

## HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :  
Nama : Dona Abrini  
NPM : 0806420985  
Program Studi : Magister Fisika  
Kekhususan : Fisika Murni dan Terapan  
Judul Tesis : Efek Penambahan Ni Terhadap Perubahan  
Mikrostruktur Campuran Serbuk Fe-Al Dengan  
Metode Pemaduan Mekanik

**Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Sains pada Program Studi Magister Fisika Kekhususan Fisika Murni dan Terapan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.**

## DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Nurul Taufiqu Rochman ( )  
Pembimbing : Dr. Muhammad Aziz Majidi ( )  
Penguji : Dr. Suhardjo Poertadji ( )  
Penguji : Dr. Budhy Kurniawan ( )  
Penguji : Dr. Sri Harjanto ( )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 15 Juli 2010



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**EFEK PENAMBAHAN Ni TERHADAP PERUBAHAN  
MIKROSTRUKTUR CAMPURAN SERBUK Fe-Al  
DENGAN METODE PEMADUAN MEKANIK**

**TESIS**

**DONA ABRINI  
0806420985**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
PROGRAM STUDI MAGISTER FISIKA  
KEKHUSUSAN FISIKA MURNI DAN TERAPAN  
DEPOK  
JULI 2010**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**EFEK PENAMBAHAN Ni TERHADAP PERUBAHAN  
MIKROSTRUKTUR CAMPURAN SERBUK Fe-Al  
DENGAN METODE PEMADUAN MEKANIK**

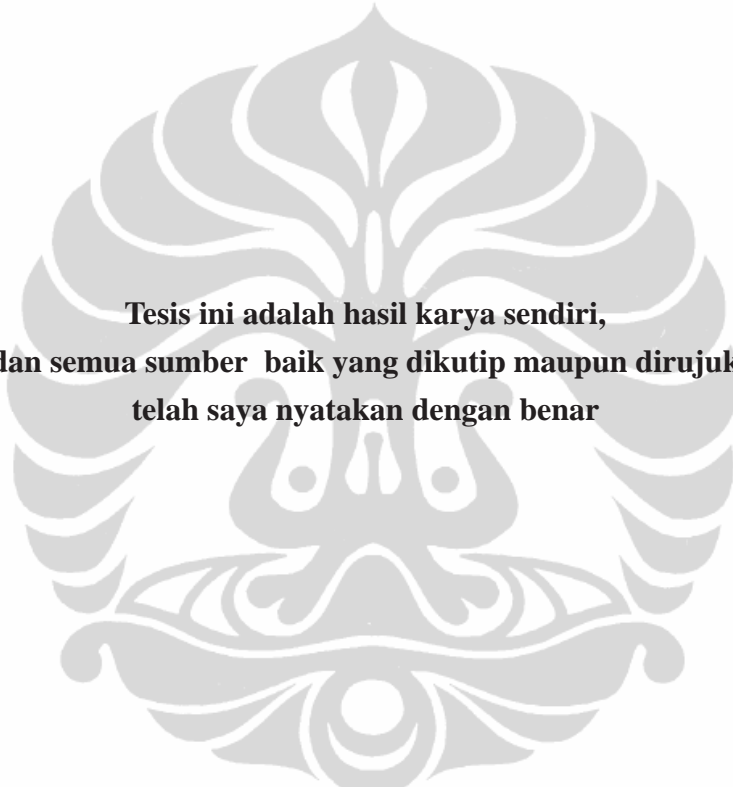
**TESIS**

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Sains

**DONA ABRINI  
0806420985**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
PROGRAM STUDI MAGISTER FISIKA  
KEKHUSUSAN FISIKA MURNI DAN TERAPAN  
DEPOK  
JULI 2010**

## **HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS**



**Tesis ini adalah hasil karya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar**

**Nama : Dona Abrini**

**NPM : 0806420985**

**Tanda Tangan:**

**Tanggal : 15 Juli 2010**

## HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

---

---

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

Nama : Dona Abrini  
NPM : 0806420985  
Program Studi : Magister Fisika  
Kekhususan : Fisika Murni dan Terapan  
Departemen : Fisika  
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Jenis karya : Tesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Efek Penambahan Ni Terhadap Perubahan  
Mikrostruktur Campuran Serbuk Fe-Al Dengan  
Metode Pemaduan Mekanik

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada tanggal : 15 Juli 2010

Yang menyatakan

(Dona Abrini)

## KATA PENGANTAR



*Ya Rabbku, bagi-Mu lah segala puji sebagaimana ketinggian wajah-Mu dan sebesar kekuasaan-Mu (H.R. Imam Ahmad dan Ibnu Majah )*

*Mahasuci Allah dan dengan memuji-Nya, sebanyak jumlah makhluk-Nya dan keridhaan-Nya, setimbang berat Arsy-Nya dan sebanyak tinta kalimat-nya ( H.R. Muslim )*

Semoga Allah SWT yang Maha Mulia senantiasa melimpahkan rahmat-Nya kepada kita, sehingga kita bukan saja akan menjadi hamba yang mulia, tetapi juga diridhoi-Nya. Shalawat dan salam teruntuk Baginda Nabi Muhammad SAW. Beliau lah panutan kita yang paling hak di bumi ini.

Penulis telah berusaha menampilkan tesis ini dalam kondisi yang terbaik dan setepat mungkin, namun karena keterbatasan dan kelemahan yang ada, pasti terbuka kemungkinan kesalahan. Untuk itu penyusun mengharap masukan positif dari semua pihak untuk perbaikan tesis ini.

Dengan penuh kerendahan hati, penulis menyampaikan terima kasih yang tidak terhingga kepada semua pihak yang langsung maupun tidak langsung, turut andil dan memotivasi penyelesaian tesis ini, antara lain kepada :

1. Dr. Yunus Daud selaku ketua Program Pascasarjana FMIPA UI Program Magister Fisika yang telah memberikan arahan dan kemudahan dalam menyelesaikan studi ini.
2. Dr. Nurul Taufiqu Rochman dan Dr. M. Aziz Majidi, selaku Pembimbing yang telah berusaha dengan sabar dan cermat membimbing dan mengarahkan penyusun untuk menyelesaikan penelitian ini.
3. Dr. Agus Sukarto Wismogroho, M.Sc dan Wahyu Bambang widayatno, M.Si yang telah membimbing penulis selama berada di PPF-LIPI SERPONG untuk menyelesaikan penelitian ini.

4. Dr. Suhardjo Poertadji, Dr. Budhy Kurniawan dan Dr. Sri Harjanto selaku pengguji dalam sidang akhir, yang telah memberikan arahan sebagai masukan dalam penulisan tesis ini
5. Seluruh Dosen Program Studi Magister Fisika Kekhususan Fisika Murni dan Terapan yang telah berkenan mentransfer dan membuka cakrawala ilmu pengetahuan kepada penulis
6. Teman-teman Program Studi Magister Fisika Kekhususan Fisika Murni dan Terapan yang sering berbagi wacana
7. Ikhwah fisika S1 universitas Andalas , sykron jazakumullah atas doanya.
8. Zulham yang satu tim dengan penulis dalam melakukan penelitian di PPF-LIPI SERPONG. Semoga Allah memudahkan semua urusan baiknya.
9. Papa, mama, nenek, incim beserta 3 kakak laki-laki tak henti-hentinya mendukung penulis baik secara materil maupun spirituil agar segera menyelesaikan studi S2.
10. Om Erman selaku paman yang mendukung penulis agar menyelesaikan studi S2 ini.

Akhirnya, semoga tesis ini membawa manfaat untuk pengembangan ilmu pengetahuan. Amin.

Depok, 23 Juli 2010

Penulis,

Dona Abrini

## ABSTRAK

Nama : Dona Abrini  
Program Studi : Ilmu Fisika  
Kekhususan : Fisika Murni dan Terapan  
Judul : Efek Penambahan Ni Terhadap Perubahan Mikrostruktur Campuran Serbuk Fe-Al Dengan Metode Pemaduan Mekanik

Efek penambahan Ni pada perubahan mikrostruktur campuran serbuk Fe-Al yang dipreparasi dengan pemaduan mekanik telah diinvestigasi. Campuran bubuk Fe-50at.%Al dengan penambahan variasi 0,5at.%Ni, 2at.%Ni, dan 5at.%Ni di-*milling* menggunakan *High Energy Milling* HEM – E3D dalam suasana Argon, dengan variasi waktu *milling*: 0, 15 menit, 30 menit, 1 jam, 2 jam, 5 jam dan 10 jam, kemudian di-*sinter* pada suhu 500<sup>0</sup>C selama 2 jam. Untuk mengetahui perubahan mikrostruktur, sampel dari setiap variasi waktu *milling* dikarakterisasi menggunakan XRD, mikroskop dan SEM untuk melihat mikrostruktur masing-masing komposisi. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa semakin besar persentase atom Ni dalam paduan Fe-Al, semakin cepat proses penghancuran dan penggumpalan yang terjadi pada proses *milling*. Dengan *sintering* pada temperatur 500<sup>0</sup>C selama 2 jam, intermetalik FeAl untuk komposisi Fe-50at.%Al terbentuk.

**Kata kunci:** Pemaduan Mekanik, Nikel, *High Energy Milling*



## ABSTRACT

Name : Dona Abrini  
Program of Study : Physics  
Area of Specialty : Pure and Applied Physics  
Thesis Title : Effect of Ni Addition to the Change of  
Microstructure of Fe-Al Powder Mixture Using  
Mechanical Alloying Method

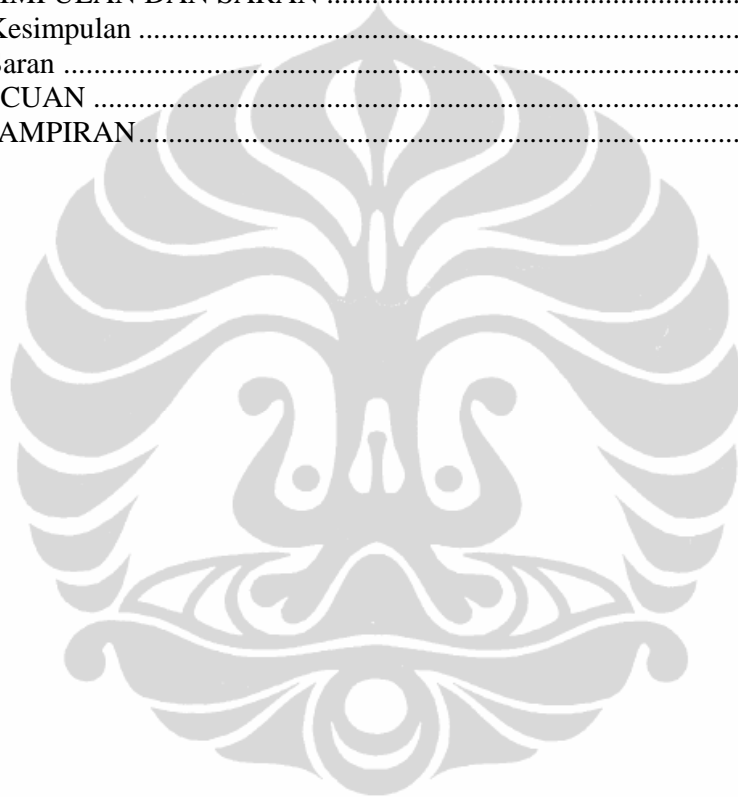
Effect of Ni addition to the change of microstructure of Fe-Al powder mixture prepared with mechanical alloying method has been investigated. The Fe-50at.%Al powder mixture with variation of Ni atomic percentage: 0,5at.%Ni, 2at.%Ni, and 5at.%Ni are milled using High Energy Milling HEM E-3D in Argon environment for various milling times: 0, 15 minutes, 30 minutes, 1 hour, 2 hours, 5 hours, and 10 hours, and sintered in 500<sup>0</sup>C for 2 hours . To know the change of microstructure, sample of each milling time variation is characterized using XRD, microscope, SEM and EDX to see the microstructure of each composition. The characterization result shows that the bigger the Ni atomic percentage in the Fe-Al mixture, the faster the fracturing and the cold welding processes occur during the milling process. Upon sintering at temperature 500 C for 2 hours, FeAl intermetallics forms for composition of Fe-50at.%Al.

**Keywords : Mechanical alloying, Nikel, High Energy Milling**

## DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
KATA PENGANTAR .....	iii
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	iv
ABSTRAK .....	v
ABSTRACT.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan Penelitian .....	2
1.3 Batasan Penelitian.....	2
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....	3
2.1 Aluminium .....	3
2.2 Besi.....	3
2.3 Nikel.....	4
2.4 Intermetalik Fe – Al .....	5
2.5 Pemaduan Mekanik.....	6
2.5.1 Komponen Pemaduan Mekanik.....	6
2.5.1.1 Bahan Baku .....	6
2.5.1.2 Bola giling.....	6
2.5.1.3 Wadah Penggilingan .....	7
2.5.1.4 Alat Penggiling Bola.....	8
2.5.1.4.1 HEM – E3D .....	8
2.5.1.4.2 Prinsip Kerja HEM – E3D .....	8
2.5.2 Parameter Proses Pemaduan Mekanik .....	9
2.5.2.1 Kecepatan dan waktu penggilingan .....	9
2.5.2.2 Perbandingan berat bola terhadap berat serbuk .....	9
2.5.2.3 Volume Pengisian Wadah Penggilingan.....	10
2.5.2.4 Atmosfer Penggilingan .....	11
2.5.2.5 Process Control Agent .....	11
2.5.2.6 Temperatur Penggilingan.....	11
2.5.3 Mekanisme Pemaduan Mekanik .....	12
2.5.4 Karakteristik Serbuk Hasil Proses Pemaduan Mekanik.....	15
2.5.4.1 Campuran Antara Serbuk Ulet Dengan Serbuk Ulet .....	15
2.5.4.2 Campuran Antara Serbuk Ulet Dengan Serbuk Getas .....	16
2.5.4.3 Campuran Antara serbuk Getas Dengan Serbuk Getas .....	19
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	20
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	20

3.2 Variabel Penelitian .....	21
3.3 Bahan .....	21
3.4 Peralatan.....	21
3.5. Prosedur Penelitian .....	23
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>25</b>
4.1 Analisa Hasil XRD.....	25
4.2 Analisa Hasil SEM.....	28
4.3 Analisa EDX .....	33
4.4 Analisa XRD Pada Sampel Sinter.....	38
4.5 ukuran Kristal.....	40
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>42</b>
5.1 Kesimpulan .....	42
5.2 Saran .....	42
<b>DAFTAR ACUAN .....</b>	<b>44</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN.....</b>	<b>48</b>



## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1	Bubuk Aluminium ..... 3
Gambar 2.2	Bubuk Besi ..... 4
Gambar 2.3	Diagram Fasa Fe – Al ..... 5
Gambar 2.4	Bola giling dan wadah penggilingan ..... 7
Gambar 2.5	Prinsip kerja HEM-E3D ..... 9
Gambar 2.6	Hubungan antara ukuran partikel dengan waktu <i>milling</i> untuk dua harga perbandingan berat bola giling terhadap berat serbuk yang berbeda ..... 10
Gambar 2.7	Hubungan antara temperature penggilingan terhadap waktu pemaduan dan ukuran partikel ..... 12
Gambar 2.8	Mekanisme tumbukan serbuk – bola ..... 13
Gambar 2.9	Perubahan ukuran serbuk terhadap waktu penggilingan ..... 14
Gambar 2.10	Morfologi hasil penggilingan material ulet-ulet ..... 16
Gambar 2.11	Mekanisme penghancuran partikel antara serbuk ulet dengan serbuk getas ..... 17
Gambar 2.12	Partikel berstruktur <i>lamellar</i> hasil pengelasan dingin antara serbuk ulet dengan serbuk getas ..... 18
Gambar 2.13	Partikel – partikel serbuk getas yang tidak larut di dalam matriks partikel – partikel serbuk ulet ..... 18
Gambar 2.14	Proses pemaduan mekanik pada campuran serbuk getas dengan serbuk getas ..... 19
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian ..... 20
Gambar 3.2	<i>High Energy Milling</i> HEM E3D ..... 22
Gambar 3.3	Alat pembersih ultrasonik Branson ..... 22
Gambar 4.1	Hasil XRD serbuk Fe-50at.% Al dengan penambahan (a) 0,5at.% Ni (b) 2at.% Ni (c) 5at.% Ni ..... 26
Gambar 4.2	Perubahan morfologi partikel Fe-50at.% Al-2at.% Ni dengan waktu penggilingan (a) 15 menit (b) 30 menit (c) 1 jam (d) 2 jam (e) 5 jam (f) 10 jam ..... 28
Gambar 4.3	Perubahan morfologi partikel Fe-50at.% Al-5at.% Ni dengan waktu penggilingan (a) 15 menit (b) 30 menit (c) 1 jam (d) 2 jam (e) 5 jam (f) 10 jam ..... 30
Gambar 4.4	Foto SEM serbuk Fe-50at.% Al-2at.% Ni dengan 5 jam waktu <i>milling</i> ( a) diperbesar 1000x (b) diperbesar 3000x ..... 31
Gambar 4.5.	Perbandingan morfologi hasil foto SEM Fe – 50at.% Al pada 2 jam penggilingan dengan penambahan (a) 2at.% Ni (b) 5at.% Ni ..... 32
Gambar 4.6	Hasil EDX pada sampel Fe – 50at.% Al – 5at.% Ni sebelum di- <i>milling</i> ..... 33
Gambar 4.7	Hasil EDX pada sampel Fe – 50at.% Al – 0,5at.% Ni dengan 10 jam penggilingan ..... 34
Gambar 4.8	Hasil EDX pada sampel Fe – 50at.% Al – 2at.% Ni dengan

	10 jam penggilingan (a) Area titik (b) analisa titik 001 (c) analisa titik 002.....	36
Gambar 4.9	Hasil EDX pada sampel Fe – 50at.%Al – 5at.%Ni dengan 10 jam penggilingan (a) area titik (b) analisa 001 (c) analisa 002 .....	37
Gambar 4.10	Perbandingan hasil XRD sample yang telah disinter 500 <sup>0</sup> C selama 2 jam dengan sample yang belum disinter pada penggilingan 10 jam dengan variasi (a) 0,5at.%Ni (b) 2at.%Ni (c) 5at.%Ni .....	39
Gambar 4.11	Ukuran kristal pada paduan serbuk Fe-Al dengan penambahan 0,5 at.%Ni dan 5at.% Ni .....	40



## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Senyawa intermetalik Fe – Al dan karakteristiknya .....	7
Tabel 2.2 Spesifikasi HEM – E3D.....	11
Tabel 2.1 Spesifikasi HEM-E3D.....	8
Tabel 3.1 Variabel komposisi campuran serbuk.....	21



## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1 Analisis EDX sampel Fe-50at.%Al-0,5at.%Ni 0 jam pada titik1	.48
Lampiran 2 Analisis EDX sampel Fe-50at.%Al-0,5at.%Ni 0 jam pada titik 2....	49
Lampiran 3 Analisis EDX sampel Fe-50at.%Al-0,5at.%Ni 10jam pada titik1	50
Lampiran 4 Analisis EDX sampel Fe-50at.%Al-0,5at.%Ni 10jam pada titik2	51
Lampiran 5 Analisis EDX sampel Fe-50at.%Al-2at.%Ni 5jam pada titik 1 ....	52
Lampiran 6 Analisis EDX sampel Fe-50at.%Al-2at.%Ni 5jam pada titik 2 ....	53
Lampiran 7 Analisis EDX sampel Fe-50at.%Al-2at.%Ni 10jam pada titik 1 ..	54
Lampiran 8 Analisis EDX sampel Fe-50at.%Al-2at.%Ni 10 jam pada titik 2 ..	55
Lampiran 9 Analisis EDX sampel Fe-50at.%Al-5at.%Ni 10jam pada titik 2 ..	56
Lampiran 10 Analisis EDX sampel Fe-50at.%Al-5at.%Ni 10jam pada titik 2 ..	57
Lampiran 11 Persamaan linier Al pada sampel Fe-50at.%Al-0,5at.%Ni.....	58
Lampiran 12 Persamaan linier Al pada serbuk Fe-50at.%Al-5at.%Ni.....	60
Lampiran 13 Data PDF .....	62

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Baja sangat mudah kena korosi. Untuk melindungi besi dari serangan korosi maka dilakukan pelapisan dengan unsur lain yang akan membentuk oksida yang stabil, diantaranya dengan pembentukan paduan intermetalik FeAl. Paduan intermetalik Fe-Al memiliki sifat yang menguntungkan seperti kekuatan mekanik yang tinggi, densitas yang rendah dan memiliki ketahanan korosi yang baik dalam lingkungan oksidasi dan sulfidasi [1-4]. Dengan sifat yang menguntungkan itu, diharapkan paduan itu dapat mensubstitusi penggunaan *stainless steel* dan *superalloy* berbasis Ni dalam beberapa kasus [5-12].

Paduan intermetalik Fe-Al dapat dibuat dengan beberapa cara yaitu dengan peleburan [13-17] dan pemaduan mekanik [18-21]. Paduan intermetalik itu juga memiliki kelemahan yaitu cenderung getas pada temperatur kamar dan kekuatannya rendah pada temperatur di atas 600°C. Beberapa pendekatan telah dikembangkan untuk mengurangi kelemahan paduan ini, diantaranya dengan menambahkan unsur ketiga seperti C, Nb, Ti [13-14], Cr [14-16, 22] Zr [17], Mo [23] dan Ni [24-25]

Menurut S. Gedevanishvili dan S. C. Deevi, intermetalik Fe-Al yang paling baik adalah FeAl kemudian Fe<sub>3</sub>Al dan yang terakhir Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> [26]. Oleh karena itu pada penelitian ini diharapkan mendapatkan senyawa intermetalik Fe Al sehingga komposisi yang dipakai adalah Fe-50at.%Al sesuai dengan diagram fasa Fe-Al pada Gambar 2.1. Selain itu juga akan dilakukan penambahan Ni pada serbuk Fe-Al. Pemaduan mekanik pada komposisi Fe-50at%Al dengan penambahan Ni belum banyak diamati oleh para peneliti dan sangat menarik untuk diteliti.



## 1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Mengetahui mekanisme perubahan mikrostruktur yang terjadi selama proses pemaduan mekanik.
- Mengetahui efek penambahan Ni dalam proses pemaduan mekanik terhadap mikrostruktur yang dibentuk dari sistem Fe-Al.
- Mengetahui fasa yang terbentuk pada proses pemaduan mekanik dan setelah di-sinter

## 1.3 Batasan Penelitian

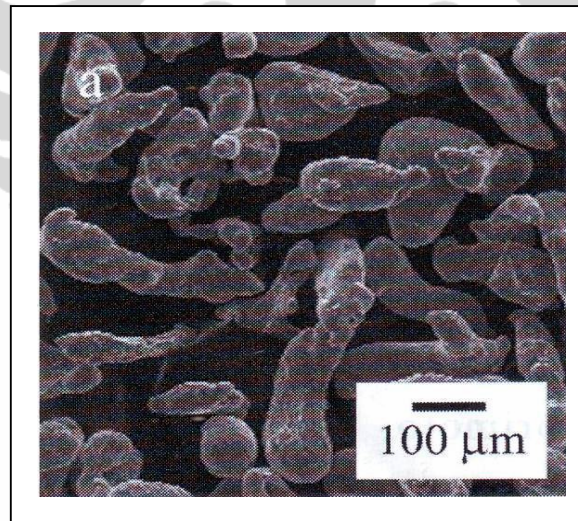
Batasan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Material yang digunakan terdiri dari : serbuk Besi ( kadar Fe > 99% ), serbuk Aluminium ( kadar Al > 90% ) dan serbuk Nikel ( kadar Ni >99,5 % ).
- Proses pemaduan mekanik dilakukan terhadap campuran serbuk Fe-50at.%Al dengan *variabel* komposisi unsur Nikel : 0,5 % Ni, 2% Ni, dan 5% Ni dan *variabel* waktu penggilingan : 0 jam, 15 menit, 30 menit, 1 jam, 2 jam, 5 jam, dan 10 jam.
- Proses karakterisasi sampel dilakukan dengan menggunakan: *X-ray diffraction* ( XRD ), *scanning electron microscopy* ( SEM ), *energy dispersive X-ray* ( EDX ) dan mikroskop.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Aluminium

Sifat Aluminium adalah ringan, tahan korosi, dengan daya hantar listrik dan panas yang sangat baik. Sifat tahan korosi pada aluminium diperoleh karena terbentuknya lapisan oksida aluminium pada permukaan aluminium. Lapisan oksida ini melekat pada permukaan dengan kuat dan rapat serta sangat stabil (tidak bereaksi dengan lingkungannya) sehingga melindungi bagian yang sebelah dalam. Adanya lapisan oksida ini di satu pihak menyebabkan tahan korosi tetapi di pihak lain menyebabkan aluminium menjadi sukar dilas dan disolder (titik leburnya lebih dari  $2000^{\circ}\text{C}$ ). Kekuatan dan kekerasan aluminium memang tidak begitu tinggi, namun dapat diperbaiki dengan pepaduan dan *heat treatment* [27].

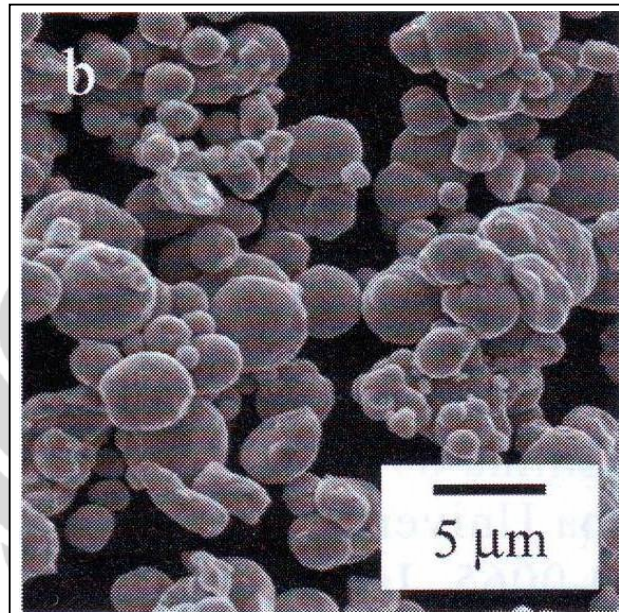


Gambar 2.1 Bubuk Aluminium [28]

### 2.2 Besi

Besi merupakan logam yang paling banyak digunakan manusia untuk berbagai keperluan. Bahan ini telah banyak sumbangannya terhadap perkembangan budaya manusia. Ada beberapa hal yang membuat besi banyak digunakan manusia, antara lain [27]:

1. Jumlahnya yang cukup melimpah , di alam terdapat cukup banyak besi, walaupun tidak sebagai logam murni, sebagai oksida atau sulfide dalam bijih besi .
2. Mempunyai sifat mekanik ( kekuatan, keuletan dll) yang memadai
3. Harganya relatif murah



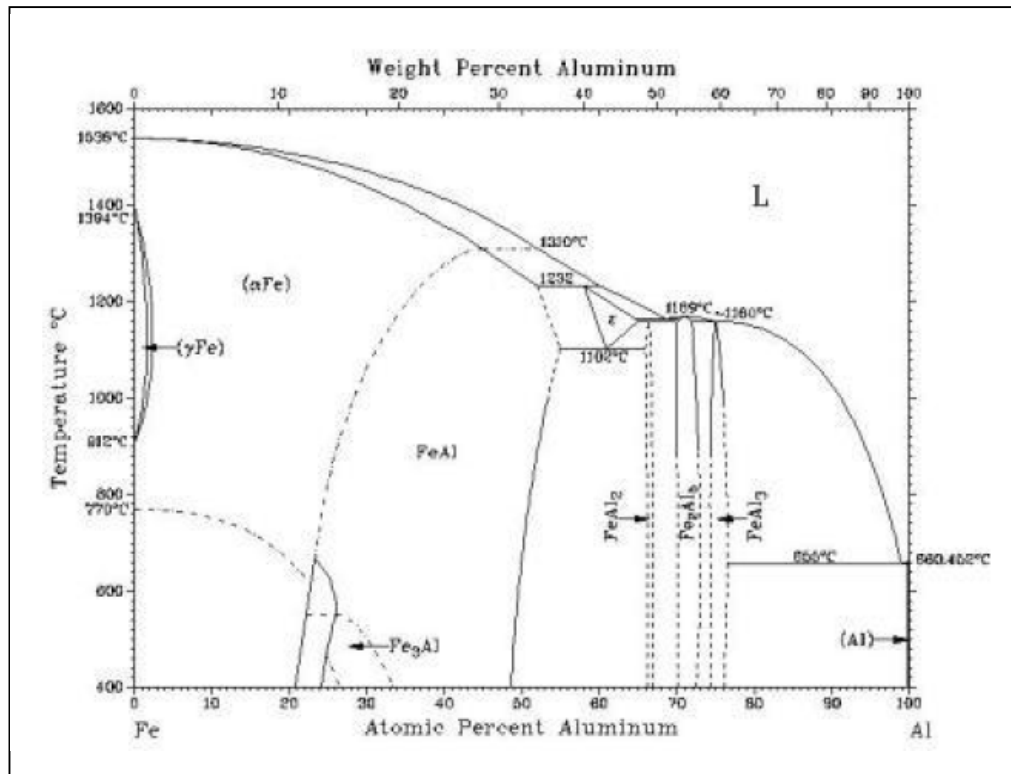
Gambar 2.2 Bubuk Besi [28]

### 2.3 Nikel

Nikel adalah suatu logam berwarna putih perak. Nikel juga dikenal tahan korosi / oksidasi, bahkan tahan pada temperatur tinggi. Dapat membentuk larutan padat yang ulet , kuat , tahan korosi, dengan banyak logam lain. Hampir 60% dari produksi Nikel digunakan sebagai unsur paduan pada baja tahan karat dan baja paduan lain. Penambahan nikel pada baja biasanya dimaksudkan memperbaiki kekuatan (tanpa mengurangi keuletan ), memperbaiki sifat tahan korosi, tahan panas dan menaikkan kekerasan [27].

## 2.4 Intermetalik Fe–Al

Intermetalik Fe–Al adalah suatu senyawa antara logam besi dengan logam aluminium. Intermetalik Fe–Al umumnya memiliki kekuatan, ketahanan mulur, oksidasi dan korosi yang sangat baik pada lingkungan bertemperatur ruang maupun lingkungan bertemperatur tinggi.



Gambar 2.3 Diagram Fasa Fe–Al [29]

Senyawa intermetalik Fe–Al terdiri dari beberapa jenis, yaitu:  $\gamma$ -Fe, FeAl, Fe<sub>3</sub>Al, Fe<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>, FeAl<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> dan FeAl<sub>3</sub>. Senyawa intermetalik Fe–Al yang terbentuk bergantung pada temperatur dan komposisi dari unsur besi dan aluminium. Setiap senyawa intermetalik Fe–Al memiliki karakteristik yang berbeda. Perbedaan karakteristik senyawa–senyawa intermetalik Fe–Al tersebut bergantung pada perbedaan struktur kristal yang dimilikinya.

## **2.5 Pemaduan Mekanik**

Pemaduan mekanik adalah suatu proses penggilingan dimana serbuk mengalami tumbukan–tumbukan oleh bola giling. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi hasil dari pemaduan mekanik yaitu komponen, parameter proses dan mekanisme pemaduan mekaniknya.

### **2.5.1 Komponen Pemaduan Mekanik**

Ada empat komponen yang mempengaruhi hasil dari pemaduan mekanik ini yaitu: bahan baku, bola giling, wadah penggilingan dan alat penggiling bola.

#### **2.5.1.1 Bahan Baku**

Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam pemilihan bahan baku untuk pemaduan mekanik yaitu ukuran dan kemurnian serbuk. Semakin kecil ukuran partikel serbuk yang digunakan, maka proses pemaduan mekanik akan semakin efektif dan efisien. Serbuk yang digunakan juga harus memiliki kemurnian yang sangat tinggi agar paduan yang terbentuk bersifat homogen dan menghindari terbentuknya paduan lain yang tidak diinginkan. Bahan baku yang dapat digunakan dalam proses pemaduan mekanik dapat berupa campuran antara serbuk ulet dan serbuk ulet, serbuk ulet dengan serbuk getas dan serbuk getas dengan serbuk getas [30]

#### **2.5.1.2 Bola giling**

Bola giling dalam proses pemaduan mekanik berfungsi sebagai penghancur dan pemadu campuran serbuk agar terbentuk suatu paduan baru. Hal yang harus diperhatikan dalam pemilihan bola-bola giling adalah sifat kekerasannya. Bahan pembentuk bola giling harus memiliki kekerasan yang sangat tinggi supaya tidak terjadi kontaminasi selama proses pemaduan mekanik. Material yang dapat digunakan dalam proses tersebut adalah baja tahan karat, baja karbon, baja perkakas dan baja kromium [ 30].

Pemilihan ukuran bola tergantung pada ukuran serbuk yang akan digunakan. Diameter bola yang digunakan harus lebih besar daripada diameter serbuknya [30]. Proses pemaduan mekanik suatu serbuk akan berlangsung lebih

**Universitas Indonesia**

efisien jika menggunakan bola berukuran kecil dibandingkan bola berukuran besar [31]. Dan akan semakin maksimal jika menggunakan bola yang berukuran besar dan kecil [30].

### 2.5.1.3 Wadah Penggilingan

Proses penghancuran serbuk tidak akan efektif dan efisien jika material yang digunakan sebagai wadah penggilingan sama dengan material serbuk yang akan digiling. Hal itu disebabkan kedua material tersebut memiliki kekerasan yang sama. Sedangkan jika kedua material yang digunakan tersebut berbeda, maka akan terjadi kontaminasi pada material serbuk yang akan di-*milling* [30]. Material yang digunakan sebagai wadah penggilingan harus memiliki kekerasan yang lebih tinggi daripada kekerasan material serbuknya agar selama proses *milling* tidak terjadi kontaminasi. Material yang dapat digunakan sebagai wadah penggilingan antara lain: baja perkakas, baja kromium dan baja tahan karat [30].

Perbedaan jenis material yang digunakan antara wadah penggilingan dan bola penggiling bisa juga menjadi penyebab terjadinya kontaminasi pada serbuk. Agar hal itu tidak terjadi, maka material antara wadah penggilingan dan bola giling yang digunakan terbuat dari jenis material yang [30]. Jika menggunakan jenis material yang berbeda maka harus diperhatikan kekerasannya. Sebaiknya kekerasan kedua material tersebut tidak jauh berbeda.



Gambar 2.4 Bola giling dan wadah penggilingan [30]

#### 2.5.1.4 Alat Penggiling Bola

Dalam proses pemaduan mekanik, ada beberapa jenis alat penggiling bola yang dapat digunakan seperti: *planetary ball mill*, *conventional horizontal ball mill*, *horizontal ball mill controlled by magnetic force*, *attritor mill* dan *shaker ball mill* [32]. Alat-alat penggiling bola tersebut terus dikembangkan untuk meningkatkan keefektifan dan efisiensinya dalam proses pemaduan mekanik. Salah satu jenis *shaker ball mill* yang merupakan generasi termutakhir alat penggiling bola yang dapat melakukan proses pemaduan mekanik dengan tingkat efektifitas dan efisiensi yang tinggi adalah HEM-E3D

##### 2.5.1.4.1 HEM – E3D

HEM-E3D adalah singkatan dari *High Energy Mill – Ellips 3 Dimensions*. *HEM-E3D* merupakan alat penggiling bola yang digunakan untuk melakukan proses pemaduan mekanik berskala kecil dalam laboratorium. Spesifikasi HEM-E3D tampak pada tabel berikut ini.

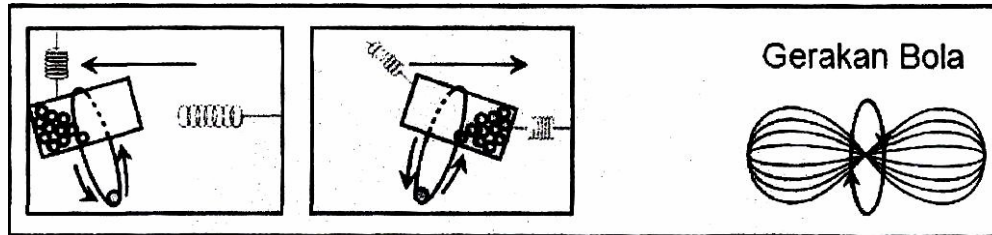
Tabel 2.1 Spesifikasi HEM – E3D [33]

Spesifikasi	Nilai
Dimensi	70 cm x 60 cm x 40 cm
Berat	63 kg ( tanpa wadah penggilingan )
Sumber daya	380 volt
Daya Motor	0,5 PK
Kecepatan Motor	0 rpm – 500 rpm

##### 2.5.1.4.2 Prinsip Kerja HEM–E3D

Dalam proses pemaduan mekanik, HEM-E3D bekerja dengan cara menghancurkan campuran serbuk melalui mekanisme pembenturan bola-bola giling yang bergerak mengikuti pola gerakan wadahnya yang berbentuk elips tiga dimensi. Terbentuknya partikel-partikel serbuk berskala nanometer disebabkan pola gerakan elips tiga dimensi dimana frekuensi tumbukan menjadi tinggi.

Dalam hal ini, wadah juga ikut berputar hingga 500 rpm. Prinsip kerja HEM-E3D terlihat pada gambar berikut ini.



Gambar 2.5 Prinsip kerja HEM-E3D [33]

### 2.5.2 Parameter Proses Pemaduan Mekanik

Proses pemaduan mekanik selain dipengaruhi oleh komponen namun juga dipengaruhi oleh faktor parameter proses seperti kecepatan dan waktu penggilingan, perbandingan berat bola terhadap berat serbuk, volume pengisian wadah penggilingan, atmosfer penggilingan, *process control agent* dan temperatur penggilingan.

#### 2.5.2.1 Kecepatan dan waktu milling

Jika kecepatan *milling* semakin cepat, maka semakin cepat pula proses penghancuran campuran serbuk. Kecepatan *milling* yang meningkat menyebabkan temperatur juga meningkat. Kenaikan temperatur mampu mempercepat proses difusi sehingga terjadi pemaduan mekanik. Namun kenaikan temperatur dapat menyebabkan terjadinya kontaminasi pada campuran serbuk [30].

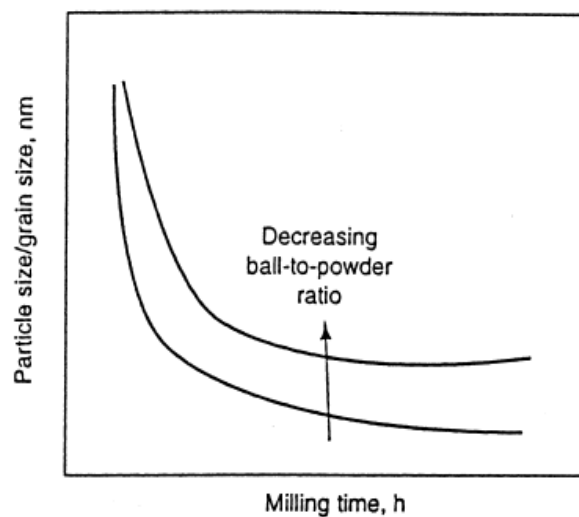
Waktu yang diperlukan dalam pemaduan mekanik bergantung pada jenis alat penggilingan bola, intensitas penggilingan, perbandingan antara berat bola terhadap berat serbuk dan temperatur penggilingan. Namun, kontaminasi bisa terjadi ketika waktu *milling* terlalu lama [30].

#### 2.5.2.2 Perbandingan berat bola terhadap berat serbuk

Jumlah perbandingan antara berat bola dengan berat serbuk pada skala laboratorium adalah 10:1. Sedangkan untuk skala industri, perbandingan yang digunakan bisa mencapai 100:1. Semakin tinggi perbandingan berat bola terhadap



berat serbuk yang digunakan menyebabkan ukuran partikel / butir makin mengecil sehingga waktu yang dibutuhkan dalam pemaduan mekanik menjadi singkat. Hal itu disebabkan karena frekuensi benturan yang semakin tinggi. Namun, tingginya frekuensi benturan tersebut akan meningkatkan temperatur komponen-komponen pemaduan mekanik sehingga paduan yang terbentuk tidak sesuai dengan campuran serbuk yang digunakan akibat terjadinya kontaminasi. Selain itu, efek dari meningkatnya temperatur adalah fasa amorf yang terbentuk dari proses pemaduan mekanik dapat membentuk kristal kembali. [30].



Gambar 2.6 Hubungan antara ukuran partikel dengan waktu milling untuk dua harga perbandingan berat bola giling terhadap berat serbuk yang berbeda [30]

### 2.5.2.3 Volume Pengisian Wadah Penggilingan

Proses pemaduan mekanik dapat berlangsung dengan efektif dan efisien, jika jumlah maksimal bola-bola giling dan serbuk yang dimasukkan kedalam wadah penggilingan tidak melebihi 50% volume wadahnya. Proses pemaduan mekanik berlangsung lebih cepat jika volumenya kurang dari 50%, tetapi jumlah campuran serbuk yang dimasukkan ke dalam wadah penggilingan sangat sedikit sehingga hanya cocok untuk proses pemaduan mekanik skala kecil atau

laboratorium. Proses pemaduan mekanik berlangsung lebih lama jika volume nya lebih dari 50 %. Hal itu disebabkan karena terbatasnya ruang gerak bola-bola giling sehingga energi impaknya terhadap campuran serbuk tidak maksimal [30].

#### **2.5.2.4 Atmosfer Penggilingan**

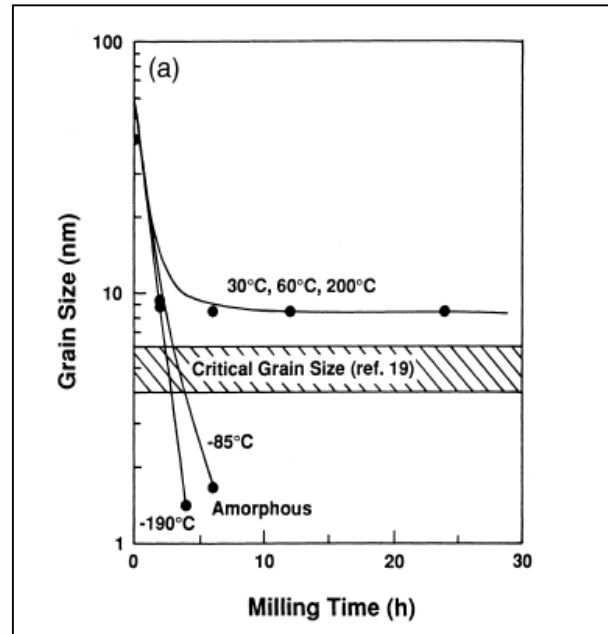
Atmosfer di dalam wadah penggilingan dibuat *inert* dengan mengisinya dengan gas *inert* seperti gas Nitrogen atau gas Argon agar campuran serbuk tidak bereaksi dengan lingkungan sekitarnya. Namun, gas *inert* tersebut juga dapat bertindak sebagai kontaminan terhadap campuran serbuk [30]. Karena jumlahnya sangat sedikit dan tidak terjadi reaksi dengan campuran serbuk, maka hal ini masih dapat ditoleransi.

#### **2.5.2.5 Process Control Agent**

Laju pengelasan dingin yang lebih tinggi dibandingkan laju penghancuran campuran serbuk menyebabkan terjadinya agglomerasi antarpartikel campuran serbuk sehingga membentuk suatu partikel yang berukuran lebih besar dari ukuran partikel serbuk sebelumnya [30]. Untuk mengatasi hal ini, maka ditambahkan *process control agent* dalam jumlah yang sedikit kedalam wadah penggilingan. Dengan adanya *process control agent*, maka partikel-partikel campuran serbuk tersebut akan terselubungi sehingga tidak terjadi proses agglomerasi akibat proses pengelasan dingin. Zat yang dapat bertindak sebagai *process control agent* antara lain: benzene, ethanol, methanol, grafit, natrium klorida, paraffin dan lain-lain [30].

#### **2.5.2.6 Temperatur Penggilingan**

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa temperatur penggilingan akan mempengaruhi waktu penggilingan yang diperlukan pada proses pemaduan dan ukuran dari partikel campuran serbuk yang terbentuk. Semakin rendah temperatur penggilingan, maka waktu pemaduan semakin singkat dan ukuran partikelnya semakin kecil [30].



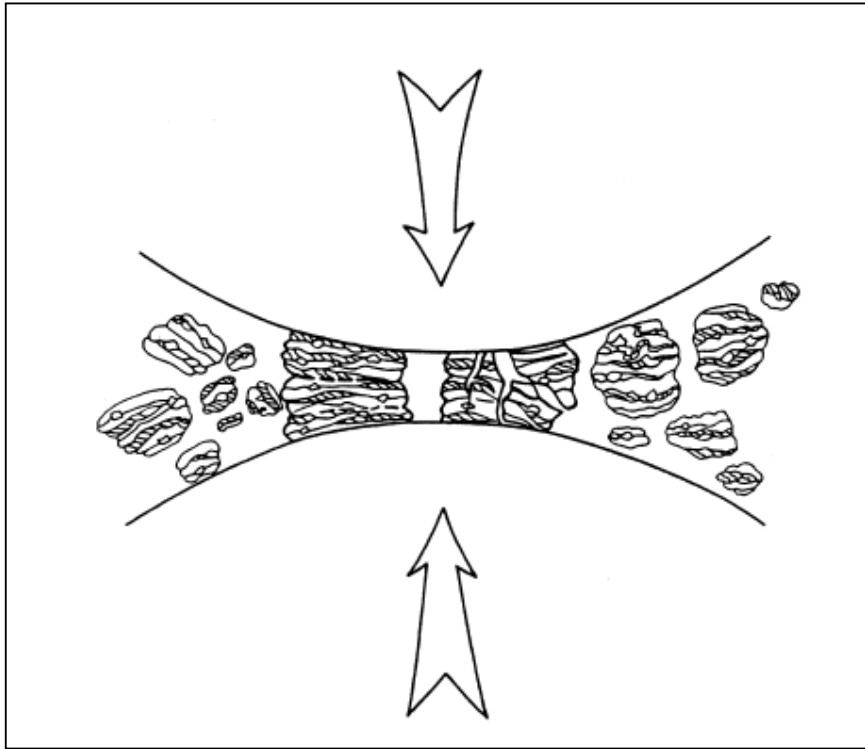
Gambar 2.7 Hubungan antara temperatur penggilingan terhadap waktu pemaduan dan ukuran partikel [30]

### 2.5.3 Mekanisme Pemaduan Mekanik

Mekanisme pemaduan mekanik adalah pengelasan dingin (*cold welding*), pematahan (*fracturing*) dan pengelasan kembali (*rewelding*) [34, 35].

#### a. Tahapan awal

Akibat benturan dari bola giling menyebabkan partikel serbuk mengalami gaya tekan. Karena gaya tekan yang tinggi maka luas permukaan dari partikel serbuk menjadi besar. Partikel serbuk yang ulet akan lebih mudah terdeformasi plastik menjadi lapisan *flake* yang tipis. Jika menggunakan partikel getas-ulet maka deformasi akan lebih kecil, hal itu disebabkan partikel ulet akan mengikat partikel getas.



Gambar 2.8 Mekanisme tumbukan serbuk-bola [35]

b. Tahapan Pertengahan

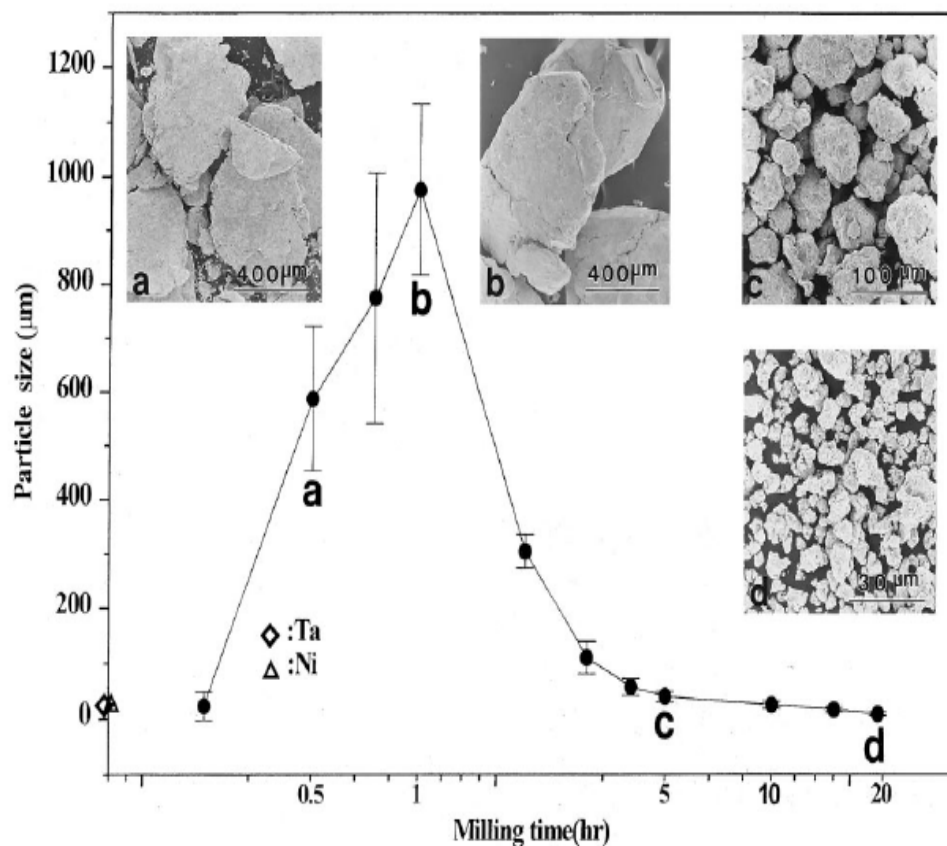
Proses pengelasan dingin lebih dominan terjadi daripada proses penghancuran. Proses penghancuran dan pengelasan dingin yang terjadi pada tahapan ini menghasilkan *lamellar* yang terorientasi secara acak. Deformasi plastik yang besar akan menghasilkan struktur yang berlapis. Struktur yang berlapis ini lebih diperhalus. Ketebalan dari *lamellar* menjadi berkurang. Komposisi kimia pada tahapan ini masih belum homogen.

c. Tahapan akhir

Proses penghalusan ukuran partikel menjadi tahap terakhir dari pemaduan mekanik. Pada tahap ini akan terbentuk paduan mekanik. Terjadinya kesetimbangan antara proses penghancuran dan pengelasan dingin menyebabkan

**Universitas Indonesia**

partikel menjadi homogen. Partikel menjadi lebih kecil karena penghancuran dan sebaliknya partikel akan beragglomerasi karena pengelasan dingin. Partikel yang beragglomerasi akibat pengelasan dingin akan memerlukan energi penghancuran yang lebih besar untuk memecahkan partikel tersebut. Sedangkan jika partikel sudah menjadi halus maka dibutuhkan energi yang lebih besar dalam mengikat partikel tersebut selama proses pengelasan dingin.. Proses pengelasan dingin dan penghancuran akan menghasilkan kondisi yang setimbang. Jika sudah tercapai kesetimbangan maka ukuran partikel akan menjadi semakin halus dan menghasilkan kesetimbangan antara kekuatan dari gaya yang terjadi pada pengelasan dingin dan gaya untuk memecahkan partikel serbuk. Serbuknya telah bercampur secara homogen.



Gambar 2.9 Perubahan ukuran serbuk terhadap waktu *milling* [35]

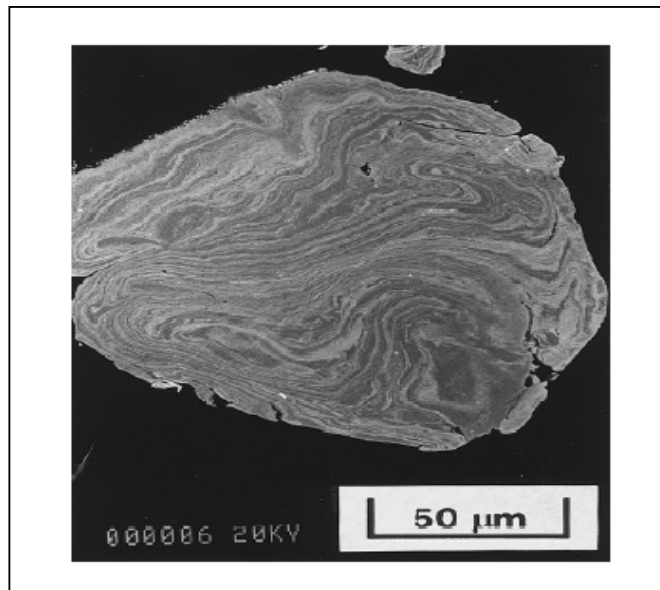
## 2.5.4 Karakteristik Serbuk Hasil Proses Pemaduan Mekanik

Karakteristik serbuk pada proses pemaduan mekanik bergantung pada sifat mekanik material campuran serbuknya, yang dapat berupa : campuran antara serbuk ulet dengan serbuk ulet, serbuk ulet dengan serbuk getas dan serbuk getas dengan serbuk getas [30]. Perbedaan sifat mekanik material campuran serbuk tersebut juga menentukan jenis mekanisme pemaduannya. Berikut ini adalah mekanisme pemaduan masing-masing campuran serbuk tersebut beserta hasil pemaduannya.

### 2.5.4.1 Campuran Antara Serbuk Ulet Dengan Serbuk Ulet

Campuran antara serbuk ulet dengan serbuk ulet adalah kombinasi ideal untuk proses pemaduan mekanik. Agar proses pemaduan mekanik dapat terjadi , minimal 15 % serbuk ulet dalam campuran serbuk. Hal ini disebabkan proses pengelasan dingin sulit terjadi pada serbuk getas [ 26 ] .

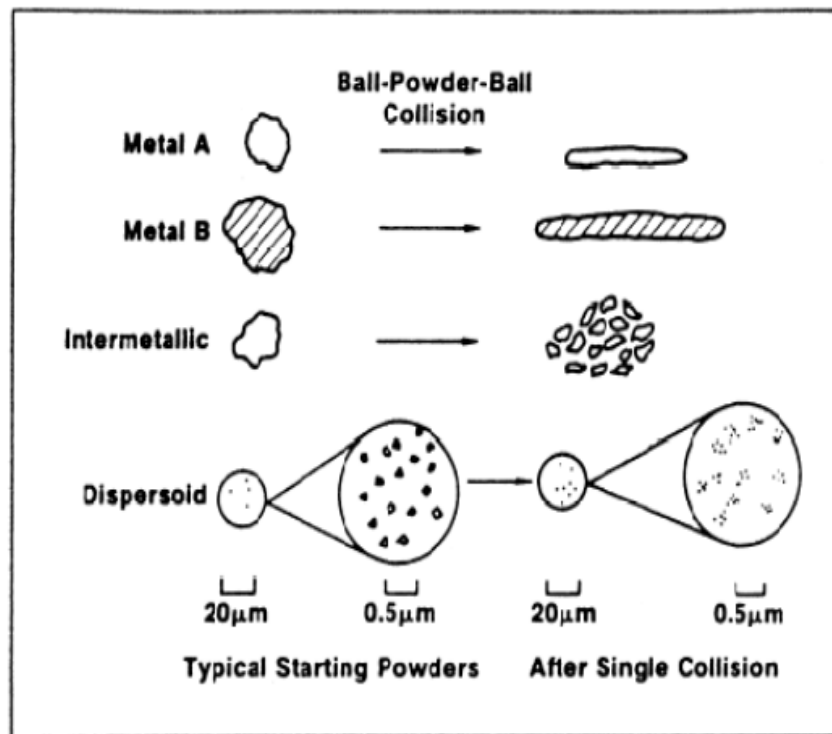
Tahap awal proses pemaduan mekanik, partikel serbuk ulet akan mengalami proses pemipihan akibat proses tempa berskala mikro oleh tumbukan bola-bola giling. Selanjutnya, partikel-partikel pipih tersebut akan saling bergabung membentuk suatu struktur *lamellar* dengan ukuran partikel yang lebih besar dari partikel-partikel pipih sebelumnya akibat proses pengelasan dingin yang dilakukan oleh bola-bola giling. Seiring dengan tumbukan-tumbukan bola-bola giling yang terus menimpa partikel-partikel berstruktur *lamellar* tersebut, maka akan terjadi proses pengerasan regangan sehingga partikel-partikel berstruktur *lamellar* akan menjadi getas dan akhirnya hancur. Proses ini berlangsung terus-menerus hingga tercapai kesetimbangan antara laju pengelasan dingin dengan laju penghancuran sehingga proses pemaduan mekanik dapat terjadi [26].



Gambar 2.10 Morfologi hasil penggilingan material ulet-ulet [30]

#### **2.5.4.2 Campuran Antara Serbuk Ulet Dengan Serbuk Getas**

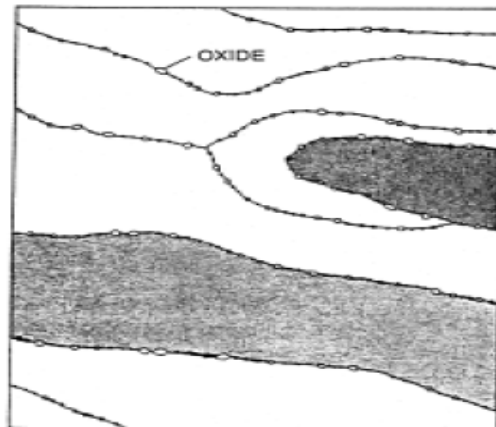
Pada tahap awal proses pemaduan mekanik campuran antara serbuk ulet dengan serbuk getas, partikel-partikel serbuk ulet akan mengalami proses pemipihan, sedangkan partikel-partikel serbuk getas akan hancur akibat tumbukan bola-bola giling [26].



Gambar 2.11 Mekanisme penghancuran partikel antara serbuk ulet dengan serbuk getas [30]

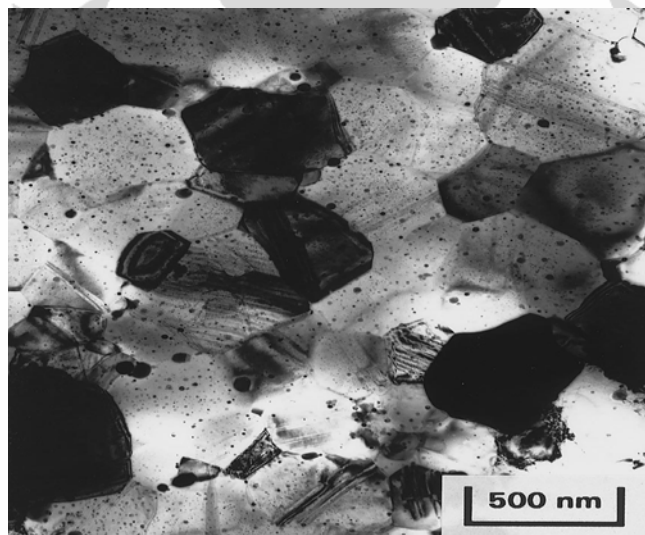
Kemudian, partikel-partikel serbuk getas yang berukuran lebih kecil akan terperangkap di antara partikel-partikel pipih serbuk ulet saat terjadi proses pengelasan dingin sehingga terperangkap di dalam partikel-partikel berstruktur *lamellar* di antara lapisan-lapisan *lamellar*-nya. Seiring dengan tumbukan-tumbukan bola-bola giling yang terus menimpa partikel-partikel berstruktur *lamellar* tersebut, maka akan terjadi proses pengerasan regangan sehingga partikel-partikel berstruktur *lamellar* akan menjadi getas dan akhirnya hancur. Proses ini berlangsung terus-menerus hingga tercapai kesetimbangan antara laju pengelasan dingin dengan laju penghancuran sehingga proses pemaduan mekanik dapat terjadi [26].





Gambar 2.12 Partikel berstruktur *lamellar* hasil pengelasan dingin antara serbuk ulet dengan serbuk getas [30]

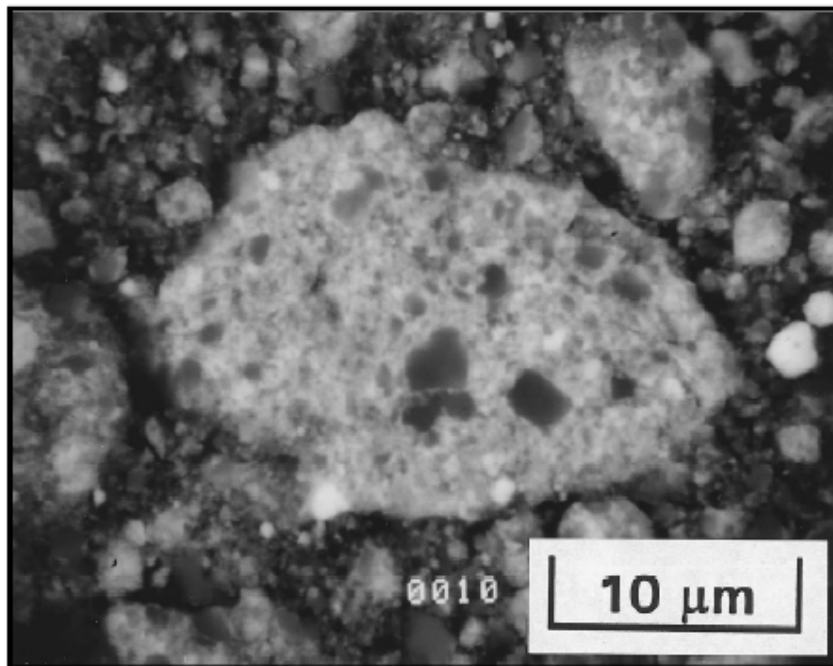
Proses pepaduan mekanik dapat terjadi jika partikel-partikel serbuk getas tersebut larut dalam matriks partikel-partikel serbuk ulet. Partikel-partikel serbuk getas hanya tersebar secara merata di dalam matriks partikel-partikel serbuk ulet jika partikel-partikel serbuk getas tersebut tidak larut dalam matriks partikel-partikel serbuk ulet [30].



Gambar 2.13 Partikel – partikel serbuk getas yang tidak larut di dalam matriks partikel – partikel serbuk ulet [ 30 ]

### 2.5.4.3 Campuran Antara serbuk Getas Dengan Serbuk Getas

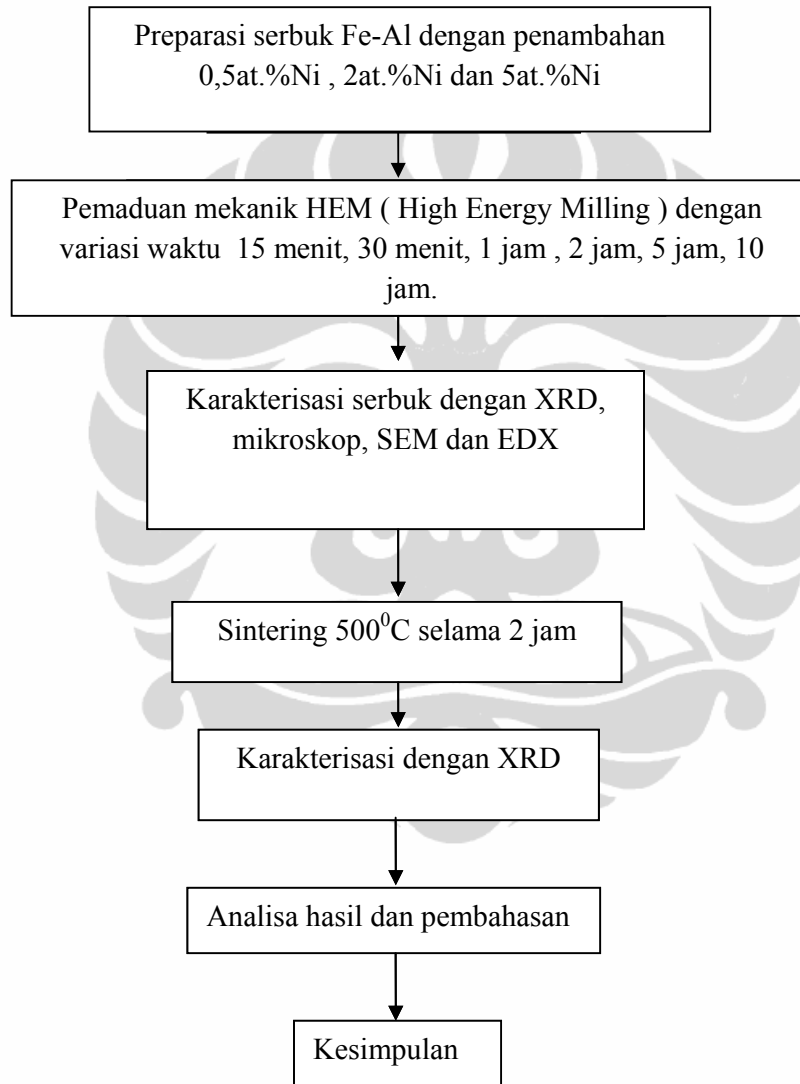
Pemaduan mekanik campuran serbuk getas dan getas mengalami hal yang berbeda dengan proses ulet-ulet dan ulet-getas. Pada tahap awal proses pemaduan mekanik antara campuran serbuk getas dengan serbuk getas, seluruh partikel dari kedua campuran tersebut akan segera mengalami penghancuran oleh tumbukan bola-bola giling tanpa adanya proses pengelasan dingin terlebih dahulu. Ketika partikel berada dalam ukuran yang sangat kecil, partikel-partikel serbuk getas yang memiliki kekerasan lebih tinggi akan kembali mengalami proses penghancuran. Sedangkan partikel-partikel serbuk getas yang memiliki kekerasan lebih rendah akan bertindak sebagai *substrate* tempat melekatnya partikel-partikel serbuk getas yang memiliki kekerasan lebih tinggi. Namun, proses pemaduan mekanik pada campuran serbuk getas dengan serbuk getas ini sangat sulit terjadi tanpa adanya pemicu terjadinya proses difusi, salah satunya adalah temperatur yang tinggi [30].



Gambar 2.14 Pemaduan mekanik pada campuran serbuk getas dengan serbuk getas [30]

### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

### 3.2 Variabel Penelitian

Variabel penelitian yang akan diteliti adalah komposisi unsur Ni dalam campuran serbuk Fe – 50at.%Al dan waktu penggilingan campuran serbuk tersebut. Komposisi campuran serbuk yang akan diteliti adalah : Fe-50at%Al-0,5at.%Ni, Fe-50at%Al-2at.%Ni dan Fe-50at%Al-5at.%Ni. Sedangkan waktu penggilingan serbuk yang akan diteliti adalah : 0 jam, 15 menit, 30 jam, 1 jam, 2 jam, 5 jam, 10 jam. Perbandingan bola giling terhadap serbuk adalah 10:1.

Tabel 3.1 Variabel komposisi campuran serbuk

Unsur	Persen atom ( at.% )		
	Komposisi 1	Komposisi 2	Komposisi 3
Fe	49,5	48	45
Al	50	50	50
Ni	0.5	2	5

### 3.3 Bahan

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah Al dengan kemurnian di atas 90% dan serbuk Fe dengan kemurnian lebih dari 99% diperoleh dari Merck Co. Ltd. Sedangkan serbuk Nikel dengan kemurnian nya 99,5% .

### 3.4 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah

#### 1. *High Energy Milling* HEM-E3D

Suatu alat *high energy milling* yang mempunyai 1 bejana penggiling digerakkan dengan motor secara tiga dimensi. HEM-E3D ini merupakan instrumen hasil kreasi Pusat Penelitian Fisika LIPI.



Gambar 3.2 *High Energy Milling* HEM E3D

2. *Scanning Electron Microscopy* (SEM) - *Energy Dispersive X – Ray* (EDX )

Analisa SEM dilakukan untuk mengetahui morfologi, permukaan dan struktur mikro serbuk Fe-Al . Dalam penelitian ini digunakan SEM JSM – 6510LA, EDS ES-54185JMU yang terdapat di PTBIN BATAN Serpong.

3. *X-Ray Diffraction* (XRD)

Alat XRD yang digunakan pada penelitian ini adalah alat XRD tipe Philip PW7010 yang berada di PTBIN BATAN.

4. Pembersih Ultrasonik (Branson)

Alat pembersih ultrasonik Branson digunakan untuk membersihkan bola dan bejana giling dari kotoran sebelum dilakukan penggilingan.



Gambar 3.3 Alat pembersih ultrasonik Branson

## 5. Mikroskop

Mikroskop yang digunakan adalah microscope Digital Indo Cerdas Pt. Sahabat Ilmu.

## 6. Tungku Pemanas

Tungku pemanas yang digunakan pada penelitian ini berada di P2 Fisika Serpong. Tungku pemanas digunakan untuk melakukan proses sintering pada pelet hasil MA. Tungku pemanas ini dapat diprogram untuk melakukan pemanasan hingga suhu  $800^{\circ}\text{C}$  dengan pilihan fungsi penahanan pemanasan untuk mempertahankan pemanasan pada suhu tertentu tertentu dengan waktu yang diinginkan. Pada penelitian ini digunakan suhu pemanasan  $500^{\circ}\text{C}$  dengan waktu penahanan selama 2 jam.

### 3.5. Prosedur Penelitian

*Milling* dilakukan dengan menggunakan *high energy mill* HEM E3D yang dibuat oleh Pusat Penelitian Fisika-LIPI. *Milling* dilakukan dalam suasana gas Argon untuk mencegah terjadinya oksidasi. Bejana yang digunakan berukuran 100 ml yang terbuat dari bahan baja *chromium*. Bola penggiling yang digunakan terbuat dari baja chrome, dengan besar 10 mm dan 4 mm. Perbandingan bola dan serbuk (*ball powder ratio*) 10:1. Putaran diatur pada kecepatan 1476 RPM.

Pengambilan sampel dilakukan pada interval waktu 0 jam 15 menit, 30 menit, 1 jam, 2 jam, 5 jam dan 10 jam selama proses pemaduan mekanik. Pengambilan sampel dilakukan di dalam plastik besar dalam suasana Argon untuk mencegah terjadinya oksidasi.

Karakterisasi sampel yang dilakukan adalah pengujian SEM-EDS dan XRD. Pengujian SEM dilakukan untuk melihat morfologi serbuk hasil pemaduan mekanik. Pengujian XRD bertujuan untuk mengetahui fasa apa saja yang telah terbentuk pada saat pemaduan mekanik. Sampel Estimasi ukuran kristalit dapat dilakukan dengan menggunakan profile puncak XRD yang teramati. Pelebaran pada puncak XRD dapat dikarenakan oleh tiga hal yaitu instrument, ukuran

Universitas Indonesia

kristalit dan regangan mikro. Pelebaran karena ukuran kristalit dan pelebaran karena regangan mikro dapat dihitung dengan persamaan Scherer seperti terlihat pada persamaan 3.1 dan persamaan 3.2 [36].

$$B = \frac{0,94 \times \lambda}{D \cos \theta} \dots\dots\dots 3.1$$

$$B = 4\varepsilon \tan \theta \dots\dots\dots 3.2$$

dimana B merupakan Full Width at Half Maximum (rad),  $\lambda$  merupakan panjang gelombang radiasi sinar x (nm), D merupakan ukuran kristalit (nm),  $\varepsilon$  merupakan regangan mikro dan  $\theta$  merupakan sudut puncak yang diamati.

Dengan menggunakan metode Willian-Hall, dua persamaan di atas dapat digabungkan setelah dikurangi pelebaran karena instrument. Persamaan tersebut dapat dilihat pada persamaan 3.3.

$$B \cos \theta = \frac{0,94 \times \lambda}{D} + 4\varepsilon \sin \theta \dots\dots\dots 3.3$$

Dengan memandang persamaan 3.3. sebagai persamaan garis lurus maka B  $\cos \theta$  adalah sumbu y dan  $\sin \theta$  adalah sumbu x. Sehingga gradient dari persamaan tersebut adalah regangan mikro dan perpotongan dengan sumbu y adalah ukuran kristalit.

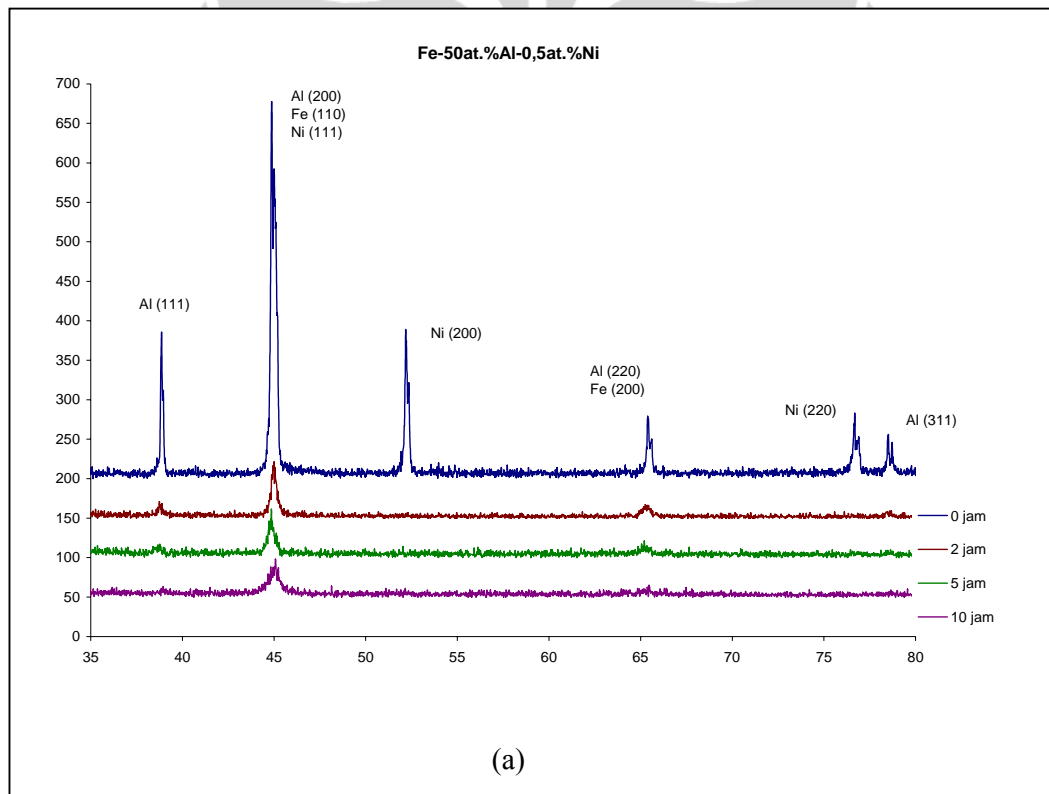
## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

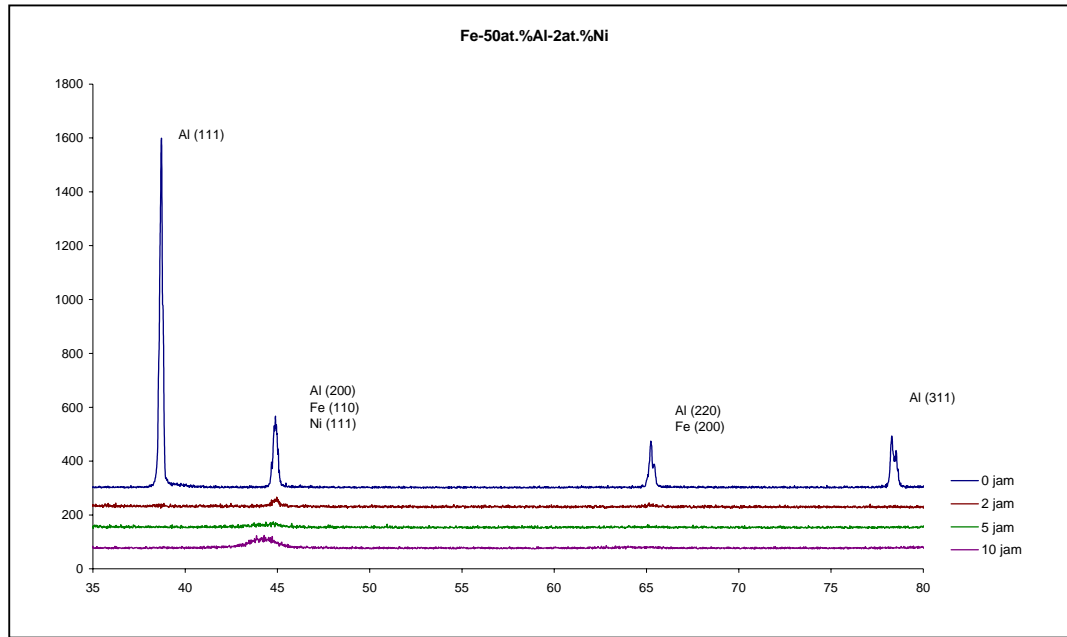
Serbuk hasil pepaduan mekanik dikarakterisasi dengan menggunakan XRD, SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan EDX serta mikroskop.

#### 4.1 Analisa Hasil XRD

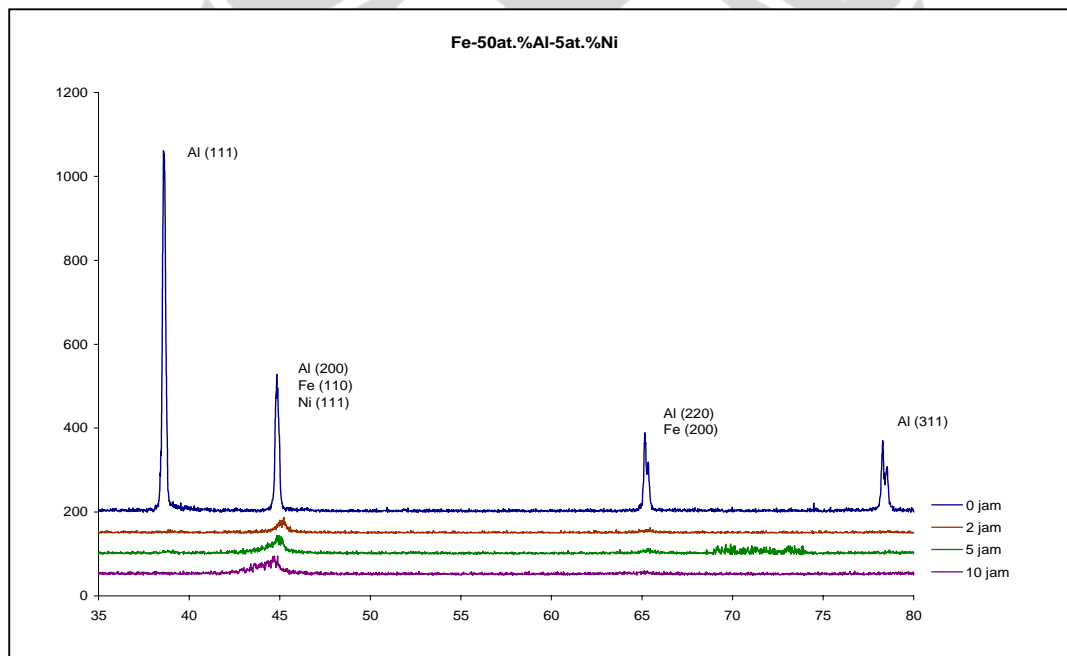
Bentuk grafik hasil XRD pada serbuk Fe-50at.%Al-0,5at.%Ni dapat dilihat pada gambar 4.1 dibawah ini.







(b)



(c)

Gambar 4.1 Hasil XRD serbuk Fe-50at.%Al dengan penambahan (a) 0,5at.%Ni  
(b) 2at.%Ni (c) 5at.%Ni

Gambar 4.1 (a) terlihat puncak–puncaknya mengalami penurunan intensitas dan pelebaran seiring bertambahnya waktu *milling*. Penurunan intensitas dan pelebaran menunjukkan ukuran kristal makin mengecil. Ketika Waktu *milling* 2 jam dan 5 jam intensitasnya makin menurun disertai dengan pelebaran. Dan ketika waktu *milling* ditambah menjadi 10 jam, yang terlihat hanya satu puncak yaitu pada sudut  $45,0613^{\circ}$  sedangkan puncak–puncak yang lain sudah tidak terlihat lagi.

Gambar 4.1 (a) puncak–puncak hasil pengukuran XRD juga mengalami pergeseran sudut. Pergeseran disebabkan karena telah terjadi peregangan sehingga jarak antar bidang kristal suatu material berubah. Pada 2 dan 5 jam *milling* puncak–puncaknya mengalami pergeseran kekiri. Seperti yang dilaporkan oleh Hongwei Shi et al, pergeseran puncak kekiri menunjukkan bahwa menuju ke arah pembentukan fasa baru [5]. Sementara pada penambahan waktu *milling* menjadi 10 jam, puncak pada sudut  $45,0613^{\circ}$  mengalami pergeseran kekanan.

Gambar 4.1 (b) menunjukkan bahwa ketika penambahan waktu *milling*nya menjadi 2 jam dan 5 jam ( pada penambahan 2 at.%Ni ), intensitas puncak–puncaknya makin mengecil. Namun ketika waktu *milling* ditambah lagi menjadi 10 jam ternyata intensitasnya membesar dan melebar. Hal itu disebabkan karena pengaruh regangan.

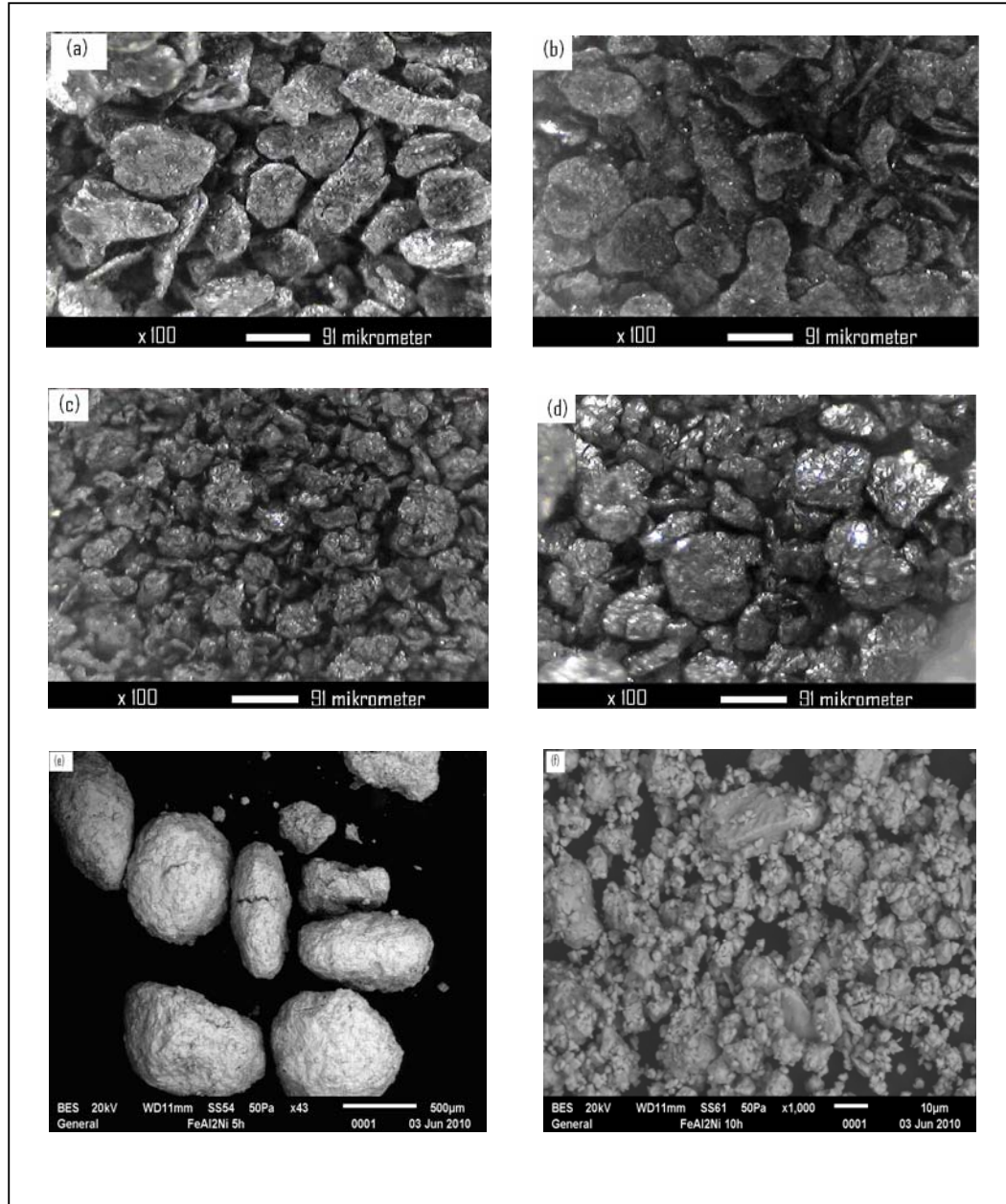
Gambar 4.1 (c) dengan waktu *milling* 2 jam, intensitas puncaknya mengalami penurunan dan melebar. Ketika waktu *milling* ditambah menjadi 5 jam, puncak dengan sudut  $45,2736^{\circ}$  mengalami pelebaran. Ketika ditambah lagi waktu *milling* menjadi 10 jam, puncak tersebut juga semakin melebar. Hal ini menunjukkan ukuran kristalnya makin mengecil seiring bertambahnya waktu *milling*.

Ketika puncak-puncak hasil pengukuran XRD diatas dicocokkan dengan data PDF ternyata belum menunjukkan terbentuknya fasa baru. Hal ini terjadi pada paduan serbuk Fe-Al dengan penambahan 0,5at.%Ni, 2at.%Ni dan 5at.%Ni selama di-*milling* 10 jam. Namun untuk memastikan kesimpulan diatas maka paduan serbuk Fe-Al tersebut di-*sinter* selama 2 jam pada suhu  $500^{\circ}\text{C}$ .

**Universitas Indonesia**

## 4.2 Analisa Hasil SEM

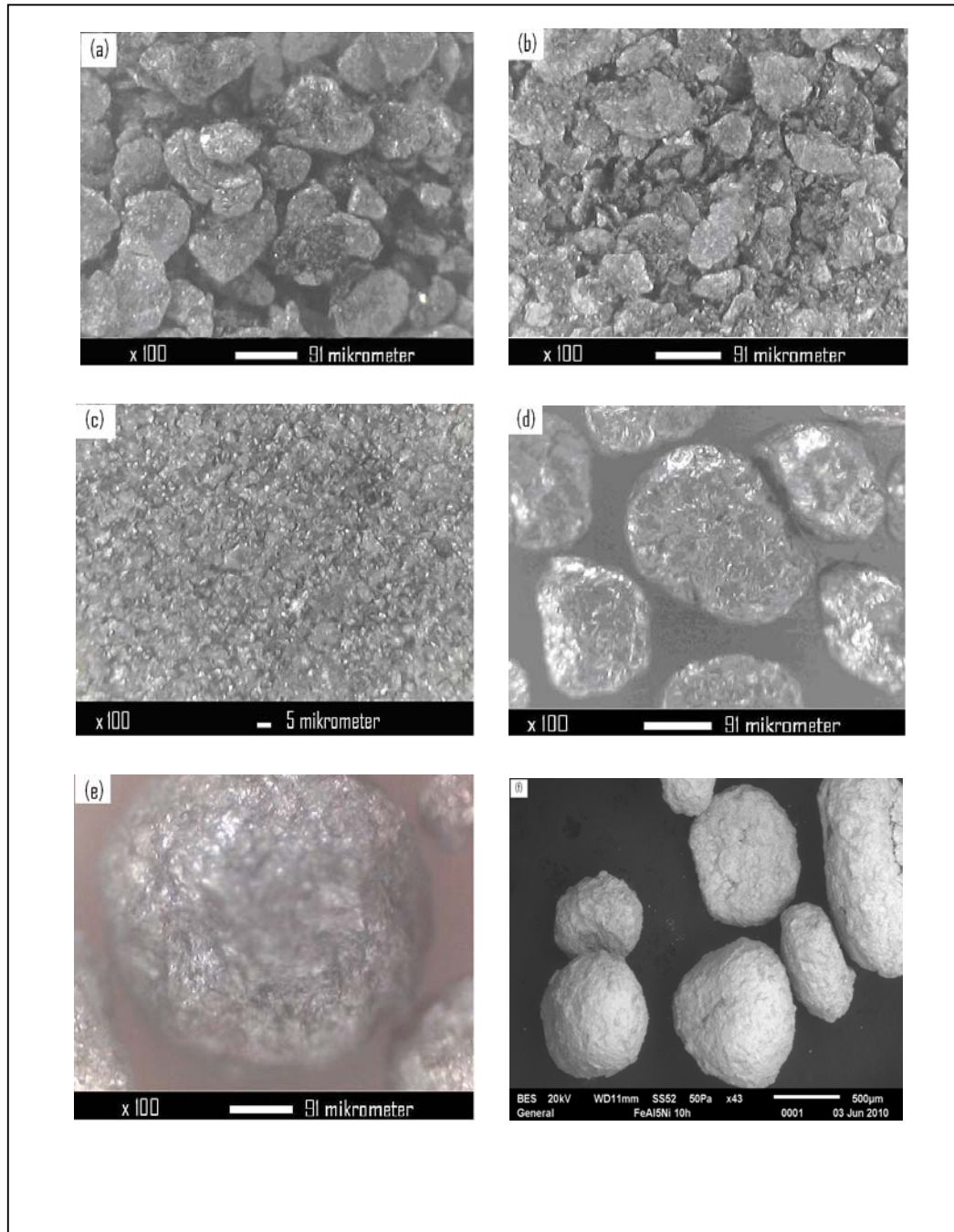
Gambar 4.2 dibawah ini menunjukkan hasil SEM pada paduan serbuk Fe-Al dengan penambahan 2at.%Ni sebelum di-*sinter*.



Gambar 4.2 Perubahan morfologi partikel Fe-50at.%Al-2at.%Ni dengan waktu *milling* (a) 15 menit (b) 30 menit (c) 1 jam (d) 2 jam (e) 5 jam (f) 10 jam

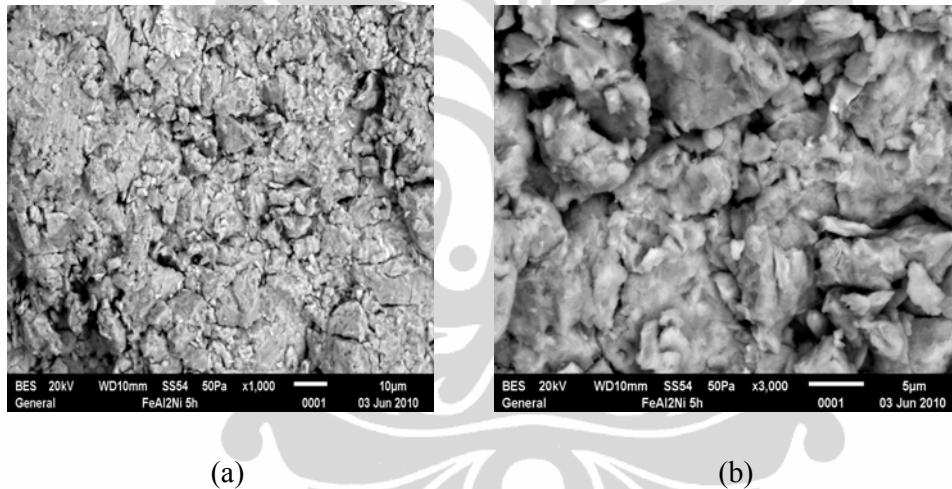
Gambar 4.2 memperlihatkan perubahan morfologi serbuk Fe–Al dengan penambahan 2% atom Nikel. Pada 15 menit waktu *milling* ( lihat gambar 4.2(a)), partikel serbuk mengalami pemipihan. Hal itu disebabkan tumbukan yang berulang oleh bola–bola giling. Pada 30 menit waktu *milling* ( lihat gambar 4.2 (b)) , struktur partikel serbuknya masih memipih. Namun pada waktu *milling* 1 jam partikel serbuknya sudah mengalami penghancuran . Hal ini disebabkan karena tumbukan bola–bola giling yang berulang menyebabkan peregangan makin membesar. Membesarnya peregangan menyebabkan partikel serbuk itu hancur. Pada gambar 4.2 (d) partikel serbuk mengalami pemipihan kembali. Pada waktu *milling* meningkat menjadi 5 jam, partikel serbuknya telah beragglomerasi membentuk partikel baru yang berukuran lebih besar. Partikel tersebut rata-rata berukuran 903  $\mu\text{m}$ . Pada 10 jam *milling* partikel serbuk yang telah beragglomerasi itu hancur membentuk bulatan kecil yaitu sekitar 6,5  $\mu\text{m}$  .

Gambar 4.3 terlihat perubahan morfologi serbuk Fe–Al dengan penambahan 5% atom Nikel. Pada 15 menit di-*milling* , partikel serbuk memipih akibat tumbukan bola–bola giling yang terus berulang ( lihat gambar 4.3 (a) ). Tumbukan itu menyebabkan terjadi pengerasan regangan sehingga partikel serbuknya menjadi hancur ( lihat gambar 4.3 (b) ), tapi belum semuanya. Partikel-partikel itu hancur merata ketika di-*milling* selama 1 jam ( lihat gambar 4.3 (c) ). Pada 2 jam waktu *milling* ( lihat gambar 4.3 (d) ) partikel serbuknya telah beragglomerasi sehingga kumpulan partikel serbuk itu berbentuk bulat. Partikel tersebut berukuran 295,6  $\mu\text{m}$ . Hal yang sama juga terjadi ketika ditambah waktu *milling* menjadi 5 jam. Ketika di-*milling* 10 jam, partikel tersebut mengalami agglomerasi yang ukurannya makin membesar yaitu sekitar 297,6  $\mu\text{m}$  ( lihat gambar 4.3 (e) ). Agglomerasi terjadi karena pada saat pemaduan mekanik terjadi pengelasan dingin (*cold welding*) diantara partikel akibat dari penghancuran bola-bola penggiling seperti yang dilaporkan oleh Suryanarayana [52]. Bentuk yang dihasilkan pun tidak pipih seperti awal pemaduan mekanik tetapi hampir bulat. Partikel tersebut telah mengalami *work hardened* sehingga kekerasan meningkat dan lebih getas dari sebelumnya [52].



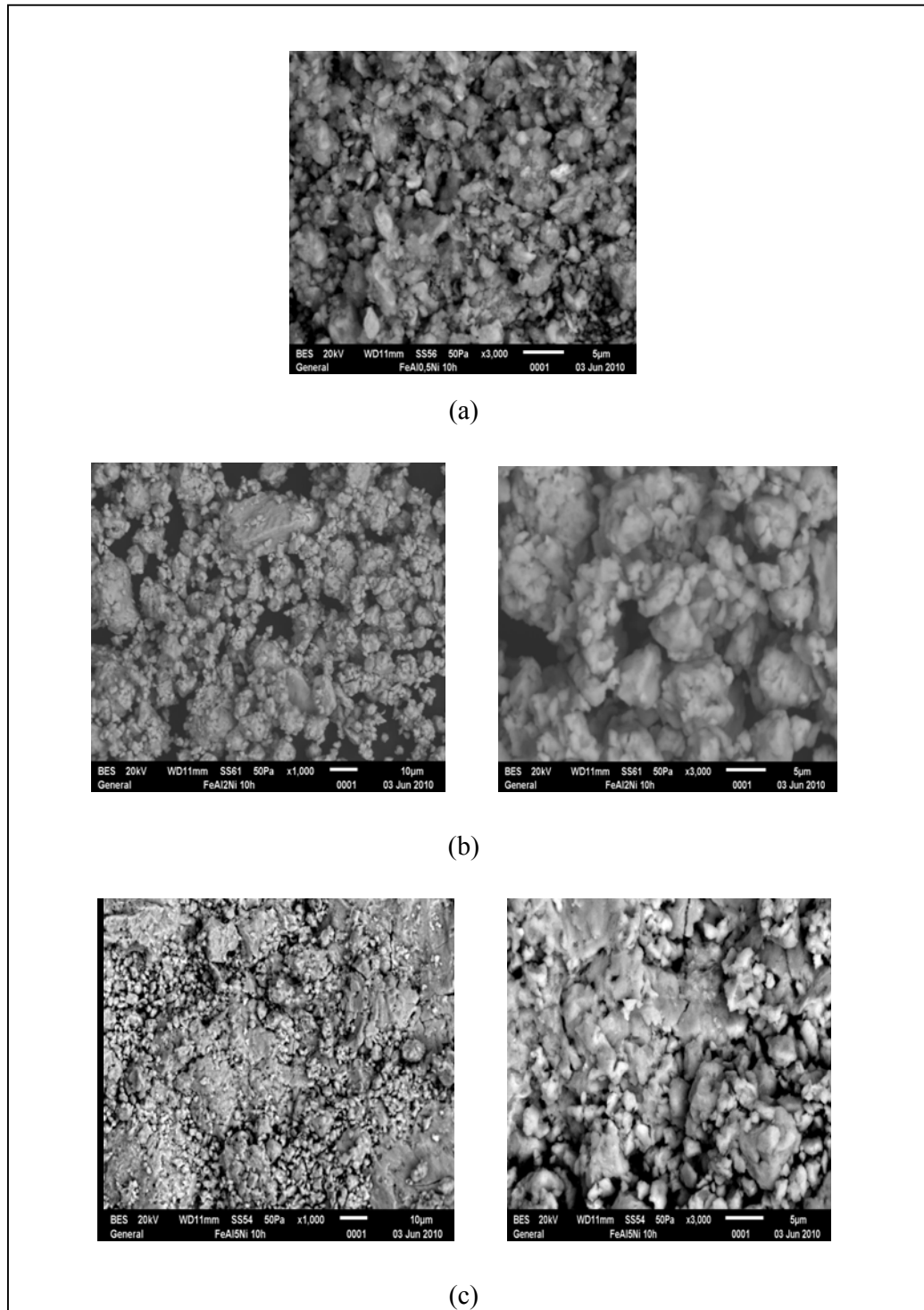
Gambar 4.3 Perubahan morfologi serbuk Fe-50at.%Al-5at.%Ni dengan waktu *milling* (a) 15 menit (b) 30 menit (c) 1 jam (d) 2 jam (e) 5 jam (f) 10 jam

Jika dibandingkan gambar 4.2 dan 4.3 terlihat perbedaan kecepatan proses penghancuran dan pengelasan dingin. Ketika penambahan 5at.%Ni selama 30 menit waktu *milling*, partikel serbuknya sudah mulai mengalami proses penghancuran sedangkan partikel serbuk dengan penambahan 2at.%Ni belum mengalami proses itu hanya mengalami pemipihan saja. Begitu juga ketika penambahan 5at.%Ni selama 2 jam waktu *milling*, partikel serbuknya mengalami agglomerasi akibat proses pengelasan dingin sedangkan partikel serbuk dengan penambahan 2at.%Ni belum mengalami proses itu masih baru pada tahap proses pemipihan dan penghancuran. Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak komposisi Nikel dalam serbuk Fe-Al ternyata mampu mempercepat proses penghancuran dan pengelasan dingin .



Gambar 4.4 Foto SEM serbuk Fe-50at.%Al-2at.%Ni dengan 5 jam waktu *milling*  
( a) diperbesar 1000x ( b) diperbesar 3000x

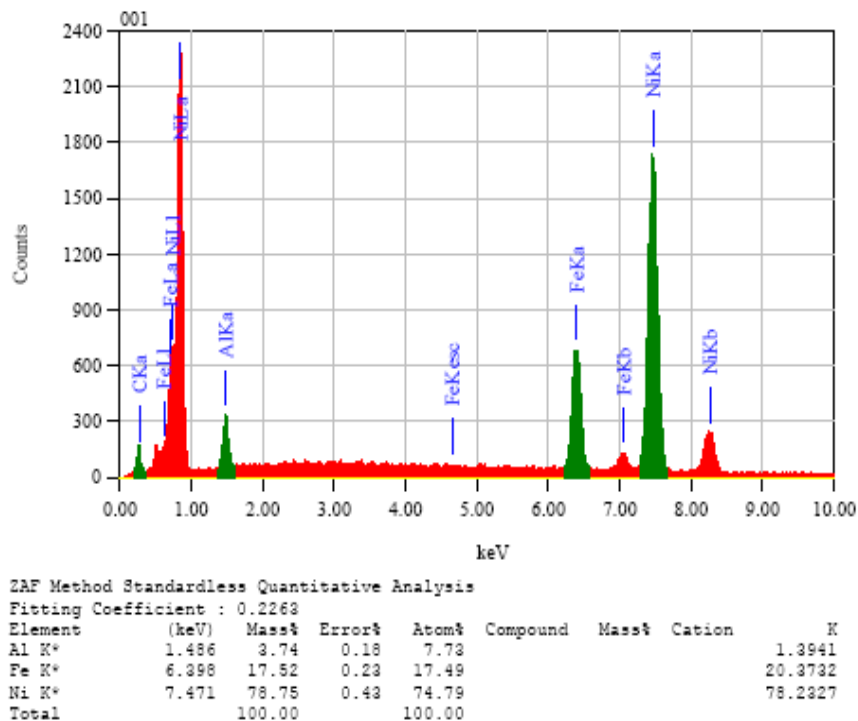
Gambar 4.2 (e) serbuk mengalami agglomerasi . Permukaan agglomerasi itu bisa diperjelas dengan perbesaran 1000x ( lihat gambar 4.4 (a) ). Permukaannya terlihat masih kasar. Jika diperbesar lagi sebesar 3000x terlihat permukaan agglomerasi partikel itu terdiri dari kumpulan partikel. Gambar 4.4 (b) terlihat kumpulan partikel tersebut rata-rata berukuran 13  $\mu\text{m}$ .



Gambar 4.5 Perbandingan morfologi hasil foto SEM serbuk Fe-Al pada *milling* 10 jam dengan penambahan (a). 0,5at.%Ni (b) 2at.%Ni (c) 5at.%Ni

Waktu 10 jam *milling* dengan penambahan 0,5at.%Ni ( lihat gambar 4.5 (a) terlihat terjadi agglomerasi. Ukuran partikelnya sekitar 7,7  $\mu\text{m}$ . Pada penambahan 0,5at.%Ni masih ditemukan partikel pipih yang ukurannya sekitar 2,32  $\mu\text{m}$ . Sedangkan pada penambahan 2at.%Ni ( lihat gambar 4.5 (b) ) terlihat partikel serbuknya sudah berbentuk bulatan-bulatan yang berukuran 6,5  $\mu\text{m}$ . Pada penambahan 5at.%Ni partikel serbuknya juga sudah berbentuk bulatan-bulatan yang ukurannya sekitar 2,5  $\mu\text{m}$ .

### 4.3 Analisa EDX

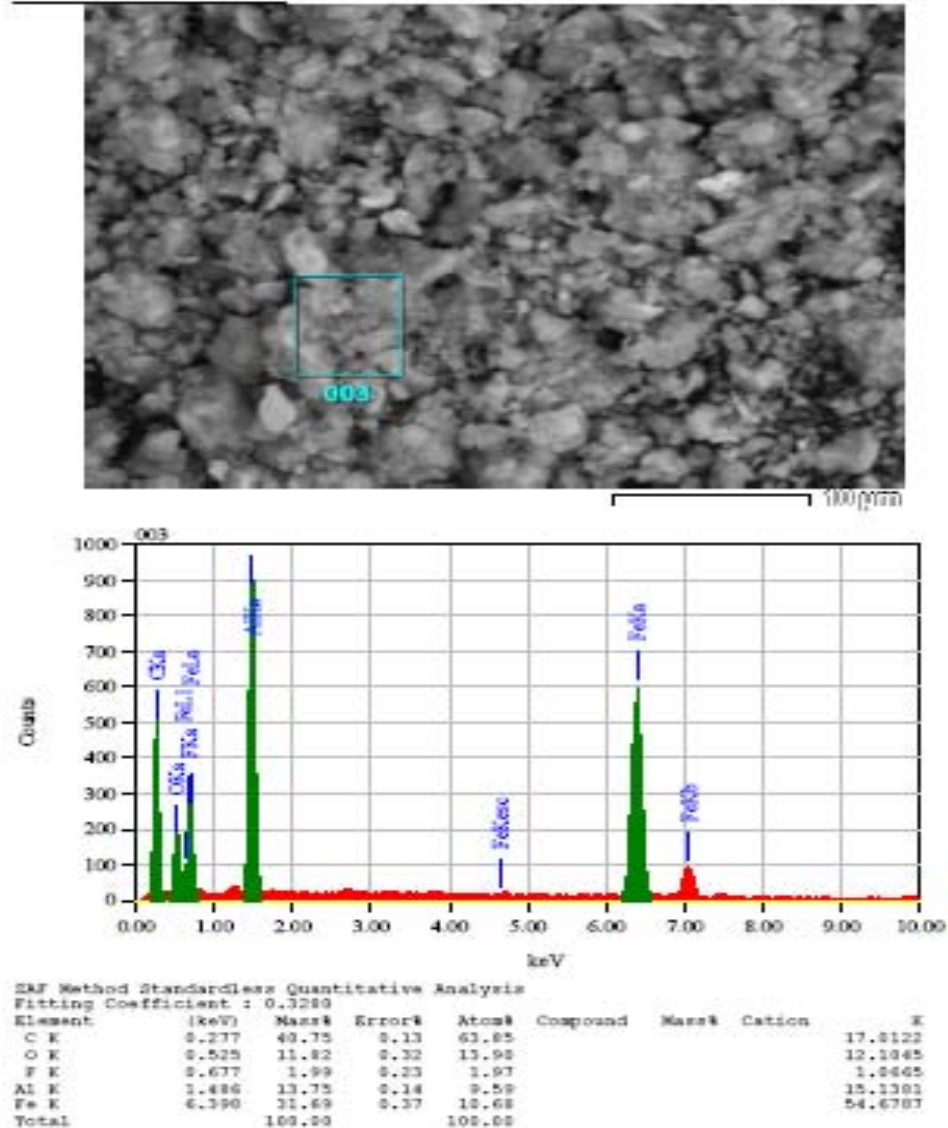


Gambar 4.6 Hasil EDX pada sampel Fe – 50at.%Al – 5at.%Ni sebelum di-*milling*

Gambar 4.6 diatas, terlihat bahwa serbuk Fe–50at.%Al–5at.%Ni terdiri dari unsur Fe, Al dan Ni dimana komposisi atom Al sebesar 7,73%, Fe sebesar 17,49% dan Ni sebesar 74,79%.



FeAl05Ni 10h Pos2

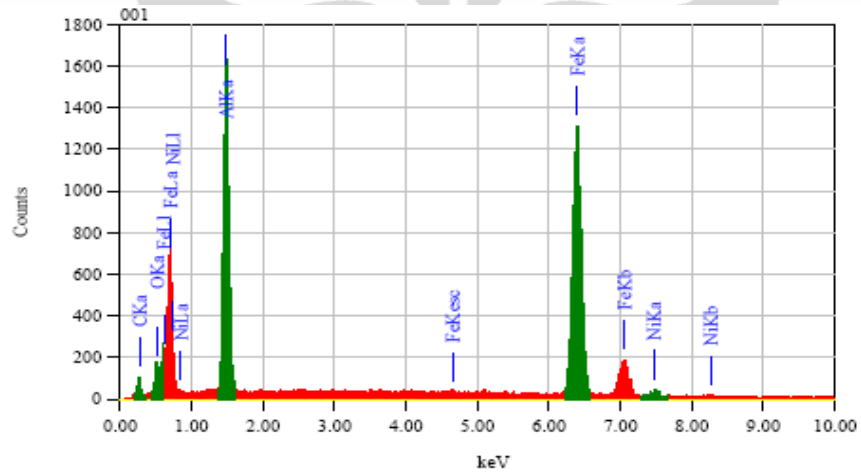
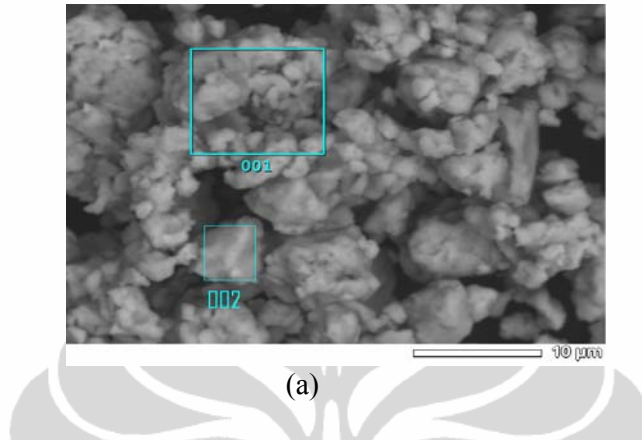


Gambar 4.7 Hasil EDX pada sampel Fe – 50at.%Al – 0,5at.%Ni dengan 10 jam *milling*

Hasil analisa EDX ( lihat gambar 4.7) menunjukkan bahwa untuk titik 003 mengandung beberapa unsur yaitu C sebanyak 63,85% atom, O sebanyak 13,90% atom, F sebanyak 1,97% atom , Al sebanyak 9,59% atom dan Fe sebanyak 10,68% atom. Masuknya unsur C, O dan F dalam paduan itu disebabkan oleh lingkungan luar. Kemungkinan masuknya bisa ketika mengeluarkan serbuk setelah proses pepaduan mekanik, meski sudah

**Universitas Indonesia**

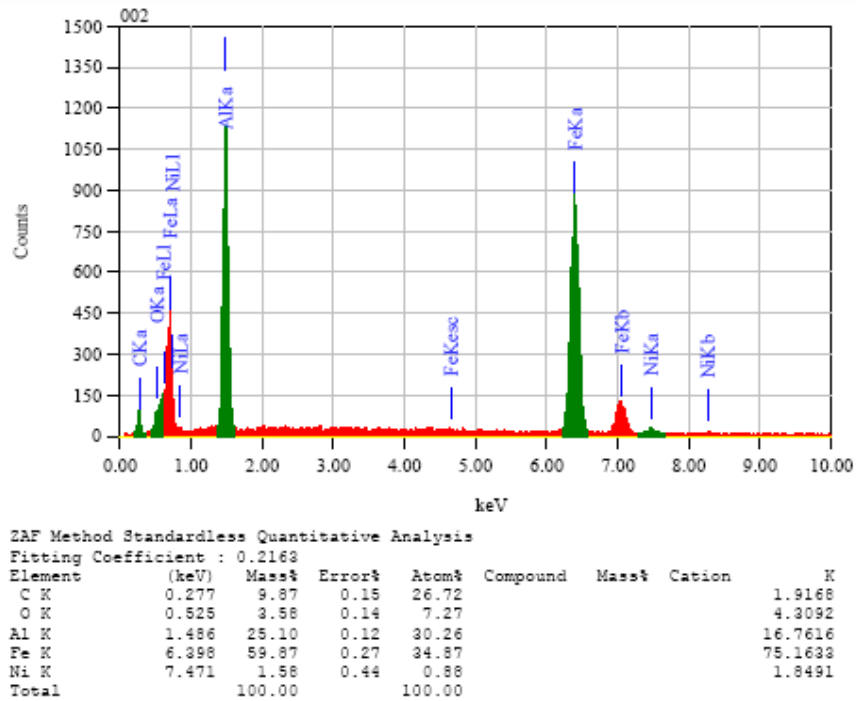
mengondisikan dalam suasana Argon. Selain itu, ketika akan melakukan pengukuran XRD dan SEM bisa juga menjadi penyebab masuknya unsur-unsur yang tidak di inginkan dalam sampel tersebut.



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis  
Fitting Coefficient : 0.2029

Element	(keV)	Mass%	Error%	Atom%	Compound	Mass%	Cation	K
C K	0.277	8.79	0.15	24.04				1.6981
O K	0.525	4.82	0.14	9.90				5.8781
Al K	1.486	24.27	0.12	29.56				15.8107
Fe K	6.398	60.36	0.27	35.52				74.5952
Ni K	7.471	1.76	0.45	0.98				2.0178
Total		100.00		100.00				

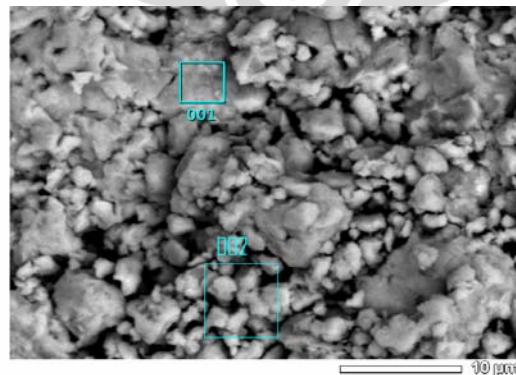
(b)



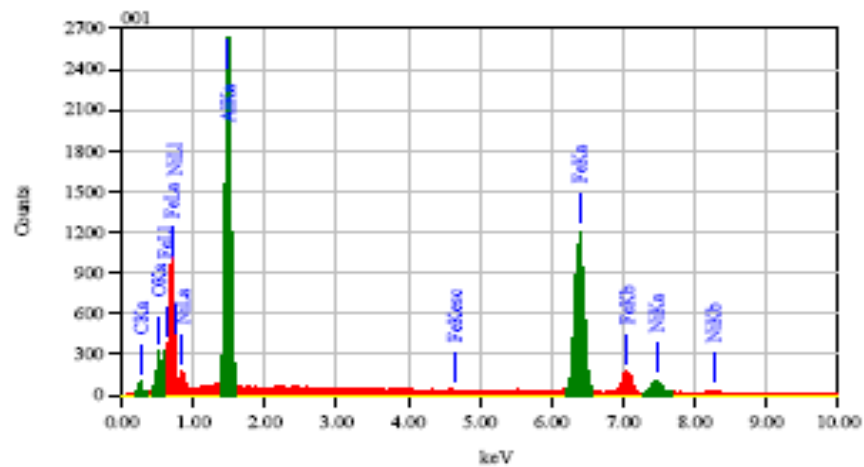
(c)

Gambar 4.8 Hasil EDX pada sampel Fe-50at.%Al-2at.%Ni dengan 10 jam *milling* (a) Area titik (b) analisa titik 001 (c) analisa titik 002

Gambar 4.8, terlihat bahwa serbuk Fe-50at.%Al-2at.%Ni terdiri dari unsur C, O, Al, Fe dan Ni. Adanya unsur C dan O dikarenakan pengaruh lingkungan luar.



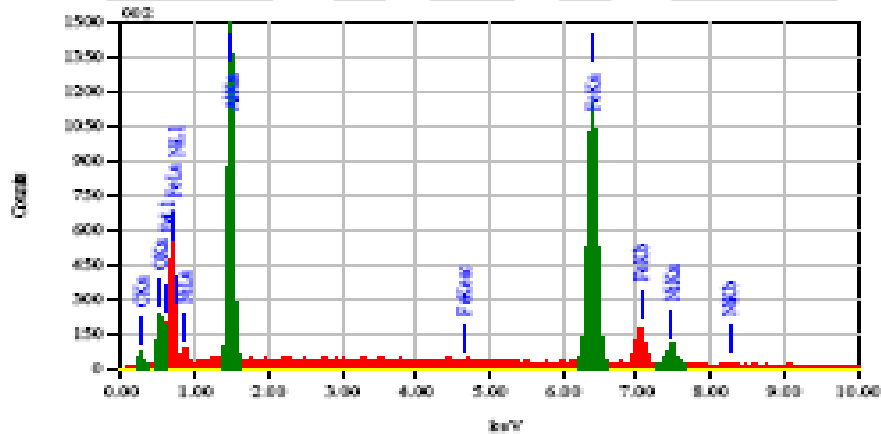
(a)



SAF Method Standardless Quantitative Analysis  
Fitting Coefficient : 0.2056

Element	(keV)	Mask	Error%	Atom%	Compound	Mask	Cation	Z
C K $\alpha$	0.277	7.09	0.21	18.29				1.2326
O K	0.525	9.07	0.17	15.63				9.9166
Al K	1.486	32.30	0.14	37.08				22.8953
Fe K	6.399	47.23	0.33	26.20				59.6509
Ni K	7.471	5.31	0.54	2.80				6.3066
Total		100.00		100.00				

(b)



SAF Method Standardless Quantitative Analysis  
Fitting Coefficient : 0.1966

Element	(keV)	Mask	Error%	Atom%	Compound	Mask	Cation	Z
C K $\alpha$	0.277	5.44	0.14	15.45				0.9915
O K	0.525	7.02	0.12	14.94				0.7832
Al K	1.486	25.07	0.12	31.66				15.5911
Fe K	6.399	56.70	0.25	34.60				66.1885
Ni K	7.471	5.77	0.41	3.35				5.4457
Total		100.00		100.00				

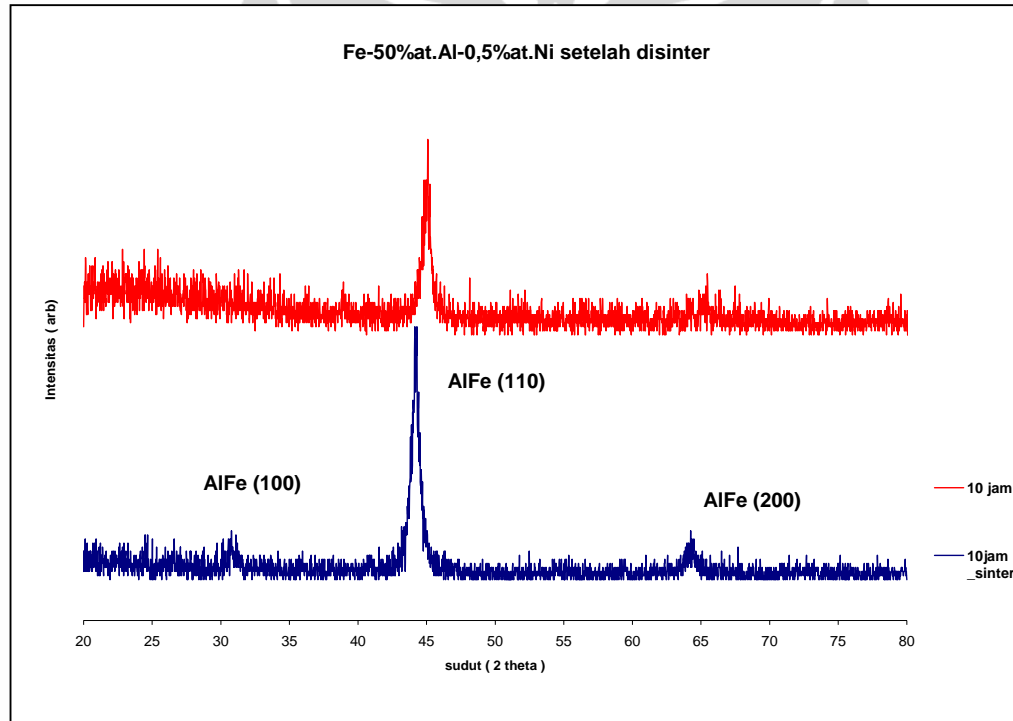
(c)

Gambar 4.9 Hasil EDX pada sampel Fe-50at.%Al-5at.%Ni dengan 10 jam *milling* (a) area titik (b) analisa 001 (c) analisa 002

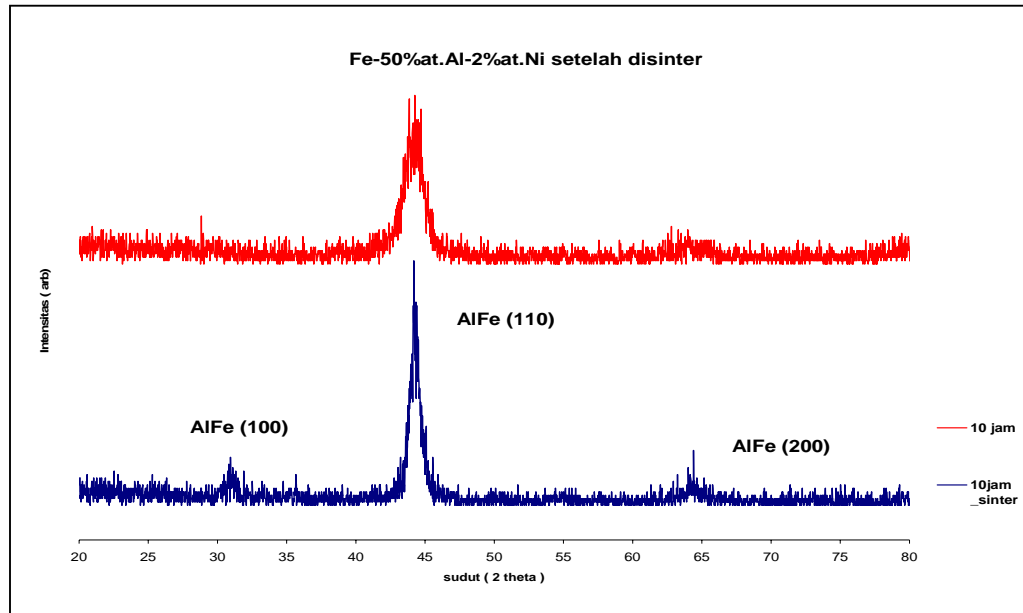
Gambar 4.9 memperlihatkan adanya unsur Fe, Al dan Ni pada sampel Fe-50at.%Al-5at.%Ni. Selain itu ternyata pada sampel tersebut juga terdapat unsur C dan O. Elemen baru yang muncul itu bisa disebabkan sampel tersebut telah terkontaminasi dengan lingkungan luar.

#### 4.4 Analisa XRD Pada Sampel Sinter

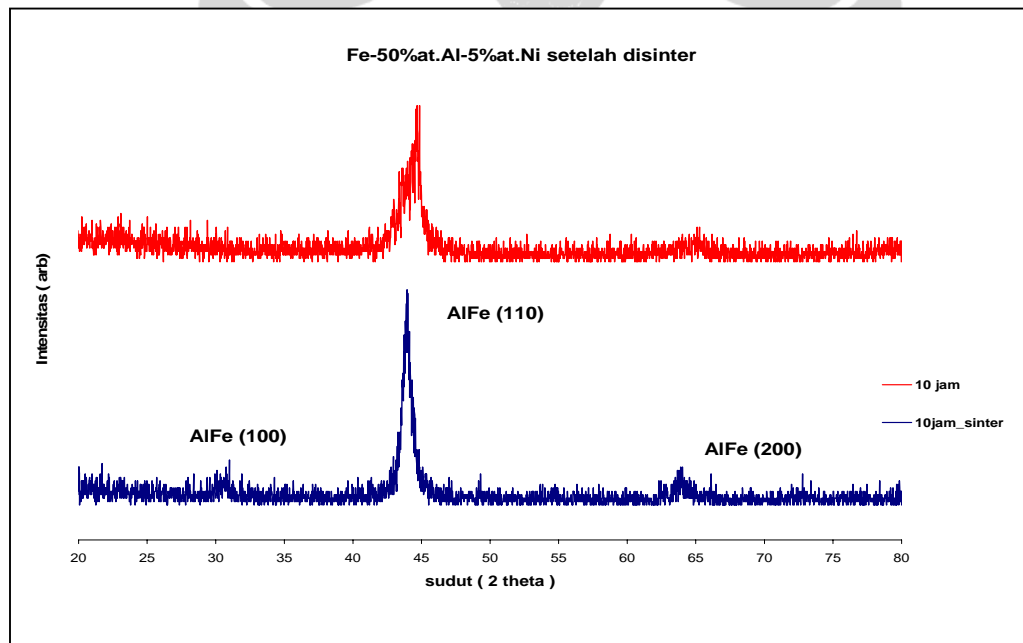
Hasil XRD pada sampel yang telah di-sinter pada suhu  $500^{\circ}\text{C}$  selama 2 jam bisa dilihat pada gambar dibawah ini:



(a)



(b)

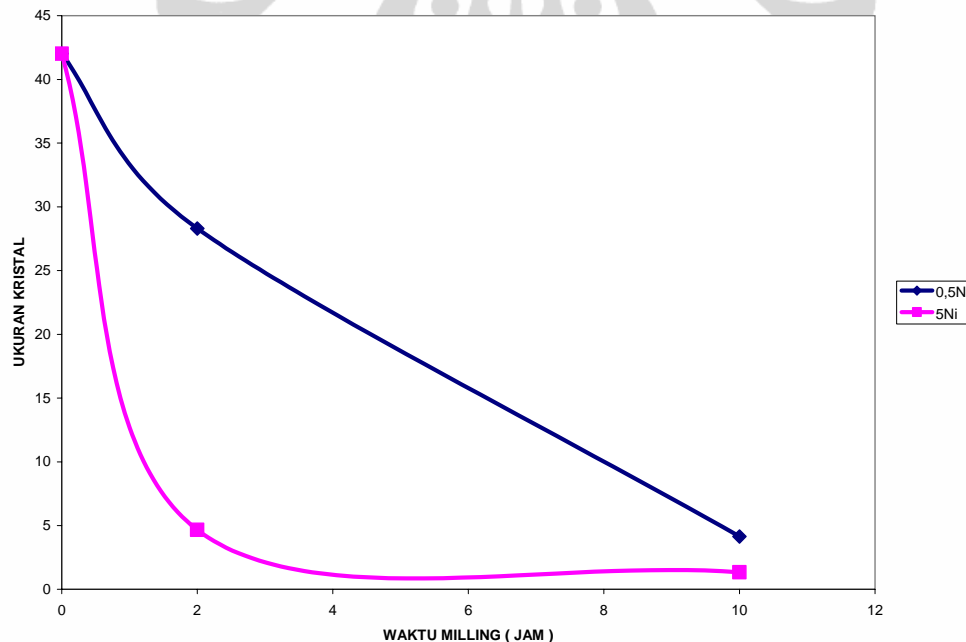


(c)

Gambar 4.10 Perbedaan hasil XRD pada serbuk Fe-Al yang telah di-sinter  $500^{\circ}\text{C}$  selama 2 jam dengan serbuk Fe-Al yang belum disinter pada waktu *milling* 10 jam dengan variasi (a) 0,5at.%Ni (b) 2at.%Ni (c) 5at.%Ni

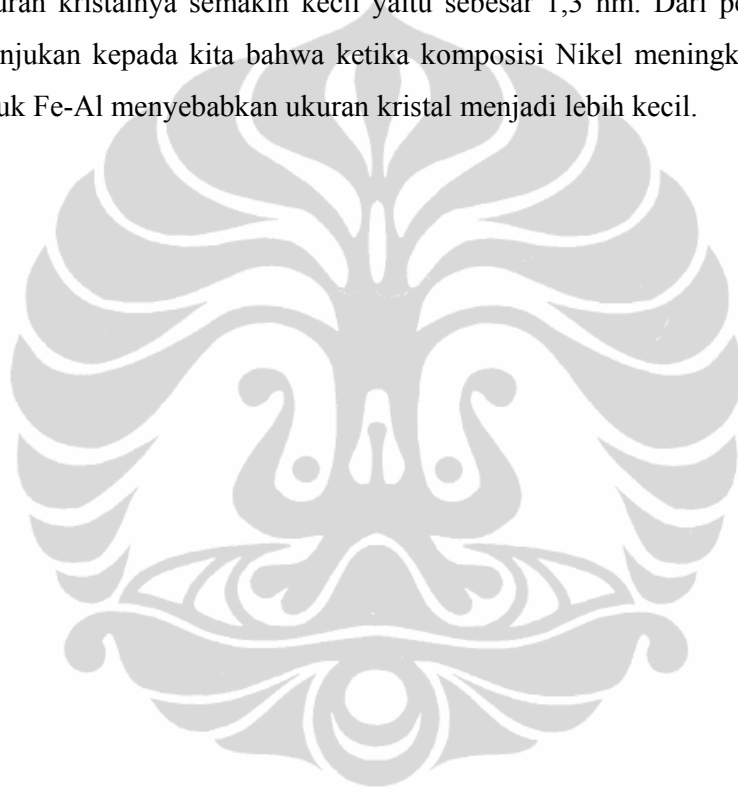
Gambar 4.10 menunjukkan perbedaan serbuk Fe-Al yang belum di-sinter dengan serbuk Fe-Al yang telah di-sinter pada 10 jam waktu *milling*. Dengan penambahan 0,5at.%Ni ( lihat gambar 4.10 (a) ), sudut puncak paduan serbuk Fe-Al  $45,0613^{\circ}$  dan  $65,0795^{\circ}$  setelah dicocokkan dengan data PDF ternyata masih belum terbentuk fasa baru. Setelah disinter, puncak dengan sudut  $30,8392^{\circ}$  dicocokkan dengan data PDF AlFe  $30,818^{\circ}$  terbentuk senyawa AlFe (100). Puncak dengan sudut  $44,2314^{\circ}$  dicocokkan dengan data PDF AlFe  $44,186^{\circ}$  terbentuk senyawa AlFe (110). Puncak dengan sudut  $64,3537^{\circ}$  dicocokkan dengan data PDF AlFe  $64,316^{\circ}$  terbentuk senyawa AlFe (200). Hal yang sama juga terjadi pada paduan serbuk Fe-Al dengan penambahan 2at.%Ni dan 5at.%Ni, dimana fasa terbentuk setelah serbuk itu di-sinter. Fasa yang terbentuk adalah AlFe(100), AlFe(110) dan AlFe(200). Dari penjelasan diatas menunjukkan bahwa paduan serbuk Fe-Al setelah di-sinter ternyata membentuk intermetalik AlFe.

#### 4.5 Ukuran kristal



Gambar 4.11 Ukuran kristal pada paduan serbuk Fe-Al dengan penambahan 0,5at.%Ni dan 5at.%Ni

Gambar 4.11 memperlihatkan pengaruh penambahan Nikel terhadap ukuran kristal pada serbuk Fe-Al. Pelebaran puncak XRD menunjukkan ukuran kristal makin kecil. Pada waktu *milling* 2 jam, ukuran kristal pada penambahan 0,5at.%Ni dalam serbuk Fe-Al sebesar 28 nm. Sedangkan ketika serbuk Fe-Al dengan penambahan 5at.%Ni ukuran kristalnya menjadi lebih kecil yaitu sebesar 4,7 nm. Hal yang sama juga terjadi pada waktu *milling* 10 jam, pada penambahan 0,5at.%Ni, ukuran kristalnya sebesar 4,1 nm sedangkan pada penambahan 5at.%Ni ukuran kristalnya semakin kecil yaitu sebesar 1,3 nm. Dari penjelasan diatas menunjukkan kepada kita bahwa ketika komposisi Nikel meningkat dalam paduan serbuk Fe-Al menyebabkan ukuran kristal menjadi lebih kecil.





## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dan dengan mengacu semua hasil analisis yang dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan Nikel dalam serbuk Fe – Al mampu mempercepat proses penghancuran dan agglomerasi selama pemaduan mekanik dimana pada penambahan 5at.%Ni dalam waktu 30 jam *milling* sudah mengalami proses penghancuran dan pada 2 jam *milling* sudah mengalami proses agglomerasi.
2. Selama *di-milling*, partikel serbuk Fe-Al mengalami perubahan mikrostruktur. Dimulai dengan memipihnya partikel serbuk, kemudian partikel pipih tersebut hancur. Setelah itu, beragglomerasi berbentuk bulat.
3. Sebelum *sinter* pada temperatur 500<sup>0</sup>C selama 2 jam, intermetalik Fe-Al belum terbentuk.
4. Setelah *sinter* pada temperatur 500<sup>0</sup>C selama 2 jam, intermetalik Fe-Al berupa fasa FeAl terbentuk untuk semua sampel pada penambahan 0,5at.%Ni, 2at.%Ni dan 5at.%Ni.
5. Penambahan Nikel pada paduan serbuk Fe-Al mampu memperkecil ukuran kristal dimana selama 10 jam waktu *milling* ukuran kristalnya sebesar 4.138 nm untuk penambahan 0,5at.%Ni dan 1.341 nm untuk penambahan 5at.%Ni.

#### 5.2 Saran

Saran yang penulis berikan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sebaiknya daerah jangkauan sudut dalam pengukuran XRD dibuat lebih lebar untuk mendapatkan data puncak yang banyak sehingga memudahkan menentukan ukuran kristal menggunakan metode William – Hall.

2. Perlunya memastikan atmosfer dalam pengambilan sampel yang telah di-*milling* dengan HEM E3D secara seksama dengan cara memastikan pengisian gas inert ( argon ) dengan volume yang tidak terlalu sedikit.

50



## DAFTAR ACUAN

- [1] Deevi,S.C, Sikka., V.K. (1996). Nickel and Iron Aluminides: an Overview on Properties, Processing and Applications. *Intermetallics*, 4 , hal. 357- 375.
- [2] McKamey, C.G., Stoloff,N.S., and Sikka,V.K. (1996). *Physical metallurgy and Processing of Intermetallic Compounds* .London: Chapman and Hall. Hal. 351-391.
- [3] Deevi,S.C., Sikka,V.K., Maziasz, P.J., Cahn, R.W. (1996). *Processing, Properties, and Applications, ASM, Materials Park, OH* . Proceedings of the International Symposium on Nickel and Iron Aluminides. Hal. 145-156, 361-375.
- [4] M. Hashii., Y. Hosoi. (1998). Characterization of FeAl Intermetallic Compound in the Process of Mechanical Alloying. TMS, hal. 2425-2430
- [5] Stoloff, N.S. (1985). *High Temperature Ordered Intermetallic Alloys*. MRS Symp.Proc., MRS, 39, hal. 3-27.
- [6] McKamey, C.G., De Van, J.H., Tortorelli, P.F and Sikka, V.K. (1991). *J. Mater.Res*, 6 , hal. 1779-1805.
- [7] N.S. Stoloff, C.T. Liu. (1994). Enviromental Embrittlement of Iron Aluminides. *Intermetallics*, 2 , hal. 75-87.
- [8] McKamey,C.G., Maziasz, P.J., Goodwin, G.M., and Zacharia, T. (1994). *Materials Science and Engineering A174*, hal. 59-70.
- [9] Maziasz, P.J., Goodwin, G.M., Alexander, D.J., and Viswanathan, S. (1996). Processing, Properties, and Applications. Proceedings of the International Symposium on Nickel and Iron Aluminides, hal. 157-176.
- [10] R.H Rabin, R.N. (1991).Wright, *Metall. Trans.*, 22A, hal. 277-286.
- [11] Sheasby, J.S. (1979). *Int. J. Powder Metall. Powder Technol.*, 15(4), hal. 30-305.
- [12] D.J. Lee and R. M. German. (1985). *Int. J. Powder Metall. Powder Technol*, 12, hal. 9-21.

- [13] Zheng-Rong Zhang, Wen-Xi Liu. (2006). Mechanical Properties of Fe<sub>3</sub>Al-based Alloys with Addition of Carbon, Niobium and Titanium. *Materials Science and Engineering* ,A423 , hal. 343-349
- [14] Wann-Chiun Luu, Wen-Chi Chiang, Jiann-Kuo Wu. (2006). Effect of Cr and Ti Additions on The Corrosion Behavior of Fe<sub>3</sub>Al alloys in Chloride-containing Sulfuric Acid Solution. *Materials Letters* ,59 ,hal. 3295-3298
- [15] Sharma,G., Kishore, R., Sundararaman, M., and Ramanujan, R.V. (2006). Superplastic Deformation Studies of Fe-28Al-3Cr Intermetallic Alloy. *Materials Science and Engineering* ,A419, hal. 144-147
- [16] Sharma,G., Gaonkar, K. B., and Singh, P. R.(2007) . Effect of Cr Addition on Pitting Behavior of Iron Aluminide Intermetallic. *Materials Letters* ,61, hal. 971-973
- [17] Kratochvíl ,P., Málek, P., Cieslar ,M., Hanus , P., Hakl ,J., and Vlasák ,T. (2007). Hightemperature mechanical properties of Zr alloyed Fe<sub>3</sub>Al-type iron aluminide, *Intermetallics* ,15, hal. 333-337
- [18] B.G. Park, S.H. Ko, Y.H. Park and J.H. Lee. (2006).Mechanical properties of in situ Fe<sub>3</sub>Al matrix composites fabricated by MA–PDS process. *Intermetallics* ,14 , hal. 660-665.
- [19] Krasnowski , M., Kulik ,T. (2007). Nanocrystalline FeAl Intermetallic Produced by Mechanical Alloying Followed by Hot-Pressing Consolidation. *Intermetallics* ,15 ,201-205.
- [20] Q. Zeng and I. Baker. (2006). Magnetic properties and thermal ordering of mechanically alloyed Fe–40 at% Al, *Intermetallics* ,14 , hal. 396-405.
- [21] W, Wahyu B., W,Dody ., Suryadi, Agus D., Noviyanto, Alfian., Hubby I., S, Endang ., W, Agus S., R, Nurul T. (2006,juli). *Perubahan Mikrostruktur Pada Campuran Bubuk Al-Fe Dengan Metoda Mechanical Alloying*. Prosiding Seminar Nasional Tenaga Listrik dan Mekatronika , 447-452.
- [22] Ortega ,Y., de Diego ,N., Plazaola ,F., Jiménez ,J.A. and del Río , J. (2007). Influence of Cr addition on the defect structure of Fe-Al Alloys. *Intermetallics* ,15, hal. 177-180.
- [23] Godlewska , E. (2006).Effect of molybdenum on high-temperature corrosion of Fe–Al intermetallics, *Intermetallics*, 14 , hal. 280-286.

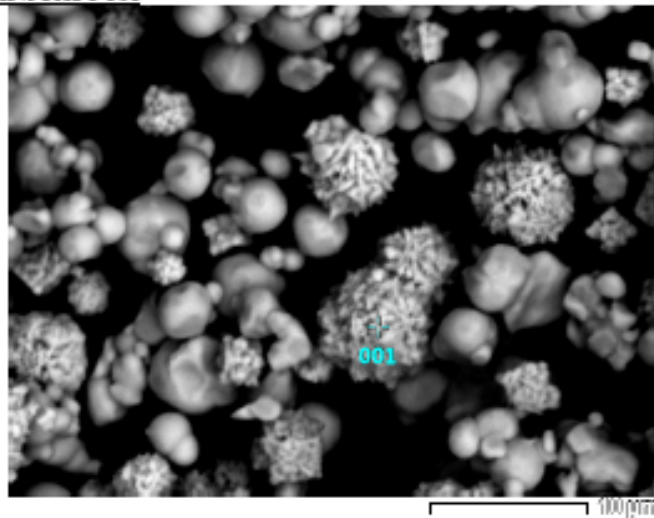
- [24] Munos-Morris, M.A., and Morris, D.G. (2006). Mikrostruktur and mechanical behaviour of a Fe-Ni-Al alloy. *Materials Science and engineering*, A 444, 236-241.
- [25] Maziarz, W., Dutkiewicz, J. (2003). Processing of nanocrystalline FeAlX ( X = Ni, Mn ) intermetallics using a mechanical alloying and hot pressing techniques. *Journal of materials science*, 39, 5425-5429.
- [26] Noviyanto, Alfian. (2008). Pelapisan intermetalik Fe-Al pada baja dengan metode pepaduan mekanik. Depok: Departemen teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia.
- [27] S, Wahid. (1987). *Pengetahuan Bahan*. Surabaya: Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh November.
- [28] W, Agus S., et al. (2009). Iron aluminide coating on steel surface by mechanical alloying at elevated temperature. *Transaction of the materials Research Society of Japan*, 34[3], 565-569.
- [29] Potesser, M., et al. (2006). *The Characterization of the Intermetallic Fe – Al Layer of Steel – Aluminium Weldings*, EPD Congress 2006 – TMS ( *The Minerals, Metals Materials Society* ), hal. 167 – 176.
- [30] Suryanarayana, C. (2001). Mechanical Alloying dan Milling. *Progress in materials Science*, 46, hal 11 – 15, 22 – 31, 32 – 39.
- [31] Cellard, Audrey., et al. (2007). Optimization of Chromium Oxide Nanopowders dispersion for Spray – Dring, *Journal of the European Ceramic Society*, 27, hal. 1017 – 1021.
- [32] L. Lu dan M.O Lai. (2008). Mechanical Alloying. Boston : Kluwer Academic Publisher, hal. 1,7,11-20, 69-153, 165-169, 155-172.
- [33] Nurul T. R., Agus S. W., Alfian N., Wahyu B. W., Suryadi, Djandjani, (2007)“ HEM type E3D, Mesin Penghancur Partikel Berenergi dan Metodenya,” alat pembuat fungsional nanomaterial dengan gerakan elips 3 dimensi. Paten No. P00200700207.
- [34] L. Lu dan M.O Lai. (1998). Mechanical Alloying. London : Kluwer Academic Publisher, hal: 24,25,26,27,28,48-54,75,76,166
- [35] Suryanarayana, C. (2003). *Mechanical Alloying and Milling*. New York: Marcel Dekker, hal 11,21-26,29.

- [36] Suryanarayana, C. (2004). *Mechanical Alloying and Milling* .New York: Marcel Dekker, hal 111-112.

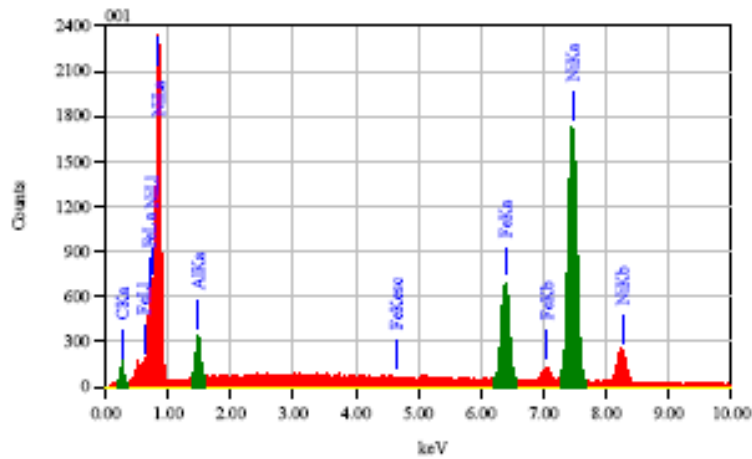


**DAFTAR LAMPIRAN****Lampiran 1: Analisis EDX sampel Fe-50at.%Al-0,5at.%Ni 0 jam pada titik 1****Universitas Indonesia**

FeAlNi Ref Posl



Title	: IMG1
Instrument	: 6510 (JA)
Volt	: 20.00 KV
Mag.	: x 3,000
Date	: 2010/06/23
Pixel	: 512 x 394



Acquisition Parameter

Instrument	: 6510 (JA)
Acc. Voltage	: 20.0 kV
Probe Current	: 1.00000 nA
PEA mode	: T4
Real Time	: 46.13 sec
Live Time	: 30.00 sec
Dead Time	: 35 %
Counting Rate	: 4278 cps
Energy Range	: 0 - 20 keV

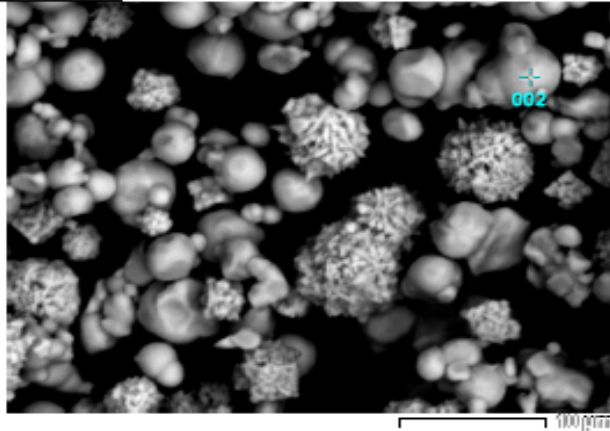
SAF Method Standardless Quantitative Analysis  
Fitting Coefficient : 0.2263

Element	(keV)	Mass%	Error%	Atom%	Compound	Mass%	Cation	Z
Al K*	1.486	3.74	0.18	7.73				13
Fe K*	6.390	17.52	0.23	17.49				26
Ni K*	7.471	78.75	0.43	74.79				28
Total		100.00		100.00				

Lampiran 2: Analisis EDX sampel Fe-0,5at.%Al-0,5at.Ni 0 jam pada titik 2

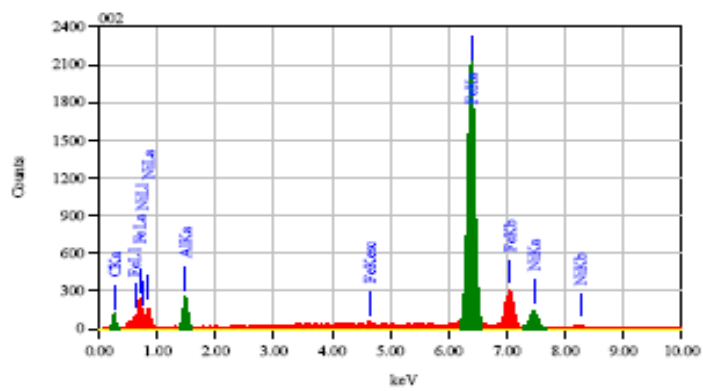


FeAlNi ref Pos2



1/1

Title	: IMG1
Instrument	: 6510 (LA)
Volt	: 20.00 kV
Mag.	: x 3,000
Date	: 2010/06/03
Pixel	: 512 x 304



Acquisition Parameter	
Instrument	: 6510 (LA)
Acc. Voltage	: 20.0 kV
Probe Current	: 1.00000 mA
FWHM mode	: 74
Real Time	: 37.00 sec
Live Time	: 30.00 sec
Dead Time	: 21 %
Counting Rate	: 2298 cps
Energy Range	: 0 - 20 keV

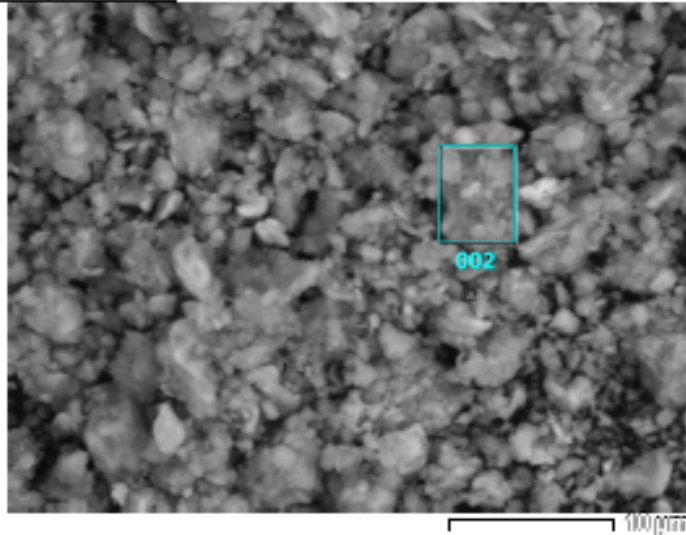
JEB-2300 Analysis Station

JEOL

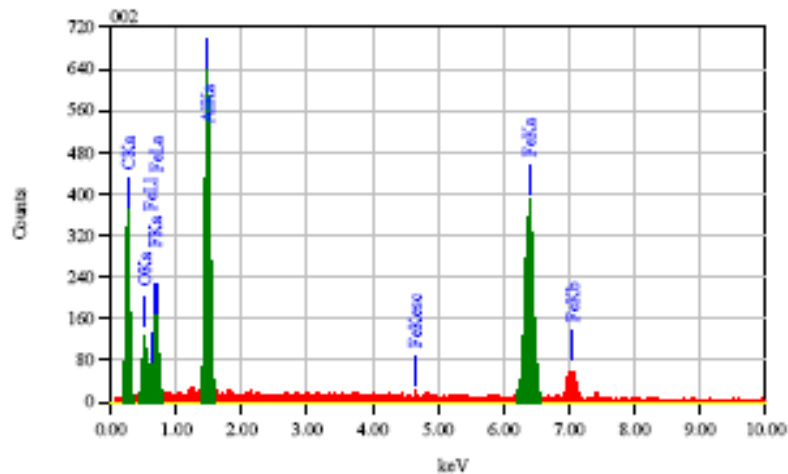
Lampiran 3: Analisis EDX sampel Fe-50at.%Al-0,5at.%Ni 10jam pada titik 1

Universitas Indonesia

## FeAl05Ni 10h Pos1



1/1	
Title	: IMG1
Instrument	: 6510(LA)
Volt	: 20.00 kV
Mag.	: x 3,000
Date	: 2010/06/03
Pixel	: 512 x 304



Acquisition Parameter	
Instrument	: 6510(LA)
Acc. Voltage	: 20.0 kV
Probe Current	: 1.00000 nA
EDS mode	: FE
Real Time	: 32.82 sec
Live Time	: 30.00 sec
Dead Time	: 8 %
Counting Rate	: 890 cps
Energy Range	: 0 - 20 keV

## EDS Method Standardless Quantitative Analysis

Fitting Coefficient : 0.3430

Element	(keV)	Mass%	Error%	Atom%	Compound	Mass%	Cation	Z
C K	0.277	42.18	0.15	65.37				12.0026
O K	0.525	11.30	0.37	13.15				11.4007
F K	0.677	1.80	0.27	1.76				0.9703
Al K	1.486	13.48	0.16	9.30				15.8900
Fe K	6.399	31.24	0.42	10.41				54.4304
Total		100.00		100.00				

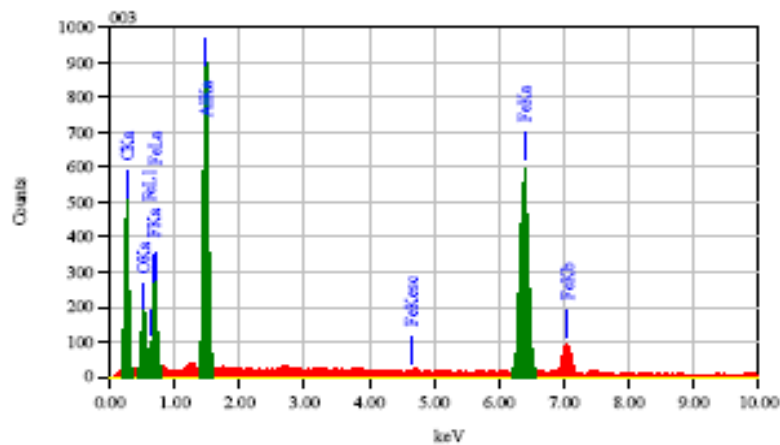
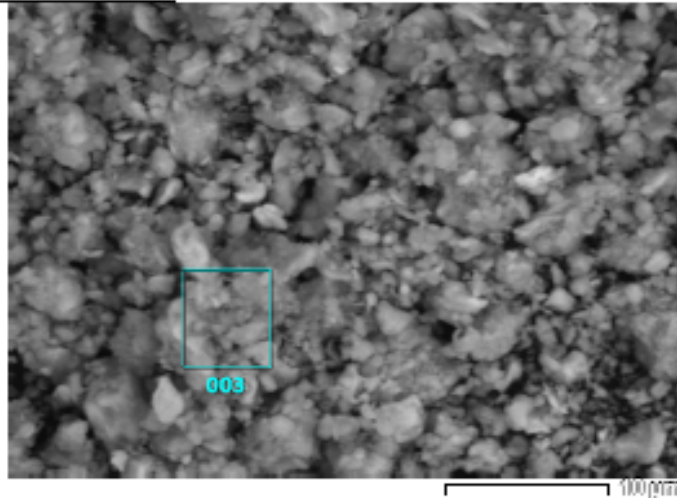
JED-2300 AnalysisStation

JEOL

## Lampiran 4: Analisis EDX sampel Fe-50at.%Al-0,5at.%Ni 10jam pada titik 2

Universitas Indonesia

## FeAl05Ni 10h Pos2



SAF Method Standardless Quantitative Analysis  
Fitting Coefficient : 0.3280

Element	(keV)	Mass%	Error%	Atom%	Compound	Mass%	Cation	Z
C K	0.277	40.75	0.13	63.85				17.0122
O K	0.525	11.82	0.32	13.90				12.1045
F K	0.677	1.99	0.23	1.97				1.0465
Al K	1.486	13.75	0.14	9.59				15.1301
Fe K	6.390	31.69	0.37	10.68				54.6707
Total		100.00		100.00				

1/1

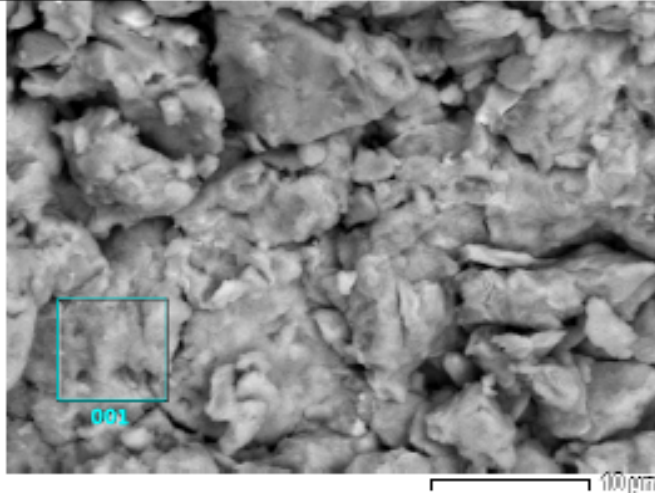
Title : IMG1  
Instrument : 6510(LA)  
Volt : 20.00 kV  
Mag. : x 3,000  
Date : 2010/04/03  
Pixel : 512 x 304

Acquisition Parameter  
Instrument : 6510(LA)  
Acc. Voltage : 20.0 kV  
Probe Current: 1.00000 nA  
PXA mode : T4  
Real Time : 34.43 sec  
Live Time : 30.00 sec  
Dead Time : 12 μs  
Counting Rate: 1338 cps  
Energy Range : 0 - 20 keV

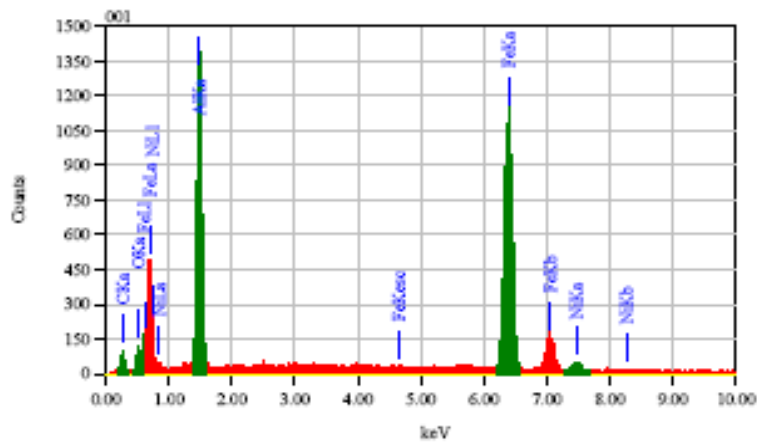
### Lampiran 5: Analisis EDX sampel Fe-50at.%Al-2at.%Ni 5jam pada titik 1

FeAl2Ni 5h Pos1

1/1



Title	: IMG1
Instrument	: 6510 (LA)
Volt	: 20.00 kV
Mag.	: x 3,000
Date	: 2010/06/03
Pixel	: 512 x 384



Acquisition Parameter	
Instrument	: 6510 (LA)
Acc. Voltage	: 20.0 kV
Probe Current	: 1.00000 nA
PEA mode	: T4
Real Time	: 37.11 sec
Live Time	: 30.00 sec
Dead Time	: 10 %
Counting Rate	: 2010 cps
Energy Range	: 0 - 20 keV

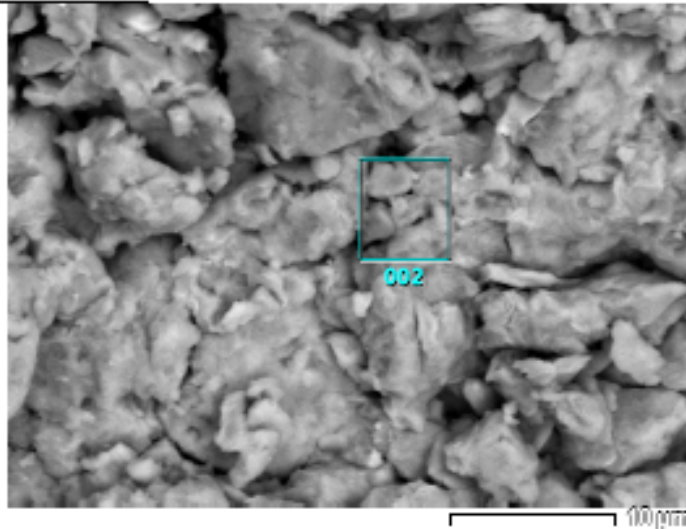
SAF Method Standardless Quantitative Analysis							
Fitting Coefficient : 0.1066							
Element	(keV)	Mass%	Error%	Atom%	Compound	Mass%	Cation
C K	0.277	10.00	0.12	27.15			1.9662
O K	0.525	3.87	0.12	7.90			4.6577
Al K	1.486	23.59	0.10	28.52			15.4303
Fe K	6.390	59.58	0.22	34.79			74.5074
Ni K	7.471	2.95	0.38	1.64			3.4303
Total		100.00		100.00			

JED-2300 AnalysisStation

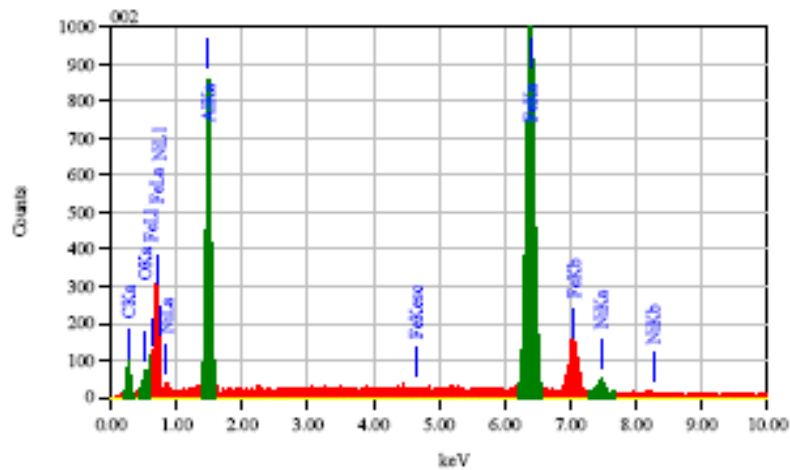
JEOL

### Lampiran 6: Analisis EDX sampel Fe-50at.%Al-2at.%Ni 5jam pada titik 2

Universitas Indonesia

FeAl<sub>2</sub>Ni 5h Pos2

1/1	
Title	: IMG1
Instrument	: 6510 (IA)
Volt	: 20.00 KV
Mag.	: x 3,000
Date	: 2010/06/03
Pixel	: 512 x 304



Acquisition Parameter	
Instrument	: 6510 (IA)
Acc. Voltage	: 20.0 kV
Probe Current	: 1.00000 nA
FEA mode	: T4
Real Time	: 35.42 sec
Live Time	: 30.00 sec
Dead Time	: 15 s
Counting Rate	: 1598 cps
Energy Range	: 0 - 20 keV

EDS Method Standardless Quantitative Analysis							
Fitting Coefficient : 0.1749							
Element	(keV)	Mass%	Error%	Atom%	Compound	Mass%	Cation
C K	0.277	10.79	0.09	30.35			2.2473
O K	0.525	2.70	0.09	5.70			3.2109
Al K	1.486	18.12	0.08	22.69			11.0673
Fe K	6.390	65.00	0.17	39.32			79.6571
Ni K	7.471	3.38	0.29	1.94			3.8174
Total		100.00		100.00			

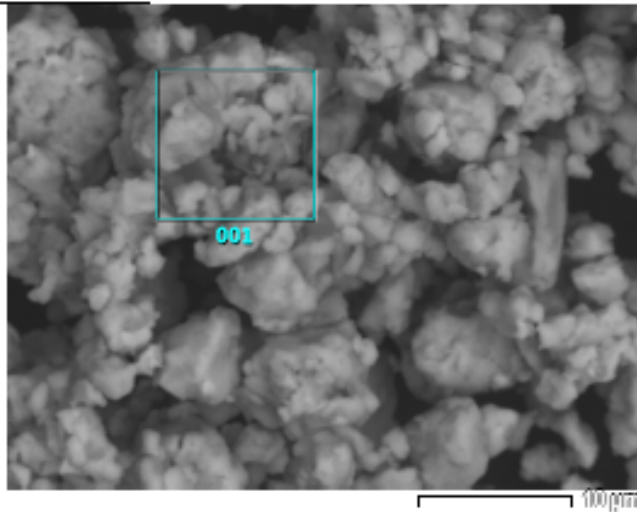
JED-2300 AnalysisStation

JEOL

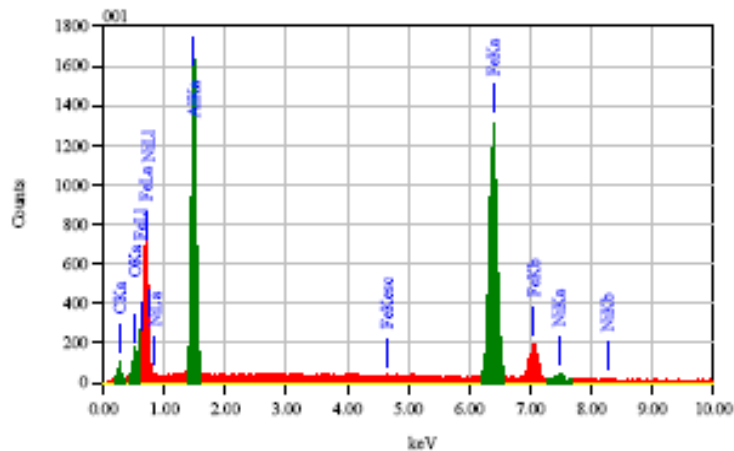
Lampiran 7: Analisis EDX sampel Fe-50at.%Al-2at.%Ni 10jam pada titik 1  
Universitas Indonesia

FeAl2Ni 10h Pos1

1/1



Title	: IMG1
Instrument	: 6510(LA)
Volt	: 20.00 kV
Mag.	: x 3,000
Date	: 2018/06/03
Pixel	: 512 x 384



Acquisition Parameter	
Instrument	: 6510(LA)
Acc. Voltage	: 20.0 kV
Probe Current	: 1.00000 nA
PIA mode	: 74
Real Time	: 39.40 sec
Live Time	: 30.00 sec
Dead Time	: 24 %
Counting Rate	: 2971 cps
Energy Range	: 0 - 20 keV

SAF Method Standardless Quantitative Analysis  
Fitting Coefficient : 0.2029

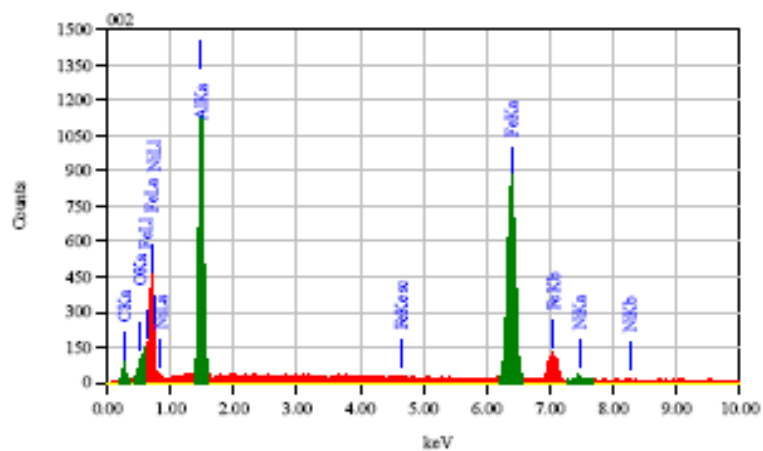
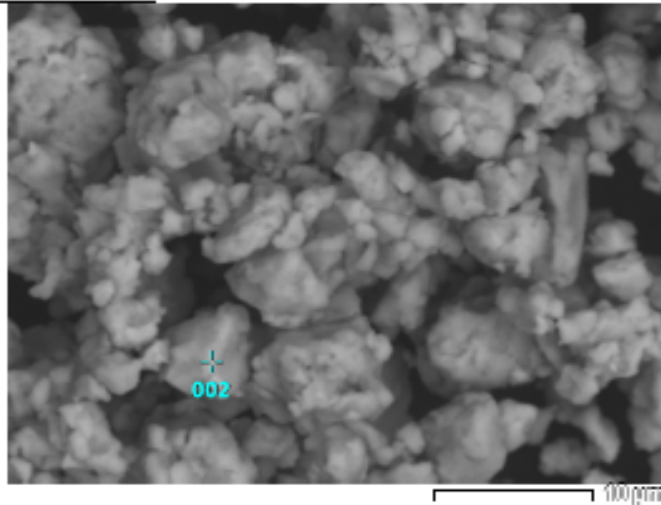
Element	(keV)	Mask	Error%	Atom%	Compound	Mask	Cation	K
C K	0.277	8.79	0.15	24.04				1.6901
O K	0.525	4.82	0.14	9.90				5.8701
Al K	1.486	24.27	0.12	29.56				15.8107
Fe K	6.390	60.36	0.27	35.52				74.5952
Ni K	7.471	1.76	0.45	0.98				2.0178
Total		100.00		100.00				

JED-2300 AnalysisStation

JEOL

### Lampiran 8: Analisis EDX sampel Fe-50at.%Al-2at.%Ni 10 jam pada titik 2

Universitas Indonesia

FeAl<sub>2</sub>Ni 10h Pos2

EDS Method Standardless Quantitative Analysis  
Fitting Coefficient : 0.2163

Element	(keV)	Mass%	Error%	Atom%	Compound	Mass%	Cation	Z
C	0.277	9.87	0.15	26.72				1,9168
O	0.525	3.58	0.14	7.27				4,3092
Al	1.486	25.10	0.12	39.26				16,7616
Fe	6.398	59.87	0.27	34.87				75,1633
Ni	7.471	1.58	0.44	0.88				1,8491
Total		100.00		100.00				

1/1

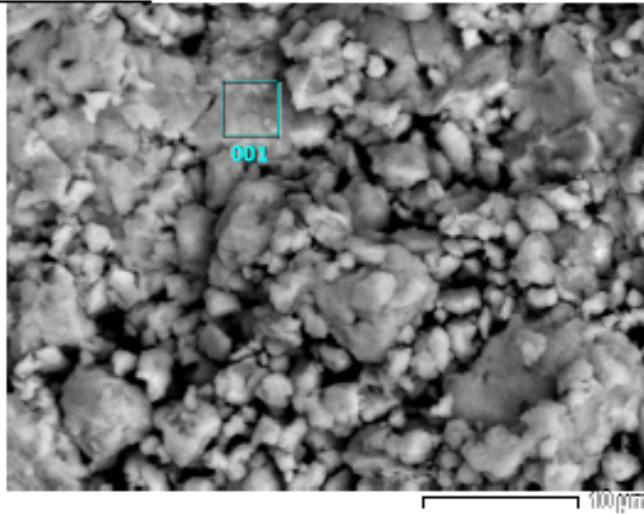
Title	: IMG1
Instrument	: 6510(LA)
Volt	: 20.00 kV
Mag.	: x 3,000
Date	: 2010/06/03
Pixel	: 512 x 384

Acquisition Parameter	
Instrument	: 6510(LA)
Acc. Voltage	: 20.0 kV
Probe Current	: 1.00000 nA
PEA mode	: T4
Real Time	: 35.30 sec
Live Time	: 30.20 sec
Dead Time	: 15 %
Counting Rate	: 1603 cps
Energy Range	: 0 - 20 keV

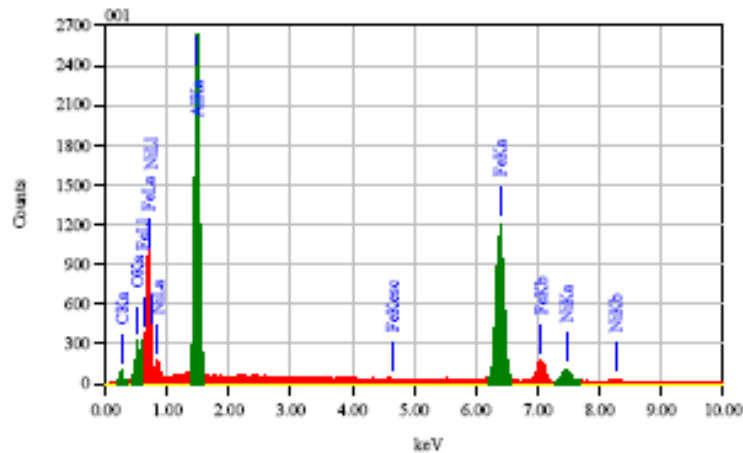
Lampiran 9: Analisis EDX sampel Fe-50at.%Al-5at.%Ni 10jam pada titik 2

FeAl5Ni 10h Pos1

1/1



Title	: IMG1
Instrument	: 6510(LA)
Volt	: 20.00 kV
Mag.	: x 3,000
Date	: 2010/06/23
Pixel	: 512 x 384



Acquisition Parameter

Instrument	: 6510(LA)
Acc. Voltage	: 20.0 kV
Probe Current	: 1.00000 nA
DEA mode	: T4
Real Time	: 40.66 sec
Live Time	: 30.00 sec
Dead Time	: 26 %
Counting Rate	: 2934 cps
Energy Range	: 0 - 20 keV

SAF Method Standardless Quantitative Analysis  
Fitting Coefficient : 0.2056

Element	(keV)	Mass%	Error%	Atom%	Compound	Mass	Cation	K
C K <sup>a</sup>	0.277	7.89	0.21	18.29				1.2326
O K	0.525	8.87	0.17	15.63				9.9146
Al K	1.486	32.30	0.14	37.08				22.8953
Fe K	6.398	47.23	0.33	26.20				59.6509
Ni K	7.471	5.31	0.54	2.80				6.3066
Total		100.00		100.00				

JED-2300 Analysis Station

JEOL

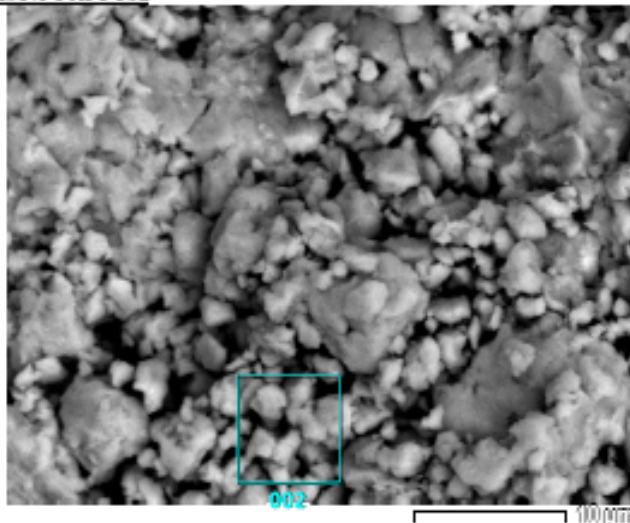
Lampiran 10: Analisis EDX sampel Fe-50at.%Al-5at.%Ni 10jam pada titik 2

Universitas Indonesia

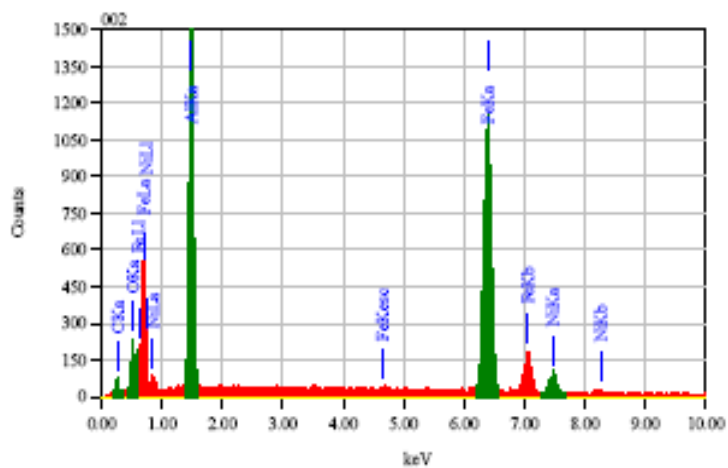


FeAl5Ni 10h Pos2

1/1



Title	: IMG1
Instrument	: 6510(LA)
Volt	: 20.00 kV
Mag.	: x 3,000
Date	: 2010/06/03
Pixel	: 512 x 304



Acquisition Parameter	
Instrument	: 6510(LA)
Acc. Voltage	: 20.0 kV
Probe Current	: 1.00000 nA
FEA mode	: T4
Real Time	: 37.70 sec
Live Time	: 30.00 sec
Dead Time	: 20 %
Counting Rate	: 2240 cps
Energy Range	: 0 - 20 keV

EDS Method Standardless Quantitative Analysis  
Fitting Coefficient : 0.1956

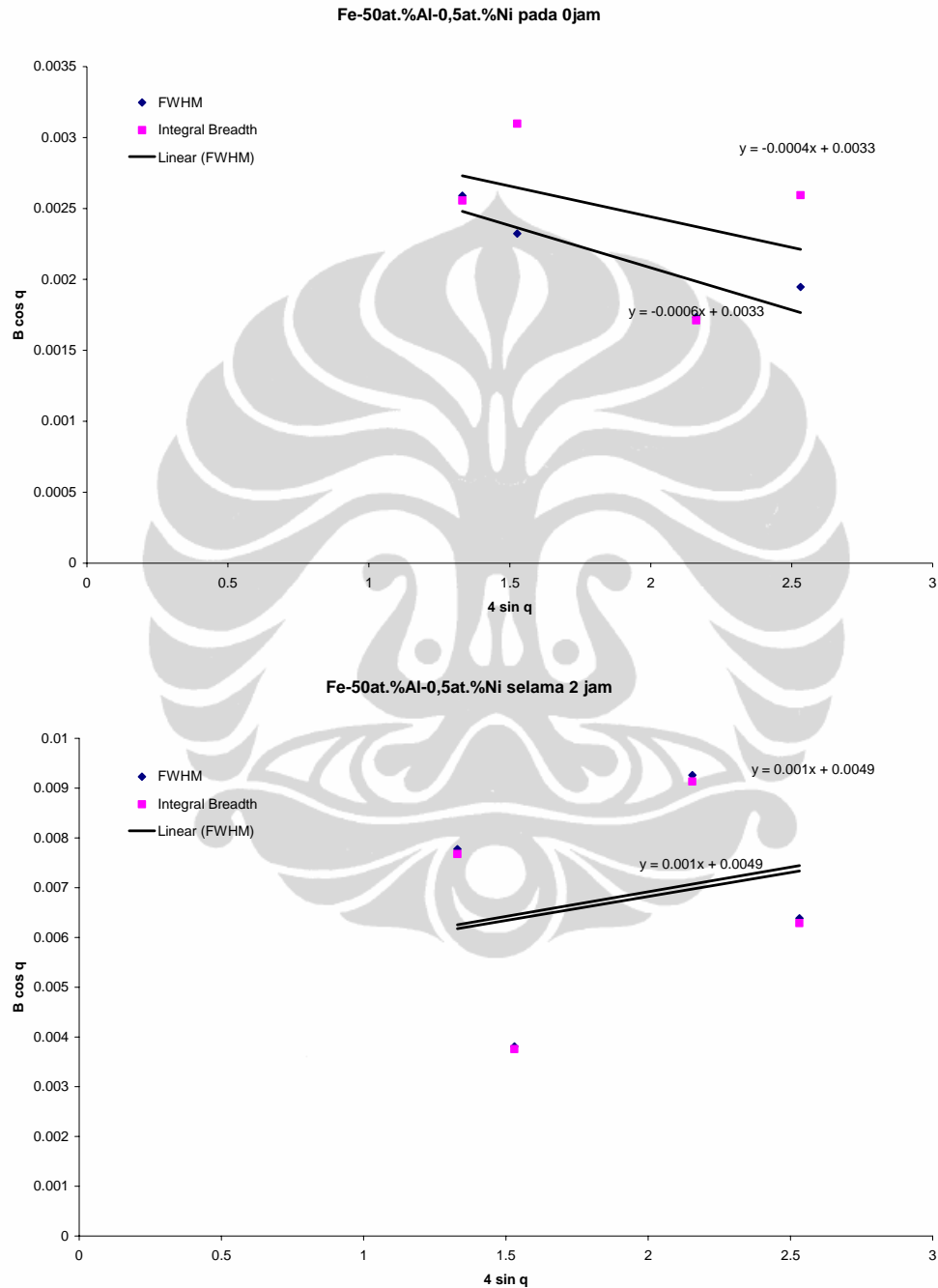
Element	(keV)	Mass%	Error%	Atom%	Compound	Mass%	Cation	Z
C K $\alpha$	0.277	5.44	0.14	15.45				0.9915
O K $\alpha$	0.525	7.02	0.12	14.94				8.7832
Al K $\alpha$	1.486	25.07	0.12	31.66				15.5911
Fe K $\alpha$	6.390	56.70	0.25	34.60				68.1805
Ni K $\alpha$	7.471	5.77	0.41	3.35				6.4457
Total		100.00		100.00				

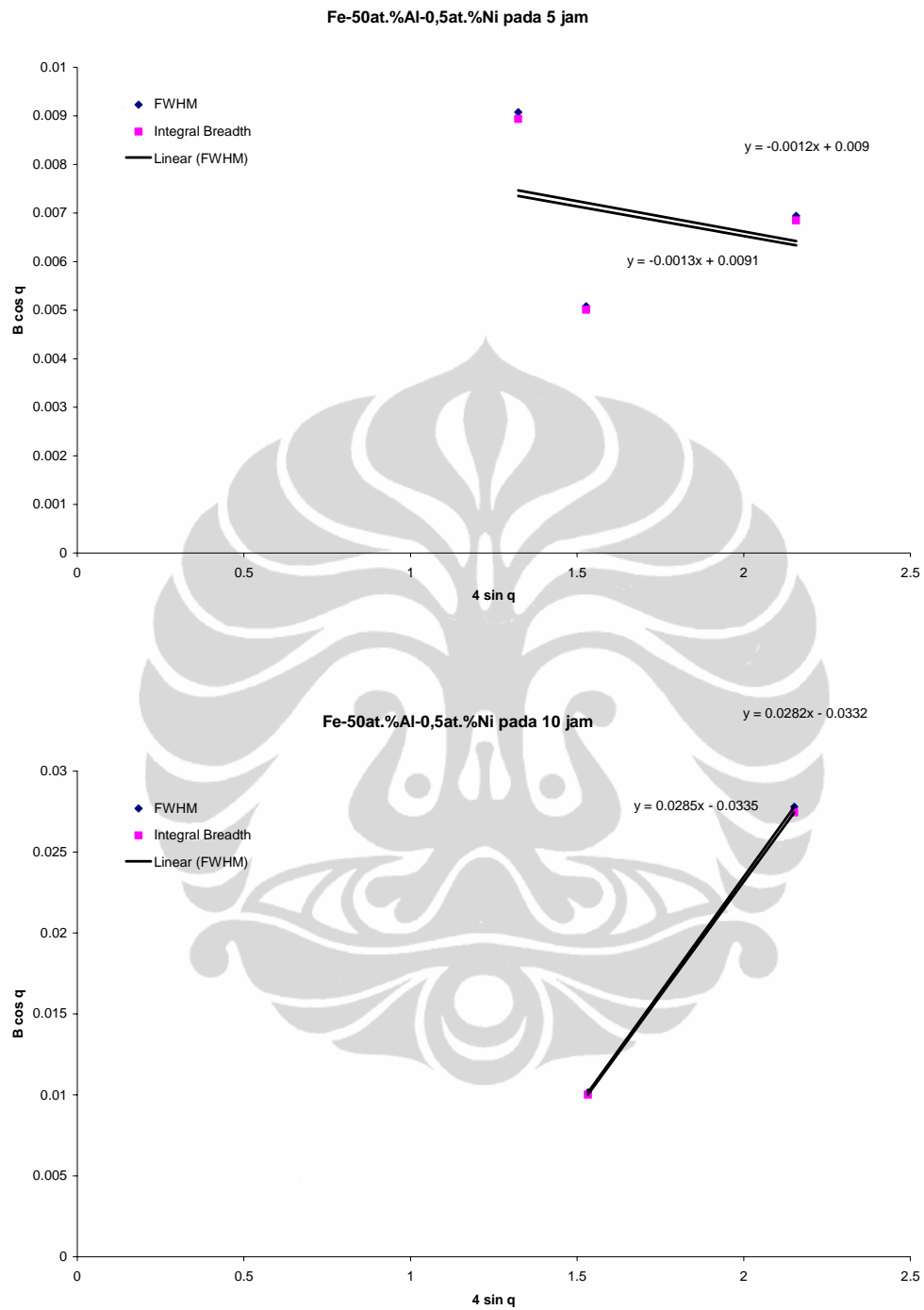
JED-2300 AnalysisStation

JEOL

Universitas Indonesia

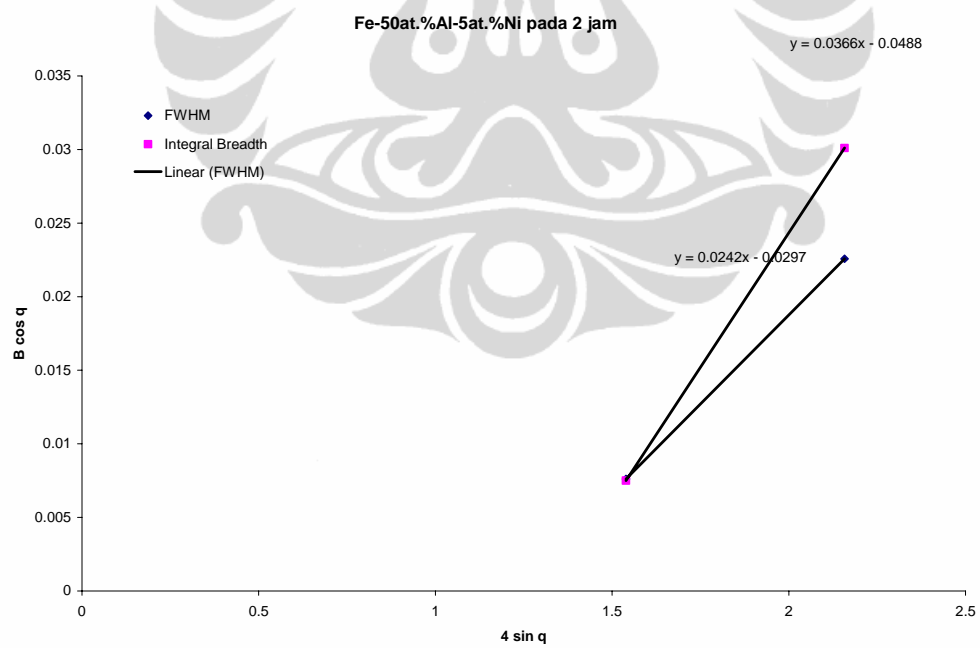
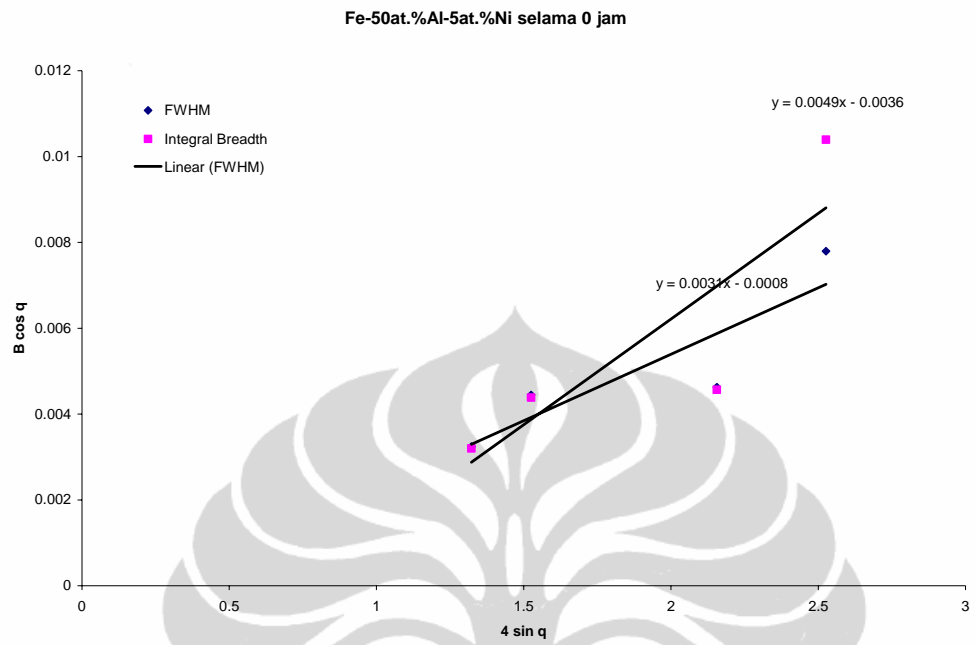
### Lampiran 11: Persamaan linier Al pada sampel Fe-50at.%Al-0,5at.Ni

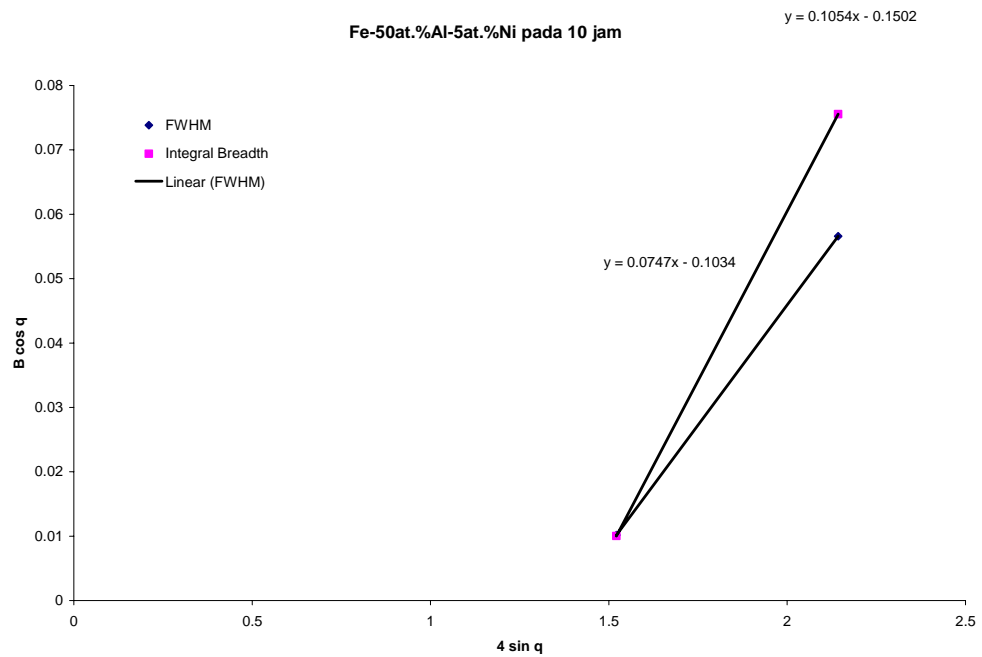
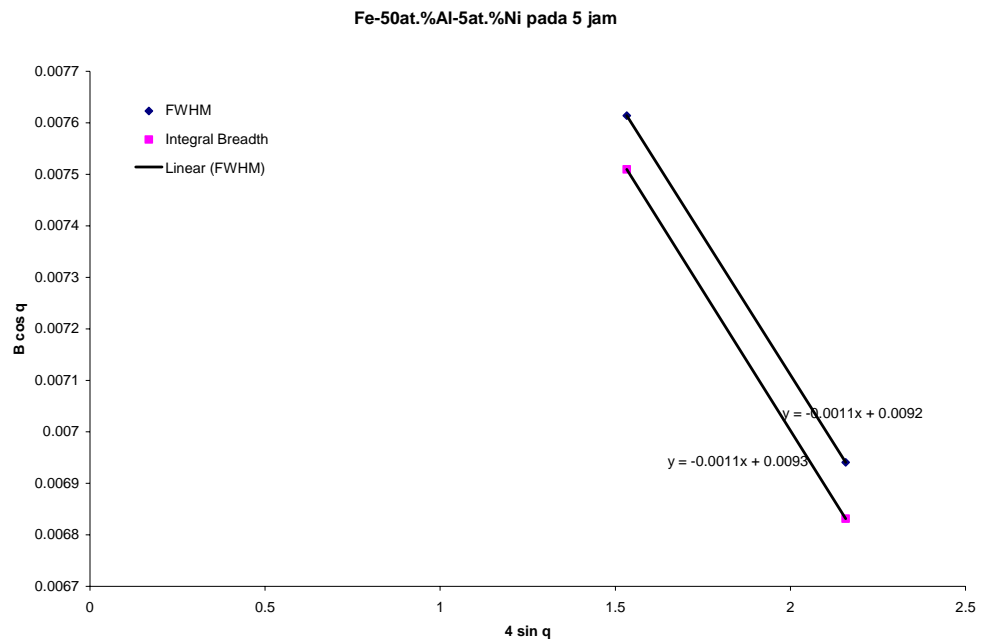




Lampiran 12: Persamaan linier Al pada serbuk Fe-50at.%Al-5at.%Ni

Universitas Indonesia





Lampiran 13. Data PDF