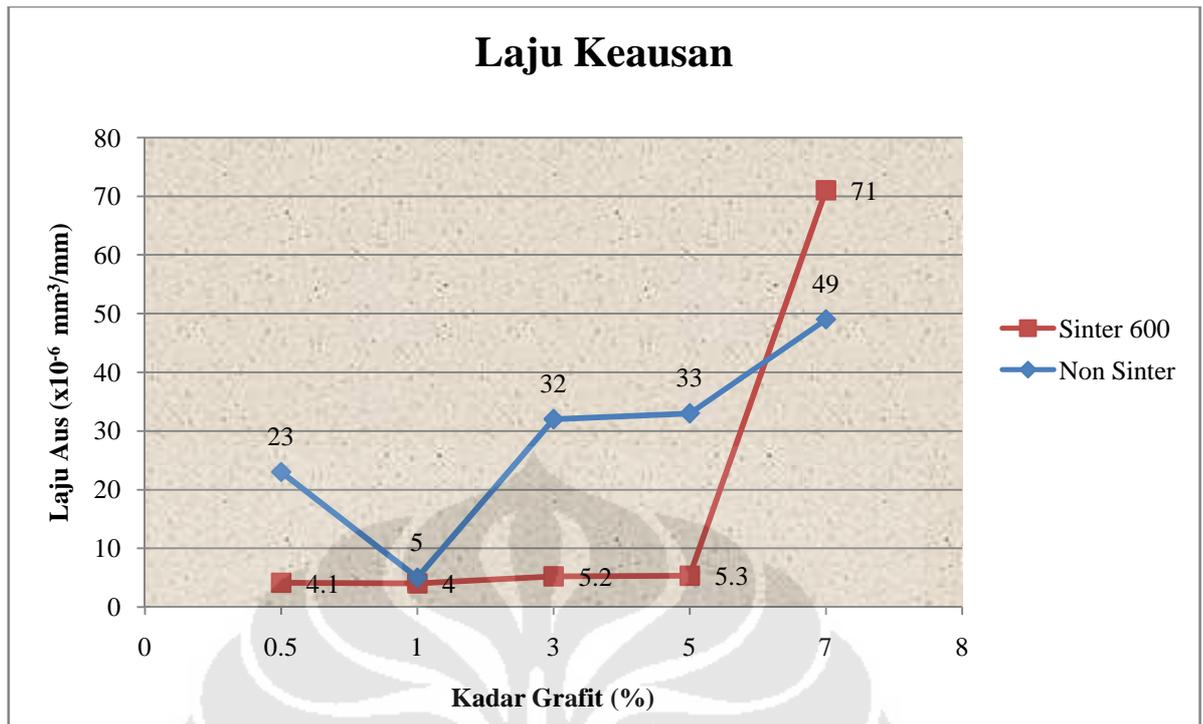
### 4.3 UJI AUS

Pengujian keausan dilakukan dengan menggunakan 2 buah sample untuk setiap variable %Vf grafit yang hasilnya dirata-ratakan, dimana setiap sample diuji laju keausannya pada 2 titik yang berbeda sehingga didapat nilai keausan dari setiap sample.

**Tabel 4.4.** Data pengujian laju aus

<b>Perlakuan Sample</b>	<b>Nilai laju aus rata-rata (<math>\times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{mm}</math>)</b>
0,5 % Vf Grafit Non Sinter	23
1 % Vf Grafit Non Sinter	5
3 % Vf Grafit Non Sinter	32
5 % Vf Grafit Non Sinter	33
7 % Vf Grafit Non Sinter	49
0,5% Vf Grafit Sinter	4,1
1 % Vf Grafit Sinter	4,0
3 % Vf Grafit Sinter	5,2
5 % Vf Grafit Sinter	5,3
7 % Vf Grafit Sinter	71

Hubungan laju aus terhadap variabel %Vf grafit dapat dilihat pada grafik dibawah ini. Dimana grafik 4.4 merupakan grafik perbandingan untuk sample komposit Al-C yang mengalami proses sinter dan non sinter.



**Gambar 4.4.** Grafik hubungan laju aus terhadap variabel % Vf grafit

#### 4.4 PENGUJIAN KUAT TEKAN

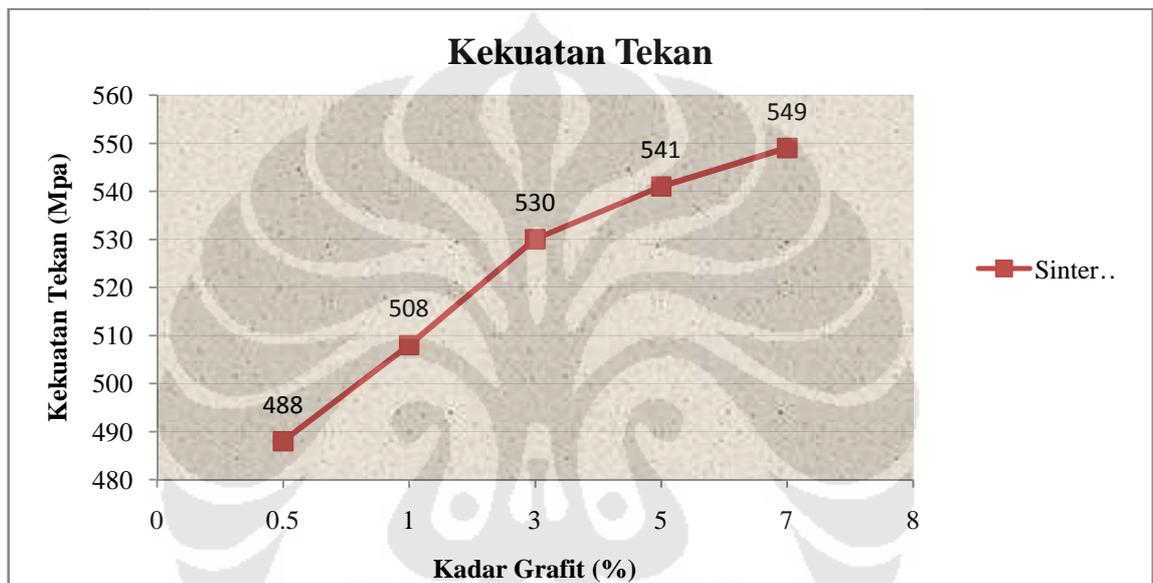
Pengujian kuat tekan dilakukan dengan menggunakan 2 buah sample untuk setiap variable % Vf grafit. Setiap sample diuji kekuatannya dengan memberikan penekanan pada sample hingga tinggi sample terdeformasi 25%.

**Tabel 4.5.** Data pengujian kuat tekan

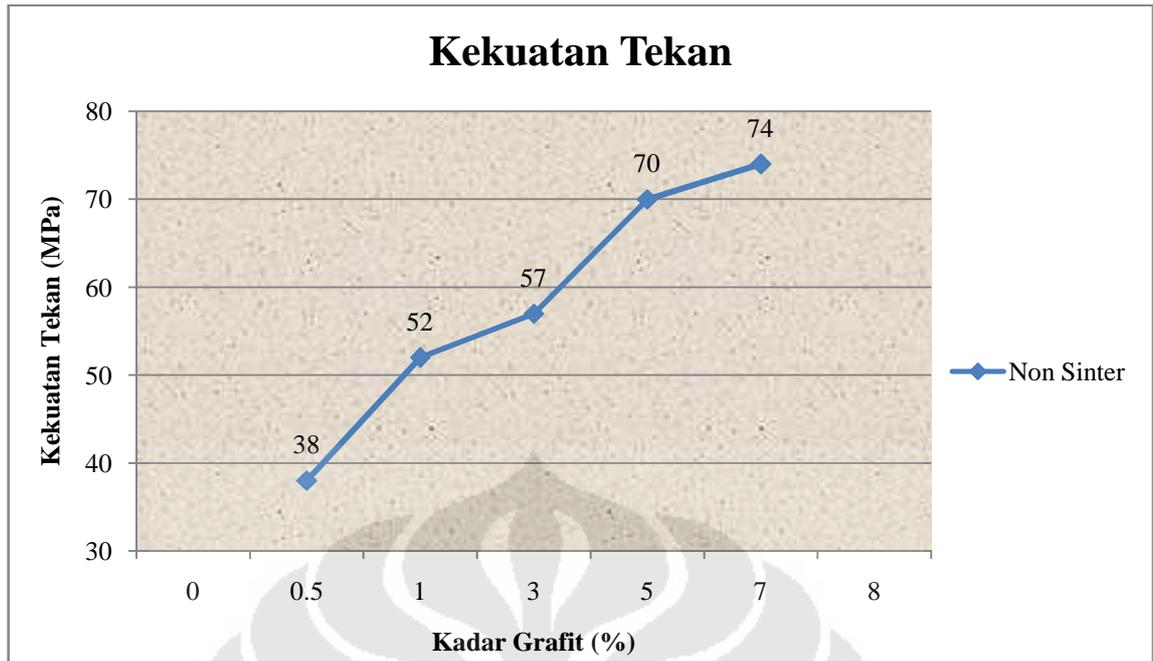
Perlakuan Sample	Nilai kuat tekan rata-rata (MPa)
0,5 % Vf Grafit Non Sinter	38
1 % Vf Grafit Non Sinter	52
3 % Vf Grafit Non Sinter	57
5 % Vf Grafit Non Sinter	70
7 % Vf Grafit Non Sinter	74
0,5% Vf Grafit Sinter	488
1 % Vf Grafit Sinter	508
3 % Vf Grafit Sinter	530

5 % Vf Grafit Sinter	541
7 % Vf Grafit Sinter	549

Hubungan kuat tekan terhadap variabel %Vf grafit dapat dilihat pada grafik dibawah ini. Dimana grafik 4.5 merupakan grafik perbandingan untuk sample komposit Al-C yang mengalami proses sinter dan grafik 4.6 merupakan grafik untuk sample non sinter.



**Gambar 4.5.** Grafik hubungan kuat tekan sample sinter terhadap variabel %Vf grafit

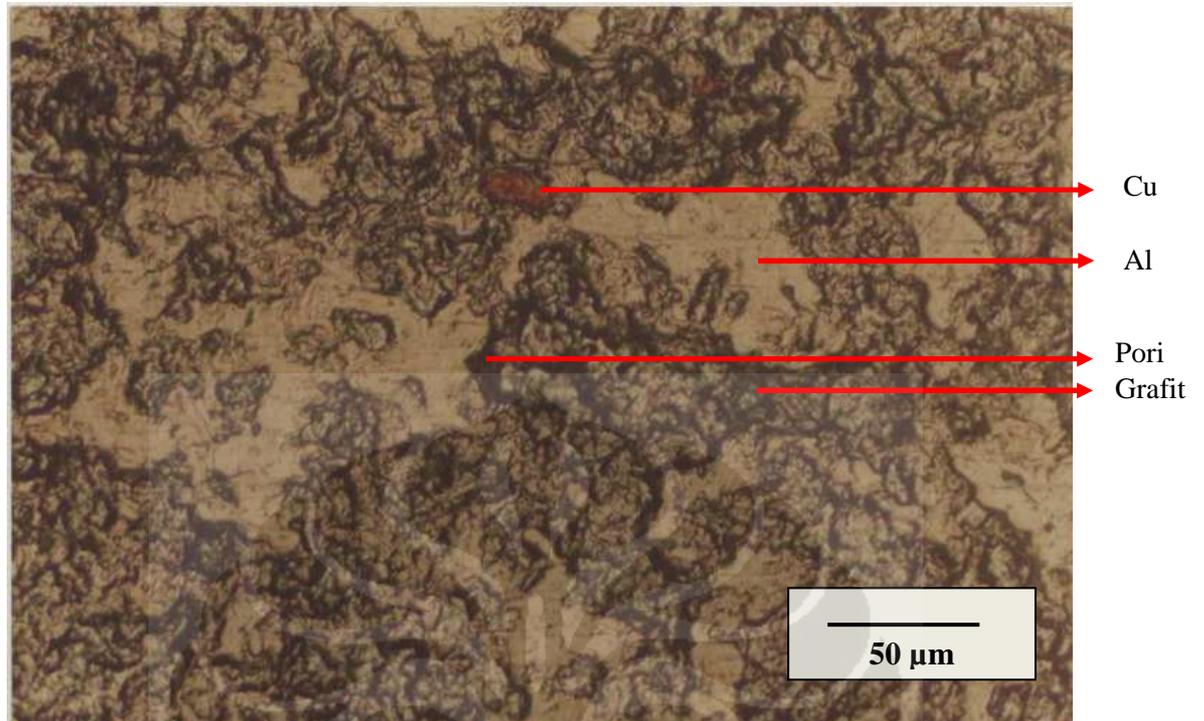


**Gambar 4.6.** Grafik hubungan kuat tekan sample non-sinter terhadap variabel %Vf grafit

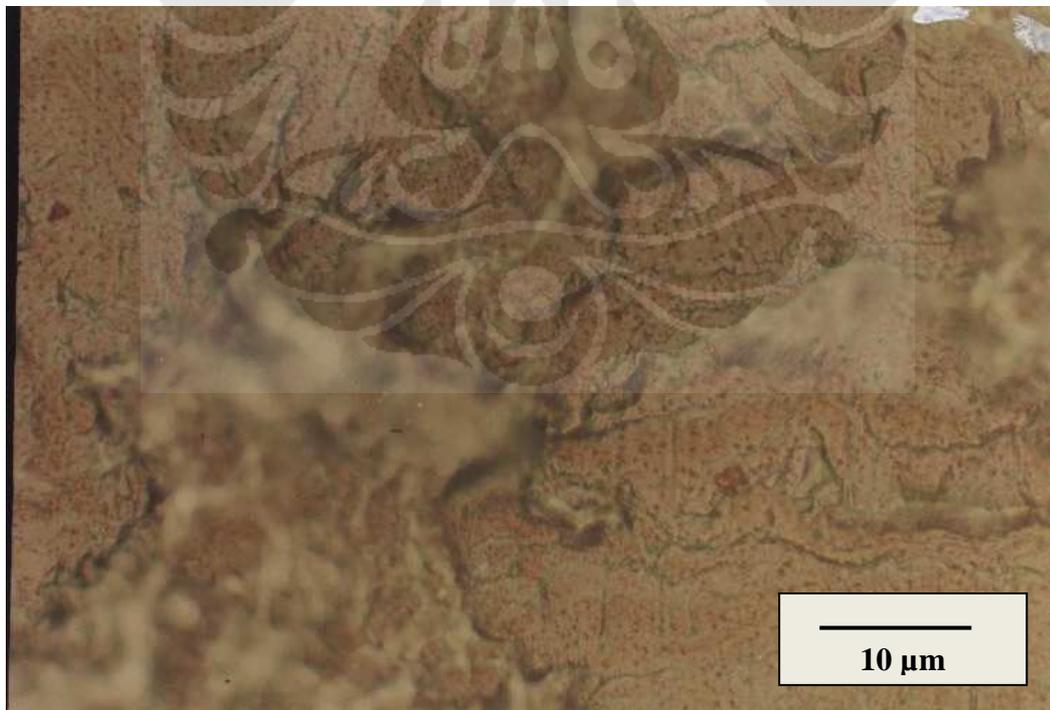
#### 4.5 PENGAMATAN STRUKTUR MIKRO

Pengamatan struktur mikro dilakukan untuk sample komposit dengan penguat dengan setiap variable %Vf grafit yang mengalami proses sinter maupun sample non-sinter . Pengamatan dilakukan dengan Mikroskop Optik (MO). Pengamatan dengan SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan EDS (*Energy Dispersion Spectroscopy*) dilakukan hanya pada variable %Vf grafit 1% yang mengalami proses dimana pada kadar grafit tersebut sifat komposit Al-C optimum. Pengamatan dengan EDS dilakukan untuk mengetahui fasa yang terbentuk pada komposit Al-C yang mengalami proses sinter pada temperatur 600°C.

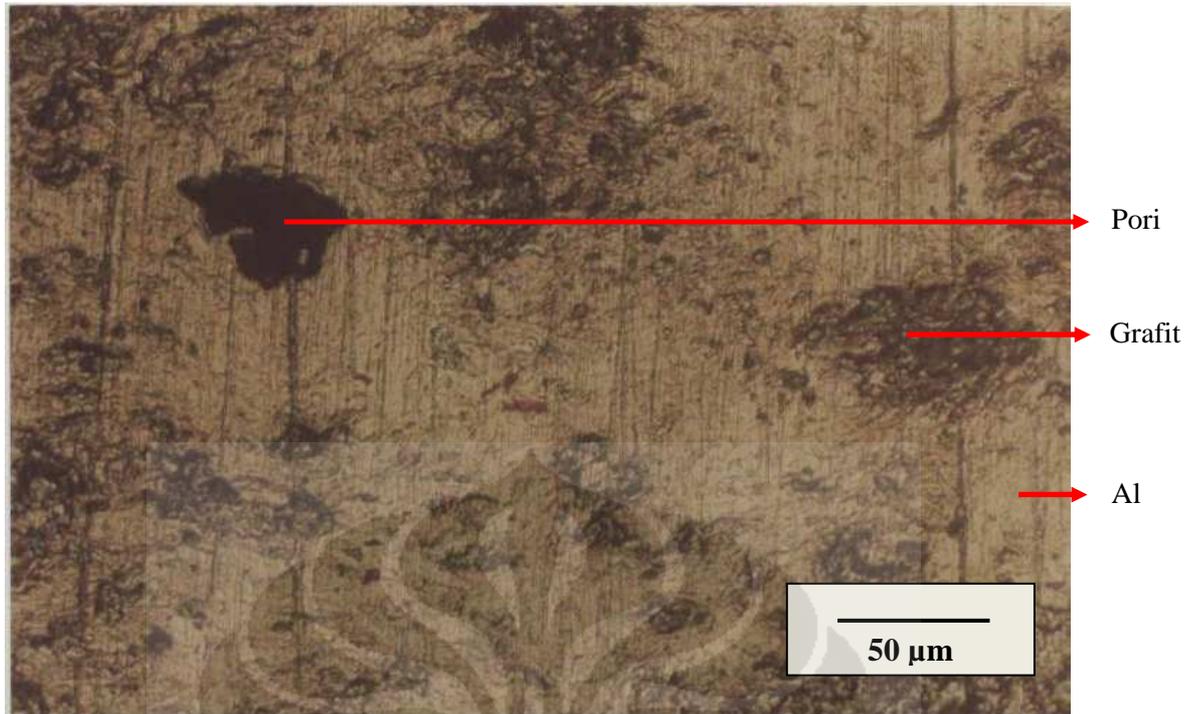
#### 4.5.1 Hasil foto struktur mikro dengan menggunakan mikroskop optik



**Gambar 4.7.** Struktur mikro dari Al + 0,5 % Vf C perbesaran 100x (non-sinter)



**Gambar 4.8.** Struktur mikro dari Al + 0,5 % Vf C perbesaran 500x (non-sinter)



**Gambar 4.9.** Struktur mikro dari Al + 1 % Vf C perbesaran 100x (non-sinter)



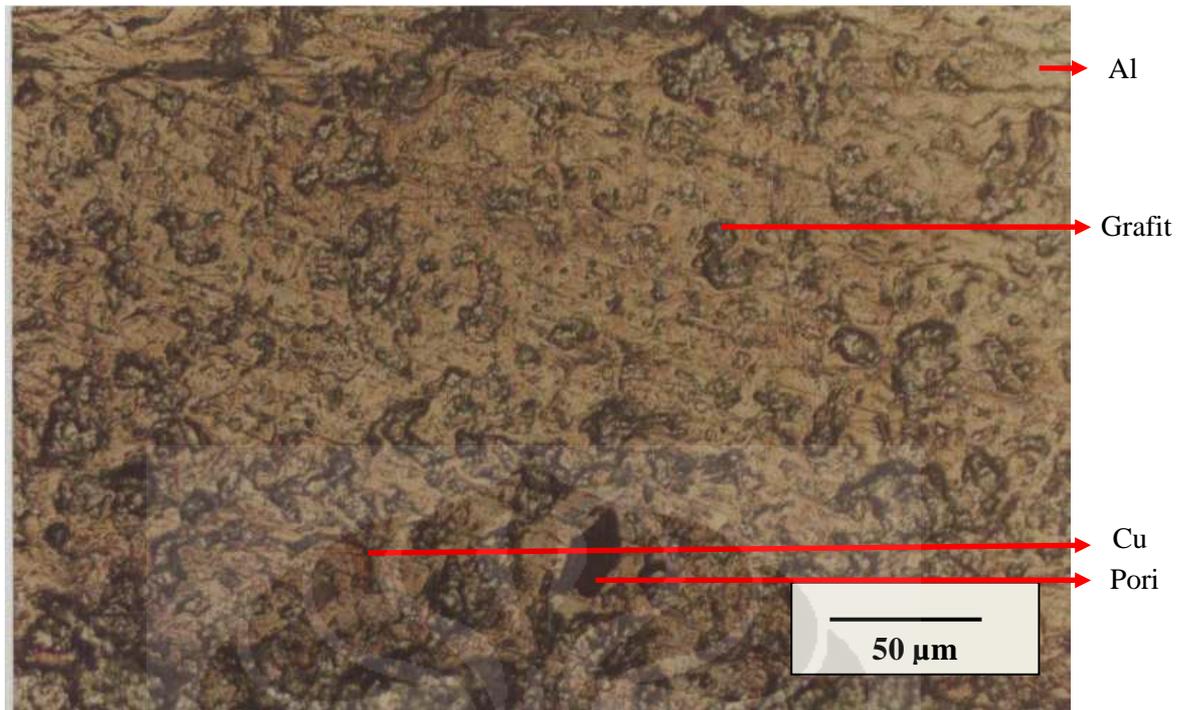
**Gambar 4.10.** Struktur mikro dari Al + 1% Vf C perbesaran 500x (non-sinter)



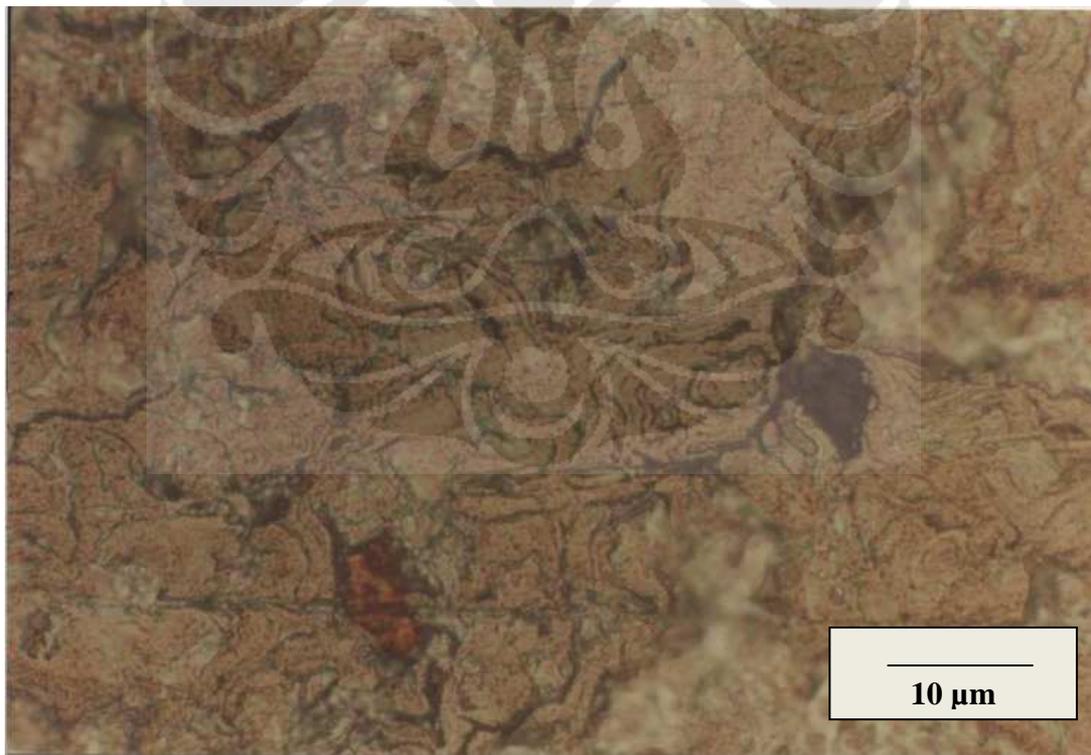
**Gambar 4.11.** Struktur mikro dari Al + 3 %Vf C perbesaran 100x (non-sinter)



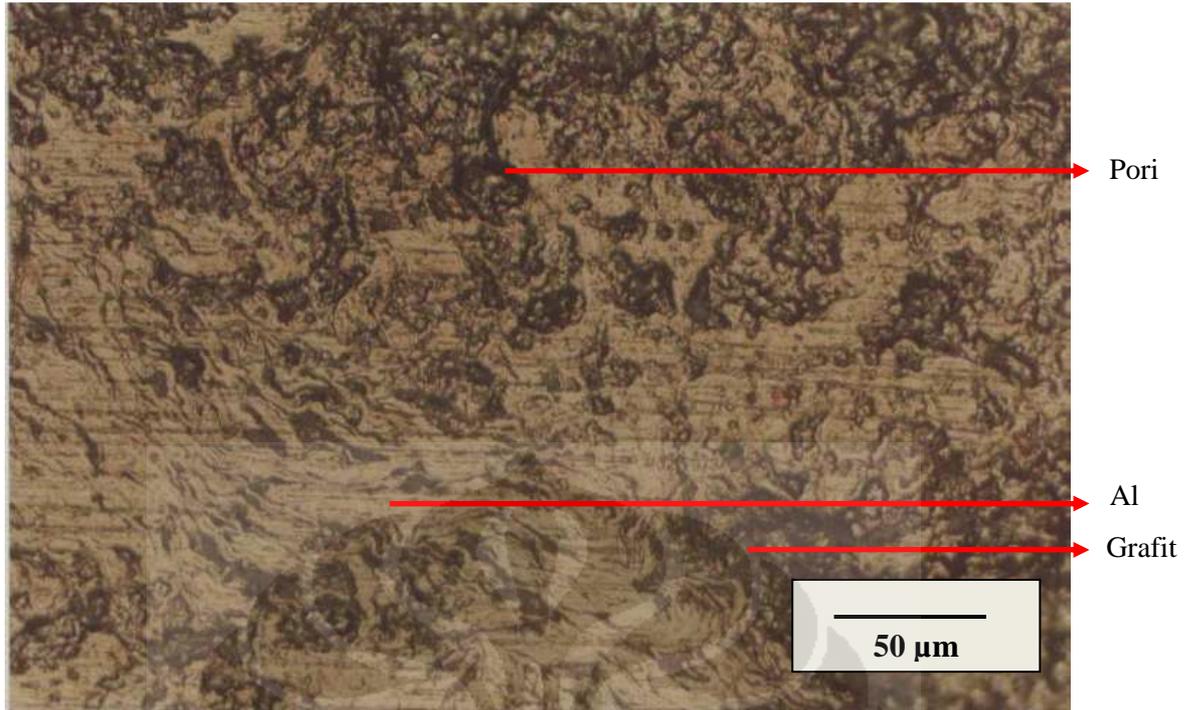
**Gambar 4.12.** Struktur mikro dari Al + 3 %Vf C perbesaran 500x (non-sinter)



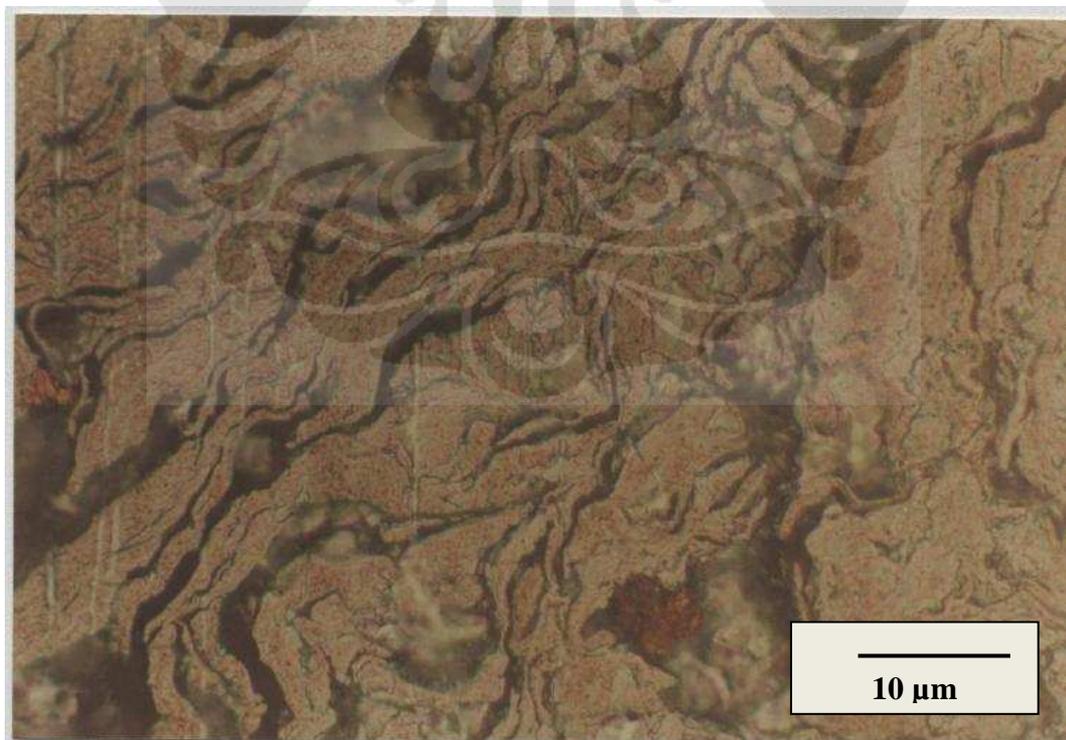
**Gambar 4.13.** Struktur mikro dari Al + 5 %Vf C perbesaran 100x (non-sinter)



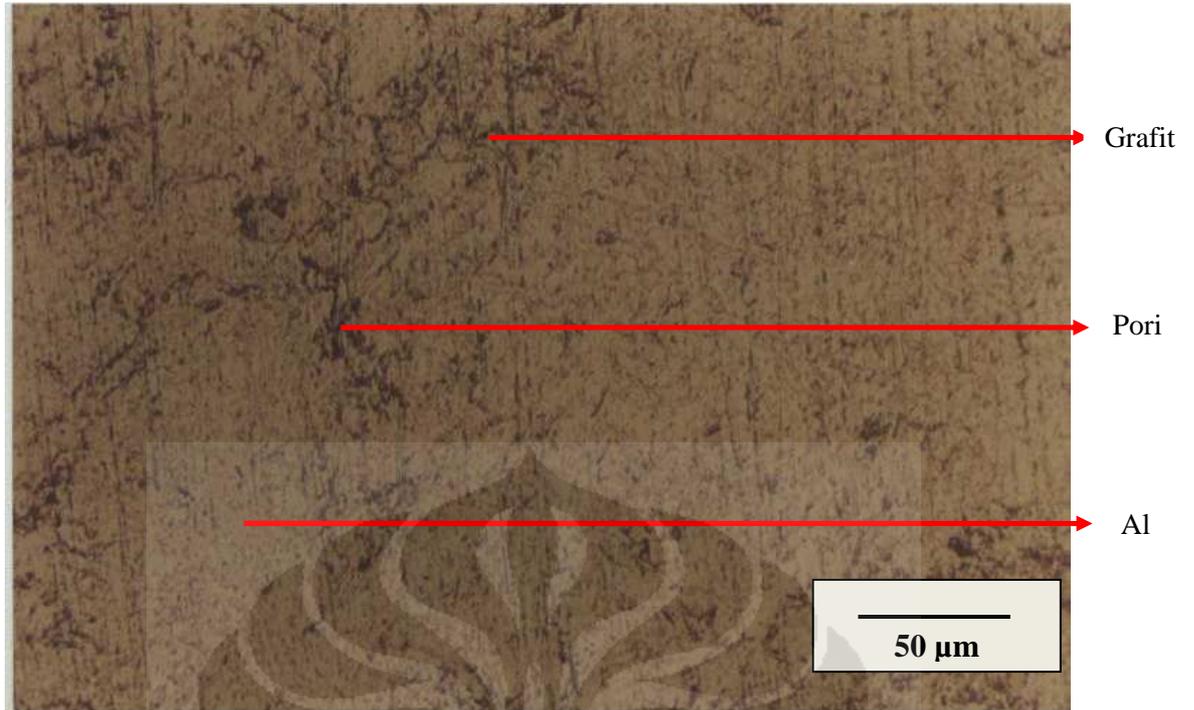
**Gambar 4.14.** Struktur mikro dari Al + 5 %Vf C perbesaran 500x (non-sinter)



**Gambar 4.15.** Struktur mikro dari Al + 7 %Vf C perbesaran 100x (non-sinter)



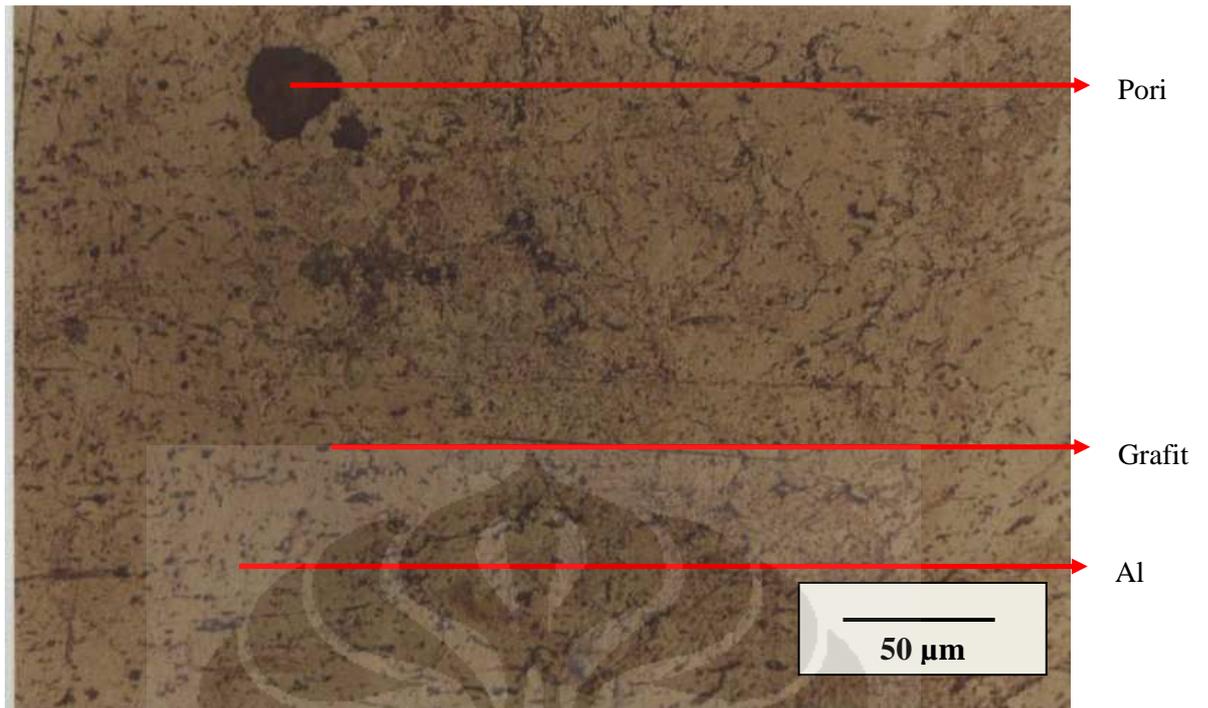
**Gambar 4.16.** Struktur mikro dari Al + 7 %Vf C perbesaran 500x (non-sinter)



**Gambar 4.17.** Struktur mikro dari Al + 0,5 % Vf C perbesaran 100x (sinter)



**Gambar 4.18.** Struktur mikro dari Al + 0,5 % Vf C perbesaran 500x (sinter)



**Gambar 4.19.** Struktur mikro dari Al + 1 % Vf C perbesaran 100x (sinter)



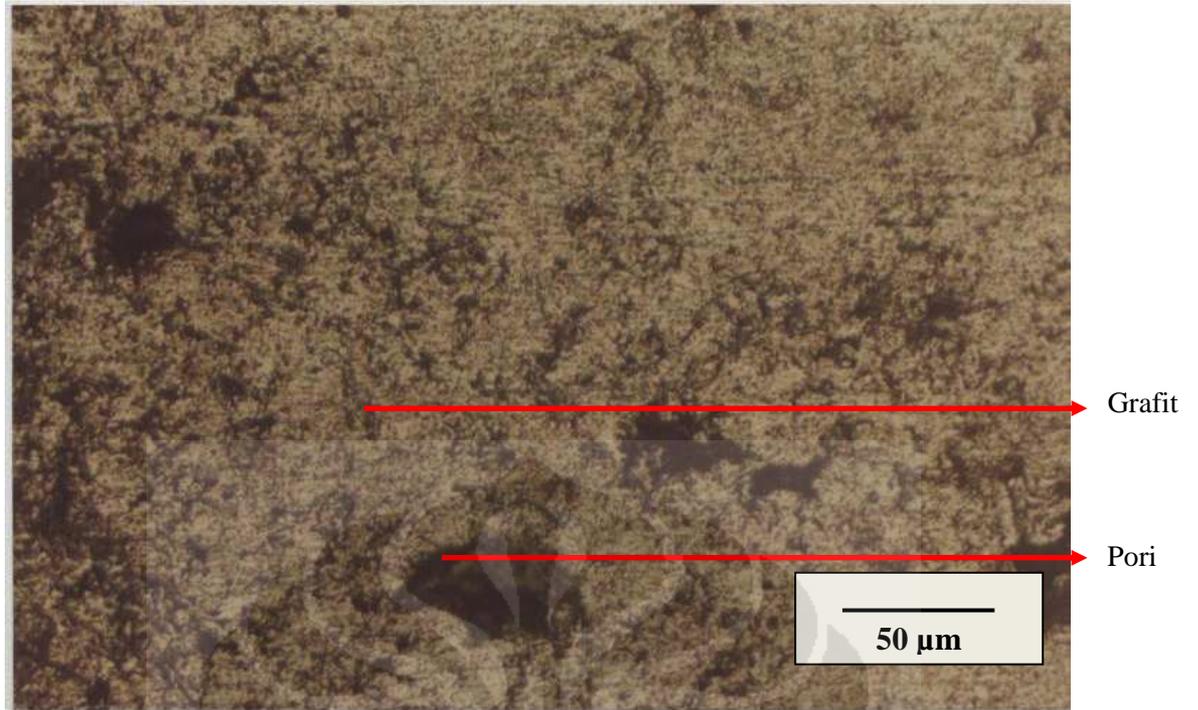
**Gambar 4.20.** Struktur mikro dari Al + 1 % Vf C perbesaran 500x (sinter)



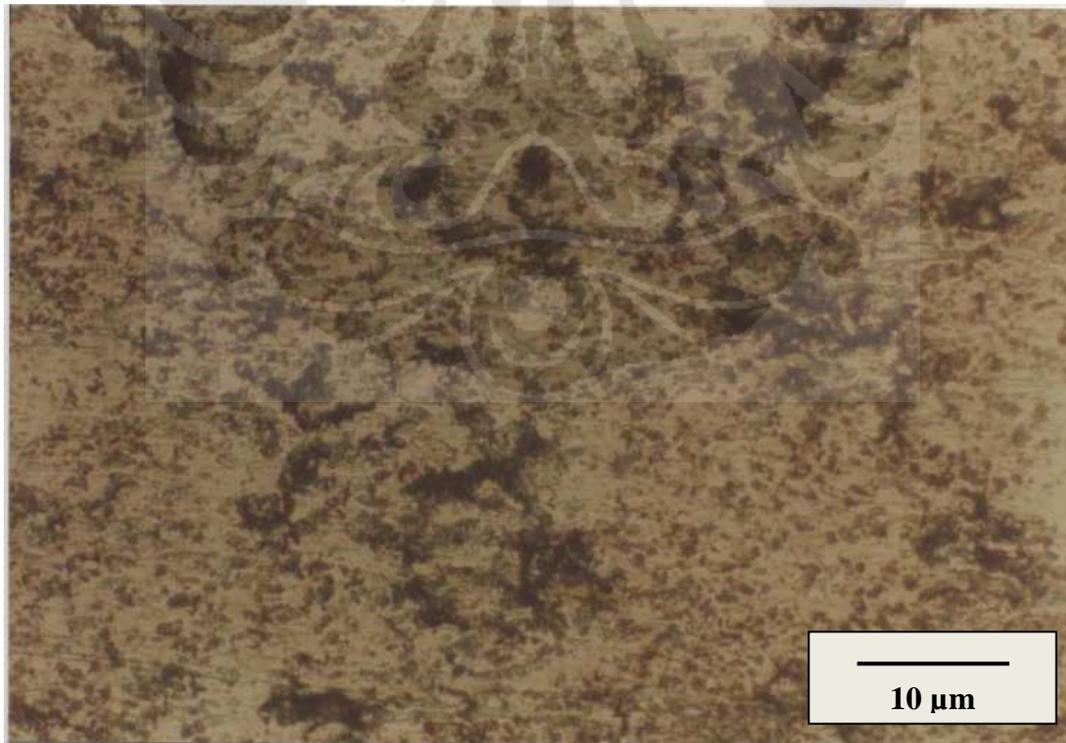
**Gambar 4.21.** Struktur mikro dari Al + 3 % Vf C perbesaran 100x (sinter)



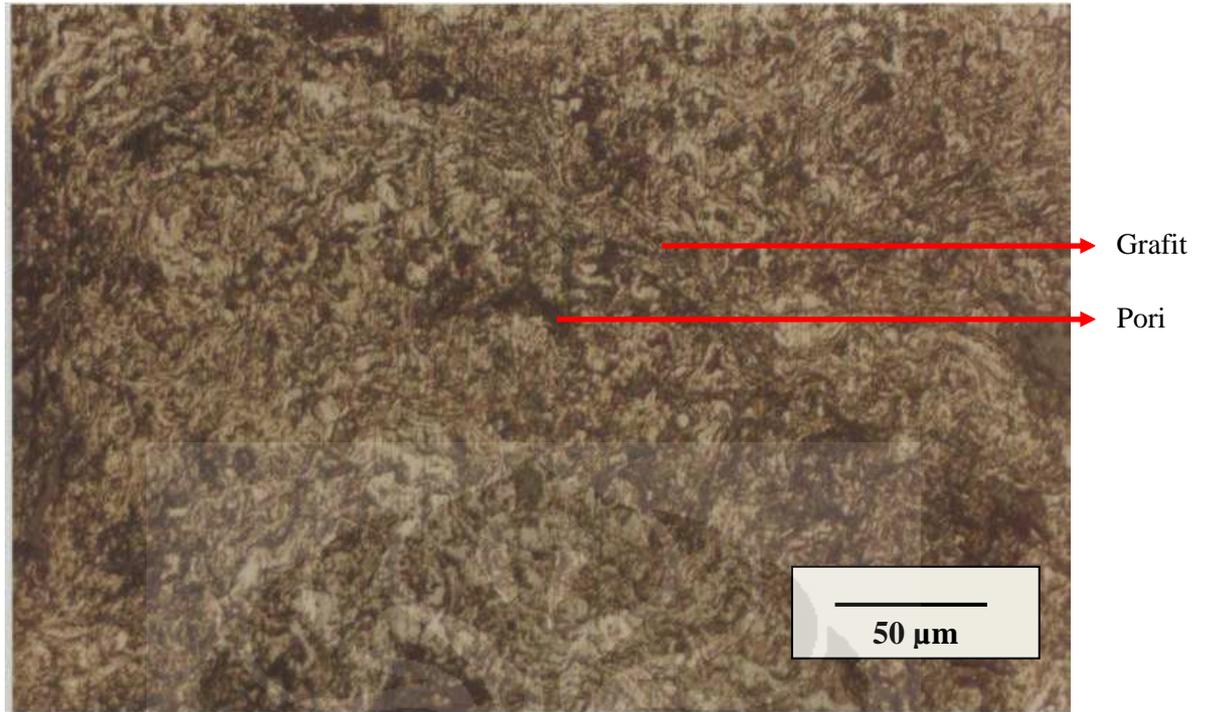
**Gambar 4.22.** Struktur mikro dari Al + 3 % Vf C perbesaran 500x (sinter)



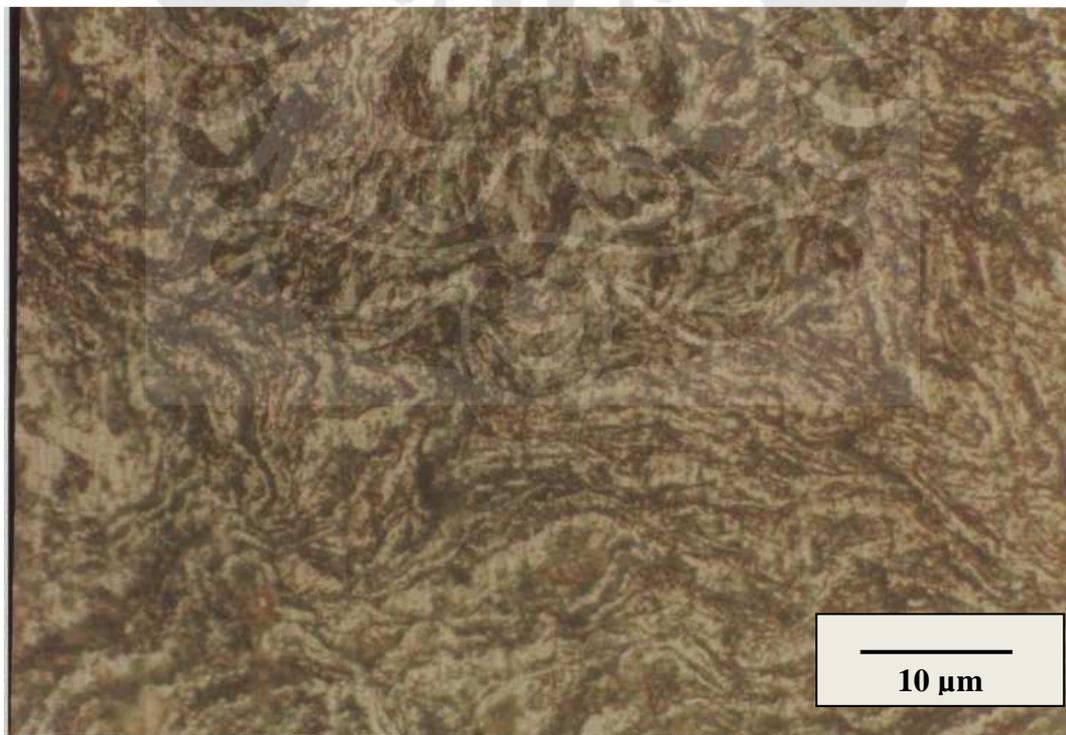
**Gambar 4.23.** Struktur mikro dari Al + 5 % Vf C perbesaran 100x (sinter)



**Gambar 4.24.** Struktur mikro dari Al + 5 % Vf C perbesaran 500x (sinter)

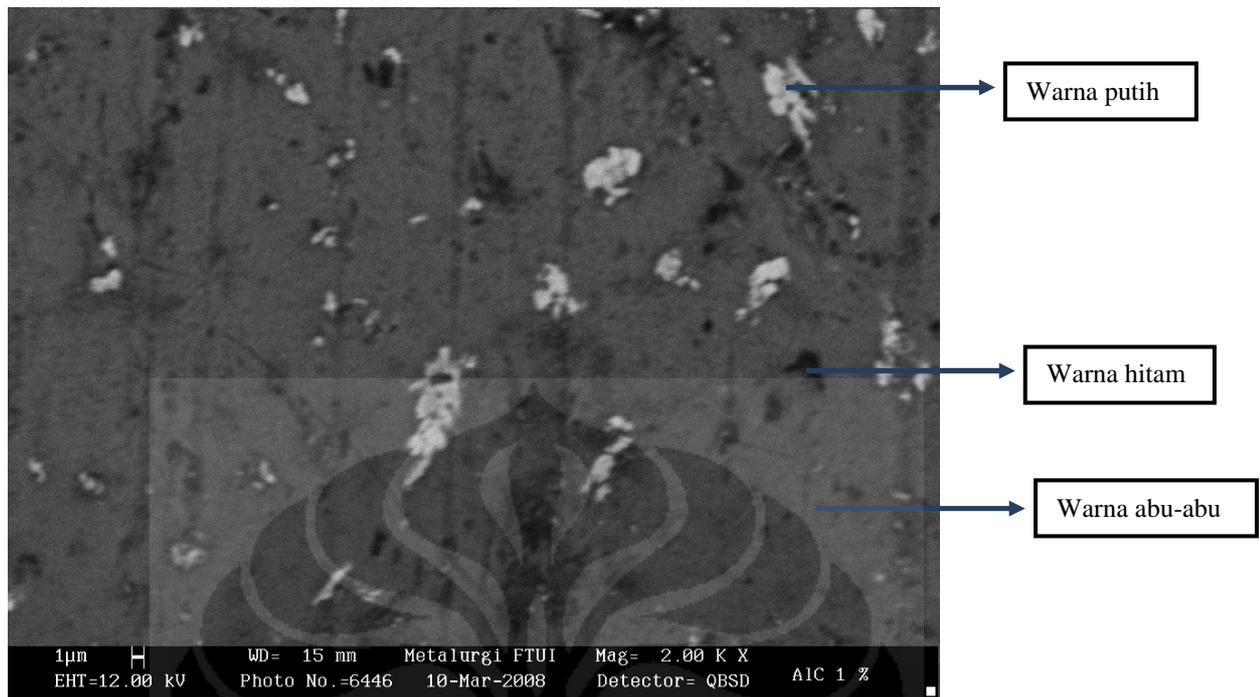


**Gambar 4.25.** Struktur mikro dari Al + 7 % Vf C perbesaran 100x (sinter)



**Gambar 4.26.** Struktur mikro dari Al + 7 % Vf C perbesaran 500x (sinter)

#### 4.5.2 Hasil foto struktur mikro dengan menggunakan SEM



**Gambar 4.27.** Struktur mikro dari Al + 1 % Vf C perbesaran 2000x (sinter)



**Gambar 4.28.** Struktur mikro dari Al + 1 % Vf C perbesaran 1000x (sinter)

**4.5.3 Hasil uji komposisi menggunakan EDS (*Energy Disperse Spectroscopy*)  
Sample Aluminium grafit 1%Vf C**

**Tabel 4.6.** Hasil Pengujian Komposisi dengan Menggunakan EDS

Komposisi (% unsur)	Warna Putih	Warna Abu-abu	Warna Hitam
Al	46,11	92,69	62,01
C	1,71	1,57	5,28
Cu	49,05	-	-
O	3,13	5,50	22,15
Si	5,04	0,23	0,66
Na	-	-	6,79
K	-	-	3,11
<b>Total</b>	100	100	100

**Tabel 4.7.** Indikasi pembentukan senyawa

Fasa	Kandungan	Indikasi senyawa
Putih	Al, C, Cu, O, Si	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , AlC, AlCu <sub>2</sub> , AlSi, SiC, SiO <sub>2</sub> , CuO
Abu-abu	Al, C, O, Si	AlC, AlSi, SiC, SiO <sub>2</sub>
Hitam	Al, C, O, Si, Na, K	AlC, AlSi, SiC, SiO <sub>2</sub>

# **BAB V**

## **PEMBAHASAN**

### **5.1 UMUM**

Penelitian yang dilakukan untuk mengetahui pengaruh %Vf grafit sebagai penguat pada komposit dengan matriks logam aluminium ini pada aplikasinya nanti akan digunakan pada komponen otomotif yaitu bantalan (*bearing*) menggunakan proses pembuatan dengan metalurgi serbuk. Karakteristik yang diperlukan untuk material yang akan digunakan sebagai bantalan yang utama adalah ketahanan aus, kemudian kekerasan, kuat tekan yang baik, dan tahan terhadap korosi. Karakteristik tersebut akan didapatkan dengan menggabungkan sifat-sifat terbaik yang dimiliki kedua komponen penyusun dari komposit tersebut yaitu aluminium dengan tingkat kemurnaan 95,42% yang memiliki sifat ulet dan ringan serta grafit sebagai penguat yang memiliki sifat keras dan getas. Selain itu ditambahkan tembaga (Cu) sebagai *wetting agent* untuk membantu proses pembasahan antara matriks aluminium dan penguat grafit. Jenis penguat grafit yang diberikan pada matriks aluminium ini berupa partikel (*particulate*). Serbuk aluminium yang digunakan memiliki kandungan pengotor yang rendah, sehingga mendapatkan sifat mekanik produk yang semakin baik karena pengotor dapat menjadi penghalang ikatan antar partikel yang dapat menurunkan sifat mekanik.

Dengan proses metalurgi serbuk yang digunakan, terdapat beberapa tahapan yang dilakukan, yaitu mulai dari persiapan serbuk, pencampuran dan pengadukan, kemudian kompaksi untuk menghasilkan sample *green compact* dan pemanasan (*sintering*) untuk menghasilkan sample *burn compact*. Kemudian dilakukan pengujian-pengujian yaitu pengujian kekerasan, uji keausan, kuat tekan, porositas dan densitas, serta pengamatan metalografi untuk sample *green compact* dan *burn compact*.

Bab ini akan menganalisa hasil pengujian dan perbandingannya dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya untuk membandingkan karakteristik dari material yang akan digunakan pada aplikasi *bearing* pada masa yang akan datang

## 5.2 PERSIAPAN DAN PENCAMPURAN SERBUK

Pada tahapan ini akan dilakukan penimbangan terhadap komponen penyusun dari bantalan itu sendiri yaitu serbuk aluminium, grafit dan tembaga dengan komposisi yang telah ditentukan sebelumnya yaitu dengan kadar grafit 0,5% Vf, 1% Vf, 3% Vf, 5% Vf, dan 7% Vf, dan serbuk tembaga 0,5% Vf sebagai *wetting agent*.

Setelah dilakukan penimbangan, serbuk diaduk dengan menggunakan blender selama 5 menit untuk menghasilkan distribusi serbuk yang homogen. Mekanisme pengadukan yang digunakan yaitu metode geser yaitu terjadinya pencampuran dengan bantuan media pengaduk[13].

## 5.3 KOMPAKSI

Pada proses kompaksi dengan menggunakan alat kompaksi *Krisbow*, serbuk dari hasil pencampuran dan pengadukan dimasukkan kedalam rongga cetakan (*dies*) untuk dibuat bakalan berbentuk silinder. Sebelum serbuk dimasukkan kedalam rongga cetakan (*dies*), cetakan dibersihkan terlebih dahulu dengan menyemprotkan WD 40 dan kemudian mengelapnya dengan kain. Penyemprotan WD 40 ini juga berfungsi sebagai pelumas untuk mengurangi gesekan antara cetakan dan serbuk sehingga akan memudahkan pengeluaran bakalan dari cetakan.

Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam proses kompaksi ini adalah mengenai penuangan serbuk ke dalam cetakan dan nilai tekanan kompaksi yang diberikan. Proses penuangan harus dilakukan dengan hati-hati agar tidak banyak serbuk yang terbuang. Pada proses penuangan harus dihindari terjadinya segregasi partikel serbuk karena kecepatan penuangan yang tidak konstan. Setelah cetakan terisi penuh dengan serbuk, dilakukan kompaksi. Berdasarkan penelitian sebelumnya yang dilakukan Aprijal dalam skripsinya yaitu “Pengaruh Tekanan Kompaksi terhadap Karakteristik Komposit Matriks Logam Aluminium-Grafit Produk Metalurgi Serbuk” pada tahun 2006 menyatakan bahwa nilai tekanan kompaksi optimum yang diberikan untuk material komposit aluminium yaitu 300 bar.

Kehomogenan berat jenis merupakan salah satu hal yang harus diperhatikan untuk sample hasil proses kompaksi. Hal ini dapat dicapai dengan memberikan tekanan secara bertahap dan dengan memperhatikan rasio tinggi sample dengan diameter sample ( $L/D$ ). Proses kompaksi yang dilakukan dengan memberikan tekanan secara bertahap dari tekanan yang lebih rendah sampai tekanan kompaksi yang optimum, yaitu 300 bar. Hal ini dimaksudkan untuk memberikan densitas yang homogen pada sample hasil kompaksi karena pada saat tekanan diberikan secara bertahap, partikel serbuk membentuk susunan yang terpadat dan menghasilkan berat jenis yang homogen. Selain itu, dengan perbandingan  $L/D$  yang semakin kecil maka densitas bakalan akan semakin mudah tercapai karena distribusi partikel serbuk akan semakin homogen.

Pada saat proses kompaksi, terjadi penataulangan serbuk, deformasi elastis dan plastis, penghancuran, dan pemadatan serbuk yang diikuti dengan meningkatnya berat jenis dan menurunnya porositas karena rongga akan berkurang. Hal ini disebabkan oleh partikel serbuk yang hancur dan mempunyai ukuran serbuk yang kecil atau halus akan mengisi rongga antar partikel, sehingga mengakibatkan terjadinya proses pemadatan partikel (*densification*). Saat kompaksi, terjadi *mechanical interlocking* (antar butir saling mengunci) sehingga serbuk memiliki kekuatan bakalan (*green strength*). Mekanismenya melalui ikatan *cold weld* (ikatan antara dua permukaan butiran logam yang bersih yang ditimbulkan oleh gaya kohesi, tidak ada peleburan atau pengaruh panas). Selain itu, ketika serbuk mengalami penekanan, serbuk mengalami distribusi berat jenis yang tidak merata. Di bagian bawah (dekat cetakan) berat jenis serbuk kasar, karena pada *single compaction* aliran serbuk dari atas ke bawah mengikuti aliran penekanan.

#### **5.4 SINTERING**

Pada proses sintering, pemanasan sample dilakukan pada temperatur sinter 600°C untuk setiap variable %Vf grafit. Waktu tahan yang digunakan selama 60 menit. Proses pendinginan dilakukan dalam dapur dengan membiarkan sample kembali pada temperatur ruang. Sample mengalami oksidasi pada permukaannya dengan terlihatnya lapisan oksida hitam pada permukaan sample yang disebabkan

oleh kondisi atmosfer sinter dapur yang berupa udara (oksigen) sehingga terjadi oksidasi pada permukaan sample. Lapisan oksida ini dihilangkan dengan cara diampelas sebelum pengujian agar didapat hasil yang akurat. Pada saat proses sinter, untuk mencegah sample teroksidasi maka dapat digunakan atmosfer sinter di dalam dapur berupa vakum, nitrogen, maupun gas inert, seperti argon dan helium. Ukuran bakalan pun mengalami penyusutan setelah proses sintering ini.

## 5.5 PENGUJIAN KEKERASAN

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variable grafit pada komposit aluminium grafit terhadap nilai kekerasan dengan melihat kemampuan sample dalam menahan deformasi plastis akibat indentasi yang dihasilkan dari alat uji Brinell[31]. Dari hasil pengujian, pada gambar 4.1, diketahui bahwa nilai kekerasan dari kadar sample 0,5%Vf sampai kadar 1%Vf grafit meningkat. Kekerasan sample maksimum pada kadar grafit 1% Vf dengan kekerasan 65 BHN, dan untuk penambahan grafit seterusnya nilai kekerasan akan mengalami penurunan dengan kekerasan terendah 47 BHN. Penambahan grafit yang terdispersi akan meningkatkan kekerasan dari komposit aluminium grafit karena partikel grafit akan meningkatkan kekerasan dengan menghalangi pergerakan dislokasi. Hal ini juga dihasilkan karena terjadinya pembasahan yang baik antara matriks aluminium dengan grafit dengan adanya *wetting agent* Cu. Pembasahan yang optimal ini akan menghasilkan lapisan antar muka ini dapat mentransfer beban dengan baik dari Cu menuju grafit. Pada penambahan 3%, 5%, dan 7% Vf grafit, nilai kekerasan mengalami penurunan. Penambahan kadar grafit ini tidak diikuti dengan penambahan *wetting agent* Cu sehingga tidak terjadi pembasahan yang optimum pada sample sehingga menyebabkan lapisan antar muka yang berperan sebagai media transfer beban tidak berfungsi dengan baik. Karena adanya proses sinter, terbentuknya fasa intermetalik antara aluminium dan tembaga (Cu) juga meningkatkan kekerasannya dari samplelangn akibat terhalangnya pergerakan dislokasi.

Hasil ini didukung oleh literatur yang menyatakan bahwa dengan semakin tingginya %Vf grafit yang ditambahkan akan meningkatkan kekerasan dan sifat mekanik dari sample dimana grafit akan bersifat sebagai penguat (*reinforcement*)

namun dengan memperhatikan bahwa jumlah *wetting agent* yang tersedia cukup sehingga terjadi proses pembasahan yang baik[1]. Namun, apabila pembasahan tidak terjadi dengan baik, maka penambahan %Vf grafit akan menurunkan nilai kekerasan sample[32]. Mekanisme peningkatan nilai kekerasan pada sample dengan adanya partikel grafit adalah terdispersinya partikel grafit yang akan menahan laju pergerakan dislokasi. Partikel terdispersi menghalangi pergerakan dislokasi dan berperan sebagai jangkar[31]. Beban yang diterima matriks aluminium akan diteruskan ke penguat yaitu grafit melalui lapisan antar muka. Sehingga diperoleh kekerasan yang baik dengan pembasahan yang baik pula. Selain itu, adanya partikel Cu yang terdispersi selain berfungsi sebagai *wetting agent*, juga akan menyebabkan pergerakan dislokasi menjadi terhambat sehingga partikel Cu juga akan menjadi unsur penguat pada material.

Dari gambar 4.1, terlihat bahwa pada kadar 5 %Vf grafit, nilai kekerasan seharusnya berada pada nilai antara kekerasan pada 3%Vf grafit dan 7%Vf grafit, namun ternyata pada 5%Vf grafit nilai kekerasan berada pada nilai terendah. Hal ini dapat terjadi apabila pada saat indentasi dilakukan terdapat porositas pada daerah indentasi, sehingga kekerasan yang didapatkan tidak tinggi karena adanya porositas tersebut.

Sedangkan untuk sample non-sinter nilai kekerasannya masih berada dibawah kekerasan sample sinter. Kekerasan tertinggi yang didapatkan adalah 46 BHN. Hal ini menunjukkan bahwa proses sinter pada sample akan meningkatkan kekerasan dari komposit aluminium grafit. Pada sample non-sinter, ikatan yang terjadi merupakan *mechanical interlocking*, dimana tidak terjadi peristiwa transport atom karena tidak adanya energi thermal yang cukup. Dengan proses sinter tersebut maka akan terjadi pemadatan dan mengurangi pori sehingga sifat mekanis meningkat.

Pada penelitian sebelumnya, komposit aluminium grafit dengan *wetting agent* Mg menyatakan bahwa kekerasan yang didapatkan paling tinggi adalah pada penambahan 2 %Vf grafit, namun dengan variable kompaksi 200 bar dan sinter pada 600°C selama 30 menit dengan nilai kekerasan yang diperoleh adalah 23 BHN[12].

Apabila dibandingkan dengan *bearing* yang terbuat dari komposit *bronze bearing* (Cu-Sn-Zn-C), pada 1% Vf grafit, dengan variable tekanan kompaksi 200 bar, dengan sinter 850°C selama 5 menit maka nilai kekerasan yang dihasilkan memiliki kekerasan 55 BHN[11].

Dengan perbandingan diatas dapat terlihat bahwa ternyata kekerasan tertinggi didapatkan pada komposit MMC aluminium grafit dengan kadar 1% Vf grafit dan *wetting agent* Cu dibandingkan dengan kekerasan *bronze bearing* dan komposit aluminium grafit dengan *wetting agent* Mg.

Material *aluminium bearing alloy* hasil *casting* memiliki kekerasan sebesar 85 Rockwell B atau sekitar 140 BHN. Namun, aluminium ini mencapai kekerasan 140 BHN setelah mengalami proses pengerasan. Sehingga untuk mencapai kekerasan material *bearing* yang diperlukan maka komposit aluminium tersebut harus mengalami proses pengerasan selanjutnya.

## 5.6 PENGUJIAN DENSITAS DAN POROSITAS

Pengujian porositas dan densitas dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan kadar grafit pada komposit aluminium grafit. Untuk pengujian ini, densitas tertinggi yang didapatkan 2,4 gr/cm<sup>3</sup> pada 0,5% Vf dan dengan porositas yang rendah yaitu 11,23%, kemudian pada 1% Vf sebesar 2,3 gr/cm<sup>3</sup> dengan porositas sebesar 16,11% dan menurun terus dengan penambahan kadar grafit yang lebih tinggi, dengan demikian porositas pun akan semakin tinggi. Grafit yang terdapat pada komposit ini berfungsi untuk mengisi pori yang ditimbulkan oleh sample saat proses sintering. Grafit yang mengisi pori pada sample dapat meminimalisasi ruang kosong pada sampel sehingga pada volume yang tetap, berat sampel akan semakin bertambah sehingga densitas akan naik. Kemampuan grafit mengisi pori karena adanya penambahan Cu yang berfungsi sebagai *wetting agent*. Pada saat penambahan grafit yang lebih tinggi, terlihat bahwa densitas sample akan menurun. Hal ini mungkin disebabkan karena jumlah *wetting agent* yang tersedia tidak mencukupi jumlahnya untuk membasahi seluruh grafit. Pada kadar grafit 1% Vf ini merupakan kadar grafit yang optimal untuk material *bearing* karena memiliki sifat mekanis yang baik dan memiliki porositas yang memang diperlukan untuk material bearing. Pori ini diperlukan untuk material

tahan aus sebagai penyimpan oli (*oil reservoir*). Oli yang tersimpan ini akan membantu sebagai *self-lubricant* selain karena adanya *self-lubricant* dari pengaruh grafit.

Selain itu, partikel Cu dapat meningkatkan densitas dari sample karena dapat pula menjadi partikel yang terdispersi yang akan meningkatkan kekerasan dari sample dengan menghalangi pergerakan dislokasi.

Hasil pengujian densitas dan porositas material komposit aluminium grafit non-sinter menunjukkan kecenderungan yang berbeda dengan proses sinter. Material komposit aluminium grafit non-sinter menghasilkan densitas yang lebih tinggi dan porositas yang lebih rendah dibandingkan dengan material dengan proses sinter. Penambahan %Vf grafit pada material non-sinter akan menurunkan densitas dan meningkatkan porositas. Densitas yang lebih tinggi dan porositas yang lebih rendah pada material komposit non-sinter didapatkan karena tidak terjadi perubahan fasa Cu. Partikel Cu yang ada dalam bentuk padat akan saling mengisi ruang kosong diantara partikel-partikel lain akibat adanya gaya kompaksi. Pada sample sinter, Cu akan berdifusi meninggalkan ruang kosong yang akan meninggalkan porositas dan menurunkan densitas.

Nilai densitas dan porositas ini juga berhubungan dengan pengujian kekerasan, dimana dengan densitas yang tinggi maka nilai kekerasan akan tinggi pula karena adanya ikatan yang terjadi hasil dari proses pembasahan. Semakin tinggi densitas suatu material, maka jarak atom akan semakin dekat dan kekuatan ikatan menjadi semakin kuat.

Material *bearing* dari hasil metalurgi serbuk menghasilkan porositas yang terkontrol. Adanya porositas pada material *bearing* akan berfungsi sebagai penyerap oli yang diperlukan pada aplikasi bearing untuk meningkatkan ketahanan aus dari material.

Pada penelitian sebelumnya[12], komposit aluminium grafit dengan *wetting agent* Mg menyatakan bahwa densitas yang didapatkan paling tinggi adalah pada penambahan 2 %Vf grafit, dengan variable kompaksi 200 bar dan sinter pada 600°C selama 30 menit dengan nilai densitas yaitu 1,89 gr/cm<sup>3</sup> dengan nilai porositas 26%.

Apabila dibandingkan dengan bearing yang terbuat dari komposit bronze bearing (Cu-Sn-Zn-C), pada 1% Vf grafit, dengan variable tekanan kompaksi 200 bar, dengan sinter 850°C selama 5 menit maka nilai porositas yang dihasilkan memiliki porositas 23,3% dan dengan densitas 6,67 gr/cm<sup>3</sup>[11].

Dengan perbandingan diatas dapat terlihat bahwa MMC aluminium grafit dengan kadar 1% Vf grafit dan *wetting agent* Cu memiliki densitas yang cenderung lebih tinggi daripada komposit aluminium grafit dengan *wetting agent* Mg. Selain itu, porositas yang dihasilkan lebih rendah yaitu hanya sekitar 11,23% pada kadar grafit 0,5% Vf dan 16,11% pada kadar grafit 1% Vf. Dengan tingginya densitas yang berarti porositas yang dihasilkan lebih sedikit, maka sifat mekanis yang dihasilkan akan lebih baik. Sehingga, hal ini dapat menjadi suatu keunggulan komposit aluminium grafit dengan *wetting agent* Cu dibandingkan dengan komposit aluminium grafit dengan *wetting agent* Mg. Selain itu, nilai densitas dari komposit aluminium grafit lebih rendah dibandingkan dengan komposit *bronze bearing*. Pada penelitian sebelumnya[11], nilai densitas komposit *bronze bearing* yang didapatkan adalah 6.67 gr/cm<sup>3</sup>. Sehingga dengan ukuran yang sama, massa komponen yang akan diproduksi dengan menggunakan material komposit aluminium grafit akan lebih ringan. Dengan komponen yang lebih ringan maka akan menghemat penggunaan bahan bakar.

## 5.7 UJI AUS

Pengujian keausan dilakukan untuk mengetahui hubungan antara variabel % Vf grafit dengan laju keausan komposit aluminium grafit. Keausan yang terjadi pada sample merupakan keausan abrasif dimana terjadi pengikisan material dari permukaan karena adanya kontak dengan material lain yang bergerak relatif terhadap permukaan kontak.

Berdasarkan gambar 4.4, dapat terlihat suatu hubungan laju aus terhadap penambahan grafit, dimana laju aus terus mengalami kenaikan dengan meningkatnya kandungan grafit pada sample. Laju aus mengalami nilai terendah pada penambahan 1% Vf grafit yaitu sebesar  $4,0 \times 10^{-5}$  mm<sup>3</sup>/mm. Dan laju aus tertinggi untuk sample sinter dicapai pada penambahan grafit 7% Vf yaitu sebesar 71 mm<sup>3</sup>/mm. Pengujian ini berkaitan erat dengan pengujian kekerasan sehingga

hasil yang didapatkan menunjukkan nilai optimum yang sama, yaitu pada penambahan 1% Vf grafit. Dimana nilai kekerasan berbanding terbalik dengan nilai laju ausnya. Sehingga pada material yang lebih keras ketahanan aus dari material akan semakin meningkat, sehingga volume material yang mengalami abrasi akan semakin kecil. Pada kandungan grafit yang lebih tinggi dan tanpa disertai penambahan *wetting agent* Cu maka pembasahan tidak akan terjadi dengan sempurna sehingga menyebabkan lemahnya lapisan antar muka (*interface*) yang mengakibatkan sifat keausan material menjadi menurun.

Penambahan grafit akan berpengaruh terhadap laju keausan. Grafit pada material bearing berfungsi sebagai *solid lubrication*. Mekanisme peningkatan nilai kekerasan pada sample dengan adanya partikel grafit adalah terdispersinya partikel grafit yang akan menahan laju pergerakan dislokasi. Partikel terdispersi menghalangi pergerakan dislokasi dan berperan sebagai jangkar. Beban yang diterima matriks aluminium akan diteruskan ke penguat yaitu grafit melalui lapisan antar muka. Sehingga diperoleh kekerasan yang baik dengan syarat terjadi pembasahan yang baik pula. Karena nilai kekerasannya yang semakin meningkat, maka nilai laju aus dari material akan menurun. Selain itu, adanya partikel Cu yang terdispersi akan menyebabkan pergerakan dislokasi menjadi terhambat sehingga partikel Cu akan menjadi unsur penguat pada material.

Pada sample non-sinter, penambahan grafit akan meningkatkan laju aus, yang berarti ketahanan terhadap aus berkurang. Nilai terendah didapatkan pada kadar grafit 1% Vf. Peningkatan laju aus ini disebabkan penambahan fraksi berat grafit yang semakin melemahkan ikatan antar partikel pada bakalan. Lemahnya ikatan ini menyebabkan pada saat pengujian aus, bagian material yang kontak langsung dengan cincin putar akan mudah terkoyak.

Pada penelitian sebelumnya[12], komposit aluminium grafit dengan *wetting agent* Mg menyatakan bahwa laju aus yang didapatkan paling rendah adalah pada penambahan 2 % Vf grafit, dengan variable kompaksi 200 bar, sinter pada 600°C selama 30 menit dengan beban pada mesin Ogoshi 3,16 Kg, diperoleh laju aus yaitu 0,0822 mm<sup>3</sup>/mm.

Apabila dibandingkan dengan bearing yang terbuat dari komposit *bronze bearing* (Cu-Sn-Zn-C), pada 1% Vf grafit, dengan variable tekanan kompaksi 200

bar, dengan sinter 850°C selama 5 menit maka nilai nilai laju aus yang dihasilkan yaitu  $1,91 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$ [11].

Ketahanan aus merupakan sifat yang sangat penting dimiliki oleh material untuk aplikasi *bearing*. Pada penelitian, dilakukan penelitian mengenai komposit aluminium grafit dengan *wetting agent* Cu, dimana untuk meningkatkan ketahanan ausnya, dilakukan perlakuan pada permukaan partikel grafit (*surface treated*). Fuentes dan kawan-kawan, dalam penelitiannya *wear behavior of self lubricating aluminum/graphite composite* menyatakan bahwa dengan *surface treated* melalui proses elektrokimia yaitu reaksi pendesakan, dimana grafit dicelupkan pada larutan acetone pada kondisi tertentu sehingga Cu akan terdepositasi pada permukaan grafit. Hal inilah yang akan meningkatkan *wettability* antara grafit dan dengan matriks Al sehingga akan meningkatkan ketahanan ausnya.

## **5.8 PENGUJIAN KUAT TEKAN**

Pengujian kuat tekan dilakukan untuk mengetahui kekuatan tekan komposit aluminium grafit dalam berbagai variabel. Dari hasil pengujian didapatkan kekuatan tekan tertinggi dimiliki oleh komposit dengan kadar grafit 7% Vf. Berdasarkan literatur, kekuatan dari komposit dengan matriks aluminium dan dengan penguat grafit, maka penambahan kadar grafit akan meningkatkan kekuatan tekan dari komposit tersebut. Pada gambar 4.5, diketahui bahwa dengan meningkatnya % Vf grafit akan meningkatkan kekuatan dari sample. Namun, nilai optimum pada pengujian tekan ini hasil ini kurang sesuai apabila dibandingkan dengan hasil dari pengujian kekerasan dan keausan. Dimana hasil dari pengujian keausan dan kekerasan menunjukkan nilai optimum pada kadar 1% Vf grafit. Range dari kekuatan tekan komposit ini ada pada 500 – 550 MPa. Adanya partikel Cu turut menambah kekuatan dari material tersebut, pembentukan fasa intermetalik yang keras dan kuat menjadi suatu alasan mengapa komposit ini memiliki nilai kekuatan tekan yang tinggi.

## 5.9 PENGAMATAN STRUKTUR MIKRO DAN KOMPOSISI

### 5.9.1 Pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik

Pengamatan struktur mikro dilakukan pada masing-masing %Vf komposit hasil perlakuan sinter dan non-sinter untuk mengetahui pengaruh %Vf grafit terhadap struktur mikro dan pori yang dihasilkan. Foto struktur mikro yang diamati merupakan struktur mikro dengan perbesaran 100x dan 500x (gambar 4.7-4.26). Dari hasil pengamatan terlihat bahwa adanya perubahan struktur mikro secara bertahap dan meningkatnya jumlah pori dengan yang terbentuk dengan meningkatnya kadar grafit.

Pengamatan struktur mikro dilakukan untuk mengetahui pengaruh grafit terhadap ukuran pori dan persebaran grafit pada sample. Apabila terjadi pembasahan yang baik antara aluminium dan grafit, maka jumlah pori akan berkurang. Akan tetapi dengan pembasahan yang buruk maka pori akan semakin banyak.

Gambar 4.17-4.26 menunjukkan struktur mikro untuk sample sinter. Dari gambar 4.17 dan 4.18 yang merupakan foto mikro untuk kadar 0,5%Vf menunjukkan adanya porositas yang ditunjukkan dengan bagian yang berwarna hitam, kemudian matriks dan grafit. Dengan adanya grafit yang mengisi pori yang dihasilkan dari hasil sintering maka porositas akan berkurang. Namun, porositas yang tampak sedikit karena *wetting agent* Cu yang ditambahkan masih cukup karena grafit yang ditambahkan pun hanya 0,5%Vf.

Pada gambar 4.19-4.20 menunjukkan struktur mikro dari sample dengan kadar 1%Vf grafit. Pada sample ini, porositas ditunjukkan dengan bagian yang berwarna hitam gelap. Selain itu, adanya fasa matriks dan grafit yang nampak pada gambar 4.19 dan 4.20. Pada perbesaran 500x, terlihat fasa yang diduga merupakan fasa intermetalik yang terbentuk akibat proses sinter. Pada kadar grafit 1%Vf ini merupakan kadar grafit yang optimal untuk material *bearing* karena memiliki sifat mekanis yang baik dan memiliki porositas yang memang diperlukan untuk material bearing. Pori ini diperlukan untuk material tahan aus sebagai penyimpan oli. Oli yang tersimpan ini akan membantu sebagai *self-lubricant* selain karena adanya pengaruh grafit.

Pada gambar 4.21-4.26 merupakan kadar grafit 3% Vf, 5% Vf dan 7% Vf. Dari foto struktur mikro dapat terlihat dari bagian yang berwarna hitam sebagai pori tampak semakin banyak. Pori yang muncul ini karena tidak terjadinya pembasahan pada grafit yang jumlahnya lebih banyak sehingga grafit tidak dapat mengisi pori dengan sempurna. Selain itu peningkatan kadar grafit juga memperlihatkan persebaran grafit yang semakin merata dan jumlahnya semakin banyak. Pada kadar 7% Vf terlihat aliran material dari pembentukan fasa intermetalik.

Untuk sample non-sinter, terlihat pada gambar 4.7-4.16, terlihat bahwa serbuk tembaga masih berbentuk gumpalan dan tidak tercampur secara homogen yang terlihat pada foto berwarna merah bata. Pada sample non sinter tidak terjadi difusi aliran massa. Porositas tampak pada sample yang ditunjukkan dengan bagian yang berwarna hitam gelap.

### **5.9.2 Pengamatan struktur mikro menggunakan SEM dan EDS**

Pengamatan ini dilakukan pada sample 1% Vf grafit karena pada kadar ini menunjukkan nilai optimum untuk sifat mekanis dari sample. Hasil foto struktur mikro dengan SEM memperlihatkan bahwa pada komposit dengan penguat (*reinforced*) dengan penambahan 1% Vf grafit terdapat adanya 3 fasa yang berbeda, yaitu fasa yang berwarna putih, abu-abu dan matriks. Pengujian unsur-unsur yang terkandung dalam fasa pada material komposit ini dilakukan dengan menggunakan EDS.

Pada fasa yang berwarna abu-abu, menunjukkan bahwa komposisi kimia unsur yang dominan adalah Al-O-C. Dari *element %* yang diperlihatkan pada tabel 4.6, maka fasa yang berwarna abu-abu ini merupakan fasa matriks yang terdiri atas 92,69 % Al; 1,57 % C; 0,23 % Si; 5,50% O. Berdasarkan hasil EDS ini dapat diketahui kemungkinan fasa yang terbentuk pada bagian ini adalah Al-O-C.

Pada fasa yang berwarna putih (mengkilap), terdiri atas 36,96% Al; 59,33% Cu; 0,95% C; 0,49% O. Berdasarkan hasil EDS ini dapat diketahui kemungkinan fasa yang terbentuk pada bagian yang didominasi oleh warna putih ini adalah Al-Cu-C. Fasa ini menunjukkan bahwa terjadi reaksi *Interface* antara *wetting agent*(Cu), matriks(Al) dan grafit dengan membentuk suatu fasa yang

berfungsi untuk menguatkan ikatan partikel serbuk. Namun, terlihat bahwa kadar C yang ada memang lebih rendah, hal ini mungkin terjadi karena *wetting agent* Cu kurang kurang memberikan hasil yang optimal, walaupun sifat mekanis yang dihasilkan sudah cukup baik. Berdasarkan penelitian sebelumnya, sifat mekanis dapat lebih ditingkatkan lagi dengan cara *wetting agent* Cu yang digunakan mengalami proses perlakuan permukaan (*surface treatment*). Menurut Fuentes dan kawan-kawan[3], dalam penelitiannya *wear behavior of self lubricating aluminum/graphite composite*, menyatakan bahwa  $\text{CuSO}_4$  merupakan larutan yang dapat digunakan untuk menghasilkan endapan Cu secara elektrolisis. Ion Cu direduksi menjadi endapan Cu dengan penambahan serbuk Zn, sehingga endapan Cu tersebut akan mengendap pada permukaan grafit dan meningkatkan *wettability* antara aluminium dan grafit. Apabila kandungan grafit kita abaikan, maka fasa intermetalik yang terbentuk adalah  $\text{AlCu}_2$  yang keras. Dengan kehadiran Cu yang terdispersi dan membentuk intermetalik  $\text{AlCu}_2$ , juga akan meningkatkan sifat mekanis dari material dengan menahan pergerakan dislokasi. Pengujian EDS ini menggunakan energi yang berasal dari *backscattered electron*, unsur yang berwarna terang, dalam hal ini putih (mengkilap) merupakan unsur yang memiliki nomer atom yang tinggi yaitu fasa intermetalik yaitu  $\text{AlCu}_2$ .

Pada fasa yang berwarna hitam (gelap), terdiri atas 62,01% Al; 5,28% C; 22,15% O dan kandungan Na, K, dan Si. Berdasarkan hasil EDS ini dapat diketahui kemungkinan fasa yang terbentuk pada bagian ini adalah  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Senyawa ini terbentuk akibat atmosfer yang digunakan pada saat sintering tidak *inert* sehingga sample teroksidasi.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  merupakan senyawa yang brittle sehingga akan menyebabkan material menjadi brittle dan menurunkan sifat mekanis dari material.

Tingginya kandungan oksigen yang terdapat pada fasa yang gelap, abu-abu, maupun matriks dapat menandakan bahwa sampel mengalami oksidasi dan membentuk suatu lapisan oksida yang terlihat pada seluruh permukaan sampel. Seperti telah dijelaskan diatas, lapisan oksida ini dapat dihasilkan dari proses sinter sebagai akibat dari reaksi dengan atmosfer dapur (*furnace*).