

UNIVERSITAS INDONESIA

**KARAKTERISASI MAGNETIK DAN ABSORPSI GELOMBANG MIKRO
MATERIAL MAGNET BERBAHAN DASAR BARIUM HEXAFERRITE**

DISERTASI

MILIK PERPUSTAKAAN
FMIPA - UI

PRIYONO
NPM. 8305000035

PERPUSTAKAAN
FAKULTAS MIPA-UI
TIDAK DIPINJAMKAN
HANYA BACA DITEMPAT

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI : MATERIALS SCIENCE
UNIVERSITAS INDONESIA
2010**

UNIVERSITAS INDONESIA

**KARAKTERISASI MAGNETIK DAN ABSORPSI GELOMBANG MIKRO
MATERIAL MAGNET BERBAHAN DASAR BARIUM HEXAFERRITE**

DISERTASI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh Gelar Doktor

MILIK PERPUSTAKAAN
FMIPA - UI

PRIYONO
NPM. 830500035

PERPUSTAKAAN
FAKULTAS MIPA-UI
TIDAK DIPINJAMKAN
HANYA BACA DITEMPAT

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI : MATERIALS SCIENCE
UNIVERSITAS INDONESIA
2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**MILIK PERPUSTAKAAN
FMIPA - UI**

**Nama : Priyono
NPM : 8305000035
Tanda tangan :
Tanggal :**

HALAMAN PENGESAHAN

Disertasi ini diajukan oleh :

Nama : Priyono
NPM : 8305000035
Program Studi : Materials Sciences
Judul Disertasi : **Karakterisasi Magnetik dan Absorpsi Gelombang Mikro Material Magnet Berbahan Dasar Barium Hexaferrite**

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

DEWAN PENGUJI

Promotor	: Dr. Azwar Manaf, M. Met	(.....)
Kopromotor	: Dr Budhy Kurniawan	(.....)
Ketua Sidang	: Dr. Adi Basukriadi, M.Sc	(.....)
Team Penguji	: Dr. Suharjo Poertadji (Anggota)	(.....)
	Dr. Ridwan (Anggota)	(.....)
	Dr. Muhammad Hikam (Anggota)	(.....)
	Dr. Mohammad Aziz Majidi (Anggota)	(.....)

Ditetapkan di:

Tanggal:.....

KATA PENGANTAR

Saya memberi penghargaan yang sangat tinggi kepada kedua orang tua dan mertua serta keluarga atas segala dorongan dan pengorbanan yang diberikan mulai dari pemberian izin atas keinginan untuk melanjutkan studi program doctoral. Saya sadar sepenuhnya bahwa awal perjalanan yang baik dan kesuksesan tentu atas keterlibatan semua pihak di sekitar kehidupan saya. Saya harus memberikan penghargaan dan permintaan maaf kepada Istri dan kedua anak saya Hanif Alfian Aliefananda dan Hafidz Fadlila Akbar atas segala pengorbanan dan dengan kerelaannya ditinggalkan selama tiga tahun bahkan lebih dari itu.

Saya juga sangat percaya bahwa keberhasilan berkat dukungan oleh beberapa staf akademik di lingkungan Kampus Universitas Diponegoro khususnya Jurusan Fisika, juga seluruh staf akademis Program Materials Sciences Universitas Indonesia. Kepada Dr. Azwar manaf. M.Met selaku Promotor dan Dr. Budy Kurniawan yang telah memberikan bimbingan dan nasehat serta ilmu yang sangat bermanfaat dalam penelitian saya. Kepada Dr. Bambang Soegijono yang banyak memberi pelatihan untuk berbagai peralatan pengujian XRD, XRF dan SEM serta Dr. Djoko Triyono yang memberikan kuliah material magnetik serta beberapa Dosen program doctoral yang tidak mungkin saya sebutkan satu persatu.

Penghargaan juga saya sampaikan kepada Soeprapto, Edi Gunarto dan Edy Junaedi serta Musni Ahyani sahabat dan teman diskusi. Kepada Erfan Handoko, Yoventina, dan semua rekan kerja di program pasca sarjana Universitas Indonesia. Saya juga minta beribu maaf atas segala kesalahan kepada teman teman semua selama kita bekerja bersama di Laboratorium yang terkadang membuat kita frustrasi atas berbagai kegagalan yang ditemui selama penelitian.

Yang terakhir dari ungkapan, pernyataan dan harapan semoga apa apa yang telah kita lakukan bersama dapat memberikan satu nilai tambah bagi kita. Hasil karya yang jauh dari sempurna ini semoga dapat menjadi salah satu pintu masuk untuk kelanjutan penelitian tentang material magnet khususnya yang berbahan dasar ferrit. Harapan terakhir dari penulis semoga karya ini dapat dikritisasi untuk kesempurnaan dan mudah mudahan bermanfaat bagi yang membutuhkannya.

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Priyono
NPM : 8305000035
Program Studi : Material Sciences
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu pengetahuan Alam Universitas Indonesia
Jenis Karya : Disertasi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneklusif (Non-Exclusive Royalty-Free Right) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

KARAKTERISASI MAGNETIK DAN ABSORPSI GELOMBANG MIKRO MATERIAL MAGNET BERBAHAN DASAR BARIUM HEXAFERRITE

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan hak bebas Royalti Noneklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat dan memublikasikan 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,
Pada tanggal : Januari 2010
yang menyatakan

Priyono

Nama : Priyono
Program Studi : Ilmu Material
Judul : Karakterisasi Magnetik dan Absorpsi Gelombang Mikro Material Magnet Berbahan Dasar Barium Hexaferrite

Abstrak

Ferrite banyak dikenal sebagai material yang digunakan untuk magnet permanen, maupun sebagai material magnet tidak permanen dan banyak digunakan dalam berbagai aplikasinya seperti penyimpanan data, *computer*, perangkat gelombang radio, televisi hingga gelombang mikro. Disamping itu banyak digunakan sebagai *Electromagnetic Impedance* (EMI) yang mampu melindungi sistem perangkat elektronik dari gangguan interferensi. *Ferrite* juga difungsikan sebagai material penyerap (*absorber*) gelombang mikro untuk mereduksi radiasi pantul pada perangkat anti deteksi (*stealth*). Penelitian ini mengembangkan material *hexaferrite* tipe-M ($\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$) sebagai absorbing material melalui rekayasa struktur dengan metoda mekanika milling (*mechanical alloying*), khususnya substitusi secara parsial ion Fe dengan ion Mn dan ion Ti sehingga membentuk senyawa $\text{BaO} \cdot 6(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Ti})_2\text{O}_3$.

Pembentukan fasa $\text{BaFe}_{12-2x}(\text{MnTi})_x\text{O}_{19}$ (x bervariasi dari 0.0 hingga 2,5) diperoleh melalui dua tahap, diawali oleh substitusi ion Mn dan ion Ti terhadap ion Fe dalam komponen material Fe_2O_3 untuk membentuk fasa $(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Ti})_2\text{O}_3$. Kemudian material hasil substitusi dipadukan secara mekanik dengan komponen BaCO_3 untuk membentuk fasa barium *hexaferrite* tipe - M, setelah melalui reaksi padat. Hasil sintesis diuji dengan difraksi sinar X (XRD) untuk memastikan fasa material yang terbentuk. Observasi mikrostruktur material dilakukan baik dengan SEM maupun TEM untuk mengetahui ukuran dan morfologi kristal yang terbentuk. Perangkat *permeagraph* yang dilengkapi dengan medan magnet luar hingga 2,15 T digunakan untuk kajian sifat-sifat magnetik. Kajian terhadap karakteristik serapan gelombang elektromagnetik oleh material yang diteliti dilaksanakan melalui perangkat Network Analyser (HP-8753ES) terutama pada jangkauan frekuensi yang tersedia 1 GHz hingga 6 GHz.

Hasil XRD terhadap sintesis komponen material memastikan bahwa substitusi partial ion Fe^{+3} dengan ion Mn^{+2} dan Ti^{+4} dapat berjalan dengan baik yaitu pola difraksi Fe_2O_3 dapat dipertahankan pasca substitusi parsial. Demikian juga dengan material $\text{BaFe}_{12-2x}(\text{MnTi})_x\text{O}_{19}$. Namun evaluasi parameter sel satuan menunjukkan terjadi perubahan parameter kisi fasa $\text{BaFe}_{12-2x}(\text{MnTi})_x\text{O}_{19}$ dari $c = 23.2093$ nm pada nilai konvensional $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ menjadi $c = 22.8146$ nm pada $\text{BaFe}_7(\text{MnTi})_{2.5}\text{O}_{19}$, sedangkan nilai parameter kisi a cenderung konstan dengan kisaran 5.8839 nm (nilai konvensionalnya 5.8862 nm). Sebagai konsekuensi lain dari substitusi ion Mn dan ion Ti dalam material $\text{BaFe}_{12-2x}(\text{MnTi})_x\text{O}_{19}$ adalah terjadinya perubahan sifat magnetik terutama koersifitas yang bertambah rendah nilainya dengan bertambahnya fraksi ion Mn dan ion Ti. Dari hasil pengujian diperoleh bahwa koersivitas untuk $x = 0$ adalah $142 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$, turun secara signifikan menjadi $3 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ pada $x = 2,5$. Magnetisasi total juga mengalami penurunan nilai karena berkurangnya fraksi ion Fe dalam $\text{BaFe}_{12-2x}(\text{MnTi})_x\text{O}_{19}$ dari $\sim 0,38$ T (untuk $x = 0$) menjadi $\sim 0,21$ T (untuk $x = 2,5$). Nilai koersivitas yang rendah, magnetisasi total yang tinggi serta resistivitas listrik yang besar adalah beberapa sifat yang dikehendaki oleh material untuk berperan sebagai material penyerap gelombang elektromagnetik.

Serapan gelombang mikro pada material ferrite dengan $0 < x < 2,0$ dikarakteristikan oleh serapan pada dua daerah frekuensi dengan jangkauan frekuensi yang cukup lebar. Serapan pertama terjadi pada jangkauan frekuensi ~ 1250 MHz sampai dengan ~ 2750 MHz. Pada jangkauan frekuensi ini material (tidak termasuk untuk $x = 0$) memperlihatkan fraksi serapan yang hampir sama mencapai nilai -40 dB. Daerah frekuensi serapan kedua terjadi pada jangkauan frekuensi ~ 2750 MHz sampai dengan 5000 MHz. dalam jangkauan frekuensi ini ketiga jenis material memiliki karakteristik berbeda. Dengan meningkatnya fraksi ion substitusi jangkauan frekuensi serapan diperlebar meskipun terjadi penurunan nilai *reflection loss*. Pada material dengan fraksi ion substitusi $x = 2,5$ terjadi pergeseran frekuensi serapan pada jangkauan frekuensi serapan pertama disertai dengan peningkatan pelebaran jangkauan frekuensi. Sebagai kesimpulan, Karakteristik *electromagnetic wave absorber* material $\text{BaFe}_{12-2x}(\text{MnTi})_x\text{O}_{19}$ memiliki frekuensi serapan dengan rentang frekuensi yang lebar pada daerah frekuensi $1 - 6$ GHz. Pada rentang frekuensi tersebut terjadi serapan gelombang pada dua frekuensi berbeda yaitu pada ~ 2000 MHz dan ~ 3500 MHz dengan faktor penurunan koefisien refleksi (*reflection loss*) yang relatif rendah mencapai -30 sampai dengan -40 dB. Rentang frekuensi serapan meningkat dengan meningkatnya fraksi ion substitusi Ti dan Mn. Nanostruktur material ikut berperan dalam pelebaran frekuensi serapan gelombang elektromagnetik.

Kata kunci : M-Type Barium Hexaferrite, Substitusi, Absorption Gelombang mikro,

Name : Priyono
Study Program : Material Sciences
Title : Magnetic and Microwave Absorption Characteristic of Barium Hexaferrite Based Magnetic Materials

ABSTRACT

Ferrite was widely known for a material used for permanent magnet as well as for non-permanent magnet. It was also widely used in various applications such as in media storage, computers, radio frequency components, televisions and even in microwaves. In addition to that, it was also used as an Electromagnetic Impedance (EMI), which was able to protect electronic components from interference. Ferrite was also used as the material to absorb microwaves to reduce a reflective radiation in devices with stealth capabilities. This research was intended to develop Type-M hexaferrite material ($\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$) as an absorbing material through structural engineering with a mechanical milling (mechanical alloying) method, specifically through partial substitution of Fe ion with Mn and Ti ions to form the $\text{BaO} \cdot 6(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Ti})_2\text{O}_3$ compound.

The formation of $\text{BaFe}_{12-2x}(\text{MnTi})_x\text{O}_{19}$ phase (x varied from 0.0 to 2.5) was obtained through two stages, beginning with the substitution of the Fe ion with Mn and Ti ions in the material component of Fe_2O_3 to form the $(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Ti})_2\text{O}_3$ phase. Next, the result of this substitution was combined mechanically with BaCO_3 component to form the Type-M barium hexaferrite phase, after undergoing a solid reaction. The result of this synthesis was tested using X Ray Diffraction (XRD) to ascertain the formed phase material. The material's structural observation was done with SEM as well as TEM to ascertain the dimension and morphology of the formed crystals. The Permeagraph device, which was equipped with external magnetic field up to 2.15 T, was used to study the magnetic characteristics. The study on the characteristic of the electromagnetic wave absorption was done utilizing the Network Analyzer (HP-8753ES) particularly within the available frequency range from 1 GHz to 6 GHz.

The result of the XRD of the component material synthesis showed that the partial substitution of Fe ion with Mn^{+2} and Ti^{+4} ions had gone well as in the diffraction pattern of Fe_2O_3 which had been maintained after the partial substitution. Likewise the $\text{BaFe}_{12-2x}(\text{MnTi})_x\text{O}_{19}$. However, an evaluation of the cell unit parameter showed a change in the grid parameter of the $\text{BaFe}_{12-2x}(\text{MnTi})_x\text{O}_{19}$ phase in $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ conventional value from $c=23.2093$ nm to $c=22.8146$ nm in $\text{BaFe}_7(\text{MnTi})_{25}\text{O}_{19}$ meanwhile the grid of a parameter

value tend to be constant at the range of 5.8839 nm (the conventional value being 5.8862 nm). Another consequence of the substitution of Mn and Ti ions in $\text{BaFe}_{12-2x}(\text{MnTi})_x\text{O}_{19}$ was the change in magnetic characteristic specifically in the lowering of the coercivity with the increase of the Mn and Ti ions fractions. Test result showed that the coercivity for $x=0$ was $142 \text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$ decreased drastically to $3 \text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$ for $x=2.5$. The total of magnetizing was also decreased in value due to the reduced Fe ion fraction in $\text{BaFe}_{12-2x}(\text{MnTi})_x\text{O}_{19}$ from $\sim 0.38 \text{ T}$ (for $x=0$) to $\sim 0.21 \text{ T}$ (for $x=2.5$). The low coercivity, high magnetizing and high resistivity to electricity are amongst the desired characteristics in a material so as to be useful as an electromagnetic wave absorber.

Microwave absorption in ferrite material with $0 < x < 2.0$ was characterized by two way absorption within the frequency ranging from $\sim 1250 \text{ MHz}$ to $\sim 2750 \text{ MHz}$. Within this range a material (excluding for $x=0$) showed an almost similar absorption fraction reaching a value of -40 dB . The second frequency absorption area occurred at the frequency of $\sim 2750 \text{ MHz}$ up to 5000 MHz within this frequency range the three materials showed different characteristics. With the increasing substituted ions, the frequency range absorption widened, even though there was a decrease in the reflection loss value. In a material where the substituted ion fraction $x=2.5$ a shift in absorption frequency in the first absorption frequency range would occur, accompanied with a widening of frequency range.

As a conclusion, $\text{BaFe}_{12-2x}(\text{MnTi})_x\text{O}_{19}$ characteristic as an electromagnetic wave absorber material possesses a wide absorption frequency within the range of 1 to 6 GHz. In this range the second wave absorption occurs in two different frequencies namely at $\sim 2000 \text{ MHz}$ and $\sim 3500 \text{ MHz}$ with a lowering of the reflection loss coefficient which was relatively low around -30 to -40 dB . The range of the absorption frequency will increase along an increase in Mn and Ti ions substitution. The structure of the nanomaterial also played a role in the widening of the electromagnetic wave absorption.

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
PENGESAHAN.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	vii
ABSTRAK.....	vii
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
1. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.1.1. Perkembangan Penelitian Magnet Permanen.....	2
1.1.2. Perkembangan Penelitian Magnet Permanen Basis Ferrite.....	5
1.2 Perumusan Masalah	6
1.3 Tujuan Penelitian	8
1.4 Manfaat Penelitian	8
1.5 Batasan Penelitian	9
1.6 Model Operasional Penelitian.....	9
2. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Klasifikasi Material Berdasar pada Sifat Magnetik.....	11
2.2 Resistivitas Listrik.....	12
2.3 Permeabilitas dan Permittivitas Ferrite.....	14
2.4 Material Ferrite untuk Absorpsi Gelombang Elektromagnet.....	25
2.5 Resonansi Elektromagnetik.....	38
2.6 Kajian Teoritik Interaksi Gelombang Elektromagnetik Terhadap Perubahan Permeabilitas Material Magnetik	40
3. METODE PENELITIAN DAN PROSEDUR PERCOBAAN	
3.1 Preparasi Pembentukna Fasa $Fe_{2-x}Mn_xO_3$ Dan Fasa $Fe_{2-y}Ti_yO_3$	47
3.2 Preparasi Pembentukan Fasa $BaFe_{12-x-y}Mn_xTi_yO_9$	49
3.3 Penentuan Parameter Kisi Kristal.....	50
3.4 Pengujian Koefisien Transmisi, Koefisien refleksi dan <i>Reflection Loss</i> material	51
4. HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Senyawa Fasa $Fe_{2-x-y}Mn_xTi_yO_3$	54
4.2 Karakterisasi Dengan XRD.....	54
4.3 Substitusi ion Mn^{+2} dan Ti^{+4} pada Fe_2O_3	57
4.3.1 Substitusi ion Ti^{+4} pada Fe_2O_3	58
4.3.2 Substitusi ion Mn^{+2} pada Fe_2O_3	59
4.3.3 Substitusi ion Mn^{+2} dan Ti^{+4} pada Fe_2O_3	60

4.4 Pembentukan barium Ferrite Bersubstitusi ion Mn dan ion Ti^{+4}	63
4.4.1 Studi Pembentukan Fasa $BaFe_{12-(x+y)}Mn_xTi_yO_{19}$	63
4.4.2 Fasa Nanostruktur dan Nanokomposit.....	65
4.4.2.1 Pembentukan Nanostruktur $BaFe_{125}O_{19}$	65
4.4.2.2 Pembentukan Nanophasebarium Hexaferrite Tersubstitusi ion Mn dan Ti.....	67
4.4.3 Pembentukan Fasa Nanokomposit $BaFe_{12-(x+y)}Mn_xTi_yO_{19}/Fe_3Si$	74
4.5 Distribusi Ukuran Partikel Selama Proses Mekanika Milling	75
4.6 Sifat Listrik fasa $BaFe_{12-(x+y)}Mn_xTi_yO_{19}$ ($x = y = 0.0; 0.1; 1.5; 2.5$).....	77
4.7 Sifat Magnetik Mikrostruktur $BaFe_{12-(x+y)}Mn_xTi_yO_{19}$	79
4.7.1 Sifat Magnetik Nanostruktur $BaFe_{12}O_{19}$	83
4.7.2 Sifat Magnetik Nanostruktur $BaFe_{12-(x+y)}Mn_xTi_yO_{19}$	86
4.8 Serapan Gelombang Elektromagnetik Fasa $BaFe_{12-(x+y)}Mn_xTi_yO_{19}$	87
5. KESIMPULAN DAN SARAN-SARAN	
5.1 Kesimpulan	94
5.2 Saran-Saran	95
DAFTAR REFERENSI	96

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Resistivitas listrik sebagai fungsi temperatur dan frekuensi untuk beberapa fasa dengan struktur spinel MnZn ferrit dan NiZn-Ferrit13

Tabel 2.2 Sistim Unit sell berbagai tipe struktur Hexaferrit.....20

Tabel 3.1 Fraksi berat ion $MnCO_3$ untuk membentuk fasa $Fe_{2-y}Mn_xO_3$48

Tabel 3.2 Fraksi berat ion TiO_2 untuk membentuk fasa $Fe_{2-y}Ti_yO_3$48

Tabel 3.3 Fraksi berat ion $MnCO_3$ dan TiO_2 untuk membentuk fasa $Fe_{2-y}Mn_xTi_yO_3$49

Tabel 4.1 Fraksi berat ion $MnCO_3$ dan TiO_2 untuk membentuk fasa $Fe_{2-y}Mn_xTi_yO_3$ 54

Tabel 4.2 Parameter kisi material $BaFe_{12-(x+y)}Mn_xTi_yO_{19}$ ($x = 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5$).....64

Tabel 4.3 Ukuran butir rata-rata kristal Fasa Ferrite dan Barium Hexaferrite.....68

Tabel 4.4 Parameter magnetic pada $BaFe_{12-(x+y)}Mn_xTi_yO_{19}$ ($x=0,0,5,1,5$ dan $2,5$ pada pemanasan 1300 C selama 4 jam81

Tabel 4.5 Parameter magnetic pada $BaFe_{12}O_{19}$ pada pemanasan $850\text{ }^{\circ}\text{C}$85

Tabel 4.6 Data detail Histerisis loop untuk $BaFe_{12-(x+y)}Mn_xTi_yO_{19}$ ($x = 1,5$;) melalui pemanasan 1200 C selama 4 jam.....87

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Nilai permeabilitas real μ' (A) dan imajiner μ'' (B) Untuk Mn-Zn ferrite dalam pengaruh medan magnet luar.....16

Gambar 2.2 Permeabilitas real(μ') dan imajiner (μ'') fasa magnet sinter $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_{1.8}O_4$16

Gambar 2.3 Perubahan permeabilitas real μ' dan imajiner μ'' akibat pengaruh stress.....17

Gambar 2.4 Permeabilitas kompleks material $BaFe_{12-2x}(CoZr)_xO_{19}$ sebagai fungsi frekuensi. (a) Nilai permeabilitas real dan (b) permeabilitas imajiner pada frekuensi hingga 14 GHz.....21

Gambar 2.5 Permeabilitas magnet fasa $BaFe_{16}Zn_{2-x}Co_xO_{27}$. gambar a ditentukan pada c-axis sedangkan b pada bidang c anisotropi.....22

Gambar 2.6 Permeabilitas complex (a) dan permitivitas complex (b) material magnet hexaferrite tipe Z yang didoping dengan Y_2O_324

Gambar 2.7 Berbagai bentuk dan kontruiksi material penyerap gelombang elektromagnet tipe FIRAM, TERASORB, TK THZ RAM dan berbagai tipe Eccisorb Carpet masingmasing berdimemensi $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 26

Gambar 2.8 Ilustrasi lapisan penyerap gelombang Elektromagnet tipe Dallenbach.....27

Gambar 2.9 Penyerap gelombang elektromagnet Untuk aplikasi pada microwave dari bahan dielektrikum tipe T RAM (A) dan bahan magnet (B) serta tipe C adalah MAGRAM atau Magnetic Radar Absorbing materials.....28

Gambar 2.10 Ilustrasi lapisan penyerap gelombang Elektromagnet dengan model Jauman,.....28

Gambar 2.11 Ilustrasi lapisan penyerap gelombang Elektromagnet dengan model Sallysburi.....29

Gambar 2.12 Refelksi loss untuk POX 90% MnZn-Ferrit(A)dengan berbagai variasi ketebalan sampel.....30

Gambar 2.13 Refelksi loss untuk Ni-Ferrit dengan berbagai variasi ketebalan sampel.....31

Gambar 2.14 Refleksi loss untuk bahan ferrit tipe Garnet $Ce_xY_{3-x}Fe_5O_{12}$ (Ce;YIG) pada $x=0.0; 0.05; 0.10$ dan 0.15	32
Gambar 2.15 Absorpsi gelombang mikro pada $BaCo_{0.4}Zn_{0.6}Fe_{24-x}O_{41}$ (Z-Type) yang didoping dengan Y_2O_3	32
Gambar 2.16 Reflektion loss untuk mikrokomposist $BaCoZnFe_{16}O_{27}$ yang didoping dengan V_2O_5	33
Gambar 2.17 Reflektion loss untuk mikrokomposist $BaFe_{12}O_{19}$ (Tipe M) yang sebagai fungsi medan magnet eksternal hingga ~ 13 T	34
Gambar 2.18 Pengaruh substitusi ion logam transisi (Zn;Ti; MnTi dan Co/Ti($x=0.0$ sd 2.0) terhadap Temperatur Curie fasa barium hexaferrite type-M.....	35
Gambar 2.19 Estimasi teoritis reflektivitas pada sampel $BaFe_{12-2x}Co_xZr_xO_{19}$	36
Gambar 2.20 Reflektion loss $BaFe_9Co_{1.5}Ti_{1.5}O_{19}$ (A), dan $BaFe_9Mn_{1.5}Co_{1.5}O_{19}$ (B) serta $BaFe_9Mn_{1.5}Ti_{1.5}O_{19}$ (C) pada ketebalan 1.5 mm.....	37
Gambar 2.21 Reflektion loss $BaFe_9Co_{1.5}Ti_{1.5}O_{19}$, dan $BaFe_9Mn_{1.5}Co_{1.5}O_{19}$ Serta $BaFe_9Mn_{1.5}Ti_{1.5}O_{19}$ pada ketebalan 2.5 mm.....	37
Gambar 3.2 Skema metoda penelitian tahap I pembentukan $Fe_{2-(x+y)}Mn_xTi_yO_3$	46
Gambar 3.2 Skema metoda penelitian tahap II pembentukan $BaFe_{12-(x+y)}Mn_xTi_yO_{19}$	47
Gambar 3.3 Skema perambatan gelombang elektronik dalam airline wave Guide.....	51
Gambar 3.4 Diagram blok pengukuran koefisien transmisi, dan koefisien refleksi dengan menggunakan network Analyser.....	52
Gambar 3.5 Skema rangkaian pengujian Refleksi dan transmisi Gelombang Mikro.....	52
Gambar 4.1 Pola difraksi Fe_2O_3 menggunakan sumber Anoda Cobalt ($\lambda=1.78896\text{\AA}$) dan pada pemanasan 1300 C.....	55
Gambar 4.2 Pola difraksi $MnCO_3$ menggunakan sumber Anoda Cobalt ($\lambda=1.78896\text{\AA}$).....	56

Gambar 4.3. Difraksi Percursor TiO_2 menggunakan sumber Anoda Cobalt ($\lambda=1.78896\text{\AA}$).....	56
Gambar 4.4 Pola Difraksi percursor BaCO_3 menggunakan sumber Anoda Cobalt ($\lambda=1.78896\text{\AA}$).....	57
Gambar 4.5 Pola difraksi (XRD) hasil substitusi ion Ti^{+4} pada Fe_2O_3 Melalui proses sintering pada temperatur 1300°C , 4 jam.....	58
Gambar 4.6 Pola difraksi (XRD) Hasil Substitusi Mn pada Fe_2O_3 melalui proses sintering pada temperatur 1300°C selama 4 jam.....	60
Gambar 4.7 Pola difraksi Substitusi ion Mn dan ion Ti dalam fasa Fe_2O_3 melalui proses pemaduan padat untuk membentuk fasa $\text{Fe}_{1.5}(\text{MnTi})_{0.5}\text{O}_3$	61
Gambar 4.8 Pola difraksi Substitusi ion Mn dan ion Ti dengan fraksi berat ion yang sama dalam fasa Fe_2O_3 pada pemanasan 1300°C selama 4 jam.....	62
Gambar 4.9 Pola difraksi Substitusi ion Mn dan ion Ti dalam fasa Fe_2O_3 dengan fraksi ion Mn > dari fraksi Ti dan fraksi ion Ti > dari fraksi ion Mn melalui proses pemaduan padat.....	63
Gambar 4.10 Pola difraksi pembentukan fasa $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ ($x = y = 0.0; 0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 2.5$).....	64
Gambar 4.11 Pola difraksi pembentukan fasa $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ terhadap berbagai waktu penahanan pada temperatur 850°C a) M Sebagai fasa Magnetik $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ sedangkan F mewakili fasa Fe_2O_3 sedangkan tanda panah sebagai fasa intermediate BaFe_2O_4	66
Gambar 4.12 Pola difraksi pembentukan fasa $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ a) pengaruh temperatur terhadap Ukuran butir kristal terhadap berbagai waktu penahanan pada temperatur 850°C	66
Gambar 4.13 Penumbuhan kristal difraksi fasa $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ ($x=y=1.5$) Hasil pemaduan mekanik untuk berbagai temperatur sinter selama 60 menit.....	67
Gambar 4.14 Penumbuhan kristal difraksi fasa $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ ($x=y=1.5$) Pada 400°C dan 500°C sampai 1200°C	68
Gambar 4.15 Foto TEM material Barium Hexaferrite dengan (a) substitusi Mn dan Ti Dan (b) non substitusi (b) (Konvensional $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$).....	70

Gambar 4.16 Perubahan pola intensitas difraksi fasa campuran BaFe ₉ (Mn,Ti) _{1.5} O ₁₉ /(30w%) Fe ₃ Si setelah menjalani proses mekanika milling selama 180 Jam.....	74
Gambar 4.17 Perubahan pola difraksi fasa campuran BaFe ₉ (Mn,Ti) _{1.5} O ₁₉ / (30w%) Fe ₃ Si pada berbagai temperatur pemaduan.....	75
Gambar 4.18 Hasil uji butir material magnet fasa BaCO ₃ + Fe _{2-(x+y)} Mn _x Ti _y O ₃ (x = y = 0.25) pada berbagai waktu milling dengan teknik Meckanical alloying.....	76
Gambar 4.19 Mikrostruktur paduan BaCO ₃ + Fe _{2-(x+y)} Mn _x Ti _y O ₃ untuk nilai x = y = 0.25 dengan waktu milling 40 jam dan 60 jam.....	77
Gambar 4.20 Nilai resistivitas listrik sampel BaFe _{12-(x+y)} Mn _x Ti _y O ₁₉ untuk x=y: 0,0;1,0;1,5 dan 2.5 diplot terhadap 1/T.....	78
Gambar 4.21 Nilai Log resistivitas listrik sampel BaFe _{12-(x+y)} Mn _x Ti _y O ₁₉ untuk x=y: 0,0;1,0;1,5 dan 2.5 terhadap 1/T.....	79
Gambar 4.22 Histerisis BaFe _{12-(x+y)} Mn _x Ti _y O ₁₉ (x=0,0;0.5;1.0; 1.5;2.0 dan 2.5) dengan temperatur penumbuhan 1200 C.....	80
Gambar 4.23 Grafik hubungan koersivitas dan saturasi terhadap komposisi material BaFe _{12-(x+y)} Mn _x Ti _y O ₁₉ (x = y = 0,0;0.5;1.0;1.5 dan 2.0 serta 2.5).....	81
Gambar 4.24 Grafik hubungan Remanen dan saturasi terhadap komposisi material BaFe _{12-(x+y)} Mn _x Ti _y O ₁₉ (x = y = 0,0.5,1.5 dan 2.5).....	82
Gambar 4.25 Karakteristik loop Histerisis material magnet BaFe ₁₂ O ₁₉ pada sinter 850 C dan berbagai waktu penumbuhan.....	83
Gambar 4.26 Pengaruh waktu penahana terhadap remanen serta saturasi magnetik fasa BaFe ₁₂ O ₁₉ yang mengalami pemanasan 850 C.....	84
Gambar 4.27 Pengaruh waktu penahana terhadap koersivitas serta saturasi magnetik fasa BaFe ₁₂ O ₁₉ yang mengalami pemanasan 850 C.....	85
Gambar 4.28. Histerisis loop Phasa BaFe ₉ Mn _{1.5} Ti _{1.5} O ₁₉ pada penahanan waktu sinter 1 jam dan 4 jam.....	86

Gambar 4.29. Grafik koefisien refleksi (S11) dan koefisien transmisi (S21) Gelombang elektromagnetik fasa BaFe _{12-(x+y)} Mn _x Ti _y O ₁₉ (x=y= 0.0) yang diukur dengan Network Analiser menggunakan Coaxial wave guide.....	88
Gambar 4.30 Grafik koefisien refleksi (S11) dan koefisien transmisi (S21) Gelombang elektromagnetik fasa BaFe _{12-(x+y)} Mn _x Ti _y O ₁₉ (x=y= 0.5) yang diukur dengan Network Analiser menggunakan Coaxial wave guide.....	88
Gambar 4.31 Grafik koefisien refleksi (S11) dan koefisien transmisi (S21) Gelombang elektromagnetik fasa BaFe _{12-(x+y)} Mn _x Ti _y O ₁₉ (x=y= 1.0) yang diukur dengan Network Analiser menggunakan Coaxial wave guide.....	89
Gambar 4.32 Grafik koefisien refleksi (S11) dan koefisien transmisi (S21) Gelombang elektromagnetik fasa BaFe _{12-(x+y)} Mn _x Ti _y O ₁₉ (x=y= 1.5) yang diukur dengan Network Analiser menggunakan Coaxial wave guide.....	90
Gambar 4.33 Grafik koefisien refleksi (S11) dan koefisien transmisi (S21) Gelombang elektromagnetik fasa BaFe _{12-(x+y)} Mn _x Ti _y O ₁₉ (x=y= 2.0) yang diukur dengan Network Analiser menggunakan Coaxial wave guide.....	90
Gambar 4.34 Grafik koefisien refleksi (S11) dan koefisien transmisi (S21) Gelombang elektromagnetik fasa BaFe _{12-(x+y)} Mn _x Ti _y O ₁₉ (x=y= 2.5) yang diukur dengan Network Analiser menggunakan Coaxial wave guide.....	91
Gambar 4.35 <i>Reflection loss</i> pada material BaFe _{12-(x+y)} Mn _x Ti _y O ₁₉ (x=y= 0.0;0.5; dan 1.0) pada ketebalan 1.2 mm.....	92
Gambar 4.36 <i>Reflection loss</i> pada material BaFe _{12-(x+y)} Mn _x Ti _y O ₁₉ (x=y= 2.5) pada ketebalan 1.2 mm.....	93

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pengembangan material magnet permanen yang berbasis logam tanah jarang (*rare earth*) terutama kaya dengan unsur Fe (*Fe-rich*) dengan Sistem dan memiliki sifat kemagnetan unggul masih terus dilakukan oleh banyak peneliti bahan magnet. Demikian juga dengan alloy magnet berbasis logam tanah jarang (*Rare earth*) sistem RE-TM-B [1-5]; Sm-Co[6-7] dan tidak terkecuali sistem keramik $MO.6 Fe_2O_3$ (M=Ba atau Sr)[8-10]. Supremasi rekayasa proses preparasi baik itu teknik konvensional seperti *Powder Metallurgy*[11] maupun teknik modern seperti *Rapid Solidification*[12] telah mampu menghasilkan sifat kemagnetan ekstrinsik yang mencapai 90-100 % nilai intrinsiknya. Hal ini menunjukkan bahwa seolah-olah jenis-jenis senyawa magnet baru menjadi sangat mendesak untuk dikembangkan.

Berbeda dengan kegiatan penelitian pada era millenium dua dimana berdasarkan berbagai publikasi, arah pengembangan penelitian pada lebih dari 100 tahun di belakang terfokus pada penemuan senyawa-senyawa baru. Ternyata pada awal millenium ke tiga dimana berdasarkan pengamatan melalui berbagai publikasi, arah pengembangan penelitian bahan magnet lebih terfokus pada rekayasa struktur dari material magnet yang pernah dikembangkan sebelumnya. Penelitian pada awal meillenium ketiga terfokuskan pada rekayasa material dengan penerapan *nanotechnology* dalam preparasi material magnet. Sebagai penerapan dari teknik rekayasa moderen ini telah membuka peluang baru untuk memperoleh magnet dengan sifat yang sangat unggul, misalnya saja fasa magnet $Nd_2Fe_{14}B$ yang memiliki nilai *maximum energy product*, $(BH)_{max}$ sebesar 512 kJ.m^{-3} [13] berpeluang di rekayasa untuk menghasilkan magnet dengan nilai $(BH)_{max}$ sebesar $\sim 1 \text{ MJ.m}^{-3}$ [14]. Implikasi lain dari penerapan teknologi tersebut adalah diperlukannya pemahaman baru tentang fenomena "nanomagnetism" material yang kini telah menarik banyak perhatian para peneliti teori[15-17].

Eksplorasi efek struktur terhadap sifat kemagnetan adalah terjadinya peningkatan nilai magnetisasi sisa (*remanen magnetisation*). Peningkatan nilai

remanen ini dapat menyebabkan meningkatnya nilai densitas energi magnet. Dari pandangan teknis, peningkatan densitas energi terkait erat dengan volume magnet. Dengan perkataan lain, densitas energi magnet yang tinggi dapat mengkompensasi penggunaan volume magnet yang relatif besar. Hal ini berpotensi untuk memenuhi tujuan miniaturisasi produk yang menjadi prioritas tuntutan masa kini. Dari pandangan ilmiah, adanya fenomena nilai terukur di atas nilai teori konvensional mengundang tantangan baru terhadap pemahaman *nanomagnetism*. Dengan perkataan lain diperlukan model-model *magnetism* yang baru untuk menjelaskan efek nanostruktur.

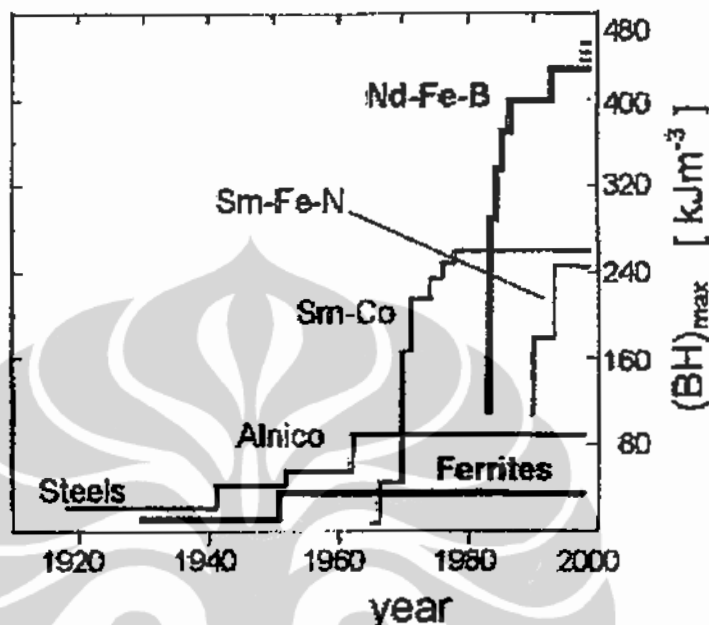
Demikian halnya dengan material magnet kelas ferrite seperti barium hexaferrite. Dengan rekayasa nanostruktur diharapkan mampu sebagai material magnet unggul sebagai material magnet permanen dan untuk aplikasi modern lain seperti *high density data storage*[18].

Dalam penelitian ini diharapkan mampu dihasilkan material magnet dengan sifat yang unggul melalui rekayasa struktur dalam orde skala nanometer dari material Barium hexaferrite ($\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$). Dengan modifikasi komponen ferrite (Fe_2O_3) melalui substitusi Mn dan Ti, serta rekayasa struktur diperoleh prototipe material magnet untuk aplikasi penyerapan gelombang mikro pada daerah frekuensi ultra tinggi (*ultra high frequency*)[19-21].

1.1.1. Perkembangan Penelitian Magnet Permanen

Perkembangan dramatis terhadap magnet permanen dimulai tahun 1980-an ketika untuk pertama kalinya dua kelompok peneliti terpisah memperkenalkan penemuannya tentang fasa magnet baru berbasis logam tanah jarang dan transisi (RE-TM-B). Sagawa dkk [22] dari kelompok peneliti Sumitomo Special Metals memperkenalkan magnet permanen Nd-Fe-B yang diproses melalui rute sintering atau *Powder Metallurgy*, sedangkan Croat dkk dari kelompok peneliti General Motors [23] memperkenalkan magnet permanen jenis yang sama yang diproses melalui rute *Rapid Solidification*. Material magnet permanen yang diperkenalkan tersebut dua-duanya berbasis fasa utama $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Sejak fasa magnet baru tersebut diperkenalkan, banyak perhatian para peneliti tercurah pada fasa magnet tersebut dan sejak saat itu penelitian magnet permanen dalam 20 tahun

belakangan ini terbukti terkonsentrasi pada pengembangan magnet permanen Nd-Fe-B.



Gambar 1. Perkembangan penelitian bidang magnet permanen dalam seratus tahun terakhir[2].

Hal ini tidak mengherankan mengingat fasa magnet $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ secara intrinsik memiliki sifat-sifat terutama sifat kemagnetan yang unggul antara lain medan anisotropi yang tinggi $\sim 7,8$ T, magnetisasi total yang tinggi $\sim 1,6$ T. Kedua besaran intrinsik ini memberikan peluang bagi material untuk memiliki densitas energi magnet yang sangat tinggi ~ 512 kJ.m^{-3} . Nilai teoretikal untuk magnet isotrop sebenarnya telah dapat dicapai melalui teknik *melt spinning* oleh Croat dkk [23] dimana nilai 112 kJ.m^{-3} (nilai teoretikal untuk orientasi random, isotrop) untuk densitas energi magnet dengan mudah dicapai, sedangkan untuk nilai teoretikal 512 kJ.m^{-3} telah didekati mencapai 80 % dengan proses konvensional sintering.

Perkembangan penelitian tentang magnet permanen logam tanah jarang berdasarkan pengamatan banyak mengarah kepada jenis baru magnet permanen yang dikenal sebagai "nanocomposite magnet" [24,25]. Magnet nanokomposit

sebenarnya adalah pengembangan magnet nanokristal multi-fasa. Pertama sekali diperkenalkan oleh Coe dkk di tahun 1989 dimana komposisi $\text{Nd}_{4.5}\text{Fe}_{77.5}\text{B}_{18}$ menghasilkan material 3-fasa dimana Fe_3B sebagai fasa utama (major phase) dan $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (sekitar 15 %) sebagai fasa kedua ditambah dengan fasa minor terdiri dari $\alpha\text{-Fe}$.

Magnet tersebut memiliki remanen ~ 1.2 T tertinggi pada masa itu dan jauh diatas nilai yang diprediksi oleh teori Stonner-Walford tetapi dengan koersifitas yang sangat rendah ~ 240 $\text{kA}\cdot\text{m}^{-1}$ oleh karena fasa Fe_3B sebagai fasa utama bersifat lunak. Oleh karena itu meskipun nilai J_r magnet jenis tsb sangat tinggi namun nilai koersifitas yang sangat rendah ini membatasi material magnet tersebut untuk mencapai $(\text{BH})_{\text{max}}$ yang tinggi dan pengembangan lanjut untuk eksploitasi komersial magnet jenis ini mendapat banyak hambatan. Jenis lain yang telah dikembangkan adalah alloy magnet Nd-Fe-B kandungan Nd rendah diproses dengan teknik melt spinning dimana pita-pita alloy menunjukkan nilai remanen > 1.0 T dengan koersifitas yang lebih tinggi.

Material memiliki fasa kedua (diamati sebagai partikel $\alpha\text{-Fe}$). Menarik untuk diperhatikan dari penelitian ini adalah partikel $\alpha\text{-Fe}$ adalah fasa magnet lunak tetapi loop histerial material ini menunjukkan jenis loop histeresis magnet keras. Hal ini dapat terjadi oleh karena interaksi antar fasa utama $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ berlangsung melalui media fasa kedua magnet lunak $\alpha\text{-Fe}$ yang berukuran butir ultra halus $\sim 8\text{-}10$ nm, yaitu jauh lebih kecil dibandingkan dengan panjang interaksi fasa lunak tsb (*exchange length* ~ 40 nm) [26]. Koersifitas magnet permanen Nd-Fe-B kandungan Nd rendah ini berkisar $\sim 500 - 1000$ $\text{kA}\cdot\text{m}^{-1}$ jauh lebih besar dari nilai minimum ($J_r/2$) untuk mempertahankan $(\text{BH})_{\text{max}}$. Dengan demikian nilai $(\text{BH})_{\text{max}} > 160$ $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ mudah dicapai. Nilai ini adalah 50 % lebih besar dari nilai $(\text{BH})_{\text{max}}$ magnet permanen Nd-Fe-B konvensional.

Sejak penemuan fenomena efek interaksi pertukaran dan struktur nanokomposit pada alloy magnet Nd-Fe-B. Berbagai teknik telah diperkenalkan seperti melt spinning, *mechanical alloying* dan kondensasi [27]. Studi teoritik tentang magnet nanokomposit juga gencar dilakukan tercatat seperti simulasi 3-dimensi nanokomposit $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ untuk berbagai komposisi fraksi volume dilakukan oleh Kronmuller dkk [28]. Coey dkk memperkenalkan ide magnet

nanokomposit $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\text{Fe-Co}$ untuk orientasi random dan acak untuk mencapai magnet dengan nilai teoritik $(\text{BH})_{\text{max}}$ menuju nilai 1 MJ.m^{-3} . Magnet permanen jenis ini sangat menarik oleh karena disamping harga produksi yang cenderung murah tetapi juga berpotensi untuk memperoleh magnet permanen dengan produk energi maksimum magnet dengan energi ultra tinggi yaitu $\sim 1 \text{ MJ.m}^{-3}$ [29].

Secara teori, nilai energi setinggi itu bisa diperoleh dari magnet nanokomposit Nd-Fe-B multi fasa dengan disain struktur yang ideal. Dengan adanya nilai $(\text{BH})_{\text{max}}$ baru dari prediksi teori magnet nanokomposit yaitu sebesar 1 MJ.m^{-3} maka itu berarti nilai tertinggi $(\text{BH})_{\text{max}}$ tertinggi pada saat ini yaitu sebesar 400 kJ.m^{-3} dari magnet permanen berbasis Nd-Fe-B baru mencapai $\sim 25\%$ nilai ekspektasi. Jelaslah difahami dari kenyataan ini bahwa penelitian dibidang magnet permanen terutama kelas Nd-Fe-B masih harus menempuh jalan yang sangat panjang.

1.1.2 Perkembangan Penelitian Magnet Permanen Basis Ferrite

Sejak disintesis pertama kali oleh Philips pada tahun 1952[30] material $\text{BaO}6\text{Fe}_2\text{O}_3$ digunakan sangat luas sebagai primadona magnet permanen saat itu, bahkan hingga sekarang masih menguasai 52% pangsa pasar magnet permanen di dunia[31]. Beberapa kelebihan yang dimiliki material ini adalah anisotropi magnetokristalin dan temperatur Currie yang tinggi serta saturasi magnetisasi total yang besar. Kelebihan lain material tersebut adalah memiliki stabilitas kimia yang baik serta tahan terhadap korosi. Disamping itu sifat resistivitas yang besar yang dimiliki memiliki peluang digunakan sebagai material magnet untuk aplikasi pada frekuensi tinggi dengan sedikit *magnetic loss*.

Seiring dengan pertumbuhan elektronika dan elektronik device yang tinggi pada dunia industri, bidang komersial lainnya maupun militer, membawa pengaruh yang besar terhadap kehidupan bernegara suatu bangsa. Disamping itu peristiwa interferensi elektronik dari suatu device menjadi permasalahan serius untuk diselesaikan karena dapat mengurangi fungsi kerja dari perangkat elektronik maupun device tersebut. Untuk menghilangkan medan bias yang biasa terjadi pada berbagai perangkat elektronik dapat dilakukan dengan menggunakan perangkat elektromagnet interfemsi (EMI)[32,33] berupa material magnet yang

dapat beresonansi pada frekuensi tertentu sedemikian sehingga dapat menyerap radiasi elektromagnet yang tidak diinginkan.

Sebuah metal(logam) ferromagnet dengan permeabilitas sangat tinggi sudah cukup untuk menyerap gelombang elektromagnet frekuensi rendah. Misalnya material magnet Ni-Rich atau FeNi yang sering disebut dengan mu-metal, sering diletakkan dalam tabung CRT, tabung Catoda Ray untuk mereduksi medan elektromagnet bumi ($H \sim 30 \text{ A/m}$) atau induksi elektromagnet[34]. Perangkat ini dapat meminimalisasi medan bias karena dapat mengatenuasi bahkan mampu menghilangkan medan bias pada perangkat elektronik tersebut. Material yang sama tidak efektif untuk mereduksi medan bias pada device yang bekerja pada frekuensi tinggi. Biasanya material tersebut digantikan oleh material magnet berbahan ferrite yang mampu mereduksi gelombang elektromagnet hingga beberapa MHz bahkan hingga ratusan GHz. Material ferrite juga banyak dimanfaatkan untuk magnet permanen, tetapi disamping sebagai magnet permanen, ferrite juga banyak digunakan sebagai *soft magnet*(magnet lunak) seperti *transformator frekuensi tinggi, circulators, isolators, tunable filters and phase shifters, antenna, serta radar absorbing material (RAM) serta material anti deteksi (Stealth)*[35-37]

Material magnet berbahan dasar ferrite juga sangat efektif untuk absorber elektromagnet frekuensi Ultra tinggi seperti pada frekuensi radar yang bekerja pada frekuensi ratusan MHz hingga ratusan GHz. Sehingga dengan berbagai sifat yang dimiliki, ferrite mampu mereduksi daya dan intensitas radiasi pada radar (*Radar Cross Saction Reduction(RCSR)*[38], Prinsip kerja ferrite sebagai material absorber adalah dapat meminimalisasi bahkan menghilangkan intensitas dan daya radiasi yang dipantulkan oleh radar. Dengan kemampuan ini material magnet ferrite sering dimanfaatkan sebagai salah satu material anti deteksi radar.

1.2 Perumusan masalah

Barium Hexaferrite tipe-M memiliki saturasi magnet dan koersifitas serta remanen yang besar. Dengan rekayasa struktur ke dalam fasa ini diharapkan dapat merubah sifat sifat kemagnetannya, sehingga dapat dimanfaatkan untuk berbagai

aplikasi seperti untuk penyerap gelombang elektromagnet khususnya pada frekuensi gelombang mikro(*microwave*).

Pada beberapa kajian didapatkan bahwa koersifitas magnet juga dapat direkayasa dari sifat intrinsiknya dengan cara substitusi atom-atom penyusun dengan atom lain. Dengan penurunan koersifitas magnet pada ferrite khususnya Barium hexaferrite melalui rekayasa struktur, sehingga memiliki manfaat lain bukan hanya sebagai magnet permanen. Dari berbagai kajian baik secara teoritis maupun empiris diperoleh informasi bahwa kelas *hard magnet* ini memiliki *magnet loss* yang tinggi bila diaplikasikan pada frekuensi tinggi. Dengan rekayasa substitusi ion Fe dengan beberapa logam transisi ternyata dapat menurunkan *magnet loss* dan memiliki potensi lain sebagai material elektromagnet frekuensi tinggi khususnya pada daerah frekuensi gelombang mikro.

Efek nanostruktur terhadap sifat kemagnetan telah menjadi topik yang menarik perhatian untuk dieksplorasi secara komprehensif pada beberapa tahun terakhir. Berdasarkan teori yang berkembang efek nanostruktur pada material magnet dapat meningkatkan nilai magnetisasi sisa melebihi nilai konvensional. Struktur nanometer juga berpengaruh negatif terhadap koersifitas menjadi lebih kecil karena efek interaksi antar butir (*grain exchange interaction*) Dengan mengontrol ukuran butir tetap pada skala nano koersifitas magnet juga dapat dikendalikan sehingga material dapat bersifat *soft magnet* maupun *hard magnet* (magnet permanen). Dengan melihat fenomena ini dapat dicari kompromi antara ukuran butir dan nilai magnetisasi optimum serta pengaruhnya terhadap serapan gelombang elektromagnet.

Terdapat beberapa teknologi untuk mendapatkan material magnet ferrite berstruktur nano. Salah satunya adalah melalui *teknik mekanika alloying* yang diterapkan dalam penelitian ini. Teknik ini dipilih karena sangat sederhana dan dapat menghasilkan kapasitas produksi yang cukup tinggi dan ekonomis.

Prinsip dasar dari teknik *mechanica Alloying* adalah larutan padat penyusun magnet material dipadukan secara mekanik sehingga memungkinkan diperoleh embrio magnet dalam struktur amorf. Melalui kristalisasi dengan teknik pemanasan pada temperatur dan waktu yang terkontrol memungkinkan

untuk mendapatkan material magnet dengan struktur dalam skala nanometer maupun mikrometer.

1.3 Tujuan Penelitian

Bertitik tolak dari perumusan di atas, arah perkembangan penelitian ini ditekankan pada rekayasa struktur material. Dengan rekayasa struktur melalui teknologi mekanika milling bertujuan untuk mendapatkan material berskala nanometer. Rekayasa material pada penelitian ini, juga dilakukan dengan substitusi secara parsial ion Fe^{+3} dengan menggunakan ion Mn dan ion Ti untuk mendapatkan material Barium hexaferrite tersubstitusi yang dapat dimanfaatkan sebagai penyerap gelombang elektromagnet frekuensi ultra tinggi yang diinginkan.

Secara spesifik tujuan penelitian dapat didiskripsikan antara lain

1. Mensintesis dan memahami fenomena substitusi ion Mn dan ion Ti dalam fasa Fe_2O_3
2. Mensintesis material magnet nanomaterial sistem $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_{2-x-y}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_3$ ($x, y=0-2.5$) dengan menggunakan metode *Mechanical Alloying*.
3. Karakterisasi sifat kemagnetan (remanen, koersifitas, saturasi magnet) dan sifat fisika (*resistivity, refleksi, transmisi*) dari material magnet yang telah terbentuk
4. Memahami fenomena *magnetism* pada struktur nanometer secara fenomenologi.

1.4 Manfaat Penelitian

Eksplorasi efek struktur terhadap material magnet adalah terjadinya perubahan sifat kemagnetan pada material tersebut. Diharapkan dari eksplorasi efekstruktur melalui rekayasa material, penelitian ini dihasilkan material magnet dengan sifat yang unggul untuk penyerap gelombang elektromagnet khususnya gelombang mikro.

Material elektromagnet berskala nanostruktur dari material Barium hexaferrite yang disubstitusi oleh ion Mn dan ion Ti dapat diaplikasikan dalam

berbagai keperluan antara sebagai interferensi elektromagnet (EMI) pada berbagai perangkat elektronik dan device, sebagai material anti gema (*anechoic chamber*). Disamping itu material ini juga dapat dimanfaatkan dalam bidang pertahanan negara antara lain untuk *Radar Absorbing Material* (RAM) yang mampu menghilangkan medan bias pada perangkat antena, serta sebagai material yang mampu mereduksi refleksi radiasi dari gelombang Radar (*Radio detection and ranging*).

1.5 Batasan Penelitian

Dari penjelasan di atas banyak masalah yang terjadi untuk memahami secara komprehensif proses substitusi dalam pembentukan fasa magnetik Barium hexaferrite serta interaksi antara material yang terbentuk dengan gelombang elektromagnet. Oleh karena itu dalam penelitian ini perlu dibatasi kajiannya, hanya diditik beratkan pada proses sintesis dan preparasi serta karakterisasi material pembentukan fasa substitusi parsial ion Mn dan Ti dalam fasa Fe_2O_3 serta pembentukan material magnet $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ melalui metoda *mechanical alloying*. Sintesis dilakukan dengan berbagai senyawa Fe_2O_3 , MnCO_3 dan TiO_2 serta BaCO_3 sebagai pembentuk material. Karakterisasi difokuskan pada kajian mikro dan nanostruktur yang berhubungan dengan interaksinya terhadap gelombang elektromagnet ditinjau dari efek reflektansi dan transmitansi pada frekuensi 1 GHz Hingga 6 GHz.

1.6 Model Operasional Penelitian

Penulisan dalam disertasi ini terdiri dari Bab 1 hingga Bab 5. Bab 1 meliputi berbagai bahasan antara lain Pendahuluan, Tujuan dan manfaat penelitian serta sistematika dalam penyusunan makalah. Bab 2 terdiri dari kajian tentang pustaka yang meliputi berbagai sub bab yang memuat tentang klasifikasi material ferromagnet, penjelasan tentang berbagai hal fasa magnet dalam kelas ferrite. Pada Bab 2 juga dijelaskan tentang berbagai teori yang melatar belakangi permasalahan, khususnya tentang fenomena kemagnetan dalam bahan dan interaksi gelombang elektromagnet dengan material. Pada bab ini juga dijelaskan

konsep tentang aplikasi ferrite dalam frekuensi tinggi, hubungan frekuensi dengan permeabilitas magnet, resistivitas magnet dan lain sebagainya.

Sedangkan pada Bab 3 menjelaskan tentang metode penelitian serta prosedur dalam penelitian yang dilakukan menyangkut metoda penelitian dan teknik analisis. Dalam bab 3, juga dijelaskan tata kerja penelitian pada preparasi material substitusi parsial ion Fe dengan ion Mn untuk dan Ti untuk pembentukan fasa $Fe_{2-x-y}Mn_x Ti_y O_3$. Fasa $Fe_{2-x-y}Mn_x Ti_y O_3$ merupakan fasa utama akan disintesis lebih lanjut dengan $BaCO_3$ untuk membentuk material $Ba Fe_{12-x-y}Mn_x Ti_y O_3$.

Pada Bab 4 dijelaskan tentang hasil hasil penelitian yang telah dilakukan sesuai dengan topik permasalahan. Pada Bab 4 juga dibahas secara mendalam sehingga dapat diperoleh kajian secara menyeluruh. Pada Bab 5 terdiri dari dua topik permasalahan yaitu kesimpulan dari semua hasil kajian dan saran untuk penyempurnaan penelitian ini.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Klasifikasi Material Berdasarkan Sifat Magnetik

Berdasarkan pada interaksi antara material terhadap medan magnet, material magnet dapat diklasifikasi menjadi tiga kelas utama yaitu diamagnetik, paramagnetik dan ferromagnetik. Dari tiga klasifikasi tersebut, dalam perkembangannya dapat diklasifikasikan kembali menjadi kelompok kelompok yang lebih spesifik misalnya dari jenis material, struktur kemagnetannya dll. Berdasarkan sifat sifat kemagnetannya ferromagnetik dibagi lagi menjadi ferimagnetik dan antiferromagnetik.

Pada kelas diamagnetik memiliki permeabilitas yang lebih kecil dari permeabilitas hampa atau memiliki susceptibilitas magnet yang lebih kecil dari nol dan kelas paramagnetik memiliki permeabilitas yang lebih besar dari permeabilitas hampa, tetapi memiliki nilai yang sangat kecil. Sedangkan ferromagnetik memiliki permeabilitas yang jauh lebih besar dari permeabilitas hampa atau memiliki susceptibilitas yang sangat tinggi.

Secara mikroskopis pada kelas diamagnetik atom atom yang terdapat dalam material tidak memiliki momen magnet dan apabila dikenakan medan magnet luar electron electron akan berpresisi sedemikian sehingga menghasilkan medan magnet yang selalu berlawanan arah dengan medan magnet luar.

Pada kelas paramagnetik, atom atom dalam material memiliki momen magnet yang berorientasi secara acak. Bila medan magnet luar dikenakan kepadanya momen magnet akan disejajarkan dalam arah yang sama dengan arah medan magnet luar sehingga akan terlihat magnetisasi meskipun cukup kecil. Orientasi acak pada spin dan momen magnet yang terjadi pada paramagnetik disebabkan oleh adanya agitasi termal sehingga pada temperatur yang lebih tinggi agitasi termal juga tinggi yang berakibat pada permeabilitas atau susceptibilitas magnet menjadi berkurang.

Pada ferromagnetik momen magnet atom atom penyusunnya sudah memiliki arah yang sama dan sejajar serta saling berinteraksi sedemikian sehingga akibat dari interaksi tersebut muncul medan magnet molekuler. Berbeda dengan

kelas ferromagnet, atom atom yang berdekatan pada ferrimagnetik saling berinteraksi menghasilkan susunan arah momen magnet saling berlawanan, meskipun nilai momen magnet totalnya tidak sama dengan nol. Terkadang kelas ferrimagnetik atom atom penyusun yang berdekatan saling berinteraksi menghasilkan momen magnet yang searah dan sejajar pada daerah tertentu dan berlawanan arah pada daerah yang lain. Susunan atom atom yang demikian ini banyak terdapat dalam kelas ferrite.

Ferrit merupakan material keramik yang memiliki resistivitas listrik cukup tinggi karena tersusun oleh senyawa oksida. Ferrit memiliki kerugian listrik (*loss power*) yang rendah pada frekuensi tinggi, banyak dimanfaatkan untuk berbagai aplikasi antara lain telekomunikasi, konversi daya maupun untuk mengurangi interferensi. Aplikasi ferrit antara lain untuk transformator frekuensi tinggi, *device elektronik*, filter *elektromagnet* juga dapat berfungsi sebagai resonansi elektromagnet (EMI) maupun sebagai *Radar Absorbing Material* (RAM) [32,39].

Pada perangkat telekomunikasi material ferrit biasa digunakan untuk *filter inductor* dan transformer signal dll. Untuk konversi daya dibutuhkan *power loss* yang kecil serta magnetisasi total tinggi saat dikenai medan magnet luar. Dengan perkataan lain untuk berbagai aplikasi material dibutuhkan harga permeabilitas tinggi serta faktor histerisis yang kecil. Untuk aplikasi frekuensi tinggi material magnet *soft ferrit* memiliki jangkauan frekuensi yang sangat lebar dari puluhan kilohertz (KHz) hingga ratusan GHz bahkan hingga orde THz [40].

Ferrit memiliki struktur yang sangat beragam bergantung pada komposisinya, tetapi dalam penggolongan berdasarkan penyusunan kisi kristal utamanya dapat dikelompokkan kedalam tiga kelas utama yaitu, Spinel, Garnet dan kelas Hexagonal. Magnet spinel memiliki fasa utama dengan struktur Fe_3O_4 berbagai contoh magnet spinel antara lain, $NiFe_2O_4$ [41], $MnZn$ ferrit [42], $NiZn$ Ferrit [41], $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_{1.8}O_4$ [43] dan lain lain yang kesemuanya memiliki struktur berbentuk seperti Fe_3O_4 .

2.2 Resistivitas Listrik Ferrit

Material magnet ferrit memiliki resistivitas listrik yang sangat bervariasi antara $10^{-5} \Omega m$ hingga $10^9 \Omega m$ bergantung pada komposisi dan strukturnya [30].

Sebagai contoh untuk Fe_3O_4 pada temperatur kamar memiliki resistivitas listrik sebesar $7 \times 10^{-5} \Omega\text{m}$. Bila ion Fe disubstitusi secara parsial dengan ion Ni dan terbentuk fasa NiFe_2O_4 resistivitas listriknya meningkat menjadi $10^6 \Omega\text{m}$ [41]. Disamping dipengaruhi oleh komposisi dan struktur, resistivitas listrik juga sangat dipengaruhi oleh temperatur dan frekuensi. Resistivitas listrik ferrit akan berkurang pada temperatur yang semakin tinggi mengikuti pola resistivitas seperti pada kelas semikonduktor yang ditunjukkan dalam persamaan (1).

$$\rho(T) = \rho_{\infty} \exp \frac{E_p}{RT} \dots \dots \dots (1)$$

Dimana ρ_{∞} adalah resistivitas listrik tidak tergantung temperatur, R adalah konstanta Boltzman, E_p adalah energi aktivasi dan T adalah temperatur dalam Kelvin. Dalam skala logaritmik nilai resistivitas sebagai fungsi temperatur mengikuti perumusan

$$\ln \rho(T) = \frac{E_p}{R} \left(\frac{1}{T} \right) + \ln \rho_{\infty} \dots \dots \dots (2)$$

Dari berbagai kasus pada kelas ferrite nilai energi aktivasi memiliki nilai 0.1 eV hingga 0.5 eV [30], sehingga baik pola karakteristik maupun energi aktivasinya dapat dimasukkan dalam kelas semikonduktor. Tabel 2.1 menunjukkan beberapa contoh perubahan nilai resistivitas listrik sebagai fungsi temperatur dan frekuensi.

Energi aktivasi E_p merupakan energi yang diperlukan untuk membebaskan elektron dalam ion untuk berpindah ke posisi ion di sekelilingnya sehingga dapat menghasilkan konduktivitas listrik. Pada material fasa tunggal (intrinsik) perubahan resistivitas listrik karena pengaruh temperatur relatif kecil, tetapi dengan adanya impuritas resistivitas listrik akan mengalami perubahan yang cukup tinggi. Hal ini berarti bahwa pengaruh impuritas juga akan mempengaruhi konduktivitas dan mobilitas elektron konduksi. Pada tabel 2.1 disampaikan nilai

resistivitas pada berbagai temperatur. Tabel 2.1 juga menampilkan pergeseran resistivitas listrik terhadap frekuensi pada jenis material yang sama.

Tabel 2.1 Resistivitas listrik sebagai fungsi temperatur dan frekuensi untuk beberapa fasa dengan struktur spinel MnZn ferrit dan NiZn Ferrit[41]

Temperatur (°C)	MnZnFerrit	NiZnFerrit	Frekuensi (MHz)	MnZnFerrit	NiZnFerrit
	Resistiviti (Ωm)	Resistiviti (Ωm)		Resistiviti (Ωm)	Resistiviti (Ωm)
-20	10	-	0.1	2	10^5
0	7	5×10^7	1	0.5	5×10^4
20	4	10^7	10	0.1	10^4
50	2	10^6	100	0.01	10^3
100	1	10^5	-	-	-

Pada frekuensi tinggi batas butir kristal seolah olah mengalami *shot circuit* seperti pada pola dielektrikum yang bersifat kapasitif, sehingga resistivitas listrik akan turun dan material akan mengalami perubahan impedansi karena pengaruh dari frekuensi tersebut. Dengan kata lain seolah olah resistivitas listrik dikontribusi oleh dua buah resistor yang tersusun secara paralel. Satu buah resistor bersifat ohmik yang mampu mendisipasi energi dalam bentuk panas dan resistor lain yang mampu mendisipasi dalam bentuk energi listrik (*dielectric loss*), meskipun hal ini tidak mungkin kuantitasnya diukur pada frekuensi tunggal.

Magnet Spinnel pertama kali diperkenalkan pada awal tahun 1945 dengan struktur utama $\text{MeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (Me = merupakan ion divalen dari elemen logam transisi seperti Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Mg, Cd atau kombinasi antara berbagai logam transisi tersebut). Struktur spinel memiliki jari jari ion yang cukup bervariasi dari 0.6 Å hingga 1 Å karena mampu membentuk fasa dengan kombinasi yang sangat bervariasi dalam bentuk $\text{Me(I)}_x\text{Me(II)}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_3$. Menurut Gorter[41] meskipun dalam pembentukannya fasa spinel memiliki berbagai kombinasi dari berbagai logam transisi yang dimiliki, tetapi tidak semua kombinasi tersebut dapat menghasilkan fasa solid solution. Misalnya fasa $\text{Na}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ tidak akan terbentuk dalam fasa solid solution, tetapi dengan

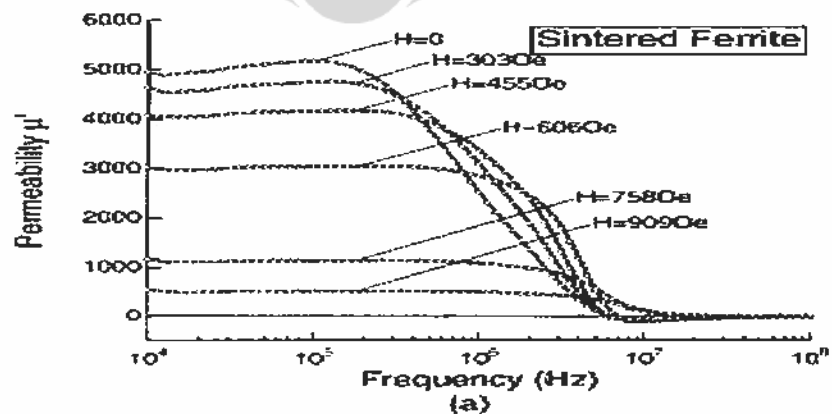
menggantikan ion Na dengan ion Li dapat terbentuk fasa solid solution hingga mencapai diatas 40%.

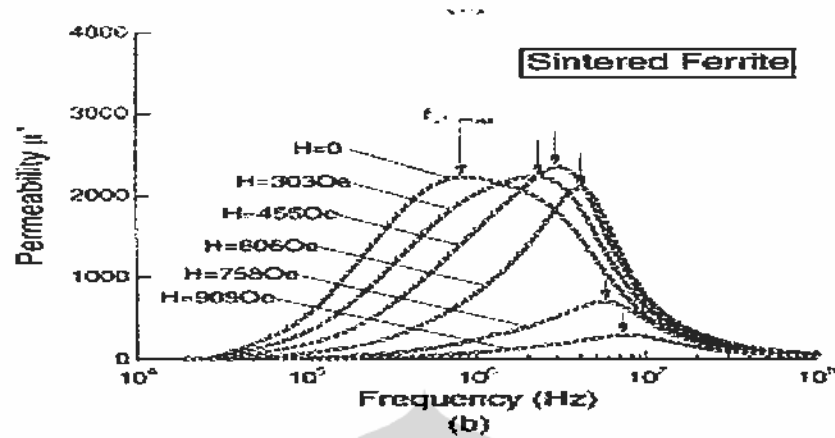
2.3 Permeabilitas dan Permittivitas Ferrit

Disamping memiliki resistivitas dan temperatur Curie yang tinggi, Spinnel magnet juga memiliki saturasi total yang cukup besar banyak bermanfaat untuk berbagai aplikasi modern. Tingginya magnetisasi total material magnet spinnel disebabkan oleh nilai permeabilitas magnet yang tinggi. Gambar 2.1 memperlihatkan nilai permeabilitas magnet fasa spinnel dengan komposisi Mn-Zn-ferrit. Pada Gambar 2.1 a memperlihatkan perubahan permeabilitas bagian real μ' dan Gambar 2.1 b sebagai perubahan permeabilitas bagian imajiner μ'' magnet Mn-Zn ferrite terhadap frekuensi gelombang elektromagnet.

Dalam gambar 2.1 a dapat disimpulkan bahwa magnet spinnel efektif untuk *device elektronik* pada frekuensi kurang dari 10 MHz. Hal ini dapat dijelaskan karena pada frekuensi di atas 10 MHz memiliki permeabilitas imajiner μ'' cukup tinggi yang dapat menyebabkan *magnetic loss* besar. Dari gambar 2.1 juga diperlihatkan bahwa tanpa adanya medan magnet luar *magnetic loss* tertinggi dicapai pada frekuensi ~100 MHz dan mengalami pergeseran apabila berada pada medan magnet luar.

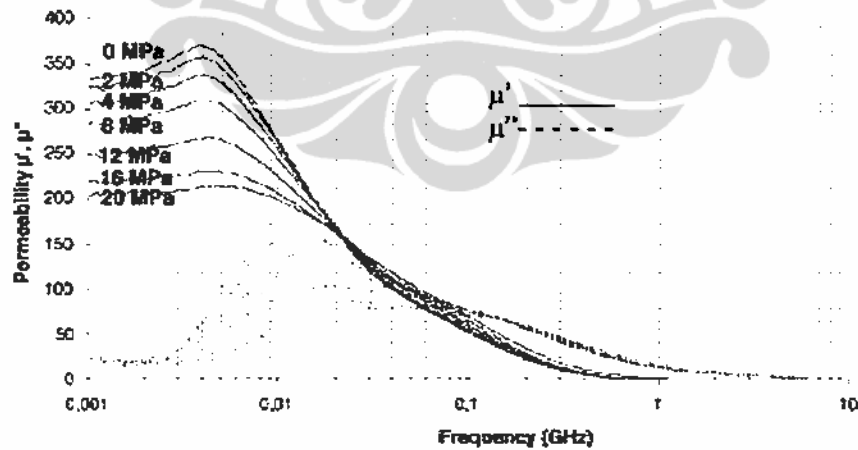
Dari Gambar 2.1.b dapat dilihat bahwa adanya medan magnet luar dapat memberi pengaruh terhadap permeabilitas magnet nilai imajinernya. Yaitu terjadi peningkatan nilai μ'' hingga ferkeuksi maksimum ~ 1 MHz.



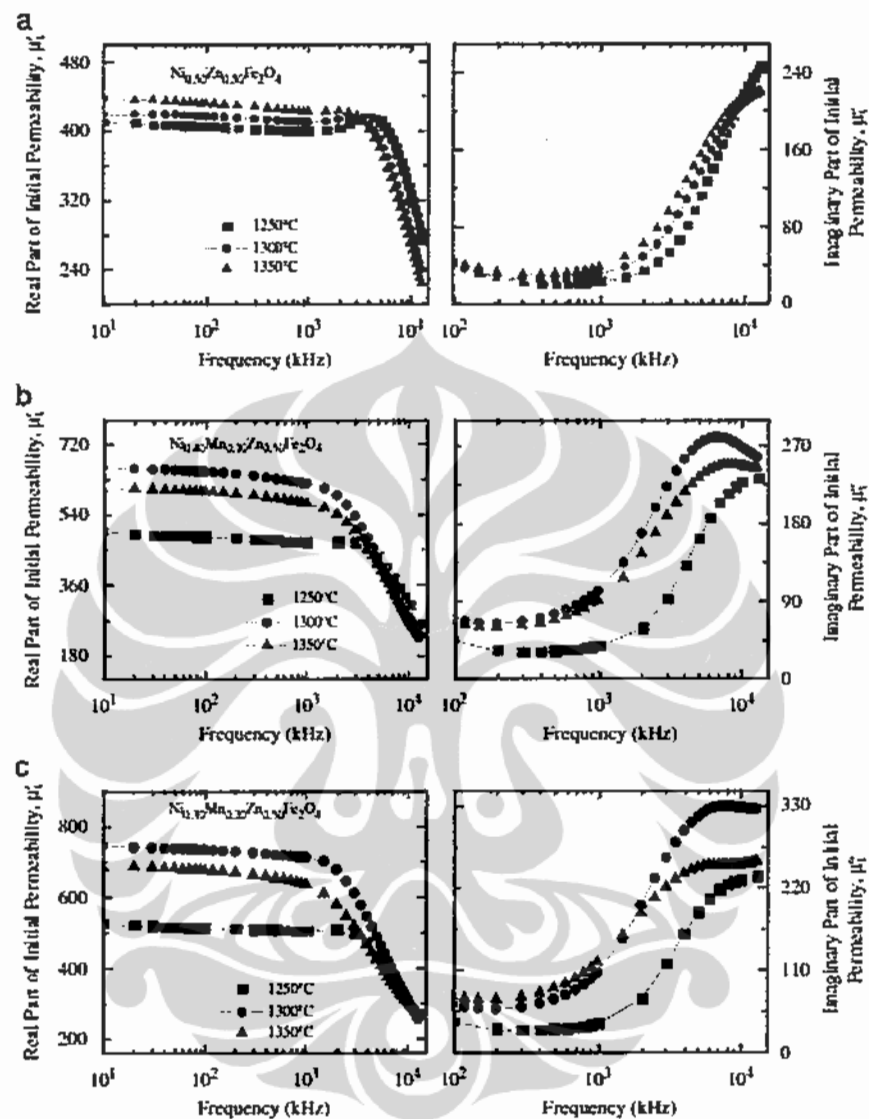


Gambar 2.1 Nilai permeabilitas real μ' (A) dan imajiner μ'' (B) Untuk Mn-Zn ferrite dalam pengaruh medan magnet luar[42].

Hal senada dialami juga oleh magnet spinel material Ni-Zn Ferrite seperti diperlihatkan dalam gambar 2.2. Material Ni-Zn ferrite dengan komposisi $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_{1.8}\text{O}_4$ memiliki nilai efektif sebagai *device elektronik* yang hampir sama dengan magnet Mn-Zn ferrit tetapi memiliki resistivitas listrik lebih tinggi. Disamping itu material Ni-Zn-Ferrit juga berpotensi sebagai material *magneto-elastic* atau *magneto striction*[43], karena pada material Ni-Zn-Ferrit dapat bergeser permeabilitas magnetnya akibat pengaruh stress dari luar.



Gambar 2.2 Permeabilitas real(μ') dan imajiner (μ'') [43] fasa magnet sinter $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_{1.8}\text{O}_4$



Gambar 2.3 perubahan permeabilitas material magnet Mn-Ni-Zn-Ferrit real μ' dan imajiner μ'' akibat pengaruh temperatur dan frekuensi[44].

Dalam gambar 2.3 memperlihatkan perubahan permeabilitas magnet real (μ') dan imajiner (μ'') material magnet Mn-Ni-Zn-Ferrit terhadap temperatur dan frekuensi. Gambar 2.3.a menunjukkan nilai permeabilitas real fasa $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ lebih tinggi 30% dibandingkan dengan fasa $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_{1.8}O_4$ tetapi diikuti dengan kenaikan nilai μ'' . Sedangkan gambar 2.3b dan 2.3c

menunjukkan bahwa fasa $\text{Ni}_{0.4}\text{Mn}_{0.1}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ dan $\text{Ni}_{0.3}\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ terjadi peningkatan permeabilitas real(μ') yang sangat tinggi dengan meningkatnya ion Mn. Ketiga material tersebut sangat efektif sebagai *device elektronik* pada frekuensi tinggi hingga $\sim 1\text{MHz}$ dan sangat tidak efektif untuk frekuensi $\sim 100\text{MHz}$ disebabkan oleh *magnetic loss* yang sangat tinggi.

Material ferrit dalam Struktur Garnet sering dijumpai di alam yang tersusun atas struktur $\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$, tetapi pada tahun 1956 ditemukan fasa lain dalam struktur $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ [45,46]. Material dengan nama *Yttrium Iron Garnet* (YIG) sangat terkenal pada awal penemuannya, karena memiliki sifat sangat menarik dan dapat dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi.

Garnet memiliki struktur yang sangat kompleks karena setiap unit cell kubiknya terdiri dari 160 atom. Ke 160 atom tersebut terdiri atas 96 ion oksigen(O^{2-}) sebagai anion dan 24 ion Y^{+3} yang berfungsi sebagai kation yang keduanya tersusun secara kompleks. Sejumlah 24 ion Fe^{+3} tersusun dalam struktur tetrahedral serta 16 ion Fe^{+3} terikat dalam struktur octahedral[47]. Kesemua ion tersebut membentuk satu struktur yang memiliki kemiripan dengan struktur spinel. Tetapi karena logam Yttrium merupakan logam tanah jarang (*rare earth*) dengan jari jari atom yang sangat besar, sehingga mampu mendestorsi kisi membentuk struktur Garnet.

Dibandingkan dengan kelas spinel, Garnet memiliki *magnet loss* yang lebih kecil pada frekuensi 1- 10 Ghz. Pada pengukuran menggunakan kristal tunggal diperoleh bahwa hanya terjadi pengurangan $\Delta H \sim 0.1$ Gauss pada frekuensi hingga 10 GHz[46]. Dengan efektivitas ini, *Yttrium Iron Garnet* banyak dimanfaatkan sebagai *device electronic pada perangkat mikrowave* seperti digunakan untuk elektronik pada perangkat *Radar*.

Substitusi ion Fe^{+3} pada kisi oktahedral dengan menggunakan logam lain dapat mempengaruhi magnetisasi total. Misalnya dengan ion Al maupun ion Ga dapat menurunkan magnetisasi total hingga menjadi ~ 400 G saja, tetapi apabila disubstitusi dengan logam Sc dapat meningkatkan magnetisasi totalnya hingga mencapai ~ 1900 Gauss[47]. Dari berbagai kajian tersebut menunjukkan bahwa struktur Garnet cukup efektif untuk aplikasi *device elektronik* pada frekuensi dibawah 10 GHz.

Untuk aplikasi pada frekuensi yang lebih tinggi hingga mencapai ~100 GHz struktur Hexaferrit menjadi perhatian yang serius untuk diteliti. Ditinjau dari struktur kristalnya, material magnet Hexaferrit dibedakan menjadi enam tipe yang dikelompokkan dalam dua tipe utama. Keempat tipe memiliki struktur hexaferrit yang berbeda yang dikenal dengan tipe M, W, Y dan tipe Z serta dua tipe lainnya X dan U[48]. Tipe pertama dapat disusun dan dirumuskan dalam bentuk perbandingan molaritas sebagai $(\text{BaO}+\text{MeO})/\text{Fe}_2\text{O}_3$ yang memiliki harga tertentu.

Tipe M, tipe W dan tipe Y, serta tipe Z memiliki anisotropi magnet dan permeabilitas magnet yang tinggi dibandingkan dengan tipe X maupun U. Disamping itu juga memiliki temperatur Curie yang lebih tinggi dibandingkan dengan dua tipe terakhir [49]. Tabel 2.3 meringkas semua struktur sell satuan dan jumlah perumusan setiap unit sellnya yang dimiliki oleh semua tipe hexaferrit. Sebagai contoh struktur magnetoplumbit yang lebih dikenal dengan tipe M tersusun atas 2 blok spinnel untuk membentuk struktur Fe_6O_8 dalam susunan S dan S* yang terlihat saling terbalik. Blok S dan S* dihubungkan oleh blok R yang berisi ion Barium dan ion oksigen membentuk struktur $\text{BaFe}_6\text{O}_{11}$ [50]. Dengan struktur kristal seperti ini maka setiap unit sel dasar tipe M berisi ion-ion dengan bentuk susunan RSR*S* atau terdiri dari dua struktur $\text{BaO6Fe}_2\text{O}_3$ seperti dapat dilihat dalam tabel 2.2. Bila dihitung dari jumlah perbandingan antara BaO dan Fe_2O_3 tipe M konvensional, memiliki nilai BaO: Fe_2O_3 sebesar 1 : 6 atau membentuk senyawa $\text{BaO6Fe}_2\text{O}_3$.

Besarnya momen magnet tiap unit sel untuk tipe M secara teoritis berasal dari penjumlahan 7 buah ion Fe^{+3} dalam bentuk *Octahedral* dengan sebuah ion Fe^{+3} dalam bentuk *trigonal* serta dikurangi dengan momen magnet dari sebuah ion Fe^{+3} dalam bentuk *Octahedral* serta dua buah ion Fe^{+3} berbentuk *tetrahedral*. Dengan menganggap ion magnet hanya berasal dari ion Fe^{+3} saja dan masing masing memiliki momen magnet sebesar $5\mu_B$, maka besarnya magnetisasi total setiap unit molekul $\text{BaO6Fe}_2\text{O}_3$ adalah sebesar 0.477 Tesla atau mendekati 5 kG.

Hexaferrit tipe M memiliki medan isotropi (H_A) sangat tinggi hingga mencapai angka 35 kG (0.35 Tesla) dan konstanta anisotropi kristal sebesar $3.3 \cdot 10^5 \text{ Jm}^{-3}$ [51].

Table 2.3 Sistem Unit sell berbagai tipe struktur Hexaferrit [48]

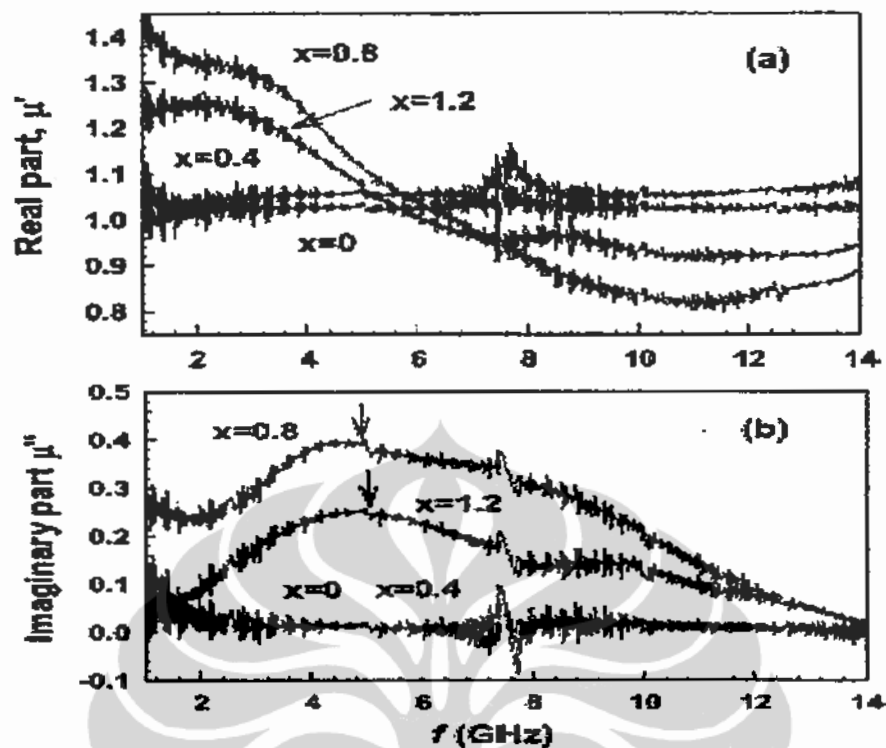
	Unit cell	Number of formulae per unit cell
M	RSR^+S^-	2M
W	$RSSR^+S^-S^-$	2MeW
Y	$3>ST_1$	3MeY
Z	$RSTSR^+S^-T^+S^-$	2MeZ
X	$3>RSR^+SS_1$	3MeX
U	$RSR^+S^-T^+S^-$	MeU

S = Fe₂O₃ R = BaFe₂O₇ T = Ba₂Fe₂O₁₁

Kedua nilai tersebut berpotensi menghasilkan energi produk maksimum magnet mencapai 45.26 kJ/m^3 sehingga digunakan sebagai magnet permanen.

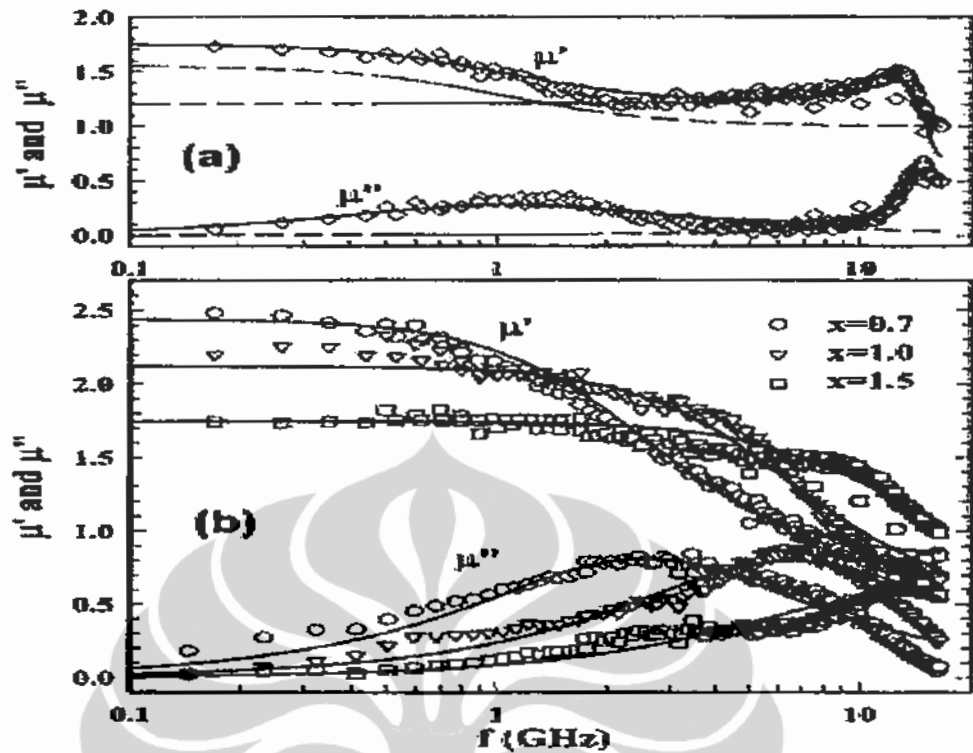
Dengan substitusi ion logam transisi besarnya medan isotropi dapat dirubah. Seperti misalnya dengan substitusi ion substitusi Al^{+3} , Ga^{+3} maupun Cr^3 pada material magnet konvensional $BaO_6Fe_2O_3$ dan $SrO_6Fe_2O_3$ memiliki medan isotropi menjadi 17 kG (0.17 T), tetapi apabila disubstitusi dengan ion $Ti^{+4}Me^{+2}$ (Me= Mn, Zn, Co, Ni dll) medan isotropinya berubah dan menurun hingga menjadi 5 kG saja[52]. Hal ini berarti bahwa dengan substitusi ion Fe menggunakan berbagai logam transisi lain dapat terjadi perubahan permeabilitas magnet. Permeabilitas magnet disamping dipengaruhi oleh adanya substitusi ion juga dapat terjadi karena pengaruh gelombang elektromagnet, temperatur stress dan lain sebagainya.

Gambar 2.4 memperlihatkan perubahan permeabilitas magnet real (μ') dan imajiner (μ'') material magnet tipe M yang disubstitusi oleh ion Co dan Zr. Pada keadaan bebas substitusi $x=0.0$ hingga $x = 0.4$) terlihat permeabilitas magnet real (μ') dan imajiner (μ'') cenderung konstan terhadap frekuensi, tetapi terjadi perubahan yang cukup signifikan dengan kehadiran ion Co dan Zr pada komposisi $x = 0.8$ dan $x= 1.2$. Perubahan nilai permeabilitas magnet ini terutama nilai imajinernya yang meningkat, menunjukkan bahwa pada $x > 0.4$ memiliki *magnetic loss* yang relatif tinggi untuk diaplikasikan dalam device elektronik.



Gambar 2.4 Permeabilitas kompleks material $\text{BaFe}_{12-2x}(\text{CoZr})_x\text{O}_{19}$ sebagai fungsi frekuensi. (a) Nilai permeabilitas real dan (b) permeabilitas imajiner pada frekuensi hingga 14 GHz[53].

Material Hexaferrit tipe W memiliki perbandingan mol antara MeO dengan Fe_2O_3 sebesar 3 : 8 atau berbentuk $\text{BaFe}_{18}\text{O}_{27}$. tipe W memiliki temperatur Currie dan saturasi magnet total yang paling tinggi diantara keenam keluarga hexagonal ferrite lainnya[54]. Meskipun nilai magnetisasi total paling tinggi, tetapi material ini memiliki koersifitas hanya beberapa ratus Oersted saja. Dengan koersifitas yang rendah material magnet tipe W telah lama dipakai untuk aplikasi pada material elektromagnet sebagai keluarga kelas *soft magnetic* material. Dengan substitusi ion Co dan Zn kedalam fasa konvensionalnya banyak dimanfaatkan sebagai *device elektromagnet* disebabkan ion Co dan Zn yang disubstitusikan kepadanya dapat mengurangi *magnetic loss*.



Gambar 2.5 Permeabilitas magnet fasa $\text{BaFe}_{16}\text{Zn}_{2-x}\text{Co}_x\text{O}_{27}$. gambar a ditentukan pada c-axis sedangkan b pada bidang c anisotropi[54].

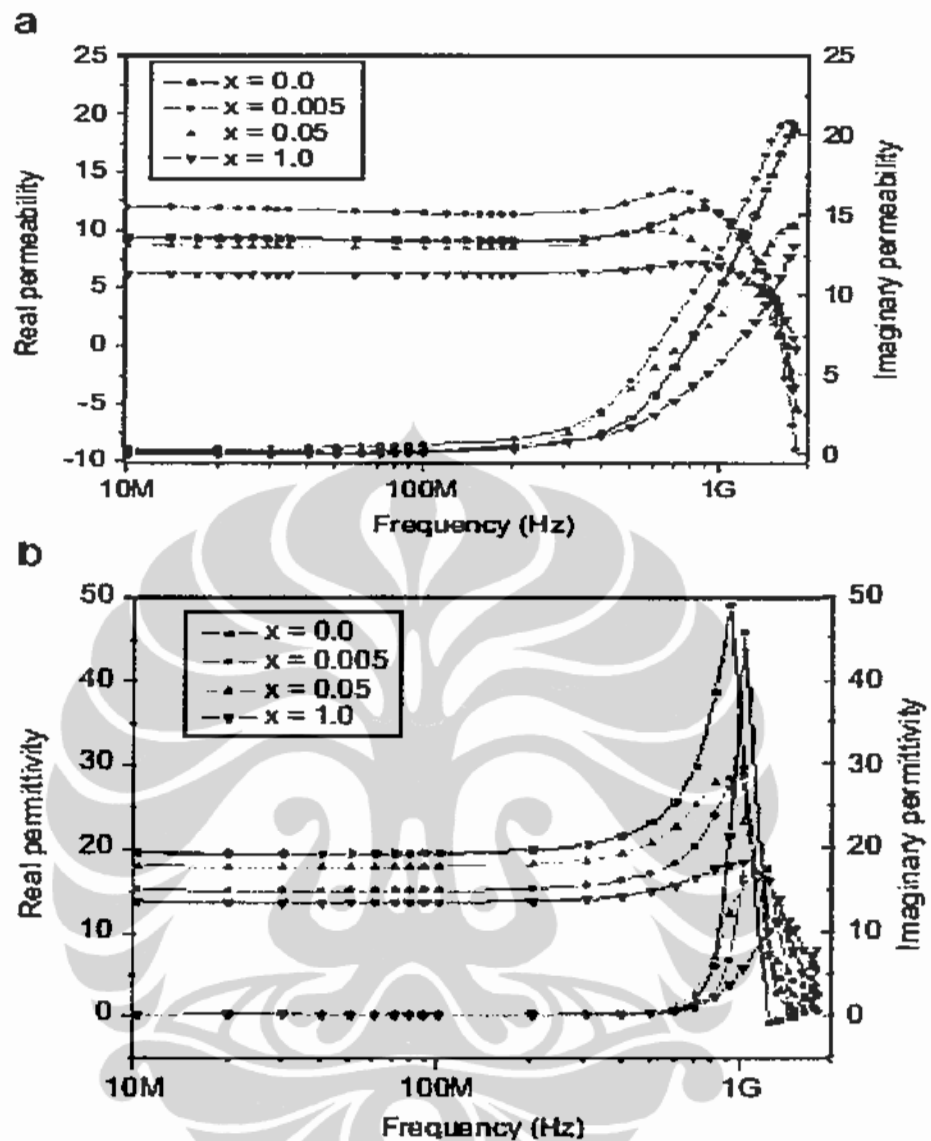
Gambar 2.5 menunjukkan perubahan nilai permeabilitas complex material $\text{BaFe}_{18}\text{O}_{27}$ (a) dan (b) material $\text{BaFe}_{16}\text{Zn}_{2-x}\text{Co}_x\text{O}_{27}$ ($x = 0.7; 1.0$ dan 1.5) terhadap perubahan medan elektromagnet dari frekuensi 100 MHz hingga lebih dari 10 GHz. Pada material bebas substitusi ($x=0.0$), perubahan permeabilitas kompleks hingga 10 GHz relatif kecil dan berubah cukup signifikan pada frekuensi yang lebih tinggi. Sedangkan material $\text{BaFe}_{16}\text{Zn}_{2-x}\text{Co}_x\text{O}_{27}$ ($x = 0.7; 1.0$ dan 1.5) telah mengalami perubahan permeabilitas complex pada frekuensi antara 1 GHz hingga 10 GHz. Pada frekuensi di atas 1 GHz untuk $\text{BaFe}_{16}\text{Zn}_{2-x}\text{Co}_x\text{O}_{27}$ ($x = 0.7; 1.0$ dan 1.5) telah mengalami pengurangan permeabilitas real yang diikuti dengan kenaikan permeabilitas imajiner. Dengan kata lain telah terjadi peningkatan *magnetic loss* pada frekuensi di atas 1 GHz apabila ion Zn dan Co bersubstitusi dengan ion Fe dalam material tersebut.

Tipe Y memiliki bentuk konvensional 2 MeW yang tersusun atas blok 3(ST) seperti dalam tabel 2.2. Setiap unit selnya terdiri dari $\text{Ba}_2\text{Me}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$. Blok

S dan blok T yang masing masing memiliki struktur Fe_6O_8 dan $\text{Ba}_2\text{Fe}_8\text{O}_{14}$. Struktur Fe_6O_8 merupakan dua lapisan unit spinel dihubungkan dengan blok T yang memiliki dua buah ion barium dengan struktur hexagonal dalam bentuk $\text{Ba}_2\text{Fe}_8\text{O}_{14}$. Karena ion barium memiliki jari jari ion yang jauh lebih besar dibandingkan dengan ion oksigen maka ion barium seolah olah keluar dari bidang. Sehingga blok hexagonal tipe Y memiliki susunan STST dan seterusnya tanpa terjadi pencerminan bidang kristal seperti pada tipe M. Material magnet dengan struktur tersebut telah menjadi perhatian serius beberapa tahun terakhir sebagai *device elektronik* pada frekuensi tinggi dikarenakan memiliki permeabilitas magnet yang besar dan sedikit terjadi *magnetic loss*. Kelemahan fasa konvensional $\text{BaFe}_{14}\text{O}_{22}$ memiliki stabilitas termal yang rendah[55]. Tetapi dari beberapa hasil studi telah diketahui bahwa Zn_2Y yaitu dengan mensubstitusi secara parsial ion Fe dengan ion Zn dapat meningkatkan stabilitas termalnya[56]. Hasil beberapa kajian juga menunjukkan bahwa karena permeabilitas complex magnet tinggi sehingga mampu merotasi spin magnet dan menggerakkan dinding domain sehingga sangat berpotensi sebagai absorber gelombang elektromagnet.

Tipe Z hexaferrit memiliki perbandingan $(\text{BaO}+\text{MeO})$ dengan Fe_2O_3 sebesar 5 : 12[30]. Tipe Z dengan komposisi $\text{Ba}_3\text{Co}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ atau (Co_2Z) merupakan material yang paling sering diteliti untuk aplikasi pada frekuensi tinggi hingga ratusan Mhz [57], karena memiliki permeabilitas yang lebih tinggi dan stabilitas termal yang baik. Material ini juga sering dimanfaatkan untuk *device electronic* seperti Induktor frekuensi tinggi, *LC filter* [58] maupun absorber elektromagnetik[59,60]. Pembentukan tipe Z jauh lebih susah dibandingkan dengan kelima tipe lainnya dikarenakan memiliki struktur yang lebih kompleks dan sangat bergantung pada komposisi kimia, mikrostruktur serta proses preparasi.

Seperti dalam penjelasan sebelumnya, Gambar 2.26 menunjukkan permeabilitas kompleks (a) dan permittivitas kompleks (b) material tipe Co-Z dalam fasa $\text{Ba}_3\text{Co}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ yang didoping dengan menggunakan material Y_2O_3 [61]. Pada material bebas substitusi ($x = 0.0$) permeabilitas kompleks cenderung stabil pada frekuensi di bawah 500 MHz, tetapi terjadi peningkatan permiabilitas imajiner yang disertai dengan penurunan nilai permeabilitas realnya



Gambar 2.6 Permeabilitas kompleks (a) dan permitivitas kompleks (b) material magnet hexaferrit tipe Z yang didoping dengan Y_2O_3 [62].

akibat adanya material Y_2O_3 . Hal ini menunjukkan telah terjadi peningkatan *magnetic loss* pada frekuensi di atas 500 MHz terutama diperoleh pada $x = 0.005$. Pada $x = 0.005$ diperoleh nilai permeabilitas real paling tinggi diantara ketiga komposisi, sedangkan pada $x > 0.05$ hingga $x = 0.1$ cenderung menurun, bahkan lebih kecil dibandingkan dengan nilai konvensional.

Hal yang sama terjadi pada hasil pengukuran permittivitas elektriknya. Material $Ba_3Co_2Fe_{24}O_{41}$ yang didoping dengan material Y_2O_3 memiliki

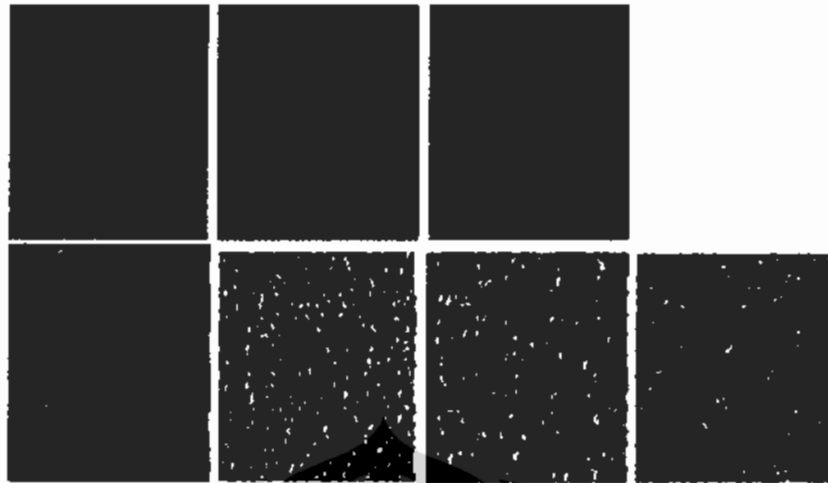
permittivitas kompleks mendekati nilai konstan pada frekuensi kurang dari 1 GHz, tetapi terjadi peningkatan pada frekuensi yang lebih tinggi. Berbeda dengan nilai permeabilitas magnetnya pada nilai bebas substitusi ($x = 0.0$), permittivitas kompleks tertinggi dimiliki oleh komposisi $x = 0.0$ sedangkan pada $x = 0.005$ permittivitas kompleks lebih rendah dibandingkan dengan nilai $x = 0.0$ dan $x = 0.05$, meskipun nilai μ Permittivitas terendah diperoleh pada komposisi $x = 1.0$.

2.4 Material Ferrit untuk Absorpsi Gelombang Elektromagnet

Permintaan perangkat elektronik untuk aplikasi frekuensi tinggi mengalami pertumbuhan yang paling cepat terutama perangkat untuk konsumsi massal seperti *cellular phone*, *automotive*, juga terjadi pada sistem industri radar. Teknologi untuk frekuensi tinggi seperti pada gelombang mikro dewasa ini mengalami pergeseran dari *mm-wave* ke arah frekuensi dan *bandwidth* yang lebih tinggi lagi hingga mencapai 100 GHz[62]. Untuk menjawab tantangan tersebut salah satunya diperlukan material magnet dengan harga ekonomis yang bersifat non konduktif seperti magnet keramik. Kegunaan material magnet non konduktif, misalnya untuk perangkat impedan elektromagnet, filter elektromagnet dan absorber elektromagnet yang mampu mengurangi penetrasi gelombang elektromagnet yang tidak diinginkan.

Jauh sebelum ditemukan material magnet untuk keperluan ini, telah dikembangkan material absorber gelombang mikro menggunakan rekayasa teknik sedemikian sehingga radiasi pantul menjadi minimum. Meskipun metoda ini sangat efektif sebagai material absorber tetapi berbagai kendala muncul terutama pada faktor ketebalan dan bentuk serta ukuran sehingga menyebabkan produk tidak *fleksibel* apabila diaplikasikan dalam keperluan tertentu.

Rekayasa teknik yang digunakan untuk menjadikan material sebagai penyerap gelombang elektromagnet dititik beratkan pada penciptaan interferensi destruktif antara gelombang elektromagnet yang datang dengan gelombang pantul yang dihasilkan oleh berbagai lapisan absorber. Metoda ini lebih menekankan pada aspek geometris atau konstruksi daripada material, seperti diperlihatkan dalam gambar 2.7.

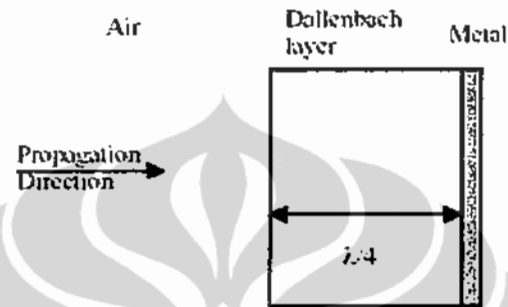


Gambar 2.7 Berbagai bentuk dan konstruksi material penyerap gelombang elektromagnetik tipe FIRAM, TERASORB, TK THZ RAM dan berbagai tipe Eccisorb Carpet[63] masing masing berdimensi $10 \times 10 \text{ cm}^2$

Metoda yang diperkenalkan di atas memerlukan berbagai konstruksi yang rumit dan bentuk serta susunan absorber, sehingga dirasakan kurang efektif dan efisien. Metoda terbaru yang dikembangkan adalah rekayasa material tanpa harus memerlukan konstruksi yang rumit, karena dengan rekayasa menggunakan material tertentu mampu melangsungkan resonansi gelombang elektromagnet. Metoda ini dikembangkan pertama kali oleh Dallenbach dan dikenal dengan *dallenbach layer*. *Dallenbach layer* pertama kali digunakan material kelas ferroelektrik dan ferromagnetik serta paduan antara keduanya[64].

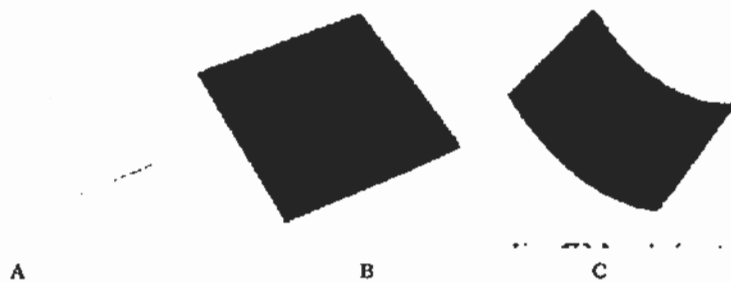
Metoda ini sangat efektif dimanfaatkan sebagai penyerap gelombang elektromagnet karena dapat mengeliminasi efek ketebalan, bentuk material dan ukuran. Berbagai parameter fisis yang sering digunakan sebagai derajat keefektifan material sebagai absorber elektromagnetik adalah besaran *reflection loss*. Besaran ini memiliki satuan decibel atau dB yang merupakan nilai perbandingan antara daya dengan nilai standardnya. Besarnya *reflection loss* dari absorber yang dikembangkan sangat ditentukan oleh berbagai parameter antara lain faktor kekasaran, ketebalan lapisan, permitivitas dielektrik dan permeabilitas magnet bahan serta ukuran butir partikel. Juga sangat bergantung pada koefisien transmisi dan refleksi perambatan gelombang elektromagnetik terhadap material.

Pada gambar 2.8 disajikan ilustrasi absorber gelombang elektromagnet menggunakan metoda *Dallenbach layer*. *Dallenbach layer* merupakan material tipis ferroelektrik dan atau ferromagnet yang dilapiskan dalam konduktor murni (logam) yang mampu memantulkan gelombang elektromagnet secara sempurna. Dengan adanya *Dallenbach layer* radiasi gelombang elektromagnet dapat direduksi menjadi minimum.



Gambar 2.8 Ilustrasi lapisan penyerap gelombang Elektromagnet tipe Dallenbach[64]

Untuk mendapatkan nilai *reflection loss* optimum diperlukan ketebalan lapisan sebesar $\frac{1}{4}$ dari nilai panjang gelombang elektromagnet yang menetrasi pada lapisan. Metoda *Dallenbach* disempurnakan oleh *Jauman* dengan memisahkan material absorber dengan metal konduktif sebesar $\frac{1}{4}$ panjang gelombang seperti diilustrasikan dalam Gambar 2.9. Dari metoda yang dikembangkan oleh *Jauman* dapat dihasilkan lapisan penyerap yang lebih tipis dibandingkan dengan metoda *Dallenbach*.

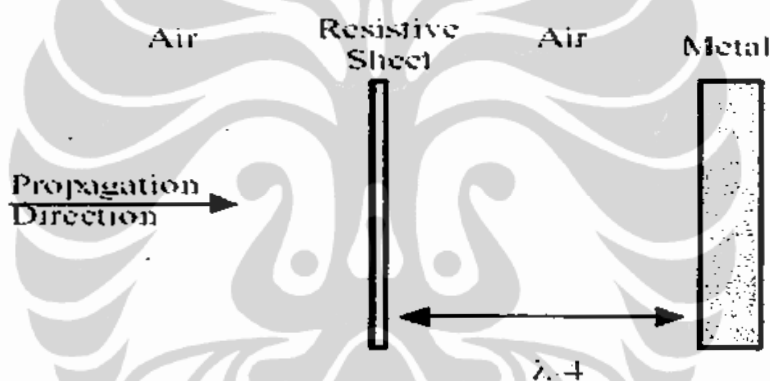


Gambar 2.9 Penyerap gelombang elektromagnet Untuk aplikasi pada microwave dari bahan dielektrikum tipe T_RAM (A) dan bahan magnet (B) serta tipe C adalah MAGRAM atau *Magnetic Radar Absorbing materials*[63]

Dari model yang dikembangkan oleh *Dallenbarch* telah menghasilkan berbagai material dielektrikum dan magnet untuk absorber elektromagnet dengan bentuk dan ukuran seperti diperlihatkan dalam gambar 2.9.

MAGRAM dikembangkan dari material magnet ferro dan ferrimagnet yang dipadukan (disuspensikan) dengan berbagai polimer seperti karet, resin maupun silicon binder. Sedangkan T-RAM merupakan material dengan dielektrikum yang tinggi bersifat transparan.

Meskipun kedua metoda ini sangat efektif diterapkan sebagai absorber elektromagnet. Tetapi berbagai kelemahan terjadi karena Jenis material yang digunakan memiliki frekuensi resonansi elektromagnet yang sangat bergantung pada frekuensi gelombang penetrasi. Sehingga pada frekuensi tertentu reflektansi gelombang tidak mampu direduksi secara sempurna.

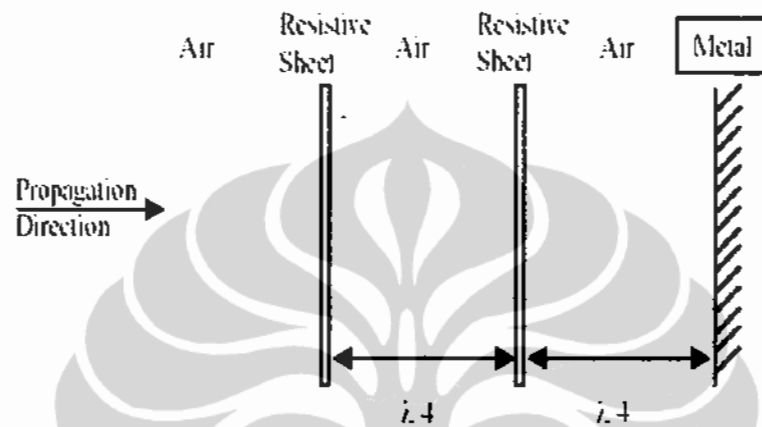


Gambar 2.10 Ilustrasi lapisan penyerap gelombang Elektromagnet dengan model *Jauman*[64].

Untuk mengatasi kondisi tersebut dikembangkan teknologi banyak lapisan (*multy layer*) yang dikenal dengan teknik *Salysbury screen*. Metoda *Salysbury screen* menggabungkan kedua metoda ini telah dikembangkan sebelumnya dan telah mulai dipatenkan pada tahun 1952[64]. Gambar 2.10 disajikan ilustrasi absorber gelombang elektromagnet menggunakan metoda *jauman layer*, sedangkan gambar 2.11 model yang dikembangkan oleh *Sallysburi*.

Teknik *Sallysburi* yang diilustrasikan dalam gambar 2.11 terdiri dari dua buah lapisan penyerap gelombang elektromagnet dan sebuah logam yang masing

masing dipisahkan oleh udara dengan jarak $\frac{1}{4}$ panjang gelombang. Seiring dengan perkembangannya material penyerap gelombang elektromagnet, telah banyak diaplikasikan untuk berbagai keperluan dalam *bidang design elektronik* maupun perangkat militer.

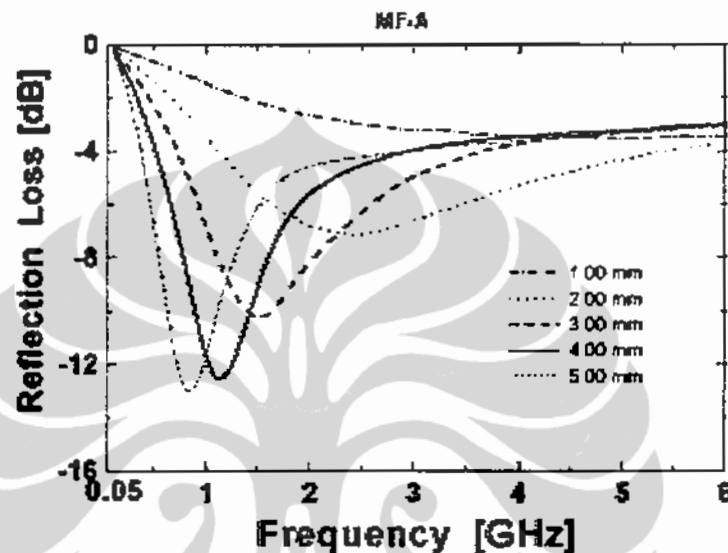


Gambar 2.11 Ilustrasi lapisan penyerap gelombang Elektromagnet dengan model Sallysburi[64]

Magnet ferrit dengan sifat sifat yang dimiliki sangat berpotensi sebagai magnet unggul untuk penyerap gelombang elektromagnet terutama pada frekuensi tinggi. Penelitian untuk aplikasi ini tidak berhenti sampai sekarang, tetapi terus berlanjut dengan berbagai penemuan material baru maupun rekayasa teknologi kearah struktur nanokristalin. Meskipun pada frekuensi yang rendah faktor resistivitas dan permeabilitas magnet tidak signifikan mempengaruhi karakteristik material tetapi pada frekuensi tinggi kedua faktor tersebut tidak dapat diabaikan. Dari nilai permeabilitas magnet kompleks yang diturunkan oleh persamaan Krammer dan Kronig[65] nilai permeabilitas sangat bergantung pada frekuensi seperti ditunjukkan dalam berbagai contoh dalam Gambar 2.1 sampai dengan 2.6 di atas.

Material dengan *Reflektion loss* yang rendah sangat diperlukan untuk aplikasi elektromagnet seperti untuk interferensi elektromagnet (EMI) dalam berbagai device elektronik yang sering dimanfaatkan misalnya sebagai *TV Gost*

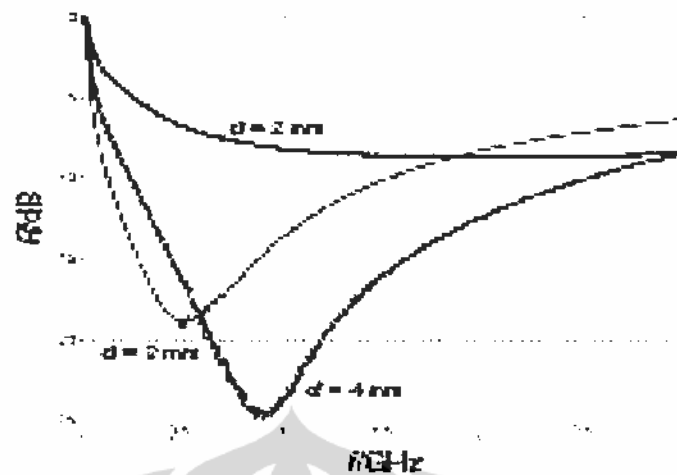
supresi, atau untuk mengurangi radiasi balik (*Back scatter*) pada perangkat antenna, juga dapat dimanfaatkan pula untuk *radar Absorbing material* (RAM) yang berfungsi sebagai material anti deteksi dan *kamuflyase*[66,67]. Berbagai material magnet yang berpotensi sebagai absorber elektromagnetik antara lain kelas spinel, garnet dan Hexaferrit dengan berbagai komposisi dan struktur:



Gambar 2.12 Refelksi loss untuk POX 90% MnZn-Ferrit(A)[68] dengan berbagai variasi ketebalan sampel

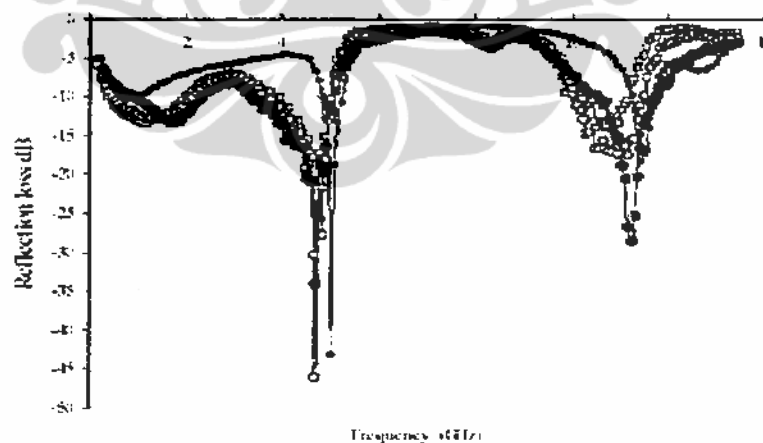
Material Mn-Zn Ferrit untuk berbagai ketebalan material yang ditunjukkan dalam gambar 2.12 terjadi *reflection loss* dari 50 MHz hingga 2 GHz atau mencapai *broadband* hingga ~ 2 GHz. Pada ketebalan 5.00 mm mampu menghasilkan faktor lossy hingga mencapai -12 dB dan mengalami penurunan pada ketebalan yang lebih kecil. Pada frekuensi di atas 4 GHz nilai *reflection loss* cenderung konstan pada ~ 4 dB saja sehingga sangat tidak efektif untuk surpresi elektromagnetik.

Pada kelas *spinel* tipe Ni-Ferrit [69] yang ditunjukkan dalam gambar 2.13 diuji pada berbagai ketebalan 2 mm hingga 4 mm pada frekuensi sampai dengan 3 GHz. Pada ketebalan 4 mm besarnya *reflektion loss* mencapai -25 dB pada frekuensi ~ 0.8 GHz, sedangkan ketebalalan 3 mm menurun menjadi -20 dB serta mendekati -10 dB pada 2 mm.



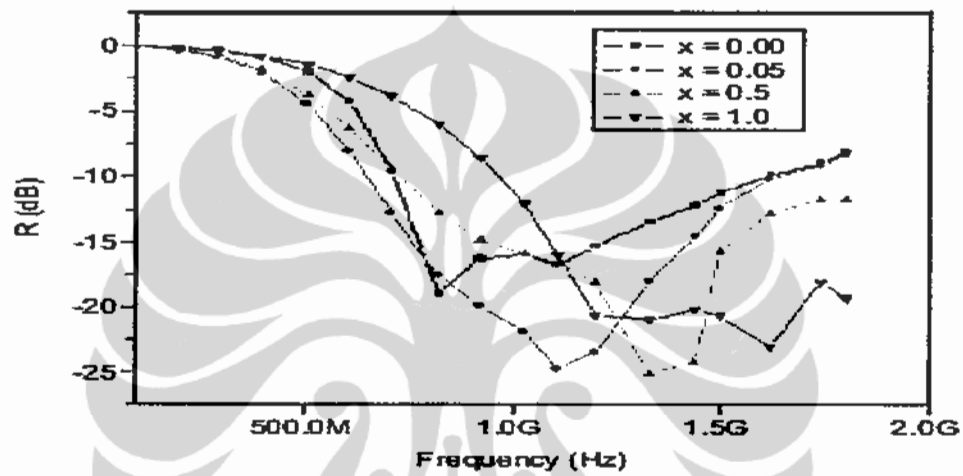
Gambar 2.13 Refelksi loss untuk Ni-Ferrit [69] dengan berbagai variasi ketebalan sampel

Reflection loss Magnet Garnet dengan material $Ce_xY_{3-x}Fe_5O_{12}$ telah diuji pada frekuensi hingga 14 GHz seperti ditunjukkan dalam gambar 2.14. Gambar 2.14 juga menunjukkan bahwa frekuensi resonansi material garnet pada daerah frekuensi hingga 14 GHz bersifat *multiband* pada daerah 2 GHz, 5GHz maupun 11 GHz. Puncak refleksi minimum ditunjukkan terletak pada frekuensi ~ 4.2 GHz dan ~ 12 GHz mencapai ~ 25 dB. Pada nilai $x > 0.15$ atau fasa $Ce_{0.15}Y_{2.85}Fe_5O_{12}$ telah terjadi pergeseran resonansi elektromagnetik menuju daerah frekuensi yang lebih tinggi.



Gambar 2.14 Refleksi loss untuk bahan ferrit tipe Garnet $Ce_xY_{3-x}Fe_5O_{12}$ (Ce;YIG)[47] pada $x=0.0$; 0.05; 0.10 dan ;0.15

Hexagonal ferrit lebih banyak dipromosikan sebagai magnet permanen terutama tipe M, meskipun demikian tipe lain seperti W, Y dan Tipe Z juga banyak dipromosikan sebagai penyerap gelombang elektromagnet[70]. Hasil kuantitatif $\text{BaCo}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{Fe}_{24-x}\text{O}_{41}$ (Z-Type)[61] yang didoping dengan Y_2O_3 telah diteliti dan nilai refleksition loss ditunjukkan dalam gambar 2.15. Semakin tinggi nilai x terjadi pergeseran reflection loss menuju arah frekuensi yang lebih tinggi, misalnya pada $x = 0.0$ terjadi pada frekuensi ~ 1 Ghz dan pada $x = 1.0$ telah bergeser menjadi ~ 1.4 Ghz dengan refleksi minimum mencapai -25 dB.

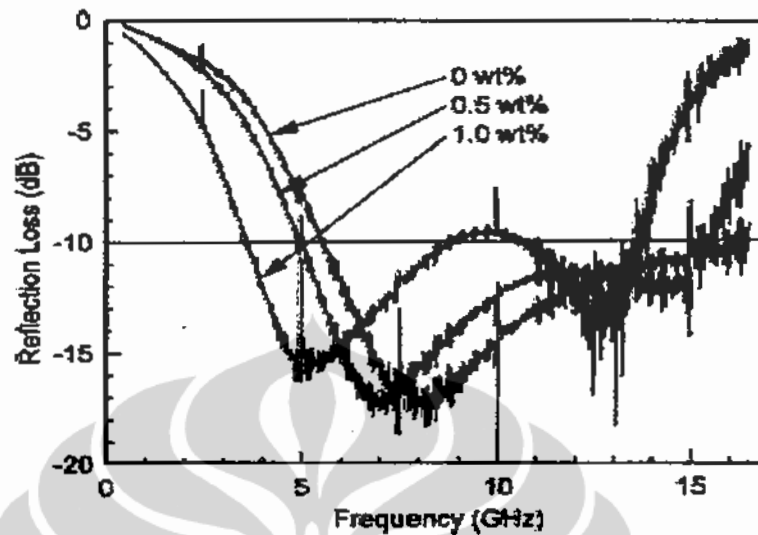


Gambar 2.15 Absorpsi gelombang mikro pada $\text{BaCo}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{Fe}_{24-x}\text{O}_{41}$ (Z-Type) yang didoping dengan Y_2O_3 [61].

Hasil kajian yang dilakukan juga menunjukkan terjadinya penurunan konstanta dielektrik ke arah frekuensi yang lebih tinggi sedangkan permeabilitas magnetnya mengalami kenaikan.

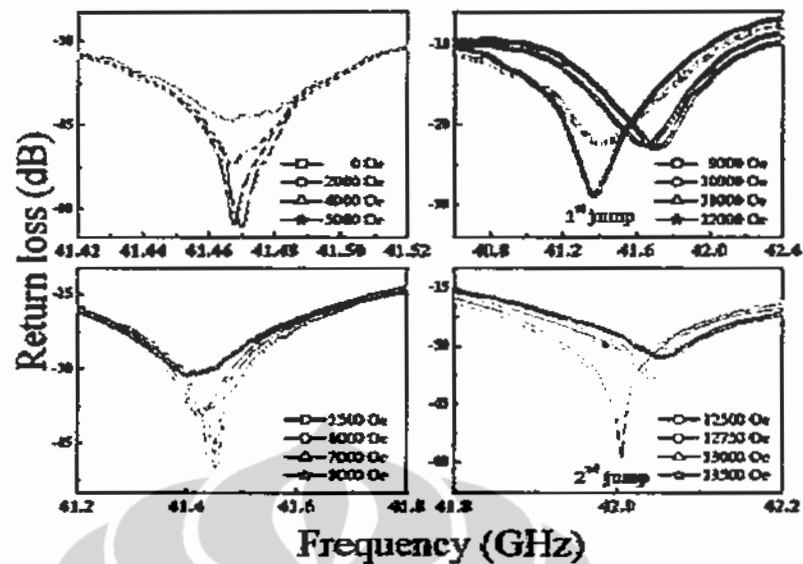
Substitusi ion Fe dengan Co dan Zn terhadap Tipe W dengan fasa $\text{BaFe}_{18}\text{O}_{27}$ telah dilakukan penelitian oleh Y.P Wu dan C.K Ong [71] membentuk komposisi $\text{BaCoZnFe}_{16}\text{O}_{27}$ berpotensi sebagai kandidat untuk *Radar Absorbing Material*. Hasil penelitian *reflection loss* yang ditunjukkan dalam gambar 2.16 diketahui bahwa pada frekuensi ~ 8 Ghz terjadi *reflection loss* sebesar -18 dB dan bersifat *multy band* pada *broadband* 0 Ghz sampai dengan 15 GHz. Dalam penelitian yang sama juga ditunjukkan bahwa material $\text{BaCoZnFe}_{16}\text{O}_{27}$ yang didoping dngan V_2O_5 menghasilkan perubahan complex permeabilitas hingga 42 % ($x=0.5$) hingga sampai dengan 67% (pada $x=1.0$). Akibat adanya doping

memberi pengaruh terhadap pergeseran *reflection loss* ke arah frekuensi yang lebih rendah.



Gambar 2.16 Reflektion loss untuk mikrokomposist $\text{BaCoZnFe}_{16}\text{O}_{27}$ yang didoping dengan V_2O_5 [71]

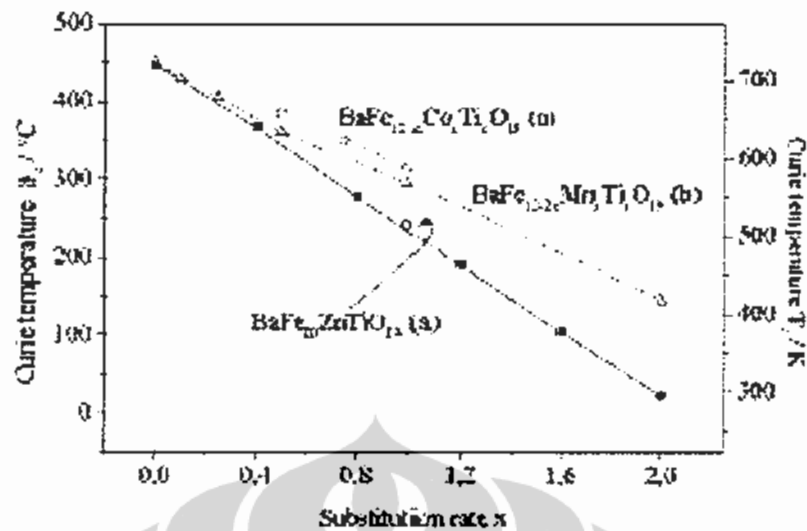
Terbukti pada $x = 0.5$ puncak refleksi terendah pada 7 GHz dan berkurang menjadi 5.0 GHz pada $x = 1.00$ dengan pelebaran yang masih tetap dipertahankan. Tipe M-hexaferrit pada material konvensional $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ memiliki *uniaxial anisotropy* tinggi dan permeabilitas kompleks kecil serta temperatur Curie tinggi. Dari hasil pengujian pada kristal tunggal (*single Cristal*) $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ memiliki *Frekuensi Magneto Resonansi (FMR)* pada kisaran 42.5 GHz[72]. Hasil pengujian empiris yang ditunjukkan pada gambar 2.18 terjadi serapan gelombang elektromagnet pada frekuensi 41.5 GHz.[73]. Dari hasil uji empiris tersebut terlihat adanya pergeseran magneto resonannya apabila berada dalam medan magnet luar seperti diperlihatkan dalam gambar tersebut. Gambar 2.17 menunjukkan nilai Reflektion loss untuk mikrokomposist $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ (Tipe M) yang sebagai fungsi medan magnet eksternal hingga ~ 13 T[72]



Gambar 2.17 Reflektion loss untuk mikrokomposit $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ (Tipe M) yang sebagai fungsi medan magnet eksternal hingga ~ 13 T [72]

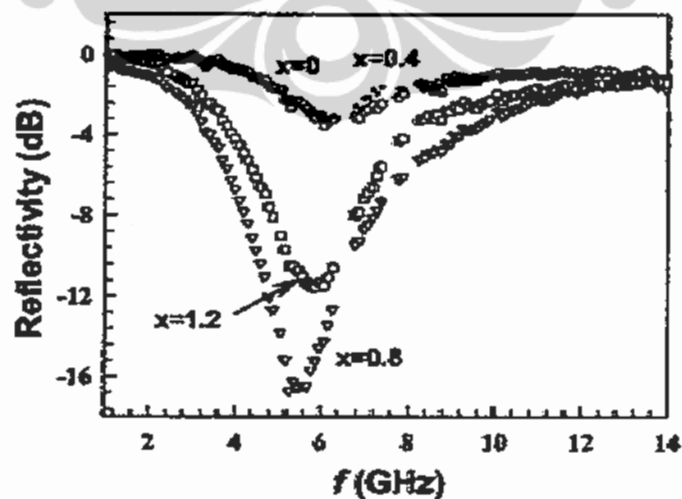
Berbagai studi empiris menunjukkan bahwa dengan modifikasi dan rekayasa struktur kristal nilai konstanta anisotropi dapat diturunkan, misalnya dengan substitusi ion Fe menggunakan logam divalen lain. Hasil penelitian tentang substitusi parsial ion Fe dengan ion Co dan Ti memperlihatkan bahwa fasa $\text{BaFe}_{12-2x}\text{Co}_x\text{Ti}_x\text{O}_{19}$ terjadi perubahan sifat anisotropi dari *uniaxial anisotropy* menjadi *planar anisotropy*. Perubahan anisotropy kristal tersebut terjadi ketika tingkat substitusi oleh ion Co dan Ti mencapai di atas 1.1% atomik. Demikian juga apabila dilakukan substitusi parsial oleh ion Co-Ru maupun ion Co-Ir, perubahan terjadi ketika nilai x lebih besar dari 0.5.

Substitusi ion Fe dengan logam-logam transisi lain juga berdampak pada sifat sifat magnet yang berhasil dirangkum oleh [74]. Dapat dilihat dalam Gambar 2.18. Substitusi ion Transisi Co-Ti, Mn-Ti, Zn-Ti menurunkan temperatur Curie dari 450°C hingga menjadi di bawah 100°C dan nilai temperatur Curie sangat rendah dicapai oleh komposisi substitusi ion Zn-Ti seperti diperlihatkan dalam gambar 2.19. Hal ini menunjukkan bahwa dengan substitusi menggunakan berbagai ion logam transisi telah terjadi interaksi *superexchange* antar ion yang menyebabkan berbagai perubahan sifat magnetiknya.



Gambar 2.18 Pengaruh substitusi ion logam transisi (Zn;Ti; MnTi dan Co/Ti ($x=0.0$ sd 2.0) terhadap Temperatur Curie fasa barium hexaferrit type-M [74]

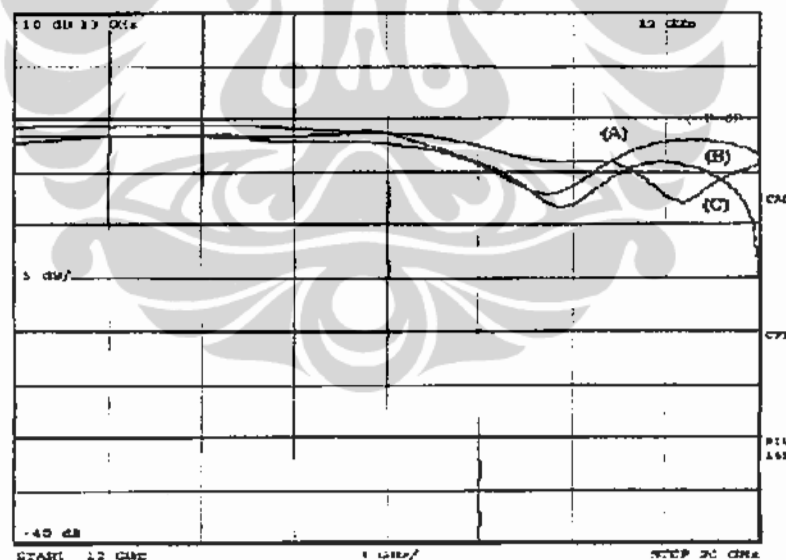
Hasil reflectivity (*reflection loss*) tipe M Hexaferrit disubstitusi oleh ion Co-Zr untuk komposisi material $\text{BaFe}_{12-2x}\text{Co}_x\text{Zr}_x\text{O}_{19}$ [75] memperlihatkan bahwa meningkatnya fraksi ion substitusi pada senyawa tersebut meningkatkan nilai reflectivity mencapai -16 dB pada frekuensi $\sim 4,7$ Ghz untuk $x = 0.8$. Pada $x = 1.2$ terjadi penurunan reflectivity yang dimungkinkan karena terjadi peningkatan ukuran butir kristal. Dalam Gambar 2.19 menunjukan Estimasi teoritis reflectivity (*reflection loss*) pada sampel $\text{BaFe}_{12-2x}\text{Co}_x\text{Zr}_x\text{O}_{19}$.



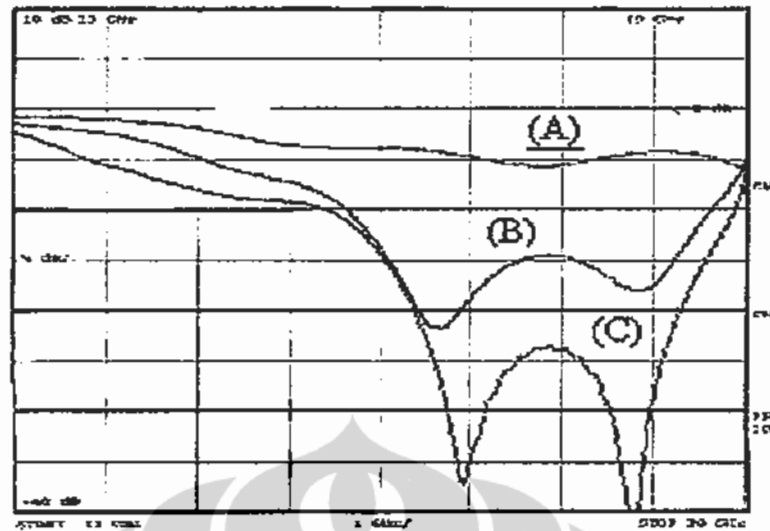
Gambar 2.19 Estimasi teoritis reflectivity pada sampel $\text{BaFe}_{12-2x}\text{Co}_x\text{Zr}_x\text{O}_{19}$ [75]

Ghasemi dkk dan Meshram[76,78] melakukan sintesis pembentukan material $\text{Ba}(\text{MnTi})_x\text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19}$ dengan metoda konvensional. Telah diperoleh informasi bahwa pembentukan fasa $\text{Ba}(\text{MnTi})_x\text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19}$ ($x=1.5$)[76] dan $\text{Ba}(\text{MnTi})_{1.6}\text{Fe}_{8.8}\text{O}_{19}$ [78] terjadi secara sempurna pada temperatur di atas 1250°C , lebih tinggi dari fasa konvensional (1200°C)[79]. Gambar 2.20 menunjukkan Reflektion loss $\text{BaFe}_9\text{Co}_{1.5}\text{Ti}_{1.5}\text{O}_{19}$ (A), dan $\text{BaFe}_9\text{Mn}_{1.5}\text{Co}_{1.5}\text{O}_{19}$ (B) serta $\text{BaFe}_9\text{Mn}_{1.5}\text{Ti}_{1.5}\text{O}_{19}$ (C) pada ketebalan 1.5 mm.

Gambar 2.20 dan 2.21 menunjukkan *reflection loss* sebagai fungsi frekuensi yang diamati untuk berbagai ketebalan sampel dalam interval 12 GHz hingga 20 GHz. Pada gambar 2.25 ditunjukkan bahwa dengan ketebalan 1.5 mm besarnya *reflection loss* untuk material $\text{BaFe}_9\text{Co}_{1.5}\text{Ti}_{1.5}\text{O}_{19}$ memiliki frekuensi resonansi magnet pada frekuensi ~19.2 GHz yang lebih tinggi dibandingkan kedua material lainnya. Pada material $\text{BaFe}_9\text{Mn}_{1.5}\text{Co}_{1.5}\text{O}_{19}$ dan $\text{BaFe}_9\text{Mn}_{1.5}\text{Ti}_{1.5}\text{O}_{19}$ memiliki frekuensi resonansi yang hampir sama (17.6-18 GHz) dengan *broadband* hingga 3 GHz.



Gambar 2.20 Reflektion loss $\text{BaFe}_9\text{Co}_{1.5}\text{Ti}_{1.5}\text{O}_{19}$ (A), dan $\text{BaFe}_9\text{Mn}_{1.5}\text{Co}_{1.5}\text{O}_{19}$ (B) serta $\text{BaFe}_9\text{Mn}_{1.5}\text{Ti}_{1.5}\text{O}_{19}$ (C) pada ketebalan 1.5 mm[76]



Gambar 2.21 Reflektion loss $\text{BaFe}_9\text{Co}_{1.5}\text{Ti}_{1.5}\text{O}_{19}$, dan $\text{BaFe}_9\text{Mn}_{1.5}\text{Co}_{1.5}\text{O}_{19}$ serta $\text{BaFe}_9\text{Mn}_{1.5}\text{Ti}_{1.5}\text{O}_{19}$ pada ketebalan 2.5 mm [76]

Pada gambar 2.21 terlihat komposisi $\text{BaFe}_9\text{Mn}_{1.5}\text{Ti}_{1.5}\text{O}_{19}$ dengan ketebalan 2 mm menunjukkan absorpsi gelombang mikro paling tinggi dan memiliki *broadband* hingga 3 GHz dari 16 GHz hingga 19 GHz.

Material $\text{BaFe}_9\text{Co}_{1.5}\text{Ti}_{1.5}\text{O}_{19}$ memiliki frekuensi resonansi yang lebih tinggi dibandingkan dengan material $\text{BaFe}_9\text{Mn}_{1.5}\text{Co}_{1.5}\text{O}_{19}$ dan $\text{BaFe}_9\text{Mn}_{1.5}\text{Ti}_{1.5}\text{O}_{19}$. Perbedaan frekuensi ini disebabkan oleh adanya substitusi parsial ion Fe dengan ion Co yang berpengaruh pada perubahan sifat anisotropi kristal dari uniaxial anisotropi menjadi planar anisotropi, sehingga menyebabkan pergeseran frekuensi resonansinya.

2.5 Resonansi Elektromagnetik

Ferromagnetik merupakan material yang seolah olah telah memiliki medan magnet mikroskopi meskipun material tidak berada dalam medan magnet luar. Besarnya medan magnet mikroskopi ditimbulkan oleh adanya dua bentuk energi yaitu energi demagnetisasi dan energi magnetokristalin. Kedua jenis ini dipandang sebagai energi bebas Gibbs dan dirumuskan dalam persamaan (15)

$$\begin{aligned}
 F &= E_d + E_a \\
 &= \frac{1}{2} M_s^2 (N_x \sin^2 \theta \cos^2 \phi + N_y \sin^2 \theta \sin^2 \phi + N_z \cos^2 \theta) + \\
 &\quad + (K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta + K_3 \sin^6 \theta \cos 6\phi) \dots \dots \dots (3)
 \end{aligned}$$

Suku pertama E_d mewakili energi demagnetisasi sedangkan suku kedua E_a sebagai energi anisotropi magnetokristalin. N_x , N_y , dan N_z adalah mewakili faktor demagnetisasi sepanjang sumbu x,y dan z sedangkan K_1 dan K_2 serta K_3 merupakan konstanta anisotropi magnetokristalin orde satu, orde kedua dan ketiga.

Bila Energi anisotropi magnetokristalin hanya disumbang oleh orde pertama, kedua dan ketiga saja, maka medan anisotropi H_θ dan H_ϕ adalah

$$H_\theta = \frac{2(K_1 + 2K_2)}{M_s} \dots \dots \dots (4)$$

$$H_\phi = \frac{36K_3}{M_s} \dots \dots \dots (5)$$

Bila gelombang elektromagnetik dengan frekuensi $\omega = 2\pi f$ berinteraksi dengan material ferromagnetik besarnya frekuensi resonansi universal yang dialami oleh suatu material dapat rumuskan sebagai persamaan (4)[77].

$$f_r = \frac{\gamma}{2\pi M_s \sin \theta} \left[\left(\frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2} \right) \left(\frac{\partial^2 F}{\partial \phi^2} \right) - \left(\frac{\partial^2 F}{\partial \theta \partial \phi} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (6)$$

dengan F sebagai energi bebas yang berasal dari energi anisotropi magnetokristalin dan energi demagnetisasi seperti ditunjukkan dalam persamaan

(3). Besaran $\frac{\gamma}{2\pi}$ adalah faktor giromagnet sebesar 2.8 GHz/kOe dan M_s sebagai magnetisasi total, sedangkan θ dan ϕ masing masing sebagai sudut polar dan azimuth yang berhubungan dengan magnetisasi. Untuk presisi dari vektor

magnetisasi pada kondisi setimbangnya akan dipenuhi syarat $\frac{\partial F}{\partial \theta} = 0$ dan $\frac{\partial F}{\partial \phi} = 0$. Dengan substitusi persamaan (3) dan (4) maka besarnya frekuensi resonansi dalam arah c axis dapat ditunjukkan dalam penyelesaian

$$f_r = \frac{\gamma}{2\pi} [H_0 + (N_x - N_z)M_x]^{\frac{1}{2}} [H_0 + (N_x - N_y)M_y]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(7)$$

Dalam persamaan (5) $N_x M_x$, mewakili medan demagnetisasi statis kearah x dan $N_y M_y$, serta $N_z M_z$, merupakan magnetisasi kearah y dan z. Untuk sampel yang berbentuk bola nilai $N_x = N_y = N_z = 1/3$ frekuensi resonansinya diberikan oleh persamaan (8).

$$f_r = \frac{\gamma}{2\pi} [H_0 H_0]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(8)$$

Mengingat H_0 sebanding dengan konstanta anisotropi material dan berbanding terbalik dengan magnetisasi total, maka semakin tinggi nilai H_0 , frekuensi resonansi terjadi pada frekuensi tinggi. Hasil kajian oleh kristal tunggal Ba-Ferite diperoleh resonansi yang sangat tinggi mendekati 42.5 Ghz [72] dan mengalami penurunan apabila ion Fe disubstitusi secara parsial oleh ion Mn. Apabila disubstitusi dengan ion Al [73] terjadi resonansi pada frekuensi ~7 GHz. Hasil hasil kajian ini dijadikan dasar untuk merencanakan struktur agar memenuhi frekuensi resonansi tertentu.

2.6 Kajian Teoritik Interaksi Gelombang Elektromagnet Terhadap Perubahan Permeabilitas Material Magnet

Telah banyak diketahui bahwa parameter dielektrikum dan magnetisme meliputi vektor medan listrik \vec{E} , vektor medan magnet \vec{H} , Induksi magnet \vec{B}

displacement \vec{D} dan polarisasi \vec{P} serta magnetisasi \vec{M} semuanya telah dipresentasikan secara lengkap oleh Maxwell[74].

Magnetisasi adalah jumlah momen dipole magnet setiap unit volume. Bila medan magnet \vec{H} dikenakan kepada material magnet maka material termagnetisasi sehingga timbul medan magnet induksi \vec{B} . Hubungan antara medan magnet luar $\mu_0\vec{H}$ magnetisasi $\mu_0\vec{M}$ dengan medan magnet induksi \vec{B} diberikan oleh persamaan(9)

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{M} \dots\dots\dots(9)$$

Hubungan antara magnetisasi dengan medan magnet luar adalah mengikuti persamaan $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$ dengan χ disebut sebagai subseptibilitas material. Subseptibilitas material memiliki relasi dengan permeabilitas sedemikian sehingga $\mu = \mu_0(1 + \chi_m)$.

Demikian juga apabila medan listrik \vec{E} dikenakan dalam suatu material dielektrik akan terjadi pergeseran medan listrik dalam material yang disertai dengan polarisasi listrik \vec{P} sesuai dengan persamaan(10)

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon \vec{E} \dots\dots\dots(10)$$

Interaksi medan listrik dalam material mengikuti pola yang mirip dengan interaksi medan magnet dalam material. Besarnya polarisasi listrik mengikuti relasi $\vec{P} = \epsilon_0 \chi_e \vec{E}$ dengan χ_e adalah subseptibilitas listrik. Nilai subseptibilitas listrik dengan permittivitas listrik memiliki hubungan sebagai $\epsilon = \epsilon_0(1 + \chi_e)$. Bila diasumsikan gelombang elektromagnet terpolarisasi dengan membawa medan magnet eksternal H merambat ke arah z. Maka terjadi interaksi medan magnet luar dengan material magnet, sehingga akan terjadi pergerakan secara dinamis dinding domain. Besarnya interaksi ini dapat dirumuskan dalam persamaan (11).

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma\mu_0(\vec{M}\times\vec{H}_{eff}) \dots\dots\dots(11)$$

γ adalah rasio giromagnet material yang besarnya $ge/2m_e = 1.759 \times 10$ C/kg dan \vec{H}_{eff} sebagai medan magnet efektif dari medan luar. Nilai e dan m_e sebagai muatan dan massa elektron sedangkan g sebagai faktor giromagnet. Seandainya besarnya medan magnet luar $\vec{H} = \mu_0 \vec{H}_0$ bersifat statis dengan arah tertentu, maka besarnya magnetisasi pada arah sumbu H_0 memiliki frekuensi anguler sebesar $\omega_0 = \gamma\mu_0 H_0$ yang menyebabkan dinding domain berpresisi seragam. Tetapi bila dalam waktu yang sangat pendek sebuah medan H_1 dengan frekuensi sama dengan frekuensi magnetisasi maka akan menghasilkan sebuah superposisi pada H_0 dan menyebabkan kondisi resonansi yang menyebabkan energi dari medan magnet luar ditransfer ke dalam material. Peristiwa ini dikenal dengan istilah fenomena dumping.

Peristiwa fenomena dumping pertama kali diperkenalkan pada tahun 1935 oleh Landau-Lifshitz [75] dan dikenal sebagai model Landau Lifshitz. Model Landau Lifshitz dipresentasikan secara matematis dalam bentuk persamaan 12.

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma\mu_0(\vec{M}\times\vec{H}_{eff}) - \frac{\Lambda}{|M|^2} \vec{M}\times(\vec{M}\times\vec{H}) \dots\dots\dots(12)$$

Λ adalah suatu konstanta yang memiliki dimension $[T]^{-1}$ yang bernilai positif disebut frekuensi relaksasi. Gilbert mengasumsikan bahwa resonansi terjadi karena perubahan magnetisasi sesaat sehingga ditimbulkan gerak dinamis yang disajikan dalam persamaan 13.

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma(\vec{M}\times\vec{H}_{eff}) + \alpha \frac{\vec{M}}{|M|} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial t} \dots\dots\dots(13)$$

α adalah besaran tanpa satuan yang disebut faktor damping. Kedua persamaan ini selanjutnya disebut dengan model Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG). Untuk nilai perubahan damping yang tegak lurus dengan arah M maka dapat ditunjukkan

$$\vec{M} \cdot \frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = \frac{1}{2} \frac{\partial |\vec{M}|^2}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots(14)$$

Solusi persamaan (14) menghasilkan $|\vec{M}| = M$, yang merupakan nilai magnetisasi total ic yang besarnya ditentukan oleh fasa dan komposisi material serta temperatur. Dalam persamaan di atas besarnya medan \vec{H} merupakan gabungan dari berbagai medan eksternal dan medan magnet hasil interaksi sehingga perlu dituliskan $\vec{H} = \vec{H}_{\text{eff}}$ sebagai

$$\vec{H} = \vec{H}_{\text{eff}} = \vec{H}_0 - N_c \vec{M}_0 + \vec{H}_1 - N_c \vec{M}_1 \dots\dots\dots(15)$$

Suku $H_0 - N_c M_0$ sebagai medan static dan $H_1 - N_c M_1$ mewakili medan efektif dinamik. Selanjutnya persamaan (13) di atas dapat dirubah dalam bentuk persamaan (16) yang nilainya sebesar

$$\frac{\partial(\vec{M}_0 + \vec{M}_1)}{\partial t} = -\gamma\mu_0 [(\vec{M}_0 + \vec{M}_1) \times (\vec{H}_0 + \vec{H}_1)] + \alpha \frac{(\vec{M}_0 + \vec{M}_1)}{M_s} \times \frac{\partial(\vec{M}_0 + \vec{M}_1)}{\partial t} \dots\dots\dots(16)$$

Dengan mengambil persamaan (16) dan H_1 memiliki phase perambatan $e^{i\omega t}$ serta induksi magnet $M_1(r,t) \approx M e^{i\omega t}$, sehingga persamaan (16) dapat dipresentasikan menjadi persamaan (17)

$$-i\omega \vec{M}_1 - \gamma\mu_0 (\vec{H}_0^e - N_d \vec{M}_0) \times \vec{M}_1 + -i\omega \alpha \frac{\vec{M}_0}{M_s} \times \vec{M}_1 = -\gamma\mu_0 \vec{M}_0 \times \vec{H}_1 \dots\dots\dots(17)$$

Persamaan (17) dapat disederhana bila dibatasi pada bidang planar, dimana komponen $Z = 0$ sedemikian sehingga hanya disumbang dari orientasi bidang xy

atau hanya memiliki komponen μ_{xx} , μ_{yy} , μ_{zz} , dan μ_{xy} serta $\mu_{xz} = \mu_{zx} = \mu_{yz} = \mu_{zy} = 0$. Apabila dikenalkan sebuah vektor metrik identitas $M=IM$ sedemikian sehingga $I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ dan $\bar{m}_0 = \frac{\bar{M}_0}{M_1}$ dan $\omega_m = \gamma\mu_0 M_1$, serta $\beta = (H_0^e - N_d M_0)$ maka besaran besaran dalam persamaan (9) di atas dapat disederhanakan menjadi $[-i\omega I - (\omega_m \beta - i\omega\alpha)\bar{m}_0 x \bar{I}]M_1 = -\omega_m \bar{m}_0 x \bar{H}_1$, atau dalam bentuk matrik dapat dilihat dalam persamaan (18).

$$-i\omega I - (\omega_m \beta - i\omega\alpha)\bar{m}_0 x \bar{I} = \begin{pmatrix} -i\omega & \omega_m \beta - i\omega\alpha \\ -\omega_m \beta + i\omega\alpha & -i\omega \end{pmatrix} \dots\dots\dots(18)$$

Persamaan (10) terjadi karena sifat ortogonal dari medan sedemikian sehingga nilai $\bar{m}_0 \bar{M}_1 = 0 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ dan $\bar{m}_0 x \bar{M}_1 = \bar{m}_0 x I = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$. Dengan demikian persamaan (10) dapat dirubah dalam bentuk matrik menjadi

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_{1,1} \\ M_{1,2} \end{pmatrix} = -\omega_m \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_{1,1} \\ H_{1,2} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} M_{1,1} \\ M_{1,2} \end{pmatrix} = -\frac{\omega_m}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}} \begin{pmatrix} a_{22} & -a_{12} \\ a_{11} & a_{21} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_{1,1} \\ H_{1,2} \end{pmatrix} \dots\dots\dots(19)$$

Persamaan (19) merupakan relasi yang sudah dikenal antara medan induksi dengan medan magnet, biasa dirumuskan $M_1 = \chi H_1$ dengan χ adalah supseptibilitas magnet yang besarnya

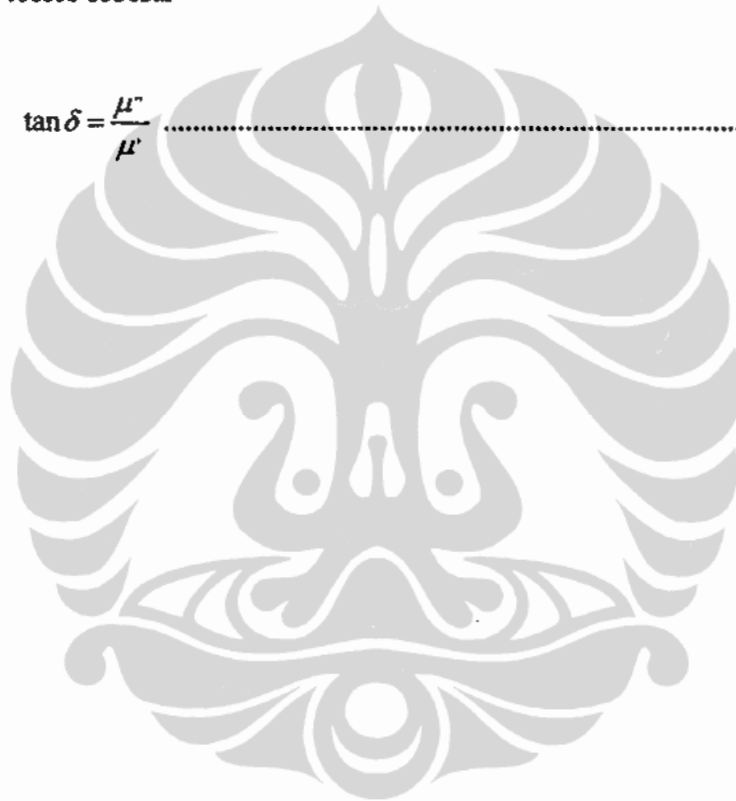
$$\chi = \frac{1}{(\beta - i\alpha\omega/\omega_m)^2 - (\omega/\omega_m)^2} \begin{pmatrix} \beta - i\alpha\omega/\omega_m & -i\omega/\omega_m \\ i\omega/\omega_m & \beta - i\alpha\omega/\omega_m \end{pmatrix} \dots\dots\dots(20)$$

Permeabilitas magnet $\mu(\omega)$ merupakan besaran tensor yang berhubungan dengan subseptibilitas yaitu $\mu_0(\chi + I) = \mu_0\mu$ maka

$$\mu(\omega) = 1 + \frac{\beta - i\alpha\omega / \omega_m}{(\beta - i\alpha\omega / \omega_m)^2 - (\omega / \omega_m)^2} \dots\dots\dots(21)$$

Dari persamaan 21 terlihat bahwa permeabilitas material adalah fungsi dari frekuensi gelombang electromagnet. Bila dipisahkan antara nilai real dan imaginernya, persamaan (21) dapat dituskan menjadi real $\mu'(\omega) + \mu''(\omega)$. Permeabilitas imajiner $\mu''(\omega)$ sangat menentukan energi *magnetic loss* dengan faktor *losses* sebesar

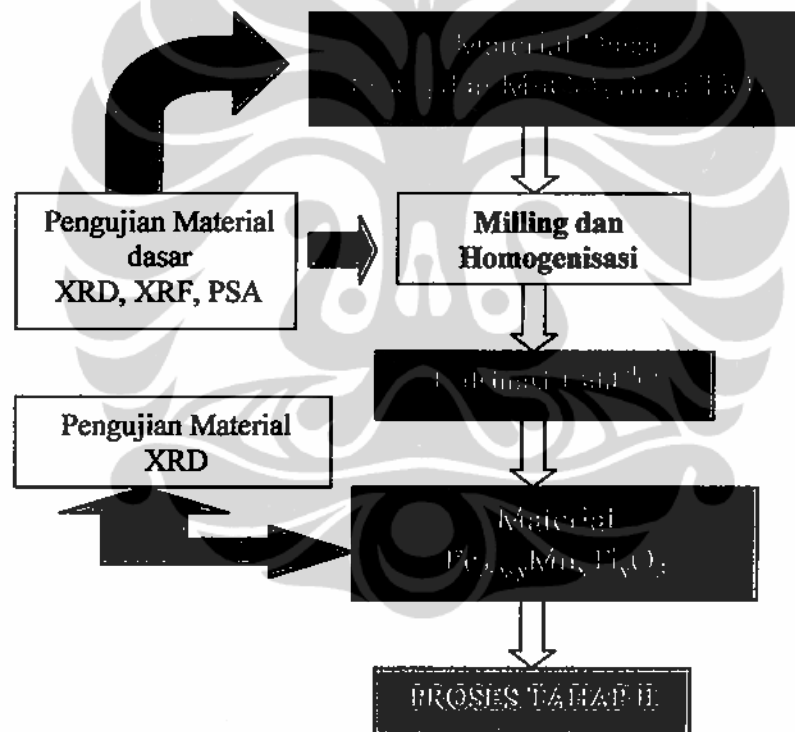
$$\tan \delta = \frac{\mu''}{\mu'} \dots\dots\dots(22)$$



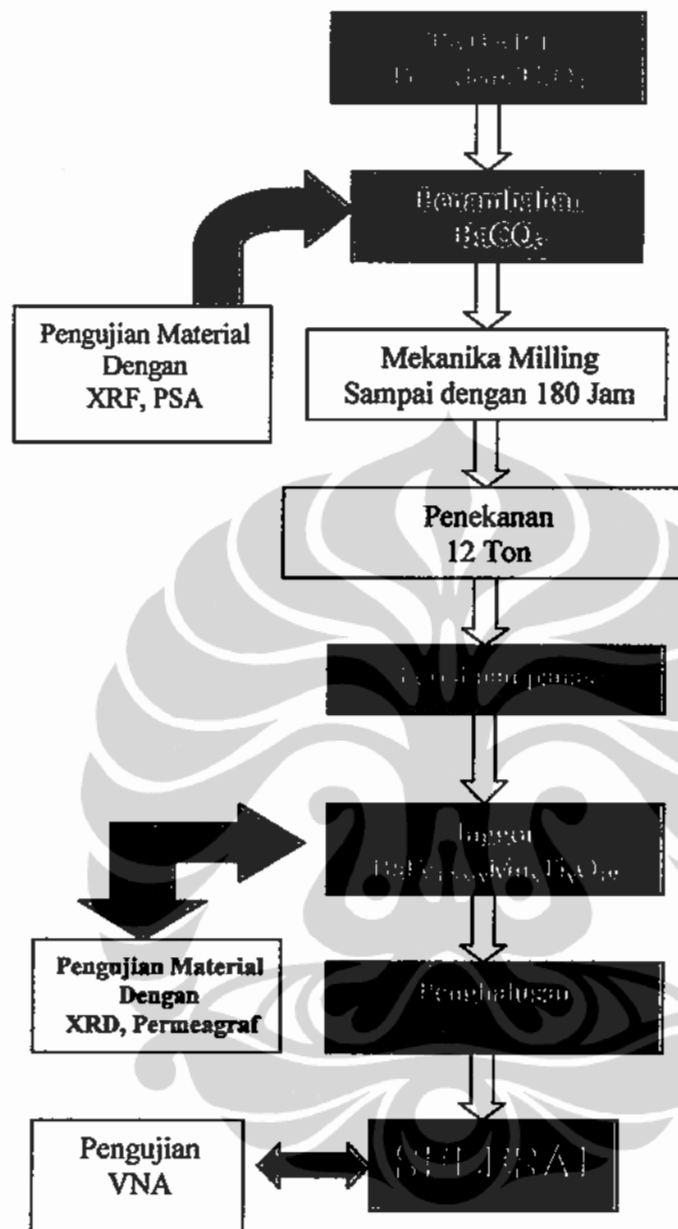
BAB 3

METODE PENELITIAN DAN PROSEDUR PERCOBAAN

Penelitian ini dititik beratkan pada preparasi material mencakup pembuatan magnet berbasis $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ yang disubstitusi secara parsial dengan menggunakan ion Mn dan Ti melalui dua tahap. Tahapan pertama mencakup substitusi ion Mn, Ti dan Mn + Ti menggantikan secara parsial ion Fe dalam struktur Fe_2O_3 atau *ferrite* menjadi $(\text{Fe},\text{Mn},\text{Ti})_2\text{O}_3$ atau *ferrite* termodifikasi. Tahapan kedua adalah pembentukan material barium hexaferrite termodifikasi atau $\text{BaO} \cdot 6(\text{Fe},\text{Mn},\text{Ti})_2\text{O}_3$ melalui pepaduan mekanik menggunakan BaCO_3 dan *ferrite* termodifikasi. Secara lengkap proses penelitian ditunjukkan dalam diagram gambar 3.1 dan 3.2



Gambar 3.1 Skema metoda penelitian Tahap I pembentukan fasa $\text{Fe}_{2-x-y}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_3$



Gambar 3.2 Skema metoda penelitian Tahap II pembentukan fasa $\text{BaFe}_{12-x-y}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_9$

3.1 Preparasi Pembentukan Fasa $\text{Fe}_{2-x-y}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_3$

Serbuk material Fe_2O_3 dan MnCO_3 masing masing dengan ukuran butir ~ 10 μm , diperoleh dari lembaga komersial Merck. Dengan komposisi Fe_2O_3 dan MnCO_3 dicampur melalui percampuran padat yang dibantu dengan perangkat Milling MM-200 selama delapan jam.

Masing masing paduan memiliki berat total yang hamper sama yang berkisar antara empat hingga 5 gram yang diharapkan dengan waktu milling sama memiliki homogenitas yang sama. Selanjutnya sampel dibentuk padat dengan kompresi 10 ton dengan diameter ~ 10 mm dan ketebalan 2 ~ 4 mm selanjutnya menjalani proses substitusi solid state reaction pada temperatur 1300 C selama 4 jam.

Untuk membentuk fasa $Fe_{1.92}Ti_{0.08}O_3$ dibutuhkan Fe_2O_3 dipadukan dengan TiO_2 . Selanjutnya masing masing sampel dibentuk paduan padat dengan penekanan 10 Ton dalam cetakan satu arah dengan diameter 10 mm. sampel yang dihasilkan memiliki diameter sesuai dengan diameter cetakan dan ketebalan sampel 2 mm hingga 4 mm. Preparasi pembentukan fasa $Fe_{2-x}Mn_xO_3$ dan pembentukan fasa $Fe_{2-y}Ti_yO_3$ secara keseluruhan diperlihatkan dalam tabel 3.1 dan tabel 3.2

Tabel 3.1. Fraksi berat ion Mn dan untuk membentuk fasa $Fe_{2-x}Mn_xO_3$

Nomor	Masa komposisi material (Gram)		Rumus Komposisi $Fe_{2-x}Mn_xO_3$
	Fe_2O_3	$MnCO_3$	
1	3.670	0.481	$Fe_{1.83}Mn_{0.17}O_3$
2	3.340	0.960	$Fe_{1.67}Mn_{0.33}O_3$
3	3.008	1.443	$Fe_{1.50}Mn_{0.50}O_3$
4	2.011	2.895	$FeMnO_3$

Tabel 3.2 Fraksi berat ion Ti untuk membentuk fasa $Fe_{2-y}Ti_yO_3$

Nomor	Masa komposisi material (Gram)		Rumus Komposisi $Fe_{2-y}Ti_yO_3$
	Fe_2O_3	TiO_2	
1	3.850	0.167	$Fe_{1.92}Ti_{0.08}O_3$
2	3.697	0.337	$Fe_{1.83}Ti_{0.17}O_3$
3	3.389	0.678	$Fe_{1.67}Ti_{0.33}O_3$
4	3.077	1.026	$Fe_{1.5}Ti_{0.5}O_3$

Sampel dengan komposisi $Fe_{2-x-y}Mn_xTi_yO_3$ dibentuk melalui dua tahap sebagai berikut: Tahap pertama dibentuk campuran antara $MnCO_3$ dan TiO_2 dengan komposisi tertentu. Selanjutnya Preparasi pembentukan fasa $Fe_{2-x-y}Mn_xTi_yO_3$ dibentuk dengan menambahkan material Fe_2O_3 pada tahapan pertam, dengan komposisi secara keseluruhan diperlihatkan dalam tabel 3.3

Tabel 3.3 Fraksi berat ion Mn dan ion Ti untuk membentuk material $Fe_{2-x-y}Mn_xTi_yO_3$

Nomor	Masa komposisi material (Gram)			Rumus Komposisi
	Fe_2O_3	TiO_2	$MnCO_3$	
1	4.5251	0.2516	0.36185	$Fe_{1.8}Mn_{0.1}Ti_{0.1}O_3$
2	4.2857	0.3784	0.5443	$Fe_{1.7}Mn_{0.15}Ti_{0.15}O_3$
3	4.0449	0.5059	0.7278	$Fe_{1.6}Mn_{0.2}Ti_{0.2}O_3$
4	3.8027	0.6342	0.9123	$Fe_{1.5}Mn_{0.25}Ti_{0.25}O_3$
5	3.5592	0.7632	1.0978	$Fe_{1.4}Mn_{0.3}Ti_{0.3}O_3$

*Selengkapnya dapat dilihat pada lampiran

3.2 Preparasi Pembentukan Fasa $BaFe_{12-x-y}Mn_xTi_yO_9$

Fasa $Fe_{2-x-y}Mn_xTi_yO_3$ dicampur dengan Barium Carbonat untuk membentuk material $BaFe_{12-x-y}Mn_xTi_yO_9$ ($x=y=0.0;0.5;1.0;1.5;2.0$ dan 2.5). Keenam komposisi disintesis melalui mekanika alloy dan reaksi pembentukan padat (*solid state reaction*). Ukuran butir partikel yang telah diukur dengan *Particle size analyzer (PSA Coulter 100Q)* setelah dimixing selama 8 jam dengan perangkat *RETCH MM 200* dan dilanjutkan dengan pemilinan dengan *High Energy Vibration Ball mill* pada 1000 RPM. Untuk membentuk material dengan komposisi $BaFe_{12-x-y}Mn_xTi_yO_9$ menggunakan perangkat Ballmill yang memiliki perbandingan berat sampel dan berat bola sebesar 1: 30 dan dilakukan pemilinan selama 180 jam.

Granuler hasil mekanika milling berupa serbuk ultra halus dimasukkan dalam dies (cetak) yang terlebih dahulu dibersihkan dengan acetone dan dikompaksi secara perlahan dengan hidraulik piston yang dikontrol dengan motor elektrik pada tekanan akhir 10 Ton sehingga dihasilkan sampel pellet dengan diameter 10 mm dengan ketebalan 2~4 mm. Setelah tekanan hidraulik tercapai sampel dibiarkan dalam tekanan tersebut selama tigapuluh detik untuk

menghilangkan tegangan sisa (residual stress) sehingga sampel tidak mengalami patahan saat dikeluarkan dari alat cetak.

Studi pembentukan material $BaFe_{12-x-y}Mn_xTi_yO_{19}$ dilakukan dengan pemanasan pada berbagai temperatur $200^{\circ}C$, $400^{\circ}C$, $500^{\circ}C$, $750^{\circ}C$, $850^{\circ}C$, $900^{\circ}C$ dan $1000^{\circ}C$ serta $1200^{\circ}C$ dengan kecepatan perambatan panas 10 C/menit selama satu jam. Hasil pembentukan fasa dianalisis dengan XRD CoK_{α} (PW-1830 Philips Netherlands) pada sudut $2\theta = 20^{\circ}$ sampai dengan 115° dengan lebar step 0.02° . Untuk melihat ukuran butir kristal dilakukan dengan penghalusan step size 0.005 pada sudut $2\theta = 32^{\circ}$ sampai dengan 43° . Penentuan puncak difraksi dengan menggunakan model distribusi gauss dapat ditentukan puncak difraksi serta setengah lebar puncak (FWHM) yang optimum dan dengan menggunakan metoda *sherrer* [88] ukuran butir kristal dapat dianalisis secara akurat. Pengukuran sifat magnetik dilakukan dengan Permeagraf C/L Magnet-Physics Dr. Steingroever GmbH pada medan luar hingga 2.15 Tesla .

3.3 Penentuan Parameter Kristal

Untuk menentukan parameter kisi (lattice parameter) dapat dilakukan dengan berbagai metoda antara lain metoda Cohen [88,89]. Pada struktur hexagonal memiliki persamaan yang lebih complex dibandingkan dengan struktur Cubic karena ada dua parameter kisi (a dan c) yang kuantitasnya berbeda. Pada sistim tetragonal/hexagonal berdasarkan persamaan bragg $2d \sin \theta = n\lambda$ memiliki relasi

$$\frac{1}{d} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \dots\dots\dots(19)$$

$$\sum \alpha \sin^2 \theta = C \sum \alpha^2 + B \sum \alpha \gamma + A \sum \alpha \delta$$

$$\sum \gamma \sin^2 \theta = C \sum \alpha \gamma + B \sum \gamma^2 + A \sum \gamma \delta$$

$$\sum \delta \sin^2 \theta = C \sum \alpha \delta + B \sum \gamma \delta + A \sum \delta^2 \dots\dots\dots(20)$$

D merupakan jarak antara bidang, a dan sebagai parameter kisi h , k , dan l , sebagai parameter bidang λ sebagai panjang gelombang radiasi X ($Co=1.778\text{ \AA}$ dan $Cu=1.54056\text{ \AA}$). Dengan menyelesaikan parameter A , B , dan C dapat ditentukan

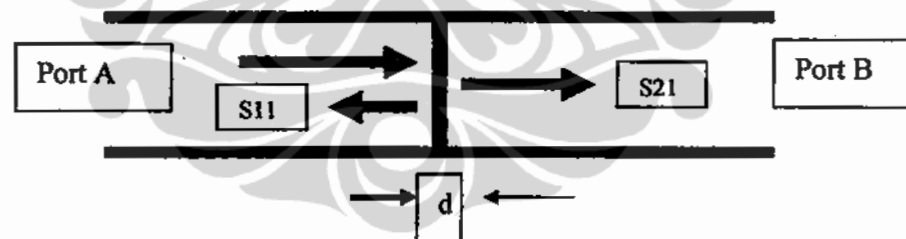
parameter kisi a dan c . Analisis XRD dapat digunakan untuk menentukan ukuran butir kristal dengan menggunakan relasi:

$$B \cos \theta = \frac{0.94\lambda}{\sigma} + \eta \sin \theta \dots\dots\dots(21)$$

B mewakili setengah lebar puncak setelah dikoreksi oleh faktor beberapa faktor dan σ sebagai ukuran butir serta $\eta = -\frac{2\Delta d}{d}$.

3.4 Pengujian Koefisien Transmisi, Koefisien Refleksi dan *Refleksi Loss* material

Sistim kerja *Network Analyser* menganalisis efek transmisi dan refleksi sumber gelombang elektromagnet yang dihasilkan dari signal frekuensinya seperti dilihat dalam gambar 3.1. Gelombang datang diwakili oleh R dari chanel referensi pada port A dan gelombang pantul diterima juga oleh chanel A serta gelombang transmisi diterima oleh chanel B (port B) seperti ditunjukkan dalam gambar 3.3.

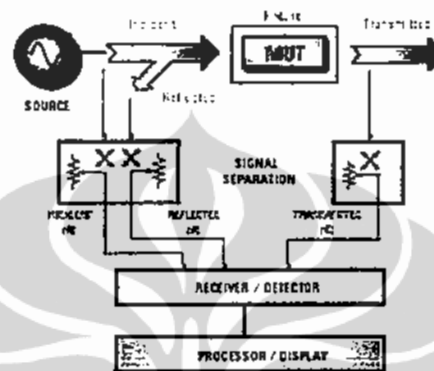


Gambar 3.3 skema perambatan gelombang elektronik dalam *airline wave Guide*[90]

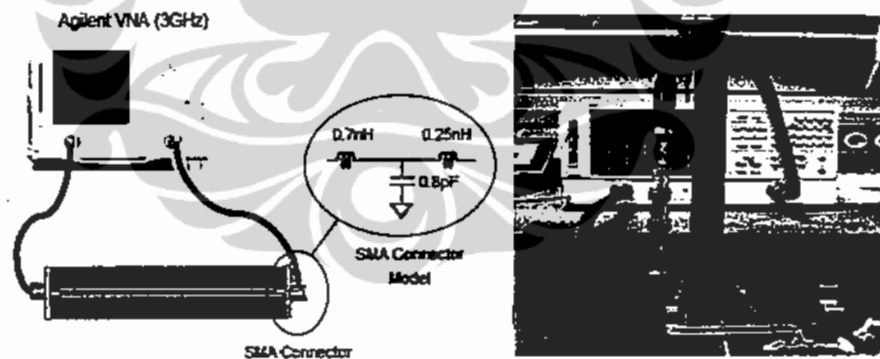
Polarisasi gelombang listrik dan magnet di dalam *airline waveguide* sangat berguna untuk menganalisa sifat sifat fisis dalam material setebal d . Dalam pengukuran ini diperlukan nilai standard untuk mengkalibrasi perangkat yang digunakan seperti pada *Vector Network Analyser* (VNA). Untuk mendapatkan akurasi data pengukuran koefisien transmisi dan koefisien reflesi dilakukan

terlebih dahulu dengan kalibrasi menggunakan metoda TRL (Transmission Reflection Line) dengan menempatkan MUT (Material Under Test) seperti pada gambar 3.4.

Network Analyzer Block Diagram



Gambar 3.4 Diagram blog pengukuran koefisien transmisi, dan koefisien refleksi dengan menggunakan network Analyser [91]. Gambar 3.5 merupakan skema rangkaian pengujian Refleksi dan transmisi Gelombang Mikro



Gambar 3.5 Skema rangkaian pengujian Refleksi dan transmisi Gelombang Mikro[92,93]

Pengukuran ini dimulai dari pengukuran transmisi line di udara yang ditransmisikan pada port pertama dan diterima oleh detektor pada port kedua dan diperoleh konstanta transmisi. Selanjutnya pada port satu pada ujung port pertama diletakkan beban 50 Ohm yang memberikan nilai bahwa semua refleksi

menjadi nol dan koefisien transmisi tak berhingga (*Open Reflection*). Setelah kalibrasi selesai dilakukan pada *Coaxial transmission line* dimasukkan MUT (*Material Under Test*) untuk mengetahui koefisien transmisi S_{21} dan koefisien Refleksi S_{11} yang dihasilkan oleh sampel.

Untuk analisis refleksi dan transmisi gelombang mikro pengujian dilakukan pada frekuensi Hingga 1 Ghz hingga 6 GHZ dengan prototipe sampel berbentuk bulk miliki diameter 7 mm dan ketebalan ~1.5 mm hingga 2 mm. Relasi S_{11} dan S_{21} sebagai faktor koefisien refleksi dan faktor transmisi selanjutnya dengan relasi seperti pada persamaan (23) sampai dengan (25) dapat ditentukan besarnya *reflection loss* menggunakan persamaan (26)[94-96]

$$X = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \dots\dots\dots(23)$$

$$\Gamma = X \pm \sqrt{X^2 - 1} \dots\dots\dots(24)$$

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \dots\dots\dots(25)$$

Sedangkan *reflection loss* dirumuskan

$$R_L = 10 \log \frac{1}{|\Gamma|^2}$$

$$R_L = -20 \text{Log} |\Gamma| \dots\dots\dots(26)$$

Menurut ZW Li[75] akibat resonansi elektromagnetik akan terjadi absorsi radiasi pada lapisan Konduktor murni (PEC) menyebabkan terjadinya *attenuasi* gelombang elektromagnetik dengan *reflection loss* sebesar

$$\text{Reflection Loss}(RL) = 10 \log \frac{1}{|R|^2} \dots\dots\dots(27)$$

Dengan $R = \frac{Z-1}{Z+1}$ sebagai koefisien refleksi gelombang, sedangkan Z mewakili impedansi oleh lapisan yang besarnya dirumuskan sebagai :

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r} \text{Tanh} \left(-i \frac{2\pi f d}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right)} \dots\dots\dots(28)$$

μ_r dan ϵ_r masing masing mewakili permeabilitas kompleks $\mu(\omega) = \mu'(\omega) + \mu''(\omega)$ dan permittivitas kompleks $\epsilon(\omega) = \epsilon'(\omega) + \epsilon''(\omega)$, dan f serta d masing masing mewakili frekuensi dan ketebalan lapisan.



BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan pembahasan berikut ini diawali dengan diskusi hasil preparasi senyawa magnetik komposisi nominal $\text{BaFe}_{12-2x}\text{Mn}_x\text{Ti}_x\text{O}_{19}$ (dengan $x = 0 - 2,5$ at.%). Preparasi senyawa ini dilakukan dalam dua tahapan, tahap pertama adalah mencakup preparasi komponen $\text{Fe}_{2-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_3$ menggunakan senyawa-senyawa oksida penyusun Fe_2O_3 , MnCO_3 dan TiO_2 . Tahap kedua adalah preparasi senyawa magnetik $\text{BaFe}_{12-2x}\text{Mn}_x\text{Ti}_x\text{O}_{19}$ menggunakan BaCO_3 dengan material hasil pada tahap pertama. Hasil evaluasi karakteristik material mencakup identifikasi fasa material, parameter sel unit fasa, sifat magnetik, mikrostruktur dan karakteristik serapan gelombang mikro pada jangkauan frekuensi yang tersedia sampai dengan 6 GHz. Komposisi nominal

4.1 Senyawa $\text{Fe}_{2-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_3$

Pada Tabel 4.1 diringkas komposisi nominal komponen material magnetik ferrite yang diteliti.

Tabel 4.1 Fraksi berat ion Mn dan ion Ti fasa $\text{Fe}_{2-x-y}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_3$

Tabel 3.3 Fraksi berat ion Mn dan ion Ti untuk membentuk fasa $\text{Fe}_{2-x-y}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_3$

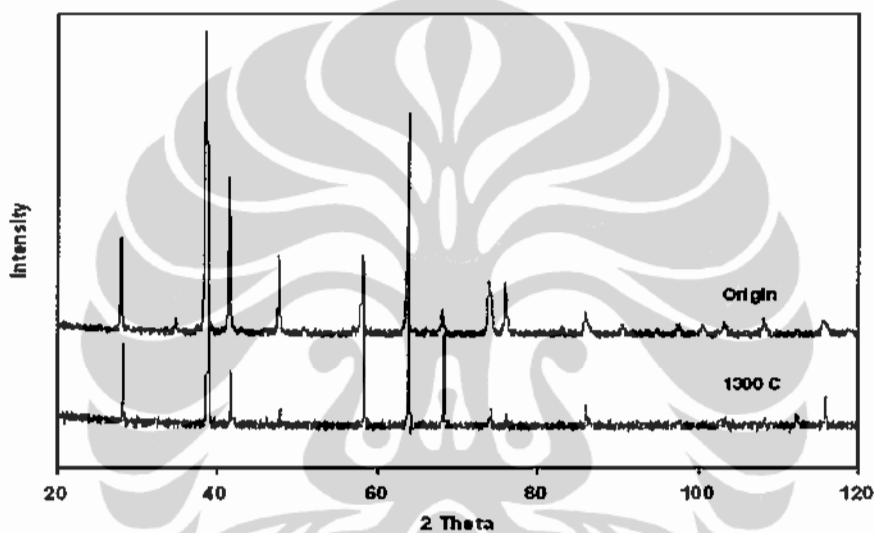
		X sebagai fraksi Mangan			
		X=0.10	X=0.15	X=0.20	X=0.25
Y sebagai fraksi dari Ti	Y=0.10	$\text{Fe}_{1.80}\text{Mn}_{0.10}\text{Ti}_{0.10}\text{O}_3$	$\text{Fe}_{1.75}\text{Mn}_{0.15}\text{Ti}_{0.10}\text{O}_3$	$\text{Fe}_{1.70}\text{Mn}_{0.20}\text{Ti}_{0.10}\text{O}_3$	$\text{Fe}_{1.65}\text{Mn}_{0.25}\text{Ti}_{0.10}\text{O}_3$
	Y=0.15	$\text{Fe}_{1.75}\text{Mn}_{0.10}\text{Ti}_{0.15}\text{O}_3$	$\text{Fe}_{1.70}\text{Mn}_{0.15}\text{Ti}_{0.15}\text{O}_3$	$\text{Fe}_{1.65}\text{Mn}_{0.20}\text{Ti}_{0.15}\text{O}_3$	$\text{Fe}_{1.60}\text{Mn}_{0.25}\text{Ti}_{0.15}\text{O}_3$
	Y=0.20	$\text{Fe}_{1.70}\text{Mn}_{0.10}\text{Ti}_{0.20}\text{O}_3$	$\text{Fe}_{1.65}\text{Mn}_{0.15}\text{Ti}_{0.20}\text{O}_3$	$\text{Fe}_{1.60}\text{Mn}_{0.20}\text{Ti}_{0.20}\text{O}_3$	$\text{Fe}_{1.55}\text{Mn}_{0.25}\text{Ti}_{0.20}\text{O}_3$
	Y=0.25	$\text{Fe}_{1.65}\text{Mn}_{0.10}\text{Ti}_{0.25}\text{O}_3$	$\text{Fe}_{1.60}\text{Mn}_{0.15}\text{Ti}_{0.25}\text{O}_3$	$\text{Fe}_{1.55}\text{Mn}_{0.20}\text{Ti}_{0.25}\text{O}_3$	$\text{Fe}_{1.50}\text{Mn}_{0.25}\text{Ti}_{0.25}\text{O}_3$

*Selengkapnya dapat dilihat pada lampiran

4.2 Karakterisasi dengan XRD

Hasil analisis kualitatif pada material dasar Fe_2O_3 , MnCO_3 , dan TiO_2 serta BaCO_3 , dengan karakterisasi XRD menggunakan sumber radiasi $\text{Co}(K\alpha)$ dilakukan pada sudut difraksi 2θ dari 20° hingga 80° . Data yang dihasilkan

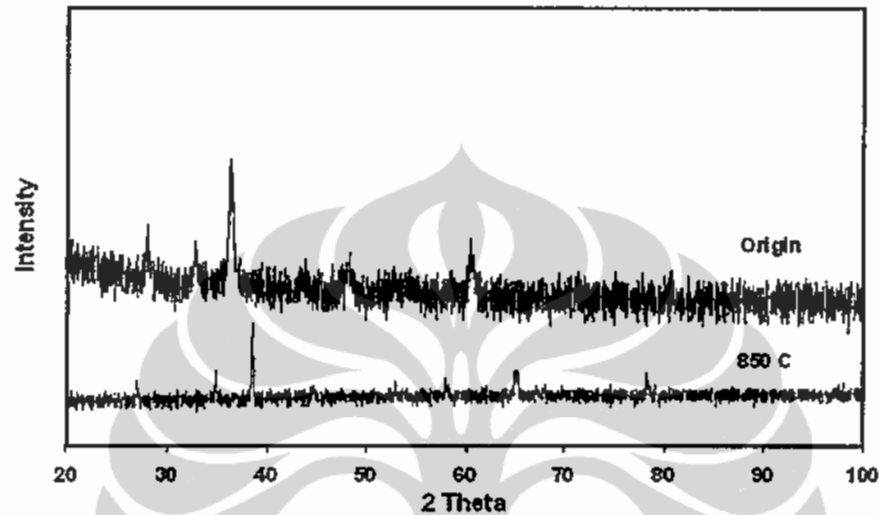
dilakukan pencocokan dengan data base ICDD untuk memperoleh kesesuaian dengan data standard tersebut. Hasil karakterisasi terhadap Fe_2O_3 yang memiliki kemurnian 99.0%(sumber teknis) ditunjukkan dalam gambar 4.1. Hasil pencocokan Identifikasi meterial Fe_2O_3 memiliki kemiripan dengan ICDD 33-0664. Dari sumber diperoleh bahwa Fe_2O_3 yang digunakan memiliki struktur Rhombohedral dengan *Space Group*(SG) $R(-3)c$. Meskipun demikian hasil perhitungan dengan metoda Kohen[78] diperoleh parameter kisi $a = b = 5.033 \text{ \AA}$ (hasil standard $a=b=5.0356 \text{ \AA}$) dan nilai $c = 13.752 \text{ \AA}$ (hasil standard $c=13.7489 \text{ \AA}$).



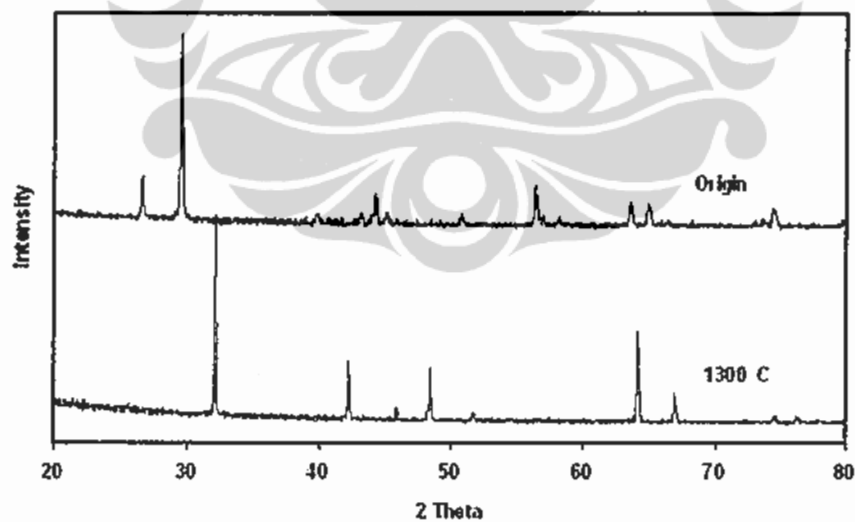
Gambar 4.1 Pola difraksi Fe_2O_3 menggunakan sumber Anoda Co ($\lambda=1.78896\text{\AA}$) dan pada pemanasan 1300 C

Hasil pengujian ini juga ditemukan intensitas yang tak teridentifikasi terutama pada $2\Theta=34.939^\circ$ dan $57,580^\circ$. Munculnya intensitas yang tak teridentifikasi dimungkinkan oleh impuritas dalam material. Setelah dilakukan pemanasan 1300° C selama empat jam, fasa tak teridentifikasi menghilang dan dihasilkan fasa tunggal Fe_2O_3 . Tetapi terjadi perubahan parameter kisi menjadi $a = 5.026 \text{ \AA}$ dan $c = 13.760 \text{ \AA}$. Hal ini dimungkinkan telah terjadi substitusi oleh fasa minor yang ditimbulkan dari impuritasnya sehingga menyebabkan perubahan parameter kisi.

MnCO_3 memiliki struktur Rhombohedral dengan space group SG-R3c, identik dengan data ICDD 73-1764. Hasil penghitungan parameter kisi diperoleh nilai $a = 4.768 \text{ \AA}$ dan $c = 15.513 \text{ \AA}$ (data standard $a = 4.7901 \text{ \AA}$ dan $c = 15.6940 \text{ \AA}$). Setelah mengalami pemanasan 850°C telah terjadi dekomposisi dan berubah menjadi MnO dengan struktur tetragonal seperti diperlihatkan dalam gambar 4.2.

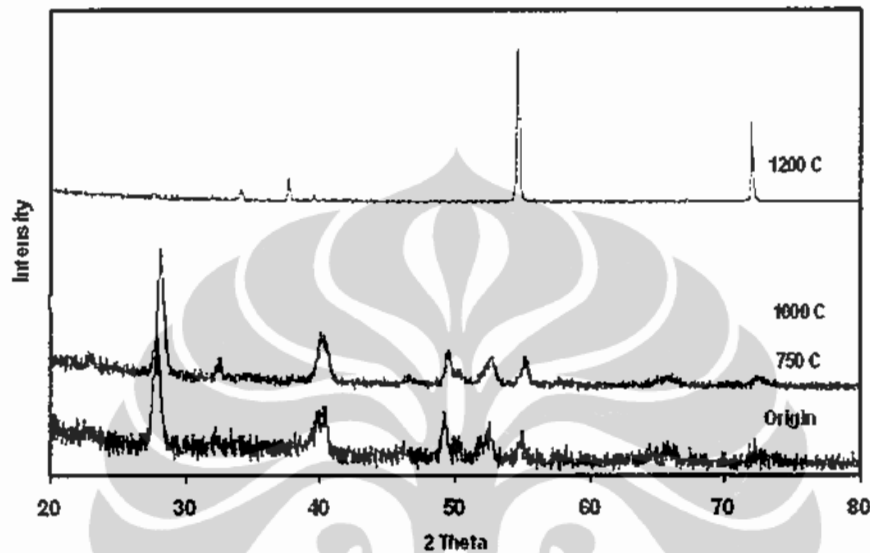


Gambar 4.2 Pola difraksi senyawa MnCO_3 menggunakan sumber Anoda Co ($\lambda = 1.78896 \text{ \AA}$) dan pada pemanasan 850°C



Gambar 4.3. Pola Difraksi Precursor TiO_2 (Anatase) menggunakan sumber Anoda Cobalt dan setelah dipanasi 1300°C .

Titanium Dioksida memiliki kemiripan dengan data ICDD 73-1764 berstruktur tetragonal ($a = 3.776 \text{ \AA}$ dan $c = 9.486 \text{ \AA}$) SG I41/amd(141) teridentifikasi sebagai fasa anatase. Setelah mengalami pemanasan 1300°C terjadi perubahan struktur menjadi rutile seperti dilihat pada gambar 4.3



Gambar 4.4 Pola Difraksi precursor BaCO₃ (Co(K α)) yang mengalami Polymorphik terhadap berbagai temperatur pemanasan (A-0 tanpa pemanasan, A-1 (750°C), A-2(1000°C) dan A(3) 1200°C)

Senyawa Barium Carbonat memiliki struktur orthorombik dengan space group Pnma sesuai data ICDD-45-1471. BaCO₃ memiliki parameter kisi $a = 6.433 \text{ \AA}$ dan $b = 5.314 \text{ \AA}$ serta $c = 8.903 \text{ \AA}$. Gambar 4.4 menunjukkan peristiwa transformasi *polymorphic* material BaCO₃ akibat pemanasan hingga 1200°C . Peristiwa ini menunjukkan bahwa BaCO₃ mengalami perubahan fasa dari β -BaCO₃ dan γ -BaCO₃ serta α -BaCO₃.

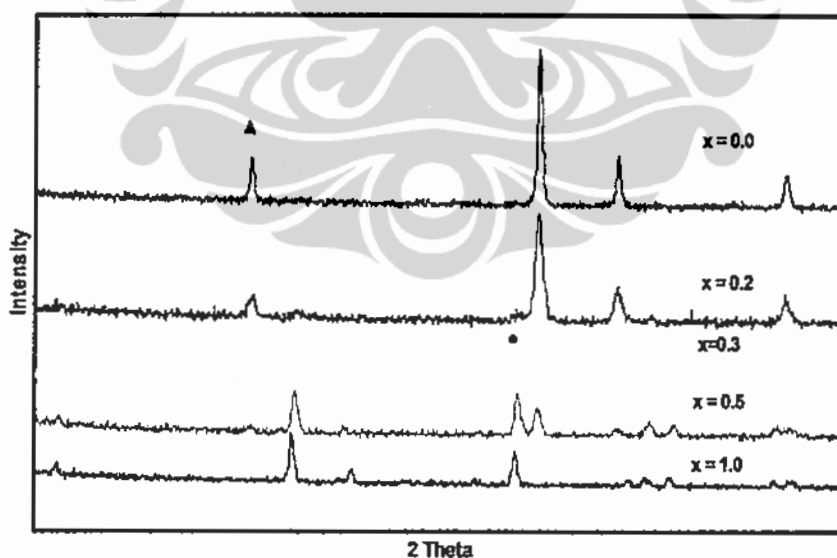
4.3 Substitusi ion Mn dan Ti pada Fe₂O₃

Pembuatan material magnet ferrit untuk aplikasi serapan atau absorber gelombang elektromagnetik diawali dengan preparasi komponen komponen penyusunnya. Dalam hal ini dilakukan substitusi parsial maupun secara total ion Fe dalam struktur Fe₂O₃ dengan ion Mn⁺² dan ion Ti⁺⁴ pada berbagai temperatur

untuk mendapatkan kondisi optimum. Komponen komponen oksida yang digunakan dalam proses *mechanical alloying* masing masing adalah Fe_2O_3 , MnCO_3 dan TiO_2 dengan fraksi atomik disesuaikan dengan komposisi nominal yang diinginkan. Studi tentang preparasi substitusi parsial pada material Fe_2O_3 dilakukan secara sistemik dengan mempelajari terlebih dahulu substitusi ion Fe dengan ion Ti^{+4} dan substitusi ion Fe dengan Mn^{+2} serta substitusi ion Fe dengan Mn^{+2} dan Ti^{+4} yang dilakukan secara bersamaan menggunakan oksida MnCO_3 dan TiO_2 .

4.3.1 Substitusi ion Ti Dalam Fe_2O_3

Substitusi ion Ti^{+4} dalam Fe_2O_3 pada temperatur optimum 1300°C selama 4 jam menggunakan komponen komponen oksidanya Fe_2O_3 dan TiO_2 dengan teknik *mechanical alloying* ditunjukkan dalam Gambar 4.5. Dalam senyawa substitusi atom Fe pada struktur Fe_2O_3 dilakukan dengan fraksi Ti 2,5 wt.% sampai dengan 31,6 wt.%. Gambar 4.5 adalah hasil identifikasi kualitatif menggunakan difraksi-X (XRD), substitusi ion Ti^{+4} pada Fe_2O_3 melalui proses pemanasan pada temperatur 1300°C , 4 jam.



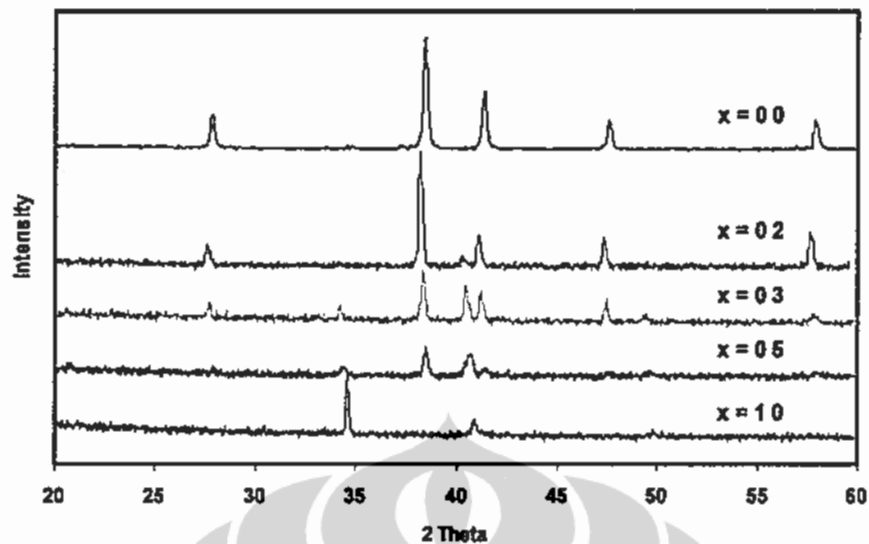
Gambar 4.5 Pola difraksi (XRD) hasil substitusi ion Ti^{+4} pada Fe_2O_3 Melalui proses sintering pada temperatur 1300°C , 4 jam

Terdapat indikasi bahwa sampai dengan fraksi substitusi 5,0 wt.% pola difraksi material terdiri dari campuran antara Fe_2O_3 dan FeTiO_3 serta Fe_2TiO_5 dengan intensitas yang relatif tinggi sedangkan fasa FeTiO_3 berimpit dengan fasa Fe_2O_3 . Hal ini menjadi lebih jelas lagi pada pola difraksi untuk sampel dengan tingkat fraksi substitusi yang lebih besar. Pada fraksi TiO_2 yang lebih tinggi terlihat jelas puncak-puncak difraksi dari fasa Fe_2TiO_5 bahkan pada fraksi substitusi Ti sebesar 31,6 wt.% puncak-puncak difraksi Fe_2O_3 sudah tidak ditemukan lagi. Hal ini menunjukkan bahwa proses substitusi berjalan dengan sangat baik membentuk fasa Fe_2TiO_5 paling tidak dapat dipastikan sampai dengan tingkat substitusi Ti sebesar 31,6 wt.%.

4.3.2 Substitusi Ion Mn dalam Fe_2O_3

Perilaku substitusi atom Fe oleh atom Mn^{+2} dalam struktur Fe_2O_3 agak berbeda dibandingkan dengan substitusi atom Fe oleh atom Ti^{+4} . Sebagaimana terindikasikan dari sederetan pola difraksi sampel-sampel, hasil substitusi memiliki kemiripan dengan mekanisme dalam pembentukan fasa Fe_3O_4 .

Pada tingkat substitusi sebesar 2,9 wt.% hasil identifikasi kualitatif menggunakan difraksi X, sampel terdiri dari fasa $(\text{Fe,Mn})_2\text{O}_3$ saja, sedangkan pada tingkat substitusi lebih dari 5.0 wt.%, sampel sudah terdiri dari campuran antara fasa Fe_2O_3 dan fasa MnFe_2O_4 . Semakin tinggi fraksi berat ion Mn^{+2} yang ditambahkan ke dalamnya akan menurunkan intensitas puncak difraksi Fe_2O_3 sedangkan intensitas puncak difraksi fasa MnFe_2O_4 mengalami peningkatan. Pada fraksi ion Mn^{+2} sebesar 34,6 wt.% yang ditunjukkan dalam Gambar 4.6 memperlihatkan puncak-puncak difraksi dari fasa Fe_2O_3 sudah tidak terlihat lagi dan didominasi oleh fasa MnFe_2O_4 . Munculnya fasa reduksi yang berstruktur spinel Fe_3O_4 disebabkan oleh adanya ion Carbon yang mampu mereduksi Fe_2O_3 menjadi fasa $(\text{Fe,Mn})_3\text{O}_4$ sebagai embrio terbentuknya fasa substitusi MnFe_2O_4 . Jadi substitusi ion Mn dari fasa MnCO_3 kedalam fasa Fe_2O_3 tidak terbentuk fasa $(\text{Fe,Mn})_2\text{O}_3$ tetapi perubahan struktur dari Rhombohedral menjadi fasa spinel $(\text{Fe,Mn})_3\text{O}_4$.



Gambar 4.6 Pola difraksi (XRD) Hasil Substitusi Mn pada Fe_2O_3 melalui proses sintering pada temperatur 1300°C selama 4 jam

Kondisi ini diperjelas dengan bertambahnya konsentrasi ion Mn^{+2} yang akan menyebabkan intensitas puncak difraksi Fe_2O_3 mengalami penurunan, sedangkan intensitas puncak difraksi fasa MnFe_2O_4 mengalami peningkatan. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa substitusi atom Fe oleh atom Mn berjalan dengan cara transformasi dari struktur Fe_2O_3 menjadi struktur Fe_3O_4 yang merupakan fasa reduksi dari Fe_2O_3 dan terbentuk gas CO atau CO_2 sebagai material pasca reduksi.

Dimungkinkan gugus CO yang berasal MnCO_3 menjadi radikal bebas sehingga dapat mereduksi Fe_2O_3 menjadi dua fasa yaitu FeO yang kurang stabil untuk membentuk Fe_2MnO_4 . Dan sebagian FeO dalam suasana oksigen akan cepat berubah kembali menjadi fasa Fe_2O_3 . Reaksi ini akan berulang terus hingga semua fasa MnCO_3 berubah menjadi fasa yang lebih stabil dalam bentuk Fe_2MnO_4

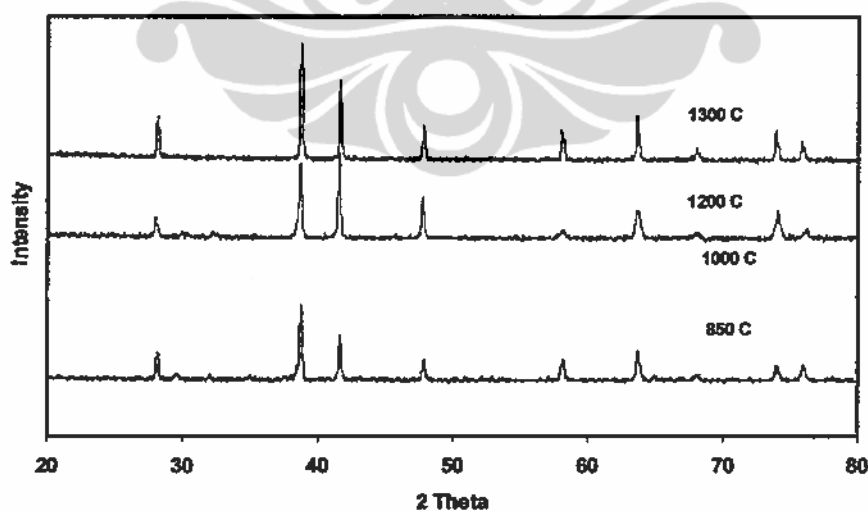
4.3.3 Substitusi Ion Mn dan Ti dalam Fe_2O_3

Substitusi ion Mn^{+2} dan ion Ti^{+4} terhadap Fe dalam struktur Fe_2O_3 juga dilakukan secara sistemik menggunakan komponen komponen oksidanya Fe_2O_3 ,

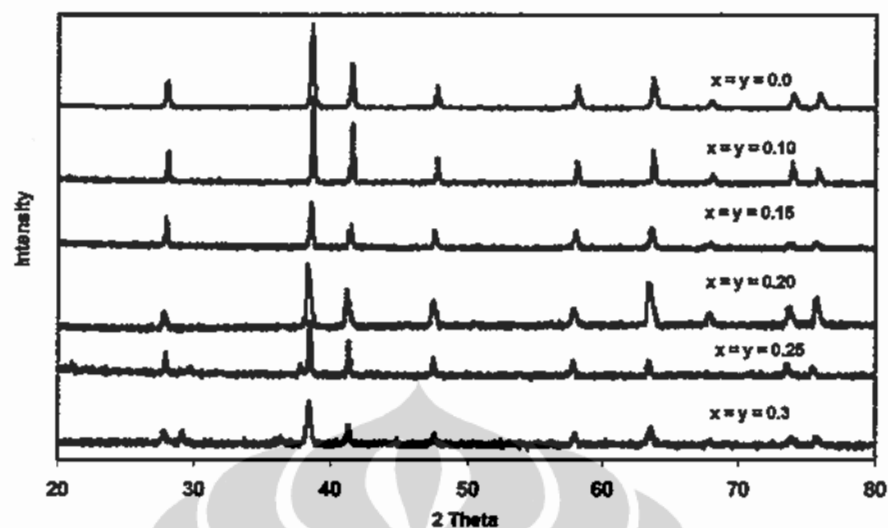
TiO₂ dan MnCO₃ dan diperlihatkan pada gambar 4.7. Gambar 4.7 merupakan hasil kualitatif pola difraksi Substitusi ion Mn dan ion Ti dengan fraksi atomik sama dalam fasa Fe₂O₃ melalui proses pemaduan padat untuk membentuk fasa Fe_{2-2x}(MnTi)_xO₃ untuk x = 0.15.

Pada temperatur ≤ 850⁰ C masih menampakan fasa TiO₂ dan fasa Fe₂O₃ sedangkan fasa MnCO₃ tidak nampak dan telah berubah menjadi fasa MnFe₂O₄. Pada pemanasan dengan temperatur tersebut juga memunculkan fasa baru Fe₂TiO₅. Temperatur pemanasan 1000⁰ C hingga 1200⁰ C fasa TiO₂ (anatase) telah menghilang demikian juga fasa MnFe₂O₄. Meskipun kedua fasa tersebut telah tidak terlihat tetapi pembentukan fasa (Fe,Mn,Ti)₂O₃ belum terjadi secara sempurna dan sebagian ion Ti berinteraksi dengan Fe₂O₃ untuk membentuk fasa Fe₂TiO₅.

Substitusi sempurna terjadi pada temperatur 1300⁰ C dan terbentuk fasa tunggal Fe₂O₃ yang telah termodifikasi menjadi (Fe,Mn,Ti)₂O₃. Keberadaan ion Mn dan ion Ti dalam komposisi yang seolah hilang dalam pemanasan 1300⁰ C dimungkinkan terjadi proses pertukaran 2 ion Fe⁺³ dengan ion Mn⁺² dan ion Ti⁺⁴ untuk mendapatkan kesetimbangan ion. Untuk mempertegas kondisi ini dilakukan substitusi ion Mn dan Ti dalam fraksi berat yang sama terhadap Fe dalam Fe₂O₃ untuk membentuk fasa Fe_{2-x}Mn_xTi_xO₃ atau Fe_{2-x}(MnTi)_xO₃ dan ditunjukkan dalam gambar 4.8.



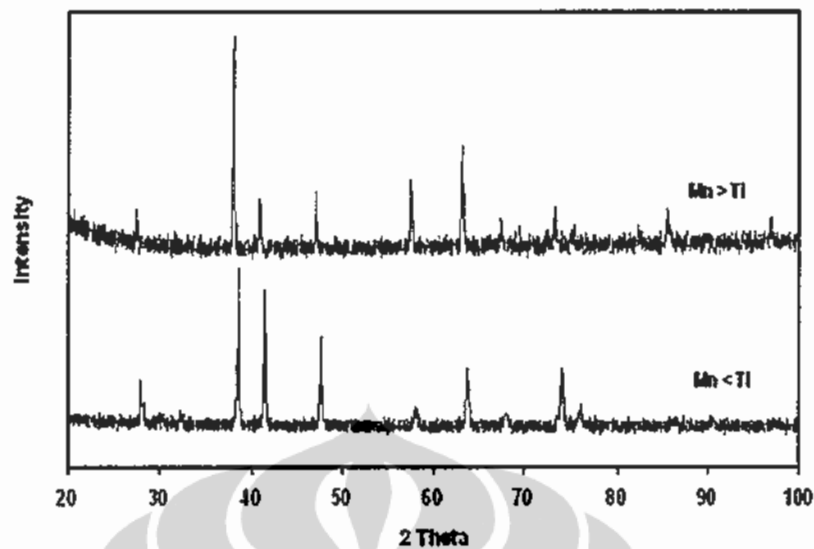
Gambar 4.7 Pola difraksi Substitusi ion Mn dan ion Ti dalam fasa Fe₂O₃ melalui proses pemaduan padat untuk membentuk fasa Fe_{1.7}(MnTi)_{0.15}O₃



Gambar 4.8 Pola difraksi Substitusi ion Mn dan ion Ti dengan fraksi berat ion yang sama dalam fasa Fe_2O_3 pada pemanasan 1300°C selama 4 jam

Hasil identifikasi fasa pada pola difraksi material hasil substitusi ion Mn dan Ti menunjukkan bahwa untuk fraksi berat atom Mn yang sama dengan fraksi berat atom Ti diperoleh hasil pola difraksi yang sesuai dengan pola difraksi Fe_2O_3 . Hal ini dapat dipastikan sampai dengan fraksi berat atom Mn 11.67 at% dan fraksi ion Ti sebesar 10.18 at% atau dapat dipastikan ion fraksi ion (Mn +Ti) mencapai 21.86wt% atau 21.85at% untuk membentuk fasa substitusi tunggal $(\text{FeMnTi})_2\text{O}_3$.

Fasa $(\text{FeMnTi})_2\text{O}_3$ yang terbentuk selanjutnya disebut fasa Fe_2O_3 termodifikasi menjadi bentuk $\text{Fe}_{2-x}(\text{MnTi})_x\text{O}_3$. Pada substitusi ion Fe dengan ion Mn dan ion Ti dengan fraksi berat masing masing 2.87 w% dan 2.50w% dalam fasa $\text{Fe}_{1.80}\text{Mn}_{0.10}\text{Ti}_{0.10}\text{O}_3$ telah merubah parameter kisi kristal dari $a = 5.035\text{\AA}$ dan $c = 13.749\text{\AA}$. pada komposisi $\text{Fe}_{1.80}\text{Mn}_{0.10}\text{Ti}_{0.10}\text{O}_3$ struktur kristal telah berubah parameter kisinya menjadi $a = 5.037\text{\AA}$ dan nilai $c = 13.755$ masih dalam struktur orthorombik. Perubahan parameter kisi $\text{Fe}_{2-x}(\text{MnTi})_x\text{O}_3$ akan selalu terjadi hingga mencapai $a = 5.048$ dan 13.659\AA pada nilai $x = 0.25$ atau membentuk struktur $\text{Fe}_{1.5}\text{Mn}_{0.25}\text{Ti}_{0.25}\text{O}_3$.



Gambar 4.9 Pola difraksi Substitusi ion Mn dan ion Ti dalam fasa Fe_2O_3 dengan fraksi ion Mn > dari fraksi ion Ti dan fraksi ion Ti > dari fraksi Mn melalui proses pemaduan padat

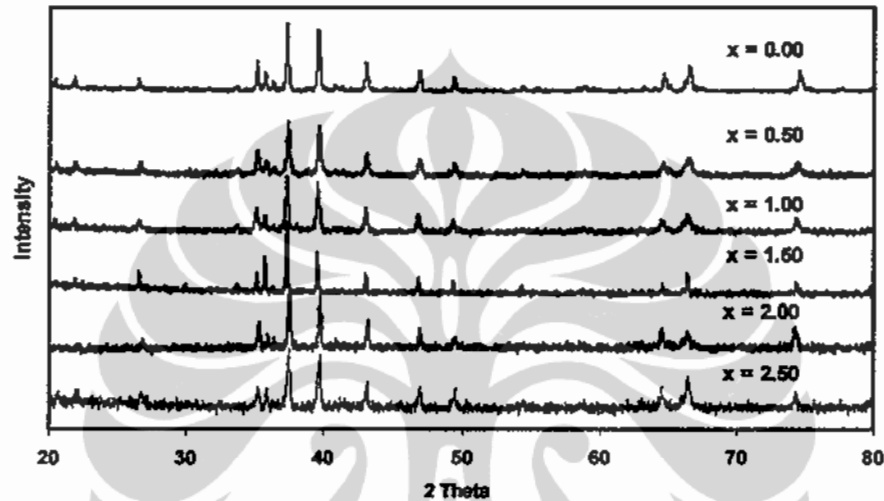
Bila jumlah fraksi berat ion Mn lebih besar dari fraksi berat ion Ti substitusi akan diperoleh hasil kualitatif dengan pola difraksi mengikuti fasa Fe_2MnO_4 dan Fe_2O_3 . Namun konstanta kisi Fe_2O_3 dalam fasa campuran mengalami perubahan parameter kisi yang mengindikasikan terbentuknya struktur Fe_2O_3 yang termodifikasi atau membentuk struktur $\text{Fe}_{2-\delta}(\text{Mn,Ti})_\delta\text{O}_3$, dimana δ adalah jumlah fraksi berat atom Mn yang sama dengan fraksi berat atom Ti. Sedangkan apabila jumlah fraksi berat atom Ti lebih besar dari fraksi berat atom Mn diperoleh pola difraksi campuran mengikuti pola Fe_2TiO_5 dan Fe_2O_3 termodifikasi.

4.4 Pembentukan Barium Ferrite Bersubstitusi Ion Mn dan Ion Ti

4.4.1 Studi Pembentukan Fasa $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$

Pembentukan fasa magnetik berbasis ferrite dengan komposisi $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ dilaksanakan melalui proses pemaduan mekanik antara komponen-komponen material terdiri dari komponen $(\text{Fe,Mn,Ti})_2\text{O}_3$ dan komponen BaCO_3 dengan fraksi komponen sesuai dengan komposisi nominal material *ferrite*. Pada

Gambar 4.10 diperlihatkan sederetan pola difraksi senyawa $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$. Secara umum, ke lima senyawa substitusi ($x=y > 0$) memiliki pola difraksi yang sama dengan pola difraksi senyawa $\text{BaO} \cdot 6(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ menunjukkan bahwa pemaduan antara komponen BaCO_3 dan komponen Fe_2O_3 termodifikasi dapat terjadi dengan baik. Meskipun demikian untuk cuplikan dengan $x=y=0,5; 1,0$ dan $1,5$ terdapat tambahan puncak difraksi diidentifikasi berasal dari fasa Fe_2O_3 termodifikasi.



Gambar 4.10 Pola difraksi fasa $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ ($x = y = 0.0; 0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 2.5$) adalah puncak-puncak difraksi fasa $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$

Tabel 4.2 parameter kisi bahan $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ ($x = 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5$)

Sampel $x = y$	Komposisi Senyawa	a (Å)	c (Å)	Volume Sel (Å ³)
0.0	$\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	5,8862	23,2093	696,4060
0,5	$\text{BaFe}_{11}\text{Mn}_{0,5}\text{Ti}_{0,5}\text{O}_{19}$	5,9042	23,2408	701,6227
1,0	$\text{BaFe}_{10}\text{Mn}_{1,0}\text{Ti}_{1,0}\text{O}_{19}$	5,9108	23,2809	704,4055
1,5	$\text{BaFe}_9\text{Mn}_{1,5}\text{Ti}_{1,5}\text{O}_{19}$	5,9049	23,2046	700,6960
2,0	$\text{BaFe}_8\text{Mn}_{2,0}\text{Ti}_{2,0}\text{O}_{19}$	5,8487	23,0040	681,4790
2,5	$\text{BaFe}_7\text{Mn}_{2,5}\text{Ti}_{2,5}\text{O}_{19}$	5,8487	22,8146	675,8681

Masih hadirnya fasa Fe_2O_3 meskipun dalam fraksi yang minor diduga berasal dari komposisi material yang tidak *stoichiometri* bisa terjadi selama

proses preparasi sampel Barium Hexaferrite, terutama pada tahapan penghalusan kembali material Fe_2O_3 termodifikasi. Kajian lebih dalam terhadap fasa senyawa substitusi dititikberatkan pada perubahan parameter kisi kristal menggunakan metode *Cohen* yang hasilnya dirangkum dalam Tabel 4.2. Berdasarkan hasil yang tercantum dalam Tabel 4.2 tersebut diketahui bahwa terjadi penurunan nilai konstanta kisi kristal fasa utama dengan meningkatnya fraksi ion substitusi (Ti dan Mn) terutama pada sampel dengan $x=y= 2,0$ dan $2,5$ (at.%). Penurunan konstanta kisi a dan c memperkecil volume sel satuan fasa utama sebesar 2 % sampai dengan 3 %. Menurut Mones (*Mones et al*, 1957) pada struktur $\text{BaFe}_{12-x-y}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$, ion Fe^{+3} diganti oleh ion Mn^{+2} dan ion Ti^{+4} . Ion Mn^{+2} menempati posisi *spin down* dari ion Fe^{+3} ($3d^0$) pada kisi tetrahedral ($4f^d$), sedangkan ion Ti^{+4} memposisikan diri pada posisi Fe^{+3} kisi oktahedralnya.

Penurunan parameter kisi kristal ini terjadi karena adanya perbedaan ukuran atom antara atom Fe dengan atom Ti dan Mn. Penurunan volume sel satuan fasa utama material tentu memberi efek lanjut terhadap nilai momen magnet total per satuan volume atau magnetisasi jenuh dari fasa utama.

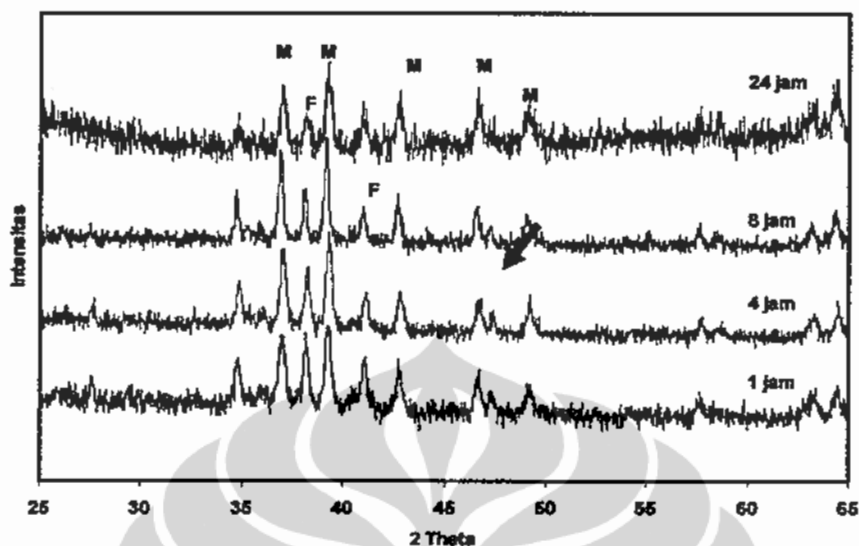
4.4.2 Fasa Nanostruktur dan Nanokomposit

4.4.2.1 Pembentukan fasa nanostruktur $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$

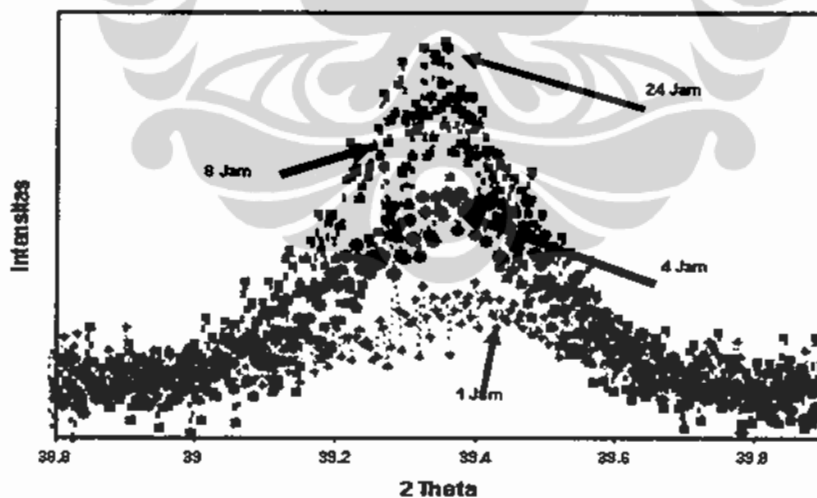
Evaluasi fasa terbentuk telah dikarakterisasi dengan XRD dan ditunjukkan dalam gambar 4.11. Hasil yang diperlihatkan dalam pola difraksi tersebut menunjukkan pengaruh waktu penumbuhan kristal terhadap fraksi pembentukan kristal Barium Hexaferrite. Semua pola terlihat adanya dua fasa utama yaitu $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{F})$ dan $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}(\text{M})$ dan tidak terlihat fasa BaCO_3 tetapi terdeteksi puncak 47.34° sebagai BaFe_2O_4 (kecuali pada penahanan 24 jam) yang diyakini sebagai fasa intermediate [79].

Dari hasil analisis menggunakan GSAS diperoleh sejumlah fraksi pembentukan $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$. Pada penahanan 1 jam telah terbentuk fraksi barium hexaferrite mencapai 23.8 % dan fraksi Fe_2O_3 masih tersisa 76.2 %. Setelah waktu penahanan dilakukan selama 4 jam terjadi peningkatan pembentukan $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ mencapai 69% dan Fe_2O_3 tertinggal 30.9% saja. Tetapi penahanan selama 8

jam tidak cukup signifikan menaikkan fraksi $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ dari 69% menjadi 72.4% saja, serta pada 24 jam hanya terbentuk 77.4%.



Gambar 4.11 Pola difraksi pembentukan fasa $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ terhadap berbagai waktu penahanan pada temperatur 850°C a) M Sebagai fasa Magnetik $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ sedangkan F mewakili fasa Fe_2O_3 sedangkan tanda panah sebagai fasa intermediate BaFe_2O_4



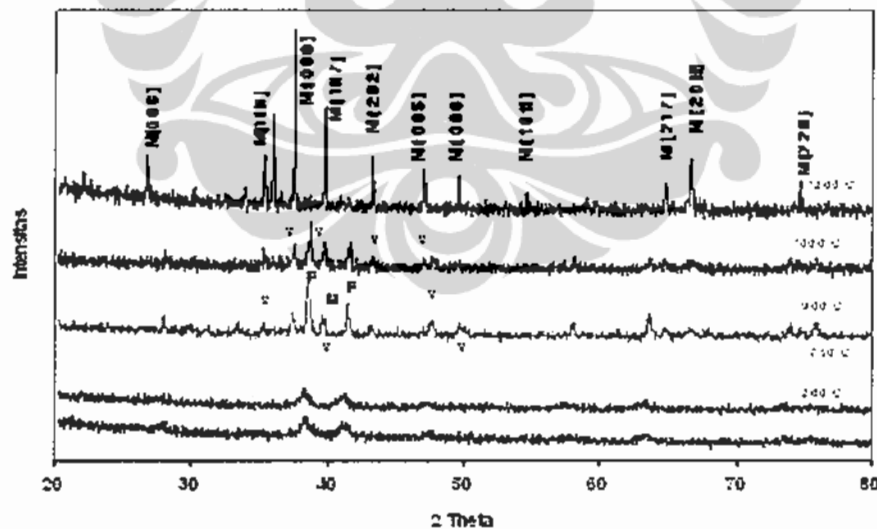
Gambar 4.12 Pola difraksi pembentukan fasa $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ a) pengaruh temperatur terhadap Ukuran butir kristal terhadap berbagai waktu penahanan pada temperatur 850°C .

Apabila temperatur dinaikan pada 1000°C selama satu jam telah terjadi kenaikan kembali fasa magnetik sebesar 98 % dan fasa Fe_2O_3 tinggal 2% saja. Pada pemanasan 1000°C selama 4 jam semua fasa telah berubah menjadi fasa magnetik. Masih terdapatnya fasa Fe_2O_3 dimungkinkan terjadinya transformasi $\gamma\text{-BaCO}_3$ menjadi $\alpha\text{-BaCO}_3$ dan fasa ini baru akan terdekomposisi pada 988°C .

Ditinjau dari efek penahanan terhadap pertumbuhan butir dalam gambar 4.12 terlihat bahwa pada penahanan 1 jam fasa Fe_2O_3 memiliki ukuran butir 38 nm dan fasa magnetik $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ memiliki ukuran butir 32 nm, selanjutnya pada 8 jam terjadi peningkatan ukuran butir Fe_2O_3 menjadi 54 nm dan $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ sebesar 63 nm. Penumbuhan butir terus meningkat menjadi 123 nm untuk Fe_2O_3 dan 137 untuk $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ pada penahanan 24 jam.

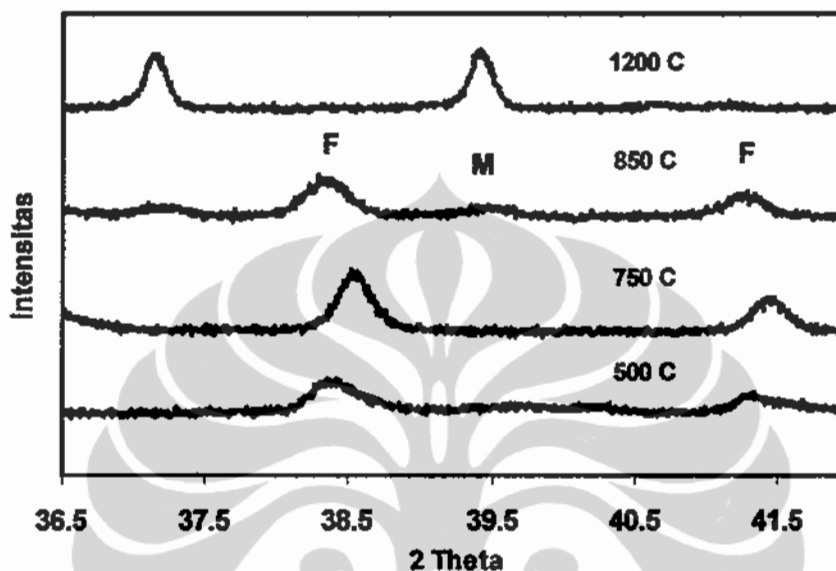
4.4.2.2. Pembentukan *nanophase Barium Hexaferrite* tersubstitusi ion Mn dan Ti

Setelah berhasil disintesis substitusi ion Mn dan Ti ke dalam fasa Barium hexaferrite melalui mekanisme dua tahap reaksi, fokus penelitian dititik beratkan pada pembentukan *nanophase Barium Hexaferrite* tersubstitusi ion Mn dan Ti. Pada Gambar 4.13 diperlihatkan serangkaian pola difraksi pada penumbuhan fasa $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ ($x=y=1.5$) hasil pemaduan mekanik untuk berbagai



Gambar 4.13 Penumbuhan fasa $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ ($x=y=1.5$) hasil pemaduan mekanik untuk berbagai temperatur selama 60 menit.

temperatur selama 60 menit. Sebagaimana terlihat pada Gambar 4.13 fasa Barium Hexaferrite tersubstitusi ion Mn dan Ti mulai terbentuk pada temperatur kristalisasi 850^oC namun material masih merupakan campuran 2 fasa. Dengan perkataan lain kristalisasi fasa magnetik utama selesai seluruhnya pada temperatur kristalisasi 1200^oC.



Gambar 4.14 Penumbuhan kristal difraksi fasa $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ ($x=1.5$) pada 400C dan 500 dan 750 C.

Tabel 4.3 Ukuran butir rata-rata kristal Fasa Ferrite dan Barium Hexaferrite

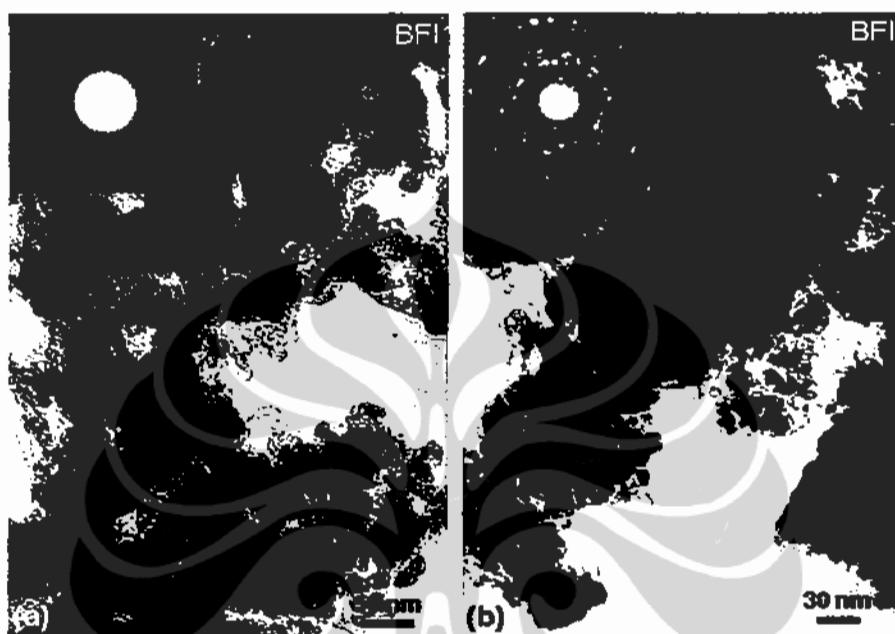
No	Temperatur	Ukuran butir rata rata (nm)	Fasa terdeteksi
1	200 C	18	$\text{Fe}_{2-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$
2	500 C	25	$\text{Fe}_{2-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$
3	750 C	135	$\text{Fe}_{2-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$
4	850 C	38	$\text{Fe}_{2-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$
		32	$\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$
5	1000 C	156	$\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$
6	1200 C	176	$\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$

Temperatur kristalisasi 1200 °C adalah cukup tinggi sehingga memudahkan terjadinya pertumbuhan ukuran butir. Terlihat juga tajamnya puncak-puncak difraksi dari fasa magnetik utama sistem yang mengindikasikan telah terjadinya pertumbuhan ukuran butir. Tentu saja hasil ini dari tinjauan disain nanostruktur tidak memenuhi tujuan yaitu menghasilkan material terdiri dari kristal-kristal fasa magnetik dengan ukuran nanometer. Namun hasil ini telah memberikan informasi yang berguna bagi proses kristalisasi pembentukan fasa magnetik Barium Hexaferrite termodifikasi yang dipersiapkan melalui rute pemaduan mekanik. Jelaslah, pada perlakuan ke depan dicari parameter temperatur dan waktu kristalisasi yang optimal untuk menghasilkan material dengan fasa tunggal dan memiliki ukuran fasa dalam skala nanometer.

Pada sudut difraksi antara 37 hingga 42° dilakukan pengukuran *step scan* untuk material yang menjalani kristalisasi pada temperatur 500 – 1200 °C. Sebagian data pengujian ini diperlihatkan pada Gambar 4.13. Pada rentang sudut difraksi tersebut terdapat puncak difraksi dari fasa ferrite (F) dan fasa barium hexaferrite (M). Hal ini dilakukan untuk menghitung ukuran butir rata-rata fasa-fasa tersebut. Hasil perhitungan ukuran butir rata-rata untuk ke dua jenis fasa diringkas pada Tabel 4.3.

Berdasarkan hasil pada Tabel 4.3 terlihat bahwa pemanasan satu jam pada temperatur 200 °C hingga 500 °C tidak menyebabkan pertumbuhan butir bagi fasa ferrite (F), kecuali pada temperatur yang lebih tinggi terjadi pengkasaran ukuran dari 25 nm menjadi 135 nm. Sebagaimana telah disinggung sebelumnya bahwa fasa M untuk material bebas substitusi mulai terbentuk pada temperatur 850 °C dengan ukuran rata-rata 32 nm namun bersamaan dengan kehadiran fasa F yang terukur memiliki pengecilan ukuran rata-rata yaitu dari 135 nm menjadi 38 nm. Berbeda dengan material bebas substitusi untuk material $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ terjadi pengkasaran ukuran butir 20 nm untuk pemanasan 200 °C dan menjadi 27 nm pada pemanasan 500 °C meskipun fasa yang terbentuk masih $\text{Fe}_{1.5}\text{Mn}_{0.25}\text{Ti}_{0.25}\text{O}_3$ (F) sedangkan pada pemanasan 850 ukuran butir fasa $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ telah terbentuk dengan ukuran butir 44 nm yang lebih kecil dari tipe M bebas substitusi.

Hal yang terakhir ini masih belum dapat difahami dan masih perlu dikonfirmasi dan teliti lanjut. Pada temperatur kristalisasi yang lebih tinggi terjadi pengkasaran ukuran rata-rata (> 150 nm) fasa M disertai dengan menurunnya fraksi fasa F sehingga menghasilkan material fasa tunggal.



Gambar 4.15. Foto TEM material Barium Hexaferrite dengan (a) substitusi Mn dan Ti Dan (b) non substitusi

Pada Gambar 4.15 diperlihatkan foto mikro material Barium Hexaferrite tanpa substitusi dan dengan substitusi yang diambil menggunakan Mikroskop Elektron Transmisi (TEM). Hasil foto TEM untuk material Barium Hexaferrite dengan substitusi ion Mn dan Ti (material dengan $x = y = 1,5$ at.%) pada Gambar 4.15 (a) memperlihatkan kristal utama material yang terdiri dari kristal dengan ukuran yang sangat halus (< 50 nm) atau dapat ditaksir sekitar 30 nm. Nilai rata-rata ini cukup sesuai dengan hasil evaluasi melalui metode XRD dengan formula *Scherrer*[80] sebagaimana tercantum pada Tabel 4.3 yaitu pada temperatur kristalisasi 850 °C nilai rata-rata ukuran butir adalah 32-38 nm. Kristal utama terlihat terorientasi random ditandai dengan pola difraksi elektron dengan lingkaran-lingkaran difraksi berupa garis lingkaran yang mulus serta adanya pelebaran garis. Hal ini memastikan bahwa sampel terdiri dari kristal-kristal halus

ber skala nanometer (*nanocrystalline*). Demikian juga dengan hasil observasi seperti terlihat pada Gambar 4.15 (b). Pada umumnya ukuran kristal masih dalam skala nanometer dengan orientasi yang random. Perbedaannya adalah bahwa sampel Barium Hexaferrite non-substitusi ini masih memiliki kristal-kristal dengan ukuran yang relatif besar. Pada foto difraksi elektron, lingkaran-lingkaran difraksi terdiri dari lingkaran dengan garis yang kontinyu dan titik-titik difraksi yang berasal dari suatu bidang kristal tertentu.

Dengan demikian material sesungguhnya terdiri dari kristal-kristal yang sama tetapi dengan campuran antara kristal dengan ukuran yang halus dan relatif besar. Dapatlah disimpulkan bahwa proses pemaduan mekanik dalam preparasi material Barium Hexaferrite cukup efektif dalam pembentukan material nanokristal. Hadirnya ion Mn dan Ti pada Barium Hexaferrite kelihatannya berperan dalam hal homogenisasi distribusi ukuran kristal material.

Berdasarkan hasil eksperimental tentang proses *mechanical alloying* untuk preparasi material Barium Hexaferrite tersubstitusi ion Mn dan Ti seperti dijelaskan di atas, dapatlah dibuat suatu ringkasan sbb:

Telah difahami bahwa pembentukan fasa tunggal barium hexaferrite tersubstitusi diperoleh dengan dua tahapan. Tahapan pertama adalah tahapan substitusi ion Mn dan Ti terhadap ion Fe. Hal ini diperoleh melalui proses sintering material dengan basis Fe_2O_3 pada temperatur $1300\text{ }^\circ\text{C}$. Sebelum mengalami sintering pada $1300\text{ }^\circ\text{C}$ pola difraksi sinar-x material dipastikan memiliki pola difraksi Fe_2O_3 yang sangat sesuai dengan pola file ICDD33-0664 yaitu Fe_2O_3 dengan struktur Rhombohedral (SG. R3C). Konstanta kisi yang ditentukan dengan menggunakan metoda Cohen juga diperoleh ukuran parameter kisi $a = 5.0355\text{ \AA}$ dan $c = 13.7495\text{ \AA}$ yang bersesuaian sampai dengan 2 angka desimal (data ICDD $a = 5.0337\text{ \AA}$ dan $c = 13.744\text{ \AA}$) dari kristal Fe_2O_3 . Pasca pemanasan terhadap Fe_2O_3 yang dimodifikasi pada $1300\text{ }^\circ\text{C}$ selama 4 jam, diperoleh bahwa tidak terjadi perubahan struktur ditandai dengan pola difraksi yang mirip antara $(\text{Fe,Mn,Ti})_2\text{O}_3$ dan Fe_2O_3 kecuali terjadi pergeseran intensitas relatif pada bidang (116). Demikian juga dengan parameter kisi terdapat perubahan terutama konstanta kisi c dari $13,7495\text{ \AA}$ menjadi $13,7203\text{ \AA}$. Perubahan parameter kisi c terjadi karena perubahan komposisi fasa tidak lagi

stokiometri karena pengaruh oksidasi selama proses sintering terutama fraksi atom O yang terdapat di dalam Fe_2O_3 . Berdasarkan geometri struktur kristalnya, sebagian besar atom-atom O menempati posisi sepanjang sumbu c. Bila demikian halnya diperkirakan dengan struktur fasa $\text{Fe}_{2-x}\text{O}_{3-y}$ setelah proses sintering, sedangkan fasa fasa Fe_xO_y tidak terlihat dalam pola difraksi karena fraksi yang relatif kecil.

Dalam senyawa substitusi atom Fe pada struktur Fe_2O_3 dengan fraksi Ti 2,5 wt.% sampai dengan 31,6 wt.%. Terdapat indikasi bahwa sampai dengan fraksi substitusi 5,0 wt.% pola difraksi material terdiri dari campuran antara Fe_2O_3 dan FeTiO_3 serta Fe_2TiO_5 dengan intensitas yang relatif tinggi sedangkan fasa FeTiO_3 berimpit dengan fasa Fe_2O_3 . Hal ini menjadi lebih jelas lagi pada pola difraksi untuk sampel dengan tingkat fraksi substitusi yang lebih besar, terlihat jelas puncak-puncak difraksi dari fasa Fe_2TiO_5 bahkan pada fraksi substitusi Ti sebesar 31,6 wt.% puncak-puncak difraksi Fe_2O_3 sudah tidak ditemukan lagi. Hal ini menunjukkan bahwa proses substitusi berjalan dengan sangat baik paling tidak dapat dipastikan sampai dengan tingkat substitusi Ti sebesar 31,6 wt.%.

Perilaku substitusi atom Fe oleh atom Mn dalam struktur Fe_2O_3 agak berbeda dibandingkan dengan substitusi atom Fe oleh atom Ti sebagaimana hal ini terindikasikan dari sederetan pola difraksi sampel-sampel hasil substitusi. Pada tingkat substitusi sebesar 2,9 wt.% pola difraksi sampel terdiri dari campuran pola difraksi dari fasa Fe_2O_3 dan fasa MnFe_2O_4 . Bertambahnya tingkat substitusi oleh atom Mn, intensitas puncak difraksi Fe_2O_3 mengalami penurunan dan intensitas puncak difraksi fasa MnFe_2O_4 mengalami peningkatan. Pada tingkat substitusi oleh Mn sebesar 34,6 wt.% sudah tidak terlihat lagi puncak-puncak difraksi dari fasa Fe_2O_3 dan pola difraksi merupakan pola difraksi fasa tunggal MnFe_2O_4 yang menyimpulkan bahwa substitusi atom Fe oleh atom Mn berjalan dengan cara transformasi dari struktur Fe_2O_3 menjadi struktur Fe_3O_4 . Fasa Fe_3O_4 adalah fasa hasil reduksi dari Fe_2O_3 yang bisa terjadi karena reaksi gas CO.

Studi substitusi ion Ti dan Mn secara bersamaan juga telah dilakukan secara sistematis dengan hasil identifikasi fasa. Dari masing-masing pola difraksi menunjukkan secara keseluruhan ditemukan bahwa bila fraksi berat Ti hampir sama dengan fraksi Mn diperoleh pola difraksi yang sesuai dengan pola difraksi

Fe_2O_3 paling tidak dapat dipastikan sampai dengan fraksi berat total atom substitusi mencapai 21,86 wt %. Sedangkan bila fraksi atom Ti > Mn diperoleh pola difraksi campuran mengikuti pola FeTiO_3 dan Fe_2O_3 serta Fe_2TiO_5 . Namun konstanta kisi fasa Fe_2O_3 dalam pola difraksi fasa campuran mengalami perubahan parameter kisi yang mengindikasikan struktur Fe_2O_3 termodifikasi menjadi $\text{Fe}_{2-z}(\text{Mn}, \text{Ti})_z\text{O}_3$ dimana z adalah fraksi berat atom Mn yang sama dengan fraksi berat atom Ti. Bila fraksi berat atom ion Ti kurang dari fraksi berat atom ion Mn diperoleh pola difraksi mengikuti fasa Fe_2MnO_4 dan Fe_2O_3 termodifikasi. Telah ditemukan juga bahwa bila fraksi berat Ti hampir sama dengan fraksi Mn diperoleh pola difraksi yang sesuai dan mirip dengan pola difraksi Fe_2O_3 yang disebut sebagai pola Fe_2O_3 termodifikasi disebabkan nilai parameter kisi yang berbeda berlaku sampai dengan fraksi berat total atom substitusi mencapai 21,85 wt %. Sedangkan bila fraksi atom Ti > Mn diperoleh pola difraksi campuran mengikuti pola Fe_2TiO_5 dan Fe_2O_3 .

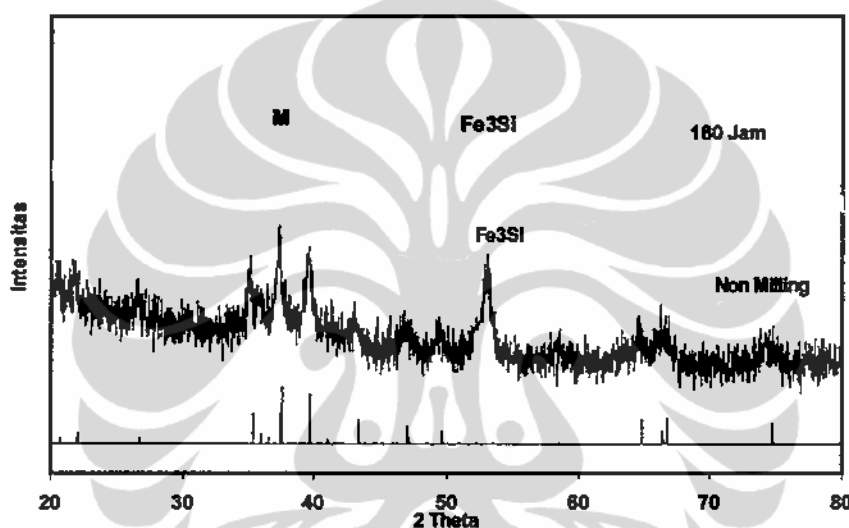
Penurunan parameter kristal ini dapat terjadi karena adanya perbedaan ukuran atom antara atom Fe dengan atom Ti dan Mn. Penurunan volume sel satuan fasa utama material tentu memberi efek lanjut terhadap nilai momen magnet total per satuan volume atau magnetisasi jenuh dari fasa utama. Magnetisasi jenuh mengalami penurunan secara sistematis dengan bertambahnya fraksi atom Mn dan Ti. Demikian juga dengan nilai remanen dan koersifitas, kedua-duanya menurun secara sistematis dengan meningkatnya fraksi atom Mn dan Ti.

Pada struktur $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$, ion Fe^{+3} diganti oleh ion Mn^{+2} dan ion Ti^{+4} . Ion Mn^{+2} menempati posisi *spin down* dari ion $\text{Fe}^{+3}(3d^5)$ pada kisi tetrahedral ($4f_1$), sedangkan ion Ti^{+4} memposisikan diri pada posisi Fe^{+3} kisi oktahedralnya. Hal ini akan mengakibatkan ion Mn^{+2} pada sisi tetrahedral mengakibatkan perubahan momen magnet total. Tidak demikian halnya dengan penggantian oleh ion Ti^{+4} pada posisi oktahedral ion Fe^{+3} yang mengakibatkan perubahan terhadap momen magnet totalnya. Oleh karena substitusi ion Fe oleh ion Ti dan Mn telah menyebabkan penurunan volume sel satuannya, maka mengacu kepada hasil penelitian Mones dapat disimpulkan bahwa laju penurunan momen magnet total fasa utama karena substitusi oleh ion Ti adalah lebih besar

dibanding laju penurunan volume sel satuannya sehingga magnetisasi total fasa utama menjadi lebih rendah.

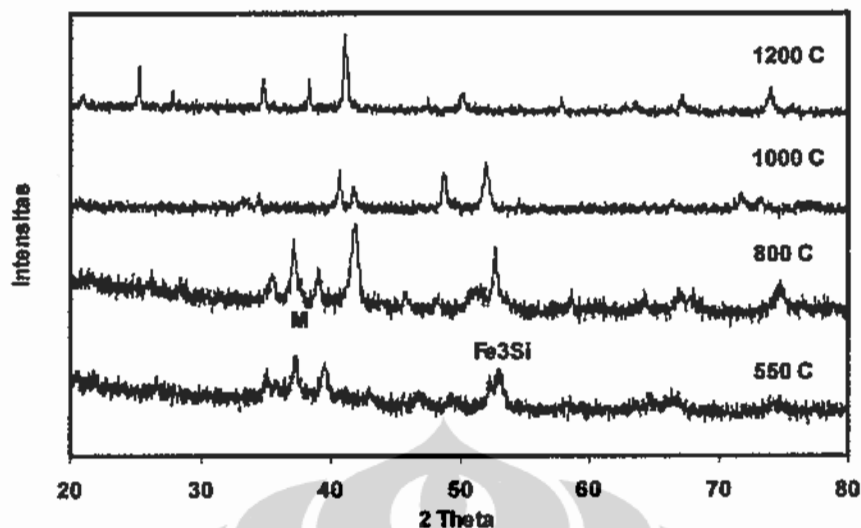
4.4.3 Pembentukan Fasa Nanokomposit $BaFe_{12-2x}(MnTi)_xO_{19}/Fe_3Si$

Komposisi campuran fasa $BaFe_9(Mn,Ti)_{1.5}O_{19}/(30w\%) Fe_3Si$ diperlihatkan dalam gambar 4.16. Hasil campuran menunjukkan terlihat dua fasa yang masing masing memiliki pelebaran puncak cukup tinggi ditunjukkan dengan berimpitnya beberapa puncak yang berdekatan. Setelah dilakukan mekanika milling 180 jam, kedua fasa terjadi penurunan intensitas terutama menuju pembentukan fasa amorf.



Gambar 4.16 Perubahan pola intensitas difraksi fasa campuran $BaFe_9(Mn,Ti)_{1.5}O_{19}/(30w\%) Fe_3Si$ setelah menjalani proses mekanika milling selama 180 Jam

Berbeda dengan yang ditunjukkan dalam gambar 4.17, setelah menjalani pemanasan (*welding*) untuk membentuk fasa nanokomposit. Pada pemanasan $550^{\circ}C$ fasa $BaFe_9(Mn,Ti)_{1.5}O_{19}/(30w\%) Fe_3Si$ terbentuk kembali tetapi disertai dengan penumbuhan fasa baru fasa α -Fe. Fasa α -Fe dimungkinkan terjadi akibat penumbuhan butir dari fasa amorf. Pada pemanasan $800^{\circ}C$ mulai terlihat munculnya berbagai fasa tambahan yang terjadi karena reduksi dari fasa $BaFe_9(Mn,Ti)_{1.5}O_{19}$ disertai dengan oksidasi dari fasa Fe_3Si .

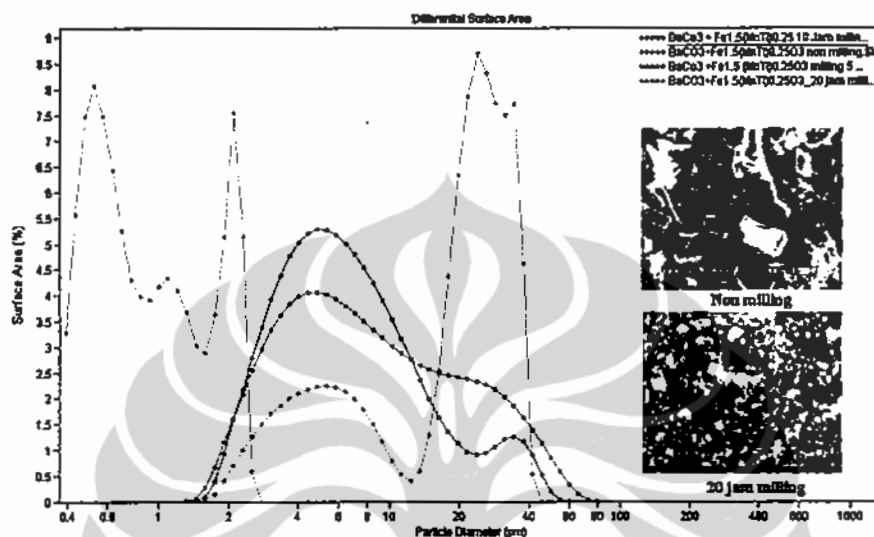


Gambar 4.17 Perubahan pola difraksi fasa campuran $\text{BaFe}_9(\text{Mn,Ti})_{1.5}\text{O}_{19}/(30\text{w}\%) \text{Fe}_3\text{Si}$ pada berbagai temperatur pemaduan

4.5 Distribusi Ukuran Partikel Selama Proses Mekanika Milling

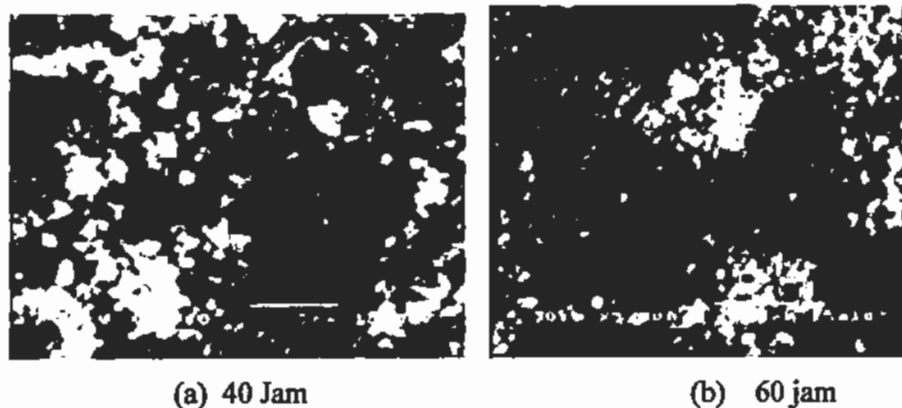
Hasil uji butir yang ditunjukkan dalam Gambar 4.18 memperlihatkan distribusi ukuran butir fasa campuran antara BaCO_3 dengan $\text{Fe}_{2-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_3$ ($x = 2.5$). Fasa campuran yang cukup heterogen yang dimungkinkan terjadi karena perbedaan yang cukup besar ukuran butir mula mula antara material BaCO_3 dan material $\text{Fe}_{2-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_3$. Pada tahap awal pencampuran material Barium carbonat memiliki ukuran butir yang relatif lebih besar dibandingkan dengan material ferrite. Telah ditunjukkan dalam gambar 4.10 sebelum proses milling memperlihatkan dua buah puncak *surface area* yang masing masing memiliki ukuran $\sim 1 \mu\text{m}$ hingga $10 \mu\text{m}$ dan dan pola kedua antara ~ 10 hingga $40 \mu\text{m}$. *Particle size* dengan ukuran $\sim 1 \mu\text{m}$ hingga $10 \mu\text{m}$ diprediksi sebagai fasa ferrite, sedangkan butir dengan ukuran ~ 10 hingga $40 \mu\text{m}$ adalah fasa BaCO_3 . Adanya perbedaan ukuran butir dan keuletan antara kedua material berakibat pada homogenitas ukuran setelah dilakukan penghalusan. Pergeseran pola ke arah dua puncak distribusi terlihat dengan jelas pada penghalusan 5 jam hingga 20 jam. Pada proses penghalusan yang berlangsung selama 5 jam dengan vibrasi *ballmill* pada kecepatan 1000 rpm, ukuran butir telah bergeser ke arah antara $2 \mu\text{m}$ hingga $10 \mu\text{m}$, meskipun demikian fraksi butir dengan ukuran $20 \mu\text{m}$ hingga $60 \mu\text{m}$

masih nampak, meskipun dengan fraksi area yang relatif rendah. Penghalusan butir selama 20 jam ukuran butir mengalami pergeseran yang cukup besar dan material campuran terdistribusi pada ukuran ~ 400 nm hingga 2 μm dengan standard deviasi yang sangat kecil.



Gambar 4.18 Hasil uji butir material magnet fasa $\text{BaCO}_3 + \text{Fe}_{2-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_3$ ($x = y = 0.25$) pada berbagai waktu milling dengan teknik Mechanical alloying

Keterbatasan kemampuan alat uji butir (*partikel analyzer*) tidak dapat menjangkau lagi untuk menganalisa penghalusan butir selama 40 jam dan 60 jam. Namun demikian dengan bantuan alat deteksi SEM dalam Gambar 4.19, dapat dilihat ukuran dan distribusi kualitatif meskipun dengan resolusi yang kurang baik. Pada gambar 4.19 a) material dengan ukuran butir ~ 1 mikron masih terlihat dengan distribusi yang besar, sedangkan pada penghalusan 60 jam pada gambar 4.19b) telah didominasi dengan ukuran butir yang lebih kecil.



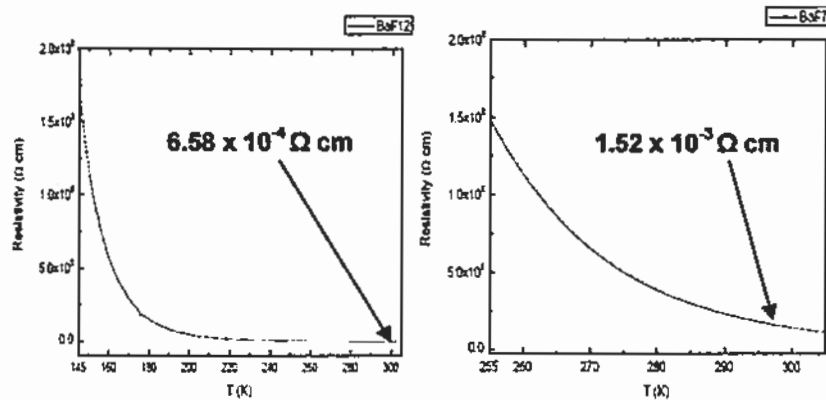
Gambar 4.19 Mikrostruktur paduan $\text{BaCO}_3 + \text{Fe}_{2-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_3$ untuk nilai $x=y=0.25$ dengan waktu milling 40 jam dan 60 jam

Dari gambar 4.19 dapat diduga bahwa terjadi penggumpalan butir atau aglomerasi selama proses deteksi karena material bersifat magnetik. Melihat ukuran aglomeratif yang cukup rendah maka dapat diduga bahwa material dengan ukuran nanometer pada penghalusan 60 jam telah dapat terbentuk.

Ketidak seragaman ukuran butir selama proses Mekanika milling disebabkan oleh perbedaan distribusi volume butir yang lebih halus sebanding dengan ukuran yang lebih besar. Akibatnya ukuran butir yang lebih kasar mampu menyusup dan bersembunyi ke dalam kelompok ukuran butiran yang lebih halus. Dengan proses tersebut sulit terjadi interaksi antara bola milling dengan partikel yang lebih kasar sehingga menyebabkan heterogenitas butiran.

4.6 Sifat Listrik Fasa $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ ($x=y=0,0; 1,0; 1,5$ dan $2,5$)

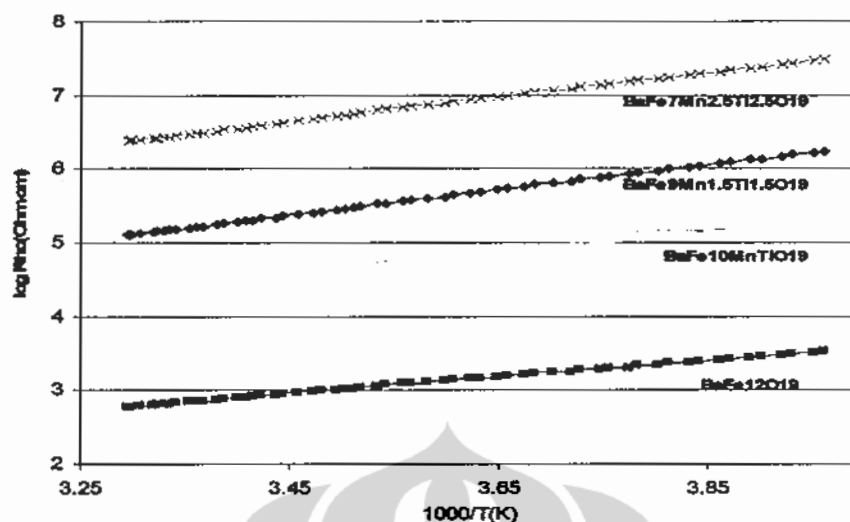
Meskipun diberbagai aplikasi *resistivity* yang berkaitan erat dengan arus eddy tidak diperhatikan secara mendalam tetapi dalam aplikasi pada frekuensi tinggi faktor *resistivity* tetap menjadi parameter yang harus diperhatikan. Material yang memiliki *resistivity* tinggi menjadi salah satu pilihan untuk aplikasi pada frekuensi tinggi. Pada Gambar 4.20 ditampilkan salah satu data pengujian *resistivity* listrik sampel sebagai fungsi temperatur. Data tersebut mengikuti secara baik persamaan (1). Gambar 4.18 adalah plot nilai logaritmic sebagai fungsi $1/T$ dari sampel barium hexaferrite dengan komposisi $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ untuk $x=y: 0,0; 1,0; 1,5$ dan $2,5$



Gambar 4.20 Nilai resistivity listrik sampel $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ untuk $x=y$: 0,0 dan 2.5 terhadap T

Konsentrasi ion Mn^{+2} dan Ti^{+4} dalam Fasa $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ sangat mempengaruhi nilai resistivity listriknya. Pada fraksi substitusi yang semakin besar nilai resistivity juga meningkat dengan temperatur. Nilai resistivity untuk keseluruhan material barium hexaferrite tersubstitusi Mn dan Ti memperlihatkan nilai yang meningkat dibandingkan resistivity material dasar barium hexaferrite bebas substitusi. Fakta eksperimental ini telah sesuai dengan harapan yaitu untuk menjadikan material barium hexaferrite yang memiliki nilai resistivity yang relatif tinggi. Adanya perbedaan resistivity dapat terjadi karena interaksi kationik dalam struktur hexagonal akibat adanya pergantian ion Fe^{+3} terhadap ion Mn^{+2} dan ion Ti^{+4} .

Timbulnya konduktivitas listrik dari ferrite karena adanya pertukaran electron (electron transfer) antara ion divalent dan ion trivalent. Dengan demikian perubahan formasi ion trivalen Fe^{+3} yang tergantikan dengan ion divalent Mn^{+2} dan ion tetravalen Ti^{+4} sangat mempengaruhi nilai resistivitynya. Hal ini disebabkan karena ion divalent dan tetravalent memiliki ikatan yang jauh lebih stabil dibandingkan dengan ion trivalen.



Gambar 4.21 Nilai Log resistivity listrik sampel $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ untuk $x=y$: 0,0; 1,0; 1,5 dan 2,5 terhadap $1/T$

Melalui data pada Gambar 4.21 nilai slope relasi linear antara nilai logaritmic resistivity dan *inverse temperatur* memberikan besaran energi aktivasi, E_v . Besarnya energi aktivasi berkisar antara 0,22 eV pada $x=y=2,5$ dan 0,30 pada $x=y=1,5$ serta 0,34 eV pada $x=y=1,0$ sedangkan untuk tanpa tersubstitusi memiliki energi aktivasi 0,33 eV. Jadi material berbasis barium hexaferrite dapat digolongkan dalam kelas semikonduktor karena memiliki energi aktivasi yang relatif rendah.

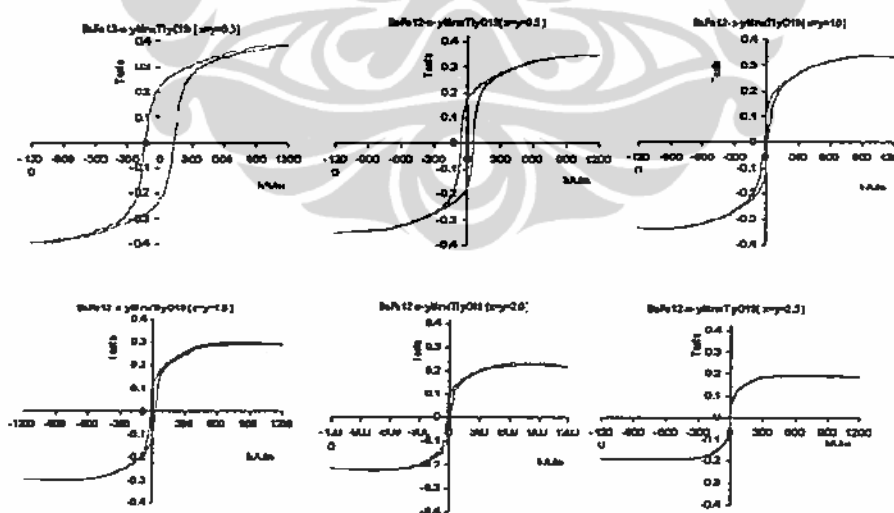
4.7 Sifat Magnetik Microstruktur $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$

Pada Gambar 4.22 diperlihatkan serangkaian hasil evaluasi proses magnetisasi berupa loop histeresis dari material barium hexaferrite dan barium hexaferrite tersubstitusi ion Mn dan Ti yang telah menjalani perlakuan sintering pada 1200°C selama 4 jam. (Gambar 4.23). Nilai koersifitas yang sangat rendah terjadi pada fraksi substitusi $x=y=2,5$ at.%. Namun penurunan koersifitas ini diikuti juga dengan penurunan nilai magnetisasi total, M_s

Pada Gambar 4.22 diperlihatkan serangkaian hasil evaluasi proses magnetisasi berupa loop histeresis dari material barium hexaferrite dan barium hexaferrite tersubstitusi ion Mn dan Ti yang telah menjalani perlakuan sintering pada 1200°C selama 4 jam dan dirangkum dalam Table 4.4. Loop histeresis pada

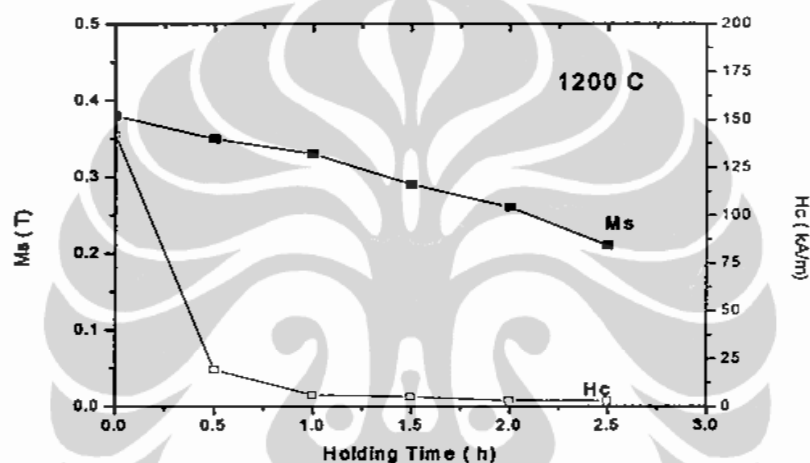
Gambar 4.22 tersebut memperlihatkan adanya penurunan nilai koersifitas yang progresif dengan meningkatnya fraksi ion pensubstitusi ion Fe pada barium hexaferrite

Dari Tabel 4.4 terlihat bahwa koersifitas magnetik mengalami penurunan secara sistematis dengan bertambahnya fraksi atom Mn dan Ti, demikian juga dengan nilai remanen. Gambar 4.22 memperlihatkan peristiwa penurunan magnetisasi jenuhnya secara linear tidak seperti penurunan pada nilai koersifitasnya. Ditinjau dari strukturnya, perubahan koersifitas disebabkan oleh berubahnya nilai anisotropinya[97]. Meskipun demikian kenaikan parameter c pada nilai $x \leq 1.0$ belum mampu merubah magnetisasi total disebabkan karena ion Mn bersifat paramagnetik dan Ti bersifat diamagnetik yang menyebabkan interaksi momen magnet yang lebih rendah. Penurunan nilai koersifitas ini diperkirakan berasal dari perubahan medan anisotropi kristal karena pengaruh substitusi ion Fe. Dalam hal ini penurunan konstanta anisotropi jauh lebih besar dibandingkan dengan penurunan nilai magnetisasi totalnya. Perubahan konstanta anisotropi inilah yang memberikan peluang kepada Barium Hexaferrite termodifikasi menjadi material untuk aplikasi penyerapan energi gelombang elektromagnetik pada frekuensi ultra tinggi.



Gambar 4.22 Histerisis $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ ($x=0,0.5,1.0,1.5,2.0$ dan 2.5) dengan temperatur penumbuhan 1200°C

Penurunan secara sistemik sifat sifat magnetik pada pada struktur $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ disebabkan oleh ion Fe^{+3} yang memiliki momen magnetik yang lebih digantikan oleh ion Mn^{+2} , dan ion Ti^{+4} dengan momen magnetik yang lebih rendah. Hal ini disebabkan ion Mn^{+2} menempati posisi *spin down* dari ion $\text{Fe}^{+3}(3d^5)$ pada kisi tetrahedral (4f1), sedangkan ion Ti^{+4} memposisikan diri pada posisi Fe^{+3} kisi oktahedralnya. Karena Mn^{+2} bersifat paramagnetik diduga akan berakibat terjadinya penurunan momen magnetik total yang berimbas pada penurunan sifat magnetik terutama koersifitas dan saturasi magnetiknya.



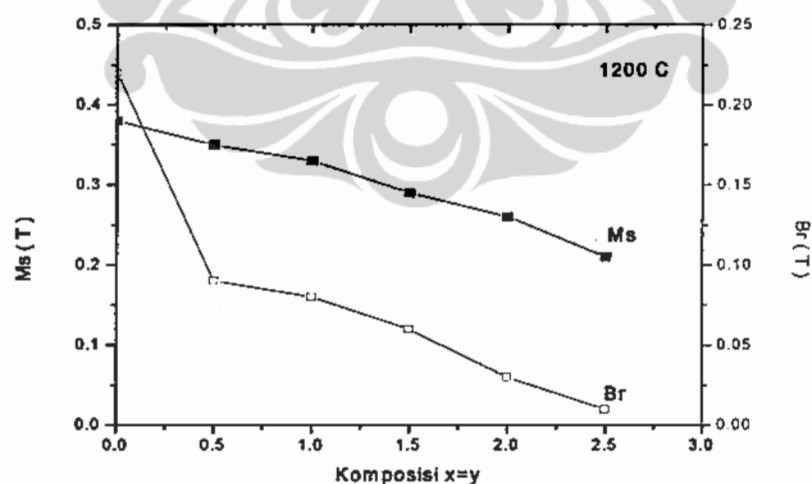
Gambar 4.23 Grafik hubungan koersifitas dan saturasi terhadap komposisi material $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ ($x = y = 0,0;0,5;1,0;1,5$ dan $2,0$ serta $2,5$)

Tabel 4.4 Parameter magnetik pada $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ ($x=0,0,5,1,5$ dan $2,5$) pada pemanasan 1300°C selama 4 jam

Sampel $x = y$	Komposisi Senyawa	Ms Tesla	Br Tesla	Hc (kA/m)
0,0	$\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	0,38	0,22	210
0,5	$\text{BaFe}_{11}\text{Mn}_{0,5}\text{Ti}_{0,5}\text{O}_{19}$	0,35	0,09	19
1,0	$\text{BaFe}_{10}\text{Mn}_{1,0}\text{Ti}_{1,0}\text{O}_{19}$	0,33	0,08	6
1,5	$\text{BaFe}_9\text{Mn}_{1,5}\text{Ti}_{1,5}\text{O}_{19}$	0,29	0,06	5
2,0	$\text{BaFe}_8\text{Mn}_{2,0}\text{Ti}_{2,0}\text{O}_{19}$	0,26	0,03	3
2,5	$\text{BaFe}_7\text{Mn}_{2,5}\text{Ti}_{2,5}\text{O}_{19}$	0,21	0,01	3

Demikian halnya dengan penggantian oleh ion Ti^{+4} pada posisi octahedral ion Fe^{+3} yang juga mengakibatkan perubahan terhadap momen magnet totalnya. Oleh karena substitusi ion Fe oleh ion Ti dan Mn telah menyebabkan penurunan volume sel satuannya, maka dapat disimpulkan bahwa laju penurunan momen magnet total fasa utama karena substitusi oleh ion Ti adalah lebih besar dibanding laju penurunan volume sel satuannya sehingga magnetisasi total fasa utama menjadi lebih rendah.

Hasil pada Tabel 4.4 juga memperlihatkan bahwa dengan bertambahnya fraksi ion substitusi menurunkan koersifitas magnet. Penurunan nilai koersifitas ini diperkirakan berasal dari perubahan medan anisotropi kristal karena pengaruh substitusi ion Fe. Dalam hal ini penurunan konstanta anisotropi jauh lebih besar dibandingkan dengan penurunan nilai magnetisasi totalnya. Dari serangkaian hasil evaluasi proses magnetisasi berupa loop histeresis dapat diketahui bahwa material barium hexaferrite dan barium hexaferrite tersubstitusi ion Mn dan Ti yang telah menjalani perlakuan sintering pada $1200^{\circ}C$ selama 4 jam, memperlihatkan adanya penurunan nilai koersifitas yang progresif dengan meningkatnya fraksi ion pensubstitusi ion Fe pada barium hexaferrite. Nilai koersifitas yang terendah terjadi pada fraksi substitusi $x=y=2,5$ at. %.

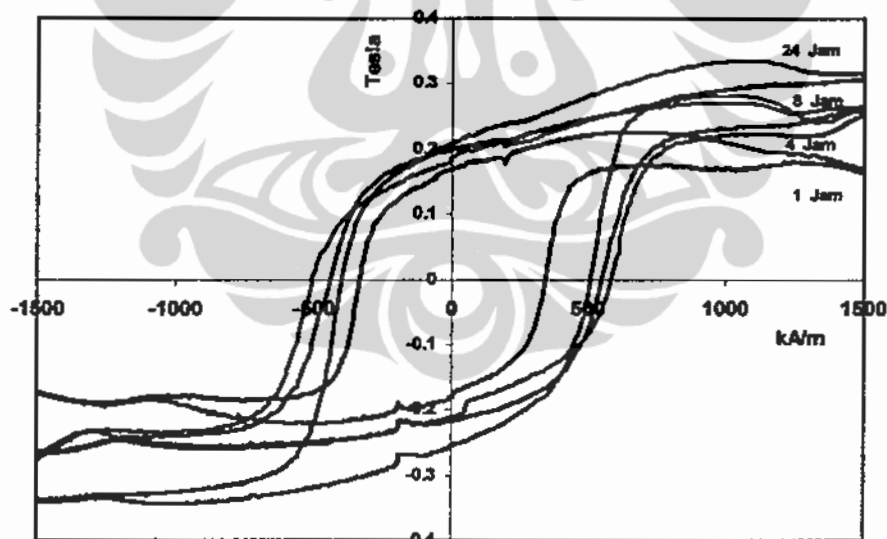


Gambar 4.24 Grafik hubungan Remanen dan saturasi terhadap komposisi material $BaFe_{12-(x+y)}Mn_xTi_yO_{19}$ ($x = y = 0,0,0,5,1,5$ dan $2,5$)

Memperhatikan besaran yang tercantum dalam Tabel 4.4 tersebut dapatlah difahami perlunya pemilihan komposisi material yang tepat bila akan diaplikasikan sebagai material penyerap gelombang elektromagnetik frekuensi tinggi. Kandidat material yang baik sebagai penyerap gelombang frekuensi tinggi adalah memiliki koersifitas yang rendah tetapi magnetisasi yang tinggi. Dengan demikian, berdasarkan hasil pada Tabel 4.4 dipilih material dengan fraksi $x=y \leq 1.0$ sebagai kandidat yang tepat dan memerlukan investigasi lanjut.

4.7.1 Magnetik properties materials fasa nanostruktur $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$

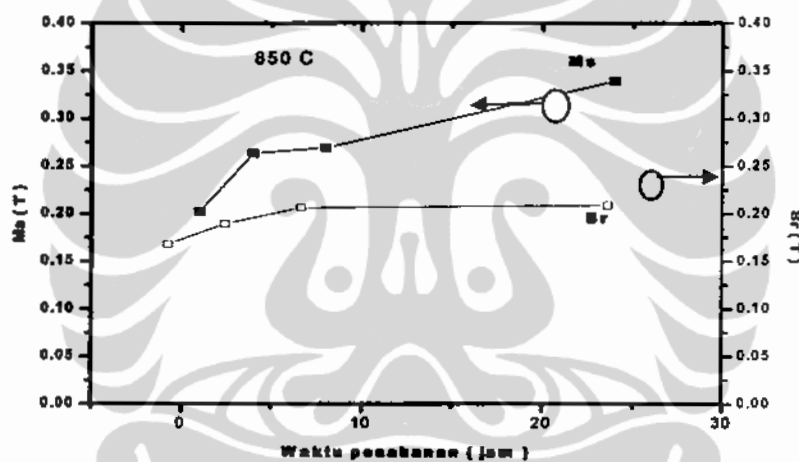
Dari hasil studi XRD yang menunjukkan masih terdapatnya fasa Fe_2O_3 yang cukup tinggi pada temperatur kristalisasi 850°C mengakibatkan perubahan parameter magnetik seperti koersifitas, saturasi magnetik total dan remanen magnetiknya. Gambar 4.25 menunjukkan Karakteristik loop Histerisis material magnet $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ pada sinter 850°C dan berbagai waktu penumbuhan. Terlihat saturasi magnetik dan remanen mengalami peningkatan apabila temperatur penahanan semakin lama, tidak demikian halnya dengan koersifitas magnetik.



Gambar 4.25 Karakteristik loop Histerisis material magnet $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ pada sinter 850°C dan berbagai waktu penumbuhan.

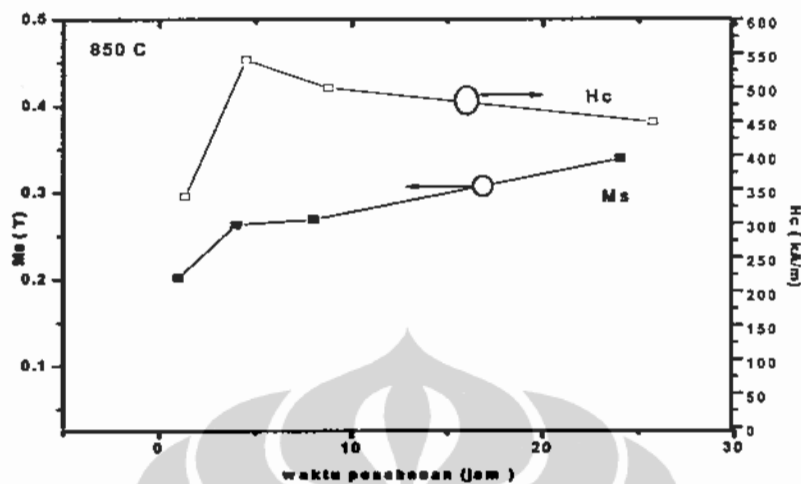
Hasil penelitian yang telah ditunjukkan bahwa dengan pemanasan 850°C di atas 1 jam magnetisasi total $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ sebesar 0.20 Tesla, sedangkan

penahanan 4 jam dalam temperatur yang sama mengalami peningkatan hingga 0.263 T dan mencapai 0.339 pada penahanan 24 jam. Terdapat dua faktor utama yang mempengaruhi nilai tersebut yaitu masih rendahnya densitas sampel yang disebabkan oleh adanya pori antara butir magnetik akan menyebabkan terjadinya demagnetisasi lokal sehingga menurunkan nilai saturasinya serta terdapatnya fasa Fe_2O_3 yang cukup tinggi. Gambar 4.26 menunjukkan pengaruh waktu penahanan terhadap nilai remanen serta saturasi magnetik fasa $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ yang mengalami pemanasan 850°C . Remanen magnetik stabil setelah waktu kristalisasi 8 jam sedangkan saturasi magnetik masih cenderung naik untuk dapat ditingkatkan lagi. Hasil memberi gambaran bahwa waktu kristalisasi optimum telah tercapai meskipun saturasi magnetiknya masih relatif rendah.



Gambar 4.26 pengaruh waktu penahanan terhadap remanen serta saturasi magnetik fasa $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ yang mengalami pemanasan 850°C

Koersifitas magnetik sebesar 339 kA/m pada penahanan satu jam dan kembali mengalami kenaikan menjadi 540 kA/m pada penahanan 4 jam. Pada penahanan melebihi waktu tersebut koersifitas kembali turun. Penurunan koersifitas magnetik dimungkinkan karena terjadinya pertumbuhan butir (*grain growth*) pada fasa magnetik yang telah terbentuk. Keberadaan fasa Fe_2O_3 tidak mendominasi terhadap perubahan koersifitas magnetik tetapi hanya berpengaruh terhadap saturasi maupun remanennya.



Gambar 4.27 pengaruh waktu penahana terhadap koersifitas serta saturasi magnetik fasa $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ yang mengalami pemanasan 850°C

Tabel 4.5 memperlihatkan perubahan sifat magnetik pada pemanasan 850°C dengan waktu penundaan satu jam hingga 24 jam. Pada penahanan hingga 24 saturasi diperoleh nilai 89,21% dari nilai jenuhnya (M_s saturasi = 0.38T), sedangkan koersifitas maksimum diperoleh pada penahanan 4 – 8 jam, yang telah mencapai titik jenuhnya. Pada waktu penahanan hingga 4 jam remanen magnetik berkurang menjadi 0.08 Tesla dari nilai tertingginya sebesar 0.14 T.

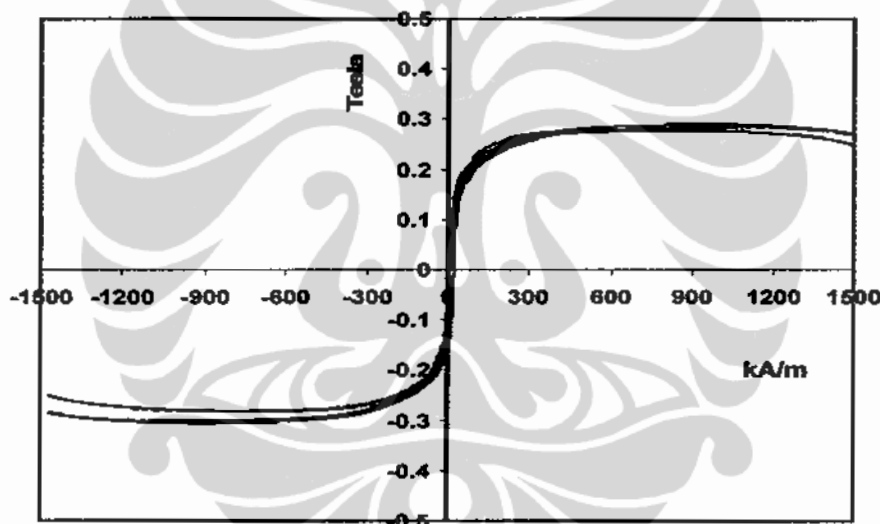
Tabel 4.5 Parameter magnetik pada $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ pada pemanasan 850°C

No	Waktu penumbuhan	(M_s) Tesla	B_r Tesla	H_c (kA/m)
1	1 Jam	0.202	0,168	339
2	4 Jam	0.263	0,189	540
3	8 jam	0.269	0.206	499
4	24 Jam	0.339	0.209	449

4.7.2 Sifat Magnetik Nanostruktur $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$

Eksplorasi efek struktur ternyata memberi dampak sifat kemagnetan dengan melihat perbandingan parameter sifat kemagnetan seperti magnetisasi total maupun koersifitas dan remanen magnetik. Hal ini dapat ditunjukkan bahwa ketika ukuran butir rata-rata (*average grain size*) fasa magnetik mengecil di bawah dibawah 100 nm (Hasil pengukuran TEM) terjadi peningkatan nilai magnetisasinya. Gambar 4.28 yang menunjukan perubahan pola histerisis akibat *mechanical alloying* dan dirangkum dalam table 4.6

Tabel 4.6 merangkum secara detail kuantitas histerisis loop untuk $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ ($x = y = 1.5$) proses *mechanical alloying* 8 jam dan 180 jam dan kristalisasi 1200°C



Gambar 4.28. Histerisis loop Fasa $\text{BaFe}_9\text{Mn}_{1.5}\text{Ti}_{1.5}\text{O}_{19}$ pada penahanan waktu sinter 1 jam dan 4 jam

Peningkatan nilai magnetisasi ini dimungkinkan adanya kenaikan densitas momen magnetik terhadap volumenya. Sedangkan penurunan nilai koersifitas lebih disebabkan oleh adanya interaksi antar dinding domain yang sangat rapat yang berakibat terjadinya kopling magnetik antar domain magnetik yang berdekatan sehingga terjadi penurunan koersifitasnya. Interaksi antar dinding domain belum diperhatikan dalam skala mikro sedangkan pada skala nanometer

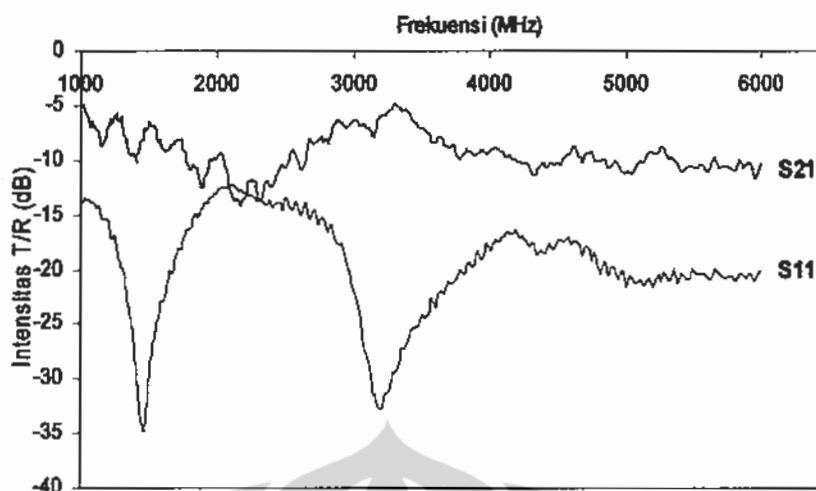
interaksi ini menjadi sangat penting dalam kajian nanomagnetisme dan tidak lagi mengikuti model Stoner dan Wolfarth[98].

Tabel 4.6 Data detail dari histerisis loop untuk $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ ($x = y = 1.5$) pada 8 jam dan 180 jam milling dan dilanjutkan pada pemanasan 1200°C 1 jam

Komposisi	HcB (kA/m)	HcJ (kA/m)	(BH)mak kJ/m ³	H _k (kA/m)	Ms (kA/m)	B _r (T)
BaFe ₁₂ O ₁₉ Milling 8 Jam	85.45	135.00	4.3	31.47	0.32	0.181
X=1.5 Milling 8 Jam	9.39	11.79	0.1	1.53	0.19	0.047
X= 1.5 Milling 180 jam	1.37	1.51	0.0	5.83	0.21	0.018

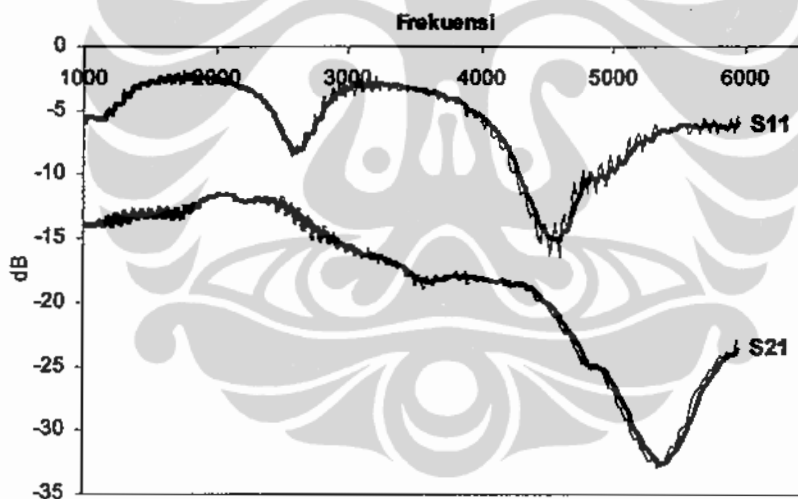
4.8 Serapan Gelombang Elektromagnetik Fasa $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$

Gambar 4.29 memperlihatkan reflektansi dan transmisi gelombang mikro pada rentang frekuensi 1 GHz hingga 6 GHz hasil pengujian material ferrite non-substitusi ($x=y=0$). Koefisien S_{11} adalah koefisien reflektansi dan S_{21} adalah koefisien transmisi. Hasil memperlihatkan terjadi resonansi pada frekuensi ~ 1460 MHz dan 3250 MHz. Koefisien reflektansi menggambarkan fraksi gelombang yang direfleksikan karena terjadinya serapan maupun pantulan. Koefisien refleksi yang rendah menunjukkan sebagian besar fraksi gelombang diteruskan tanpa adanya serapan.



Transmisi dan Refleksi $\text{BaFe}_{12-x}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ ($x=y=0$)

Gambar 4.29. Grafik koefisien refleksi (S_{11}) dan koefisien transmisi (S_{21}) Gelombang elektromagnetik fasa $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ ($x=y=0.0$) yang diukur dengan Network Analiser menggunakan Coaxial wave guide

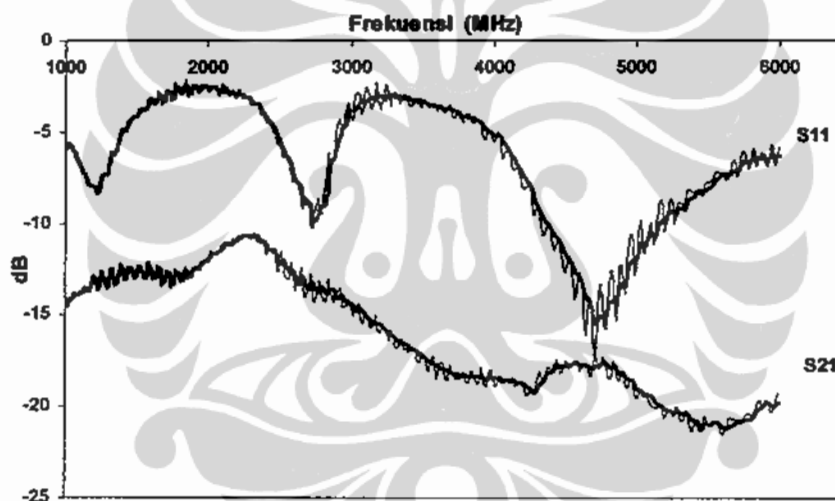


Gambar 4.30 Grafik koefisien refleksi (S_{11}) dan koefisien transmisi (S_{21}) Gelombang elektromagnetik fasa $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ ($x=y=0.5$) yang diukur dengan Network Analiser menggunakan Coaxial wave guide

Pemberian atom Mn dan Ti juga memberi pengaruh pada pergeseran koefisien transmisinya seperti diperlihatkan dalam gambar 4.30 sampai dengan 4.34 yang menunjukkan penurunan koefisien transmisi (S_{21}). Penurunan koefisien

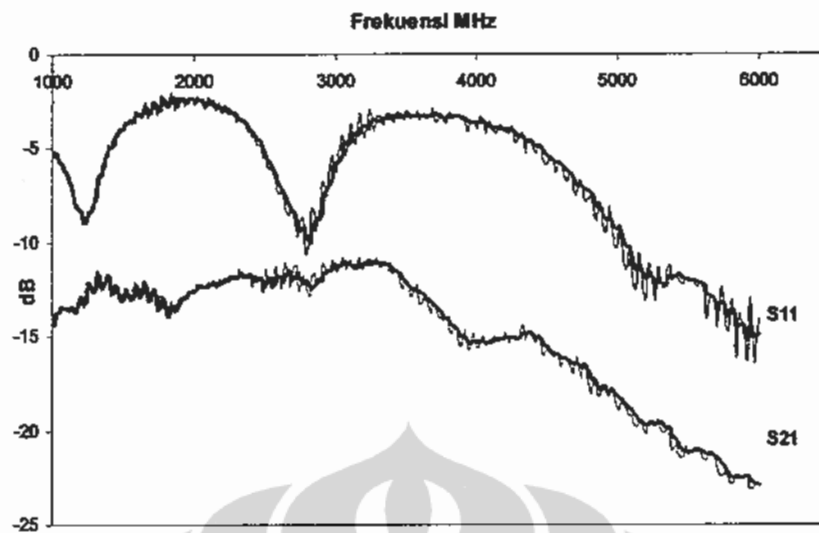
transmisi menandakan bahwa sebagian intensitas radiasi yang tidak dipantulkan akan diserap oleh material.

Penambahan $x=y=0.5$ koefisien transmisi mengalami serapan pada frekuensi 2600 MHz dan 4600 MHz sedangkan koefisien refleksi diperoleh nilai minimum pada frekuensi 5430 MHz. Pergeseran koefisien transmisi dan koefisien refleksi minimum terjadi bila konsentrasi substituen dinaikan pada $x=y=1.0$ sampai dengan $x = y = 1.5$. Pada $x,y=1.0$ koefisien transmisi minimum terjadi pada frekuensi 1230 GHz, 2700 GHz serta 4600 GHz tetapi koefisien refleksi (S_{11}) mengalami penurunan intensitas koefisien. Pola serupa juga terjadi pada $x=y=1.5$ dimana pada S_{11} tidak menampakkan nilai minimum hanya terjadi penurunan koefisien yang cukup tinggi, sedangkan koefisien transmisi mengalami nilai minimum pada frekuensi ~ 1230 GHz dan ~ 2700 GHz.

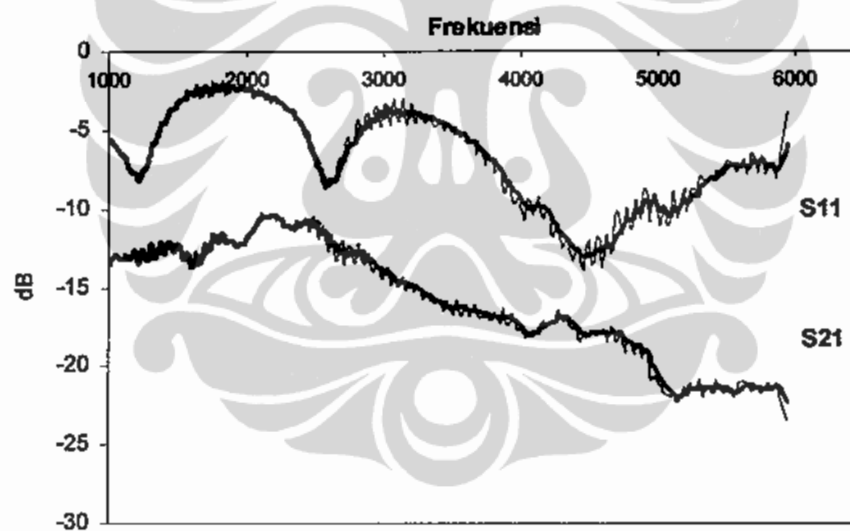


Gambar 4.31. Grafik koefisien refleksi (S_{11}) dan koefisien transmisi (S_{21})

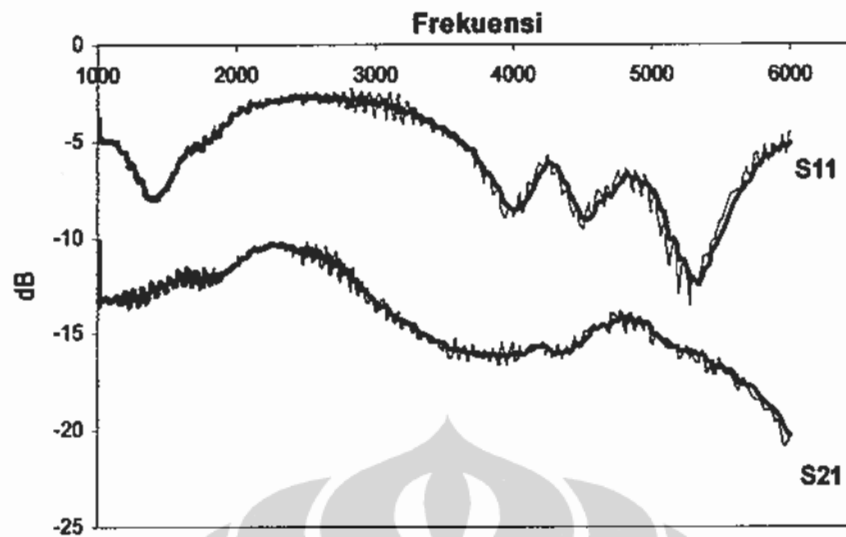
Gelombang elektromagnetik fasa $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ ($x=y=1.0$) yang diukur dengan Network Analiser menggunakan Coaxial wave guide



Gambar 4.32. Grafik koefisien refleksi (S_{11}) dan koefisien transmisi (S_{21}) Gelombang elektromagnetik fasa $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ ($x=y=1.5$) yang diukur dengan Network Analiser menggunakan Coaxial wave guide



Gambar 4.33. Grafik koefisien refleksi (S_{11}) dan koefisien transmisi (S_{21}) Gelombang elektromagnetik fasa $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ ($x=y=2.0$) yang diukur dengan Network Analiser menggunakan Coaxial wave guide



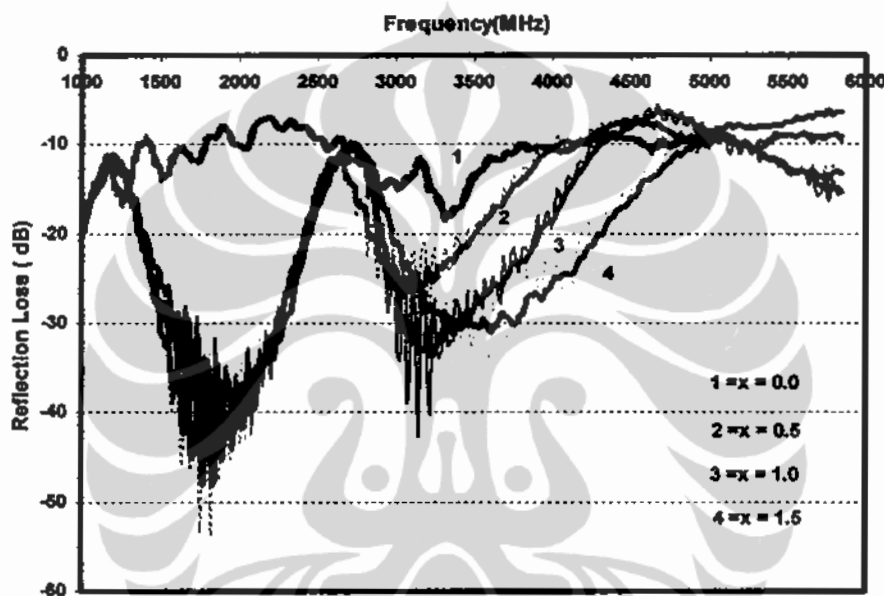
Gambar 4.34 Grafik koefisien refleksi (S_{11}) dan koefisien transmisi (S_{21}) Gelombang elektromagnetik fasa $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ ($x=y=2.5$) yang diukur dengan Network Analiser menggunakan Coaxial wave guide

Pada $x,y = 2.0$ memiliki pola koefisien transmisi yang agak berbeda terutama pada $x,y = 2.5$ meskipun intensitas pada daerah minimum masih terjadi. Keadaan ini dapat dilihat pada frekuensi transmisi 4200 MHz dan 4700 MHz yang menunjukkan pola yang berbeda. Sedangkan koefisien transmisi dapat dikatakan identik antara $x,y=2.0$ dan 2.5 meskipun pada frekuensi di atas 5000 MHz intensitas transmisi $x,y = 2.5$ cenderung menurun.

Hasil kalkulasi *reflection loss* terhadap berbagai komposisi dipresentasikan dalam Gambar 4.37 untuk $x,y < 1.5$ dan Gambar 4.38 untuk $x,y = 0.0, 1.50$ dan 2.0 serta 2.50. *Reflection loss* menggambarkan fraksi gelombang terserap karena resonansi pada material dan gelombang elektromagnetik tidak dikembalikan kepada arah datang. Jelaslah nilai *reflection loss* yang besar menunjukkan besarnya fraksi gelombang yang terserap karena peristiwa resonansi. Hanya sebagian kecil dari gelombang yang terserap dikembalikan kepada arah yang datang. Sedangkan sebagian besar dihamburkan kepada arah yang lain.

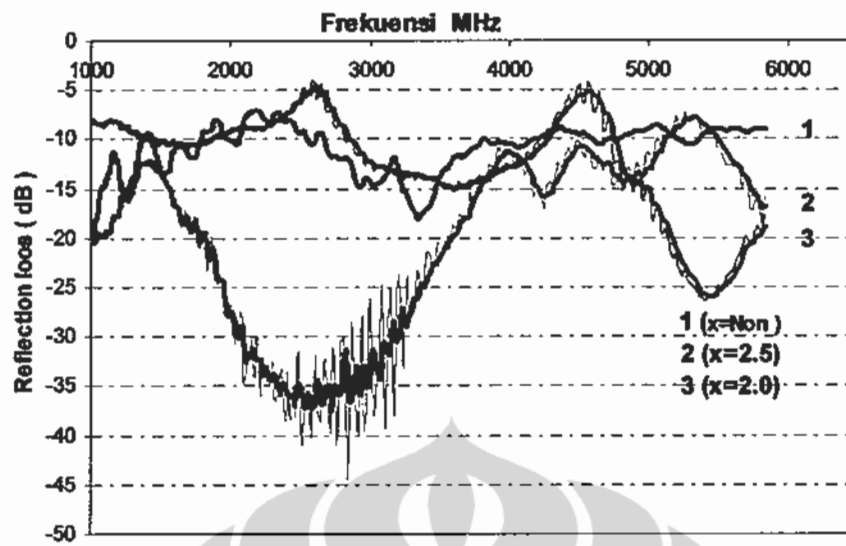
Berdasarkan hasil pada Gambar 4.35 serapan gelombang mikro pada material ferrite dengan $0 < x < 2,0$ dikarakteristikan oleh serapan pada dua

daerah frekuensi dengan jangkau frekuensi yang cukup lebar. Serapan pertama terjadi pada jangkau frekuensi ~ 1250 MHz sampai dengan ~ 2750 MHz. Pada jangkau frekuensi ini ketiga jenis material berbeda komposisi ini memperlihatkan fraksi serapan yang hampir sama. Daerah frekuensi serapan kedua terjadi pada jangkau frekuensi ~2750 MHz sampai dengan 5000 MHz. dalam jangkau frekuensi ini ketiga jenis material memiliki karakteristik berbeda. Dengan meningkatnya fraksi ion substitusi jangkau frekuensi serapan diperlebar meskipun terjadi penurunan nilai *reflection loss*.



Gambar 4.35 *Reflection loss* pada material $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ ($x=y= 0.0;0.5;$ dan 1.0) pada ketebalan 1.2 mm

Gambar 4.36 menunjukan *Reflection loss* pada material $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ ($x=y= 2.5$) pada ketebalan 1.2 mm. Pada material dengan fraksi ion substitusi $x = 2,5$ terjadi pergeseran frekuensi serapan pada jangkau frekuensi serapan pertama disertai dengan peningkatan pelebaran jangkau frekuensi. Meskipun untuk $x=2,0$ tidak ditemukan karakteristik yang mirip untuk alasan yang belum dapat dipastikan.



Gambar 4.36 *Reflection loss* pada material $\text{BaFe}_{12-(x+y)}\text{Mn}_x\text{Ti}_y\text{O}_{19}$ ($x=y= 2.5$) pada ketebalan 1.2 mm

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil-hasil penelitian dan diskusi seperti yang disampaikan pada Bab 5 dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Material magnetik dengan komposisi $\text{BaFe}_{12-2x}(\text{Mn,Ti})_x\text{O}_{19}$ untuk $x = 0 - 2,5$ berhasil dibuat melalui pemaduan mekanik komponen-komponen $(\text{Fe,Mn,Ti})_2\text{O}_3$ dan BaCO_3 . Material dengan fasa tunggal dicapai setelah reaksi padat pada temperatur $1200\text{ }^\circ\text{C}$ selama waktu minimal 1 jam. Karakteristik magnetik material $\text{BaFe}_{12-2x}(\text{Mn,Ti})_x\text{O}_{19}$ ditandai oleh menurunnya nilai koersivitas dari $142\text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$ (untuk $x=0$) menjadi $3\text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$ (untuk $x = 2,5$). Magnetisasi total juga mengalami penurunan dari $\sim 0,38\text{ T}$ menjadi $\sim 0,21\text{ T}$ karena berkurangnya fraksi ion Fe. Nilai koersivitas yang rendah, magnetisasi total yang tinggi serta resistivitas listrik yang besar menjadikan $\text{BaFe}_{12-2x}(\text{MnTi})_x\text{O}_{19}$ kandidat absorber *electromagnetic wave*.
2. Serapan gelombang mikro pada material ferrite dengan $0 < x < 2,0$ dikarakteristikkan oleh serapan pada dua daerah frekuensi dengan jangkauan frekuensi yang cukup lebar. Serapan pertama terjadi pada jangkauan frekuensi $\sim 1250\text{ MHz}$ sampai dengan $\sim 2750\text{ MHz}$. Pada jangkauan frekuensi ini fraksi serapan adalah hampir sama mencapai nilai -40 dB . Daerah frekuensi kedua terjadi pada jangkauan frekuensi $\sim 2750\text{ MHz}$ sampai dengan 5000 MHz . dalam jangkauan frekuensi ini ketiga jenis material memiliki karakteristik berbeda.
3. Meningkatnya fraksi ion substitusi memperlebar jangkauan frekuensi serapan disertai dengan penurunan nilai *reflection loss*. Untuk material dengan fraksi ion substitusi $x = 2,5$ terjadi pergeseran frekuensi serapan maksimal pada jangkauan frekuensi serapan pertama dalam daerah 1500 MHz sampai dengan 4000 MHz .

5.2 Saran-saran

1. Perlu dilakukan kajian pembentukan fasa Barium hexaferrite tersubstitusi dengan berbagai logam transisi lain dengan menggunakan teknik yang berbeda seperti sol gel karena pada proses mekanika alloy diperlukan waktu milling yang cukup panjang sehingga mengurangi efektivitasnya.
2. Pengukuran *refletion loss* dapat dikonfirmasi lebih lanjut dengan menggunakan perangkat lain seperti *rectangular wave guide* ataupun resonator elektromagnetik untuk akuisisi dan akurasi data pengukuran.



DAFTAR REFERENSI

- [01]. **M. Sagawa, S. Fujimura, N. Togawa, H. Yamamoto and Y. Matsuura**, 1984, *J. Appl. Phys.*, 55, pp. 2083-2087
- [02]. **H.A. Davies, A. Manaf, M. Leonowicz, P.Z. Zhang, S. J. Dobson and R.A. Buckley**, 1993, *Nanocrystalline Structures and the Enhancement of Remanence and Energy Product in Melt Spun Iron-Rare Earth-Boron Alloys for Permanent Magnets*", Presented at 1st International Conference on Nanostructured Materials, Cancun, Mexico, Sept. 1992, *Nanostructured Materials*, 2, pp. 197-203
- [03] **Hong-wei Zhang, Tong-yun Zhao, Chuan-bing Rong, Shao-ying Zhang, Bao-shan Han, Bao-gen Shen**, 2003, *Hard magnetic properties in isotropic Nanocomposite Pr₂Fe₁₄B/a-Fe ribbons*, *J. of Magn. Magn. Mat.* 267 pp 224-233
- [04]. **I. Betancourta, H.A. Davies**, 2003, *Influence of Zr and Nb dopant additions on the microstructure and magnetic properties of nanocomposite RE₂(Fe,Co)₁₄B/a(Fe,Co) (RE=Nd-Pr) alloys*, *J. of Magn.Magn.Mat.* 261, pp 328-336
- [05]. **J. Otani, H. Sun, J M D Coey, H.A. Davies, A. Manaf and R.A. Buckley**, 1990, *Magnetic Field Induced Alignment in Melt Spun Pr₂(Fe_{1-x}Co_x)₁₄B"*, *J. Appl Phys* 67 , pp 4616-18
- [06] **Yiping Wang, Yong Li, Chuan Bing, J Ping Li**, 2007, *Sm-Co Hard Magnetic nanoparticle prepared by Surfactan Assisted ballmill*, *J. Magn. Magn. Mat*, Vol. 18 pp 23-28
- [07]. **G M.Mc Caig and A.G. Clegg**, 1987, *Permanent Magnets in Theory and Practice*, 2nd edition, Prentech Press, London
- [08] **X Battle, M. Garcia del Muro, J. Tejada, H. Pfeiffer, P. Gornet, E. Sinn**, 1993, *Magnetic study of M-Type doped Barium ferrite nanocrystalline powders*, *J. appl. Phys.* Vo. 74 (5) pp 3333-3340
- [09] **R. Nowosielski, R. Bobies, G. Dercz, L. Pajak, J. Wrona**, 2007, *Structure and properties of Barium Ferrite Prepared by Milling and annealing*, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 28, 735-742
- [10] **R. Nowosielski, R. Babilas, J. Wrona**, 2007, *Microstructure and magnetic Properties of Commercial Barium Ferrite Powder*, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Ingenireng*, Vol. 20. 1-2
- [11] **J.Ding, P.G. McCormick and R. Street**, 1993, *High coercive ferrite magnets prepared by Mechanical Alloying*, *J. Alloy and Comp.* Vol 78, 281, 32-36

- [12] **A. Manaf, M. Leonowicz, H.A. Davies and R.A. Buckley**, 1992, Enhanced Remanence in Nanocrystalline Rapidly Solidified FeNdB Alloys, Opening paper Proc. 12th Intl. Workshop on Rare Earth magnets, pp 1-11, publ. Univ. West Australia (1992).
- [13] **J.M. Machado da Silva, J.B. Oliveiraa, M.S. Rogalskib, M.A. S!aa**, 2003, Magnetic properties and Mossbauer studies of multiphase Nd-Fe-B alloy obtained from the dissociation of Nd₂Fe₁₄B melt spun ribbon, *J. of Magn. Magn. Mat.* 261 pp. 311-313
- [14] **K.J. Strnat, E.P. Wohlfarth and K.H.J. Buschow**, 1988, *Ferro Magnetic Materials*, North-Holland, vol.4, Amsterdam, pp. 131-210
- [15] **A. Narayanasamy**, 2005, Magnetic properties of nanostructured spinel ferrites and nanocomposite Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe permanent magnets, *J. Apys.* Vol. 65, No. 5, pp. 893-900
- [16] **Li-Xian Lian, a, L. J. Deng, and M. Han, W. Tang, Shao-Dong Feng**, 2007, Microwave electromagnetic and absorption properties of Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe nanocomposites in the 0.5-18 and 26.5-40 GHz ranges, *J. Appl. Phys.*, 101, 09M520
- [17] **Sen Yang, Xiaoping Song, Shandong Li, Xiansong Liu, Zongjun Tian, Benxi Gu, Youwei Du**, 2001, Effect of Cu and Ti additions on the microstructure and magnetic properties of Nd₃Fe₈₆B₆ nanocomposite magnets, *J. Magn. Magn. Mat.* Vol 263. pp 134-140
- [18] **Long Chen, Yuhua Shen, Anjian Xie, Jinmiao Zhu, Zhifu Wu, and Liangbao Yang**, 2007, Nanosized barium carbonate particles stabilized by cetyltrimethylammonium bromide at the water/hexamethylene interface, *Cryst. Res. Technol.* 42, No. 9, 886 - 889
- [19] **C. Sudakar, G. N. Subbanna, a and T. R. N. Kutty**, 2003, Hexaferrite FeCo nanocomposite particles and their electrical and magnetic properties at high frequencies, *J. app. Phys.* Vol 24 No.9 pp 6030-6033
- [20] **M. Sivakumara, A. Gedankena, W. Zhong, Y.W. Dub, Bhattacharyac, Y. Yeshurunac, I. Felnerd**, 2004, Nanophase formation of strontium hexaferrite fine powder by the sonochemical method using Fe(CO)₅, *J. of Magn. Magn. Mat.* 268 pp. 95-104
- [21] **Xiang Cheng Li, Rongzhou Gong, Zekun Feng, Junbing Yan, Xiang Shen, and Huahui He**, 2006, Effect of Particle Size and Concentration on Microwave-Absorbing Properties of Cu_xCo_{2-x}Y (x = 0.05; 0, 1) Hexaferrite Composites, *J. Am. Cer. Soc.* Vol. 89 pp.1450-1452
- [22] **Zhongmin Chen, Y.Q. Wu, M.J. Kramer, Benjamin R. Smith, Bao-Min Ma, Mei-Qing Huang**, 2004, A Study on the role of Nb in melt-spun nanocrystalline Nd-Fe-B magnets, *J. Magn. Magn. Mat.* Vo. 268 pp.105-113

- [23] **K.J. Strnat**, "Ferro Magnetic Materials", ed. E.P. Wohlfarth and K.H.J. Buschow, 1988, North-Holland, vol.4, Amsterdam, pp. 131-210
- [24] **Li-Xian Lian, a L. J. Deng, and M. Han, W. Tang, Shao-Dong Feng**, 2007, Microwave electromagnetic and absorption properties of Nd₂Fe₁₄B/ -Fenanocomposites in the 0.5–18 and 26.5–40 GHz ranges, *J. Appl. Phys.*, 101 ,09M520
- [25] **C. Sudakar, G.N. Subbanna, T.R.N. Kutty**, 2004, Nanoparticle composites having structural intergrowths of hexaferrite and spinel ferrites prepared by gel-to-crystallite conversion and their magnetic properties, *J. of. Magn. Magn. Mat.* 268 pp 75-88
- [26] **Roy, Debangsu' Shivakumara, C. Anil Kumar, P.S.** 2009, Observation of the *exchange* spring behavior in hard–soft-*ferrite* nanocomposite, *J. magn. Magn. Mat*, Vol 321 No. 5 pp 11-14
- [27] **V. Babu, P. Padaikathan**, 2002, Structure and hard magnetic properties of barium hexaferrite with and without La₂O₃ prepared by ball milling *J. of Magn. Magn. Mat* 241 pp 85–88
- [28] **K.D. Belashchenko**, 2004, Anisotropy of exchange stiffness and its effect on the properties of magnets, *J. of Magn. Magn. Mat* 270 pp 413–424
- [29] **L. Withanawasan, A.S. Murphy and G.C. Hadjipanasis**, 1994, *J. Appl. Phys.*, 76 7065
- [30] **Smit, J. and H.P. Wihu**, 1952 Physical Properties of Ferrimagnetic Oxides in Relation Their Technical Application, Phillips Res. Lab. Endoven
- [31] **K.-H. Muller, G. Krabbes, J. Fink, S. Gru A. Kirchner, G. Fuchs, L. Schultz**, 2001, New p, ermanent magnets, *J. of Magn. Magn. Mat.* 226 pp. 1370- 1376
- [32] **Bao-Wen Li, Yang Shen, Zhen-Xing Yue, Ce- Wen Nan**, 2006, Enhanced microwave absorption in nickel/hexagonal-ferrite/polymer composite, *j. Appl. Phys. Lett.* Vo. 89, No. 132505
- [34] **R. C. O'Handley**, 2000, Modern Magnetic Materials and Applications, J. Wiley & Sons, Inc, New York. Pp25, Canada
- [35] **Ghosh, N.N**, 2000, Synthesizes of nanostructure magnetic-Mixed-Oxide Ferrite Powder By Using Novel Chemical Method, Symposium materials Issues for Tunable RF and Microwave
- [36] **Meshram, Nawal K. Agrawal, Bharoti Sinha**, 2003, Transmission Line Modeling (TLM) for Evaluation of Absorption in Ferrite Based Multilayer Microwave Absorber, Dept. of Elec. & Comp. Engin. India Institute of Tech, Rooke 247, 667, India

- [37] **J. Saily, A. Raisanen, 2003, Studies on specular and Non-Specular reflectivity of Radar Absorbing Material(RAM) at Sub millimeter Wavelengths, dio laboratory Publications Helsinki University of Tecnology , 258**
- [38] **Mirabel Cerqueira Rezende, In'acio Malmonge Martin, Roselena Faez,2002, Radar Cross Section Measurements (8-12 GHz) of Magnetic and Dielectric Microwave Absorbing Thin Sheets , Revista de F'isica Aplicada**
- [39] **S. Simms, V. Fusco, 2005, thin radar Absorber using artificial magnetic ground plane,J. Electr. Lett. Vol. 41 No. 24**
- [40] **Kodo Kawase1, Jun-ichi Shikata and Hiromasaito,2001, Terahertz Wave parametric source, J. Phys. D: Appl. Phys. 34 (2001) R1-R14**
- [41] **Fidler, 2007, Physics of Magnetic Materials, Institut furr angewandte und Technische physik ,TU, Wien, Wiedner Hauptstrabe 8-10,1040 Wien**
- [42] **Takanori T, Teruhiro K, K. Hatakeyama, 1999, Magnetic Field Effect on the Complex Permeability for a Mn-Zn Ferrite and its Composite Material, J. of Europe. Ceramic Society, 19, pp.1531-1535**
- [43] **A.K. Mahmud, .M. Akther Hossain, T.S. Biswas, S T Mahmud, Takeshi Yanagida, Hidekazu Tanaka, 2007, Enhancement of initial permeability due to Mn Substitution in polycrystalline Ni_{0.5-x}Mn_xZn_{0.5}Fe₂O₄ Vol 1 pp-235-239**
- [44] **Mangalaraja, R.V, Anathakumar, P. Manohar. F.D. Gnanam, 2003, Initial Permeability studies of Ni-Zn- Ferrite Prepared by flash Combution technique, Mat. Sci. Eng. A355 pp. 320-324**
- [45] **M. Kuceraa K. Nitsch and M. Marysko H. S tepankova, 2003, Properties of epitaxial yttrium iron garnet films grown from BaO flux, J. App. Phys. Vol. 93, No. 10, pp 7510-7512**
- [46] **Mustofa, H. Abdullah, Mardiana A., Noor Baa'yah I., A. Nazlim Yusuf, 2008, Micro wave Magnetic Dielectric Properties of Some Cerium Yttrium Garnet, J. Sains Malaysia, 37, pp 202-210**
- [47] **Yu. A. Mamlu and L. P. Ol'khovik, 2005, Hexagonal ferrite: from macro- to nanocrystal , Low Temperature Physics, Vol. 31, N0. 3 pp 268-276**
- [48] **Zhang, L,2006, Ferrite for UHF Application, The O HiO State University Group Inorganic material Sciences, USA**
- [49] **Jiles.D, 1998, Introduction to magnetism and Magnetic materials, 2nd Ed. London and Newyork: Chapman and Hall**
- [50] **G. Wingkler, 1971, Crystallography, Chemistry and technology of ferrite in Magnetic properties of Materials, , Mc Grow Hill, New York**

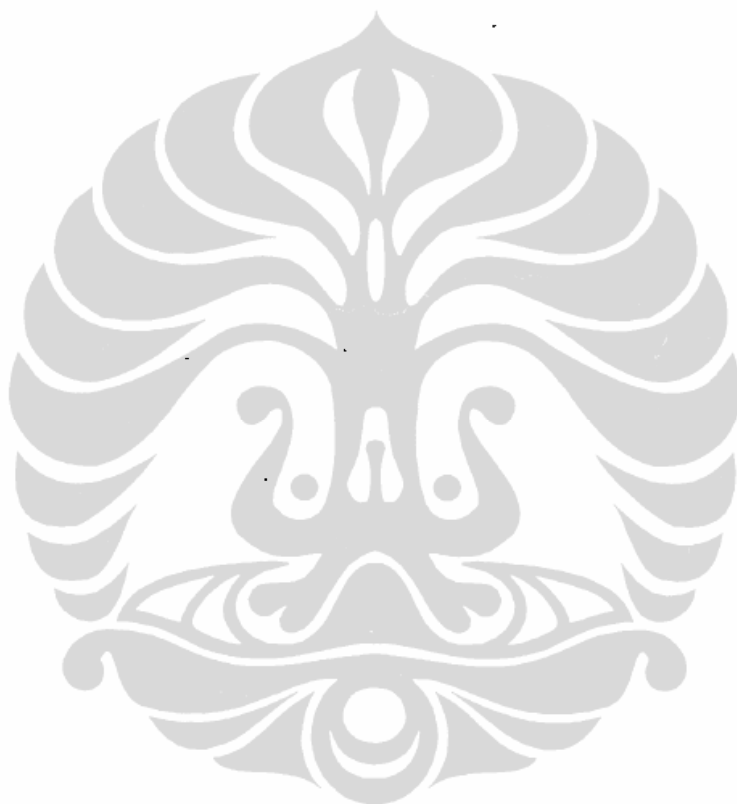
- [51] **Z. W. Li, Lin Guoqing, and Linfeng Chen, Wu Yuping and C. K. Ong, 2006, Co²⁺Ti⁴⁺ substituted Z-type barium ferrite with enhanced imaginary permeability and resonance frequency, J. Of App. Phys. Vol. 99, 063905**
- [52] **Wang, X. L., Li, L., Shuiyuan Su and Zhenxing Yue, 2004, Electromagnetic Properties of Low Temperature Sintered Ba₃Co_{2-x}Zn_xFe₂₄O₄₁, J. Magn. Magn. Materials, 280, 10-13**
- [53] **Z. W. Li and Linfeng Chen, C. K. Ong, 2002, Studies of Static and High Frequency magnetic Properties for M-Type Ferrite Ba(Co Zr)_x Fe_{12-2x}O₁₉, Journal of applied Physics Vol 92, 3902-3907**
- [54] **Morihiko Matsumoto, Yoshimori miyata, 1996, A Gigahertz-range Electromagnetic wave Absorber with bandwidth made of hexagonal ferrite, J. appl. Phys. Vo. 79 No. 08 pp. 5486-5488**
- [55] **H. Zhang, X. Yao, M. Wu and L. Zhang, 2003, Complex permittivity and permeability of Zn-Co substituted Z type hexaferrite prepared by Citrate sol-gel process, British Cer Transc. Vol. 102 pp 01-10**
- [56] **Bai, Y., J. Zhou, Z. Gui, Y. Zhenxing, L. Tu li, 2003, Complex Y-Type hexagonal ferrites: an ideal material for high frequency chip magnetic Components, J. of Magn. Magn Material 264 pp. 44-49**
- [57] **Xiang Cheng Li, Rongzhou Gong, Zekun Feng, Junbing Yan, Xiang Shen, and Huahui He, 2006, Effect of Particle Size and Concentration on Microwave-Absorbing Properties of C_xCo_{2-x}Y (x=0, 1) Hexaferrite Composites, J. Am. Ceram. Soc., 89 [4] 1450-1452**
- [58] **Jiu Rong Liu, Masahiro Itoh, and Ken-ichi Machida, 2006, Magnetic and electromagnetic wave absorption properties of Fe/Z-type Ba-ferrite nanocomposites, J. App. Phys. Lett. Vol. 88, 062503**
- [59] **K. N. Rozanova Z. W. Li and L. F. Chen M. Y. Koledintseva, 2005, Microwave Permeability of Co₂Z composites, J. App. Phys. Vo.97, 013905**
- [60] **Alexandre R., Bueno, M. L Gregory. C. S. Nobrega, 2008, Microwave Absorbing properties of Ni_{0.5-x}Zn_{0.5-x}Me_{2x}Fe₂O₄ (Me=Cu, Mn-Mg) ferrite wax composite in X- band frequency, J. Magn. Magn. Matt.**
- [61] **Z. W. Li, L. Chen, C. K. Ong, Z. Yang, 2005, Static and dynamic magnetic properties of Co₂Z barium ferrite nanoparticle composite. Sci. Mat. Vol. 40, pp 719-723**
- [62] **Li Jun Jia, Jun Luo, Huaiwu Zang, Yu Lan Jing, Yu Shi, 2007, Effect of Y₂O₃ additive on the microstructure and High frequency properties of Z-type hexaferrite J of magn. Magn matt.**

- [63] **Wilson, J. A Crawford**, 2007, Propagation losses through Common Building materials 2.4 GHz Vs 5 GHz, University of Southern California E 10589
- [64] **Ramprecht J, D. Sjoberg**, 2007, Biased Magnetic Materials in RAM Application, Progress in Electromagnetic Research, PIER 75,85-117
- [65] **V. A. Zhuravlev and V. I. Suslyayev**, 2006, Analysis and Correction of The Magnetic Permeability Spectra of Ba₃Co₂Fe₂₄O₄₁ Hexaferrite by Using Cramer Cronig Relation, *Russian Physics Journal*, Vol. 49, No. 8, pp. 840-846
- [66] **Dubranfaut, D, S., Zouhdi, A. F. Fourier Lamer, E. Brando and Vincent, H.**, 1999, Study of Microwave absorptions in M-Hexaferrite for anti-radar Application, Journal Of Eurp. Phys. Vol. 8 pp. 159-162
- [67] **Jiu Rong Liu, Masahiro Itoh, Takashi Horikawa, Kenichi machida, Satoshi Sugimoto, Toru Maeda**, 2005, Gigahertz range electromagnetic wave absorber made amorphous Carbon based magnetic nanocomposites, J. appl. Phys. Vol 98 054305
- [68] **Takanori Tsutaoka, Teruhiro Kasagi and Kenichi Hatakeyama**, 1999, Magnetic Field Effect on the Complex Permeability for a Mn±Zn Ferrite and Its Composite Materials, J. Europ. Cer. Vol. 19 pp 1531 -1535
- [69] **Hu Jun, Yan Mi**, 2005, Preparation of High-Permeability NiCuZn Ferrite, J. Zhejiang, 6B(6)580-583
- [70] **Praveen Singh V. K. Babbar Æ Archana Razdan Æ S. L. Srivastava Æ V. K. Agrawal Æ T. C. Goel**, 2006, Dielectric constant, magnetic permeability and Microwave absorption studies of hot-pressed Ba-CoTi hexaferrite composites in X-band, J Mater Sci . 41:7190–7196, DOI 10.1007/s10853-006-0921
- [71] **Wu, Y.P and C.K. Ong, Z.W.Li Linfeng and G.Q. Lin , S.J, Wang**, 2005, Micro structure and High-Frequency magnetic Characteristics of W-Type Barium Ferrite doped with V₂O₅, J. Appl. Phys. 97-063909
- [72] **Karim, R., S.D. Bell, J.R. Truedson, and C.E. Patton**, 1993. Frequency dependence of The ferromagnetic resonance line width and effective line width in manganese substituted single crystal barium, J. Appl. Phys.73(9), pp 4512-4515
- [73] **R. Heindl, H. Srikanth, S. Witanachchi and Mukherjee**, 2007, J. of Applied Physics 101 , 09M503
- [74] **Sattar A.A.**,2006, Temperature dependence of Electrical Resistivity and Thermoelectric Power of rare Erth Substituted Cu-Cd Ferrite, Egypt J. Sol., Vol. 26, No.2 pp. 113 -121

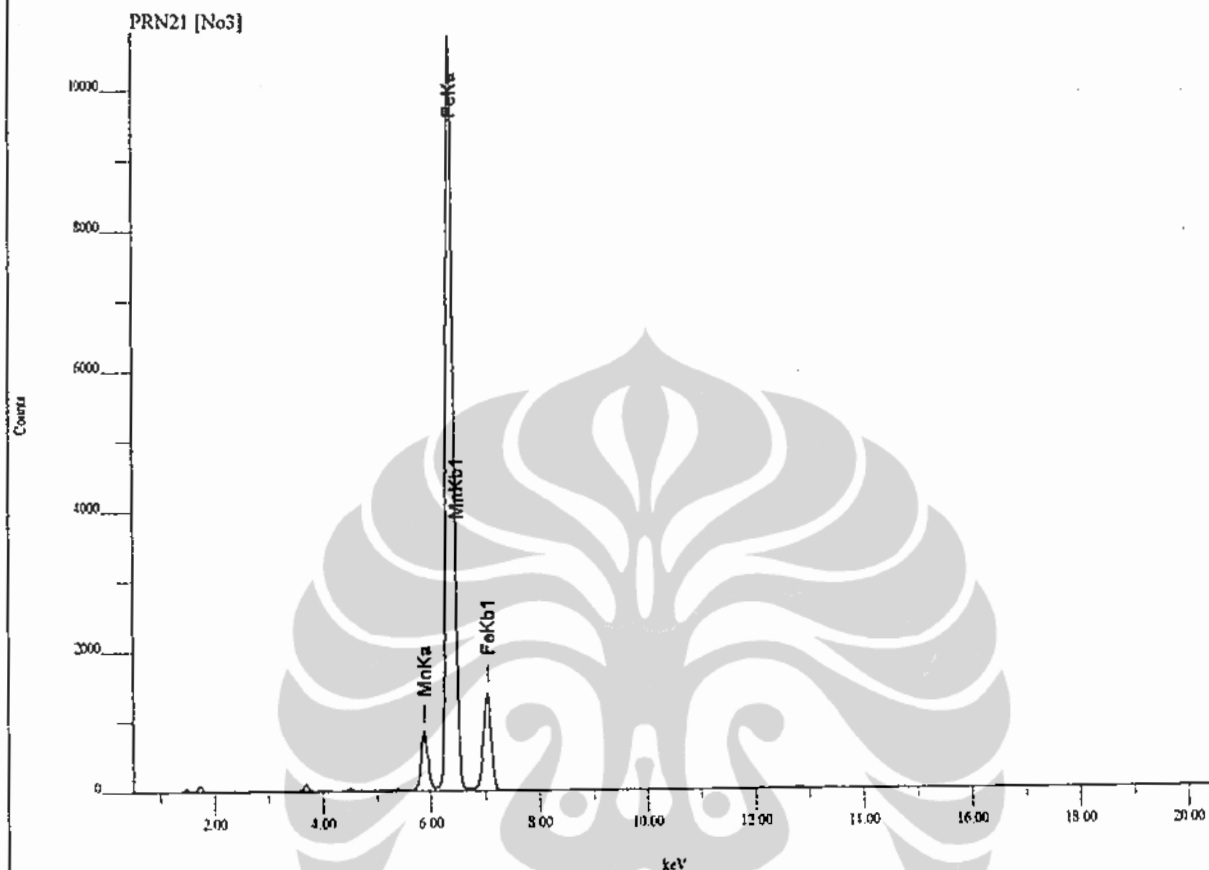
- [75] **Li, W and Chen, L., Ong, C.K.,**2002, Studies of Static and High Frequency magnetic Properties for M-Type Ferrite $Ba(Co Zr)_x Fe_{12-2x}O_{19}$, J. app. Phys. Vol. 92, 3902-390
- [76] **Ghasemi A., Saatchi, A. Saleh, M. Hossienpour, A. Morisako, A.,** 2006, Influence of matching thickness on The absorption properties of doped Barium ferrite at microwave frequencies, Phys. Stat. Sol.(a) 203, No.2, pp. 358-3
- [77] **Hong, Y.S. C.M. Ho, C.M., Hsu, H.Y., C.T. Liu,** 2004, Synthesis of Nanocrystalline $BaFe_{12-2x}(MnTi)_xO_{19}$ Powders by The Sol-Gel Combustion metho in Citrate acid- Metal nitates System ($x=0;0.5;1.0;1.5;2.0$), Journal Of Magn. Mag. Materials, 279, 401-410
- [78] **Meshram, Nawal K. Agrawal, Bharoti Sinha, P.S. Misra.** 2002, A study on The Behavior of M-Type barium hexagonal ferrite baseds microwave absorbing paint, Bull, Meter Sci. Vol. 25 No. 2 pp. 169-173
- [79] **M. R. Meshram , B. Sinha, N.K. Agrawal, P.S. Misra,** 2002, Development and Characterization o f (Ba-Mn-Ti) Hexagonal Ferrite based Absorbing paint , IEEE Antenas Propagation Society Simp. USNC/URSI pp 790-793
- [79] **M. Sivakumar, A. Geddanen, W. Zhong, Y.W. Du, D. Bhattacharya, Y. Yeshurun, I. Felner,** 2004, Nanophase formation of Strontium hexaferrite fine powder by The Sonochemical method using $Fe(Co)_5$, Journal of Magnetism and magnetic materials,
- [80] **Koutzarova, T.,**2007, Magnetic Nanocomposite for Microwave Application, Annual Report IE. Pp. 97-102
- [81] **Ramprecht J, D. Sjoberg,** 2007, Biased Magnetic Materials in RAM Application, Progress in Electromagnetic Research, PIER 75,85-117
- [82] **Sergey V. Lebedev, Carl E. Patton, a) and Michael A. Wittenauer, Laxmikant V. Saraf and Ramamoorthy Ramesh,** 2000, Frequency and temperature dependence of the ferromagnetic Resonance linewidth in single crystal platelets and pulsed laser deposited films of barium ferrite, J. App. Phys. Vol 91 pp 442604431
- [83] **Z. W. Li, a_ G. Q. Lin, and Linfeng Chen, Y. P. Wu and C. K. Ong,** 2005, Size effect on the static and dynamic magnetic properties of W-type barium ferrite composites: From microparticles to nanoparticles, J. App. Phys. Vol. 98, 094310
- [84] **Darko Makovec. Aljosa Kosak, Andrej Znidarsic , Miha Drofenuk,** 2004, The Synthesis of Spinal-Ferrite nanoparticles using Precipitation in Micro emulsions for Ferro fluid application, Journal of Magn. Magn. Materials 266, 477-482

- [85] **G. Srinivasan, I. V. Zavislyak, and A. S. Tatarenko**, 2006, Millimeter-wave magnetoelectric effects in bilayers of barium hexaferrite and lead zirconate titanate, *J. of app. Phys*, Vol 89 152508
- [86] **Kun-Yuan Chen, Yu-Wen Chen**, 2004, Preparation of barium titanate ultrafine particles from rutile titania by a hydrothermal conversion, Elsevier, *Powder Technology* 141 (2004) 69– 74
- [87] **Toyoda, T., K. Kitagawa, K. Yamawaki, T. Hanashima, S. Sasaki, P. Siddons**, 2004, Site preference Study of Ti-Mn and Ti-Co, substitution for Fe⁺³ in Ba-Hexagonal ferrite by means of X-Ray Diffraction and absorption Measurement, *J. of The Ceramic Society of Japan*, Supplement 112-1 . PacRim5 Special Issue , 112(5) S1455-1458
- [88] **B.D. Cullity**, 1978, *Elements of X-Ray Difrraction*, Addison-Wesley Publishing Company, Second Edition, P 363-367.
- [89] **C. Suryanarayana, M. Grant**, 1998, Norton, *X-Ray Difrraction A Practical Approach*, Plenum Press, 153-166
- [90] **Hidetoshi E., Takao Inoue, O. Hashimoto**, 2006, Measurement method of Complex permittivity and Permeability for Powdered Materials using a Wave guide in microwave band, *J. Sci. tech. Adv. Mat*, Vol 7 No. pp 77-83
- [91] **www.agilent.com/find/materials**, 2007, Agilent Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials
- [92] **Robde & Schwarz**, 2005, Measurement of dielectric material, Application NoteCY Kliek RAC0607-0019
- [93] **Lajos Nagy**, 2008, *Material Parameter Measurements for Microwave Antireflection Coating Development*, Hindawi Publishing Corporation Active and Passive Electronic Component Vol. 01 pp 1-6
- [94] **Young Joon an, Ken Nihsida, takeshi Yamamoto, takeshi Deguchi**, 2008, Characteristic evaluation of microwave absorber using dielectric and magnetic composite materials, *journal of Ceramic processing research* Vol. 9 No. 4 pp 430-436
- [95] **Mahmut Obol, Cermine Vittoria**, 2003, Microwave permeability of Y-Type hexaferrite in Zero Field, *Journal of Applied Physcis*, Vol 94 No, 6 pp 4013-4013
- [96] **A. Kakirde, B. sinha, S.N. Sinha**, 2008, Development and Characterization of Nickel -Zinc Spinnel Ferrite for Microwave Absorption at 2.4 GHz, *Bull Matt. Sci.* Vol 31, pp 767-777
- [97] **T. Aichele, A. Lorenz, R. Hergt, P. Görnert**, 2002, Garnet layers prepared by liquid phase epitaxy for microwave and magneto-optical applications a review *Cryst. Res. Technol.* 38, No. 7–8, 575 – 587

- [98] **L. Geiler, S. D. Yoon, Y. Chen, C. N. Chinnasamy, Z. Chen, M. Geiler, V.G. Harris, and C. Vittoria, 2007, 19 thin films grown at the atomic scale from BaFe₂O₄ and γ -Fe₂O₃, Targets, App. Phys. Vol.91, 162510**
- [99] **R.A. Candeia, M.A.F. Souza, M.L.B. Bernadi, S.C. Maestrlli, JMG. Santos, A G. Souva, L. Longo, 2007, Mono ferrite BaFe₂O₄ applied as ceramic pigment, Vol 33, pp 521-525**

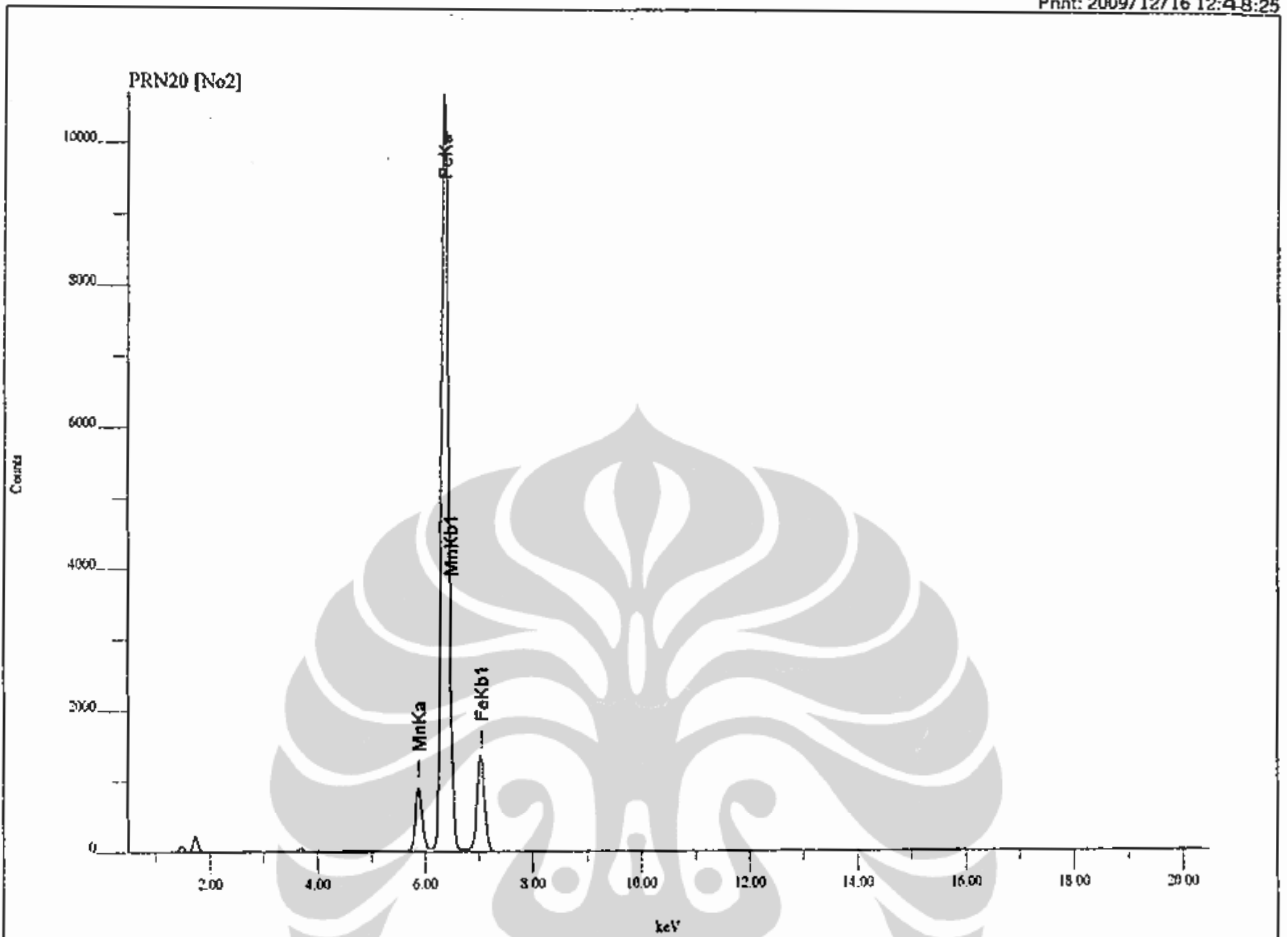


DAFTAR LAMPIRAN



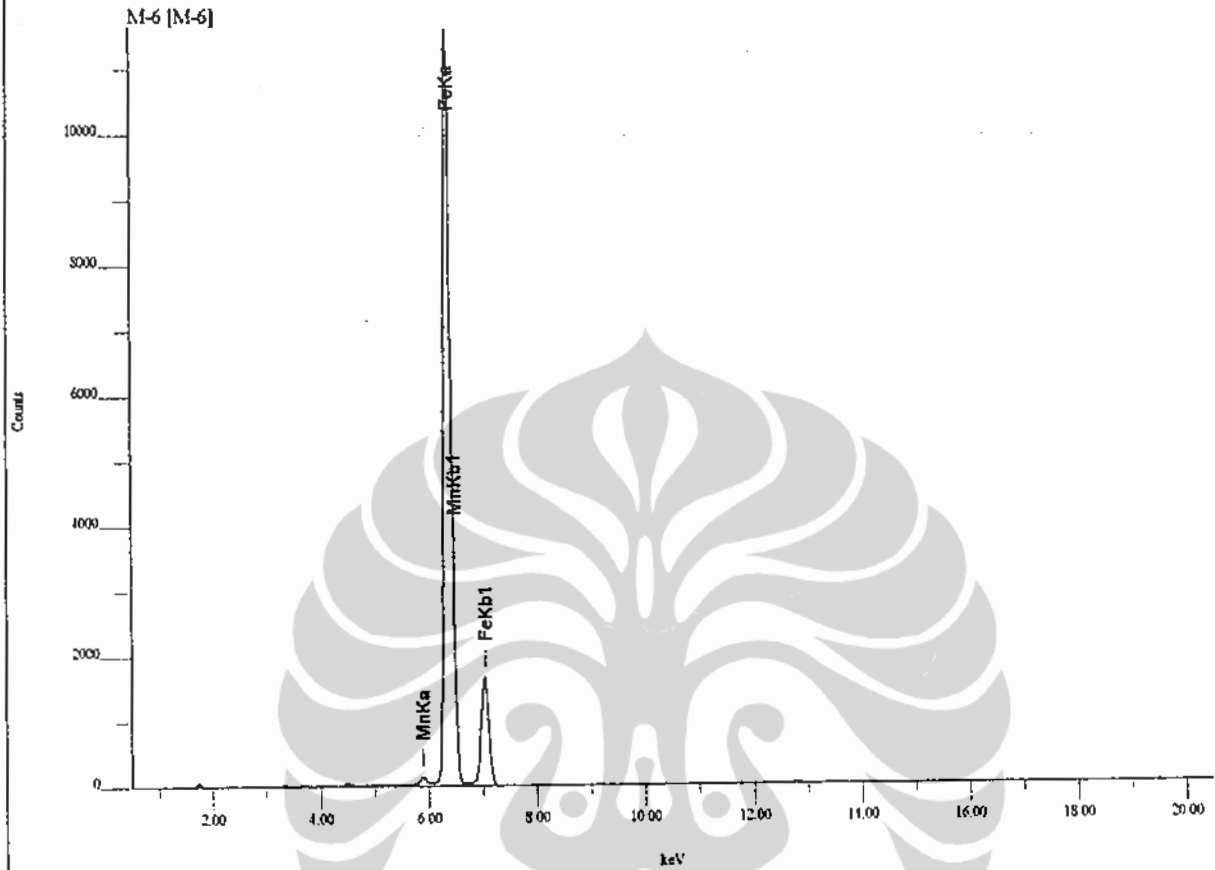
File Name : D:\USER\PRIYONO\PRN21.SPC Acq. Time: 2007/ 8/31 14:45: 9
 Sample Name: No3
 Memo : Priyono3
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.043mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: Mn,Fe

Num	Atom/Chem.Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	25 Mn	5.6077	5.6952	0.0424539	13311	0.0954
* 2	26 Fe	94.3923	94.3048	0.5578739	193615	0.1156



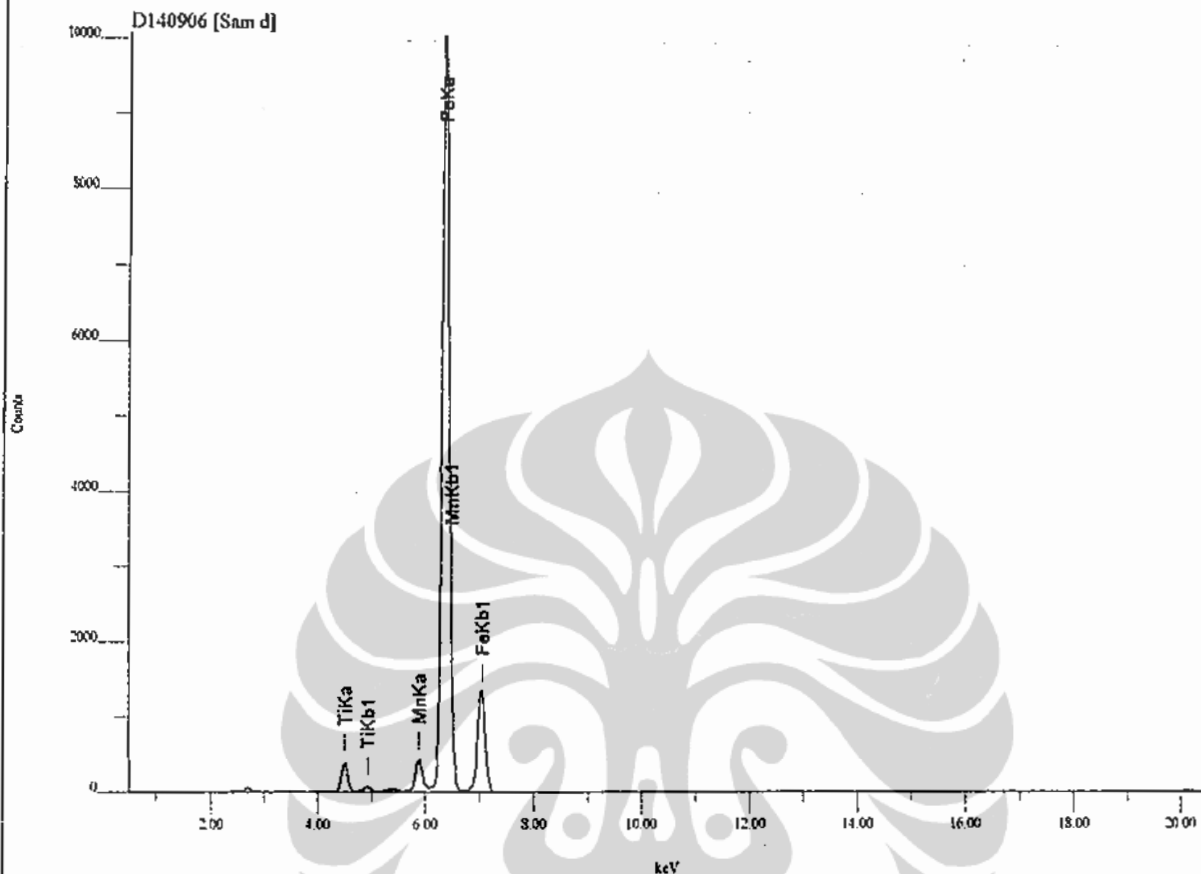
File Name : DAUSERPRIYONOPRN20.SPC Acq. Time: 2007/ 8/31 14:42:32
 Sample Name: No2
 Memo : Priyono2
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.032mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: Mn,Fe

Num	Atom/Chem.Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	25 Mn	5.9982	6.0914	0.0591613	14185	0.1131
* 2	26 Fe	94.0018	93.9086	0.7262071	192733	0.1366



File Name : D:\USER\PRIYONOM-6.SPC Acq. Time: 2009/7/24 13:48:3
 Sample Name: M-6
 Memo : Dr
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.012mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: Mn,Fe

Num	Atom/Chem. Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	25 Mn	0.4363	0.4435	0.0121886	1124	0.0645
* 2	26 Fe	99.5637	99.5565	2.0667243	210963	0.0821



File Name : DAUSER\PRIYONO\D140906.SPC Acq. Time: 2006/ 9/14 13:17: 6

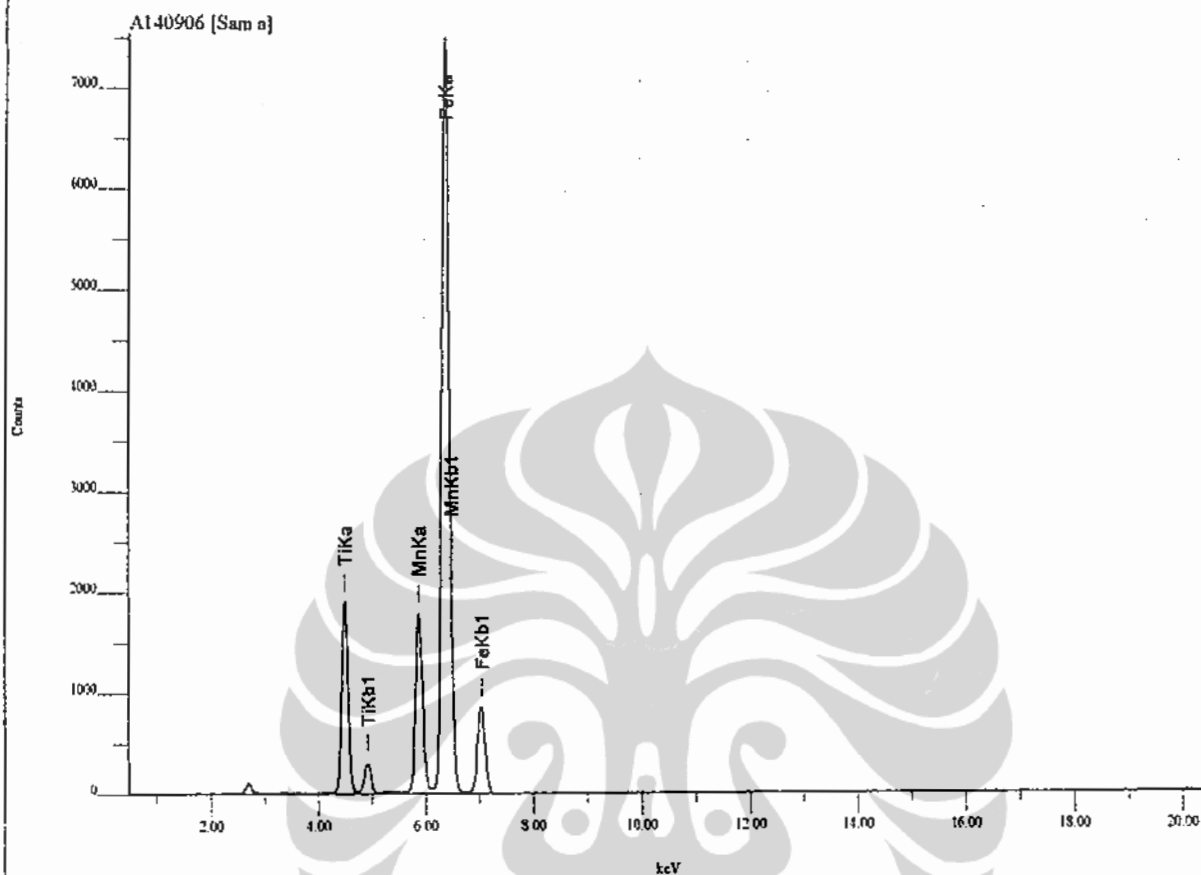
Sample Name: Sam d

Memo : Priyono

Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.036mA Live time: 100.00sec Pass:Vac

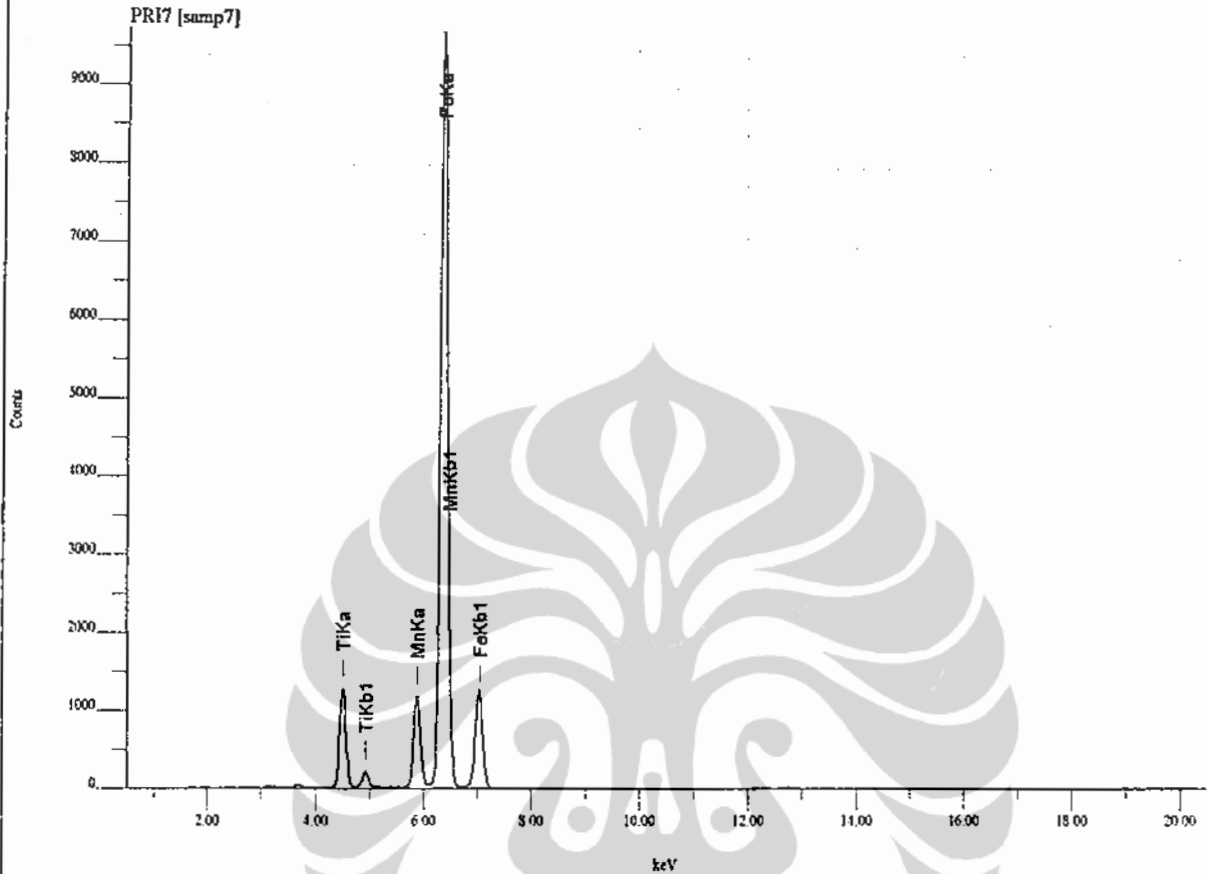
Analysis Element: Ti,Mn,Fe

Num	Atom/Chem. Formula	wl(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 Ti	2.5433	2.9515	0.0319396	5902	0.1033
* 2	25 Mn	2.6104	2.6413	0.0236654	5753	0.1257
* 3	26 Fe	94.8463	94.4072	0.6722313	180904	0.1522



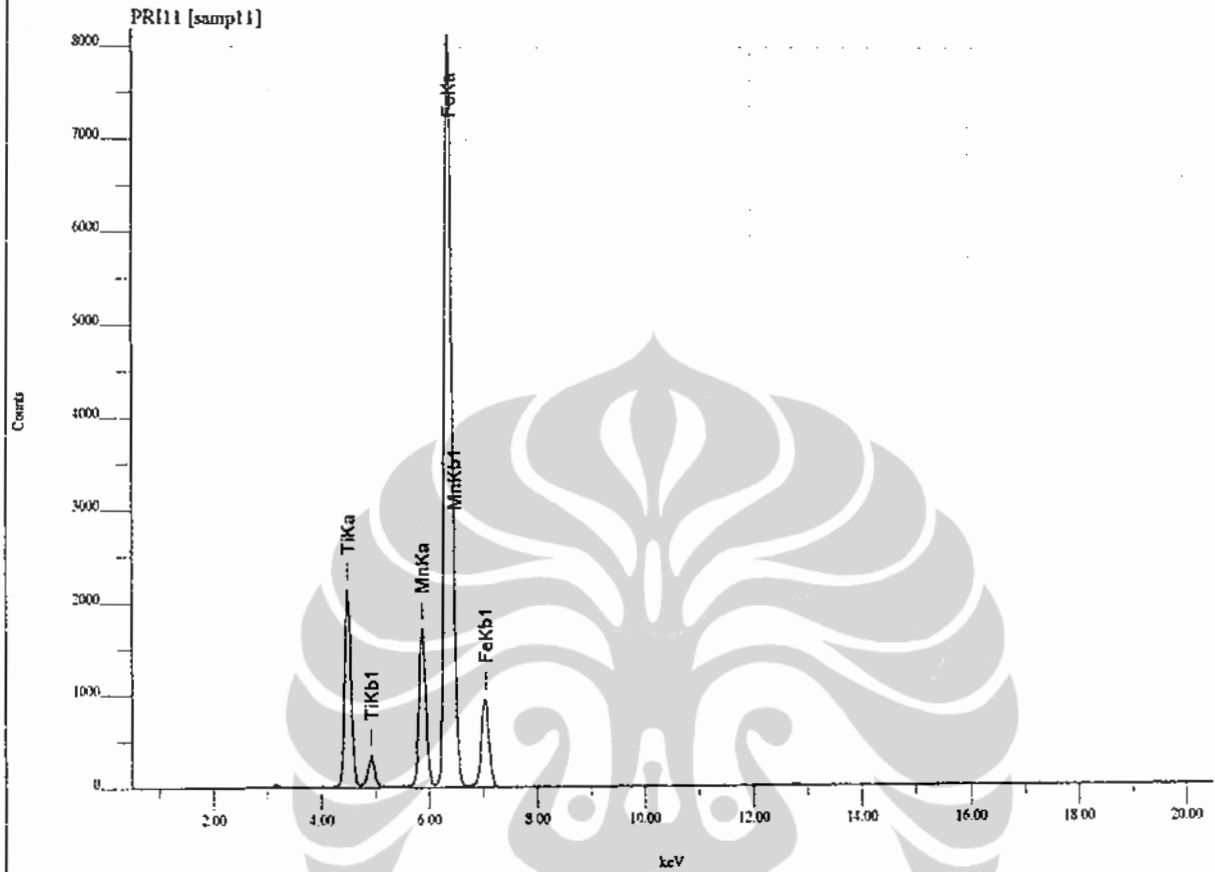
File Name : D:\USER\PRIYONO\A140906.SPC Acq. Time: 2006/9/14 13:9:56
 Sample Name: Sam a
 Memo : Priyono
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.055mA Live time: 100.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: Ti,Mn,Fe

Num	Atom/Chem. Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 Ti	13.1476	14.9627	0.1076247	30175	0.0819
* 2	25 Mn	16.0512	15.9270	0.0811891	29948	0.1165
* 3	26 Fe	70.8013	69.1102	0.3240873	132326	0.1218



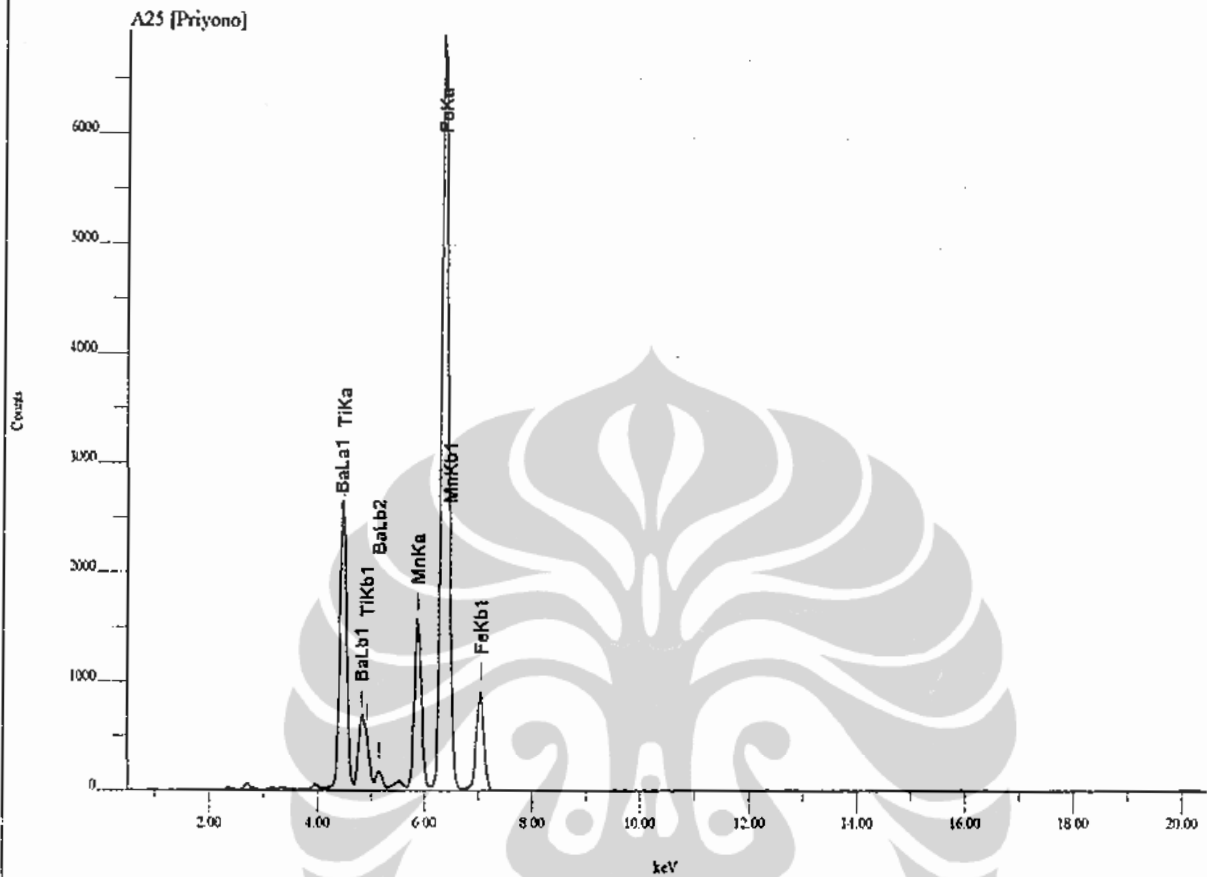
File Name : DAUSERPRIYONOPRI7.SPC Acq. Time: 2007/ 3/12 16:55:23
 Sample Name: samp7
 Memo : Priyono
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.035mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: Ti,Mn,Fe

Num	Atom/Chem.Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 Ti	7.9546	9.1408	0.1035731	20327	0.1106
* 2	25 Mn	8.5727	8.5890	0.0736976	19029	0.1472
* 3	26 Fe	83.4727	82.2702	0.6106909	174543	0.1636



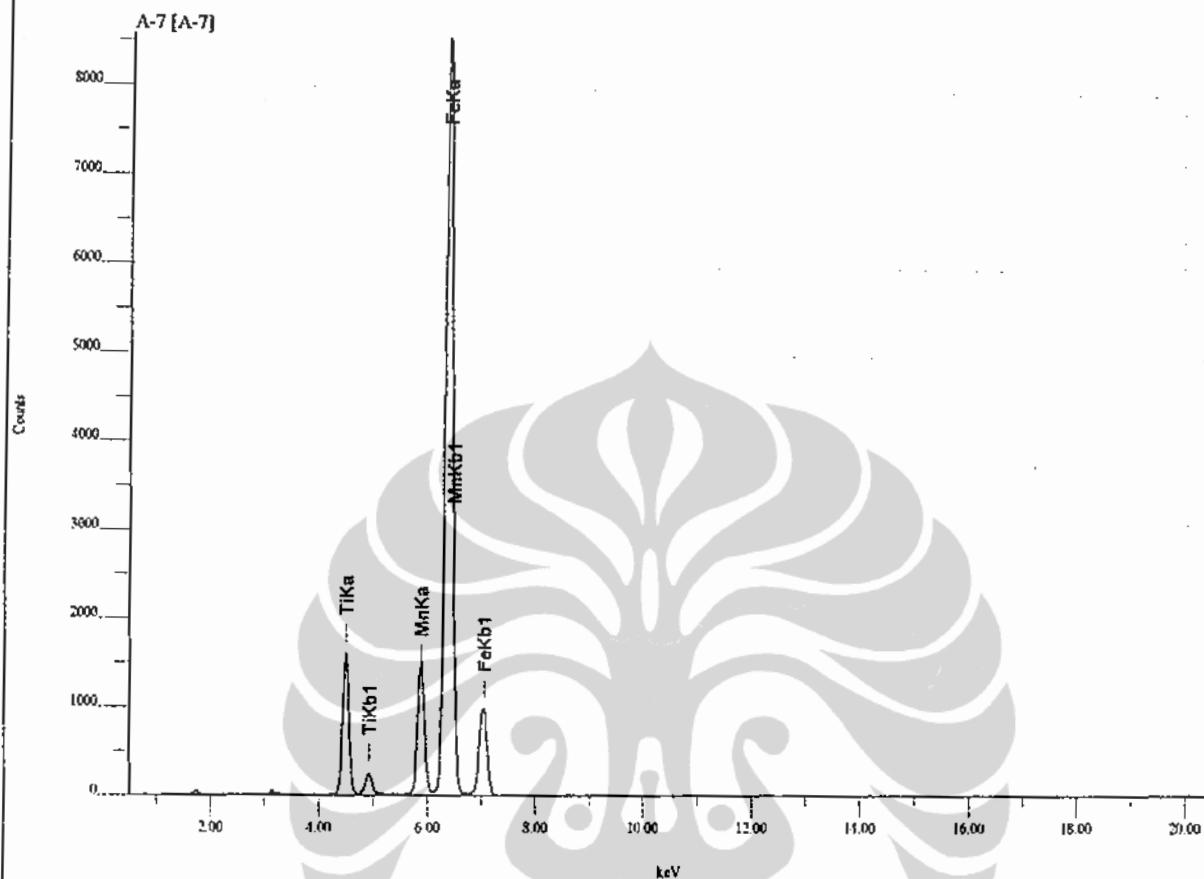
File Name : DAUSER\PRIYONO\PRI11.SPC Acq. Time: 2007/ 3/12 17: 6:43
 Sample Name: samp11
 Memo : Priyono
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.035mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: Ti,Mn,Fe

Num	Atom/Chem. Formula	wl(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 Ti	13.6360	15.5109	0.1707985	33521	0.1096
* 2	25 Mn	14.2239	14.1069	0.1103912	28504	0.1554
* 3	26 Fe	72.1402	70.3823	0.5042626	144125	0.1632



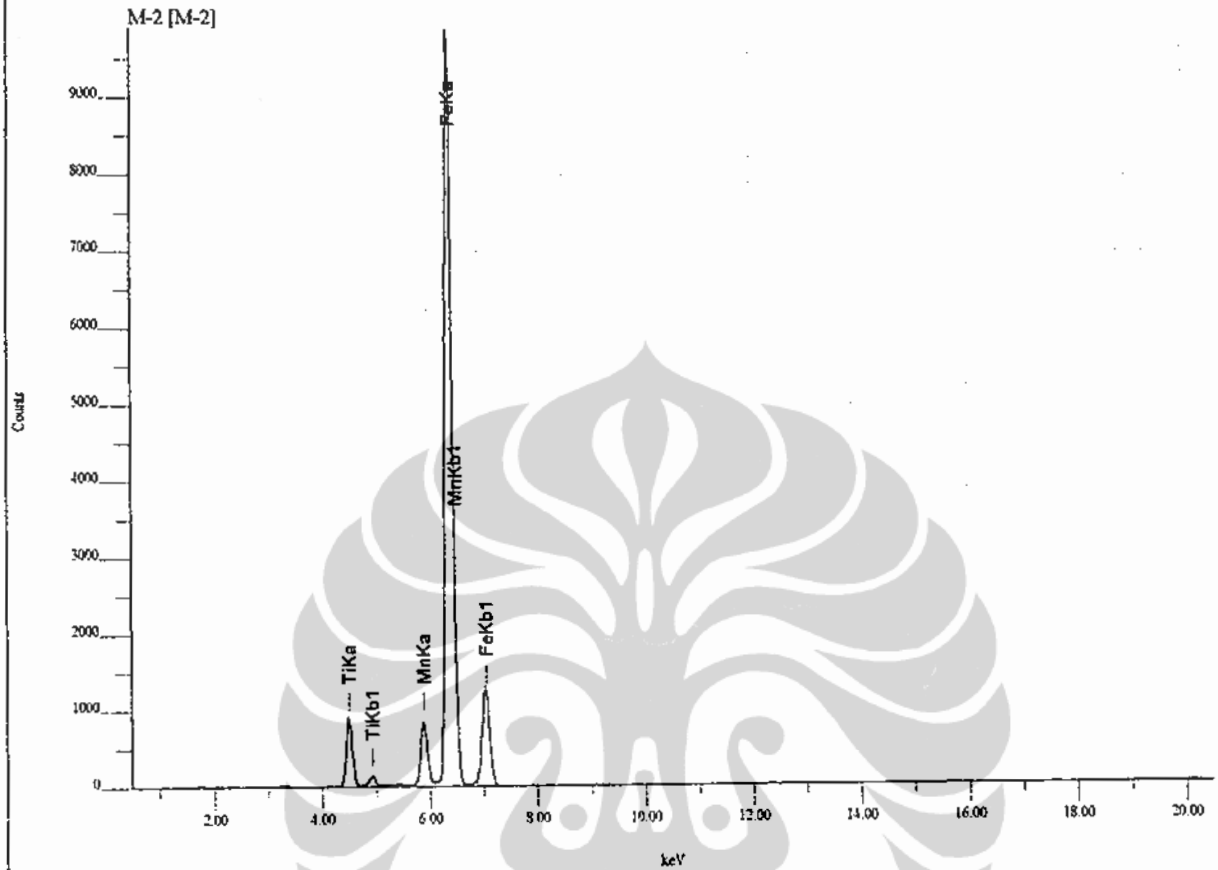
File Name : DAUSERPRIYONOA25.SPC Acq. Time: 2006/12/20 12:46: 2
 Sample Name: Priyono
 Memo : Materials sains fisisika
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.044mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: Ti,Mn,Fe,Ba

Num	Atom/Chem. Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 Ti	10.9377	13.9183	0.1174266	28808	0.0506
* 2	25 Mn	12.7236	14.1167	0.0806529	26031	0.0643
* 3	26 Fe	58.8081	64.1848	0.3427154	122440	0.0662
* 4	56 Ba	17.5306	7.7803	0.3752345	32320	0.1237



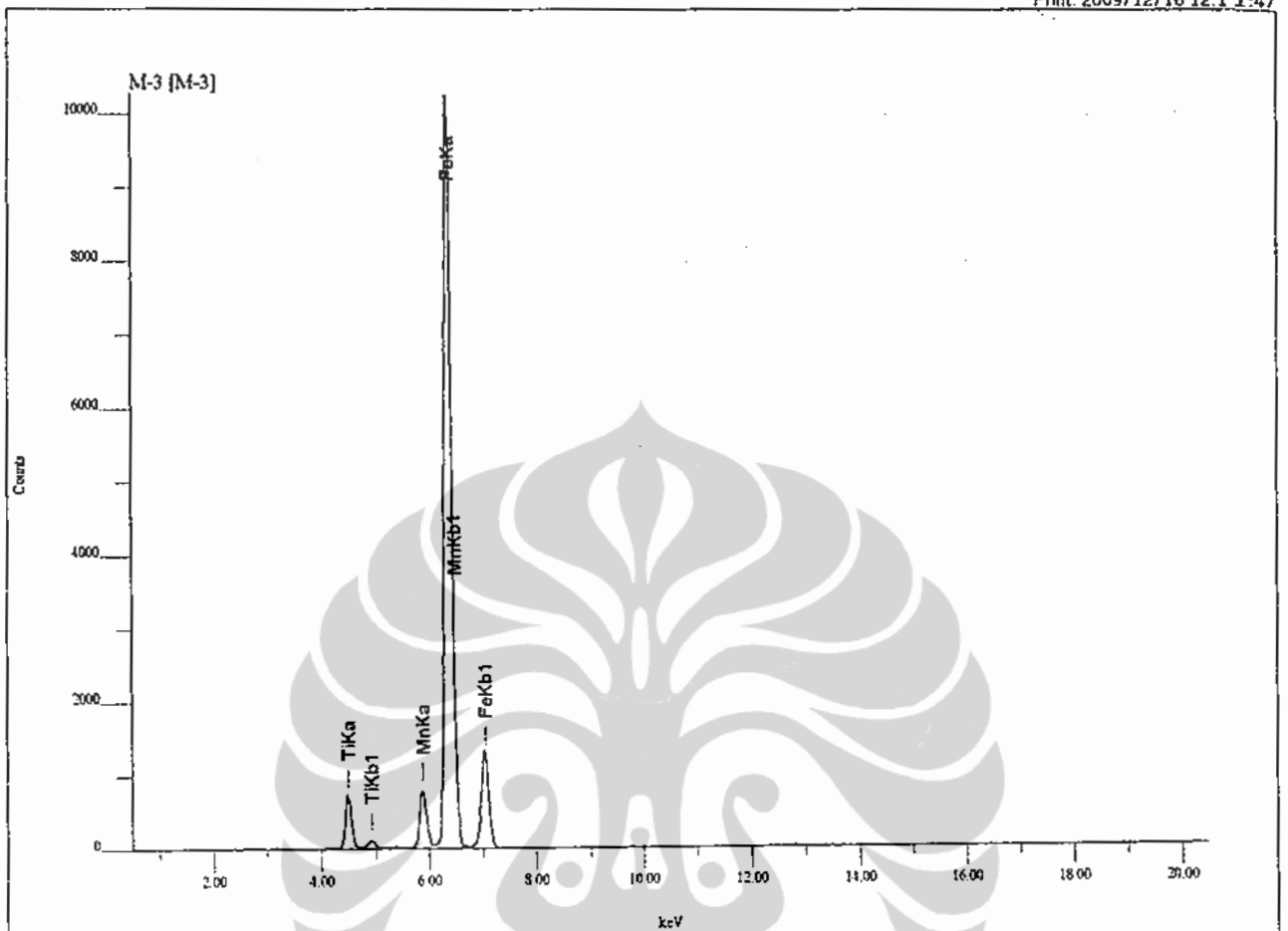
File Name : DAUSERPRIYONOA-7.SPC Acq. Time: 2009/7/24 14: 6:42
 Sample Name: A-7
 Memo : Dr
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.015mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: Ti,Mn,Fe

Num	Atom/Chem.Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 Ti	10.1987	11.6697	0.2962444	24918	0.0569
* 2	25 Mn	12.2155	12.1868	0.2266973	25086	0.0782
* 3	26 Fe	77.5858	76.1435	1.2643137	154867	0.0843



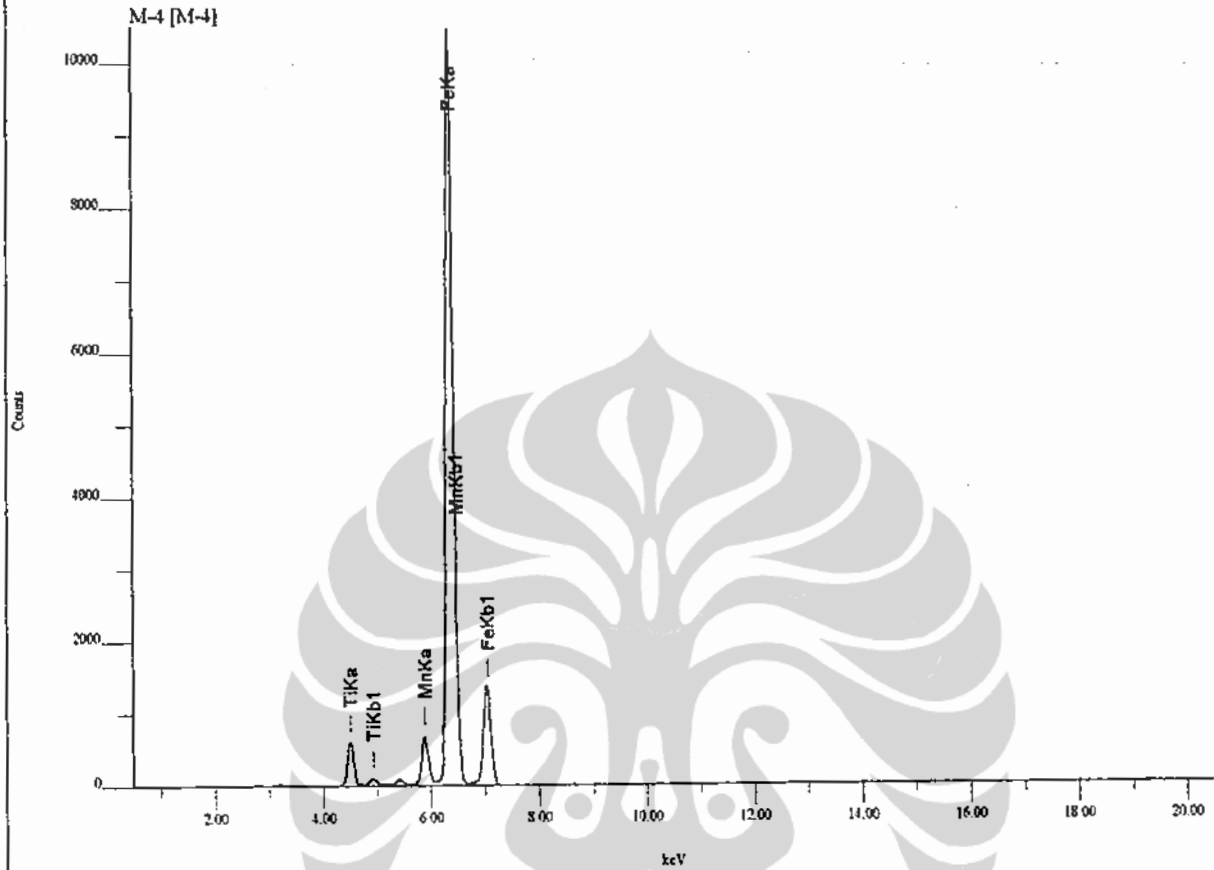
File Name : D:\USER\PRIYONOM-2.SPC Acq. Time: 2009/7/24 13:37:31
 Sample Name: M-2
 Memo : Dr
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.011mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: Ti,Mn,Fe

Num	Atom/Chem. Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 Ti	5.6113	6.4752	0.2162197	13640	0.0430
* 2	25 Mn	6.3323	6.3711	0.1663953	13810	0.0554
* 3	26 Fe	88.0564	87.1537	1.9112008	175579	0.0635



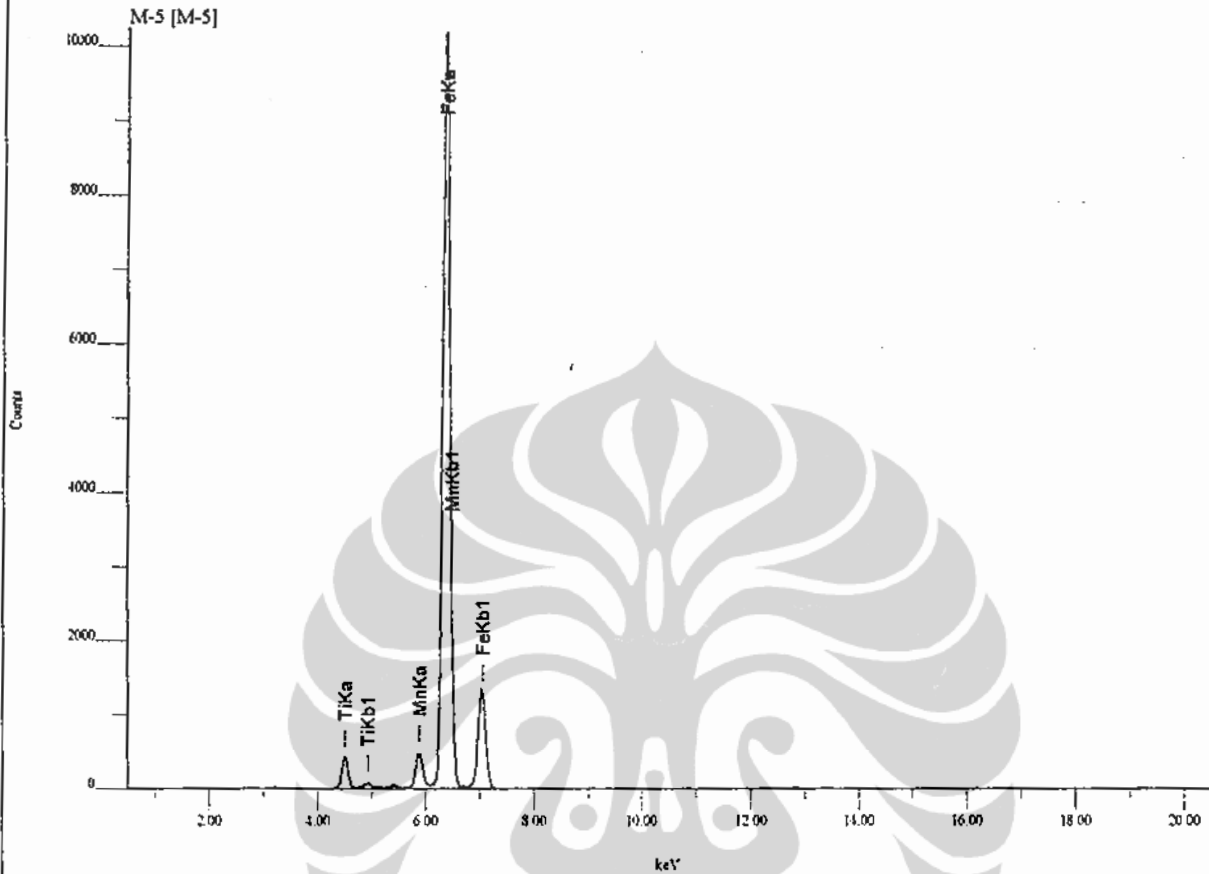
File Name : D:\USER\PRIYONO\M-3.SPC Acq. Time: 2009/7/24 13:40:1
 Sample Name: M-3
 Memo : Dr
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.011mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: H,Ti,Mn,Fe

Num	Atom/Chem. Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	1 H	ud				
* 2	22 Ti	4.4806	5.1806	0.1765762	11139	0.0415
* 3	25 Mn	5.7146	5.7609	0.1558529	12935	0.0527
* 4	26 Fe	89.8048	89.0585	1.9964017	183406	0.0612



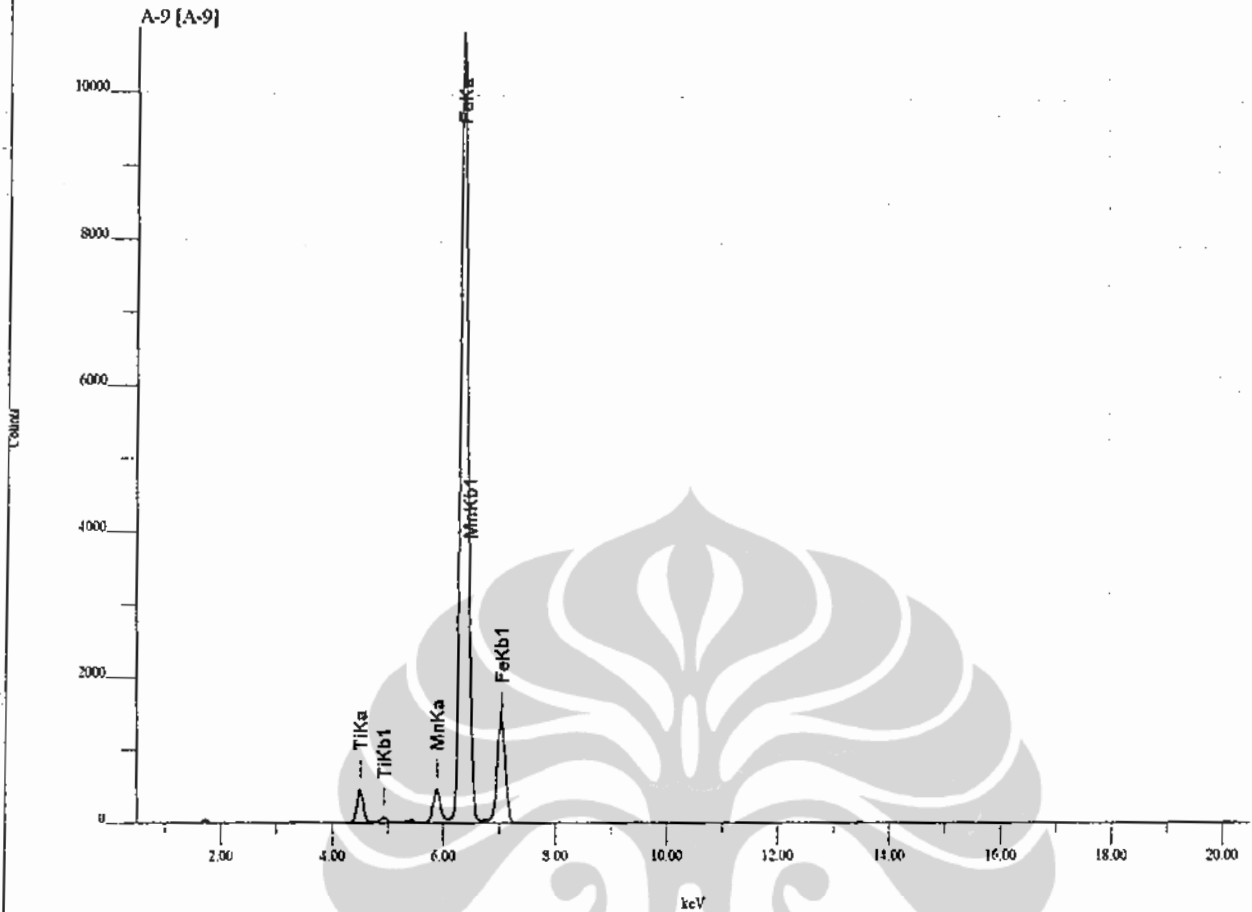
File Name : D:\USER\PRIYONO\M-4.SPC Acq. Time: 2009/7/24 13:42:49
 Sample Name: M-4
 Memo : Dr
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.011mA Live time: 110.00sec Pass: Vac
 Analysis Element: Ti, Mn, Fe

Num	Atom/Chem. Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 Ti	3.8552	4.4628	0.1520416	9591	0.0465
* 2	25 Mn	4.6820	4.7256	0.1294477	10743	0.0583
* 3	26 Fe	91.4628	90.8116	2.0351412	186965	0.0685



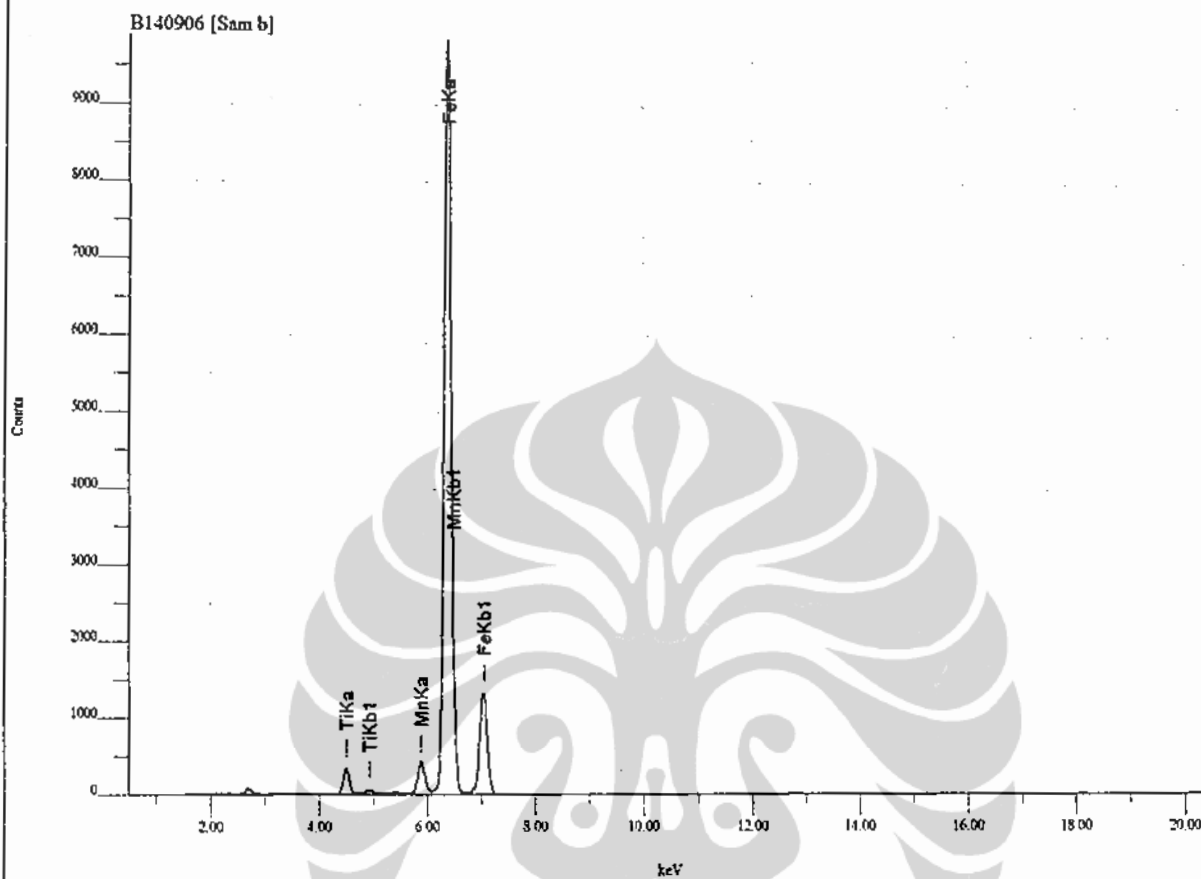
File Name : D:\USER\PRIYONOM-5.SPC Acq. Time: 2009/ 7/24 13:45:18
 Sample Name: M-5
 Memo : Dr
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.011mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: Ti,Mn,Fe

Num	Atom/Chem.Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 Ti	2.7296	3.1664	0.1028155	6486	0.0470
* 2	25 Mn	3.3333	3.3713	0.0899583	7466	0.0576
* 3	26 Fe	93.9371	93.4623	1.9977102	183526	0.0691



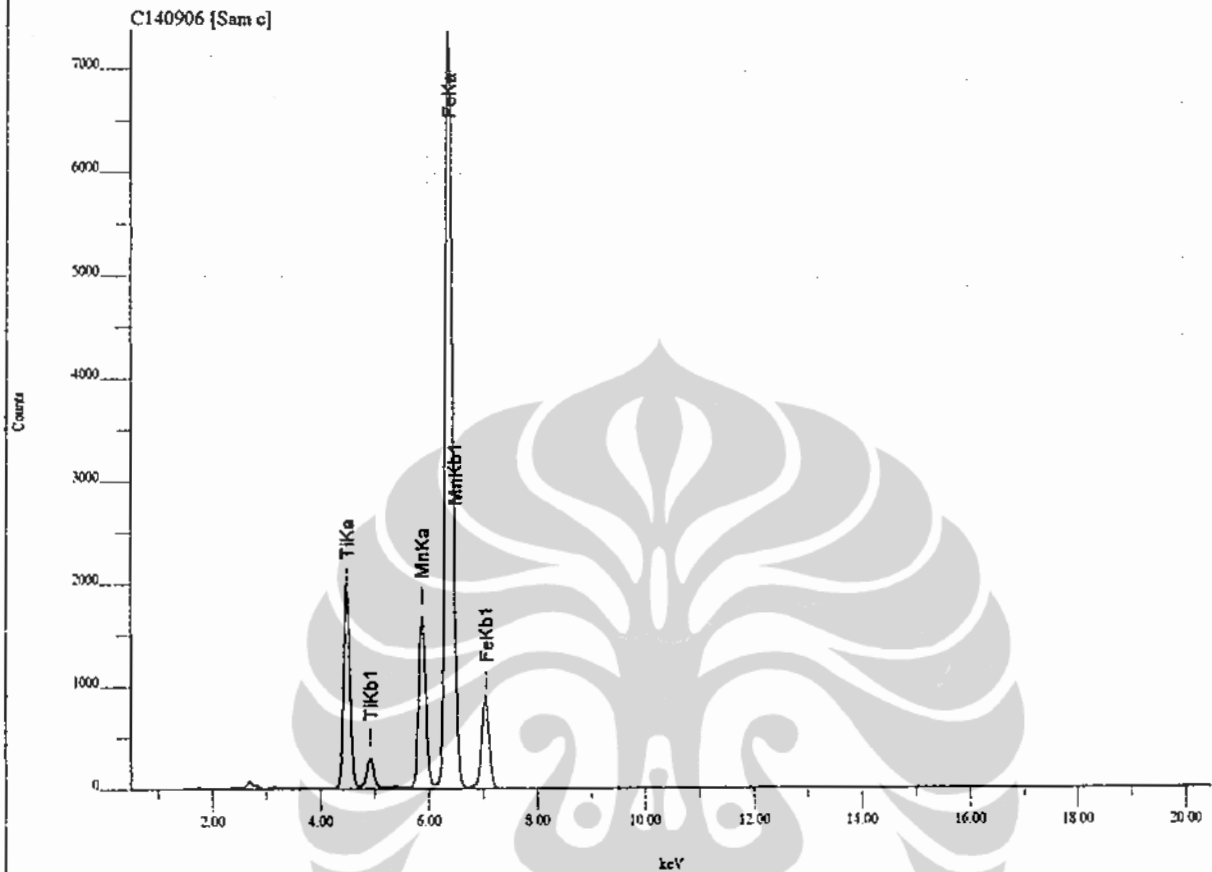
File Name : DAUSERPRIYONOA-9.SPC Acq. Time: 2009/ 7/24 14:12: 4
 Sample Name: A-9
 Memo : Dr
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.011mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: Ti,Mn,Fe

Num	Atom/Chem.Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 Ti	2.7651	3.2076	0.1110124	7003	0.0562
* 2	25 Mn	2.8828	2.9157	0.0831608	6902	0.0687
* 3	26 Fe	94.3521	93.8767	2.1376476	196382	0.0828



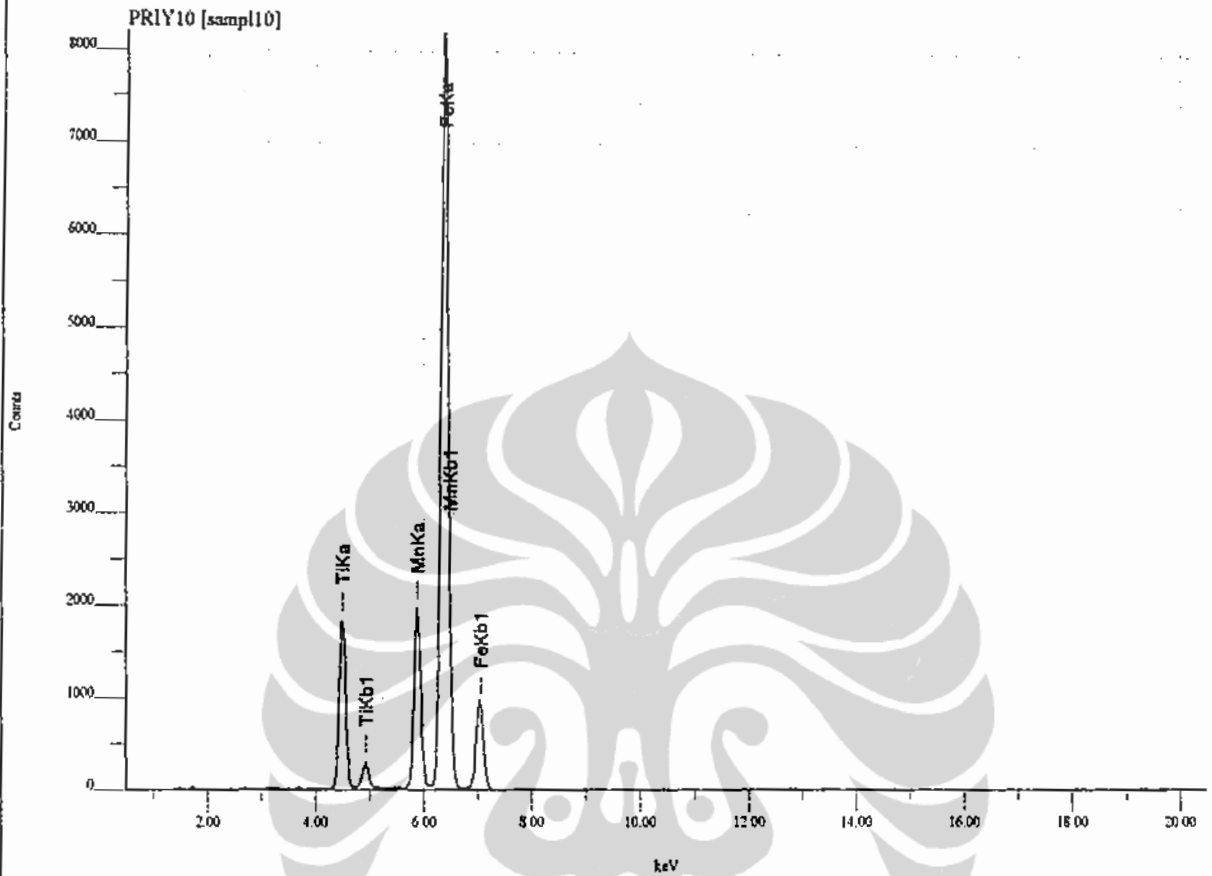
File Name : D:\USER\PRIYONO\B140906.SPC Acq. Time: 2006/9/14 13:12:23
 Sample Name: Sam b
 Memo : Priyono
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.031mA Live time: 100.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: Ti,Mn,Fe

Num	Atom/Chem. Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 Ti	2.2436	2.6050	0.0322131	5132	0.1124
* 2	25 Mn	2.6171	2.6494	0.0272240	5706	0.1363
* 3	26 Fe	95.1393	94.7456	0.7713266	178941	0.1655



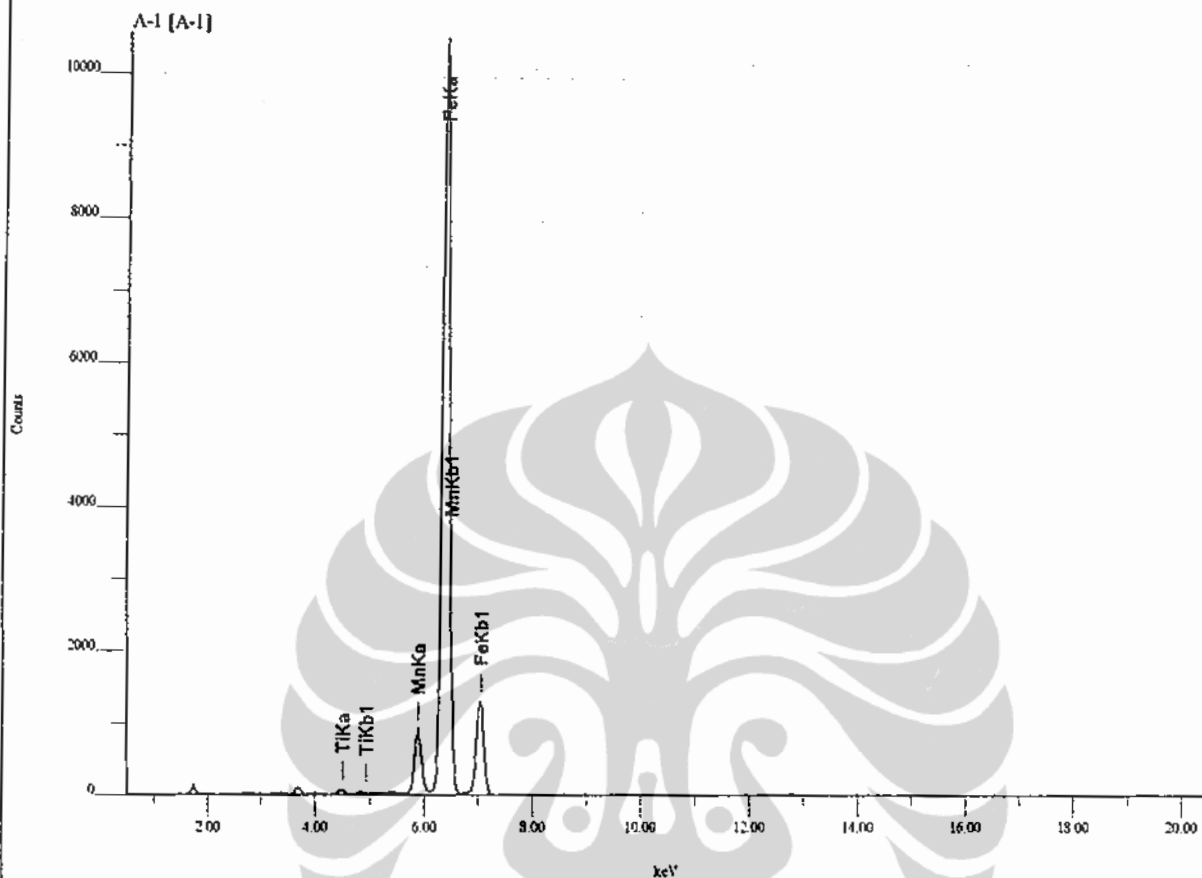
File Name : D:\USER\PRIYONO\C140906.SPC Acq. Time: 2006/9/14 13:14:48
 Sample Name: Sam c
 Memo : Priyono
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.036mA Live time: 100.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: Ti,Mn,Fe

Num	Atom/Chem. Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 Ti	13.5005	15.3580	0.1663975	30749	0.0780
* 2	25 Mn	15.0976	14.9746	0.1150739	27976	0.1108
* 3	26 Fe	71.4020	69.6675	0.4915056	132269	0.1160



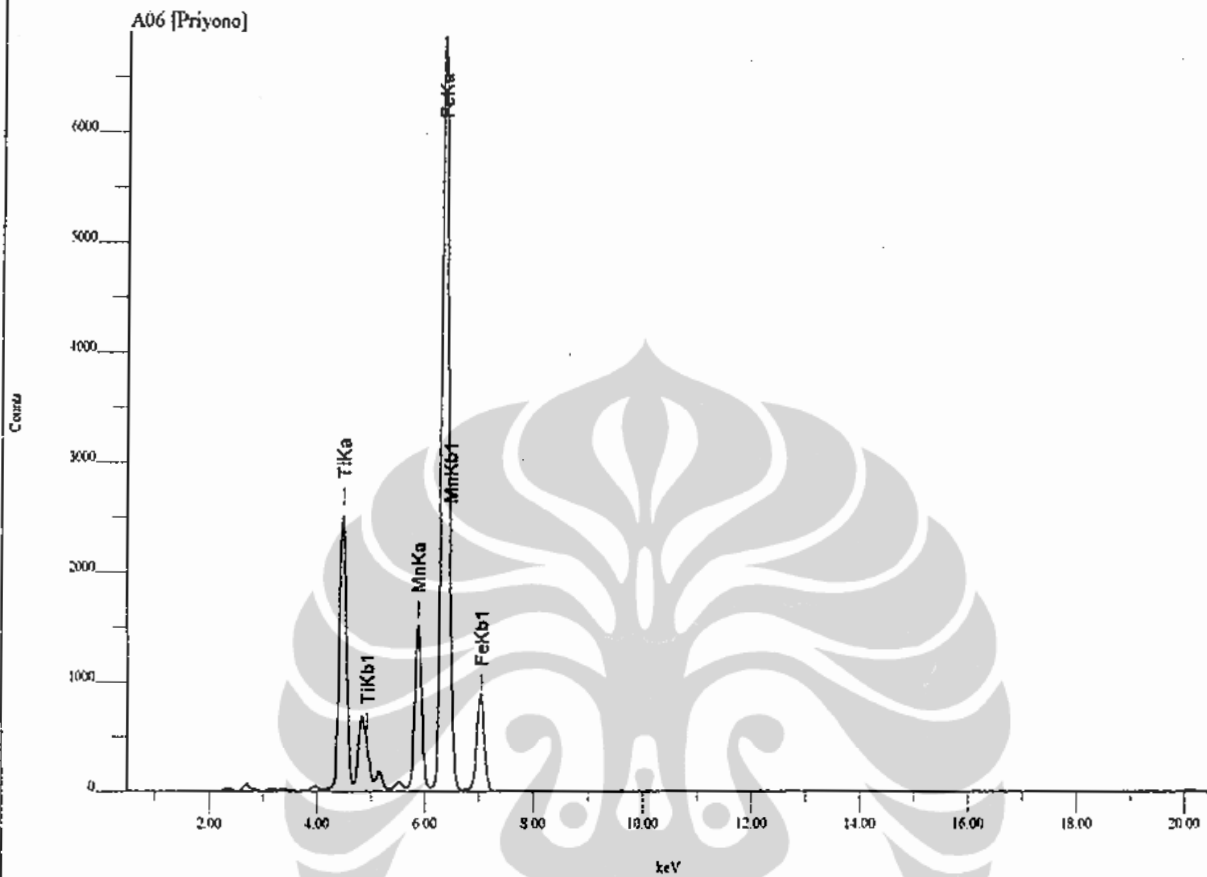
File Name : D:\USER\PRIYONO\PRIY10.SPC Acq. Time: 2007/3/12 17: 3:36
 Sample Name: sampl10
 Memo : Priyono
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.034mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: Ti,Mn,Fe

Num	Atom/Chem.Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 Ti	11.8482	13.5124	0.1542544	29193	0.1028
* 2	25 Mn	16.0719	15.9812	0.1303670	32459	0.1449
* 3	26 Fe	72.0799	70.5064	0.5260627	144985	0.1524



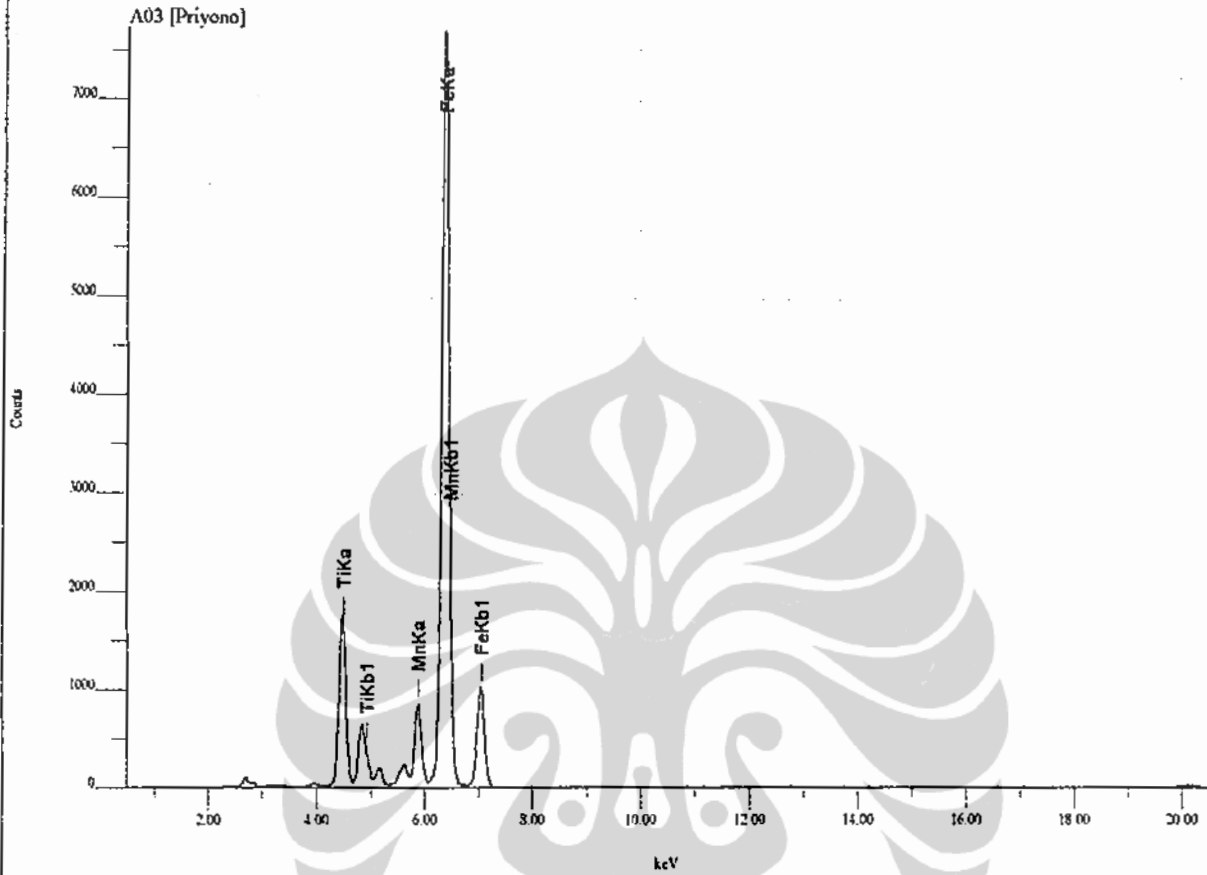
File Name : DAUSERPRIYONOA-1.SPC Acq. Time: 2009/7/24 13:50:38
 Sample Name: A-1
 Memo : Dr
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.011mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: Ti,Mn,Fe

Num	Atom/Chem. Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 Ti	0.3417	0.3978	0.0130298	822	0.0552
* 2	25 Mn	6.4106	6.5061	0.1761726	14621	0.0673
* 3	26 Fe	93.2477	93.0961	2.0211444	185679	0.0807



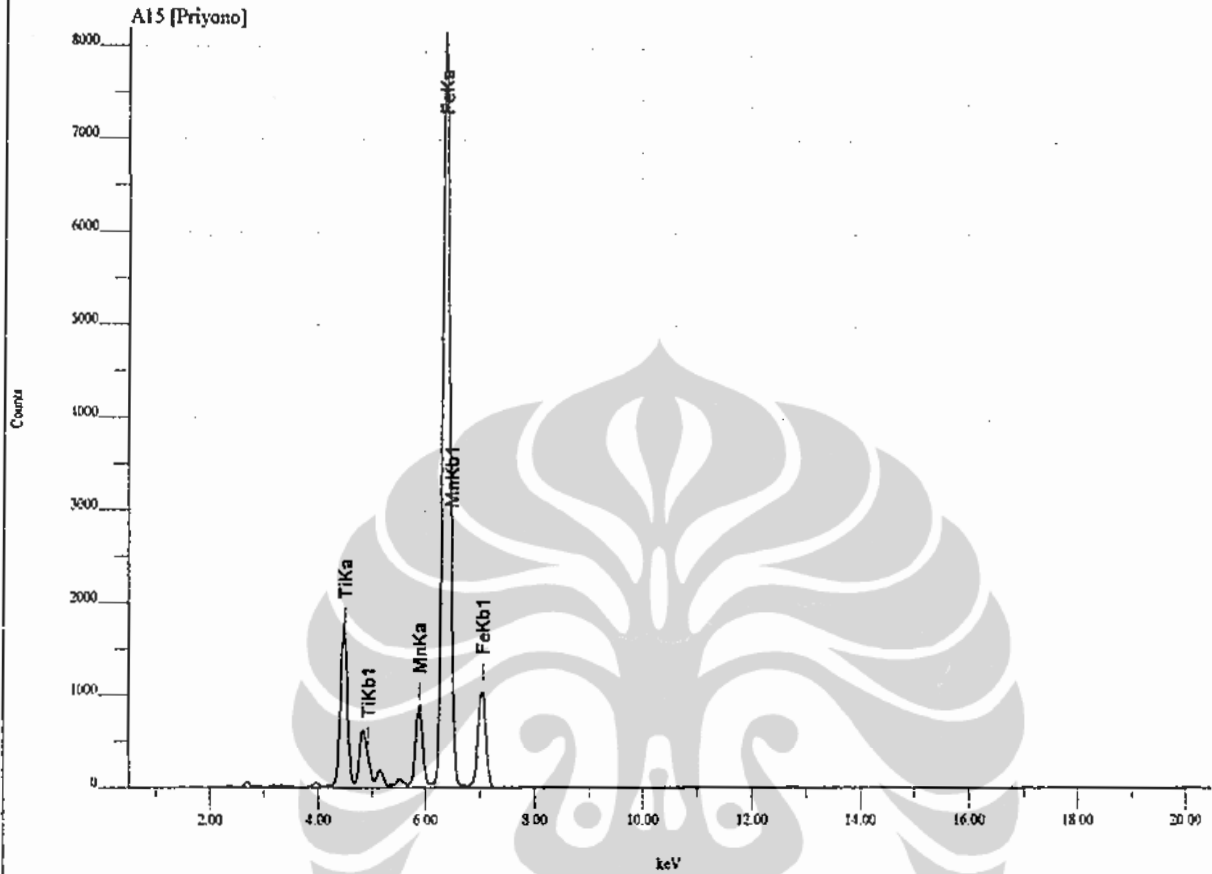
File Name : D:\USER\PRIYONO\A06.SPC Acq. Time: 2006/12/20 12:43:11
 Sample Name: Priyono
 Memo : Materials sains Fisika
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.045mA Live time: 110.00sec Pass: Vac
 Analysis Element: Ti,Mn,Fe

Num	Atom/Chem. Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 Ti	16.5441	18.7304	0.1449367	36573	0.1869
* 2	25 Mn	14.3275	14.1428	0.0763353	25342	0.2700
* 3	26 Fe	69.1285	67.1268	0.3360711	123497	0.2800



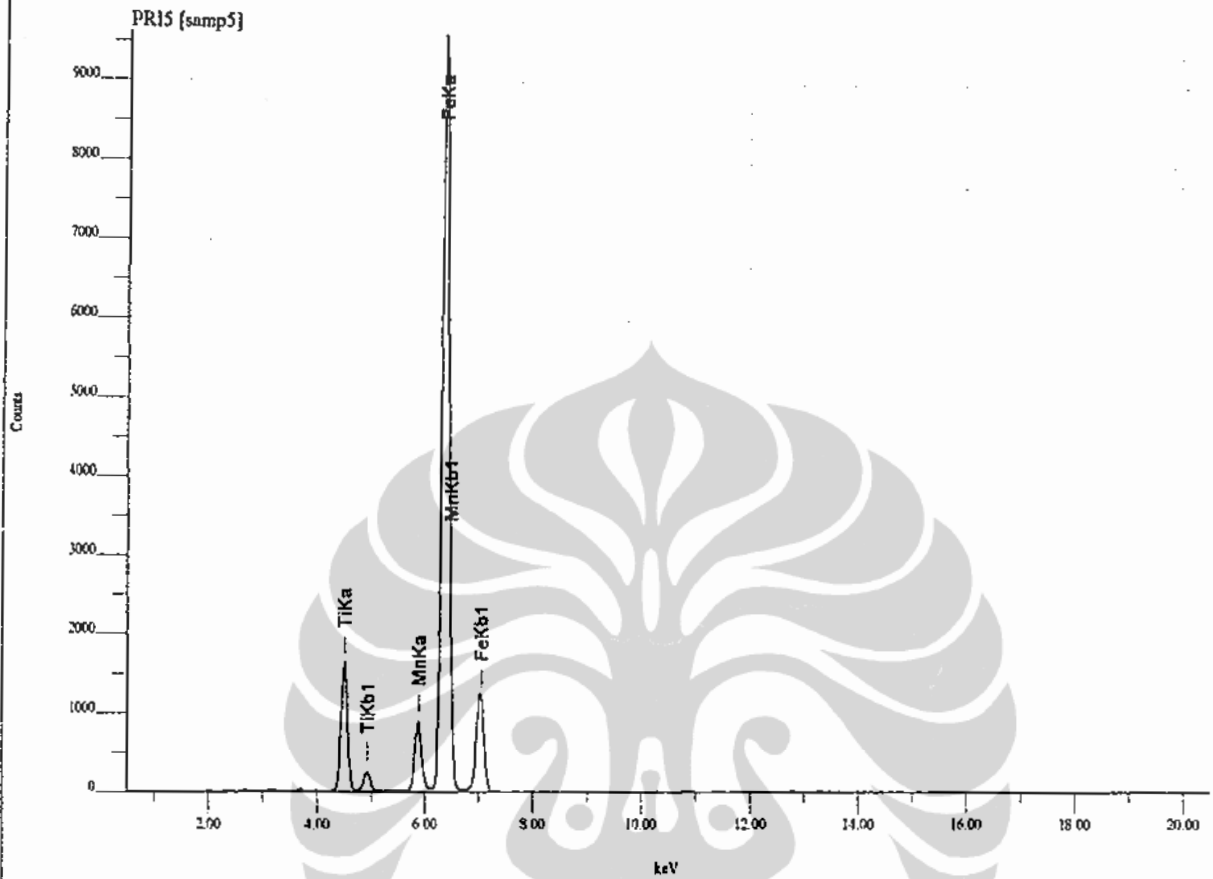
File Name : D:\USER\PRIYONO\A03.SPC Acq. Time: 2006/12/20 12:40:34
 Sample Name: Priyono
 Memo : Materials sains Fisika
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.049mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: Ti,Mn,Fe

Num	Atom/Chem.	Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22	Ti	11.2078	12.8122	0.0855646	23390	0.1881
* 2	25	Mn	7.9236	7.8975	0.0390195	14033	0.2562
* 3	26	Fe	80.8687	79.2903	0.3446518	137204	0.2801



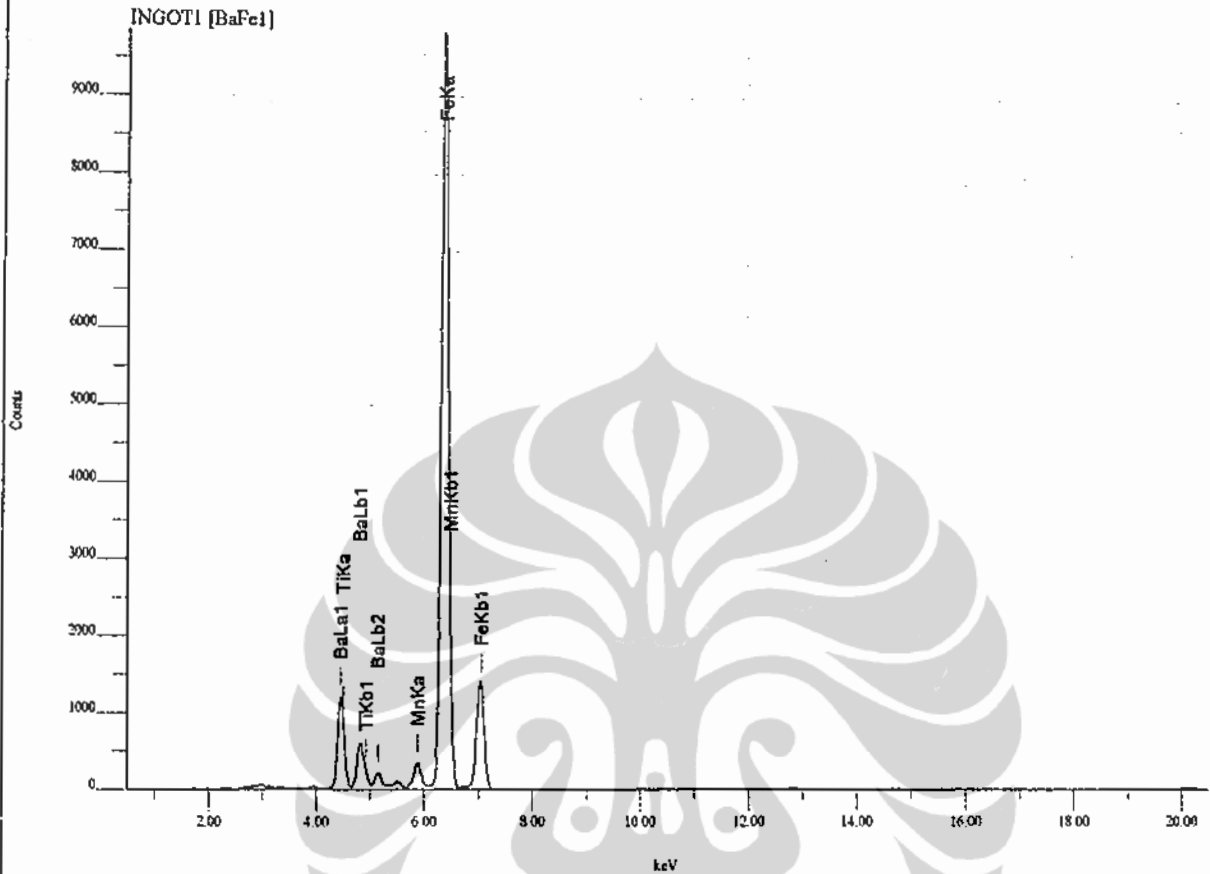
File Name : D:\USER\PRIYONO\A15.SPC Acq. Time: 2006/12/20 12:37:50
 Sample Name: Priyono
 Memo : Materials sains Fisika
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.043mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: Ti,Mn,Fe

Num	Atom/Chem. Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 Ti	10.8191	12.3762	0.1001097	23858	0.1710
* 2	25 Mn	7.6959	7.6757	0.0461173	14459	0.2320
* 3	26 Fe	81.4850	79.9481	0.4211412	146160	0.2545



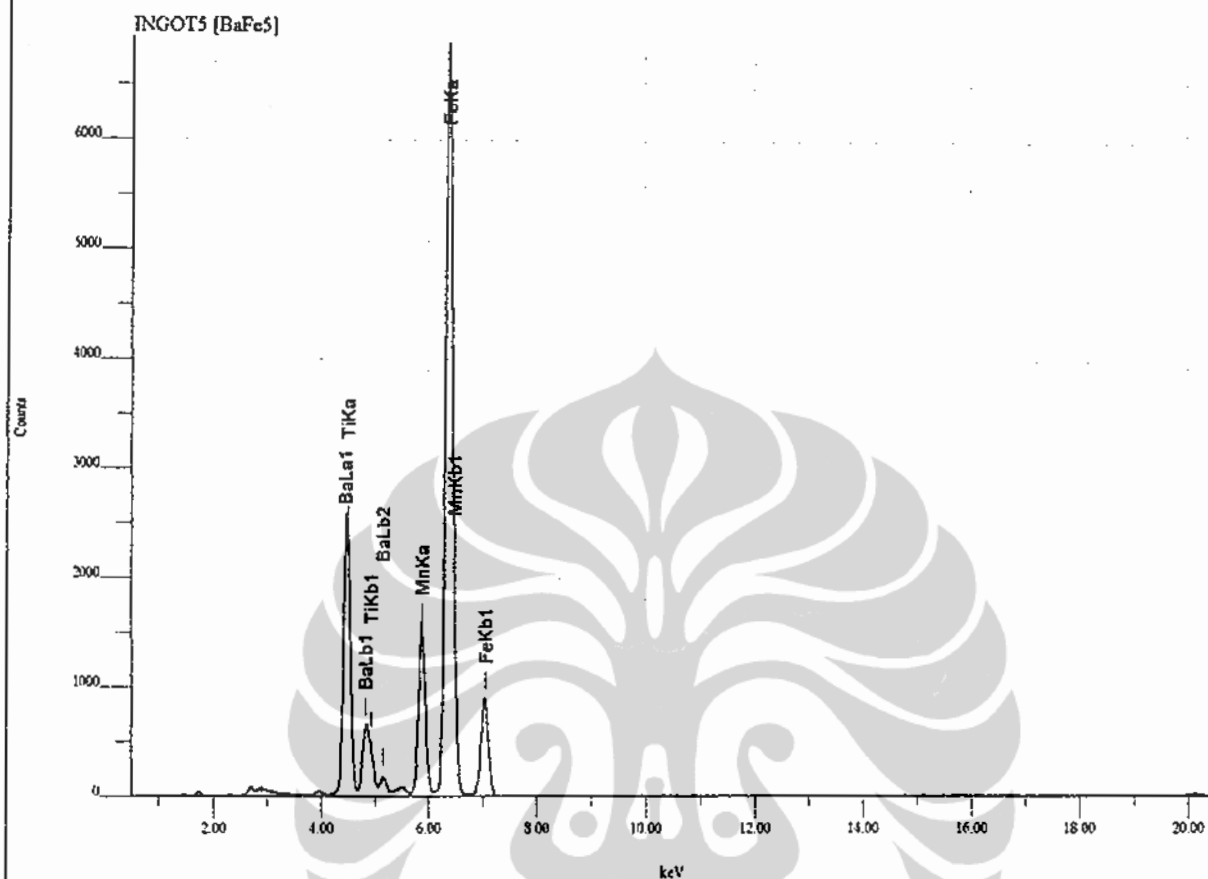
File Name : DAUSERPRIYONOPRI5.SPC Acq. Time: 2007/ 3/12 16:49:47
 Sample Name: samp5
 Memo : Priyono
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.035mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: Ti,Mn,Fe

Num	Atom/Chem.Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 Ti	10.0292	11.4903	0.1285726	25234	0.1096
* 2	25 Mn	6.1383	6.1316	0.0516401	13334	0.1468
* 3	26 Fe	83.8324	82.3780	0.6004176	171607	0.1631



File Name : D:\USER\PRIYONO\INGOT1.SPC Acq. Time: 2007/3/14 12:41:19
 Sample Name: BaFe1
 Memo : Priyono
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.045mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: Ti,Mn,Fe,Ba

Num	Atom/Chem. Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 Ti	1.4786	1.9036	0.0162106	4091	0.0745
* 2	25 Mn	1.9508	2.1897	0.0136390	4528	0.0877
* 3	26 Fe	80.1969	88.5547	0.4823765	177260	0.0965
* 4	56 Ba	16.3737	7.3520	0.3556542	31509	0.1835



File Name : DAUSERPRIYONOINGOT5.SPC Acq. Time: 2007/ 3/14 12:51:53

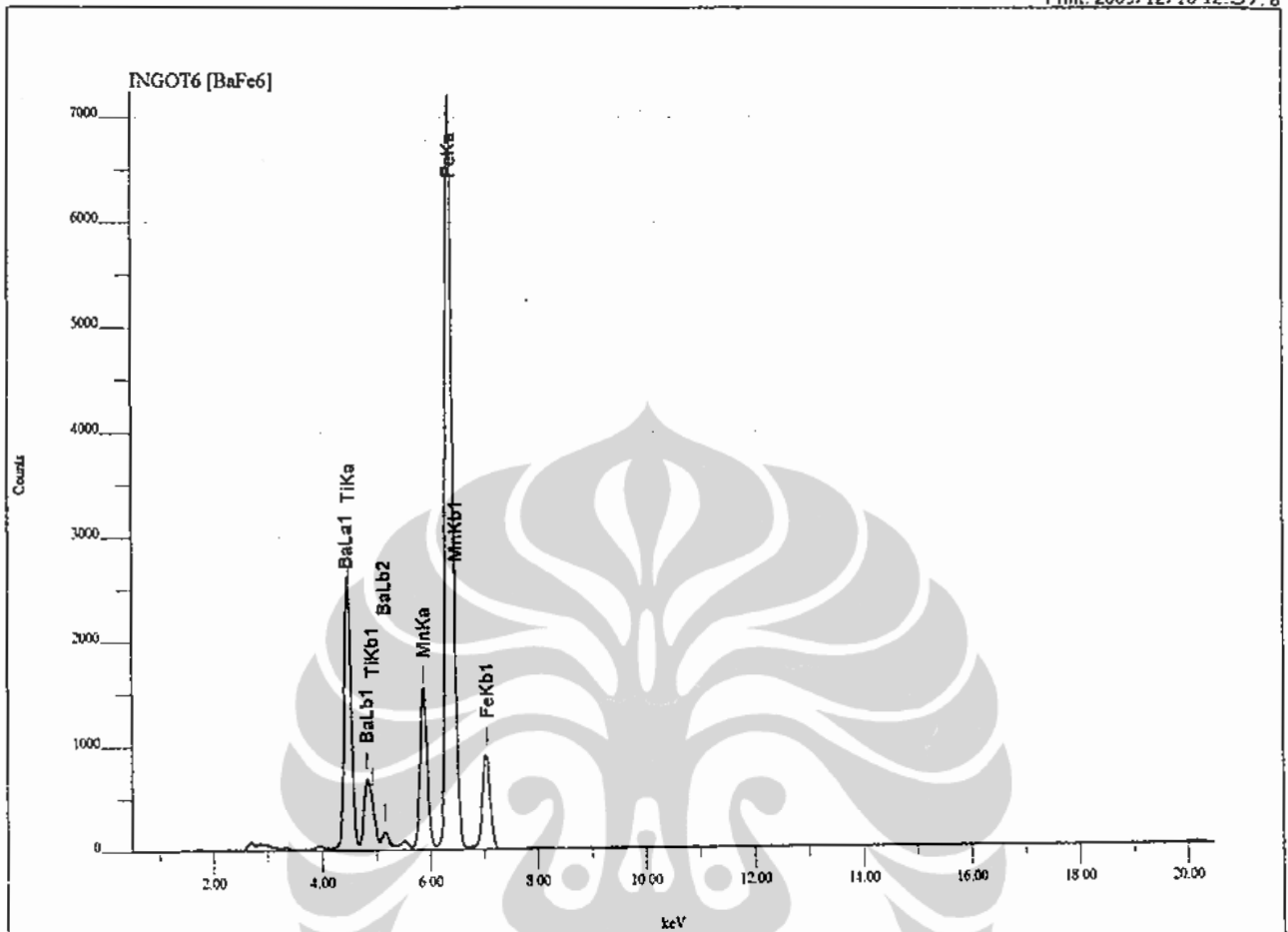
Sample Name: BaFe5

Memo : Priyono

Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.045mA Live time: 110.00sec Pass: Vac

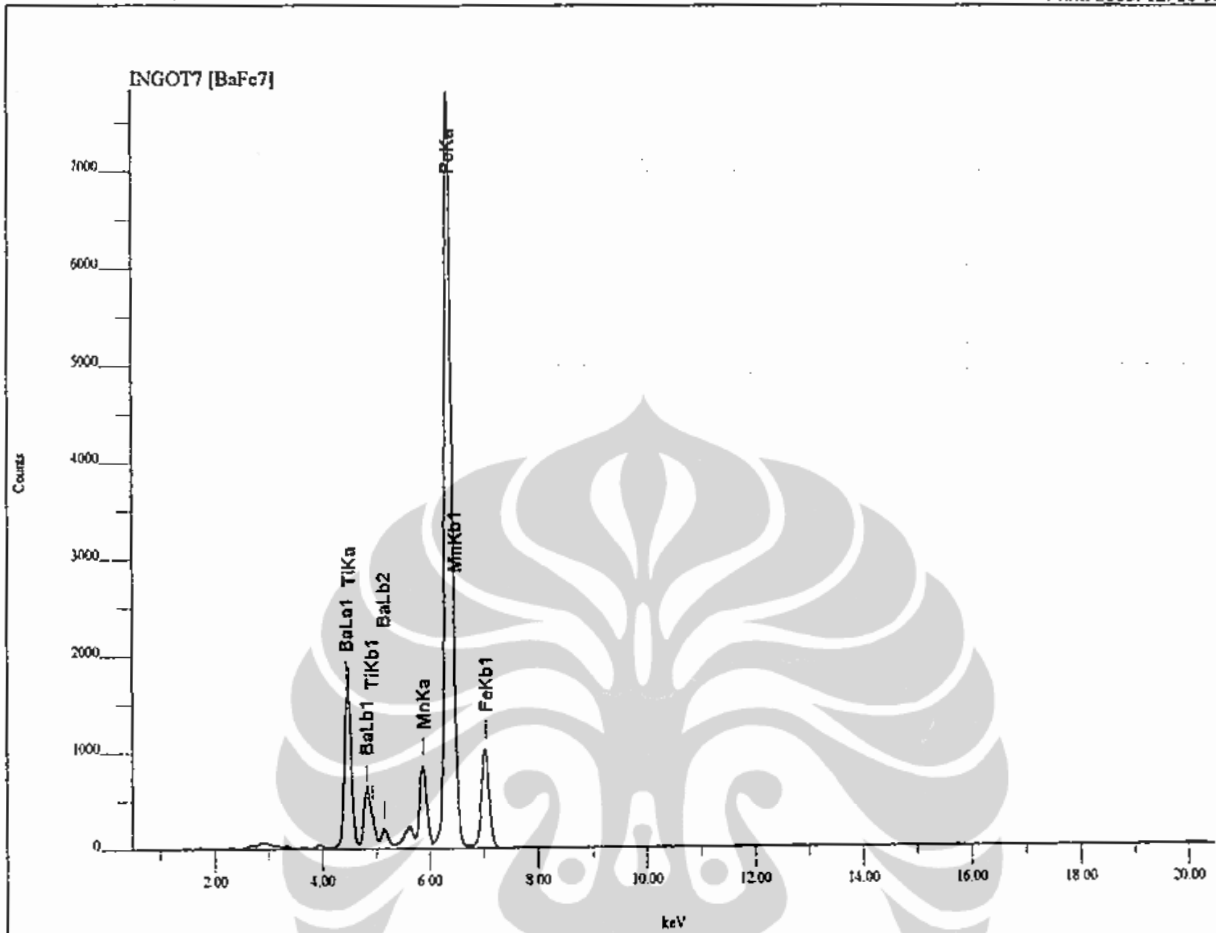
Analysis Element: Ti,Mn,Fe,Ba

Num	Atom/Chem. Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 Ti	10.5149	13.4121	0.1083084	27330	0.0650
* 2	25 Mn	12.5857	13.9969	0.0766461	25445	0.0825
* 3	26 Fe	59.1243	64.6835	0.3306371	121500	0.0850
* 4	56 Ba	17.7751	7.9076	0.3648156	32320	0.1591



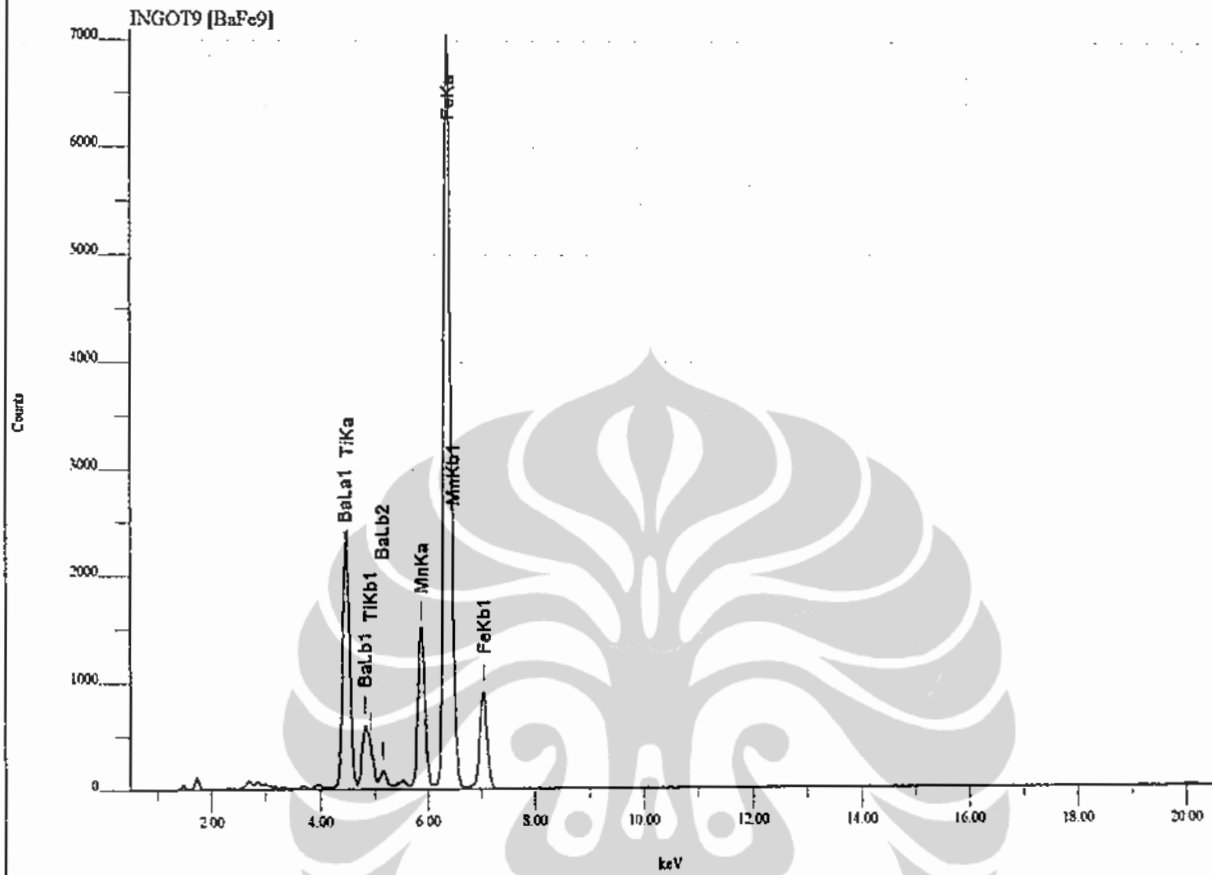
File Name : D:\USER\PRIYONO\INGOT6.SPC Acq. Time: 2007/3/14 12:54:23
 Sample Name: BaFe6
 Memo : Priyono
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.045mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: Ti,Mn,Fe,Ba

Num	Atom/Chem. Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 Ti	10.2275	13.0486	0.1096388	27666	0.0642
* 2	25 Mn	12.1815	13.5505	0.0773771	25688	0.0813
* 3	26 Fe	59.8718	65.5164	0.3485897	128097	0.0840
* 4	56 Ba	17.7191	7.8845	0.3784184	33526	0.1572



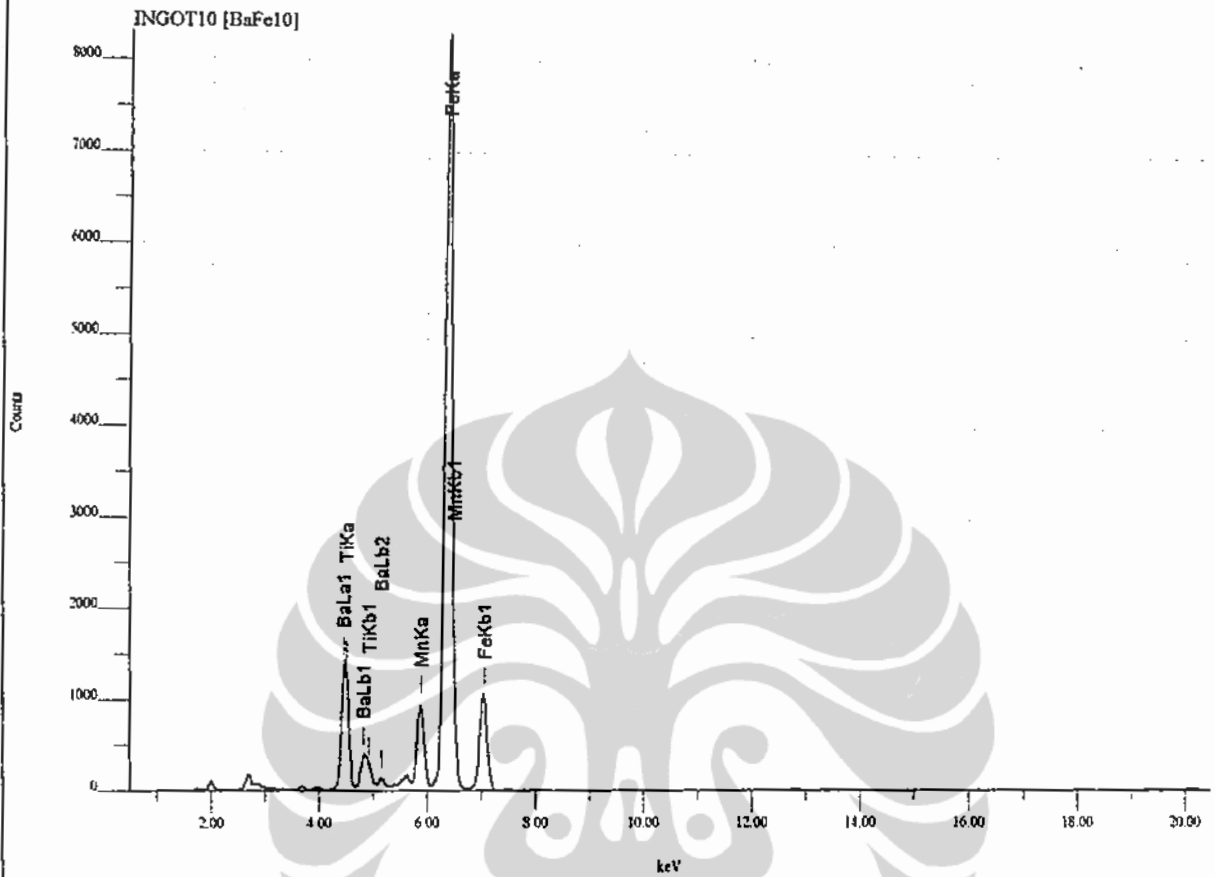
File Name : D:\USER\PRIYONO\INGOT7.SPC Acq. Time: 2007/3/14 12:57: 2
 Sample Name: BaFe7
 Memo : Priyono
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.046mA Live time: 110.00sec Pass: Vac
 Analysis Element: Ti, Mn, Fe, Ba

Num	Atom/Chem. Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 Ti	5.5848	7.1931	0.0538282	13960	0.0751
* 2	25 Mn	6.9125	7.7626	0.0407844	13916	0.0920
* 3	26 Fe	69.7755	77.0811	0.3669600	138594	0.0977
* 4	56 Ba	17.7273	7.9632	0.3391828	30884	0.1844



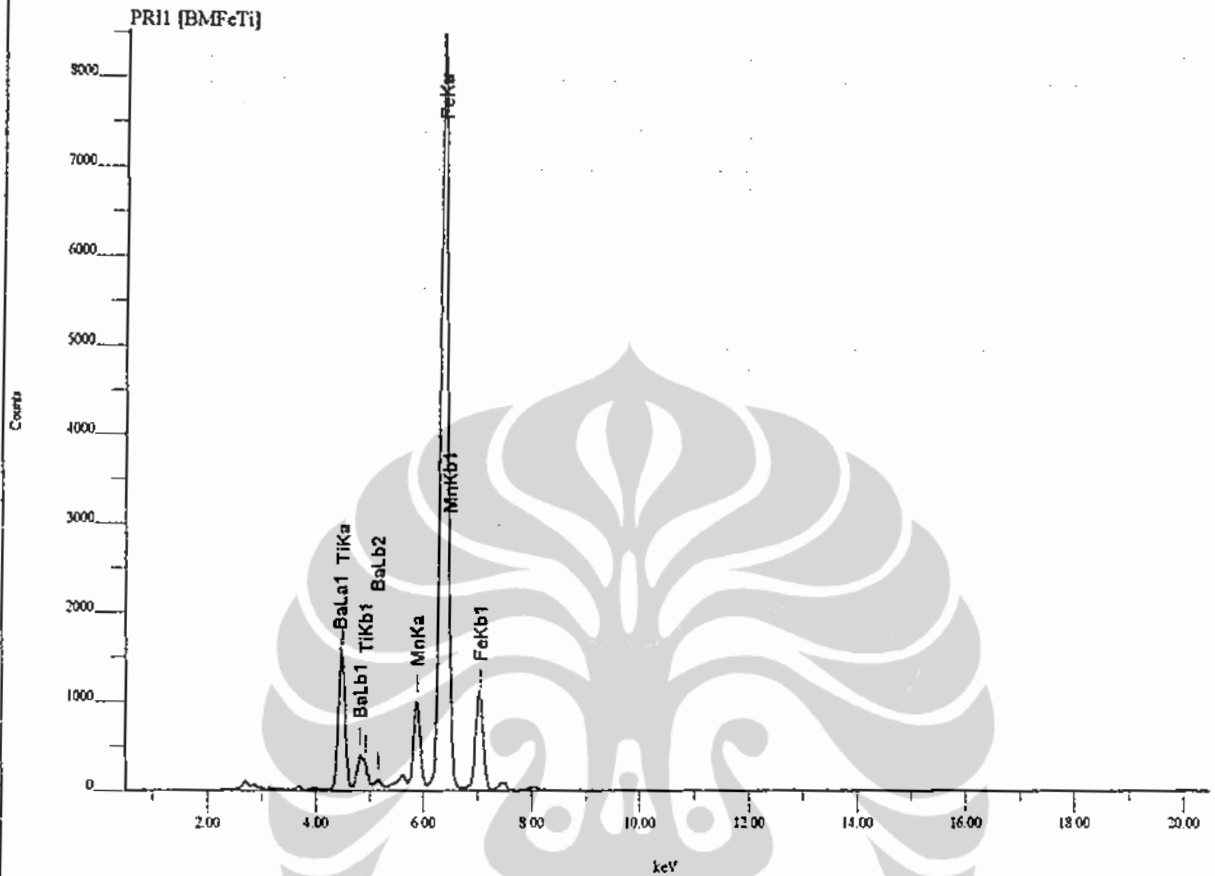
File Name : DAUSER\PRIYONO\INGOT9.SPC Acq. Time: 2007/ 3/14 13: 2:21
 Sample Name: BaFe9
 Memo : Priyono
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.044mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: Ti,Mn,Fe,Ba

Num	Atom/Chem. Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 Ti	9.0517	11.5307	0.0954443	23415	0.0729
* 2	25 Mn	12.5613	13.9514	0.0789926	25495	0.0918
* 3	26 Fe	61.2236	66.8925	0.3516217	125622	0.0951
* 4	56 Ba	17.1634	7.6254	0.3601080	31017	0.1787



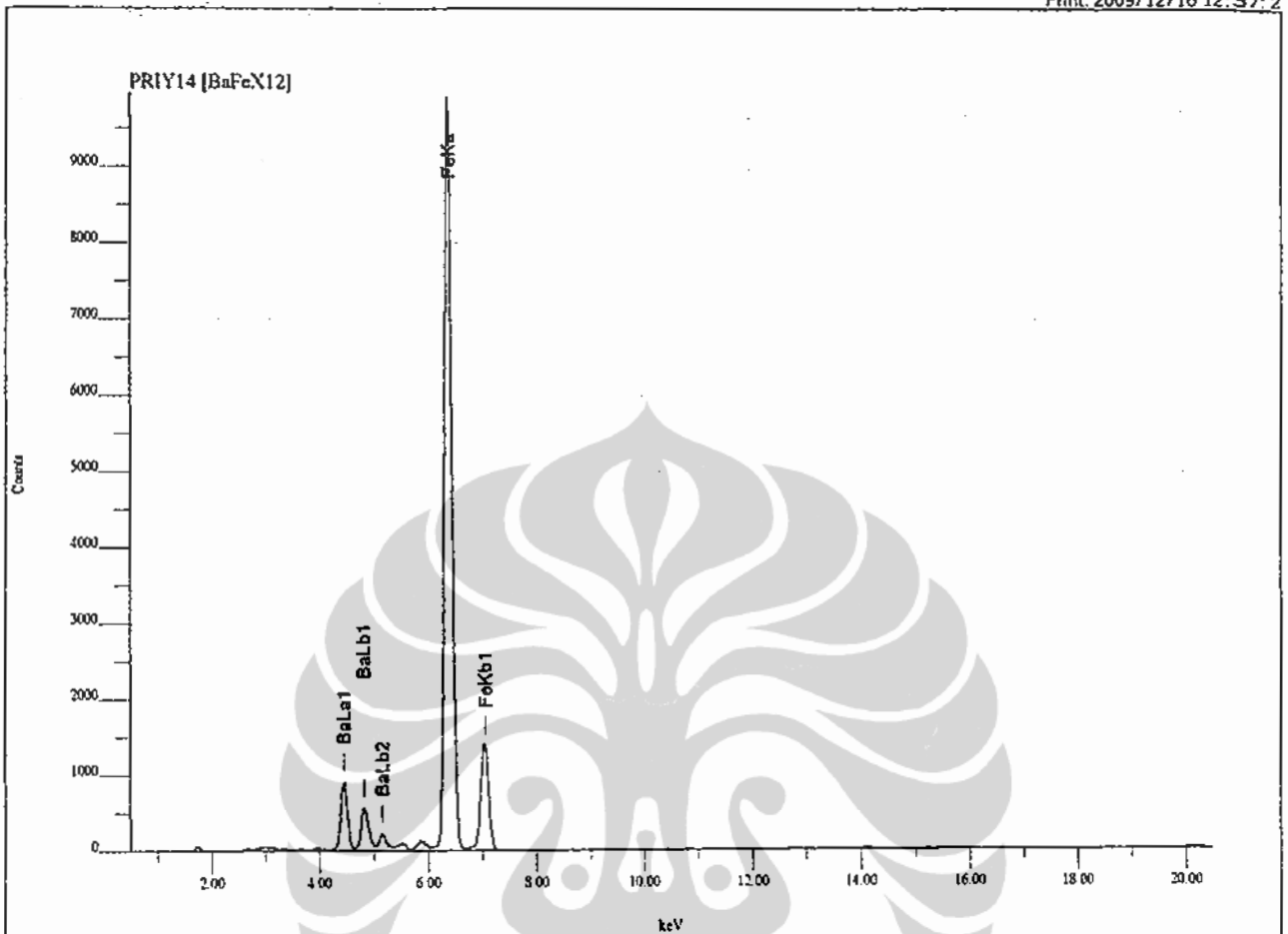
File Name : D:\USER\PRIYONO\INGOT10.SPC Acq. Time: 2007/3/14 13:53:1
 Sample Name: BaFe10
 Memo : Priyono
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.045mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: Ti,Mn,Fe,Ba

Num	Atom/Chem.Formula	wt(%)	at/molc(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 Ti	6.1974	7.6300	0.0595958	15038	0.0997
* 2	25 Mn	7.3993	7.9427	0.0447350	14851	0.1191
* 3	26 Fe	75.5312	79.7588	0.4009342	147333	0.1283
* 4	56 Ba	10.8721	4.6684	0.2087614	18495	0.2436



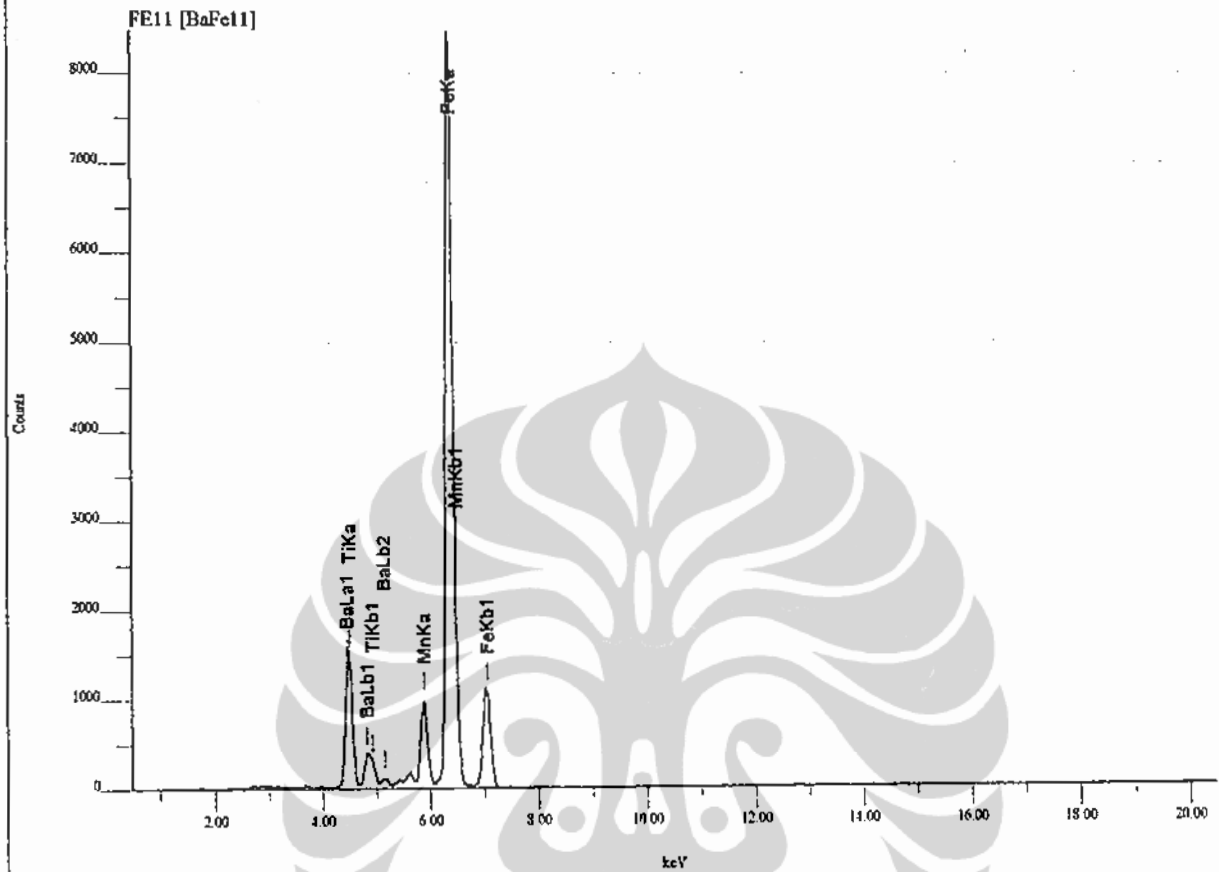
File Name : DAUSER\PRIYONO\PR11.SPC Acq. Time: 2007/ 5/15 17:31:14
 Sample Name: BMFeTi
 Memo : Priyono1
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.040mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: Ti,Mn,Fe,Ba

Num	Atom/Chem.Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 Ti	6.4110	7.9025	0.0720797	16167	0.0976
* 2	25 Mn	7.7461	8.3251	0.0545621	16101	0.1169
* 3	26 Fe	74.7084	78.9855	0.4633713	151357	0.1256
* 4	56 Ba	11.1345	4.7869	0.2499365	19683	0.2384



File Name : D:\USER\PRIYONO\PRIY14.SPC Acq. Time: 2007/11/1 13:53:6
 Sample Name: BaFeX12
 Memo : MHS-S3
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.047mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: Fe,Ba

Num	Atom/Chem. Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	26 Fe	84.4607	93.0394	0.4575389	177474	0.1323
* 2	56 Ba	15.5393	6.9606	0.3032338	28357	0.2155



File Name : DAUSERPRIYONOFE11.SPC Acq. Time: 2007/11/23 17:10:26

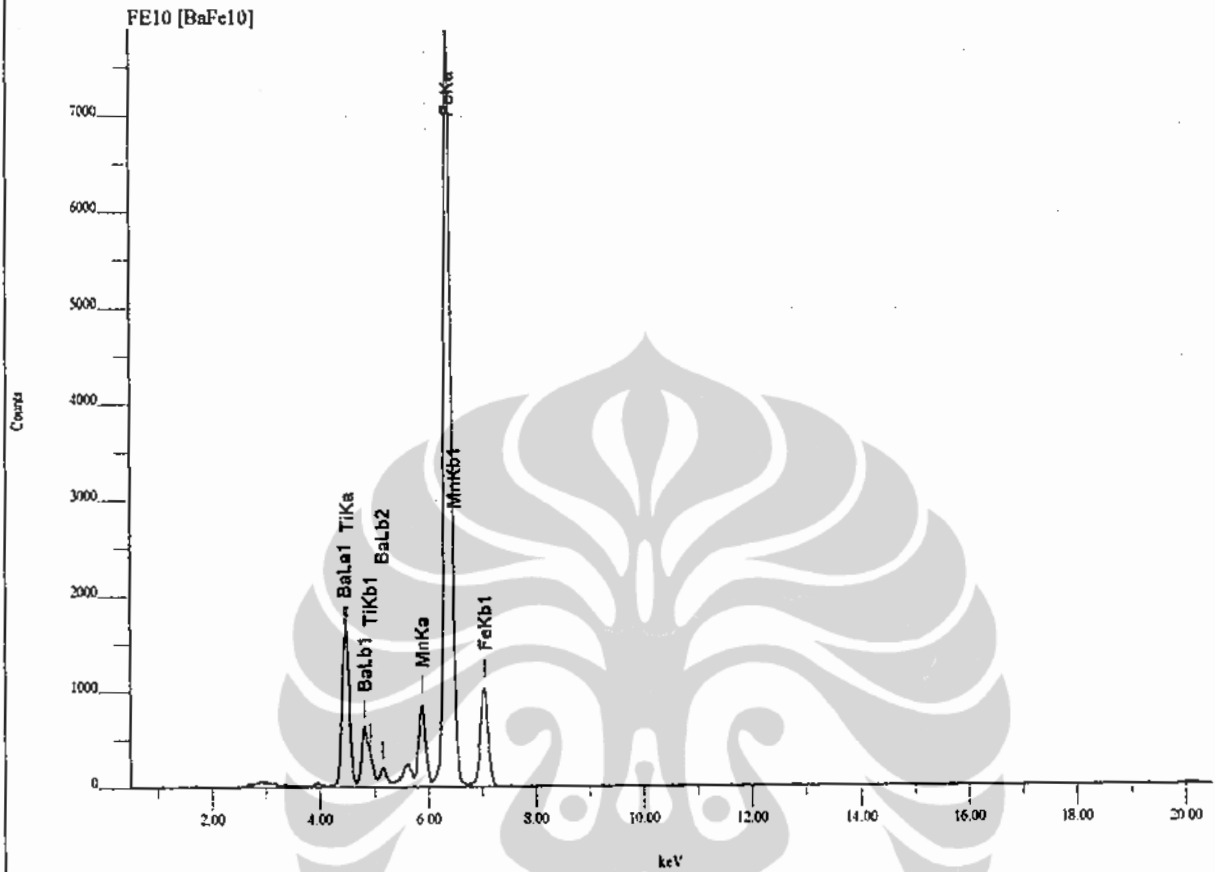
Sample Name: BaFe11

Memo : S-3

Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.052mA Live time: 110.00sec Pass:Vac

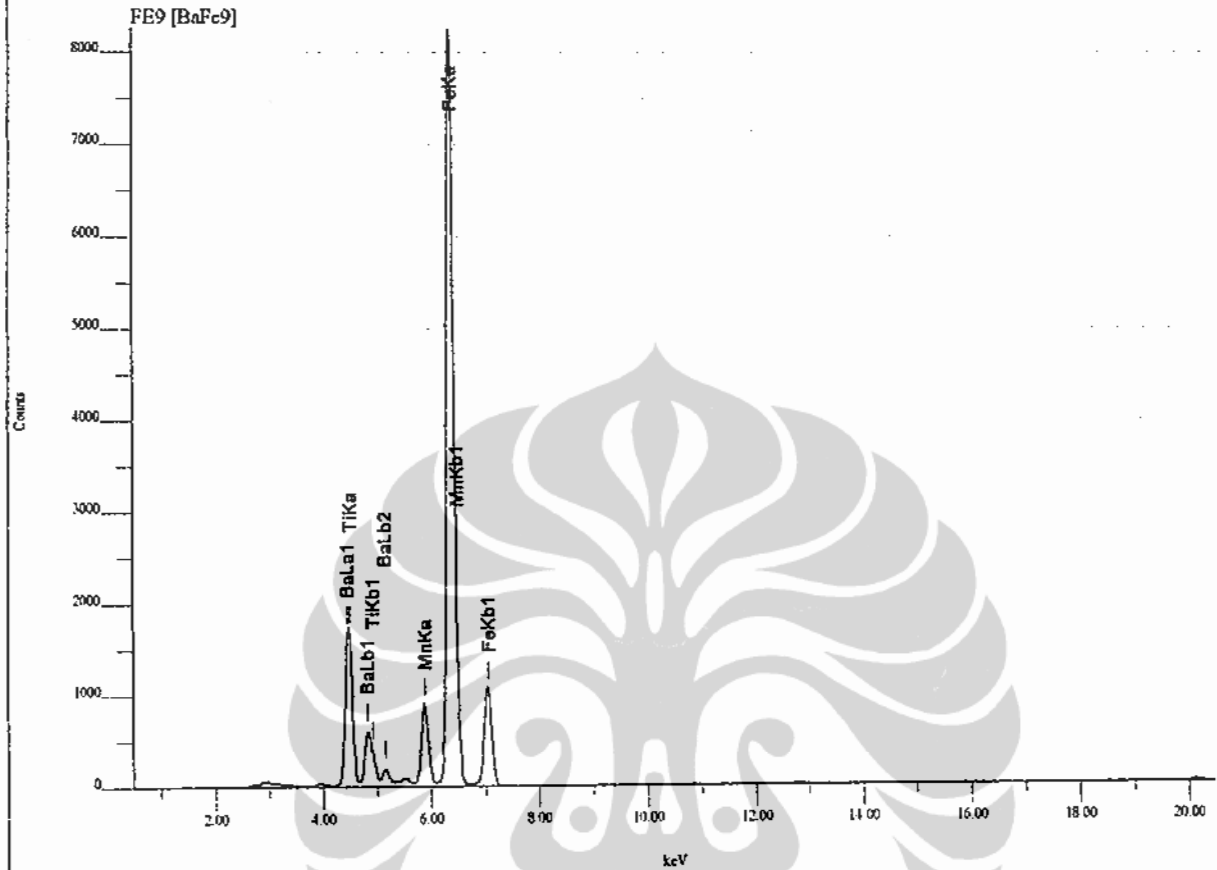
Analysis Element: Ti,Mn,Fe,Ba

Num	Atom/Chem. Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 Ti	6.7718	8.2913	0.0572865	16865	0.0623
* 2	25 Mn	7.6986	8.2186	0.0409180	15848	0.0745
* 3	26 Fe	75.3707	79.1519	0.3521623	150979	0.0802
* 4	56 Ba	10.1590	4.3382	0.1718002	17757	0.1521



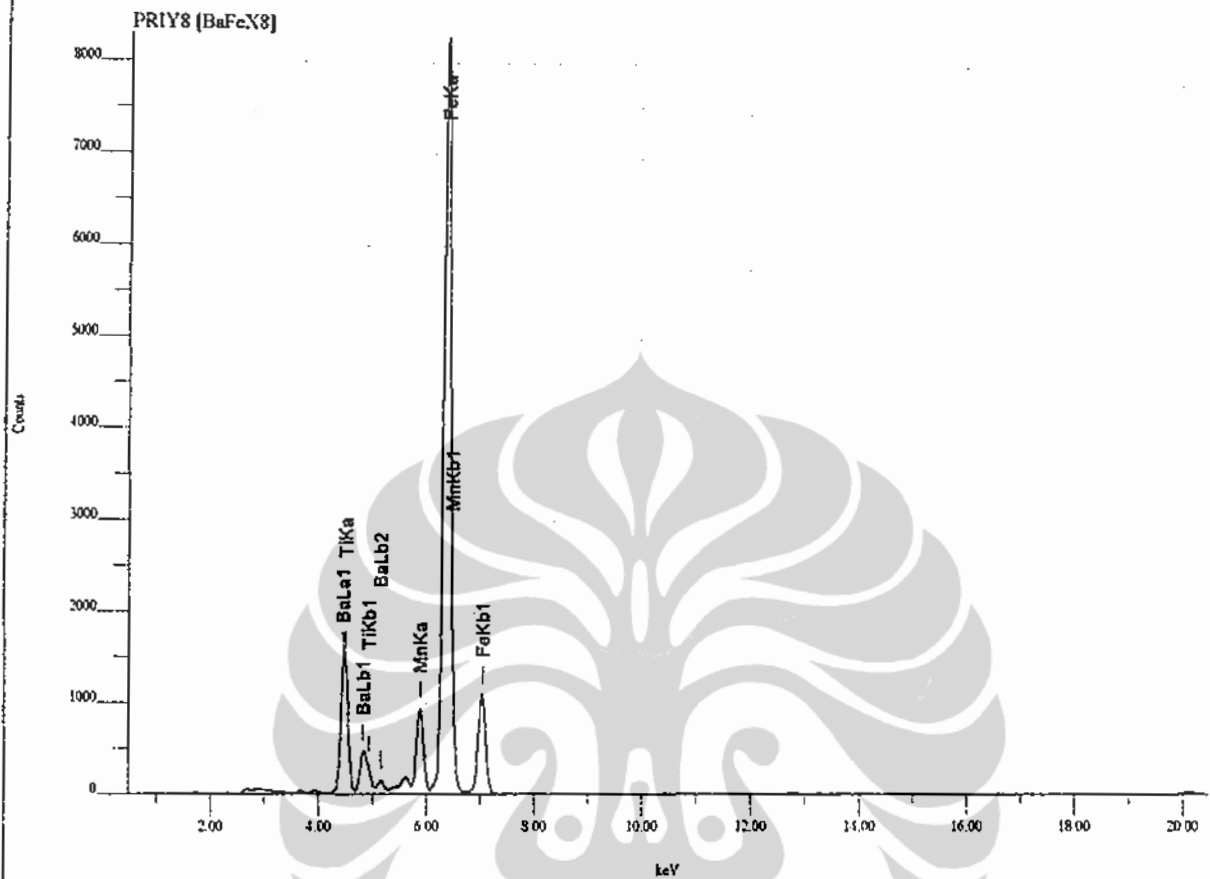
File Name : D:\USER\PRIYONO\FE10.SPC Acq. Time: 2007/11/23 17: 7:51
 Sample Name: BaFe10
 Memo : S-3
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.054mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: Ti,Mn,Fe,Ba

Num	Atom/Chem.	Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22	Ti	5.6588	7.2362	0.0471451	14210	0.0717
* 2	25	Mn	6.9795	7.7818	0.0357382	14171	0.0876
* 3	26	Fe	70.7108	77.5557	0.3220355	141350	0.0931
* 4	56	Ba	16.6510	7.4263	0.2756161	29166	0.1760



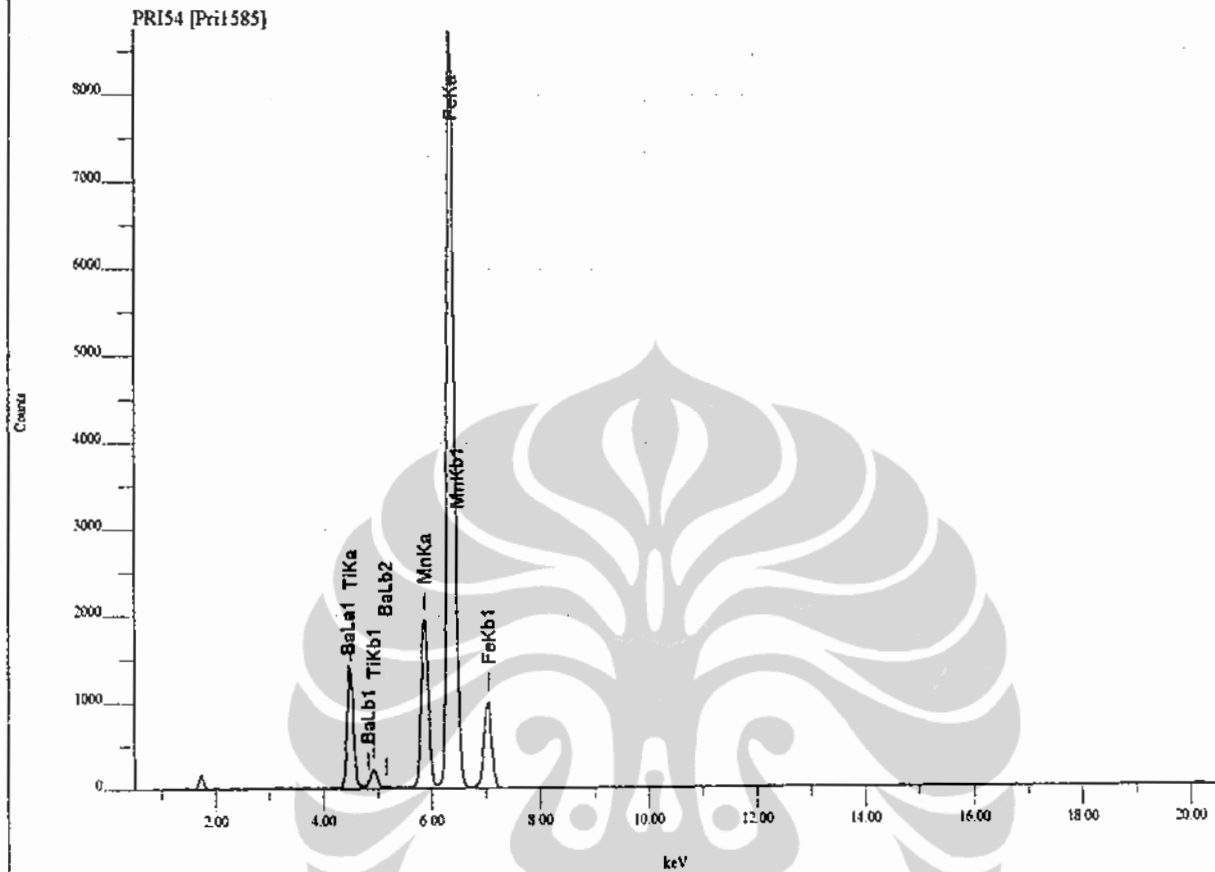
File Name : DAUSERPRIYONOFE9.SPC Acq. Time: 2007/11/23 17: 5:14
 Sample Name: BaFe9
 Memo : S-3
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.059mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: Ti,Mn,Fe,Ba

Num	Atom/Chem. Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 Ti	5.6924	7.2686	0.0454205	14963	0.0638
* 2	25 Mn	6.7190	7.4803	0.0329958	14301	0.0778
* 3	26 Fe	71.1618	77.9356	0.3104616	148946	0.0829
* 4	56 Ba	16.4268	7.3155	0.2604922	30130	0.1565



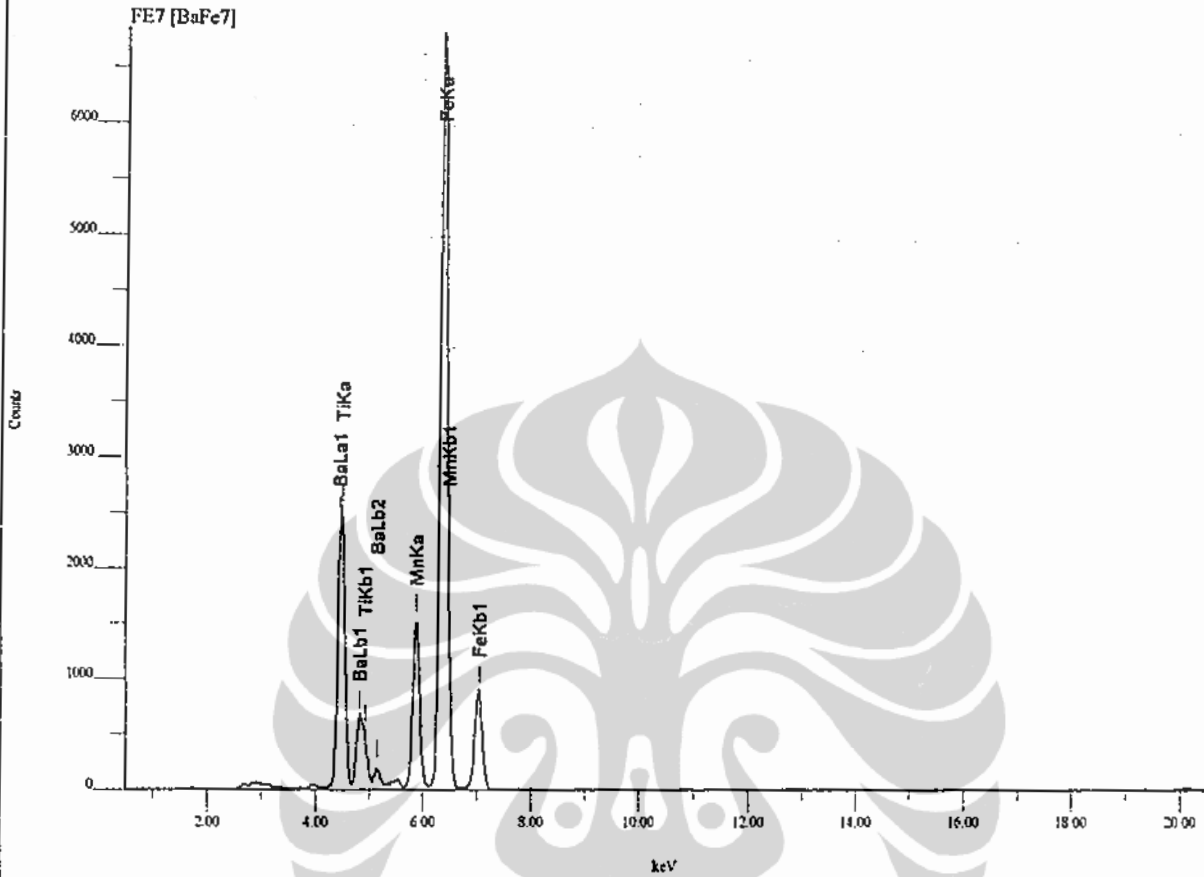
File Name : DAUSER\PRIYONO\PRIY8.SPC Acq. Time: 2007/11/1 13:42:36
 Sample Name: BaFeX8
 Memo : MHs-S3
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.047mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: Ti,Mn,Fe,Ba

Num	Atom/Chem.Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 Ti	6.1502	7.6739	0.0581042	15476	0.0690
* 2	25 Mn	7.6652	8.3389	0.0450460	15785	0.0833
* 3	26 Fe	73.1983	78.3359	0.3803528	147534	0.0892
* 4	56 Ba	12.9862	5.6513	0.2445055	22865	0.1690



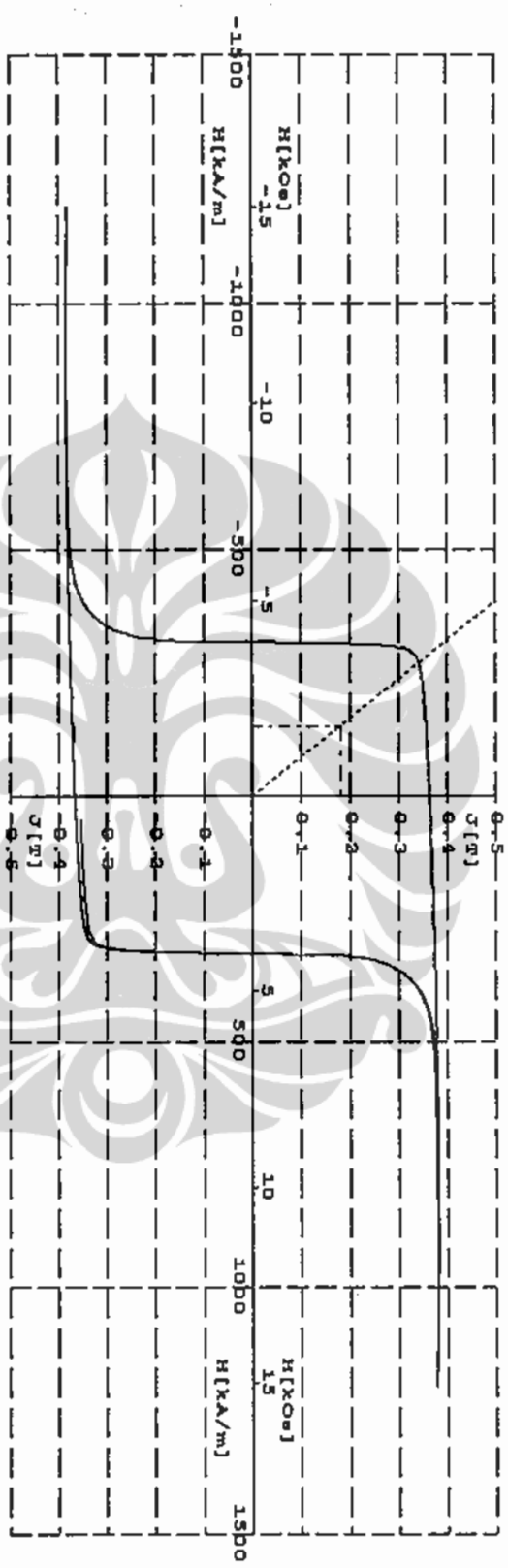
File Name : D:\USER\PRIYONO\PR154.SPC Acq. Time: 2007/9/11 12:33:47
 Sample Name: Pri1585
 Memo : S-3 sains
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.036mA Live time: 110.00sec Pass: Vac
 Analysis Element: Ti,Mn,Fe,Ba

Num	Atom/Chem. Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 Ti	8.0201	9.3214	0.1003318	20394	0.1294
* 2	25 Mn	15.5535	15.7613	0.1232573	32962	0.1533
* 3	26 Fe	74.2804	74.0475	0.5222561	154598	0.1635
* 4	56 Ba	2.1460	0.8699	0.0539675	3852	0.3139



File Name : D:\USER\PRIYONO\FE7.SPC Acq. Time: 2007/11/23 17: 0: 3
 Sample Name: BaFe7
 Memo : S-3
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.056mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Analysis Element: Ti,Mn,Fe,Ba

Num	Atom/Chem. Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 Ti	10.8090	13.7390	0.0896822	28287	0.0422
* 2	25 Mn	12.6997	14.0743	0.0622945	25851	0.0536
* 3	26 Fe	59.1715	64.5087	0.2666440	122481	0.0552
* 4	56 Ba	17.3197	7.6780	0.2864993	31728	0.1032



Dr	=	0.363	W	H[kA/m]	J(T)	B(T)	H Coil	:	116.9 cm ²	Date	:	11/20/2007
HOB	=	272.0	KA/m	-1.0	0.363	0.362	J Coil	:	30	Rested by:	:	Priyono
HOT	=	315.2	KA/m	-2.0	0.363	0.361	-Tmax	:	30	Customer:	:	UT-83
(BH)max	=	25.3	KJ/m ³	-3.0	0.363	0.360	dh/dc	:	13	Shape:	:	Disk
Ba	=	0.181	W	-4.0	0.363	0.358	Real Temp.	:	22 °C	Material:	:	FerriCe
Ha	=	139.6	KA/m	-5.0	0.363	0.357	Height	:	1.0 mm	Info 1:	:	FeFeCo9
JK	=	0.327	W	-6.0	0.363	0.356	Length	:	11.5 mm	Info 2:	:	Anticrop
JK	=	293.9	KA/m	-7.0	0.363	0.354	Width	:	11.5 mm	Info 3:	:	Standard
J90	=	0.327	W	-8.0	0.363	0.353	Area	:	1.3225 cm ²	Test No.:	:	001
H90	=	293.9	KA/m	-9.0	0.363	0.352		:		Mat. No.:	:	1
Hmax	=	1200	KA/m	-10.0	0.363	0.351		:		Art. No.:	:	H43001212

Save parameters

Copy

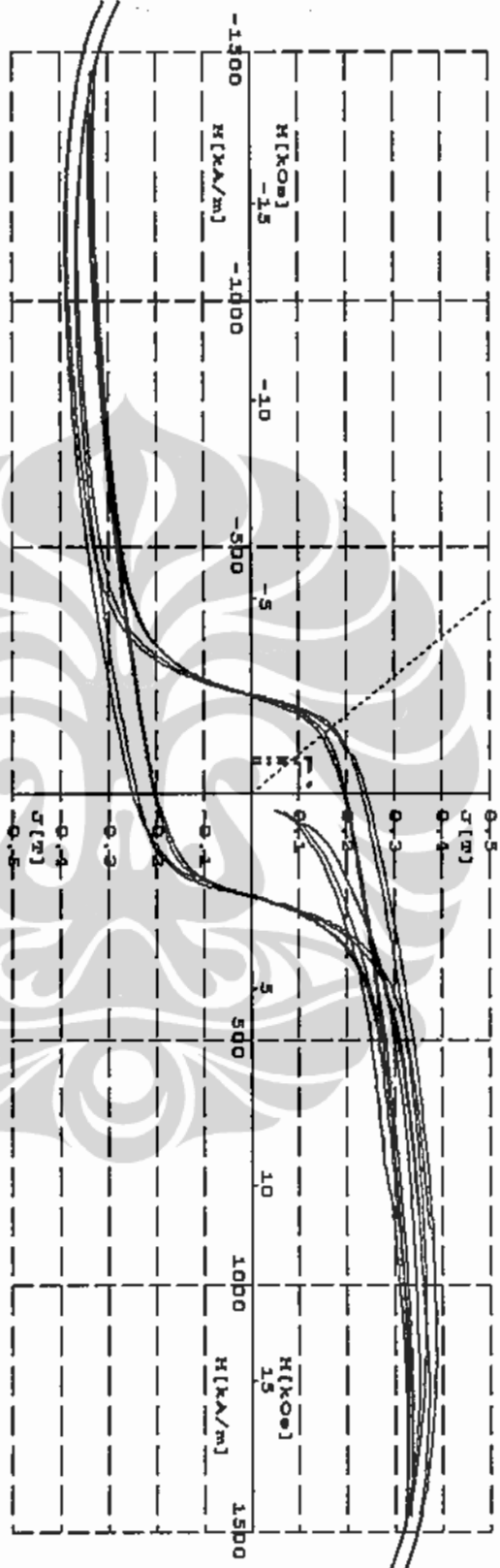
Print

OK

Cancel

Help

© KASOEN-PRATIKA DR. HESTERINGSWAR GEMBU, Xilin 1993, 1983/98
 C:\Program\KRIEBO\H43001212 new 2007.daw



	1	2	3	4	Average	H Coil	Date
Dr	0.196	0.199	0.233	0.243	0.218	116.9 cm ²	8/2/2000
Hcd	118.6	123.4	137.0	133.3	128.1	CHLS-1	Created by: Priyono
Hcd	198.8	202.0	203.6	199.9	201.1	50 %	Customer: UT-83
(BH)max	6.1	6.6	8.6	9.2	7.7	5 %	Shape: Silinder new
Re	0.102	0.102	0.122	0.126	0.113		Material: Ferrite
Ra	59.80	64.46	71.76	73.11	67.28	-1.00 kA/m	Info 1: Bore12019
Rd	61.22	74.32	71.34	70.89	70.39	-2.00 kA/m	Info 2: 1000Ccd1200 C
Rmax	1488	1465	1649	1624	1537	1.0 mm	Info 3: 4 Jam
r real	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0		
J(H1)	0.193	0.199	0.233	0.243	0.218	Diameter	Test No.: 1
J(H2)	0.195	0.199	0.233	0.242	0.217	Area	Mat. No.: 1
							Art. No.: H1cccd1200

Save parameters

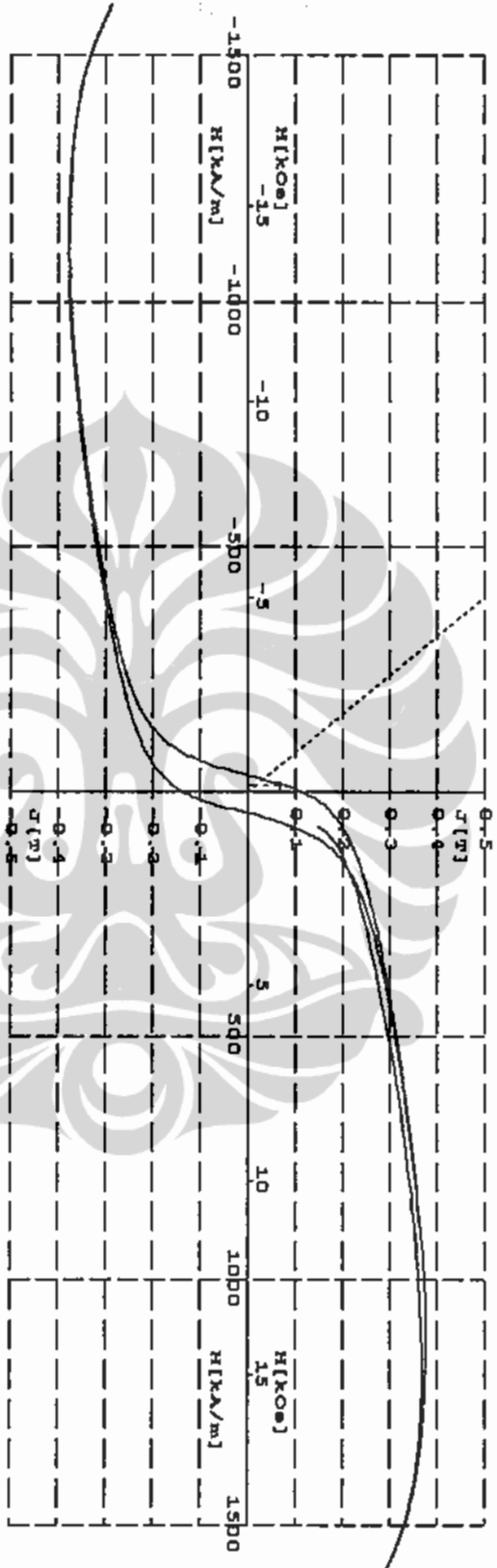
Copy

Print

OK

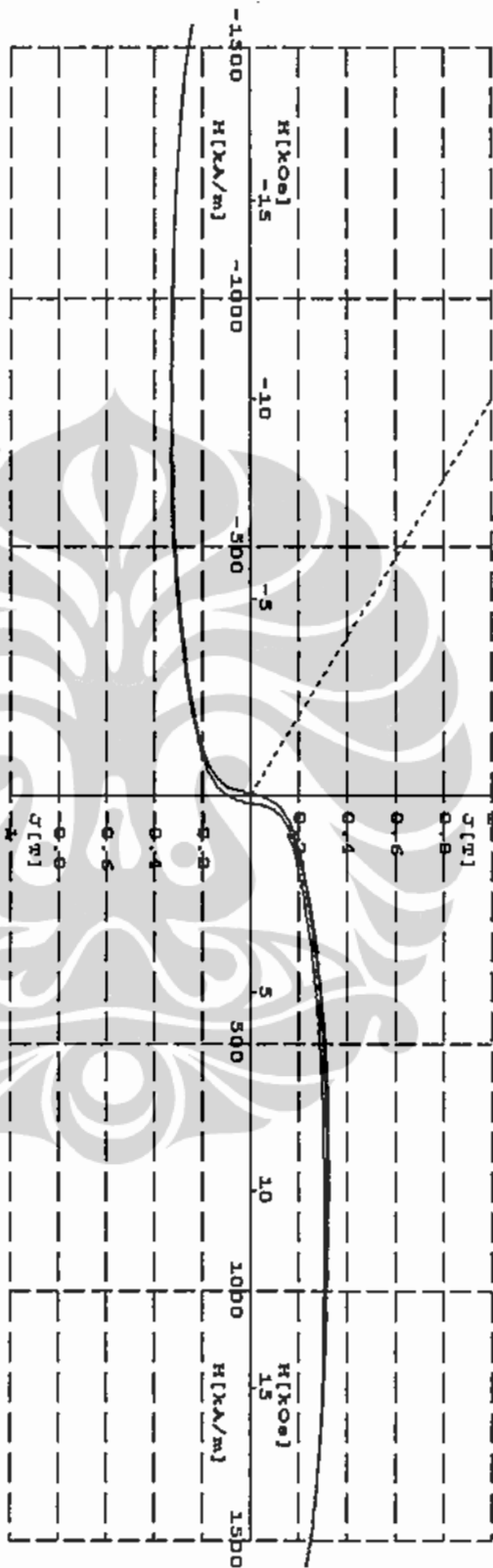
Cancel

Help



Bz	0.117	T	H[kA/m]	0.113	B(T)	H Coil	116.9 cm	Date	8/2/2000
Hcof	26.66	kA/m	-1.0	0.113	0.114	7 Coil	50 \$	Customer	UT-83
(BH)max	35.08	kA/m	-2.0	0.110	0.107	-Imax	50 \$	Shape	DIRK 12 mm
W	0.9	KT/m²	-3.0	0.106	0.103	dh/dc	5 \$	Material	Permalloy
Ba	0.068	T	-4.0	0.105	0.095	Real Temp.	22 °C	Info 1	BarrelM105
Ha	12.60	kA/m	-5.0	0.103	0.091	Height	1.0 mm	Info 2	1200 C 1.5m
Hc	0.106	T	-6.0	0.100	0.087	Diameter	15.0 mm	Info 3	Medan 2.15 T
Hk	4.53	kA/m	-7.0	0.097	0.083	Area	1.7671 cm²	Test No.	
H90	0.106	kA/m	-8.0	0.095	0.079			Mat. No.	H1878121
H90	4.93	kA/m	-9.0	0.092	0.079			Art. No.	H1878121
H90			-10.0						

Save Parameters Copy Edit OK Cancel Help



Br	0.045 T	H[kA/m]	0.040 T	B[T]	H Coll	116.9 cm ²	Date	11/23/2007
Hc2	4.99 kA/m	-1.0	0.033	0.030	J Coll	25	Customer	UT-83
Hc1	5.69 kA/m	-3.0	0.024	0.010	-Tmax	13	Shape	Disk 12 mm
(BH)max	0.134 T	-4.0	0.015	0.010	dh/dt	13	Material	Ferite
Hs	1.68 T	-5.0	0.006	0.000			Info 1	BaFe10Mn1O19
Ha	1.68 kA/m	-6.0	0.003	-0.010	Real Temp.	22 °C	Info 2	1200 C 1 Jam
CX	1.63 T	-7.0	0.000	0.000	Height	1.0 mm	Info 3	madan 2.15 T
Hk	1.63 kA/m	-8.0	0.000	0.000	Diameter	9.0 mm	Test No.	1
JS0	0.041 T	-9.0	0.000	0.000	Area	0.6362 cm ²	Mat. No.	H1steris1a
HS0	1.63 kA/m	-10.0	0.000	0.000			Art. No.	

Save parameters

Copy

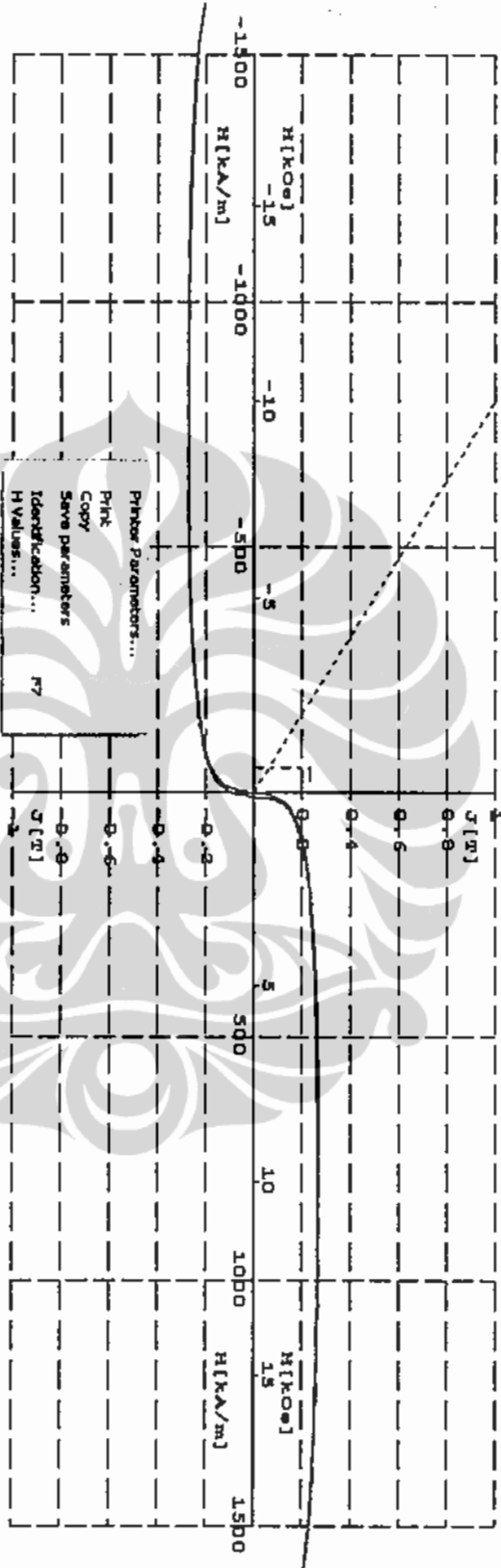
Print

OK

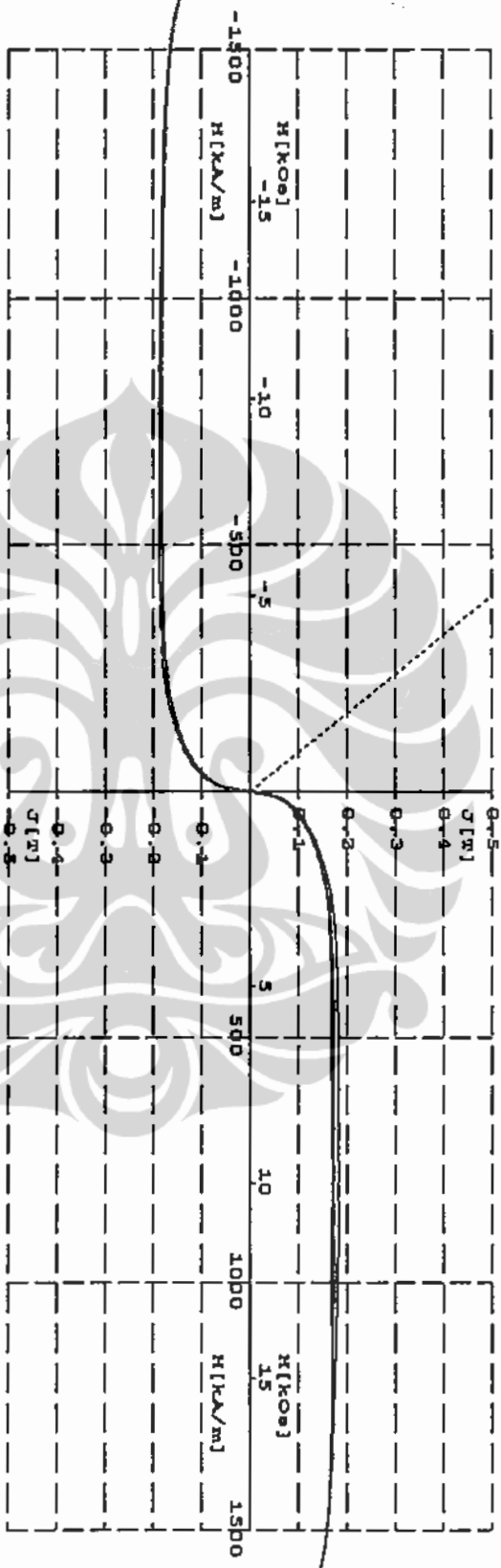
Cancel

Help

Maxwell 2.3.19.11 Br. resolution 640x480, Win 1997, 11/23/07
 C:\Program Files\Maxwell\Maxwell 2.3.19.11\bin\Maxwell.exe



Br	=	0.013	T	H [kA/m]	-	J [T]	-	B [T]	-	H Coll	:	116.9	cm ³	Date	:	7/16/2000
HcB	=	0.84	kA/m	-1.0	0.000	0.000	-0.000	0.000	J Coll	:	TH15-1		Customer	:	UR-63	
HcJ	=	0.91	kA/m	-2.0	0.000	0.000	0.000	0.000	-Tmax	:	50		Shape	:	D10K 13 mm	
(BH)max	=	0.0	kJ/m ³	-3.0	0.000	0.000	0.000	0.000	+Tmax	:	50		Material	:	Ferrite	
B _r	=	0.234	T	-4.0	0.000	0.000	0.000	0.000	dh/dc	:	5		Info 1	:	MF8Mn2(2)1	
H _a	=	51.234	kA/m	-5.0	0.000	0.000	0.000	0.000	Real Temp.	:	22	°C	Info 2	:	1200 C 1 f	
H _k	=	0.011	T	-6.0	0.000	0.000	0.000	0.000	Height	:	1.0	mm	Info 3	:	Medan 2.1 f	
H _k	=	4.151	kA/m	-7.0	0.000	0.000	0.000	0.000	Diameter	:	13.8	mm	Rest No.	:	001	
H ₉₀	=	0.011	T	-8.0	0.000	0.000	0.000	0.000	Area	:	1.4957	cm ²	Mfg. No.	:	BaF8Mn2T12019	
H ₉₀	=	4.15	kA/m	-9.0	0.000	0.000	0.000	0.000								
H _{90c}	=	1.625	kA/m	-10.0	0.000	0.000	0.000	0.000								



Hmax	1.625	kA/m	H [kA/m]	0.014	B [T]	0.013	H Coil	103.8	cm²	Date	4/9/2007
HCB	2.28	kA/m	H [kA/m]	0.005	B [T]	0.003	J Coil	50		Customer	UI (S-3)
HCB (SH)	0.0	kA/m	H [kA/m]	0.012	B [T]	0.007	+Imax	50		Shape	DISK 12 mm
HCB	0.013	kA/m	H [kA/m]	0.000	B [T]	0.000	dh/dc	10		Material	Ferri-te
HCB	1.02	kA/m	H [kA/m]	0.000	B [T]	0.000	Reel Temp.	22	°C	Info 1	Bojor25p1250
HCB	0.017	kA/m	H [kA/m]	0.000	B [T]	0.000	Height	1.0	mm	Info 2	modan 2.15 T
HCB	1.22	kA/m	H [kA/m]	0.000	B [T]	0.000	Diameter	17.23	mm	Info 3	
HCB	0.017	kA/m	H [kA/m]	0.000	B [T]	0.000	Area	2.3316	cm²	Test No.	
HCB	1.22	kA/m	H [kA/m]	0.000	B [T]	0.000				Mec. No.	
HCB	1.625	kA/m	H [kA/m]	0.000	B [T]	0.000				Art. No.	Histerimia

Save Parameters

Copy

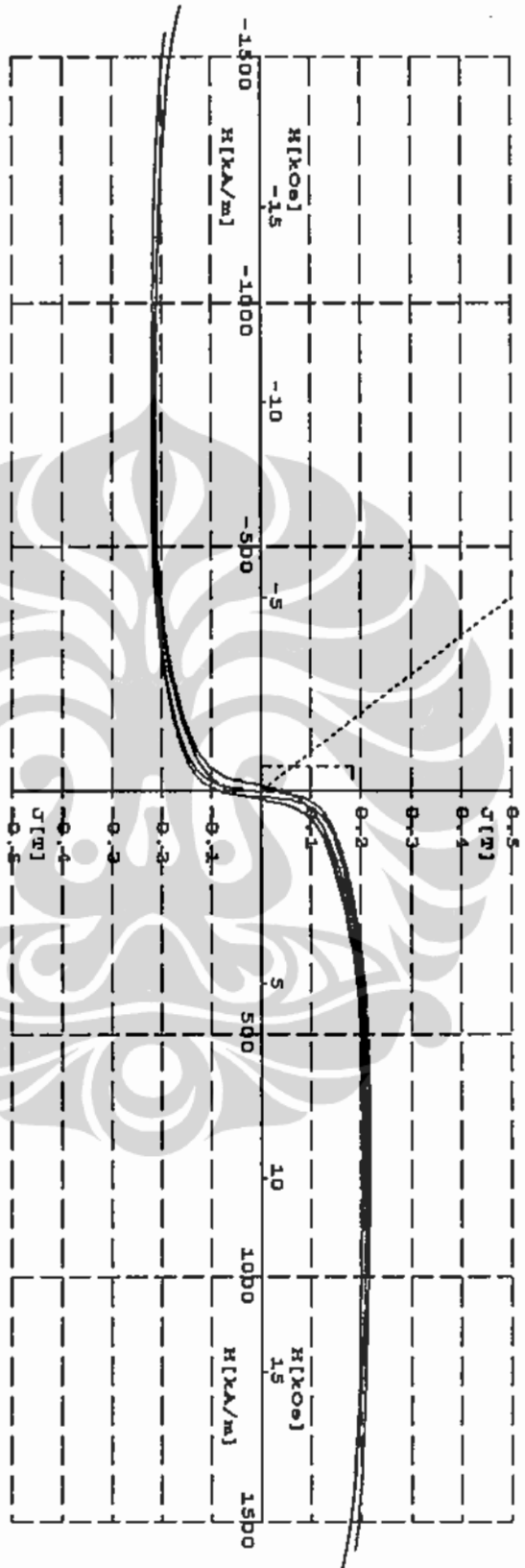
Edit

OK

Cancel

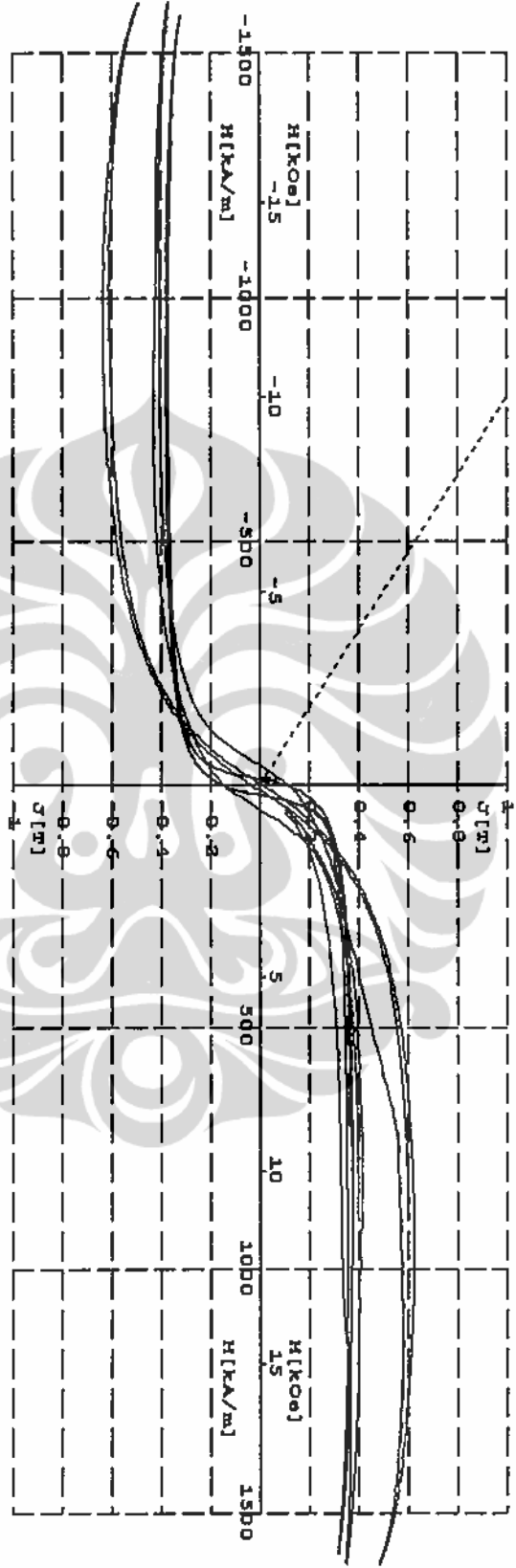
Help

File: C:\Program Files\Hysteresis\Hysteresis.exe



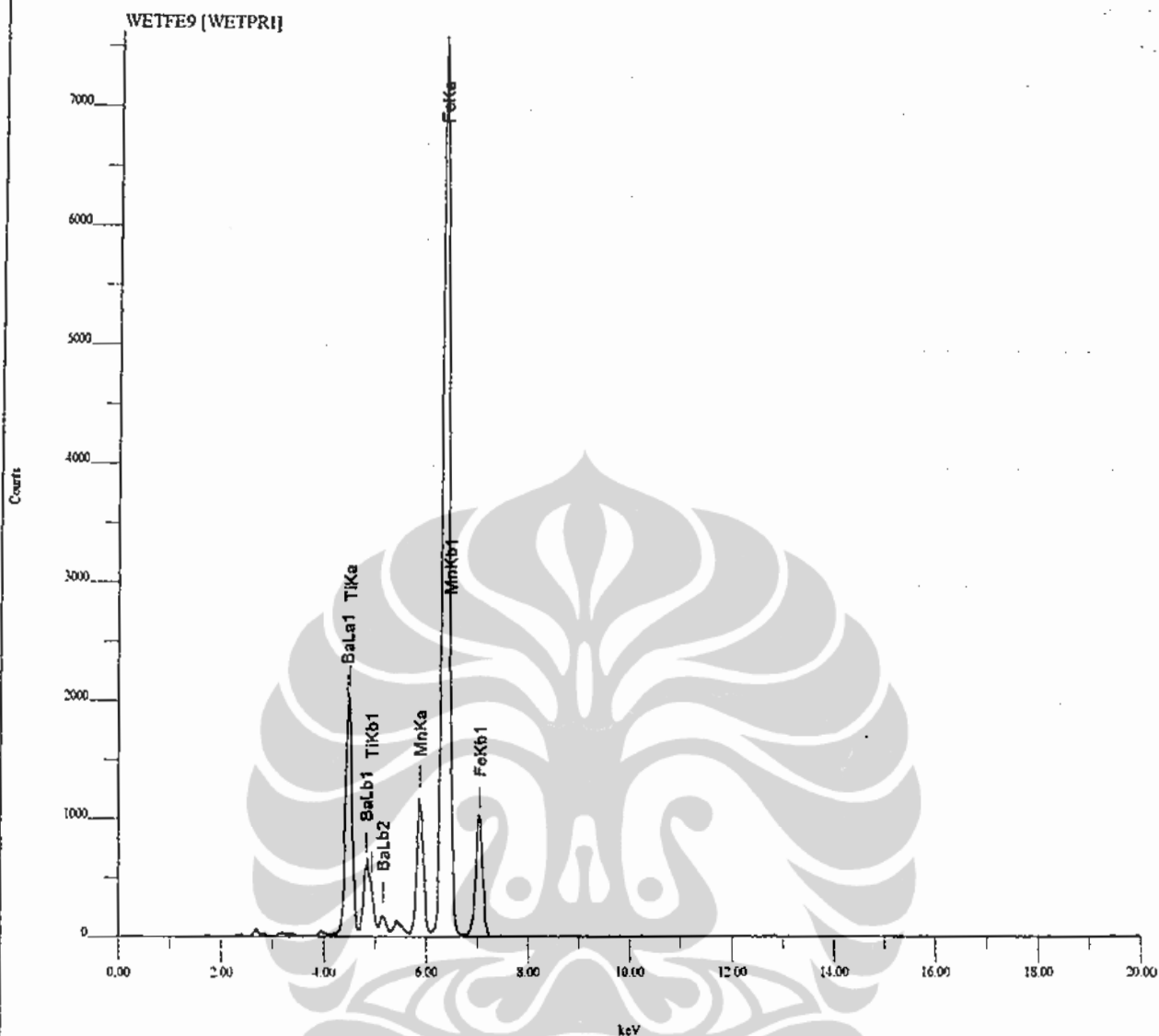
BR	m	0.047	0.018	Average	0.033 T	H Coil	116.9 cm ²	Date	2/15/2009
HcD	m	9.39	1.37	J Coll	5.38 kA/m	J Coll	JH15-1	Rest No.	BR9M15R115019
HcU	m	11.79	1.51	+Imax	6.65 kA/m	Imax	50	Customer	UI-83
(BH)max	m	0.1	0.0	kA/m	0.1 kJ/m ²	dh/dt	5	Shape	BID, 8mm
Ba	m	0.026	0.184	0.105 T	27.23 kA/m	H1	-1.00 kA/m	Material	Ferrite
Ha	m	4.70	49.76	3.68	1583 kA/m	H2	-2.00 kA/m	Info 1	M-8J1200C1J
Hk	m	1.53	5.83	22.0	22.0 kA/m	Height	1.0 mm	Info 2	M-180J1200C1J
Hmax	m	1610	1556	0.025 T	1583 kA/m	Diameter	10.0 mm	Info 3	Satu Perlekuan
Hc	m	22.0	22.0	0.021 T	22.0 kA/m	Area	0.7854 cm ²	Art. No.	Histero18
J(H1)	m	0.044	0.006						
J(H2)	m	0.041	0.000						

⊕ KAJANG-PTIK Di. Seandainya GmK, Xlin 1988, 1783/88



1	2	3	Average	H Coil	Diameter	Height	Date
Br	0.108	0.117	0.079 T	J Coil	9.6 mm	1.0 mm	9/7/2000
HcB	11.21	28.31	14.01 kA/m	+Imax	0.7238 cm		Rest by: Priyono
HcJ (BH)max	12.59	40.67	18.91 kA/m	dH/dt			UT-83
Ba	0.058	0.063	0.043 T				Shape : Silinder new
Ha	5.99	13.34	6.73 kA/m				Material : Ferrite
Hk	1.52	4.80	2.13 kA/m	H1	-1.00 kA/m	Info 1 : Cek Return	Info 2 : 10cm
Hmax	1581	1631	1610 kA/m	H2	-2.00 kA/m	Info 3 : Bepel2019	
r real	22.0	22.0	22.0 °C				
J(H1)	0.102	0.115	0.075 T				Mat. No. : 1
J(H2)	0.095	0.113	0.071 T				Art. No. : Histerisis

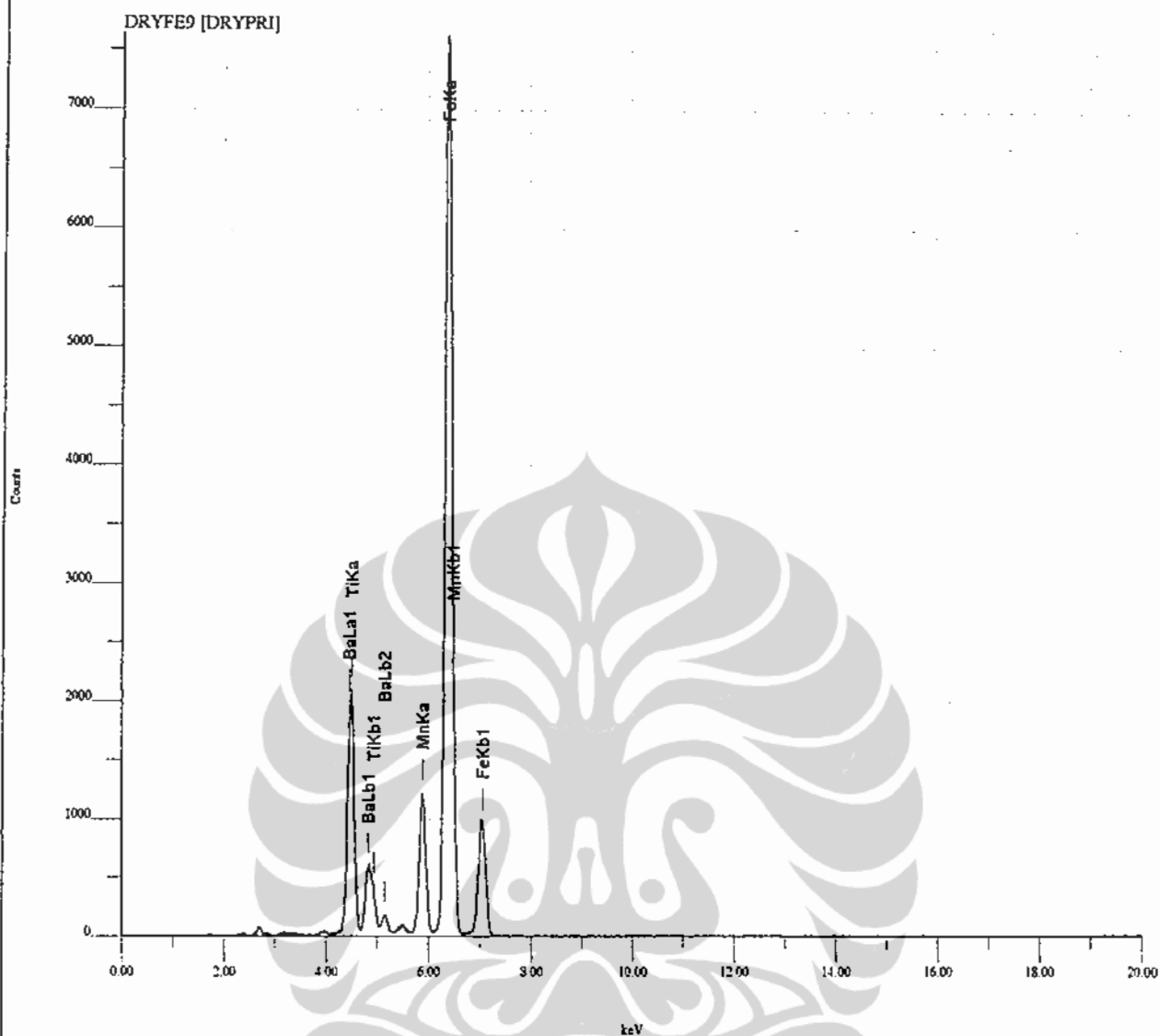
© MANDIRI TEKNIK Dit. Revisi/Revisi 02/08, 22/11/1997, 17/05/98



File Name : D:\USERAPRIYONOWETFE9.SPC Acq. Time: 2009/ 2/21 14:24:27
 Sample Name: WETPRI
 Memo : Materials Science
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.049mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Quantitative Analysis Condition
 Quantitative Analysis Method: Standard

Analysis Element: Ti,Mn,Fe,Ba

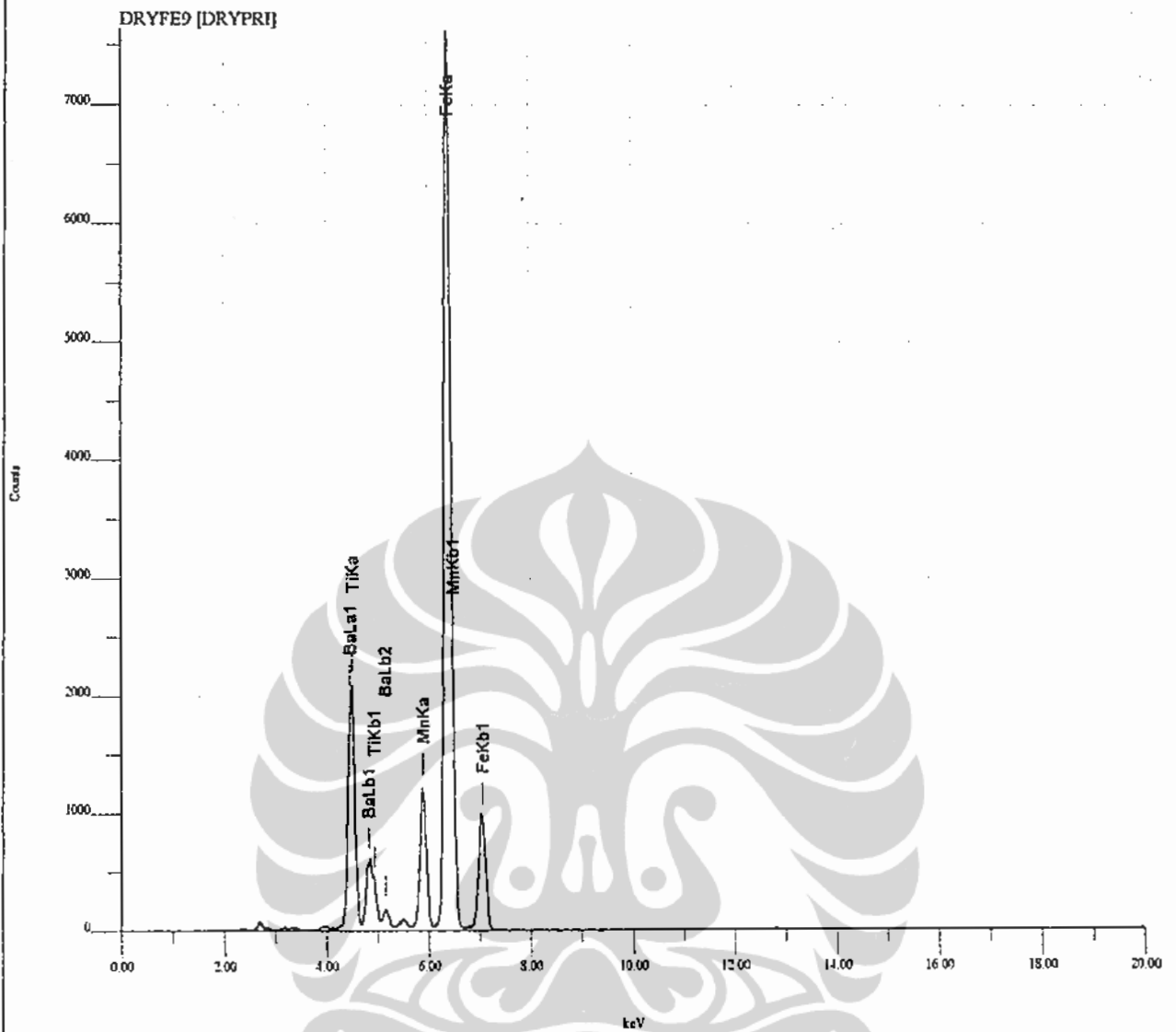
Num	Atom/Chem. Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 TiO2	9.6967	16.2675	0.0745051	20367	0.0425
* 2	25 MnO2	10.6375	16.4012	0.0549532	19764	0.0475
* 3	26 Fe2O3	66.3674	55.7068	0.3454112	137507	0.0446
* 4	56 BaO	13.2984	11.6246	0.3043194	29208	0.0696



File Name : DAUSERPRIYONODRYFE9.SPC Acq. Time: 2009/ 2/21 14:27: 3
 Sample Name: DRYPRI
 Memo : Materials Science
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.050mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Quantitative Analysis Condition
 Quantitative Analysis Method: Standard

Analysis Element: Ti,Mn,Fe,Ba

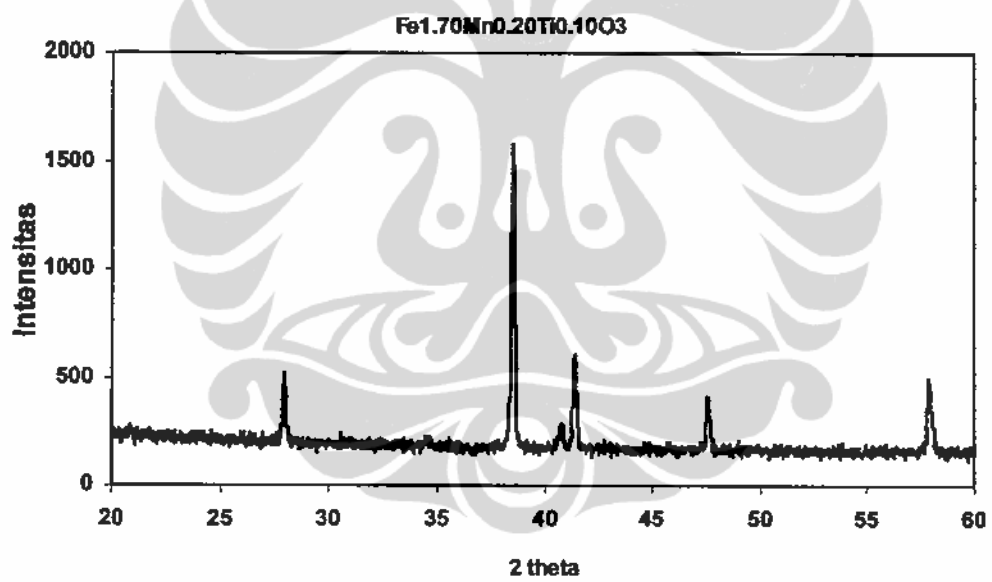
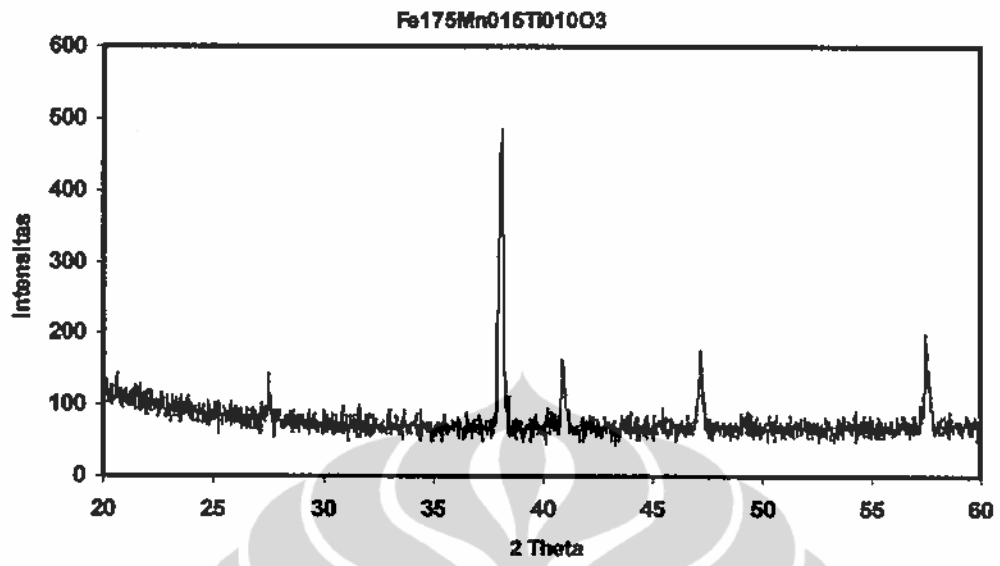
Num	Atom/Chem. Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 TiO ₂	9.9895	16.7270	0.0746680	20935	0.0559
* 2	25 MnO ₂	10.5707	16.2674	0.0531454	19603	0.0624
* 3	26 Fe ₂ O ₃	66.4124	55.6393	0.3364339	137367	0.0586
* 4	56 BaO	13.0274	11.3663	0.2901581	28562	0.0916

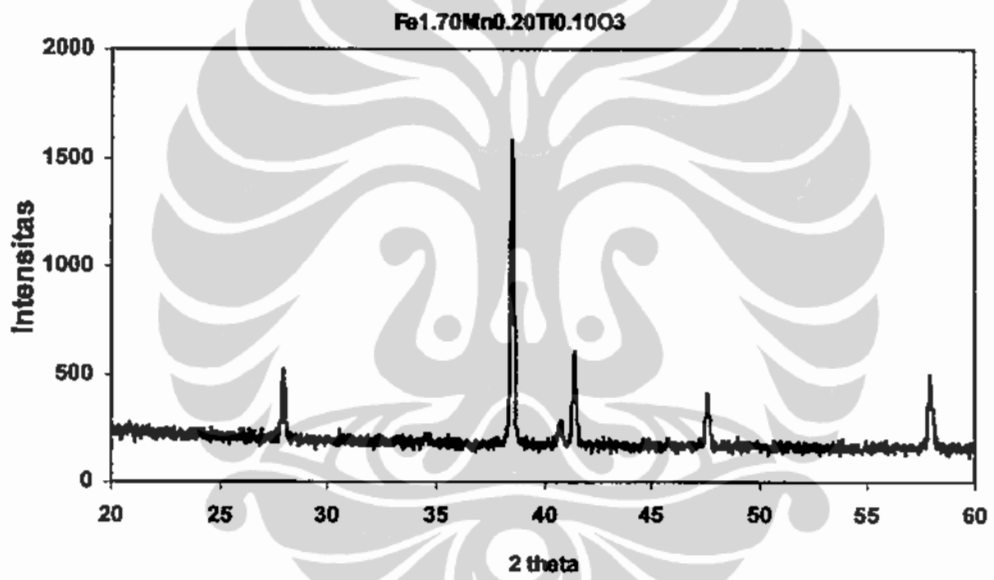
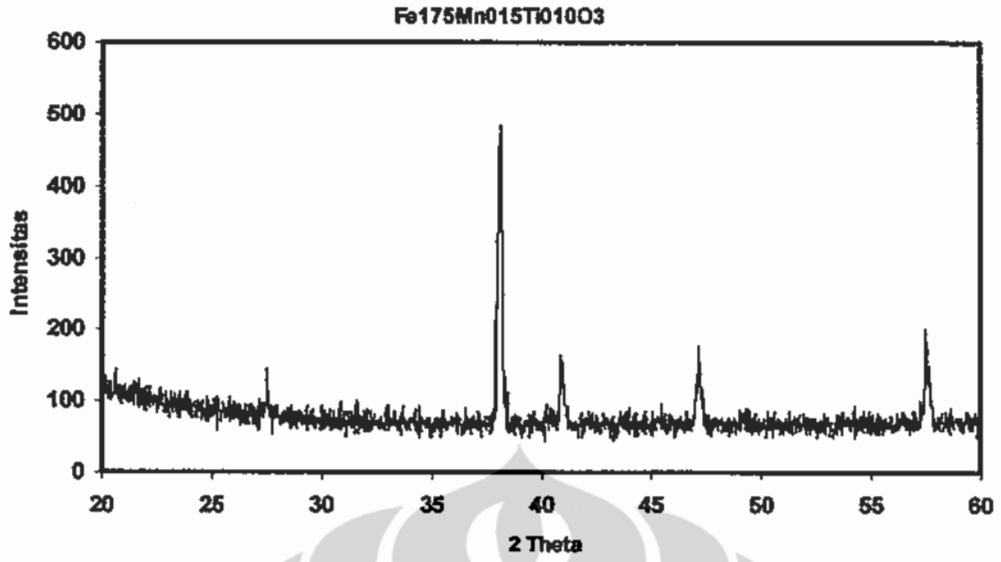


File Name : D:\USER\PRIYONO\DRYFE9.SPC Acq. Time: 2009/ 2/21 14:27: 3
 Sample Name: DRYPRI
 Memo : Materials Science
 Acq. Cond. : Voltage: 30.0kV Current: 0.050mA Live time: 110.00sec Pass:Vac
 Quantitative Analysis Condition
 Quantitative Analysis Method: Standard

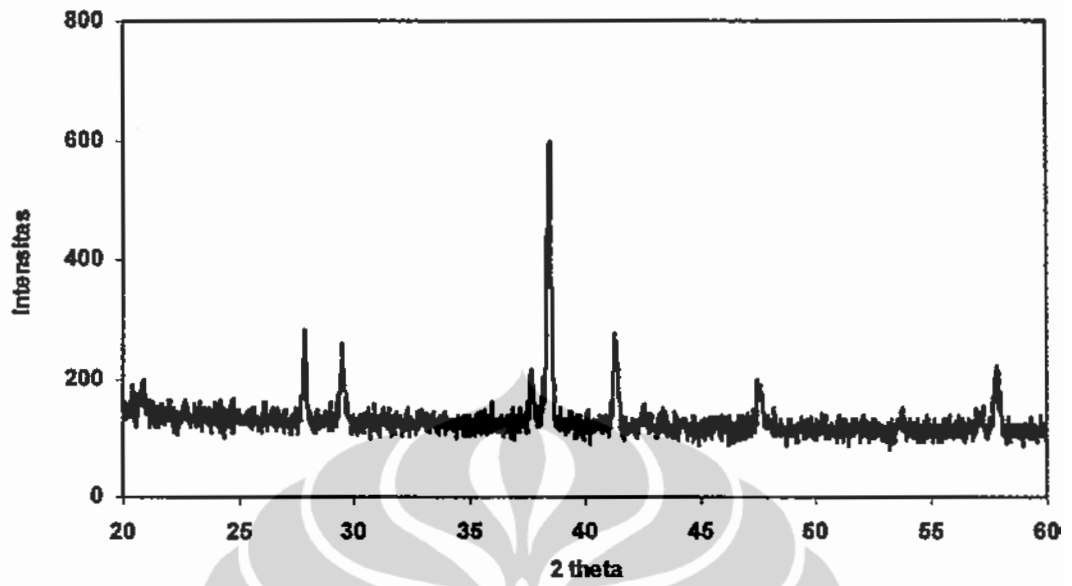
Analysis Element: Ti,Mn,Fe,Ba

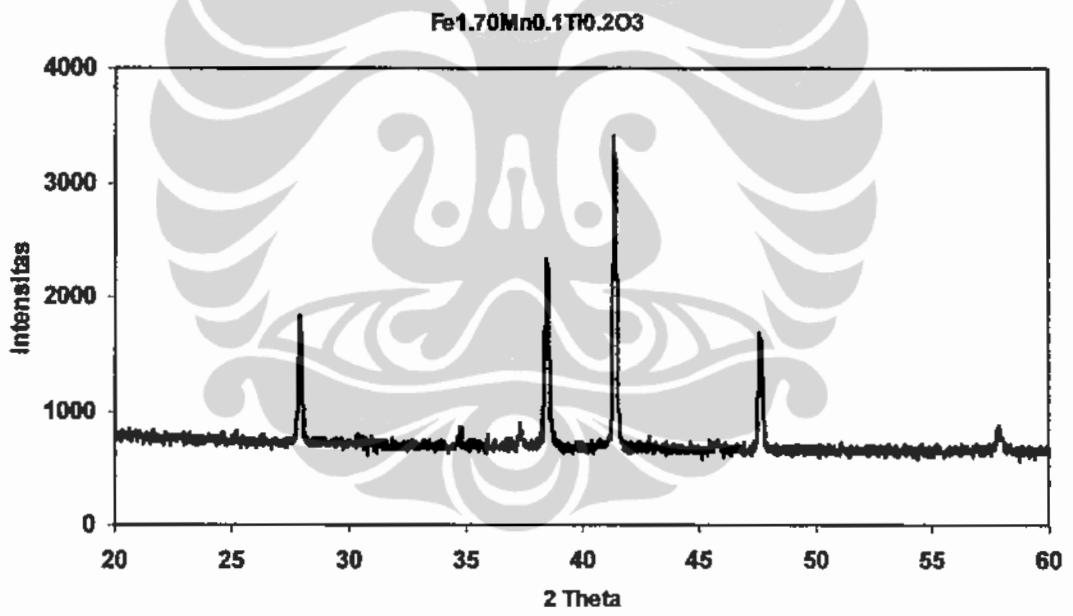
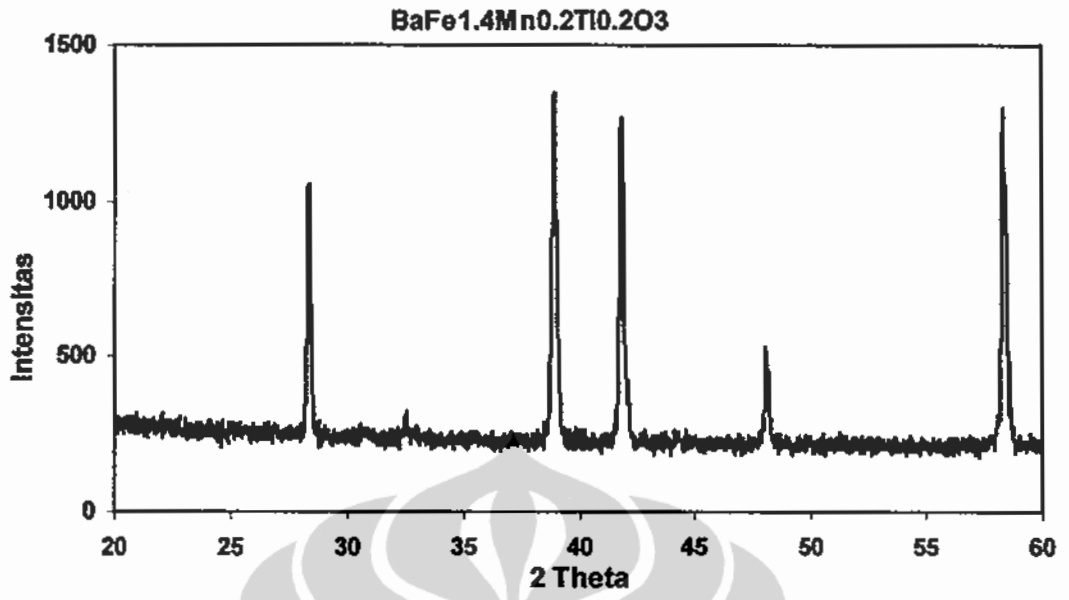
Num	Atom/Chem.Formula	wt(%)	at/mole(%)	K-ratio	Integral Int.	Standard dev.
* 1	22 TiO2	9.9895	16.7270	0.0746680	20935	0.0559
* 2	25 MnO2	10.5707	16.2674	0.0531454	19603	0.0624
* 3	26 Fe2O3	66.4124	55.6393	0.3364339	137367	0.0586
* 4	56 BaO	13.0274	11.3663	0.2901581	28562	0.0916

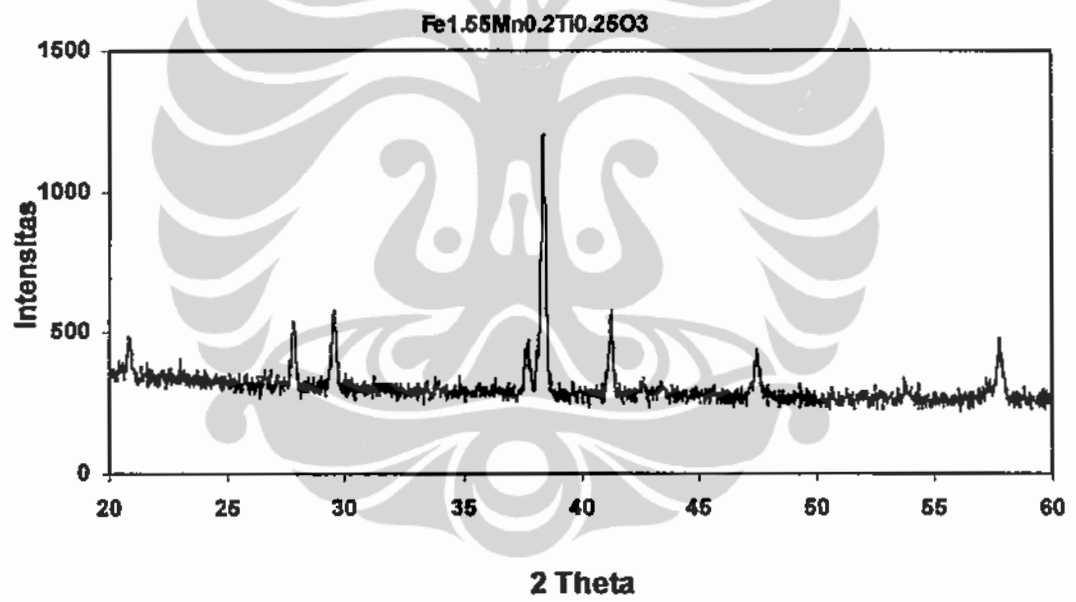
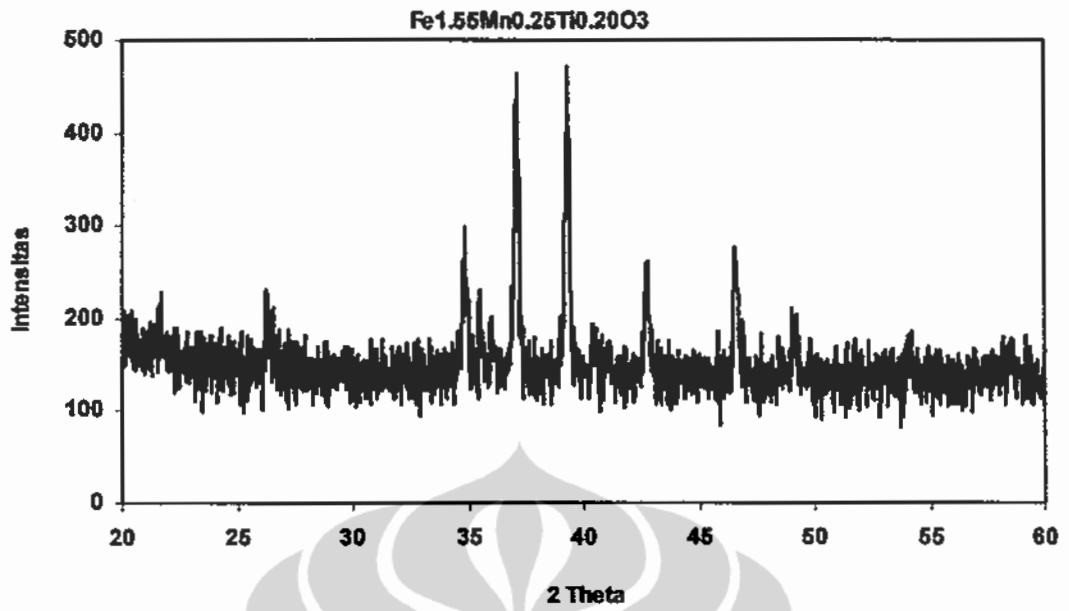




Fe_{1.65}Mn_{0.15}Ti_{0.20}O₃







PENENTUAN RESISTIVITY
 $BaFe_{12-2x}(MnTi)_xO_{19}$ ($x=0.00; 1.00; 1.50; 2.5$)

