



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMBUATAN DAN KARAKTERISASI BATANG KAWAT
KONDUKTOR ALUMINIUM KOMPOSIT NANO AL-SiC/np
MELALUI PROSES METALURGI SERBUK DAN EKSTRUSI**

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Doktor

KOSWARA
NPM 0606037380

**PROGRAM DOKTORAL BIDANG ILMU MATERIAL
FAKULTAS MATEMATIK DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS INDONESIA
DEPOK 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Disertasi ini adalah hasil karya saya sendiri.

Semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk

Telah saya nyatakan dengan benar

Nama : Koswara

NPM : 0606037380

Tanda Tangan : 

Tanggal : 12 Januari 2012

HALAMAN PENGESAHAN

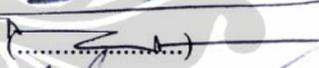
Disertasi ini diajukan oleh:

Nama : Koswara
 NPM : 0606037380
 Program Studi : Ilmu Material
 Judul Disertasi : Pembuatan dan Karakterisasi Kawat Konduktor Aluminium Komposit Nano Al-SiC/np Melalui Proses Metalurgi Serbuk Dan Ekstrusi

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Doktor pada Program Studi Ilmu Material, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

TIM PENGUJI

Dr. Adi Basukriadi	(Ketua)	
Dr. Bambang Soegijono	(Promotor)	
Dr. Ir. Dedi Priadi DEA	(Ko Promotor)	
Dr. Muhammad Anis	(Anggota)	
Dr. Azwar Manaf, M.Met	(Anggota)	
Prof. Dr. Ir D.N. Adnyana APU	(Anggota)	
Prof. Dr. Ir. Johny Wahyuadi	(Anggota)	

Ditetapkan di : Jakarta

Tanggal : 12 Januari 2012

KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Puji syukur kehadiran Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan disertasi ini. Penulisan disertasi ini dilakukan dalam rangka memenuhi syarat mendapatkan gelar Doktor pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Departemen Fisika, Jurusan Ilmu Material, Universitas Indonesia Jakarta. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, tidak mungkin disertasi ini bisa diselesaikan dengan baik. Untuk itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Dr. Bambang Soegijono, selaku Promotor dan Ketua Program Studi Ilmu Material yang telah banyak meluangkan waktu dan tenaga untuk membantu dan membimbing dalam penulisan disertasi ini.
2. Dr. Ir, Dedi Priadi DEA, selaku Ko-Promotor yang telah banyak memberikan bimbingan dalam penulisan disertasi ini.
3. Istri, Dra Kurniatin, Psi, dan anak, Yumna Sabila, yang selalu memberikan semangat dan motivasi untuk menyelesaikan pendidikan ini.
4. Seluruh Staf dan Karyawan di Program Pasca Sarjana Ilmu Material, Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia serta semua pihak yang telah banyak membantu yang tidak dapat disebutkan satu per satu.
5. Seluruh Staf dan Karyawan PT Krakatau Prima Dharma Sentana, khususnya, Ayi Suhendar, Aliman dan Edi Mashabi yang banyak membantu menyiapkan peralatan

Akhir kata, penulis berharap semoga Allah SWT membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga tulisan ini bermanfaat bagi pengembangan Ilmu Pengetahuan dan kesejahteraan masyarakat.

Jakarta, 2012

Penulis

Koswara
NPM 0606037380

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Koswara
NPM : 0606037380
Program Studi : Ilmu Material
Departemen : Físika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Jenis karya : Disertasi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Pembuatan dan Karakterisasi Batang Kawat Konduktor Aluminium Komposit Nano Al-SiC/np Melalui Proses Metalurgi Serbuk Dan Ekstrusi

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini, Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian Pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Jakarta

Tanggal : 12 – 01- 2012

Yang menyatakan :



Koswara

ABSTRAK

Nama : Koswara
Program studi : Ilmu Material
Judul : **Pembuatan dan Karakterisasi Batang Kawat Konduktor Aluminium Komposit Nano Al-SiC/np Melalui Proses Metalurgi Serbuk dan Ekstrusi**

Batang kawat konduktor komposit nano dengan matrix Aluminium dan penguat partikel nano SiC telah dibuat dengan teknik metalurgi serbuk dan ekstrusi. Bahan baku yang digunakan berupa serbuk aluminium dan serbuk nanopartikel SiC berukuran 50 nm sebanyak 0%, 1%, 5% dan 10% SiC dicampur dengan menggunakan ball mill. Bahanbaku aluminium serbuk dibuat melalui proses milling dan partikel nano SiC dilapisi dengan Mg yang dilanjutkan dengan proses oksidasi sehingga permukaan partikel nano ditutupi oleh MgO.

Proses kompaksi menggunakan mesin press satu arah dengan tekanan sebesar 10.000 kg menghasilkan tablet berdiameter 22 mm dan tebal 4 mm. Proses sinter dilakukan pada temperatur 570⁰C pada tekanan oksigen parsial sangat rendah selama 72 jam. Sampel hasil proses sinter dimasukkan ke dalam kontainer aluminium sehingga diperoleh bilet berdiameter 24 mm dan panjang 30 mm. Dengan proses ekstrusi pada temperatur 600⁰C dihasilkan kawat berdiameter 7 mm.

Berdasarkan pengujian dengan difraksi sinar x diketahui adanya fasa Al dan SiC dan terbentuknya fasa Al₂MgO₄. Melalui pengamatan dengan SEM, ditunjukkan telah terjadinya penggabungan partikel aluminium sebagai hasil proses sinter dan ekstrusi serta menunjukkan posisi nanopartikel SiC. Dari hasil pengujian kekerasan dengan menggunakan uji kekerasan mikro Vickers terhadap batang kawat Al-SiC/np diketahui bahwa nilai kekerasan pada Al-SiC/np naik seiring dengan naiknya kandungan SiC/np. Batang kawat AlSiC/np juga memiliki ketahanan terhadap temperatur yang cukup baik. Nilai kekerasan tetap stabil setelah pemanasan sampai 300⁰C selama 2 jam. SiC/np menurunkan konduktivitas kawat sehingga pemakaiannya dibatasi sampai hanya maksimum 1%.

ABSTRACT

Name : Koswara
Program : Material Science
Judul : **Manufacture and Characterization of SiC/np Reinforced Aluminum Metal Matrix Nanocomposite Wirerod Conductor Processed by Powder Metallurgy and Extrusion Method**

SiC/np reinforced aluminum conductor metal matrix nanocomposite wirerod has been produced by powder metallurgy process and extrusion method. The aluminum powder and each of 0%, 1%, 5% and 10% by weight of the 50 nm SiC nanoparticle were mixed in a ball milling unit. The aluminum powder manufactured by milling method and SiC nanoparticles covered by magnesium by electroless method, continued by oxidizing the Mg to obtain MgO cover in SiC nanoparticles.

The 22 mm diameter and 4 mm thickness green bodies were obtained after the mixed particles were pressed in a mold with a unidirectional 10,000 kg compacting force. The green bodies were then sintered in a very low oxygen partial pressure at 570⁰C in 72 hours. The sintered samples were then canned in aluminum containers to obtain 24 mm diameter and 30 mm long billets. The billets were extruded in 600⁰C to obtain 7 mm diameter wires.

X-ray diffraction examinations show Al and SiC phases and formation of Al₂MgO₄. The SEMs examination show coalescent of aluminum particles as results of sintering and extrusion processes. SEMs also show position of SiC/np in the matrix. Hardness tests using microvickers of the wire show increasing hardness value of MMNC SiC/np. Hardness value of the wire is stable after heating to 300⁰C in 2 hours. SiC/np influences conductivity of the wire and application of SiC/np limited to maximum 1%.

Abstrak	vi
DAFTAR ISI	viii
Daftar Gambar	x
Daftar Tabel	xii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Hipotesa	5
1.6 Batasan penelitian	6
1.7 Tata cara penulisan	7
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Perkembangan Komposit Nano	8
2.2 Hubungan antara Partikel Nano dengan Matrix Aluminium	16
2.3 Proses pembuatan Logam Komposit Nano	18
2.4 Material untuk Logam Komposit Nano	25
2.5 Mekanisme Penguatan pada Logam Komposit Nano	27
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	30
3.1 Urutan Proses	30
3.2 Penyediaan bahan baku	30
3.2.1 Serbuk aluminium	30
3.2.2 Partikel Nano SiC	32
3.2.3 Proses pelapisan SiC/np dengan Mg	33
3.3 Pembuatan Batang Kawat Aluminium Komposit Nano	34
3.3.1 Proses pencampuran	34
3.3.2 Proses evaporasi	35
3.3.3 Proses kompaksi	35
3.3.4 Proses sinter	36
3.3.5 Proses ekstrusi	38
BAB 4. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	40
4.1 Pembuatan Komposit Nano Al-SiC/np	40

4.2	Pembuatan Batang Kawat Aluminium Komposit Nano Al-SiC/np	43
4.2.1	Pembuatan serbuk aluminium	44
4.2.2	Penyiapan serbuk SiC/np	46
4.2.3	Proses pencampuran serbuk aluminium dengan SiC/np	47
4.2.4	Proses kompaksi dan sinter	48
4.2.5	Proses ekstrusi	49
4.3	Karakterisasi Batang Kawat Komposit Nano Al-SiC/np	50
4.3.1	Hasil pengamatan unsur dan fasa	51
4.3.2	Hasil pengamatan metalografi	52
4.3.3	Hasil pengujian kekerasan	54
4.3.4	Pengaruh temperatur terhadap nilai kekerasan	55
4.3.5	Pengaruh jumlah SiC/np terhadap konduktivitas	56
BAB 5 KESIMPULAN		60
DAFTAR REFERENSI		62
Lampiran 1 Perkembangan morfologi aluminium serbuk berdasarkan waktu ball milling		68
Lampiran 2 Pola Difraksi Sinar X		70
Lampiran 3 Perhitungan Jumlah MgO pada SiC/np		73
Lampiran 4 Tabel Konduktansi		74

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Kabel Saluran Udara Tegangan Extra Tinggi, yang terdiri dari inti penguat dan kawat konduktor	2
Gambar 2.1	Struktur mikro MA 760 superalloy dengan penguat Yttria dan Yttria – Alumina	9
Gambar 2.2	Partikel nano SiC	10
Gambar 2.3	Kawat nano SiC	10
Gambar 2.4	Skema peralatan proses pembuatan aluminium ASTM 356 komposit nano dengan metoda cair dan pengadukan dilakukan dengan bantuan ultrasonik	11
Gambar 2.5	Nilai kekerasan komposit nano Al-4Cu dengan variasi TiB	12
Gambar 2.6	Nilai kekuatan tarik komposit Al yang diperkuat multiwall nanotube dengan variasi komposisi dan waktu milling	12
Gambar 2.7	Hasil uji tarik Al, Al 2% C dan Al 3% C setelah proses <i>ball milling</i> , dan ekstrusi	14
Gambar 2.8	Hasil uji tarik pada sampel dari bahan baku Al Gas atomisasi, Al dengan proses <i>ball milling</i> pada atmosfer Ar, dan Al dengan proses <i>ball milling</i> pada atmosfer Ar + 5% O ₂	15
Gambar 2.9	Diagram tulang ikan penelitian komposit nano	16
Gambar 2.10	Daerah kerja untuk pembuatan MMC dengan penguat β -SiC dan matrix paduan Al-Si. SiC pada aluminium cair tidak terurai menjadi Si dan Al ₃ C ₄ pada daerah arsiran, yaitu antara Si 8% sampai Si 12%	17
Gambar 2.11	Pengaruh perbandingan tinggi dan diameter die (h) terhadap variasi tekanan di dalam tablet	22
Gambar 2.12	Skema difusi atom saat sinter	23
Gambar 2.13	Tiga cara ekstrusi pada serbuk	25
Gambar 2.14	Gambar skematis nanokomposit tipe intramatrix	27
Gambar 3.1	Bagan prosedur penelitian	31
Gambar 3.2	Tabung baja untuk proses sinter sampel diameter 20 mm	38
Gambar 3.3	Gambar konstruksi unit ekstrusi	39

Gambar 4.1	Tabung kwarsa dengan Sampel Al-SiC/np dan magnesium	40
Gambar 4.2	Struktur mikro komposit nano sampel dengan 1% SiC/np setelah sinter (SEM, 16.000x)	42
Gambar 4.3	Struktur mikro komposit nano sampel dengan 1% SiC/np setelah sinter (SEM, 30.000x)	42
Gambar 4.4	Struktur mikro komposit nano aluminium 356 dengan penguat SiC/np. Morfologi SiC/np terlihat dari bintik putih (SEM) (Li, 2004)	43
Gambar 4.5	Struktur mikro nanokomposit Al-SiC/np dengan teknik metalurgi serbuk. Morfologi SiC/np terlihat dari bintik putih (SEM) (Zebarzad, 2007)	43
Gambar 4.6	Perkembangan dimensi aluminium foil menjadi serbuk aluminium	45
Gambar 4.7	Morfologi serbuk aluminium setelah 30 jam ball milling (SEM, 2000x)	45
Gambar 4.8	Morfologi serbuk aluminium setelah 30 jam ball milling (SEM, 2000x) (Hong, 2001)	45
Gambar 4.9	Pola Difraksi Serbuk SiC-Mg	47
Gambar 4.10	Pola Difraksi Serbuk SiC-MgO	47
Gambar 4.11	Grafik DTA dari serbuk setelah proses milling dan mixing	48
Gambar 4.12	Unit ekstrusi	50
Gambar 4.13	Batang kawat hasil proses ekstrusi	50
Gambar 4.14	Pola Difraksi sinar x pada komposit Al-5% SiC/np setelah proses sinter	52
Gambar 4.15	Struktur mikro hasil proses sinter pada sampel dengan 1% SiC/np Pembesaran 500x	53
Gambar 4.16	Struktur mikro hasil ekstrusi batang kawat dengan 1% SiC/np Pembesaran 500x	53
Gambar 4.17	Nilai kekerasan (VHN) hasil sinter dan ekstrusi	55

Gambar 4.18 Pengaruh temperatur terhadap Nilai kekerasan (VHN) Kawat Hasil Ekstrusi	56
Gambar 4.19 Pengaruh jumlah SiC/np terhadap konduktivitas kawat hasil ekstrusi	58
Gambar 4.20 Pengaruh jumlah SiC/np pada konduktivitas kawat hasil ekstrusi	59



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Nilai kekerasan dan kerapatan aluminium komposit nano Al-C	14
Tabel 2.2 Jenis Proses Komposit Nano dengan Matrix Logam	15
Tabel 3.1 Karakteristik Partikel Nano SiC	32
Tabel 3.2 Komposisi Partikel Nano SiC pada Komposit Nano Al-SiC/np	35
Tabel 3.3 Temperatur dan Tekanan Parsial Mg	37
Tabel 4.1 Variasi Komposisi SiC/np dan Proses Pembuatan Batang Kawat Al-SiC/np	44
Tabel 4.2 Komposisi Mg dan MgO Setelah Proses Pelapisan	46
Tabel 4.3 Komposisi SiC/np dan Al_2MgO_4 pada Komposit Nano Al-SiC/np	51
Tabel 4.4 Pengaruh Komposisi SiC/np terhadap Resistivitas Batang Kawat pada Frekuensi 50 Hz	57

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Komposit adalah material yang terbuat dari dua komponen atau lebih yang bertujuan menggabungkan kelebihan sifat dari masing masing komponen. Pada komposit ada unsur matrix dan unsur penguat. Antara matrix dengan penguatnya harus terjadi ikatan sehingga kedua unsur tersebut dapat saling berinteraksi untuk memungkinkan penggabungan kekuatan dan menghilangkan kelemahan dari masing masing unsur komposit.

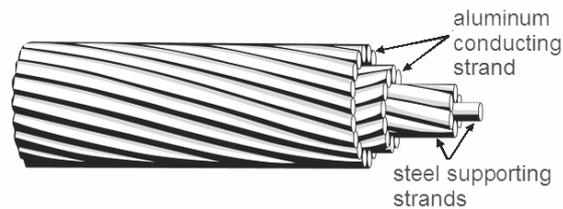
Secara umum ada 3 jenis komposit, yaitu plastik komposit, logam komposit dan keramik komposit. Logam komposit adalah komposit dengan matrix logam dan penguat dari keramik.

Pemakaian logam komposit terus berkembang dan mencapai puncaknya pada dasa warsa 1980-an. Saat ini logam komposit telah menjadi bagian dari dunia teknik dan banyak ditemukan dalam kehidupan sehari hari. Aplikasinya bermacam macam mulai dari sepatu rem pada mobil, sampai sebagai *heat sink* pada komponen elektronik.

Logam komposit dapat juga diaplikasikan pada kabel Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) atau Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET). Ada dua komponen utama kabel SUTET (Gambar 1.1), yaitu kabel konduktor dan kabel penguat. Kabel penguat berada di tengah dan terbuat dari baja atau komposit. Sedang kabel konduktor berada di bagian luar dan terbuat dari aluminium konduktor.

Kabel penguat dari bahan komposit menggantikan Baja Penguat Kabel Konduktor (Aluminum Conductor Steel Reinforced, ACSR). Paten atas produk tersebut telah dibuka yaitu US Patent no. 7,093,416 *method for manufacture ACCR* (Johnson, 2006). Komposit ini terdiri dari fiber yang dipilin dan matrix aluminium. Perbandingan antara fiber dengan matrix aluminium adalah antara 15:85, sampai

50:50. Dengan bobot yang lebih kecil, maka kemungkinan SUTET mulur karena bobot sendiri (shagging) menjadi lebih kecil.



Gambar 1.1 Kabel Saluran Udara Tegangan Extra Tinggi, yang terdiri dari inti penguat baja dan kawat konduktor (Gorur, 2009)

Kabel konduktor apabila dialiri listrik dalam jumlah yang lebih besar akan menjadi panas. Bila temperaturnya terlalu tinggi dan melewati temperatur rekristalisasi akan membuat kabel tidak mampu menahan beratnya sendiri yang dapat membebani kabel penguat sehingga menimbulkan gejala mulur.

Berbagai cara dilakukan untuk membuat kabel yang memiliki ampasitas tinggi (kemampuan menyalurkan listrik dalam jumlah tinggi). Kabel tersebut diantaranya adalah kabel konduktor yang terbuat dari paduan aluminium tanpa penguat baja. Kabel konduktor tanpa kabel penguat baja tersebut disebut AAAC (All Aluminum Alloy Conductor) menggunakan paduan Zr. Kawat konduktor dengan penguat senyawa AlZr ini sudah diaplikasikan dan digunakan untuk kabel konduktor yang mampu mengantar arus listrik lebih besar.

Mengingat karakteristik dari paduan Zr, maka AAAC dengan unsur paduan Zr memiliki batas pemakaian, yaitu temperatur kerja tidak boleh lebih dari 210⁰C. Oleh karena itu, maka muncul pemikiran untuk membuat kabel konduktor komposit yang diharapkan dapat bekerja pada ampasitas yang lebih besar dan artinya memiliki temperatur kerja yang lebih tinggi lagi. Kawat konduktor tersebut adalah kawat konduktor dengan penguat partikel nano

1.2 Perumusan Masalah

Kawat konduktor untuk Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi yang mampu menyalurkan listrik (ampasitas) dalam jumlah lebih banyak, sangat dibutuhkan.

Berbagai penelitian telah dilakukan dengan tujuan memperoleh kawat konduktor dengan ampasitas besar tapi tidak mengalami rekristalisasi pada temperatur tinggi. Diantaranya dengan menambahkan unsur paduan berupa Zr (Guo, 1994; Gunawan, 2000). Kawat ini disebut AAAC (All Aluminum Alloy Conductor). Penambahan suatu material partikel nano ke dalam aluminium konduktor juga merupakan salah satu cara untuk memperoleh kawat konduktor dengan ampasitas besar tapi tidak mengalami rekristalisasi pada temperatur tinggi.

Saat ini sudah dilakukan penelitian pembuatan kawat konduktor dengan penguat partikel nano dan disebut kawat konduktor komposit nano. Penelitian yang sudah dilakukan adalah dengan menambahkan partikel nano aluminium oksida (Al_2O_3). Komposit ini sudah ada yang dijadikan paten, yaitu US Patent no. 7,297,310 dengan judul *Manufacturing method for aluminum matrix nanocomposite* (Peng, 2007).

Penggunaan partikel nano SiC juga merupakan salah satu pilihan dalam membuat kawat konduktor. Namun demikian, saat ini penelitian tentang komposit dengan penguat partikel nano SiC (SiC/np) dengan matrix aluminium murni sebagai konduktor listrik tegangan tinggi belum pernah dilakukan.

Ada dua cara proses pembuatan komposit aluminium dengan penguat partikel nano SiC, yaitu dengan metoda cair dan metoda padat.

1. Pembuatan komposit melalui proses cair.

Pembuatan komposit dengan proses cair, dengan penguat SiC/np menemui banyak masalah, yaitu:

- Kebasahan antara aluminium dengan SiC rendah sehingga hubungan antara aluminium dengan SiC menjadi tidak sempurna yang berakibat SiC tidak berkontribusi sebagai penguat aluminium.
- Disosiasi SiC, yang memungkinkan Si larut ke dalam aluminium dan C bersenyawa dengan aluminium menjadi Al_4C_3 . Kedua permasalahan tersebut makin membesar dengan mengecilnya ukuran penguat SiC.

Disosiasi bertambah besar karena luas permukaan spesifik SiC/np sangat besar.

- Untuk SiC berukuran nano, tidak adanya kebasahan juga mengakibatkan SiC mengambang bila dicampur ke dalam aluminium cair sehingga komposit nano tidak terbentuk.

2. Proses pembuatan aluminium dengan cara metalurgi serbuk

Proses pembuatan aluminium komposit dengan penguat SiC/np dengan cara metalurgi serbuk dapat mengatasi permasalahan pencampuran partikel nano SiC. Namun, lapisan tipis alumina yang terbentuk di setiap permukaan partikel serbuk aluminium menghambat proses sinter dan dapat menggagalkan proses.

Berdasarkan hal itu perlu dilakukan penelitian proses pembuatan batang kawat konduktor aluminium komposit nano dengan penguat partikel nano SiC menggunakan metoda metalurgi serbuk dan ekstrusi. Diharapkan, batang kawat ini memiliki sifat mekanik stabil pada temperatur tinggi.

Masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Kabel konduktor yang mampu bekerja pada temperatur yang lebih tinggi. Kebutuhan tersebut dapat dipenuhi dengan menggunakan komposit nano
2. Kawat konduktor komposit nano menggunakan partikel nano SiC/np sebagai penguat. Partikel nano SiC/np sulit dibasahi oleh aluminium sehingga dibutuhkan material perantara, yang mengantari SiC/np dengan aluminium
3. Terdapat masalah sinter dalam pembuatan kawat konduktor komposit nano yang dilakukan dengan metoda metalurgi serbuk dan ekstrusi.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Membuat komposit nano Al-SiC/np dengan menggunakan metoda metalurgi serbuk dengan cara sinter di bawah titik cair logam (*solid state sintering*).

- 2 Membuat batang kawat dari komposit nano Al-SiC/np dengan metoda ekstrusi
- 3 Melakukan analisis pengaruh partikel nano SiC sebagai penguat pada batang kawat Al-SiC/np terhadap nilai kekerasan dan konduktivitas.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan batang kawat konduktor aluminium komposit nano dengan penguat partikel nano SiC. Pembuatannya dilakukan dengan metoda metalurgi serbuk dengan teknik sinter pada kondisi tekanan oksigen parsial P_{O_2} yang sangat rendah yang dilanjutkan dengan ekstrusi. Diharapkan, dari hasil penelitian ini diperoleh:

- Batang kawat konduktor aluminium komposit nano dengan penguat partikel nano SiC yang memiliki konduktivitas tinggi dapat dijadikan peluang sebagai kawat konduktor tegangan ekstra tinggi yang mampu menyalurkan listrik dalam ampasitas yang lebih tinggi.
- Mendapatkan parameter proses pembuatan kawat konduktor dengan metoda metalurgi serbuk

1.5 Hipotesa

Ada beberapa hipotesa dalam penelitian ini yaitu:

- 1 Tekanan oksigen parsial mempengaruhi keberhasilan proses sinter
- 2 Pelapisan permukaan partikel nano SiC dengan Mg dapat membentuk senyawa Al_2MgO_4 yang mengikat partikel nano SiC dengan matrix aluminium.
- 3 Penambahan SiC/np dapat meningkatkan nilai kekerasan batang kawat serta dapat menghambat pertumbuhan butir pada temperatur tinggi

1.6 Batasan Penelitian

Penelitian ini bertujuan membuat batang kawat konduktor aluminium komposit nano dengan penguat SiC/np, dengan variasi SiC/np 0%, 1%, 5% dan 10% dari total volume komposit dan dilakukan dengan cara sinter di bawah temperatur cair

(*solid state sintering*) dan pada kondisi tekanan oksigen parsial sangat rendah, dan dilanjutkan dengan proses ekstrusi.

Penelitian ini terdiri dari:

- a. Pembuatan serbuk aluminium
- b. Pencampuran serbuk aluminium dengan SiC/np
- c. Pemadatan (kompaksi)
- d. Sinter
- e. Ekstrusi
- f. Karakterisasi

Penelitian ini dilakukan mulai dari penyiapan serbuk aluminium sampai ke proses ekstrusi. Bahan SiC/np didapat dari NaBond Technologies Inc, China, sedangkan serbuk aluminium diperoleh melalui proses *ball milling* dari aluminium foil. Dalam proses ini besar kemungkinan serbuk aluminium terkontaminasi sehingga pada komposit terdapat sejumlah pengotor.

Proses ekstrusi dilakukan dengan bilet aluminium berdiameter 24 mm dan panjang 30 mm. Di dalam bilet terdapat 5 tablet komposit hasil proses sinter berdiameter 22 mm dan panjang 4 mm yang dimasukkan melalui proses *canning*. Dengan lubang cetakan berdiameter 7 mm maka panjang batang kawat komposit hanya berkisar sekitar 17 cm. Batang kawat ini terlalu pendek untuk dijadikan sampel uji tarik. Dengan demikian, pengujian mekanik hanya berupa uji kekerasan mikro dengan beban 50 gram waktu pembebanan 15 detik.

Karakterisasi pada batang kawat terdiri dari difraksi sinar x, metalografi dengan SEM, pengujian kekerasan mikro dengan beban 50 gram waktu pembebanan 15 detik dilakukan pada batang kawat setelah ekstrusi, dan setelah dipanaskan pada berbagai temperatur selama 2 jam, serta pengujian konduktifitas.

1.7 Tata Cara Penulisan

Bab 1 berisi tentang Pendahuluan dan membahas tentang perumusan masalah, hipotesa dan batasan penelitian. Bab 2 membahas tinjauan pustaka yang

berhubungan dengan permasalahan komposit nano secara umum dan khususnya dengan matrix aluminium dan penguat SiC/np. Bab 3 berisi tentang jalur proses pembuatan dan metodologi penelitian, Bab 4 tentang hasil penelitian dan pembahasan dan Bab 5 berisi tentang kesimpulan.



BAB II

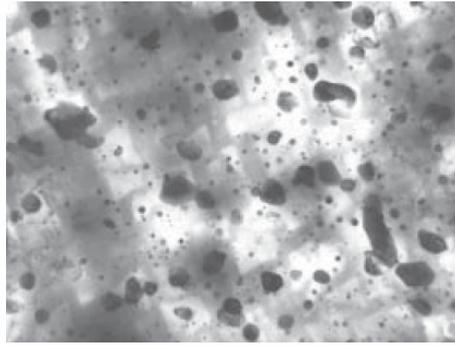
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Perkembangan Komposit nano

Pembuatan komposit dengan matrix aluminium dimulai sejak tahun 1965 oleh Pradeep K. Rohatgi (Gupta, 2006; Rohatgi, 2001). Komposit ini dibuat dengan partikel penguat berupa grafit yang dilapisi nikel. Pada penelitian ini, partikel grafit yang dilapisi nikel dimasukkan ke dalam aluminium cair dengan bantuan tiupan gas inert. Grafit adalah material yang tidak dapat dibasahi oleh aluminium cair. Penggunaan nikel yang membungkus partikel grafit memungkinkan aluminium membasahi partikel. Agar campuran antara grafit dengan aluminium merata, pengadukan dilakukan dengan metoda *mechanical stirrer*.

Perkembangan komposit dengan penguat partikel nano (komposit nano) dimulai sejak tahun 1970 oleh John Benjamin dari Inco (Neikov, et al, 2009) dengan menggunakan thoria sebagai penguat nikel (Thoria dispersion strengthening nickel – TD Nickel). TD Nickel banyak digunakan pada pembuatan sudu turbin jet. Proses pembuatan TD nickel dilakukan dengan cara mencampur serbuk nikel dengan serbuk thoria dan disebut metoda pemaduan mekanis (*mechanical alloying*).

Karena sifat thoria yang radioaktif, saat ini thoria diganti dengan yttria, dan disebut YD Nickel (Yttria Dispersion Nickel). Prosedur pembuatan YD Nickel adalah, nikel dan paduannya, *master alloy* berbentuk serbuk yang berisi beberapa logam reaktif (yang mudah teroksidasi), serta yttrium oksida dengan ukuran 20 nm sampai 40 nm dicampurkan dengan pemaduan mekanis. Serbuk campuran dimasukkan ke dalam tabung baja dan divakum pada temperatur 538⁰C dan kemudian ditutup. Tabung baja berisi serbuk dipanaskan dan diekstrusi. Hasil ekstrusi dicanai panas pada temperatur 1010⁰C selanjutnya dilunakkan. Hasilnya adalah paduan super dengan struktur mikro seperti terlihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Struktur mikro MA 760 superalloy dengan penguat Yttria dan Yttria-Alumina. Pengamatan dengan TEM (Soni, 2001)

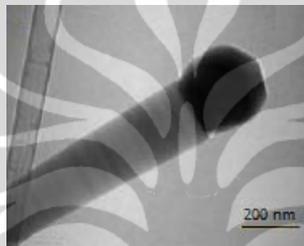
Pembuatan YD Nickel mendorong pengembangan komposit dengan matrix logam dan penguat nano sehingga ditemukan berbagai jenis penguat nano. Terdapat berbagai bentuk penguat berukuran nano. Penguat berdimensi nol disebut partikel nano dan penguat berdimensi satu disebut kawat nano serta tabung nano (nanotube).

Partikel nano dapat berupa oksida, karbida dan nitrida. Partikel nano tersebut diantaranya adalah alumina (Al_2O_3), titania (TiO_2), thoria (ThO_2), yttria (Y_2O_3), lanthana (La_2O_3) dan beryllia (BeO), Nitrida (TiN) dan borida serta karbida seperti SiC (Gambar 2.2). Sedangkan kawat nano diperoleh dari oksida, karbida dan nitride. Kawat nano tersebut diantaranya adalah ZnO, Ga_2O_3 and MgO, CuO, SiC (Gambar 2.3) dan Si_3N_4 . Sedangkan tabung nano (*nanotube*) terbuat dari karbon. Ada dua jenis tabung nano, yaitu *single wall nanotube* (SWNT) dan *multiwall nanotube* (MWNT). Walaupun umumnya tabung nano ini digunakan pada komposit dengan matrix plastik, sekarang sudah ada penelitian menggunakan tabung nano dengan matrix logam.

Penelitian dengan penguat partikel nano SiC sudah banyak dilakukan. Matrix yang digunakan bermacam macam dan khusus matrix logam ringan yang digunakan adalah Mg dan paduannya atau paduan Al. Pembuatan komposit dengan penguat nano dilakukan dengan dua cara, yaitu dengan metoda cair dan metoda padat. Pembuatan dengan metoda cair dilakukan dengan bantuan ultrasonik sedang pembuatan dengan metoda padat dilakukan dengan teknik metalurgi serbuk.



Gambar 2.2 Partikel nano SiC. Pengamatan dengan TEM (NaBond, 2010)



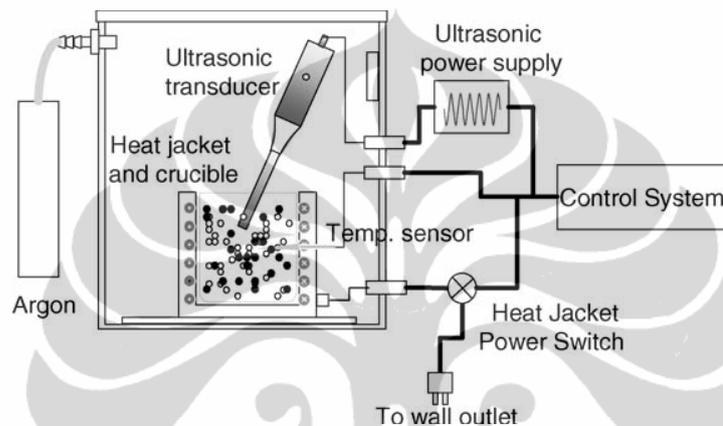
Gambar 2.3 Kawat nano SiC. Pengamatan dengan TEM (Liu, 2007)

Penelitian untuk membuat komposit nano dengan metoda cair dilakukan oleh Xiaochun Li dkk (Li, et al, 2004) pada paduan aluminium ASTM 356 (paduan Al - 1%Cu-7%Si) dengan penguat 2% SiC/np. Pencampuran SiC/np ke dalam paduan aluminium dilakukan dengan bantuan ultrasonik. Dari penelitian ini diperoleh komposit nano dengan nilai kekerasan 20% lebih tinggi dibanding tanpa 2% SiC/np.

Krusibel yang digunakan dalam penelitian Xiaochun Li dkk (Li, et al, 2004) terbuat dari bahan keramik. Logam paduan aluminium ASTM 356 dengan Si 7% Cu 1% dan Mg 0,35% dicairkan dengan menggunakan pemanas elemen. Unit ultrasonik untuk keperluan pengadukan dan untuk memungkinkan mengatasi masalah kebasahan, mampu membangkitkan getaran sebesar 20 kHz dengan kekuatan 600 W dengan *horn (probe)* terbuat dari titanium. Seperti dapat dilihat pada Gambar 2.4.

Proses pembuatan komposit nano dimulai dengan memasukkan aluminium ASTM 356 ke dalam krusibel dan memanaskannya sampai 710°C atau 100°C di atas titik

cair paduan. Partikel nano SiC berukuran 50 nm dimasukkan ke dalam cairan. *Horn* ultrasonik dimasukkan ke dalam cairan. Gelombang ultrasonik dari *horn* dapat menyelesaikan masalah kebasahan serta membantu proses pengadukan. Kebasahan dapat diatasi karena gelombang ultrasonik yang dipancarkan oleh *horn* menimbulkan *hot spot* mikro dalam tempo seketika dan hanya dalam waktu nano detik. Selain itu, temperatur di sekitar partikel nano mencapai 5000°C , tekanan 1000 atm dengan kecepatan pemanasan dan pendinginan sampai 10^{10} K/detik.

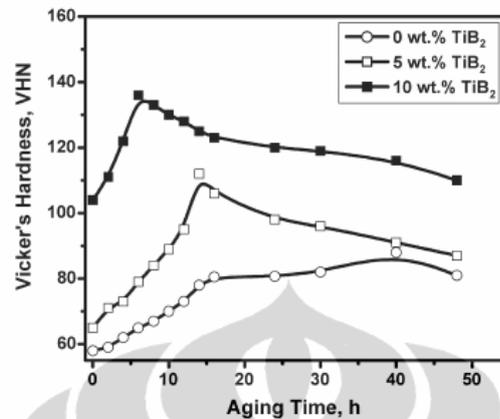


Gambar 2.4 Skema peralatan proses pembuatan aluminium ASTM 356 komposit nano dengan metoda cair dan pengadukan dilakukan dengan bantuan ultrasonik (Li, et al, 2004)

Penelitian oleh Kumar dkk (Kumar, S. et al, 2007), dengan menggunakan komposit Al-4Cu dengan 0%, 5% dan 10% TiB_2 dengan teknik *in-situ* diperoleh komposit dengan diameter partikel antara 0,5 – 1 μm . Metode *in-situ processing* pada pembuatan komposit ini dilakukan dengan cara memasukkan garam K_2TiF_6 dan KBF_4 ke dalam Al-4Cu cair dengan temperatur 800°C . Pengaturan dan waktu reaksi serta perbandingan yang tepat antara Ti:B dapat mencegah terbentuknya Al_3Ti . Selanjutnya dilakukan penuangan pada mold dengan diameter 12 mm dan panjang 300 mm.

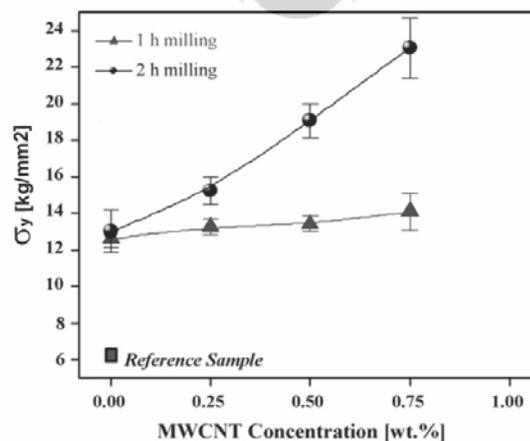
Proses artificial aging dilakukan dengan cara solutionizing (melarutkan Cu dan diikuti dengan quenching) hasil proses pengecoran tersebut pada temperatur 540°C selama 2 jam dan aging pada temperatur 170°C pada berbagai variasi waktu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terjadi peningkatan nilai kekerasan dari 88 VHN menjadi 136 VHN pada komposit 10 TiB_2 . Selain itu diketahui

bahwa waktu aging berubah dari 40 jam untuk 0% TiB₂, menjadi 14 jam (pada 5% TiB₂) dan 6 jam (pada 10% TiB₂). Hasil proses dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Nilai kekerasan komposit nano Al-4Cu dengan variasi TiB (Kumar, S. et al, 2007)

Penelitian pembuatan aluminium komposit nano yang menggunakan penguat berupa *multi-wall carbon nanotube* (MWCNT) dilakukan oleh Perez-Bustamante (Perez-Bustamante R., 2006). Pada penelitian ini, serbuk aluminium dengan kemurnian 99,9% dan berukuran 325 mesh dicampur dengan 0,25%, 0,5% dan 0,75% MWCNT. Pencampuran dilakukan dua tahap, yaitu diaduk dengan menggunakan ultrasonik selama 5 menit dan dilanjutkan dengan menggunakan *mechanical milling* dengan waktu *milling* yang bervariasi. *Milling* dilakukan tanpa menggunakan *Process Control Agent*. Proses sinter dilakukan pada temperatur 550°C pada kondisi vakum dengan tekanan hanya 2 torr selama 3 jam.



Gambar 2.6 Nilai kekuatan tarik komposit Al yang diperkuat multiwall nanotube dengan variasi komposisi dan waktu *milling* (Perez-Bustamante R., 2006)

Gambar 2.6 menunjukkan pengaruh kandungan MWCNT terhadap kekuatan tarik komposit nano. Dari Gambar 2.6 diketahui bahwa dengan 0,75% MWCNT dan waktu *milling* 2 jam kekerasannya naik menjadi 77 VHN, dibanding dengan 57 VHN untuk aluminium murni.

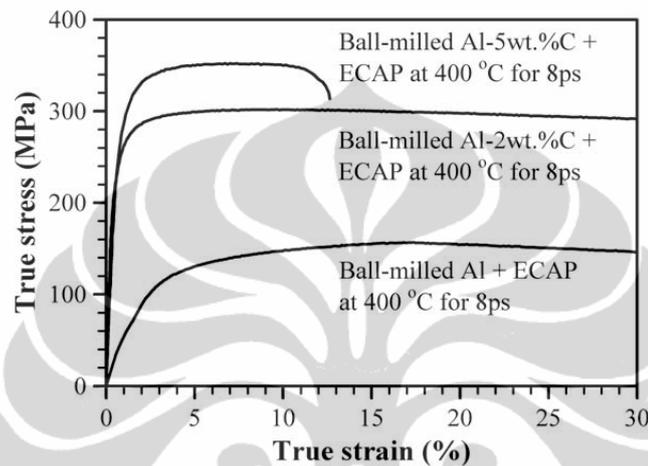
Mendoza-Ruiz (Mendoza-Ruiz, 2008) melakukan penelitian dengan mencampur serbuk aluminium Al-6063 berukuran 200 mesh, dengan partikel grafit dengan metoda *mechanical milling* yang dilanjutkan dengan proses sinter dan ekstrusi (Mendoza-Ruiz, 2008). Pada penelitian ini, partikel grafit diperoleh dengan cara *milling* selama 4 jam dan 8 jam. Jumlah partikel grafit divariasikan mulai dari 0.25, 0.50, 0.75, 1.0, 1.25, 1.50, 1.75, sampai 2.0 wt.% C.

Pencampuran dilakukan dengan metoda *mechanical milling* selama 2 jam. Perbandingan antara berat bola baja dengan serbuk adalah 20:1. Proses kompaksi dilakukan dengan menggunakan mesin pres satu arah pada tekanan 648 MPa selama 2 menit. Proses sinter dilakukan pada kondisi vacuum dengan tekanan < 1 torr pada temperatur 823K selama 1 jam. Selanjutnya dilakukan pengujian mekanis dan karakterisasi struktur mikronya. Dari hasil pemeriksaan diketahui bahwa terjadi kenaikan sifat mekanik dengan bertambahnya kandungan grafit. *Milling* selama 8 jam pada C sebesar 0,5% menghasilkan σ_y sebesar 125 MPa sedang *milling* selama 4 jam menghasilkan σ_y sebesar 110 MPa. Hal ini disebabkan oleh terjadinya penguatan dispersi oleh grafit. Namun demikian, dengan naiknya jumlah grafit, terjadi penggumpalan pada grafit sehingga dengan makin tingginya jumlah grafit, sifat mekaniknya menurun.

Penelitian yang dilakukan oleh Goussous (Goussous et al, 2009) adalah membuat aluminium komposit nano dengan penguat *carbon black* berukuran nano. Bahan baku berupa aluminium serbuk berukuran 35 μm dengan bentuk tidak beraturan, dan *carbon black* yang bersifat amorf berukuran 30 nm. Proses pencampuran dilakukan dengan metoda *mechanical milling* sedangkan pembuatan produk dilakukan dengan metoda *equal channel angular pressing* pada temperatur 400⁰C sehingga diperoleh komposit nano. Hasil pengujian kekerasan dan kerapatan dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Nilai kekerasan dan kerapatan aluminium komposit nano Al-C

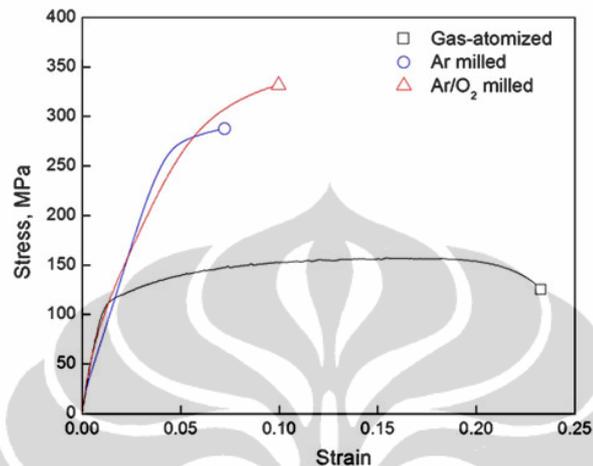
Material	HV (kg/mm ₂)	Kerapatan
Al- Murni	37,1	2,70
Al-2%C	83,1	2,68
Al-5%C	96,5	2,65

Gambar 2.7 Hasil uji tarik Al, Al 2%C dan Al 3%C setelah proses *ball milling*, dan ekstrusi (Goussous et al, 2009)

Penelitian Asgharzadeh (Asgharzadeh et al, 2011) adalah membuat aluminium komposit nano dengan penguat oksida terdispersi (ODS – Oxide Dispersion Strengthening). Bahan baku berupa serbuk aluminium AA 6061 berukuran 71 μm dengan komposisi 0,64% Mg, 0,67% Si, 0,2% Cu, 0,32% Fe sisanya Al. Serbuk tersebut diproduksi dengan teknik atomisasi. Serbuk dicampur dengan 1,5% berat asam stearat kemudian mendapat proses *milling* selama 1200 menit. Dilakukan dua penelitian proses *milling*, yaitu *milling* yang menggunakan argon dengan kemurnian tinggi, dan *milling* yang menggunakan argon yang dicampur dengan 5% O₂.

Pada serbuk selanjutnya dilakukan proses ekstrusi. Proses ekstrusi terdiri dari preparasi berupa *vacuum degassing* pada temperature 400⁰C selama 60 menit, kompaksi pada 200 MPa di dalam container aluminium, *preheating* pada 450⁰C selama 45 menit, ekstrusi pada temperatur 450⁰C pada rasio 14:1 sehingga diperoleh bilet segi empat berukuran 20 x 10 mm². Pengujian tarik pada produk hasil ekstrusi menunjukkan data bahwa sampel yang berasal dari serbuk yang

mendapat proses *milling* pada atmosfer argon + 5% O₂ memiliki yield stress 289 MPa. Sampel hasil ekstrusi yang berasal dari serbuk hasil proses *milling* pada atmosfer argon memiliki yield stress sebesar 257 MPa. Grafik hasil uji tarik dapat dilihat pada Gambar 2.8.



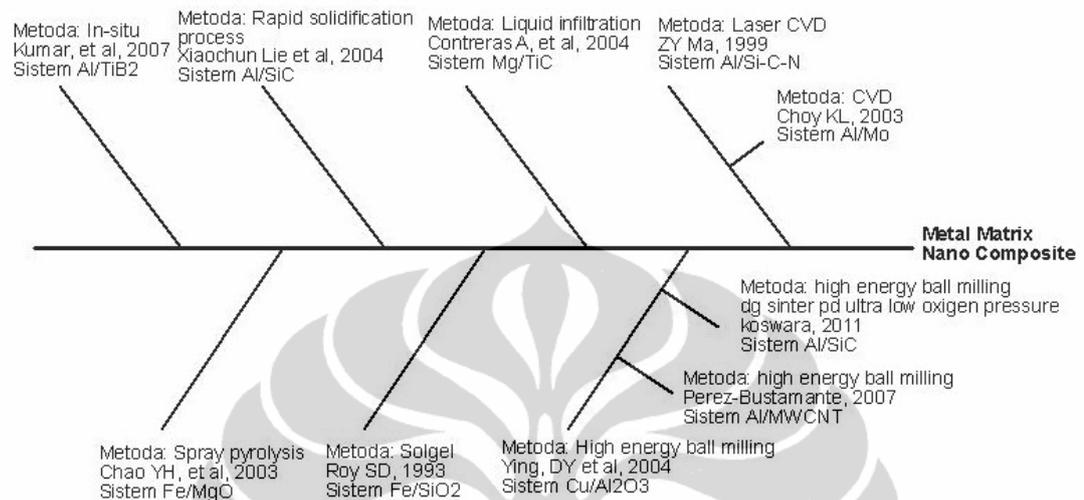
Gambar 2.8 Hasil uji tarik pada sampel dari bahan baku Al Gas atomisasi, Al dengan proses *ball milling* pada atmosfer Ar, dan Al dengan proses *ball milling* pada atmosfer Ar + 5% O₂ (Asgharzadeh et al, 2011)

Kawat aluminium konduktor dengan penguat partikel nano sudah dibuat dan paten atas kawat tersebut sudah dibuka. Paten tersebut diantaranya adalah dengan patent no. 3,816,080 *Mechanically alloyed aluminum-aluminum oxide* (Bomford, 1974) dan Paten no 7,297,310 *Manufacturing method for aluminum matrix nanocomposite* (Peng, 2007).

Tabel 2.2 Jenis Proses Komposit Nano dengan Matrix Logam

	Jenis proses	Sistem komposit
1	<i>Spray pyrolysis</i>	Fe/MgO; W/Co
2	<i>Liquid Infiltration</i>	Pb/Cu, Pb/Fe; Nb/Fe; Al/C ₆₀
3	<i>Rapid solidification Process (RSP)</i>	Al/Pb; Al/X/Zr/Fe (X=Si, Cu, Ni)
4	<i>Chemical vapor Diposition</i>	Al/Mo
5	<i>High Energy Ball Milling</i>	Cu/Al ₂ O ₃ ; Al/SiCnp; Al/MWCNT
6	<i>Chemical Processes</i>	Ag/Au; Fe/SiO ₂
7	<i>In-situ</i>	Al/TiB ₂

Secara umum, proses pembuatan logam komposit nano dapat dikelompokkan menjadi 7 kelompok seperti terlihat pada Tabel 2.2 (Camargo , 2009; Kumar, 2007; Perez-Bustamante, 2006) dan Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Diagram tulang ikan penelitian komposit nano

2.2 Hubungan antara Partikel Nano dengan Matrix Aluminium

SiC adalah satu satunya bentuk ikatan kimia yang antara unsur C dan Si. SiC digunakan untuk berbagai macam pemakaian, dari mulai sebagai amplas, penguat pada komposit sampai sebagai semikonduktor temperatur tinggi. Ikatan antara unsur Si dan C adalah 88% covalent, dan 12% ionic. Jarak antara atom Si dan atom C adalah 1,89Å.

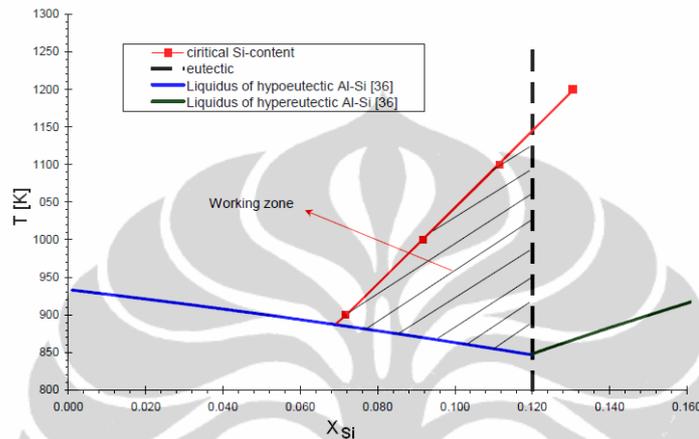
SiC memiliki kebasahan yang sangat rendah terhadap Aluminium (Zoltai, 2001). Kondisi ini dapat berakibat tidak adanya ikatan antara logam matrix dengan partikel penguat SiC yang dapat melemahkan kekuatan dari komposit.

Selain masalah kebasahan, SiC dan aluminium memiliki masalah disosiasi. Persamaan reaksinya adalah:



l = liquid dan s = solid

Penelitian yang dilakukan oleh Yaghmaee (Yaghmaee, 2001) menunjukkan daerah disosiasi antara aluminium dengan SiC. SiC pada aluminium cair tidak terurai menjadi Si dan Al_3C_4 pada daerah arsiaran, yaitu antara Si 7% sampai Si 12%. Untuk aluminium murni (Al dengan Si 0%), batas maksimum temperatur untuk tidak terbentuk Al_4C_3 adalah 933K atau 660⁰C yang merupakan temperatur liquidus dari aluminium.



Gambar 2.10. Daerah kerja untuk pembuatan MMC dengan penguat β -SiC dan matrix paduan Al-Si. SiC pada aluminium cair tidak terurai menjadi Si dan Al_3C_4 pada daerah arsiaran, yaitu antara Si 7% sampai Si 12% (Yaghmaee, 2001)

Adanya unsur Mg pada aluminium memungkinkan terjadinya disosiasi SiC melalui reaksi kimia berikut:



Reaksi ini (Vaucher,) terjadi pada temperatur di atas 650⁰C dan dapat menghilangkan partikel nano SiC sehingga menggagalkan proses pembuatan komposit nano. Dengan kata lain unsur Mg dapat bersifat katalisator untuk terjadinya disosiasi SiC. Indikasi pengaruh Mg terhadap disosiasi SiC di dalam aluminium cair seperti ditunjukkan pada persamaan (2) juga diteliti oleh Yaghmaee (Yaghmaee, 2001).

Beberapa hal dalam masalah disosiasi ini adalah sebagai berikut:

- Reaksi akan tetap terjadi walaupun dalam keadaan solid state, jika tidak ada Si di dalam Al
- Selain terbentuk Al_4C_3 , akan terbentuk juga $Al_4Si_2C_5$ pada interface, pada

temperatur minimum 640°C

- c. Reaksi pembentukan Al_4C_3 akan dihindari bila terdapat kandungan minimum Si di dalam cairan aluminium dan kandungan minimum akan naik dengan naiknya temperatur.

Masalah lain dalam hubungan antara partikel nano SiC dengan matrix aluminium adalah masalah perbedaan ekspansi termal yang tinggi antara aluminium dengan SiC (Ahmed, 2007). Aluminium memiliki ekspansi thermal sebesar $23,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ sementara SiC memiliki ekspansi thermal sebesar $4,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Perbedaan ini bermasalah bila ukuran SiC lebih dari $100 \text{ }\mu\text{m}$ karena dapat menimbulkan tegangan sisa yang besar, khususnya setelah menjalani proses pengerjaan mekanis pada temperatur tinggi atau perlakuan panas. Namun, dengan semakin mengecilnya dimensi penguat SiC sampai ke ukuran 50 nm , pengaruh ekspansi termal ini semakin mengecil dan cenderung diabaikan.

2.3 Proses pembuatan Al-SiC/np

Pembuatan Al-SiC/np dapat dilakukan dengan berbagai cara, diantaranya yaitu:

- a. Pembuatan komposit Al-SiC/np melalui fasa cair (Liquid state processing)
- b. Pembuatan komposit Al-SiC/np melalui fasa padat (Solid state processing)

Pencampuran pada saat cair memerlukan cara penanganan masalah kebasahan dan disosiasi. Sedangkan pencampuran dengan teknik metalurgi serbuk memerlukan bahan kendali proses (*process control agent*, PCA). Bahan kendali proses ini berada di permukaan partikel dan berfungsi untuk mengurangi kontak antar partikel dan dengan demikian mencegah penggumpalan.

Pembuatan komposit Al-SiC/np melalui fasa cair

Liquid state processing dilakukan dengan mencampurkan serbuk partikel nano ke dalam logam cair. Logam cair diaduk dengan alat pengaduk, kemudian dicampurkan serbuk partikel nano. Proses ini menimbulkan masalah, yaitu serbuk partikel nano tetap mengambang di permukaan logam cair. Keadaan tetap mengambang ini disebabkan oleh efek *buoyancy*.

Ada 2 faktor yang mempengaruhi efek *buoyancy*:

a. Gaya hidrostatik

Gaya hidrostatik melawan gaya gravitasi dari partikel yang berada di logam cair. Apabila gaya hidrostatik lebih kecil dari gaya gravitasi yang dialami partikel yang berada di media cair, maka partikel akan tenggelam. Namun sebaliknya, bila gaya hidrostatik lebih besar dari gaya gravitasi, maka partikel akan didorong ke permukaan.

b. Tegangan permukaan

Tegangan permukaan besarnya tergantung pada tingkat kebasahan dari partikel dengan logam cair, serta luas permukaan partikel. Keramik memiliki tingkat kebasahan yang sangat kecil, yang bila dilihat dari sudut kebasahan θ , memiliki sudut kebasahan $\theta > 100^\circ$. Artinya partikel keramik tidak dapat dibasahi oleh logam cair. Partikel nano memiliki luas permukaan yang sangat besar untuk suatu satuan volume. Dengan demikian, tegangan permukaannya juga sangat besar.

Penelitian Zoltai dan Han (Zoltai, L, 2001; Han, 1993) menunjukkan bahwa pembasahan kovalen keramik oleh logam cair memiliki sudut θ di atas 100° . Angka θ di atas 90° berarti keramik tidak dapat dibasahi oleh logam cair. Untuk sistem SiC dengan aluminium, kebasahannya mencapai 167° . Angka ini menunjukkan bahwa SiC tidak dapat dibasahi oleh aluminium. Selain itu, luas permukaan partikel nano SiC yang sangat besar, sehingga partikel nano SiC tetap berada di permukaan aluminium cair. Dengan demikian, pembuatan komposit nano melalui fasa cair terhambat oleh masalah pembasahan partikel nano oleh logam matrix sehingga partikel nano SiC tetap mengapung di permukaan aluminium cair.

Berbagai penelitian dilakukan untuk menurunkan tegangan permukaan, diantaranya yaitu dengan mempelajari pengaruh Ca, Pb atau Mg yang terdapat pada paduan aluminium terhadap kemungkinan kebasahan permukaan SiC (Candan, 2002). Penelitiannya menggunakan metoda *sessile drop*, yaitu dengan menempatkan paduan aluminium padat seberat 2 gram yang telah dicampur

dengan Ca atau Pb atau Mg dengan berbagai komposisi pada permukaan SiC berukuran 12 mm x 12 mm x 5 mm. Penelitian dilakukan di dalam tabung dari bahan *mullite* dan dipanaskan di dalam *muffle furnace* pada temperatur 750°C. Tabung dioperasikan pada kondisi vakum dengan tekanan 10^{-5} torr. Di dalam tabung, ditempatkan spons Ti untuk menurunkan kandungan oksigen dan nitrogen. Hasil penelitian menunjukkan unsur-unsur tersebut menurunkan sudut kebasahan dari aluminium, yang berarti meningkatkan kebasahan dari aluminium.

Pemberian kejutan ultrasonik pada logam cair dapat meningkatkan kebasahan antara partikel nano dengan logam cair sehingga tegangan permukaan menurun. Penelitian ini telah berhasil dengan menggunakan matrix magnesium (Cao, et al, 2008, dan Li, 2006). Penelitian dengan memanfaatkan efek pulsa ultrasonik pada partikel nano juga dilakukan oleh Li (Li, 2004) dengan menggunakan matrix aluminium 356 (Si 7%; Cu 1%; Mg 0,35%).

Namun, keberhasilan pencampuran SiC/np dengan logam cair memunculkan masalah lain, yaitu bila SiC bersentuhan dengan aluminium cair, SiC akan berdisosiasi melalui persamaan (2). Pengamatan oleh Peteves, (Peteves, 1990) dengan menggunakan TEM menunjukkan terbentuknya Al_4C_3 pada interface antara aluminium dengan SiC.

Disosiasi dari SiC tergantung juga pada luas permukaannya. Makin luas permukaan SiC bersentuhan dengan aluminium cair, makin besar jumlah SiC yang berdisosiasi. SiC partikel nano memiliki permukaan yang jauh lebih luas dibandingkan dengan SiC berukuran micron. Dengan demikian, sangat besar kemungkinan terjadinya disosiasi.

Berdasarkan hal ini, serta penelitian yang dilakukan oleh Yaghmaee (Yaghmaee, 2001) dapat disimpulkan bahwa pembuatan logam komposit nano dengan matrix aluminium dengan Si secara teoritis kurang dari 7% tidak dapat dilakukan, karena kemungkinan terjadinya disosiasi dari SiC. Oleh karena itu, pembuatan aluminium komposit nano dengan penguat SiC/np dan matrix aluminium 99% hanya dapat dilakukan dengan menggunakan metoda metalurgi serbuk dan tidak dapat dilakukan melalui fasa cair.

Pembuatan komposit nano Al-SiC/np melalui fasa padat

Secara umum, pembuatan batang kawat komposit nano Al-SiC/np melalui fasa padat dilakukan dengan urutan sebagai berikut:

a. Pembuatan serbuk aluminium

Pembuatan serbuk aluminium dilakukan dengan berbagai cara, diantaranya adalah dengan metoda *ball milling*. Proses ini menggunakan konsep, logam yang ditumbuk akan mengalami dislokasi. Jumlah dislokasi yang sangat tinggi akan menimbulkan *microcrack* dan pada akhirnya terpecah menjadi beberapa bagian. Proses *ball milling* akan membuat produk berbentuk pipih. Untuk mencegah terjadinya partikel yang lengket akibat tumbukan (*self welding*), maka saat proses *ball milling* perlu ditambahkan *surfactant* yang disebut juga dengan Bahan kendali proses (*Process Control Agent, PCA*).

Banyak jenis alat yang termasuk metoda *ball milling*. Diantaranya adalah *planetary ball mill, tumbling ball mill, cylindrical ball mill, vibratory ball mill* dan *attrition ball mill* (Soni, 2001).

Pembuatan serbuk aluminium dengan proses *ball milling* menggunakan bahan kendali proses berupa senyawa organik yang berfungsi sebagai surfaktan. Bahan kendali proses ini berada pada permukaan partikel dan mengurangi kontak antar partikel dan dengan demikian mencegah penggumpalan. Bahan kendali proses ini banyak macamnya, diantaranya adalah senyawa organik seperti asam oksalat (COOH-COOH), karbamid (H₂N-CO-NH₂), dinitrotoluen CH₃-C₆H₃(NO₂)₂, 1.5-diphenyl carbazide (C₁₃H₁₄N₄O), dan 3-methyl-1-phenyl-2-pyrazoline-5-one (C₁₀H₁₀N₂O) saat proses pencampuran (Neikov, et al, 2009). Bahan kendali proses lainnya yang digunakan untuk proses *ball milling* ini adalah asam oleat yang diencerkan dengan thinner (Hong, 2001).

b. Pencampuran

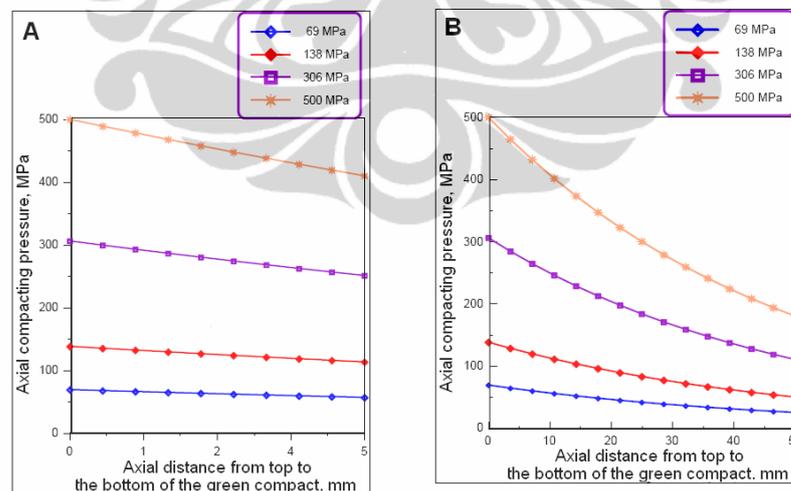
Proses *ball milling* juga dapat digunakan untuk mencampur serbuk partikel nano dengan serbuk aluminium. Proses ini disebut pemaduan mekanis. Dengan cara ini serbuk logam dengan serbuk partikel nano dicampur. Proses ini dilakukan dengan bantuan bahan kendali proses sehingga disebut *wet ball milling* atau tanpa bantuan bahan kendali proses atau disebut *dry ball milling*.

c. Pemasakan (kompaksi)

Proses kompaksi bertujuan untuk memadatkan serbuk sehingga diperoleh produk yang disebut tablet. Terjadi deformasi plastis baik antar partikel logam maupun antara partikel logam dengan partikel nano keramik. Proses kompaksi ini juga membentuk *cold welding* diantara partikel. Secara umum, proses kompaksi ini membuat serbuk yang sebelumnya terpisah satu dengan lainnya berubah bentuk menjadi suatu bentuk yang tertentu sesuai cetakan dengan toleransi dimensi yang mendekati produk akhir. Produk hasil kompaksi disebut juga tablet.

Proses kompaksi merupakan salah satu masalah kritis dalam metalurgi serbuk. Gesekan antara dinding die dengan serbuk dan piston dengan serbuk dapat membuat distribusi tekanan di dalam serbuk bervariasi.

Simulasi yang dilakukan oleh Kadhim (Kadhim, 2011) pada serbuk alumina menunjukkan terjadi variasi distribusi tekanan di dalam serbuk. Variasi ini disebabkan oleh gesekan antara dinding dengan serbuk. Dari simulasi tersebut, dengan aspect ratio dan diameter die tertentu dan tekanan yang divariasikan, dapat diketahui, makin besar aspect ratio (h), makin besar variasi tekanan di dalam serbuk (Gambar 2.11).



Gambar 2.11 Pengaruh perbandingan tinggi dan diameter die (h) terhadap variasi tekanan serbuk di dalam tablet. A dengan $h=0,38$; B dengan $h=2$ (Kadhim, 2011)

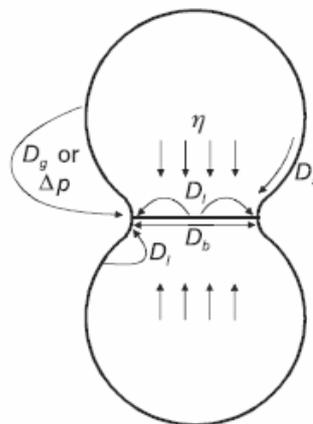
d. Sinter

Proses sinter adalah proses pemanasan pada temperatur tertentu dari produk hasil kompaksi berupa tablet sehingga terjadi pengabungan antar masing masing partikel dan pada akhirnya membentuk suatu komposit yang massif.

Proses *sinter* dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu sinter padat (*solid state sintering*) dan sinter fasa cair (*liquid phase sintering*) (Kang, 2005). Sinter padat adalah proses sinter yang dilakukan pada temperatur di bawah temperatur cair logam. Sedang sinter fasa cair adalah proses sinter yang dilakukan pada temperatur cair logam, biasanya pada titik cair logam. Proses sinter membuat partikel nano SiC yang sebelumnya ada di permukaan serbuk aluminium akan berada di tengah matrix aluminium.

Proses pemanasan saat sinter adalah proses pemberian panas kepada partikel aluminium. Saat proses ini, di lokasi lokasi dari serbuk yang mengalami deformasi dan *cold welding*, berlangsung difusi, sehingga terjadi proses *necking* yang mengindikasikan penggabungan antar serpih aluminium (Gambar 2.12). Dengan proses *necking* ini maka terbentuk produk sinter awal yang diindikasikan terdapat pori pori berukuran besar.

Proses pemanasan yang terus menerus saat sinter, menggabungkan partikel satu dengan partikel lain sehingga pori pori yang tadinya berukuran besar menjadi mengecil yang berakibat volume padatan menyusut. Pada tahap akhir sinter, pori pori terisolasi. Dengan demikian, kerapatan produk bertambah besar. Proses ini disebut densifikasi (Kang, 2005).



Gambar 2.12 Skema difusi atom saat sinter (Kang, 2005).

Keterangan: D_l difusi pada *lattice*, D_b difusi pada batas butir dan D_s difusi pada permukaan. η viskositas, Δp perbedaan tekanan uap

Kondisi permukaan partikel merupakan hambatan proses difusi. Permukaan partikel yang memiliki oksida dapat menyebabkan kegagalan proses sinter. Karbon sebagai hasil pemecahan bahan kendali proses (PCA) juga merupakan penghambat proses difusi dan dapat menyebabkan kegagalan proses sinter.

e. Ekstrusi

Proses ekstrusi adalah proses pembentukan logam. Pada proses ini, bahan awal berupa bilet yang berbentuk bulat, dimasukkan ke dalam suatu kontainer silinder dan ditekan dengan menggunakan piston. Pada sisi lainnya terdapat cetakan yang menghasilkan keluaran dengan bentuk sesuai disain.

Khusus untuk metalurgi serbuk, proses ekstrusinya secara umum ada 3 metoda, seperti terlihat pada Gambar 2.13 (Uphadaya, 2002, Bauer et al, 2006):

a. Serbuk dimasukkan ke dalam container kemudian dilakukan proses ekstrusi

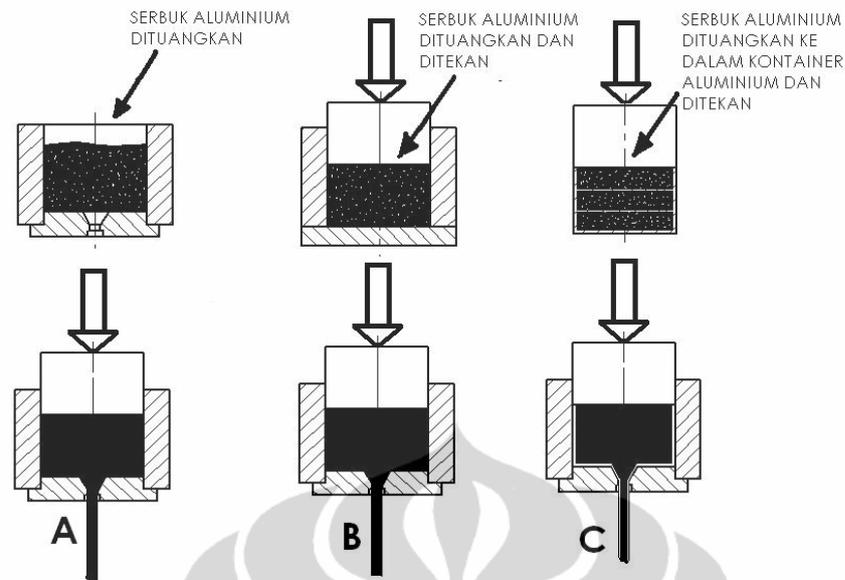
Proses ini dapat dilakukan pada temperatur dekat titik cair logam dengan sifat logam yang tidak mudah mengalami oksidasi.

b. Proses kompaksi dan sinter berlangsung secara bersamaan kemudian dilakukan proses ekstrusi

Proses ini dilakukan dengan menggunakan dua peralatan, yaitu peralatan kompaksi dan sinter, serta peralatan ekstrusi.

c. Serbuk dimasukkan ke dalam tabung (*canning*) kemudian dilanjutkan dengan ekstrusi.

Proses ini memiliki kelebihan, yaitu tabung dapat berfungsi sebagai pelumas. Proses ini memiliki dua cara pengerjaan, yaitu (1) serbuk dimasukkan ke dalam tabung dan dilanjutkan dengan ekstrusi dan (2) dilakukan dulu proses sinter, kemudian proses *canning* dan selanjutnya proses ekstrusi.



Gambar 2.13 Tiga cara ekstrusi pada serbuk (Uphadaya, 2002, Bauer et al, 2006)

2.4 Material untuk Logam Komposit Nano

Serbuk logam

Terdapat banyak jenis logam yang digunakan sebagai matrix pada komposit. Untuk logam matrix yang termasuk pada logam ringan diantaranya adalah magnesium, titanium dan aluminium. Pada beberapa penelitian proses metalurgi serbuk, magnesium yang digunakan adalah paduan magnesium (Trojanová et al, 2007); serta magnesium murni dan paduan magnesium (Ye et al, 2004), Titanium yang digunakan adalah titanium murni berbentuk spons dan serbuk (Threrujirapong et al, 2009) dan titanium paduan Ti-7Al-4Mo (Mileiko et al, 1995), dan aluminium yang digunakan adalah aluminium murni dan paduan.

Serbuk Partikel Nano

Berdasarkan bentuknya material nano dibagi dalam tiga kategori (Cao, 2004), yaitu:

- Material nano nol dimensi bila berbentuk partikel dan disebut partikel nano
- Material nano satu dimensi bila bentuknya adalah nanowire atau nanotube
- Material nano dua dimensi bila berbentuknya platelet (Thostenson, 2005)

Partikel nano untuk penguat dalam komposit nano adalah partikel refraktori

(keramik) yang memiliki struktur kristal atau amorf. Keramik secara garis besar ada dua, yaitu *ionic ceramic* dan *covalent ceramic*. *Ionic ceramic* adalah senyawa antara unsur metal dengan non metal seperti NaCl, MgO, Al₂O₃, ZrO₂. Atom dari kedua unsur tersebut berlawanan dan membuat ikatan ionik. Sedangkan *covalent ceramic* adalah senyawa antara dua unsur non metal, seperti SiO₂, SiC atau diamond C. Elektron dari kedua unsur ini membuat ikatan seperti ikatan kovalen (Ashby, 2006)

SiC adalah *covalent ceramic* dengan bentuk ikatan kimia antara unsur C dan Si. Ada berbagai macam struktur kristal SiC, yang digunakan untuk berbagai keperluan sehingga disebut polytype. Untuk keperluan sebagai bahan semikonduktor, terdapat 4 jenis kristal, yaitu 3C atau β -SiC, 2H, 3H dan 6H. SiC yang digunakan sebagai penguat komposit adalah 3C atau β -SiC.

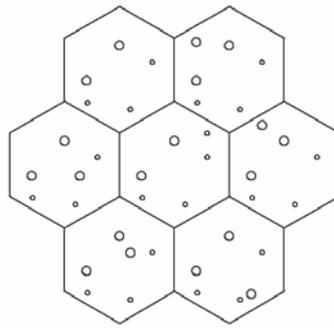
Posisi Partikel Nano Keramik pada Matrix

Posisi partikel nano pada logam komposit nano (metal matrix nanocomposite) bermacam macam dan dapat dikelompokkan pada tiga kelompok, yaitu:

- a. *Intra matrix*, dimana nano partikel berada di dalam matrix
- b. *Inter matrix*, dimana partikel nano berada di batas butir matrix
- c. *Nano-nano*, dimana baik matrix maupun partikelnya berukuran nano

Dari ketiga jenis letak partikel nano ini, komposit dengan letak partikel nano jenis *intra matrix*, menghasilkan komposit dengan kekuatan dan ketangguhan paling tinggi.

Logam komposit nano umumnya menggunakan tipe intra matrix. Pada tipe ini, di dalam matrix tersebar partikel nano dengan jarak yang tergantung pada proses pembuatannya. Proses sinter meletakkan partikel nano yang saat proses milling berada di permukaan serbuk aluminium, menjadi berada di tengah matrix (Choi et al, 2005). Gambar skematis dari komposit nano tipe ini dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Gambar Skematis nano komposit tipe intra matrix

2.5 Mekanisme Penguatan pada Logam Komposit Nano

Ada 2 mekanisme penguatan pada logam komposit nano, yaitu (a) Penguatan karena batas butir dan (b) Penguatan karena dispersi partikel. Rohatgi (Rohatgi et al.,) mengatakan bahwa penguatan komposit seperti penguatan butiran dan penguatan dispersi tersebut disebut dengan penguatan bimodal karena menggunakan mekanisme penguatan dua dimensi.

a. Penguatan karena besar butir

Penguatan karena batas butir akan tergantung pada besar butir kristal dari . Sedangkan ukuran butiran berasal dari proses milling dan proses sinter. Dengan demikian penguatan karena batas butir akan mengikuti hukum Hall-Petch, yaitu:

$$\sigma_{yB} = \sigma_i + k_y d^{-1/2} \quad (3)$$

σ_y = yield strength dari logam

σ_i = intrinsic yield strength

k_y = konstanta

d = diameter butir

Komposit nano yang dibuat dengan partikel penguat nano dan serbuk logam berdimensi nano dapat menghasilkan komposit nano dengan butir kristal nano. Pada komposit nano jenis ini, hukum Hall-Petch tidak berlaku lagi karena dislokasi tidak ditemukan di dalam butir tersebut (de Castro, 2002).

Komposit nano yang diproses melalui fasa cair akan menempatkan penguat partikel nano dengan posisi intra matrix. Sedangkan proses pembuatan komposit nano melalui metoda metalurgi sebuk memungkinkan tiga posisi partikel nano, yaitu intra matrix, intermatrix dan nano-nano dapat terjadi.

b. Penguatan karena dispersi

Mekanisme penguatan dispersi didasarkan pada pengaruh dislokasi yang terjadi pada matrix logam yang mengakami pembebanan, dan dihambat oleh partikel nano yang terdispersi di seluruh area matrix. Makin banyak jumlah nano partikel yang terdispersi, makin tinggi hambatan dari gerak dislokasi, sehingga komposit jenis ini memiliki kekuatan yang lebih tinggi dibanding dengan kekuatan logam tanpa penguatan. Mekanisme ini memiliki dua syarat sehingga dapat membuat kekuatan tarik komposit nano meningkat, yaitu:

- a. Jarak antar partikel
- b. Diameter partikel

Secara umum, penguatan dispersi ini menggunakan menggunakan hukum Orowan.

Prof. S.C. Tjong (Tjong, 2007) menggunakan persamaan berikut:

$$\tau = \frac{0,84MGb}{(L-d)} \quad (4)$$

τ = Shear yield stress, G = shear modulus, M = faktor Taylor (≈ 3),

b = Burgers vektor, d = diameter rata2 partikel,

L = jarak antar partikel yang dinyatakan dengan persamaan :

$$L = \left(\frac{6V}{\pi} \right)^{-1/3} d \quad (5)$$

V = kandungan volume partikel

Dari persamaan Orowan tersebut dapat disimpulkan bahwa penguatan karena partikel tergantung pada jarak antar partikel dan dislokasi yang melingkari partikel saat suatu proses deformasi terjadi.

Dislokasi tidak dapat dihambat oleh partikel yang dimensinya lebih besar dari

100 nanometer. Mengingat nano partikel ini berdimensi kurang dari 100 nm, maka mekanisme penghambatan dislokasi untuk meningkatkan yield strength dapat berlangsung.



BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Urutan proses

Penelitian ini bertujuan untuk membuat batang kawat konduktor aluminium komposit nano (aluminium metal matrix nanocomposite) dengan tahapan sebagai berikut:

- a. Pembuatan serbuk aluminium
- b. Pencampuran partikel nano SiC dengan serbuk aluminium
- c. Kompaksi
- d. Proses sinter
- e. Ekstrusi

Penelitian ini menggunakan bahan berupa aluminium serbuk dan SiC partikel nano (SiC/np). Serbuk aluminium dibuat dengan *ball milling* dari bahan berupa aluminium foil. Sedangkan SiC/np diperoleh dari NaBond, Cina. Diagram alir proses tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.1.

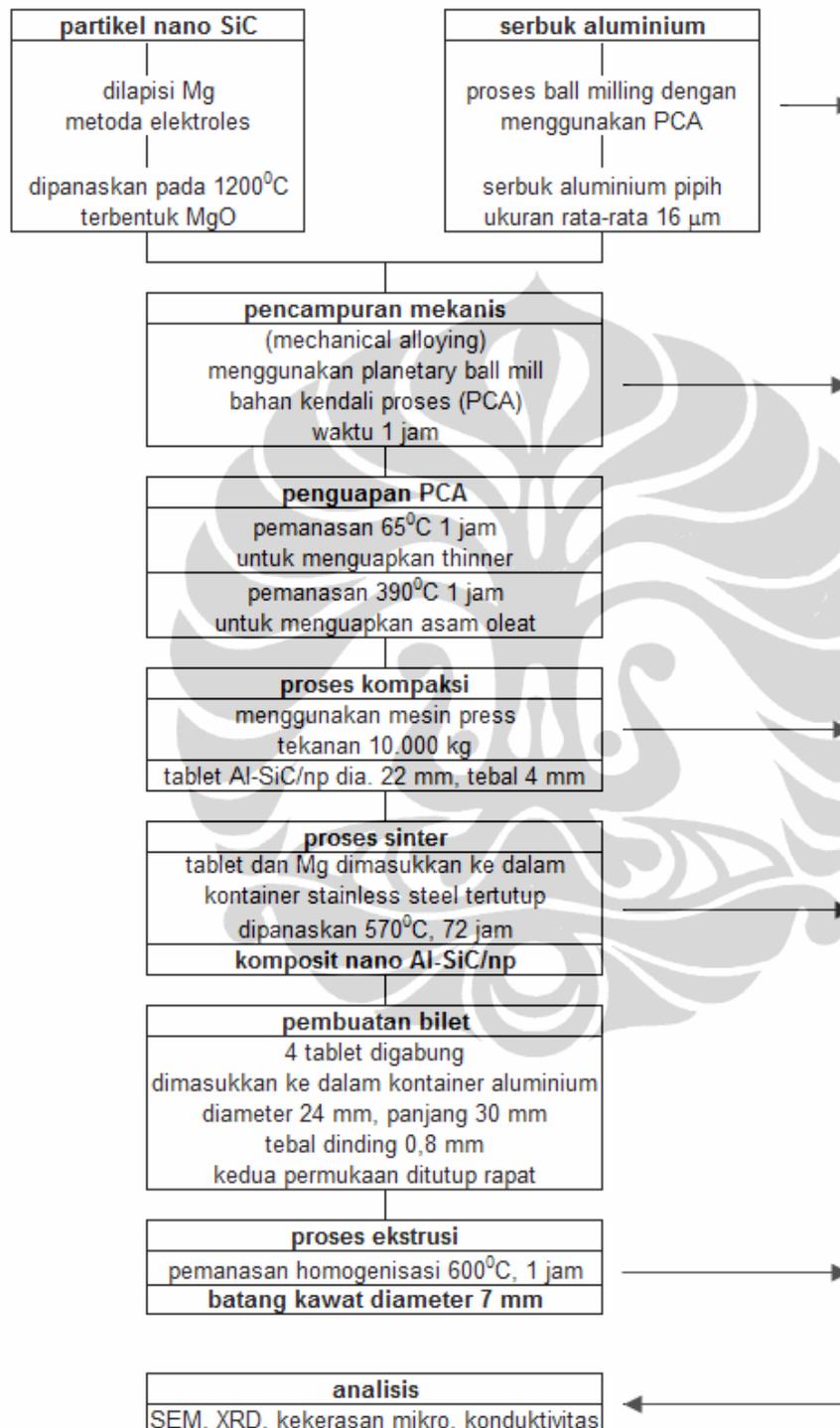
3.2 Penyediaan bahan baku

3.2.1 serbuk aluminium

Bahanbaku untuk keperluan proses pembuatan Al-SiC/np adalah aluminium berbentuk serbuk yang berasal dari aluminium foil dan diproses menjadi serbuk dengan menggunakan metoda *ball milling*. Proses *ball milling* untuk membuat serbuk aluminium menggunakan bahan kendali proses (*process control agent*, PCA). Bahan tersebut berupa senyawa organik yang berfungsi sebagai surfaktan dan berada pada permukaan partikel. Kondisi ini mengurangi kontak antar partikel dan dengan demikian mencegah terjadinya *self welding* diantara partikel sehingga mencegah penggumpalan.

Salah satu bahan kendali proses yang digunakan untuk proses *ball milling* ini adalah asam oleat yang diencerkan dengan thinner (Hong, 2001). Proses *ball*

milling juga dapat digunakan untuk mencampur serbuk partikel nano dengan serbuk aluminium. Proses ini disebut pencampuran mekanis.



Gambar 3.1 Bagan prosedur penelitian

Serbuk aluminium diperoleh dengan *proses ball milling* dengan menggunakan peralatan *ball mill*. Proses tersebut dilakukan dengan data sebagai berikut:

a. Bahan baku

Jenis : Aluminium foil
 ukuran : 80 mm x 80 mm x 7 μ m (tebal)
 berat : 50 gram

b. Bahan kendali proses

Bahan PCA : Asam oleat
 Berat : 5% dari berat aluminium
 Pengencer : Petroleum spirit (thinner)
 Berat : 150% dari berat aluminium

c. Proses milling

Jenis : *vibratory ball milling*, putaran 900 rpm
 Bola baja : berat total 500 gram; diameter 10 mm dan 25 mm
 Waktu : 30 jam dengan intermitten setiap 5 menit

3.2.2 Partikel nano SiC

Partikel nano untuk penelitian ini adalah partikel nano SiC yang diperoleh dari NaBond Technologies, Co, Limited, China. Secara singkat, partikel nano SiC (β) memiliki karakteristik seperti dilihat pada Tabel 3.1 berikut:

Tabel 3.1 Karakteristik partikel nano SiC

Tampilan	Hijau
Kemurnian serbuk	99+%
<i>Dissociate silicon content</i>	< 0.20%
Kandungan oksigen	< 0.61%
Bentuk kristalografik	kubus
Rata rata ukuran partikel	<50nm
Luas permukaan spesifik	>90m ² /g
<i>Apparent density</i>	0.05g/cm ³
<i>True density</i>	3.22 g/cm ³
Morfologi	Mendekati bulat

3.2.3 Proses pelapisan SiC/np dengan Mg

Partikel nano untuk penelitian ini adalah partikel nano SiC yang diperoleh dari NaBond Technologies, Co, Limited, China. SiC sulit untuk dibasahi oleh aluminium cair, sehingga kecil kemungkinan terjadi ikatan antar muka antara SiC dengan aluminium. Hal ini disebabkan sudut kebasahan θ antara aluminium dengan SiC yang sangat besar. Padahal sistem penguatan komposit nano tergantung pada ikatan antarmuka antara partikel keramik dengan matrix logam. Ikatan antarmuka tersebut diantaranya adalah ikatan kimia.

Untuk memungkinkan terjadinya ikatan antarmuka antara SiC dengan aluminium, maka permukaan SiC/np terlebih dulu dilapisi dengan Mg yang dilanjutkan dengan proses oksidasi pada temperatur 1200°C agar terbentuk lapisan MgO di permukaan SiC. Saat proses sinter, akan terbentuk fasa Al_2MgO_4 spinel. Proses pelapisan dengan Mg dilakukan metoda elektroles.

Ikatan kimia merupakan faktor penting dalam penguatan komposit dan berlaku pada semua jenis penguat, baik penguatan yang menggunakan serat, *whisker* maupun partikel. Ikatan kimia pada suatu komposit dapat dimungkinkan apabila terjadi reaksi kimia antara permukaan matrix dengan penguatnya. Reaksi kimia itu ditunjukkan dengan terjadinya pertukaran electron dan jenis pertukarannya menentukan karakteristik dari ikatan.

Pada penelitian oleh Shi (Shi et al, 2001), terbentuknya spinel Al_2MgO_4 pada permukaan permukaan SiC akan membuat terjadinya ikatan antara SiC dengan matrix aluminium. Spinel tersebut diperoleh melalui reaksi kimia:



Untuk memungkinkan terjadinya ikatan antarmuka antara SiC dengan aluminium, maka permukaan SiC/np terlebih dulu dilapisi dengan Mg yang dilanjutkan dengan proses oksidasi pada temperatur 1200°C agar terbentuk lapisan MgO di permukaan SiC. Saat proses sinter, akan terbentuk fasa Al_2MgO_4 spinel.

Rincian proses pelapisan adalah sebagai berikut:

a. Pelapisan permukaan SiC/np dengan Mg dengan metoda elektrodes

Penambahan unsur Mg dilakukan melalui proses pelapisan electroles. Proses pelapisan ini dilakukan secara kimia untuk melapiskan logam pada material lain baik yang bersifat konduktif seperti juga material non konduktif seperti keramik, kaca dan plastik (Agrawala, 2003). Pada proses ini, magnesium dicampurkan ke permukaan partikel nano SiC dengan berat 0,1 mol. Berat 1 mol magnesium adalah 24 gram, sedangkan berat 1 mol HNO₃ adalah 56 gram. Rincian proses pencampurannya adalah sebagai berikut:

Bahan:

0,1 mol Mg	= 2,4 gram
1 mol HNO ₃	= 63.012 gram
1 mol SiC	= 40.097 gram

Larutan yang terdiri dari 0,1 mol Mg dan 1 mol HNO₃ dibuat dengan cara memasukkan 2,4 gram Mg ke dalam 63.012 gram HNO₃. Selanjutnya dimasukkan 1 mol SiC dengan berat 40 gram ke dalam larutan. Larutan dikeringkan dengan cara menguapkan HNO₃ sehingga yang tersisa adalah partikel nano SiC yang di permukaannya telah terdapat unsur Mg.

b. Proses oksidasi dengan pemanasan

Pembentukan MgO adalah proses oksidasi Mg yang dilakukan dengan memanaskan SiC/np yang sebelumnya telah dilapisi dengan Mg. Waktu proses oksidasi adalah 1 jam pada pada atmosfir udara pada temperatur 1200⁰C sehingga di permukaan SiC/np yang telah dilapisi dengan Mg akan terjadi oksidasi dan membentuk MgO.

3.3 Pembuatan Batang Kawat Aluminium Komposit Nano

3.3.1 Proses pencampuran

Pencampuran antara serbuk logam dengan partikel nano dapat dilakukan dengan

mekanis yaitu pemaduan mekanis. Waktu proses pemaduan mekanis adalah 1 jam. Jumlah SiC partikel nano adalah 0%, 1%, 5%, dan 10%. Campuran SiC/np dan serbuk aluminium yang diperlukan untuk mendapat komposisi tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.2 sebagai berikut:

Tabel 3.2 Komposisi partikel nano SiC pada Komposit Nano Al-SiC/np

No	Campuran	Berat serbuk aluminium	Berat SiC/np
1	Al-0%SiC/np	25 gram	0 gram
2	Al-1%SiC/np	25 gram	0,25 gram
3	Al-5%SiC/np	25 gram	1,25 gram
4	Al-10%SiC/np	25 gram	2,5 gram

3.3.2 Proses evaporasi

Proses evaporasi dalam *muffle furnace* dilakukan dalam dua tahap, yaitu pemanasan pada 65⁰C untuk menguapkan thinner atau *mineral spirit* dan pada temperatur 360⁰C untuk menguapkan asam oleat (J.T. Baker, 2005). Namun, untuk memastikan temperatur penguapan asam oleat yang tepat, khususnya dikarenakan telah terjadi proses milling, dilakukan pengujian dengan menggunakan *Differential Thermal Analysis*.

Waktu penguapan baik untuk thinner maupun untuk asam oleat masing masing adalah 1 jam. Proses penguapan dilakukan di atmosfer terbuka. Tujuannya adalah untuk memungkinkan baik mineral spirit maupun asam oleat menguap secara natural dan tidak mengalami penguraian. Dengan demikian dapat dihindari terbentuknya karbon sebagai hasil proses penguraian dari thinner dan asam oleat.

3.3.3 Proses kompaksi

Proses kompaksi dilakukan pada campuran serbuk aluminium dengan partikel nano SiC untuk menghasilkan tablet. Proses kompaksi bertujuan untuk memadatkan serbuk dari kondisi awalnya berupa serbuk lepas (*loose green*) menjadi padat dan berbentuk tablet. Proses kompaksi menggunakan cetakan (*die*)

dan penekan berupa plunyer. Dengan proses kompaksi maka pori pori yang terdapat pada tablet menjadi berkurang, yang disebabkan terjadi proses deformasi antara masing masing serbuk dan penyatuan.

Pada proses kompaksi ini, tidak digunakan pelumas antara dinding cetakan dengan serbuk, dengan tujuan agar terhindar dari terjadinya kontaminasi dengan pelumas. Proses kompaksi dapat menyebabkan distribusi tekanan di dalam tablet bervariasi (Kadhim, 2011). Perbedaan tekanan ini akan makin besar sebanding dengan besarnya perbandingan (*aspect ratio*) antara diameter produk yang dikompaksi dan tinggi. Oleh karena itu tebal dari sampel dibatasi maksimum 3 mm untuk sampel dengan diameter 10 mm dan tebal 5 mm untuk sampel dengan diameter 22 mm.

Proses kompaksi pada penelitian ini menghasilkan sampel tablet dengan diameter 22 mm. Proses kompaksi menggunakan mesin press satu arah. Tekanan untuk proses kompaksi adalah 10.000 kg.

3.3.4 Proses sinter

Proses sinter dilakukan pada tablet hasil proses kompaksi. Proses ini dilakukan pada temperatur tinggi tapi di bawah temperatur cair aluminium. Pada permukaan aluminium terdapat alumina dengan ketebalan sangat tipis antara 5 nm sampai 15 nm. Alumina ini sangat menyulitkan proses sinter, sebab menghalangi terjadinya difusi antar partikel aluminium dan menghambat terjadinya *necking*, yaitu penggabungan antar serbuk aluminium dan antara serbuk aluminium dengan SiC/np. Pemanasan yang semakin tinggi sampai di atas titik cair aluminium malah semakin menambah tebal lapisan oksida.

Lapisan alumina tersebut dapat dihilangkan dengan cara disosiasi. Untuk memungkinkan terjadinya disosiasi alumina sehingga proses sinter berlangsung dengan baik, maka proses sinter dilakukan pada tekanan parsial oksigen 10^{-50} bar Schaffer (Schaffer, 2004).

Untuk memungkinkan tekanan parsial oksigen 10^{-50} bar, saat proses sinter ditambahkan unsur dengan energi Gibbs ($-\Delta G$) yang lebih rendah dibanding dengan energi Gibbs untuk pembentukan Al_2O_3 . Unsur tersebut diantaranya adalah Magnesium. Reaksi pembentukan MgO membuat jumlah oksigen di dalam ruangan sinter menjadi sangat berkurang dengan tekanan parsial O_2 $P_{O_2} < 10^{-50}$ bar, atau setara dengan dew point temperatur $< -140^{\circ}C$. Reaksi pembentukan MgO juga dimungkinkan bila Mg di dalam ruangan sinter menguap. Temperatur dan tekanan parsial uap Mg dapat dilihat pada Tabel 3.3 (Hultgren et al, 1963)

Tabel 3.3 Temperatur dan tekanan parsial Mg

T K ($^{\circ}C$)	P (atm)
644 (371)	10^{-6}
703 (430)	10^{-5}
776 (503)	10^{-4}
865 (592)	10^{-3}

Bedasarkan diagram Ellingham (ASM International Handbook vol 7, 1990), pada tekanan parsial oksigen di bawah 10^{-50} bar dan temperatur $570^{\circ}C$ terjadi disosiasi alumina dengan reaksi sebagai berikut:

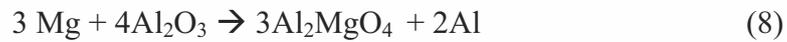


Dari persamaan (7) dapat diketahui bahwa alumina terurai menjadi aluminium dan oksigen. Aluminium dari alumina kemudian bergabung ke dalam matrix. Sedangkan Oksigen kemudian bereaksi dengan uap Mg membentuk MgO. Proses sinter dilakukan pada muffle furnace dengan waktu tahan selama 72 jam pada tempertur sinter $570^{\circ}C$. Gambar 3.2 menunjukkan tabung baja untuk proses sinter.

Penghilangan lapisan Al_2O_3 terjadi karena dua hal, yaitu

1. Alumina terurai menjadi Al dan O_2 sesuai persamaan reaksi (7). Pada reaksi tersebut O_2 tersebut kemudian bereaksi dengan uap Mg membentuk MgO. Selanjutnya, MgO tersebut bereaksi dengan alumina membentuk spinel seperti dijelaskan oleh persamaan (6).

2. Alumina bereaksi dengan Mg membentuk spinel Al_2MgO_4 sesuai persamaan Shi, (Shi, 2001) berikut:



Gambar 3.2 Tabung baja berdiameter dalam 25 mm untuk proses sinter pada sampel berdiameter 22 mm

3.3.5 Proses ekstrusi

Proses ekstrusi bertujuan untuk memperoleh batang kawat berdiameter 7 mm. Proses ekstrusi dilakukan pada unit ekstrusi (Gambar 3.3) dengan menggunakan bilet berukuran diameter 24 mm dan panjang 30 mm dengan rasio ekstrusi 11,7. Di dalam bilet terdapat tablet produk hasil proses sinter. Pemasukan tablet hasil sinter ke dalam bilet aluminium disebut *canning*.

Proses *canning* memiliki tiga tujuan, yaitu:

- a. Menghindari terjadinya reoksidasi dari sampel tablet Al-SiC/np
- b. Menjadikan bilet aluminium sebagai pelumas proses ekstrusi
- c. Menghindari tekanan serbuk pada dinding kontainer

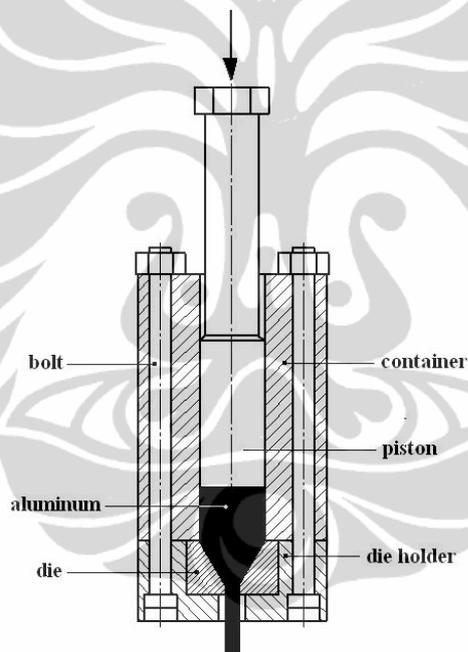
Unit ekstrusi yang dipakai dalam penelitian ini terdiri dari:

- a. Kontainer baja
- b. Piston
- c. Dies dengan keluaran berdiameter 7 mm

- d. Unit pemanas
- e. Kontrol temperatur.

Gambar teknis unit ekstrusi dapat dilihat pada Gambar 3.3. Sedangkan tahapan proses ekstrusinya adalah sebagai berikut:

- a. Bilet aluminium dimasukkan ke dalam unit ekstrusi
- b. Unit ekstrusi dipanaskan sampai 600°C , dengan tujuan agar saat proses ekstrusi, temperatur aluminium tetap terjaga pada teperatur kerja. Kondisi ini memanaskan bilet aluminium
- c. Proses penekanan dengan menggunakan mesin pres hidraulik



Gambar 3.3 Konstruksi unit ekstrusi.

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini dilakukan pembuatan batang kawat konduktor aluminium komposit nano Al-SiC/np dengan metoda vakum dan tekanan oksigen sangat rendah dan dilakukan dalam dua tahap. Penelitian tahap pertama menggunakan sampel tablet berdiameter 10 mm untuk mengamati proses sinter. Penelitian tahap kedua menggunakan sampel tablet berdiameter 22 mm untuk proses lanjutan berupa ekstrusi sehingga diperoleh batang kawat.

4.1 Pembuatan Komposit Nano Al-SiC/np

Pada penelitian tahap pertama berupa pembuatan komposit nano Al-SiC/np digunakan sampel diameter 10 mm. Sampel dijaga dari kontaminasi oleh udara dari luar. Untuk itu, sampel dimasukkan ke dalam tabung kwarsa dan kedua ujungnya ditutup (gambar 4.1). Sebelum penutupan, udara di dalam tabung dibilas (*purging*) dengan gas argon dan terakhir, kandungan gas di dalam tabung dikeluarkan sehingga terjadi vakum. Waktu penelitian adalah 24 jam. Prosedur penelitian adalah sebagai berikut:

- a. Sampel dan magnesium dimasukkan ke dalam tabung kwarsa
- b. Udara di dalam tabung dibilas dengan gas argon
- c. Tekanan di dalam tabung 300 mbar absolut
- d. Kedua ujung tabung kwarsa ditutup
- e. Proses sinter dilakukan pada temperatur 620⁰C dan 570⁰C



Gambar 4.1 Tabung kwarsa dengan sampel Al-SiC/np dan magnesium

Dari penelitian ini diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

- a. Proses sinter pada temperatur 620°C tidak berhasil karena magnesium mencair dan kemudian menguap dengan tekanan uap sangat tinggi yang tidak mampu ditahan oleh tabung kwarsa
- b. Proses sinter pada temperatur 570°C dengan hasil baik.

Pengamatan dengan SEM pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3, menunjukkan bahwa proses sinter telah menggabungkan partikel aluminium menjadi matrix yang padat. Struktur mikro ini mirip dengan hasil penelitian Li (Li, 2004) yang ditunjukkan pada Gambar 4.4.

Terlihat partikel SiC/np berbentuk bintik putih. Dimensi dari partikel berkisar antara 50 nm sampai 100 nm. Morfologi SiC/np pada matrix, sama dengan hasil penelitian oleh Li (Li, 2004), serta Zebarjad (Zebarjad, 2007).

Penelitian yang dilakukan oleh Li menggunakan matrix aluminium ASTM 356 dengan proses mencampurkan SiC/np ke dalam aluminium cair dan bantuan ultrasonik (Gambar 4.4). Sedangkan penelitian Zebarjad (Gambar 4.5) menggunakan teknik metalurgi serbuk dan sinter pada atmosfer inert dan temperatur 585°C . Pada penelitian Li, keberadaan partikel nano di dalam matrix Al ada yang tunggal tapi juga ada yang berupa beberapa partikel bersatu. Distribusi partikel merata.

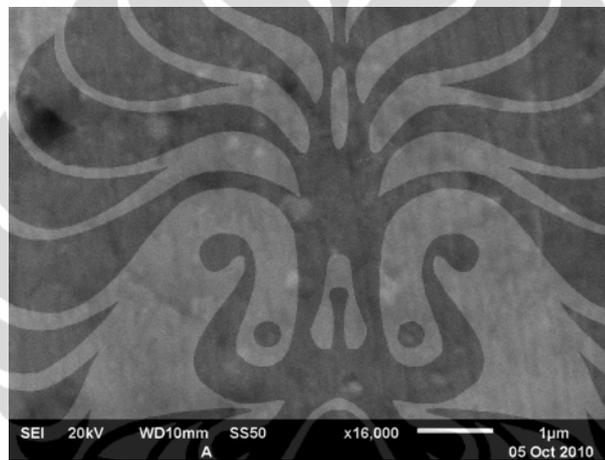
Hal yang sama dengan penelitian Li juga terlihat pada Gambar 4.2 dan 4.3 dari penelitian ini. Partikel nano SiC/np ada yang tunggal dan ada pula yang berupa bersatunya beberapa partikel. Hal ini menunjukkan bahwa proses *ball milling* telah menyebarkan partikel nano secara merata.

Berdasarkan pengamatan struktur mikro dan membandingkan dengan hasil penelitian dari Li (Li, 2004) maka dapat diimpulkan bahwa proses sinter dengan tekanan oksigen parsial sangat rendah dinyatakan berhasil. Data hasil proses sinter dilanjutkan untuk penelitian berikutnya, yaitu pembuatan batang kawat Al-SiC/np.

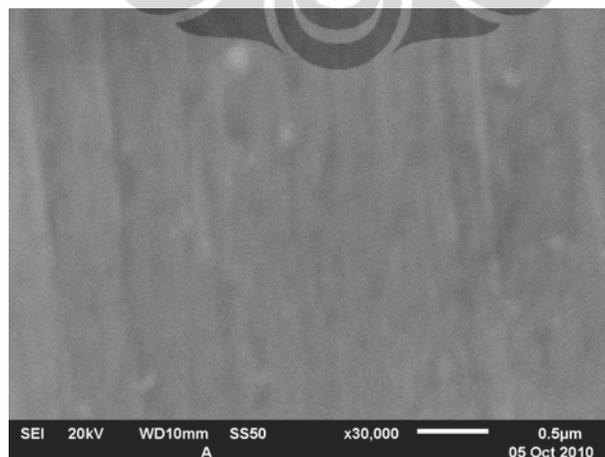
Hasil penelitian tahap pertama ini sama dengan hasil penelitian oleh Schaffer (Schaffer, 2004) yang mengatakan bahwa Al_2O_3 merupakan penghambat proses sinter. Al_2O_3 ini dapat dihilangkan saat sinter pada temperatur 600°C dan tekanan parsial oksigen sangat rendah yaitu $P_{\text{O}_2} < 10^{-50}$ bar.

Dari hasil penelitian tahap pertama disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

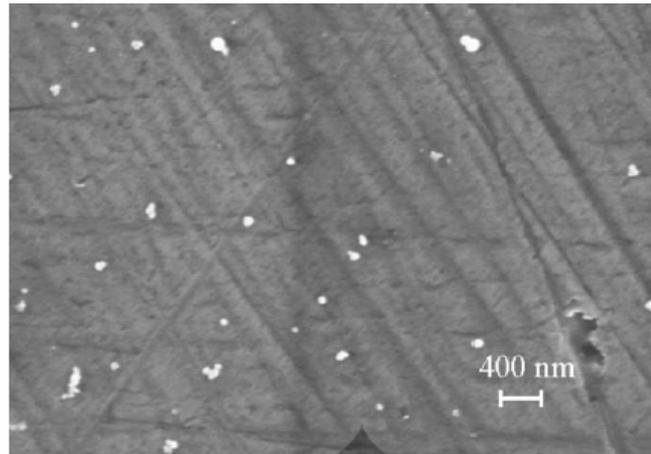
- Proses sinter dilakukan pada ruangan tertutup dan tidak ada udara dari luar yang memasuki ruangan sinter
- Menggunakan magnesium untuk menurunkan tekanan oksigen parsial
- Temperatur sinter adalah 570°C



Gambar 4.2 Struktur mikro komposit nano sampel dengan 1% SiC/np setelah sinter (SEM, 16.000x)



Gambar 4.3 Struktur mikro komposit nano sampel dengan 1% SiC/np setelah sinter (SEM, 30.000x)



Gambar 4.4 Struktur mikro komposit nano aluminium ASTM 356 dengan penguat SiC/np. Morfologi SiC/np terlihat dari bintang putih (SEM) (Li, 2004)



Gambar 4.5 Struktur mikro komposit nano Al -SiC/np dengan teknik metalurgi serbuk. Morfologi SiC/np terlihat dari bintang putih (SEM) (Zebarjad, 2007)

4.2 Pembuatan Batang Kawat Aluminium Komposit Nano Al-SiC/np

Dari data penelitian pertama, kemudian dilakukan penelitian lanjutan dengan beberapa variasi komposisi SiC/np. Penelitian tersebut menggunakan tabung baja dengan diameter dalam 25 mm (Gambar 3.2). Pada tabung baja ini, udara dari luar dicegah memasuki ruang sinter.

Empat variasi komposisi SiC/np dipelajari untuk mengetahui nilai optimum kandungan SiC/np pada sifat batang kawat. Keempat komposisi tersebut adalah sebagai berikut:

Tabel 4.1 Varisi komposisi SiC/np dan proses pembuatan batang kawat Al-SiC/np

%SiC	Keterangan
Al monolithic	Ekstrusi
Al-0% SiC/np	Sinter dan ekstrusi
Al-1% SiC/np	Sinter dan ekstrusi
Al-5% SiC/np	Sinter dan ekstrusi
Al-10%SiC/np	Sinter dan ekstrusi

Keempat komposisi tersebut diproses menjadi batang kawat dengan proses manufaktur sebagai berikut:

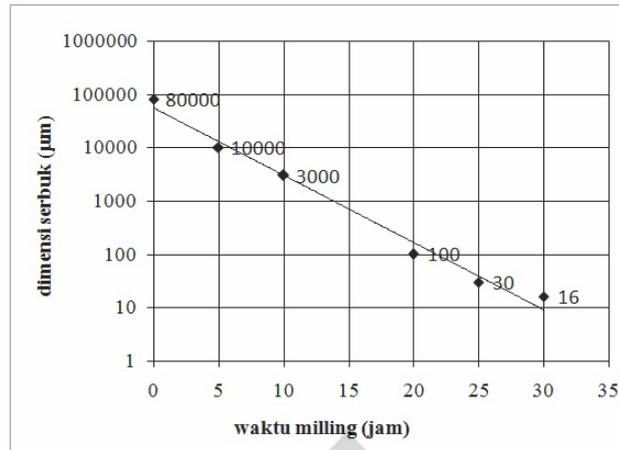
- a. Pembuatan serbuk aluminium
- b. Kompaksi
- c. Sinter
- d. Ekstrusi

4.2.1 Pembuatan serbuk aluminium

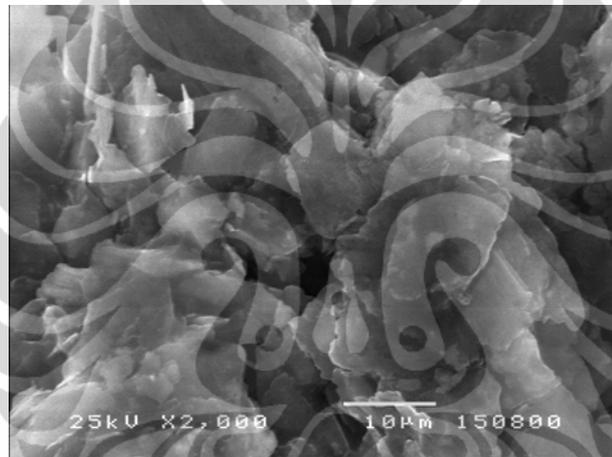
Proses pembuatan serbuk aluminium dengan metoda *ball milling* dilakukan di Laboratorium Fisika Universitas Indonesia, Depok. Tujuan proses ini adalah memperoleh serbuk aluminium dengan ukuran kurang dari 50 μm dari bahan aluminium foil dan digunakan sebagai bahan pembuatan Al-SiC/np.

Proses *milling* menggunakan bantuan Bahan kendali proses (PCA) dengan tujuan tidak terjadi penggabungan (*welding*) dari masing masing serpih saat *milling*. Dengan demikian dapat dihindari terjadinya penggumpalan. Proses *milling* dilakukan selama 30 jam. Sampel diambil setelah proses *milling* selama 5 jam, 10 jam, 20 jam, 25 jam dan 30 jam.

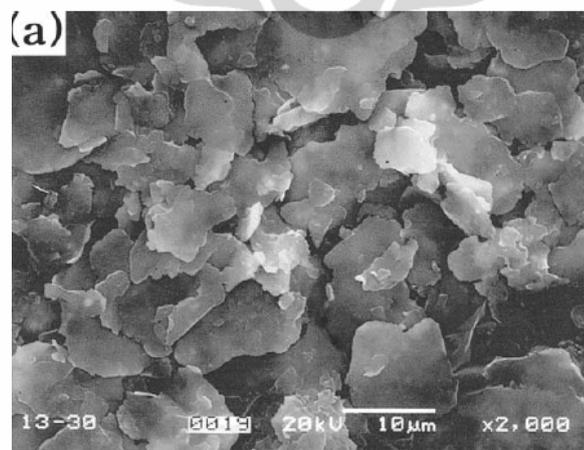
Dimensi serbuk diukur dengan menggunakan SEM. Perubahan dimensi dari aluminium foil menjadi serbuk aluminium dapat dilihat pada Gambar 4.6. Dari Gambar 4.6 dapat dilihat, makin lama proses *milling*, aluminium foil berubah menjadi serpih dengan dimensi yang semakin mengecil. Hasil proses *milling* setelah 30 jam dapat dilihat pada gambar 4.7.



Gambar 4.6 Perkembangan dimensi aluminium foil menjadi serbuk aluminium



Gambar 4.7 Morfologi serbuk aluminium setelah 30 jam *ball milling* (SEM, 2000x)



Gambar 4.8 Morfologi serbuk aluminium setelah 30 jam *ball milling* (SEM, 2.000x) (Hong, 2001)

Nilai ini sesuai dengan hasil penelitian oleh Hong (Hong, 2001). Data yang diperoleh pada Gambar 4.7 serta bentuk morfologi serbuk aluminium setelah proses *ball milling* sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Hong dan ditunjukkan pada Gambar 4.8 (Hong, 2001). Gambar perkembangan morfologi serbuk sebagai fungsi dari waktu dapat dilihat pada lampiran 1.

4.2.2 Penyiapan serbuk SiC/np

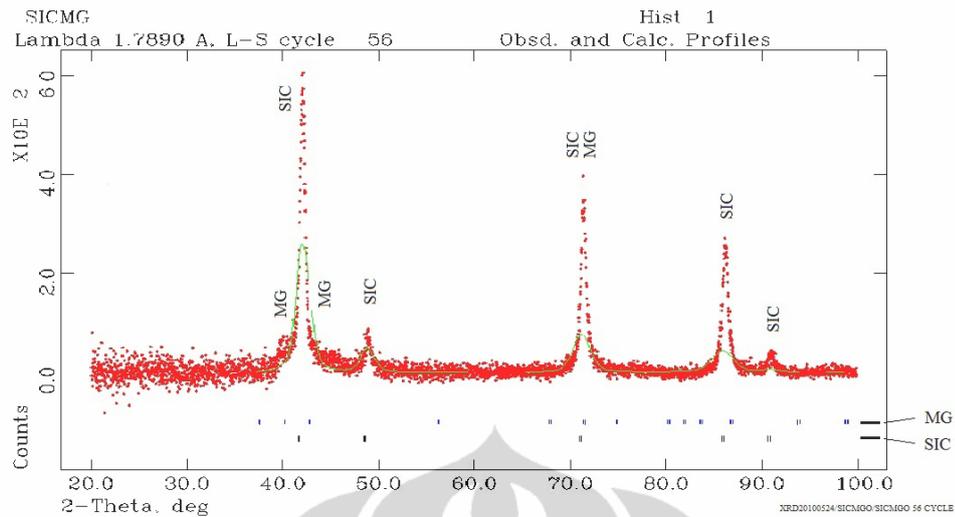
Serbuk SiC/np dilapisi dengan Mg dengan menggunakan metoda elektrodes, kemudian dipanaskan pada temperatur 1.200°C pada muffle furnace agar di permukaan SiC/np terdapat lapisan MgO.

Pengamatan unsur dan fasa serbuk SiC/np, serbuk SiC/np dengan lapisan Mg dan SiC/np dengan lapisan MgO dilakukan dengan menggunakan diftaksi sinar x dan analisis dengan menggunakan GSAS. Pengamatan dengan difraksi sinar x dilakukan dengan menggunakan target Co pada sudut 2θ $20^{\circ} - 100^{\circ}$.

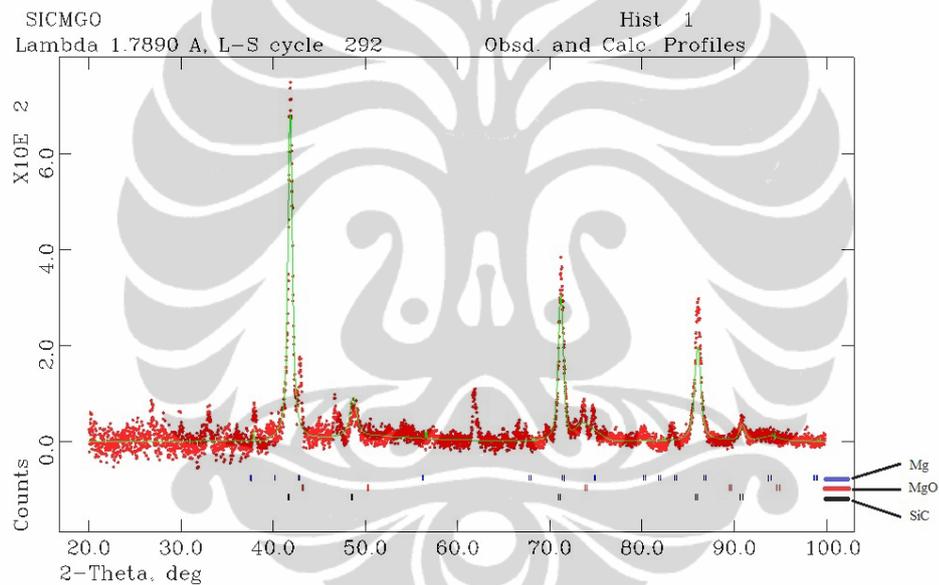
Pola difraksi sinar x serbuk SiC/np dengan lapisan Mg dan SiC/np dengan lapisan MgO dapat dilihat pada Gambar 4.9 dan Gambar 4.10. Jumlah fasa Mg dan MgO dari serbuk dapat dilihat pada tabel 4.2 yang menunjukkan bahwa pada SiC/np terdapat lapisan Mg (Tabel 4.2, kolom 2, SiCMg). Fraksi Mg adalah 13,5% dari total serbuk. Pada SiC/np dengan Lapisan MgO (Tabel 4.2, kolom 3, SiCMgO), fraksi MgO adalah 22,48%. Data ini menyimpulkan bahwa proses oksidasi telah menaikkan fraksi berat MgO serta mengurangi fraksi berat Mg.

Tabel 4.2 Komposisi Mg dan MgO Setelah Proses Pelapisan

(1)	(2) SiCMg	(3) SiCMgO
SiC	86,47%	77,08%
Mg	13,53%	0,44%
MgO	-	22,48%



Gambar 4.9 Pola Difraksi Serbuk SiC-Mg



Gambar 4.10 Pola Difraksi Serbuk SiC-MgO

4.2.3 Proses Pencampuran Serbuk Aluminium dengan SiC/np

Proses pencampuran serbuk aluminium dengan SiC/np dilakukan dengan menggunakan *planetary ball mill* dengan bola baja berdiameter 10 mm dan 25 mm. *Planetary ball mill* berputar dengan kecepatan 900 rpm. Proses pencampuran menggunakan PCA (bahan kendali proses). Tujuannya adalah agar SiC/np dapat menyebar secara merata di seluruh bagian aluminium. Proses ini merupakan kelanjutan dari proses pembuatan serbuk aluminium. Waktu proses pencampuran

adalah 1 jam.

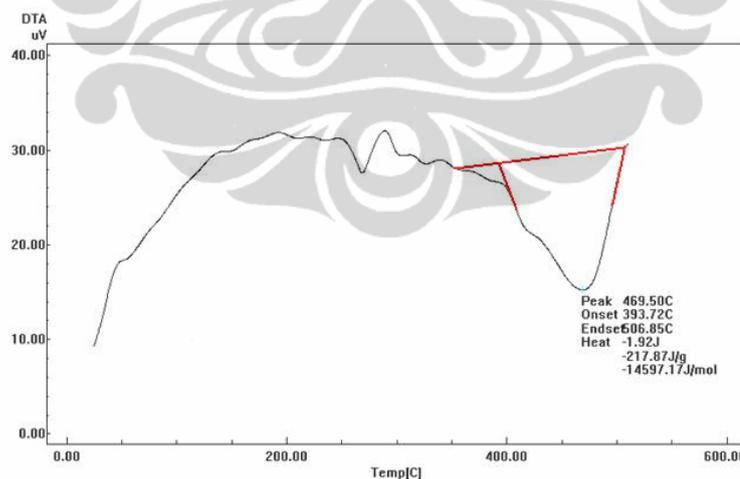
4.2.4 Proses Kompaksi Dan Sinter

Proses kompaksi dan sinter dilakukan dengan tiga tahap pekerjaan, yaitu:

1. Proses Penguapan

Proses penguapan atau evaporasi dilakukan pada serbuk hasil proses *milling* dan pencampuran. Proses ini dilakukan pada temperatur penguapan selama kurun waktu 1 jam. Tujuan dari proses penguapan ini adalah memberi kesempatan pada bahan kendali proses (PCA) untuk menguap sehingga tidak lagi berada dalam serbuk. Bila tetap berada di dalam serbuk, bahan kendali proses akan mengalami cracking saat sinter dan terurai menjadi hidrogen dan karbon. Karbon akan menghambat keberhasilan proses sinter.

Data DTA penguapan dari serbuk terlihat pada Gambar 4.11. Dari data DTA, diketahui bahwa temperatur penguapan asam oleat adalah 390°C . Data ini sesuai dengan karakteristik dari asam oleat berdasarkan J.T. Baker, yang menyatakan titik uap asam oleat adalah 360°C (J.T. Baker, 2005).



Gambar 4.11 Grafik DTA dari serbuk setelah proses *milling* dan *mixing*

2. Proses Kompaksi Dengan Menggunakan Mesin Press

Proses kompaksi dilakukan dengan menggunakan cetakan berdiameter 22 mm. Tekanan pada proses kompaksi ini adalah 10.000 kg. Tujuannya adalah diperoleh tablet dengan kerapatan yang cukup merata. Untuk itu maka berat

dari tablet hanya 6 gram sehingga setelah proses kompaksi diperoleh tablet dengan berukuran diameter 22 mm dan tebal 4 mm.

3. Proses Sinter Dengan Menggunakan Tabung Baja

Proses sinter dilakukan dengan menggunakan tabung baja (Gambar 3.3) dengan lubang berdiameter 25 mm. Setelah seluruh tablet dan magnesium dimasukkan, tabung baja ditutup rapat dan dilas sehingga tidak ada oksigen dari luar yang masuk ke dalam ruang sinter. Dengan proses sinter ini terjadi penggabungan serbuk yang saat berada pada tablet masih terpisah. Proses sinter dilakukan pada temperatur 570⁰C. Waktu sinter adalah 72 jam. Proses sinter dengan menggunakan Mg sebagai pengambil oksigen di ruang sinter dan membuat ruang sinter memiliki tekanan parsial oksigen P_{O_2} terdapat pada US patent no. 6,303,236 B1 tentang pembuatan *aluminium composite-based plate* (Nakao, 2001) dan hasil penelitian Schaffer (Schaffer, 2004).

Struktur mikro hasil proses sinter dapat dilihat pada Gambar 4.15 dan 4.16. Sedang nilai kekerasan mikro dapat dilihat pada Gambar 4.18.

4.2.5 Proses Ekstrusi

Proses ekstrusi dilakukan dengan menggunakan mesin press dan unit ekstrusi. Tujuannya adalah diperoleh batang kawat dengan diameter 7 mm. Cetakan yang digunakan untuk proses ekstrusi ini memiliki lubang keluaran berdiameter 7 mm. Unit ekstrusi dan sampel dipanaskan oleh unit pemanas agar temperatur unit pemanas tetap tinggi dan temperatur sampel tetap terjaga pada temperatur operasi.

Proses dilakukan dengan cara sebagai berikut:

1. Bahan hasil proses sinter dimasukkan ke dalam wadah aluminium berdiameter luar 24 mm dan diameter dalam 22 mm dan dibungkus dengan aluminium foil untuk menghindari oksidasi saat pemanasan. Kedua ujung kontainer ditutup. Proses ini disebut *canning*.
2. Hasil proses *canning* dimasukkan ke dalam unit ekstrusi dan dipanaskan

sampai temperatur can mencapai temperatur operasi, yaitu 600°C . Waktu homogenisasi adalah satu jam.

3. Dilakukan proses ekstrusi

Unit ekstrusi dapat dilihat pada Gambar 4.12 dan hasil proses ekstrusi dapat dilihat pada Gambar 4.13.



Gambar 4.12 Unit ekstrusi



Gambar 4.13 Batang kawat hasil proses ekstrusi

4.3 Karakterisasi Batang Kawat Komposit Nano Al-SiC/np

Batang kawat Al dengan penguat SiC/np memiliki struktur yang terdiri dari matrix aluminium dengan penguat SiC/np. Batang kawat tersebut memiliki empat variasi komposisi SiC/np yang berbeda beda, mulai dari 0% SiC/np, 1% SiC/np, 5% SiC/np dan 10% SiC/np. Karakterisasi pada Al-SiC/np bertujuan untuk

melihat struktur dari Al-SiC/np tersebut serta pengaruh dari penguat terhadap sifat mekanik. Ada 4 jenis karakterisasi pada masing masing batang kawat, yaitu:

- a. Difraksi sinar x
- b. Metalografi dengan menggunakan SEM
- c. Pengujian kekerasan mikro
- d. Konduktivitas listrik

4.3.1 Hasil Pengamatan Unsur Dan Fasa

Pengamatan unsur dan fasa sampel batang kawat Al-SiC/np dilakukan dengan menggunakan difraksi sinar x dengan menggunakan target Co pada sudut 2θ 20° – 100° . Hasil pengamatan dengan difraksi sinar x pada sinter Al-SiC/np dapat dilihat pada Gambar 4.14. Pada Gambar 4.14 terlihat puncak puncak fasa Al dan SiC dan juga puncak fasa Al_2MgO_4 yang posisinya berimpitan dengan puncak fasa Al.

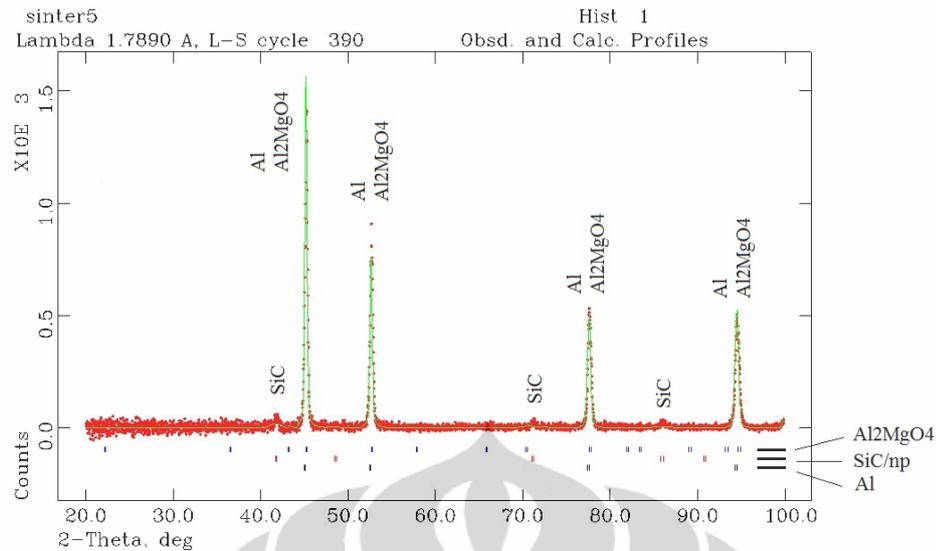
Munculnya fasa Al_2MgO_4 pada sinter Al-5%SiC/np menunjukkan pelapisan SiC/np dengan MgO berhasil membentuk Al_2MgO_4 yang berfungsi sebagai perantara antara SiC/np dengan aluminium. Tabel 4.3 menunjukkan kandungan SiC/np dan Al_2MgO_4 pada komposit nano Al-5%SiC/np.

Perbandingan berat Al_2MgO_4 dengan SiC/np pada komposit nano Al-SiC/np yaitu Al_2MgO_4 : SiC/np adalah 0,8 : 1 (Tabel 4.3). Sedangkan perbandingan berat MgO dengan SiC/np pada serbuk SiCMgO yaitu MgO : SiC/np adalah 0,29 : 1 (Tabel 4.2). Penambahan nilai perbandingan berat ini disebabkan terjadinya perubahan komposisi kimia dari MgO menjadi Al_2MgO_4 .

Tabel 4.3 Komposisi SiC/np dan Al_2MgO_4 pada Komposit Nano Al-SiC/np

	Al-5% SiC/np sinter
Al	90,679%
SiC/np	5,862%
Al_2MgO_4	4,719%

Catatan: Identifikasi dengan menggunakan GSAS



Gambar 4.14 Pola difraksi sinar x pada komposit 5% SiC/np setelah proses sinter

4.3.2 Hasil Pengamatan Metalografi

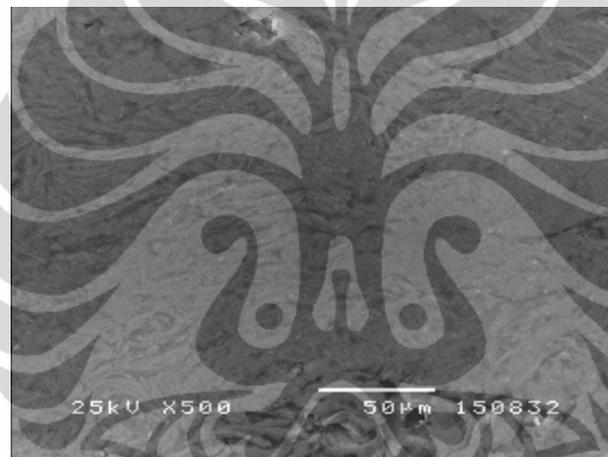
Pengamatan metalografi dilakukan pada sampel hasil proses ekstrusi dan dibandingkan dengan proses sinter. Pengamatan dilakukan dengan SEM pada pembesaran 500x, 16.000x dan 30.000x untuk sampel hasil sinter dan 500x untuk sampel hasil ekstrusi.

Gambar 4.2 dan Gambar 4.3 menunjukkan sampel hasil proses sinter pada sampel Al-1% SiC/np dengan pembesaran 16.000 x dan 30.000 x. Pengamatan dengan SEM seperti ditunjukkan oleh Gambar 4.2 dan 4.3 tidak menemukan celah antara SiC/np dengan matrix aluminium. Hal ini menunjukkan terjadi koherensi antara SiC/np dengan matrix aluminium. Adanya koherensi ini menunjukkan bahwa proses pelapisan SiC/np dengan Mg berhasil membentuk spinel Al_2MgO_4 . Spinel ini memungkinkan terjadinya koherensi antara SiC/np dengan aluminium. Dengan adanya koherensi ini maka SiC/np memiliki peran sebagai penguat pada komposit. Penggunaan Al_2MgO_4 sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Shi (Shi, 2001). Posisi SiC/np berada di dalam matrix.

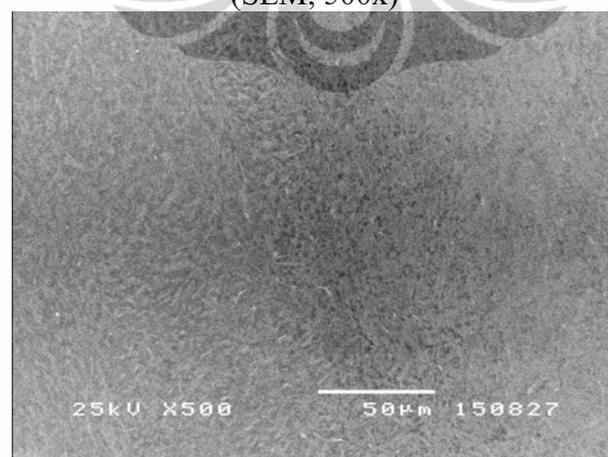
Al_2MgO_4 yang menutupi permukaan SiC/np membuat dimensi SiC/np lebih besar dari seharusnya. Gambar 4.5 menunjukkan dimensi SiC/np lebih besar dari 50 nm

yang menunjukkan SiC/np dilapisi oleh Al_2MgO_4 . Data ini juga sesuai dengan penelitian Shi.

Dari pengamatan juga terlihat sebaran SiC/np pada matrix. SiC/np menyebar cukup merata, namun dengan membentuk suatu kelompok (cluster) yang memiliki sebaran rapat. Makin besar jumlah SiC/np pada komposit, maka sebaran SiC/np dalam kelompok menjadi semakin rapat. Hal ini menunjukkan bahwa proses pencampuran dengan metoda *milling* dapat meratakan penyebaran SiC/np. Penyebaran SiC/np tersebut memungkinkan terjadinya proses penguatan matrix aluminium oleh SiC/np seperti ditunjukkan oleh Grafik Nilai kekerasan Mikro pada Gambar 4.17.



Gambar 4.15 Struktur mikro hasil proses sinter pada sampel dengan 1% SiC/np, (SEM, 500x)



Gambar 4.16 Struktur mikro hasil ekstrusi batang kawat dengan 1% SiC/np (SEM, 500x)

Gambar 4.15 menunjukkan struktur mikro komposit hasil proses sinter. Pada gambar dapat dilihat masih adanya pori pori yang dapat menurunkan nilai kekerasan sampel. Sedangkan Gambar 4.16 adalah struktur mikro batang kawat hasil proses ekstrusi. Gambar 4.16 menunjukkan berkurangnya pori pori yang dapat memperbaiki nilai kekerasan dari sampel seperti dijelaskan oleh Gambar 4.17.

4.3.3 Hasil Pengujian Kekerasan

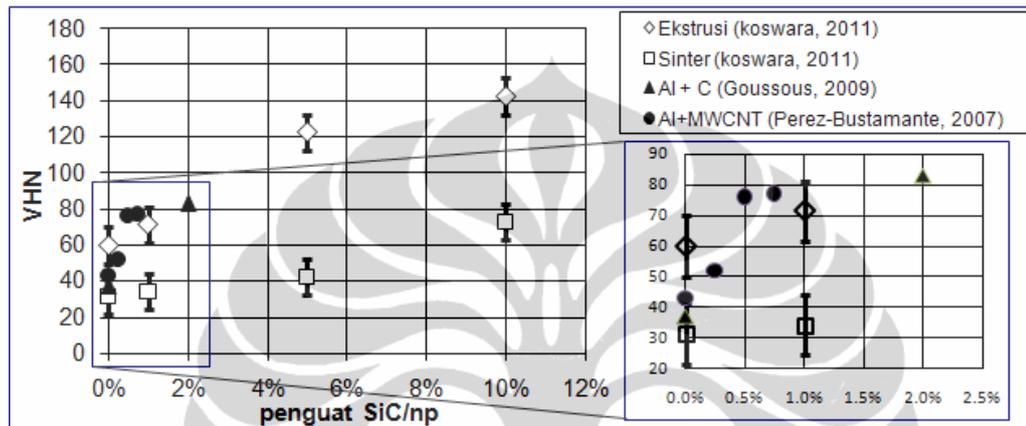
Ukuran sampel yang pendek tidak memungkinkan dilakukan pengujian tarik. Dengan demikian, sifat mekanik batang kawat hanya dinyatakan dengan hasil uji kekerasan.

Grafik nilai kekerasan dari hasil proses sinter dan ekstrusi dapat dilihat pada Gambar 4.17. Pengujian dilakukan dengan menggunakan microhardness vickers dengan beban 50 gram dan waktu 15 detik. Grafik nilai kekerasan hasil proses sinter yang masih rendah disebabkan oleh terdapat pori pori pada produk sehingga nilai kekerasannya masih rendah. Namun demikian, dengan meningkatnya kandungan SiC/np, nilai kekerasan sampel hasil sinter meningkat.

Grafik nilai kekerasan hasil proses ekstrusi menunjukkan hasil yang lebih tinggi. Nilai kekerasan pada batang kawat Al- 0% SiC/np jauh lebih tinggi dibandingkan dengan nilai kekerasan aluminium monolitik. Hal ini disebabkan oleh adanya unsur lain yang menjadi pengotor. Makin tinggi kandungan SiC/np, makin tinggi pula nilai kekerasan batang kawat Al-SiC/np. Perbedaan nilai kekerasan antara batang kawat Al-SiC/np hasil ekstrusi dengan komposit Al-SiC/np hasil proses sinter disebabkan pada hasil proses sinter masih terdapat pori pori, sedangkan pada batang kawat hasil proses ekstrusi, jumlah pori pori tersebut sudah dikurangi.

Gambar 4.17 juga menunjukkan nilai kekerasan sinter dan batang kawat komposit nano Al-SiC/np dengan hasil penelitian Li tentang pembuatan komposit nano Mg dengan penguat SiC/np dan hasil penelitian Perez-Bustamante tentang pembuatan komposit nano Al dengan penguat multiwall nanotube (MWCNT). Komposit

nano Al-C pada penelitian Goussous, dibuat dengan mencampur C dengan serbuk Al. Sedangkan komposit nano Al-MWCNT pada penelitian Perez-Bustamante dibuat dengan cara mencampur MWNT dengan serbuk Al menggunakan metoda metalurgi serbuk (Perez-Bustamante, 2007). Baik komposit nano Al-C maupun Al-MWCNT memiliki nilai kekerasan yang hampir sama dengan komposit nano Al-1% SiC/np pada penelitian ini.

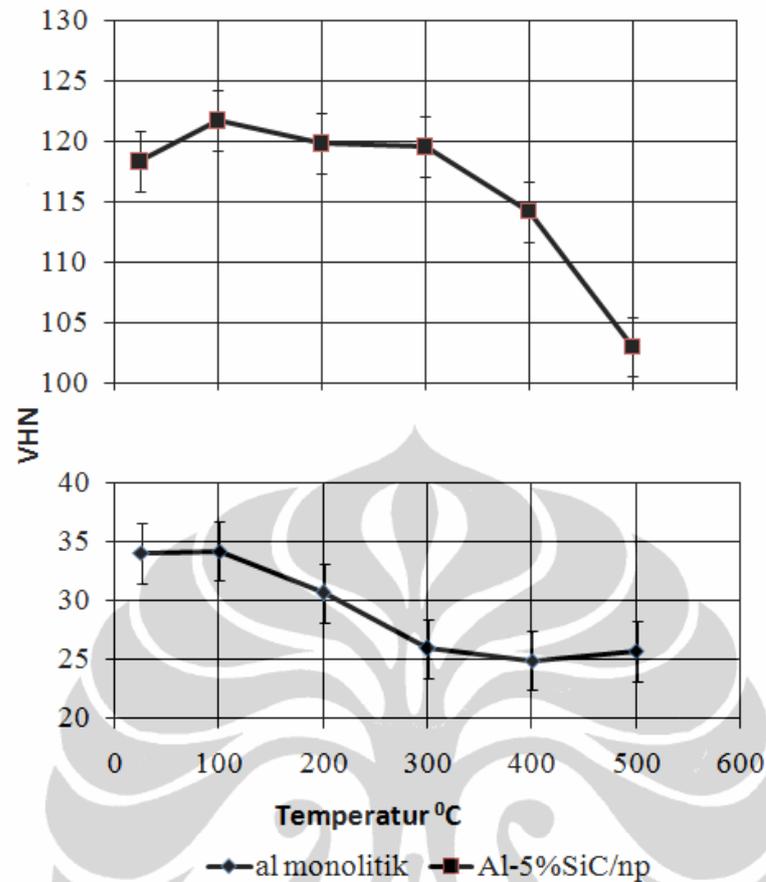


Gambar 4.17 Nilai kekerasan (VHN) hasil sinter dan ekstrusi

4.3.4 Pengaruh Temperatur Pada Nilai Kekerasan

Pengaruh temperatur terhadap nilai kekerasan dari batang kawat dapat dilihat pada Gambar 4.18. Pengujian dilakukan setelah sampel dipanaskan selama 2 jam pada temperatur pengujian. Dari gambar diketahui bahwa nilai kekerasan batang kawat Al-5% SiC/np tetap stabil setelah dipanaskan sampai 300⁰C, dan turun sedikit sampai pemanasan 500⁰C. Sedangkan nilai kekerasan batang kawat aluminium monolitik stabil sampai pemanasan 100⁰C dan setelah itu nilainya menurun.

Nilai kekerasan batang kawat Al-5% SiC/np yang tetap stabil setelah menjalani pemanasan 300⁰C menunjukkan bahwa pada batang kawat tersebut terjadi pergeseran temperatur rekristalisasi. Dari Gambar 4.18 dapat diketahui temperatur rekristalisasi batang kawat aluminium yang berkisar antara 150⁰C dan 250⁰C sedangkan temperatur rekristalisasi pada batang kawat Al-5%SiC/np lebih dari 300⁰C. Data ini menunjukkan bahwa penambahan SiC/np telah menaikkan temperatur rekristalisasi.



Gambar 4.18 Pengaruh pemanasan selama 2 jam pada temperatur uji terhadap Nilai kekerasan (VHN) Batang kawat Hasil Ekstrusi

4.3.5 Pengaruh SiC/np Terhadap Konduktivitas

Resistivitas ρ adalah karakteristik tahanan listrik yang dimiliki oleh logam konduktor dalam satuan $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$, Ωkm atau Ωm . Tembaga memiliki resistivitas sebesar $0,017241 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ (National Bureau of Standards, 1966). Resistivitas logam lain dibandingkan dengan tembaga, dan dinyatakan dalam % IACS (International Annealed Copper Standard). Pengukuran resistivitas dilakukan dengan listrik arus bolak balik dengan variasi frekuensi (Hz) dari listrik arus bolak balik tersebut.

Berdasarkan pengukuran, komposit nano SiC/np memiliki nilai resistivitas yang lebih tinggi dibanding dengan batang kawat monolitik seperti ditunjukkan pada Gambar 4.19. Makin tinggi kandungan SiC/np, makin besar nilai resistivitas dari batang kawat. Resistivitas dari batang kawat dengan masing masing komposisi

pada frekuensi 50 Hz dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 juga menunjukkan nilai IACS dari batang kawat komposit nano hasil proses ekstrusi. Dengan membandingkan terhadap resistivitas tembaga ($0,017241 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$) dapat dilihat nilai resistivitas batang kawat tersebut dalam satuan % IACS.

Tabel 4.4 Pengaruh Komposisi SiC/np terhadap Resistivitas Batang Kawat pada Frekuensi 50 Hz

	Al Monolith	1% SiC/np	5% SiC/np	10% SiC/np
Resistivitas ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)	0.0288	0.0335	0.0952	1,2260
% IACS	59,8	51,3	18,1	1,4

Konduktivitas dari batang kawat komposit nano Al-SiC/np dapat dilihat pada Gambar 4.20 yang menunjukkan bahwa makin besar kandungan SiC/np makin kecil konduktivitas dari komposit. Makin tinggi frekuensi arus listrik, makin besar konduktivitas batang kawat, namun pada suatu frekuensi sebesar sekitar 500KHz terjadi penurunan nilai konduktivitas. Konduktivitas σ dihitung dalam satuan S/cm, dimana S adalah Siemens. Konduktivitas σ dihitung sesuai dengan persamaan:

$$\sigma = K G \text{ (S/cm)} \quad (8)$$

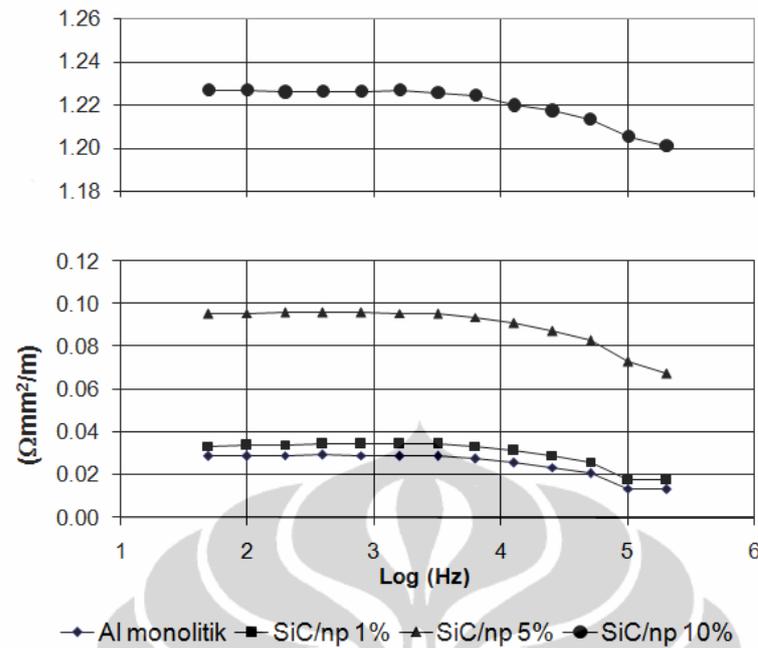
$$K = \frac{l}{A}$$

l = panjang kawat (cm); A = luas permukaan kawat (cm^2); σ = Konduktivitas (S/cm)

G = konduktansi (S = Siemens)

$$S = \frac{1}{R}$$

R = Resistansi (Ω)

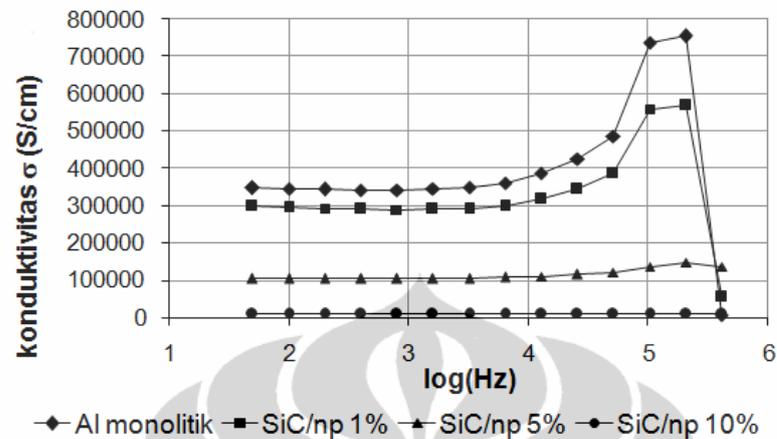


Gambar 4.19 Pengaruh jumlah SiC/np pada resistivitas batang kawat hasil ekstrusi

Hasil penelitian Pan (Pan, 1994) menunjukkan bahwa penambahan La sebanyak 0,6% membuat konduktivitas menjadi sebesar 62,7% IACS dan penambahan Ce sebesar 1% membuat konduktivitas batang kawat menjadi sebesar 60,1%. Konduktivitas tanpa paduan adalah 60% IACS. Hasil penelitian Gunawan (Gunawan, 2000) menunjukkan bahwa konduktivitas listrik turun dari 61,7% tanpa penambahan Zr menjadi 59,1% IACS dengan penambahan 0.08% Zr. Perbedaan nilai konduktivitas hasil penelitian Pan dan Gunawan terhadap batang kawat nanokomposit Al-1% SiC/np disebabkan beberapa hal, diantaranya adalah kebersihan dari matrix aluminium selain, yang utama adalah pengaruh SiC/np. Sedangkan penelitian yang dilakukan oleh Horikoshi (Horikoshi, 2006) menunjukkan bahwa penambahan 0,6% Fe dan penambahan 0,6% Fe, 0,05% Zr meningkatkan kekuatan tarik sementara konduktivitasnya terjaga pada 59 % dan 58% IACS pada temperatur annealing 200⁰C.

Penurunan konduktivitas ini sesuai dengan pendapat (Horikoshi, 2006) bahwa konduktivitas batang kawat konduktor menurun bila terdapat penambahan Fe sampai 0,2% dan kemudian konstan berada pada 63% IACS dari sebelumnya 64,5% IACS tanpa Fe. Serta konduktivitas batang kawat konduktor menurun bila

terdapat penambahan Zr sampai 0,3% dan kemudian konstan berada pada 57% IACS dari sebelumnya 64,5% IACS tanpa Zr.



Gambar 4.20 Pengaruh jumlah SiC/np pada konduktivitas batang kawat hasil ekstrusi

Penurunan konduktivitas ini juga sesuai dengan pendapat Pan (Pan, 1994), bahwa konduktivitas batang kawat konduktor menurun dengan makin besarnya unsur pengotor dan memenuhi persamaan:

$$R = R_0 + k [\%Si + \%Fe + \dots] + k [\%FeAl_3 + \dots] \quad (9)$$

R = Resistivitas

k = konstanta

Dalam hal ini, SiC/np dapat dianggap pengotor sehingga termasuk pada komponen yang menurunkan konduktivitas. Makin tinggi SiC/np makin besar resistivitas dan penambahan 10% SiC/np membuat resistivitas menjadi sangat tinggi yang membuat konduktivitas dengan satuan %IACS menjadi sangat rendah.

Dapat disimpulkan penggunaan penguat SiC/np yang terlalu banyak berpengaruh besar pada konduktivitas dari batang kawat. Berdasarkan itu maka jumlah kandungan penguat SiC/np pada batang kawat konduktor maksimum hanya 1%, agar konduktivitas batang kawat konduktor tidak terlalu banyak terganggu.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan pada penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Batang kawat Al-SiC/np telah berhasil dibuat dengan metoda metalurgi serbuk yang dilanjutkan dengan proses ekstrusi. Batang kawat yang diperoleh, berdiameter 7 mm dengan komposisi 0% SiC/np, 1% SiC/np, 5% SiC/np dan 10% SiC/np.
2. Penambahan Mg pada saat proses sinter telah berhasil menurunkan tekanan oksigen parsial yang dibuktikan dengan terjadinya penggabungan partikel aluminium
3. Penggunaan Mg untuk menutupi permukaan partikel nano SiC dengan metoda elektrodes menyatukan partikel nano SiC dengan matrix aluminium sehingga terjadi membuat hubungan yang bersambung (koheren) antara SiC/np dengan matrix aluminium.
4. Penambahan 1% SiC/np telah menaikkan nilai kekerasan batang kawat komposit 2 kali lipat dari nilai kekerasan aluminium murni. Penambahan 5% SiC/np dan 10% SiC/np membuat batang kawat komposit memiliki nilai kekerasan yang jauh lebih tinggi lagi.
5. Nilai Kekerasan dari batang kawat tidak berubah setelah pemanasan sampai 300⁰C selama 2 jam. Hal itu menunjukkan penambahan partikel nano SiC menghambat pertumbuhan butir.
6. Penambahan SiC/np lebih dari 1% dapat menurunkan nilai konduktivitas dari batang kawat secara signifikan.

5.2 Saran

Disarankan agar dilakukan penelitian lanjutan berupa:

1. Pembuatan batang kawat dengan variasi komposisi SiC/np antara 0,1% sampai 0,5%.
2. Dilakukan penelitian proses penarikan kawat sehingga diperoleh kawat dengan diameter 1,6 mm
3. Pada kawat hasil penarikan, dilakukan karakterisasi terhadap konduktivitas dan sifat mekanik, khususnya kuat tarik dan pemuluran pada temperatur tinggi



DAFTAR REFERENSI

Ahmed, A., A.J.Neely, K.Shankar, *Effect of Ceramic Reinforcements on the Mechanical Behaviour of 7xxx series Aluminium Matrix Composites*, 5th Australasian Congress on Applied Mechanics, ACAM 2007, 10-12 December 2007, Brisbane, Australia

Asgharzadeh, H., A. Simchi, HS. Kim, *Microstructure and Mechanical Properties of Oxide-Dispersion Strengthened Al6063 Alloy with Ultra-Fine Grain Structure*, Metallurgical and Materials Transactions A, volume 42A, March 2011

Ashby, Michael F., David R. H. Jones, *Engineering Materials 2, An Introduction to Microstructures, Processing and Design*, Butterworth-Heinemann, Third edition 2006

ASM International Handbook Committee, *ASM Handbook, Volume 7, Powder Metal Technologies and Applications 10th ed.*, Ohio, 1990

Bauser, M., G. Sauer, K. Siegert, *Extrusion*, ASM International, Ohio, 2006

Bomford, US patent no. 3,816,080, Mechanically alloyed aluminum-aluminum oxide, Juni 11, 1974

Camargo, et al, *Nanocomposites: Synthesis, Structure, Properties and New Application Opportunities*, Materials Research, Vol. 12, No. 1, 1-39, 2009

Candan, Ercan, *Effect of Alloying Elements to Aluminium on the Wettability of AL/SiC System*, Turkish J. Eng. Env. Sci. 26 (2002) , 1 - 5.

Cao, G., H. Konishi, X. Li, *Recent Developments on Ultrasonik Cavitation Based Solidification Processing of Bulk Magnesium Nanocomposites*, International Journal of Metalcasting/Winter 2008,

Cao, Guozhong, *Nanostructures & Nanomaterials, Synthesis, Properties & Applications*, Imperial College Press, London, 2004

Choi, Seong-Min, Hideo Awaji, *Nanocomposites - a new material design concept*, Science and Technology of Advanced Materials 6 (2005) 2–10, Elsevier

Cottrell, Allan, *An Introduction to Metallurgy*, Edward Arnold, London, 1975

Gorur, *Characterization of Composite Cores for High Temperature-Low Sag (HTLS) Conductors*, Power Systems Engineering Research Center, Arizona State University, 2009

Goussous, R., et al, *Al-C Nanocomposites Consolidated by Back Pressure Equal Channel Angular Pressing*, Composites Science and Technology 69 (2009) 1997 - 2001

Gunawan, *Pengaruh Penambahan Zirkonium dan Lanthanum terhadap Konduktivitas Listrik dan Ketahanan Panas Batang kawat Konduktor Aluminium*, Tesis Magister Materials Science, Program Studi Material Science, Universitas Indonesia, 2000

Guo, J, Q, K. Ohtera, K. Kita, T. Shibata, *New Metastable phases in rapidly solidified Al-Zr and Al-Ti alloys with high soluble contents*, Materials Science and Engineering, A181/A182 (1994) 1397-1404

Gupta, Nikhil, K. G. Satyanarayana, *Symposium Review- Solidification Processing of Metal Matrix Composites - Rohatgi Honorary Symposium*, JOM, Vol. 58, No. 11, 2006, pp. 91-93

Han, Do-Suck, H. Jones, H. V. Atkinson, *The wettability of silicon carbide by liquid aluminium: the effect of free silicon in the carbide and of magnesium, silicon and copper alloy additions to the aluminium*, Journal of Materials Science 28 (1993) 2654 2658

Hong, S.H., B.K. Kim, *Fabrication of aluminum flake powder from foil scrap by a wet ball milling process*, Materials Letters 51, 2001

Horikoshi et al, *development of aluminum alloy conductor with high electrical conductivity and controlled tensile strength and elongation*, Hitachi Cable Review, August 2006, http://www.hitachi-cable.com/about/publish/review/icsFiles/afieldfile/2006/10/16/h_06.pdf, download pada 15 November 2011.

Hultgren, Ralph, Raymond L. Orr, Philips D. Anderson, Kenneth K. Kelly, *Selected Values of Thermodynamic Properties of Metals and Alloys*, John Willey & Sons, New York, 1963

J.T. Baker, *MSDS, Oleic Acid*, 2005, <http://www.jtbaker.com/msds/englishhtml/o3596.htm>, download pada tanggal 17 September 2010

Johnson, US Patent no. 7,093,416, method for manufacture ACCR, Aug. 22, 2006.

Kadhim, K. Mohammed Jasim, Adil A. Alwan, Iman J. Abed, *Simulation of Cold Die Compaction Alumina Powder*, STM Journal, Trends in Mechanical Engineering & Technology Volume 1, Issue 1, February, 2011, Pages 1-21.

Kang, L, Suk-Joong, *Sintering, Densification, Grain Growth, and Microstructure*, Elsevier Butterworth-Heinemann, London, 2005

Kumar, S., V. Subramanya Sarma, B.S. Murty, *Influence of in situ formed TiB_2 particles on the abrasive wear behaviour of Al-4Cu alloy*, Materials Science and Engineering A 465 (2007) 160–164

Li, Xiaochun, Roderic Lakes, Sindo Kou, Joanna Groza, and Kenneth Gall, *NIRT/GOALI: Fundamental Study of Bulk Magnesium Alloy Matrix Nanocomposites Fabricated by Ultrasonic Cavitation Based Solidification Processing*, NSF Nanoscale Science and Engineering Grantees Conference, Dec 4-6, 2006, <http://www.nseresearch.org/2006/NewFiles/45Li%200506767%20NIRT%202005%20overview.pdf>

Li, Xiaochun, Yong Yang, Xudong Cheng, *Ultrasonic-assisted fabrication of metal matrix nanocomposites*, Journal of Materials Science **39** (2004) 3211 – 3212

Liu et al, *Nanostructure Characterization of Iron Catalyst Assisted SiC Nanowires*, Microsc Microanal 13(Suppl 2), 2007

Mendoza-Ruiz, M. A. Esneider-Alcalá, I. Estrada-Guel, M. Miki-Yoshida et al, *Dispersion of Graphite Nanoparticles In A 6063 Aluminum Alloy by Mechanical Milling and Hot Extrusion*, Rev.Adv.Mater.Sci. 18(2008) 280-283

Mileiko, S. T., A. M. Rudnev & M. V. Gelachov, *Carbon-Fibre/Titanium Silicide Interphase/Titanium-Matrix Composites: Fabrication, Structure and Mechanical Properties*, Composites Science and Technology 55 (1995) 255-260

Mitra, Rahul, Yashwant R. Mahajan, *Interfaces in Discontinuously Reinforced Metal-matrix Composites*, Defence Science Journal, Vol 43, No 4, October 1993, pp 397-418

http://www.nabond.com/SiC_nanopowder.html, 2010

Nakao, US Patent no. 6,303,236 BI Method for Manufacturing Aluminum-Based Composite Plate and Composite Back-Plate, Oct 16, 2001

National Bureau of Standards, *Copper Wire Tables*, US Department of Commerce, 1996

Neikov, Oleg D., Stanislav S. Naboychenko, Gordon Dowson, *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders, Technologies and Application*, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, First edition, 2009

Peng, US Patent no 7,297,310, *Manufacturing method for aluminum matrix nanocomposite*

Perez-Bustamante, R., *Novel Al-matrix nanocomposites reinforced with multi-walled carbon nanotubes*, Journal of Alloys and Compounds, Elsevier B.V., 2006
<http://www.me.utexas.edu/~ferreira/publications/papers/JALCOM.pdf>

Peteves, S. D., P. Tambuyser, P. Helbach, *Microstructure and microchemistry of the Al/SiC interface*, Journal of Materials Science 25 (1990) 3765-3772

Rohatgi, P.K., B. Schultz, *Lightweight Metal Matrix Nanocomposites - strength the boundaries of metals*, Material Maters, vol 2 no. 4

Rohatgi, P.K., *Cast Metal Matrix Composites: Past, Present and Future*, AFS Transactions 01-133 (Page 1 of 25), 2001, www.moderncasting.com/MoreInfo/0107/MoreInfo0107.pdf

Schaffer G.B, *Powder Processed Aluminium Alloys*, Materials Forum, Volume 28 - 2004, Institute of Materials Engineering Australasia Ltd, http://www.materialsaustralia.com.au/lib/pdf/Materials_Forum/Volume28/INV7.pdf

Shi, Zhongliang, Gu Mingyuan, Liu Junyou, Liu Guoquan, Lee Jae-chul, Zhang Di, Wu Renjie, *Interfacial reaction between the oxidized SiC particles and Al-Mg alloys*, Chinese Science Bulletin Vol. 46 No. 23 December 2001

Soni, P.R., *Mechanical Alloying, Fundamental and Application*, Cambridge International Publication, Cambridge, 2001

Thostenson, Erik T., Chunyu Li, Tsu-Wei Chou, *Nanocomposites in context*, Composites Science and Technology 65 (2005) 491–516 <http://imechanica.org/files/Thostenson-Li-Chou-05-CST.pdf>

Threrujirapong, Thotsaphon, et al, *Titanium Matrix Composite Reinforced with In-situ Formed TiC Using Carbon black Nanoparticles via a Wet Process*, Transaction of JWRI, vol 38 (2009), no. 1, <http://www.jwri.osaka-u.ac.jp/publication/trans-jwri/pdf/381-03.pdf>

Tjong, Sie Chin, *Novel Nanoparticle-Reinforced Metal Matrix Composites with Enhanced Mechanical Properties*, *Advanced Engineering Materials* **2007**, 9, No. 8 © 2007 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

Trojanová, Z. P. Lukác, *Deformation behaviour of ZC63 Magnesium Matrix Composite*, *Archives of Materials Science and Engineering*, Volume 28, Issue 6, June 2007, Pages 361-364, http://www.archivesmse.org/vol28_6/2869.pdf

Upadhyaya, G. S., *Powder Metallurgy Technology*, Cambridge International Science Publishing, Cambridge, 2002

Vaucher, S., O. Beffort, *Bonding and interface formation in Metal Matrix Composite*, http://www.empa.ch/abt126/abt126/1.3.hybrid/1.3.8.literatur_mmc/literatur/light_metals_general/The_Booklet2.pdf

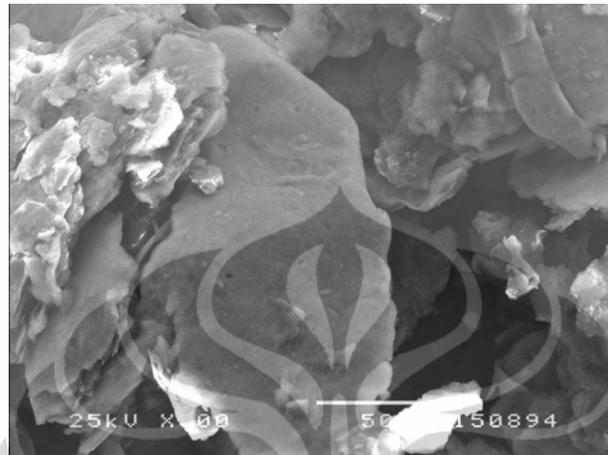
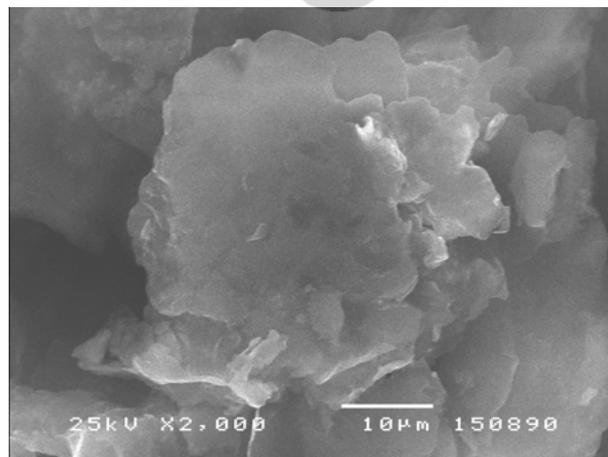
Yaghmaee, M.S., G.Kaptay, *On the Stability Range of SiC in Ternary Liquid Al-Si-Mg Alloy*, www.uni-miskolc.hu/~fkmsahba/Publication-view/2001/2001-F2.pdf

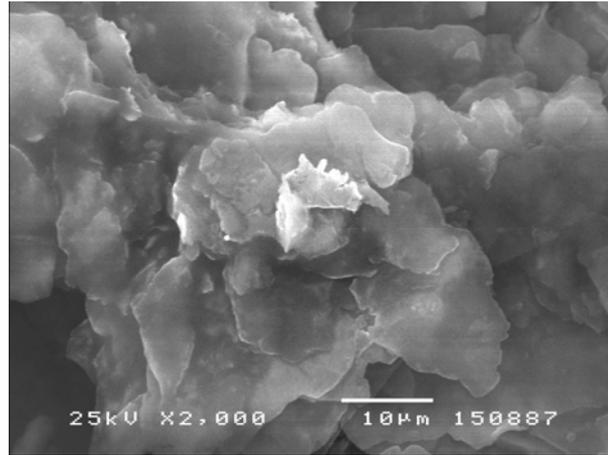
Ye, Hai Zhi, Xing Yang LIU, *Review of recent studies in magnesium matrix composites*, *Journal of Materials Science*, 39 (2004) 6153 – 6171, <http://acetake.com/Documents/Review%20of%20Mg%20MMC.pdf>

Zebarjad, S. M., S. A. Sajjadi, and E. Z. Vahid Karimi, *Influence of Nanosized Silicon Carbide on Dimensional Stability of Al/SiC Nanocomposite*, Hindawi Publishing Corporation, *Research Letters in Materials Science*, Volume 2008, Article ID 835746, 4 pages

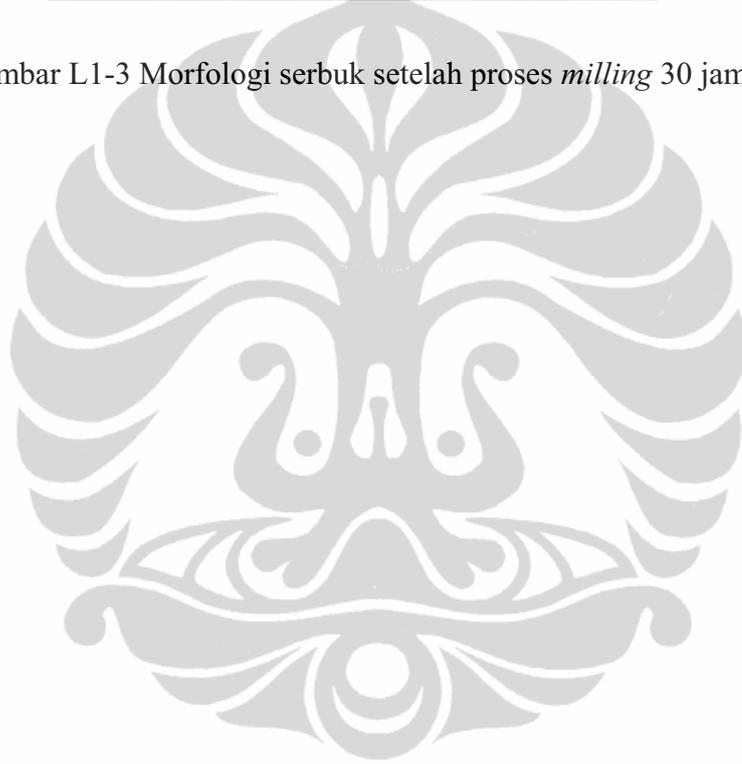
Zoltai, L, *Prediction of Wettability between Liquid Metals and Covalent Ceramics*, *anyagok vilaga (material world)*, Hungaria, Juli 2001, <http://www.kfki.hu/~anyag/tartalom/2001/jul/zoltai.htm>, di download pada tanggal 29 September 2010

LAMPIRAN 1

PERKEMBANGAN MORFOLOGI ALUMINIUM SERBUK
BERDASARKAN WAKTU *BALL MILLING*Gambar L1-1. Morfologi serbuk setelah 20 jam proses *milling*Gambar L1-2. Morfologi serbuk setelah proses *milling* 25 jam

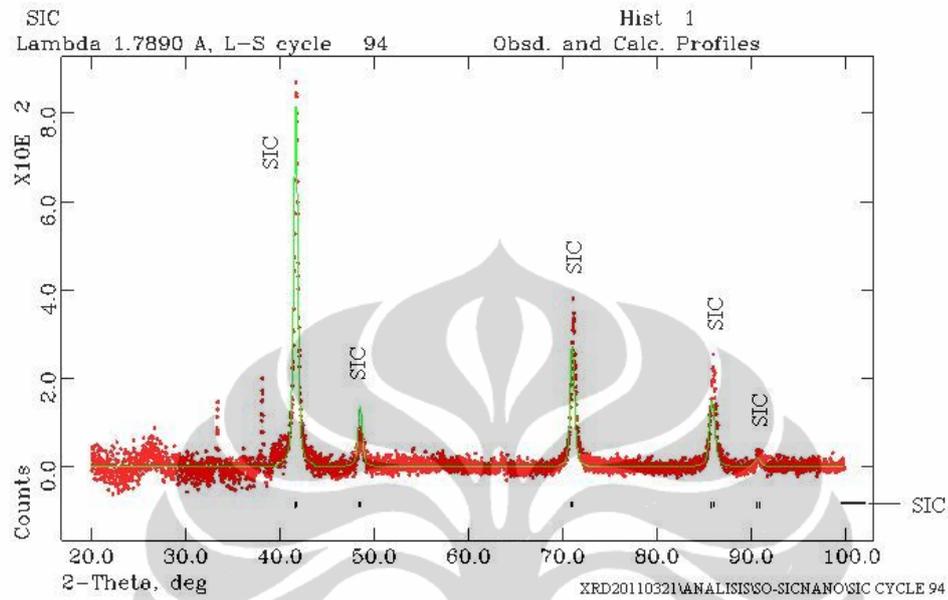


Gambar L1-3 Morfologi serbuk setelah proses *milling* 30 jam

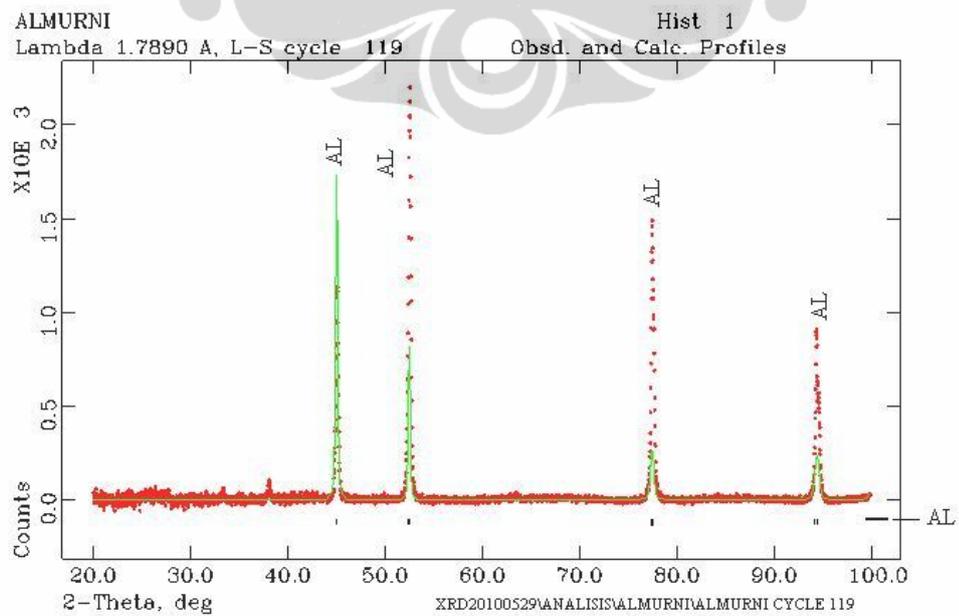


LAMIRAN 2

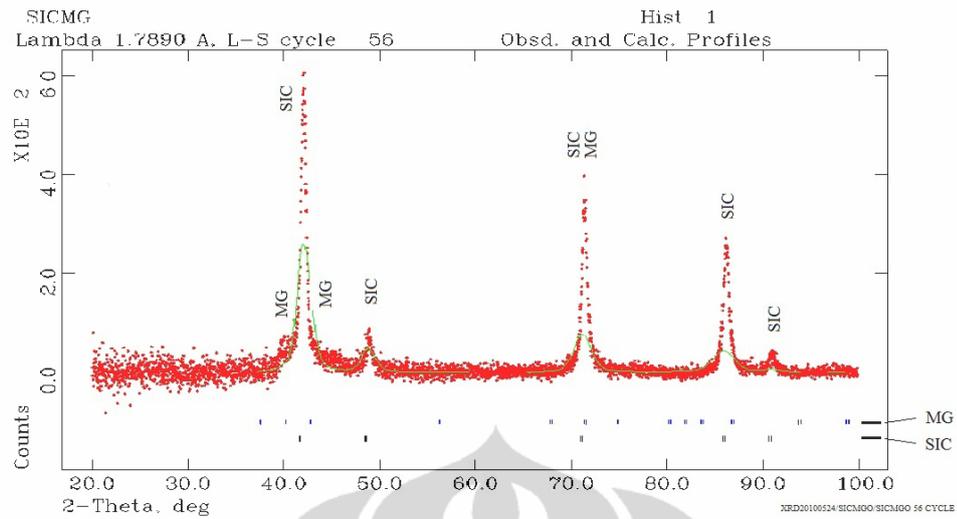
POLA DIFRAKSI SINAR X



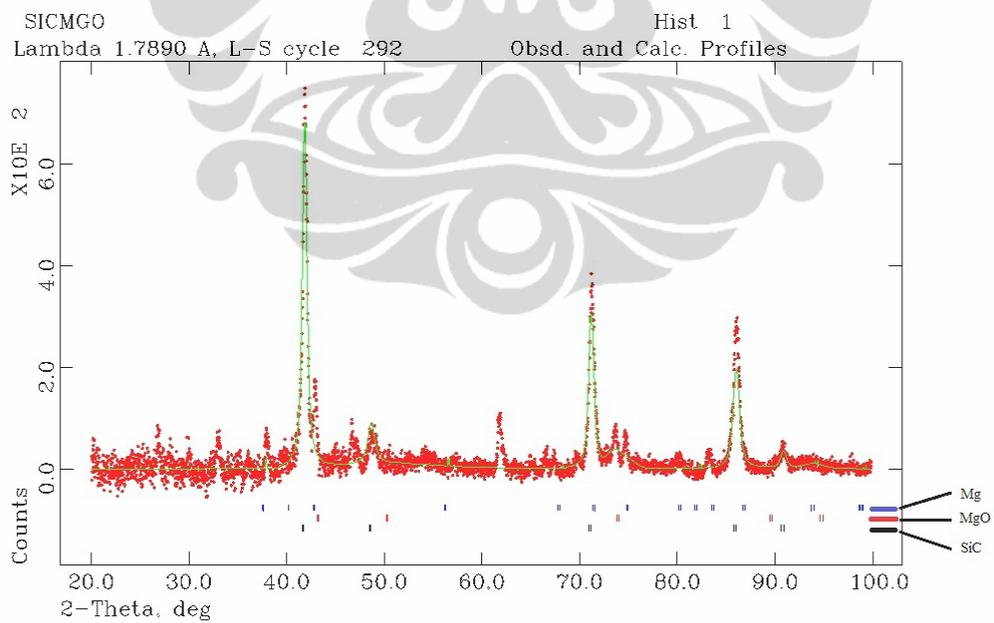
Gambar L2.1 Pola Difraksi Sinar X SiC/np



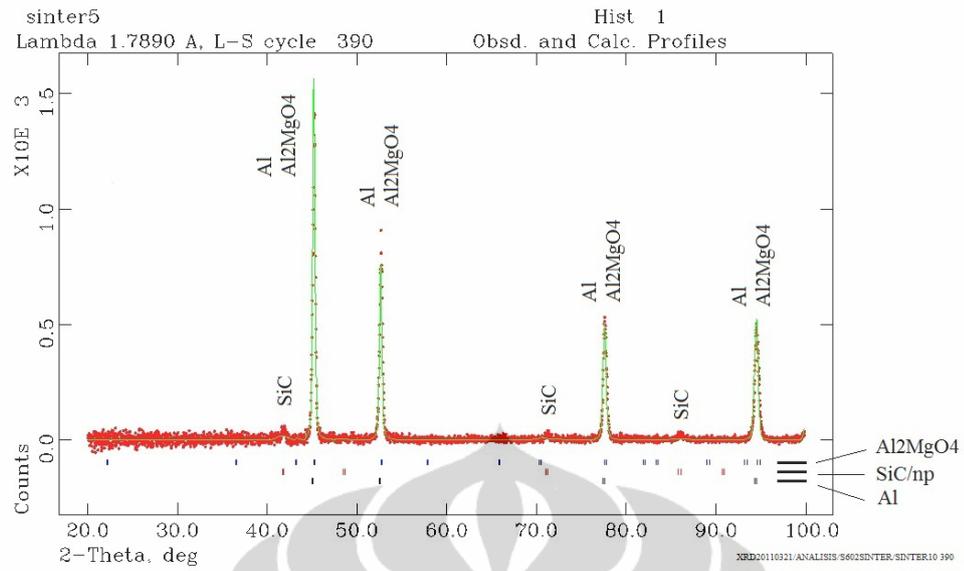
Gambar L2.2 Pola Difraksi Aluminium



Gambar L2.3 Pola Difraksi Serbuk SiC-Mg



Gambar L2.4 Pola Difraksi Serbuk SiC-MgO



Gambar L2.5 Pola Difraksi Sinter Al-5%SiC/np

LAMPIRAN 3

PERHITUNGAN JUMLAH MgO PADA SiC

$$\begin{aligned}
 \text{Berat MgO} &= 3,58 \text{ gram/cm}^3 \\
 &= 3,58 \cdot 10^{-24} \text{ gram/\AA}^3 \\
 \text{Jarak antar atom MgO } a &= 4,2147 \text{ \AA} \\
 \text{Luas permukaan kisi}^2 \text{ kristal MgO} &= 17,7634 \text{ \AA}^2 \\
 \text{Volume 1 unit kristal MgO} &= 74,8686 \text{ \AA}^3 \\
 \text{Berat per kristal MgO} &= 2,6803 \cdot 10^{-22} \text{ gram} \\
 \text{Luas permukaan partikel nano SiC 50 nm} &= 785398,16 \text{ \AA}^2 \\
 \text{Jumlah 1 lapis kristal MgO di permukaan SiC} &= 44213,67 \\
 \text{Berat 1 lapis MgO di permukaan SiC} &= 1,1851 \cdot 10^{-17} \text{ gr} \\
 \text{Berat SiC} &= 3,22 \text{ gram/cm}^3 \\
 &= 3,22 \cdot 10^{-24} \text{ gram/\AA}^3 \\
 \text{Jarak antar atom SiC } a &= 4,358 \text{ \AA} \\
 \text{Volume 1 unit kristal SiC} &= 82,77 \text{ \AA}^3 \\
 \text{Berat per kristal SiC} &= 2,66512 \cdot 10^{-22} \text{ gram} \\
 \text{Volume 1 butir SiC 50 nm} &= 65449846,95 \text{ \AA}^3 \\
 \text{Jumlah unit kristal pada satu butir SiC 50 nm} &= 790764,12 \\
 \text{Berat 1 butir SiC 50 nm} &= 2,10749 \cdot 10^{-16} \text{ gram} \\
 \text{Perbandingan Berat 1 lapis MgO dengan 1 butir SiC 50 nm} & \\
 \frac{\text{MgO}}{\text{SiC}} &= \frac{1,1851 \cdot 10^{-17}}{2,10749 \cdot 10^{-16}} \times 100\% = 5,62\% \\
 \text{Perbandingan MgO dengan SiC pada serbuk SiC yang telah dilapis MgO} & \\
 \frac{\text{MgO}}{\text{SiC}} &= \frac{22,48}{77,08} \times 100\% = 29,16\% \\
 \text{Jumlah Lapisan MgO} &= \frac{29,16}{5,62} = 5,18
 \end{aligned}$$

Dari perhitungan disimpulkan, pada setiap butir SiC terdapat 5 lapis MgO

LAMPIRAN 4

Tabel L4.1 Konduktansi

konduktansi G (S), 1S = 1/Ω					
Hz	log(Hz)	SiC/np 0%	SiC/np 1%	SiC/np 5%	SiC/np 10%
50	1.6990	1.2832.E+05	1.1437E+05	5.8563E+04	3.2323E+03
100	2.0000	1.2758.E+05	1.1330E+05	5.8313E+04	3.2319E+03
200	2.3010	1.2699.E+05	1.1235E+05	5.8197E+04	3.2344E+03
400	2.6021	1.2626.E+05	1.1126E+05	5.8012E+04	3.2336E+03
800	2.9031	1.2661.E+05	1.1104E+05	5.8099E+04	3.2340E+03
1600	3.2041	1.2779.E+05	1.1145E+05	5.8336E+04	3.2320E+03
3200	3.5051	1.2896.E+05	1.1179E+05	5.8592E+04	3.2354E+03
6400	3.8062	1.3331.E+05	1.1464E+05	5.9537E+04	3.2388E+03
12800	4.1072	1.4341.E+05	1.2182E+05	6.1370E+04	3.2506E+03
25600	4.4082	1.5719.E+05	1.3163E+05	6.3910E+04	3.2572E+03
51200	4.7093	1.8009.E+05	1.4788E+05	6.7367E+04	3.2675E+03
102000	5.0103	2.7335.E+05	2.1452E+05	7.6276E+04	3.2893E+03
205000	5.3113	2.7932.E+05	2.1784E+05	8.2569E+04	3.3013E+03
410000	5.6124	2.8129.E+03	2.1142E+04	7.5876E+04	3.3267E+03

Tabel L4.2 Resistivitas

l (m)	0.00583	0.00562	0.00688	0.00544
d (mm)	5.24	5.24	6.990	5.24
A	21.5651	21.5651	38.3746	21.5651

resistivitas $\rho = RA/l$ ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)					
Hz	log(Hz)	Al monolitik	SiC/np 1%	SiC/np 5%	SiC/np 10%
50	1.6990	0.028827	0.033552	0.095244	1.226434
100	2.0000	0.028994	0.033869	0.095651	1.226588
200	2.3010	0.029129	0.034154	0.095842	1.225621
400	2.6021	0.029297	0.034489	0.096148	1.225950
800	2.9031	0.029216	0.034558	0.096004	1.225796
1600	3.2041	0.028946	0.034430	0.095613	1.226544
3200	3.5051	0.028684	0.034324	0.095196	1.225247
6400	3.8062	0.027747	0.033473	0.093685	1.223953
12800	4.1072	0.025793	0.031499	0.090887	1.219519
25600	4.4082	0.023533	0.029151	0.087274	1.217065
51200	4.7093	0.020540	0.025948	0.082796	1.213198
102000	5.0103	0.013532	0.017887	0.073126	1.205176
205000	5.3113	0.013243	0.017615	0.067552	1.200793
410000	5.6124	1.314992	0.181497	0.073511	1.191624

Tabel L4.4 Konduktansi

l (cm)	0.583	0.562	0.68800	0.544
d (cm)	0.524	0.524	0.699	0.524
A	0.2157	0.2157	0.3837	0.2157
$K=l/A(\text{cm}^{-1})$	2.703436	2.606057	1.792851	2.522589

konduktivitas $\sigma = \text{KG (S/cm)}$					
Hz	$\log(\text{Hz})$	Al monolitik	SiC/np 1%	SiC/np 5%	SiC/np 10%
50	1.6990	346902.75	298049.18	104994.02	8153.72
100	2.0000	344895.72	295254.88	104546.88	8152.69
200	2.3010	343296.37	292789.05	104338.91	8159.13
400	2.6021	341336.38	289951.19	104006.16	8156.94
800	2.9031	342277.17	289370.90	104162.14	8157.96
1600	3.2041	345475.88	290442.54	104588.48	8152.99
3200	3.5051	348627.54	291343.74	105046.01	8161.62
6400	3.8062	360403.17	298746.70	106740.97	8170.25
12800	4.1072	387701.93	317472.60	110026.91	8199.95
25600	4.4082	424941.76	343037.44	114581.47	8216.49
51200	4.7093	486861.80	385392.60	120779.00	8242.67
102000	5.0103	738979.38	559052.89	136751.15	8297.54
205000	5.3113	755129.70	567694.95	148033.56	8327.83
410000	5.6124	7604.61	55097.32	136033.65	8391.91