

Studi Sifat-Sifat Listrik Bahan Magnetik FeSi

TESIS

**NORITA
630522030Y**



**UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU FISIKA
DEPOK
JULI 2008**

Studi Sifat-Sifat Listrik Bahan Magnetik FeSi

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Fisika

**NORITA
630 522 030Y**



**UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU FISIKA
KEKHUSUSAN FISIKA MURNI DAN TERAPAN
DEPOK
JULI 2008**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Norita
NPM : 630522030Y**

Tanda Tangan :

Tanggal : Juli 2008

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh

Nama : Norita
NPM : 630522030Y
Program Studi : Magister Ilmu Fisika
Judul Tesis : Studi Sifat-Sifat Listrik Bahan Magnetik FeSi

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Djoko Triyono (.....)

Penguji : Prof.Dr.Rer.nat. Rosari Saleh (.....)

Penguji : Dr Cuk Imawan (.....)

Penguji : Dr. Ariadne L.Juwono (.....)

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : Juli 2008

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah rabbil'alamin, puji syukur kehadiran Allah SWT, atas rahamat dan hidayah-Nya. Setelah melewati banyak rintangan baik dari luar maupun dari dalam. Penulis tidak akan pernah mampu menyelesaikan tugas akhir tanpa dukungan dari keluarga dan teman-teman terdekat. Hanya keinginan yang kuat untuk menambah wawasan yang selalu memacu semangat penulis untuk terus maju.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang telah banyak membantu penulis selama penulisan tesis ini khususnya kepada :

1. Bapak Dr. Techn. Djoko Triyono sebagai dosen pembimbing penulis dengan sabar yang selalu memberikan ide-ide serta kritik saran yang sangat berguna bagi penulis.
2. Ibu Prof.Dr. Rosari Saleh sebagai dosen penguji yang telah meluangkan waktunya untuk penulis dalam melaksanakan sidang tugas akhir.
3. Bapak Dr. Eng. Cuk Imawan sebagai dosen penguji yang telah meluangkan waktunya untuk penulis dalam melaksanakan tugas akhir.
4. Ibu Dr. Ariadne L Juwono sebagai dosen penguji yang memberikan kritik dan masukan terhadap hasil tulisan ini.
- 5.
6. Bapak Dr. Dedi Suyanto selaku ketua sidang tugas akhir.
7. Bapak Dr. Azwar Manaf selaku ketua Departemen Fisika yang telah memberikan kemudahan fasilitas .
8. Bapak Dr. Bambang yang telah memberikan kemudahan fasilitas.
9. Untuk Muhammad doris yang banyak membantu dan menemani penulis selama bimbingan dan memotivasi untuk menyelesaikan tugas akhir.
10. Ibu Yofentina Iriani, M.Si dan Ibu Vira, M.Si yang banyak penulis repotkan dengan XRD dan masukan terhadap hasil tulisan ini.
11. Bapak Erfan yang telah membantu dalam pembuatan sampel arc Melting Furnace.

12. Kepada Ibu tercinta yang selalu memberikan doa dan restunya selama penyelesaian tesis ini
13. Suamiku tercinta Slamet Sudadiyo, anakku tercinta Azkia dan kenzi atas doa dan semangat yang tiada henti.
14. Kepada keluarga besarku Bang Ismed, Eva, Mirza, adikku Ira dan Surya serta keponakan-keponakan yang aku sayangi kalian telah memberi semangat dalam hidup penulis.
15. Teman-teman seperjuangan Safari, Zul, Hasan merupakan rekan-rekan satu bimbingan penulis terima kasih motivasinya.
16. Sekolah SMA Negeri 35 yang banyak membantu selama kuliah dan mengerjakan tugas akhir ini telah mengizinkan penulis untuk meninggalkan tugas.
17. Pak Suparman yang membantu dengan sabar ketika penulis mengurus administrasi dan persyaratan menuju sidang.
18. Zahara, Risma, Herry, Ernelly dan Duma Risma R. atas perhatian dan keceriaan yang penulis rasakan.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan pada penulisan ini. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran dari semua pihak agar penulisa ini dapat menjadi sumber bacaan yang baik.

Depok, Juli 2008

Norita
Penulis

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

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

Nama : Norita
NPM : 630522030Y
Program Studi : Fisika Murni dan Terapan
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Jenis Karya : Tesis

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

Studi Sifat-Sifat Listrik Bahan Magnetik FeSi

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di Jakarta
Pada bulan Juli 2008
Yang menyatakan

(Norita)

ABSTRAK

Nama : Norita
Prgram Studi : Fisika Murni dan Terapan
Judul : Studi Sifat-Sifat listrik Bahan Magnetik Fesi

Telah dilakukan preparasi *alloy magnet* FeSi dengan variasi Si = 1, 2, 3 dan 4 at % menggunakan metode *arc melting*. *Alloy* tersebut kemudian di anil pada temperatur 800 C selama 1 jam. XRD dan fotomikro digunakan untuk meneliti struktur mikro seperti *fase*, parameter kisi, ukuran, distribusi dan batas butir. Analisis struktur mikro menunjukkan terjadinya *fase* tunggal α -Fe baik pada kondisi *As cast* maupun kondisi *annealed*. Proses anil menyebabkan pertumbuhan ukuran butir dan kristalisasi serta difusi atom-atom Si pada kristal α -Fe. Karakterisasi listrik menggunakan RLC meter menunjukkan bahwa rangkaian *ekivalen alloy* FeSi adalah rangkaian RL yang tersusun secara seri. Bertambahnya %Si dalam *alloy* FeSi baik dalam kondisi *As cast* dan kondisi *annealed* cenderung meningkatkan nilai resistivitas dan induktansi listrik. Proses anil juga menyebabkan nilai resistivitas dan induktansi listrik meningkat.

Kata Kunci:
Resistivitas, Parameter Kisi

ABSTRACT

Name : Norita
Study Program : Fisika Murni dan Terapan
Title : Study of Electrical Properties of FeSi
Magnetic Alloy

Preparation of FeSi magnetic alloy with composition of Si = 1, 2, 3 and 4 at% has been done using arc melting technique under Ar atmosphere. These alloy was annealed at 800 C for 1 hour. XRD and metallography was used to investigate the existence of phase, lattice parameter, size, boundary and distribution of grains. Microstructural analysis of as-cast and annealed samples show that these alloys consist of single phase α -Fe. Heat treatment of these alloys cause grain growth, crystallization and diffusion of Si atoms in α -Fe crystals. Electrical characterization by RLC meter indicates RL series circuit as equivalent circuit. Increasing %Si in FeSi alloy both in as-cast and annealed state tend to increase the values of electrical resistivity and inductance. These values also increase due to annealing process.

Key words:
Resistivitas, Lattice parameter

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
1. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Batasan Masalah	2
1.3. Tujuan Penelitian	2
1.4. Susunan Tesis	2
2. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Sifat-Sifat Magnetik Besi	3
2.2. Persyaratan Bahan Inti Transformer	4
2.2.1. Kerugian Histerisis	4
2.2.2. Kerugian Arus Eddy	5
2.3. Struktur Fasa dan Pengaruh Karbon	9
2.4. Pengaruh Ukuran Butir Berdasarkan Kerugian Histerisis dan Arus Eddy	9
2.5. Pengaruh Penyekat pada Sifat-Sifat Magnetik	10
2.6. Kerugian Energi Listrik pada Transformator	11
2.7. Spektroskopi Impedansi	13
2.8. Difraksi Sinar X	16
2.8.1. Hukum Bragg	16
2.8.2. Metode Difraksi Sinar-X	18

2.8.3. Analisa Kualitatif	21
2.8.4. Perhitungan Ukuran Butir	22
2.8.5. Parameter Kisi	23

3. METODELOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alur Penelitian	25
3.2. Preparasi FeSi	26
3.2.1. Arc Melting Furnace	26
3.2.2. Pemotongan (<i>Cutting</i>)	27
3.2.3. Annealing	27
3.2.4. Mounting	27
3.2.5. Pengampelasan	28
3.2.6. Pemolesan	28
3.2.7. Etsa	29
3.3. Fotomikro	29
3.4. X-Ray Difraktometer (XRD)	29
3.4.1. Ukuran Butir dengan Metode Difraksi Sinar X	30
3.5. RLC meter	31

4. PEMBAHASAN

4.1. XRD	33
4.2. Fotomikro	36
4.3. Pengukuran RLC	39
4.3.1. Impeansi Imaginer terhadap Impedansi Real	39
4.3.2. Impedansi Imaginer terhadap perubahan frekuensi	41
4.3.3. Impedansi Real terhadap perubahan frekuensi	44
4.4. Pembahasan Kerugian Arus Eddy	44

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan	48
5.2 Saran	48

DAFTAR REFERANSI	49
-------------------------------	----

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Penurunan Energi Magnetostatik karena Kebocoran <i>Fluks</i> Oleh Pembentukan Struktur <i>Domain</i>	3
Gambar 2.2	Struktur Magnet dari <i>Domain</i> dengan Sudut 180^0	3
Gambar 2.3	(a) Penampang Lintang dari Bahan Inti Transformer, Memperlihatkan Arah Arus Eddy. (b) Penyederhanaan Jalur Arus Eddy (bidang gelap) Pada Bahan Inti Transformer	5
Gambar 2.4	Penetrasi <i>Fluks</i> pada Bahan Inti Transformer sebagai Fungsi dari Ketebalan Lapisan	8
Gambar 2.5	Ketergantungan Konstanta Magnetostriksi <i>Saturasi</i> pada Pemberian Tekanan	10
Gambar 2.6	Magnetisasi oleh Pergeseran Dinding <i>Domain</i> Sederhana Didalam Lapisan tipis <i>Ferromagnet</i> (a) Keadaan Demagnetisasi (b) Termagnetisasi Sebagian	11
Gambar 2.7	Rasio Rugi Arus Eddy pada Dinding <i>Domain</i> terhadap Rugi Daya Arus Eddy Klasik P/P_s sebagai Fungsi dari Jarak Dinding <i>Domain</i> Jarak L Relatif terhadap Ketebalan Lapisan d	12
Gambar 2.8	(a) <i>Plot Nyquist</i> yang diperoleh dari Data Impedansi. (b) Rangkaian Sederhan Yang diperoleh dari Gambar (a)	15
Gambar 2.9	(a) <i>Plot Nyquist</i> yang diperoleh dari data Impedansi (b) Rangkaian <i>Ekivalen</i> Seri Sederhana yang diperoleh dari Gambar (a)	16
Gambar 2.10	Sinar X yang Terdifraksi oleh Bidang Kristal Material	16
Gambar 2.11	Intensitas yang Terukur oleh Detektor hasil Difraksi oleh Bidang Kristal	17
Gambar 2.12	Pola-Pola Intensitas terhadap Posisi Sudut <i>Bragg</i> yang Menunjukkan Bidang-Bidang yang Mendifraksikan Sinar X yang Datang Pada Bidang	17
Gambar 2.13	Diagram Grafik Sinar X Pada Kristal Tunggal	18
Gambar 2.14	Pengaruh Posisi Atom Pada Perbedaan <i>Fase</i> Sinar X Terdifraksi	19
Gambar 3.1	Peralatan RLC meter untuk Pengukuran Impedansi	31
Gambar 4.1	Puncak Intensitas Pola Difraksi Sinar X Pada FeSi dengan <i>As cast</i>	32
Gambar 4.2	Puncak Intensitas Pola Difraksi Sinar X Pada FeSi yang Diannealing	33
Gambar 4.3	Fotomikro FeSi -1 <i>As cast</i>	37
Gambar 4.4	Fotomikro FeSi-2 <i>As cast</i>	37
Gambar 4.5	Fotomikro FeSi-3 <i>As cast</i>	38
Gambar 4.6	Fotomikro FeSi-4 <i>As cast</i>	38
Gambar 4.7	Fotomikro FeSi-1 <i>Anneal</i>	38

Gambar 4.8	Fotomikro FeSi-2 <i>Anneal</i>	38
Gambar 4.9	Fotomikro FeSi-4 <i>Anneal</i>	38
Gambar 4.10	Nyquist Plot untuk variasi Si Pada Kondisi <i>As cast</i> dan <i>Anneal</i>	39
Gambar 4.11	Nyquist Plot untuk variasi Si 1- 4% Pada Kondisi <i>As cast</i> dan <i>Anneal</i>	39
Gambar 4.12	Impedansi Imajiner Terhadap Perubahan Frekuensi Pada Kondisi <i>As cast</i> dan <i>Anneal</i>	41
Gambar 4.13	Impedansi Imajiner Terhadap Perubahan Frekuensi untuk Variasi dengan Kurva Fe Murni Si Pada Kondisi <i>As cast</i> dan <i>Anneal</i>	41
Gambar 4.14	Grafik Gradien $2\pi L$ Terhadap Si 1-4% <i>As cast</i> dan <i>Anneal</i>	42
Gambar 4.15	Grafik Induktansi L terhadap Si 1-4% <i>As cast</i> dan <i>Anneal</i>	43
Gambar 4.16	Impedansi Real Terhadap Perubahan Frekuensi Si Pada Kondisi <i>As cast</i> dan <i>Anneal</i>	44
Gambar 4.17	Impedansi Real Terhadap Perubahan Frekuensi untuk variasi Si Pada Kondisi <i>As cast</i> dan <i>Anneal</i> dibandingkan dengan kurva Fe murni	45
Gambar 4.18	Grafik Resistivitas terhadap variasi Si dengan tegangan 1 volt Pada Kondisi <i>As cast</i> dan <i>Anneal</i>	47

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Impedensi dari komponen listrik.....	14
Tabel 3.1.	Komposisi FeSi dengan variasi massa Fe.....	26
Tabel 4.1.	Parameterkisi untuk Si 1-4% pada, Kondisi <i>As cast</i> dan <i>Anneal</i>	36
Tabel 4.2.	Gradien untuk Si 1-4% pada kondisi, <i>As cast</i> dan <i>Anneal</i>	42
Tabel 4.3.	Resistiviltan untuk Si 1-4% pada kondisi, <i>Anneal</i> dengan teggang 1 <i>Volt</i>	46
Tabel 4.4.	Resistivitasi intuk Si 1-4% pada kondisi, <i>As cast</i> dengan teggang 1 <i>Volt</i>	46



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Aplikasi material softmagnetik umumnya secara eksklusif diasosiasikan pada kemampuannya untuk meningkatkan *fluks* magnet secara signifikan, cepat dan mudah dengan pemberian arus listrik pada *elektromagnet*. Penggunaan bahan *softmagnetik* sangat terkait dengan aplikasi-aplikasi kelistrikan seperti: Generator listrik, inductor, relay, transformator dan sebagainya. Salah satu parameter yang paling penting dari sebuah material magnet untuk aplikasi arus/tegangan AC seperti transformator adalah kerugian *core* atau *core loss*, kerugian ini terutama disebabkan oleh *hysterisis* (*hysterisis loss*) dan arus Eddy (*Eddy Current Loss*). Untuk meminimalkan kerugian ini, bahan *soft magnetik* haruslah memiliki koersivitas sekecil mungkin dan permeabilitas setinggi mungkin. Sedangkan *Eddy Current Loss* bergantung pada frekuensi sumber arus listrik yang digunakan dan resistivitas material *softmagnet* tersebutnya.

Alloy FeSi umum digunakan sebagai *Core Transformer* (inti transformator), dikenal sebagai *electric steel*. Aplikasi penggunaannya pada alat listrik dengan tegangan listrik AC pada frekuensi rendah 50-60 Hz menyebabkan arus Eddy di dalam inti transformer. Komposisi prosentasi Si dalam *alloy FeSi* berpengaruh pada resistivitas listriknya yang bertambah secara proporsional dengan jumlah % at. Si. Selain itu, Si juga dapat mengurangi efek magnetostriksi dan *anisotropy magneto crystalin*. Penambahan silikon yang terlalu banyak akan menyebabkan material menjadi rapuh dan sulit untuk di produksi dan secara praktek maksimum hanya 4 % at Si yang dapat ditambahkan.

Pada penelitian ini akan dianalisis bagaimana pengaruh penambahan Si dalam *alloy FeSi* terhadap sifat listriknya. Sifat listrik yang diukur terkait dengan aplikasi *alloy FeSi* sebagai inti transformator yang memunculkan adanya kerugian akibat arus Eddy, yaitu impedansi listrik sebagai fungsi frekuensi $z = z(f)$ dan resistivitas listriknya.

1.2 . Batasan Masalah

Penelitian yang dilakukan mulai dari preparasi *alloy* FeSi dengan komposisi Si = 1,2,3 dan 4 % at. dengan kemurnian masing-masing Fe > 99,97 % dan Si = 99,9999 %. Preparasi *alloy* FeSi dilakukan dengan metode *arc melting* dalam kondisi *Argon*. *Alloy* FeSi kemudian di anil pada temperatur 800 C selama 1 jam. Respon AC terhadap sifat listrik FeSi dianalisis dengan menggunakan alat RCL meter sebagai fungsi dari frekuensi dan amplitudo/tegangan listrik. Untuk mengetahui struktur kristal, parameter kisi dan ukuran kristal (*grain*) sampel di gunakan XRD dan Fotomikro.

1.3 . Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

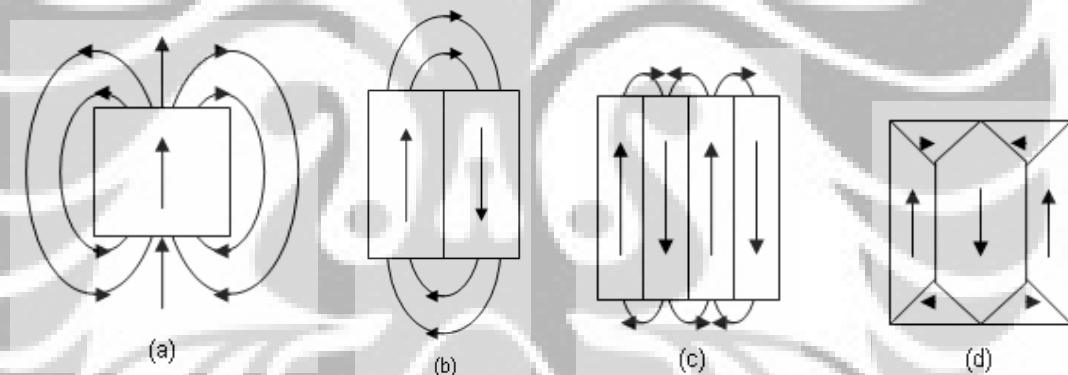
1. Mempreparasi bahan *magnetic* FeSi dengan komposisi Si = 1% sampai 4% at. ($\text{Fe}_{100-x}\text{Si}_x$).
2. Mengkarakterisasi spektroskopi impedansi bahan *magnetic* FeSi dengan Z sebagai fungsi frekuensi $Z=Z(f)$.
3. Mempelajari efek penambahan Si dan aniling terhadap impedansi dan resistivitas *alloy* FeSi.

BAB 2

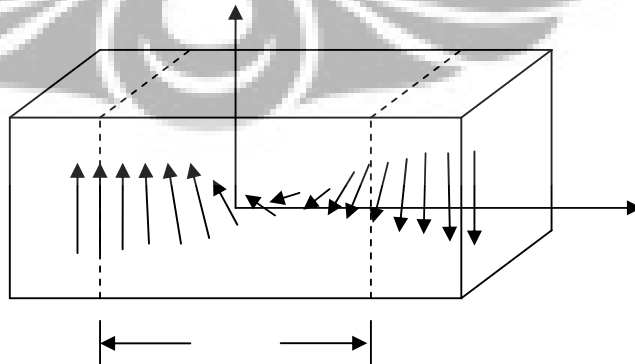
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sifat-sifat Magnetik Besi

Salah satu sifat dasar dari bahan *ferromagnet* seperti Fe adalah memiliki magnetisasi spontan M_s yang bergantung pada temperatur T atau $M_s(T)$. Jika Fe dipanaskan sampai diatas temperatur *Curie* maka magnetisasi spontan menghilang dan Fe menjadi paramagnet karena momen magnetnya menjadi terorientasi secara acak. Jika temperaturnya diturunkan dibawah temperature *Curienya* maka magnetisasi spontan pada Fe muncul kembali dengan intensitas yang sama, dengan anggapan tidak ada perubahan struktur atau perubahan kimia selama pemanasan.



Gambar-2.1. Pembentukan struktur domain karena penurunan energi magnetostatik.



Gambar-2-2. struktur magnet dari domain dengan sudut 180° .

Walaupun Fe memiliki magnetisasi spontan di bawah temperatur *Curie* tetapi secara makroskopik Fe tidak menunjukkan adanya magnetisasi atau $M=0$. Hal ini dikarenakan adanya domain-domain magnet, yaitu daerah dimana orientasi momen dipol magnetnya searah. Sedangkan antar domain sendiri orientasi momen dipol magnetnya acak sehingga secara makro menghasilkan magnetisasi nol. Pada Gambar 2.1 dan Gambar 2.2 terlihat struktur *domain* dan perilaku dari *domain walls* dalam pengaruh medan magnet luar H . Perilaku domain dan *domain walls* sangat penting dalam memahami sifat-sifat magnet bahan ferromagnet dan ferrimagnet.

2.2 Persyaratan Bahan Inti Transformer

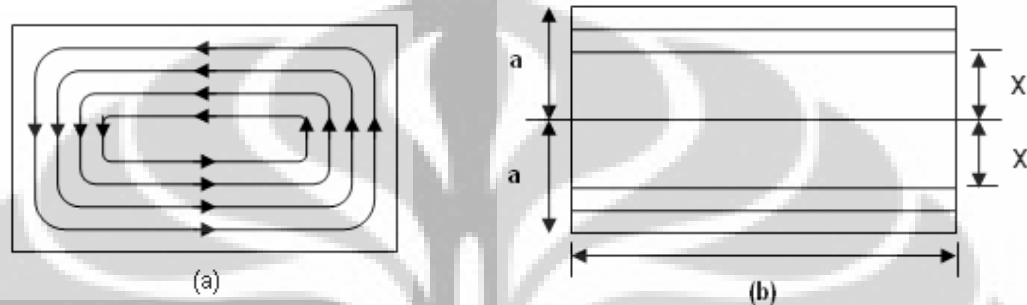
Transformer terdiri dari dua kumparan penghantar listrik yaitu primer dan *sekunder*. Kumparan digulung didalam cincin tertutup yang terbuat dari material berpermeabilitas tinggi. Cincin ini biasa disebut *core*/inti transformer. Besi merupakan penghantar listrik yang baik dan mempunyai permeabilitas tinggi. Fungsi dari inti besi adalah untuk mentransfer *fluks* magnet maksimum dari kumparan primer ke sekunder dengan perubahan arus minimum pada kumparan primer. Persyaratan dasar untuk bahan inti transformer yang *efisien* yaitu harus memiliki polarisasi magnetik jenuh, M_s dan permeabilitas yang tinggi serta dikombinasi dengan resistivitas listrik tinggi untuk menurunkan *eddy current loss*.

2.2.1 Kerugian Hysterisis (*Hysterisis Los*)

Bentuk dan bidang *loop* histerisis statik merupakan pedoman bila dilihat dari keserasian bahan untuk inti transformer. *Histerisis loop* yang menutupi bidang minimum adalah yang paling baik untuk praktek akan tetapi harus memiliki polarisasi magnetik jenuh yang tinggi sehingga dapat memberikan *fluks* magnetik maksimum untuk volume bahan minimum. Jika kedua persyaratan ini terpenuhi, maka koersivitas akan rendah. Bahan inti transformer yang kita perlukan yaitu yang memiliki permeabilitas tinggi, magnetisasi jenuh tinggi, dan koersivitas rendah, sehingga memungkinkan *histerisis loop* menutupi bidang paling kecil.

2.2.2 Kerugian Arus Eddy (*Eddy Current Loss*)

Bahan inti adalah penghantar listrik dan dikenai medan arus bolak-balik, perubahan *fluksnya* pada bahan dapat menginduksi arus Eddy. Arus Eddy dibangkitkan melalui tahanan dari bahan inti dan karena itu merupakan “rugi bersih listrik” sebagai panas ($I^2 R$ J/s pada intinya). Lihat Gambar-2.3:



Gambar-2.3. (a) Penampang lintang dari bahan inti transformer, memperlihatkan arah arus eddy. (b) penyederhanaan jalur arus eddy (bidang gelap) pada bahan inti transformer.

Kerapatan *fluks* (B) sebagai fungsi waktu t , diberikan oleh:

$$B = B_m \sin \omega t \quad 2-1.$$

Ω = frekuensi sudut.

B_m = kerapatan fluks maksimum (weber/m²).

$$B_m = J_s + \mu_0 H \quad 2-2.$$

Dimana :

μ_0 = permeabilitas ruang hampa (weber/Amp.m) (N/A²).

J_s = polarisasi magnet.

H = kuat medan magnet (intensitas) (Amp/m).

Di dalam besi harus di bedakan antara B dan H . Di besi H di pandang sebagai penyebab induksi magnetik, kalau di udara tidak ada perbedaan antara B dan H . Jadi $B = H$ atau $\mu_0 = 1$.

Karena perubahan *fluks* tegak lurus dengan penampang lintang, pada gambar arus Eddy ditunjukkan dengan garis panah.

Anggap arusnya mengalir pada dua garis plat tipis dengan lebar δx dan tinggi (kedalaman) sama dengan l , maka tahanan arus (R) untuk inti Fe-Si sekitar:

$$R = \frac{2l}{I} \rho = 2\rho l / \delta x \quad (\Omega) \quad 2-3.$$

Jumlah *fluks* (Φ) dengan *flux/weber* satuan yang ditutupi oleh *loop* arus Eddy adalah:

$$\Phi = 2 \times l B_m \sin \omega t \quad 2-4.$$

Karena bidang yang ditutupi adalah $2xl$ dan kerapatan fluks (B) pada waktu t adalah $B_m \sin \omega t$, dari hukum *Faraday-Lenz* tentang induksi elektromagnet, perubahan *fluks* adalah:

$$V = \frac{d\Phi}{dt} = -2 \times l B_m \cos \omega t \quad 2-5.$$

Maka kerugian Daya:

$$\begin{aligned} P &= \frac{v^2}{R} = \frac{(-2xlB_m \cos \omega t)^2}{R} \\ &= \frac{4x^2 l^2 B_m^2 \cos^2 \omega t}{2\rho l} \\ P &= \frac{2x^2 l B_m^2 \cos^2 \omega t}{\rho} \end{aligned} \quad 2-6.$$

Rata-rata kerugian Daya:

$$\delta P = I \omega^2 B_m^2 x^2 \frac{\delta x}{\rho} \quad 2-7.$$

karena $\cos^2 \omega t = 1/2$

δP = kerugian daya (watt/s) untuk satu putaran arus Eddy, sehingga untuk seluruh lintasan arus dayanya adalah:

$$\begin{aligned} P &= \int_0^a I \omega^2 B_m^2 x^2 \delta x \\ P &= \frac{I \omega^2 B_m^2 a^3}{3\rho} \end{aligned}$$

Karena volume = $2 a l \times l = 2 a l$

Maka kerugian daya per unit adalah $\frac{P}{2al} = P_e$

$$\begin{aligned}
P_e &= \frac{I\omega^2 B^2 ma^3}{3\rho} / 2al \\
&= \frac{14\pi^2 f^2 B^2 ma^2}{6\rho} \quad \text{dengan } \omega^2 = 4\pi^2 f^2 \\
&= \frac{2\pi^2 f^2 B^2 ma^2}{3\rho}
\end{aligned}
\tag{2-8}$$

Dimana :

- f = frekuensi (*Hertz*).
- B_m^2 = kerapatan fluks maksimum (*weber/m²*).
- a = tebal penampang (m).
- ρ = resistivitas (*ohm/m*).

Persamaan 2-8 harus dianggap sebagai pendekatan, dengan asumsi sebagai berikut:

1. Bahwa kerapatan *fluks* tidak dipengaruhi oleh arus Eddy, hal ini terjadi jika materialnya sangat tipis dengan frekuensi rendah.
2. Bahwa permeabilitas dari bahan inti konstan di seluruh siklus dan merata di seluruh siklus dan volume.

Telah diketahui bahwa Fe-Si mempunyai bidang, dimana bahan magnetisnya tidak sama, maka reaksi medan terhadap sudut tertentu pada bahan, sangat tergantung pada struktur dan orientasi bidang lokal. Jadi *Eddy Current* tergantung pada sifat-sifat permeabilitas dan *histerisis* bahan. Begitu pula sifat *histerisis* tergantung pada perubahan magnet yang dihasilkan arus Eddy.

Kesimpulan dari kerugian arus Eddy:

1. Berbanding lurus dengan pangkat dua frekuensi f^2
2. Berbanding dengan pangkat dua ketebalan benda a^2
3. Berbanding terbalik dengan tahanan ρ^{-1}

Frekuensi ditentukan oleh frekuensi daya, maka rugi arus Eddy akan berkurang, jika resistivitasnya tinggi dan intinya dilapisi atau diberi lembaran. Penurunan persamaan selanjutnya adalah jika lembaran satu dengan lembaran

lainnya disekat dari pengaruh listrik, maka penyekatan/lapisan akan menghilangkan arus Eddy yang berbanding lurus dengan lapisan. Jika balok dengan ketebalan 2α dengan N lapisan, maka lembaran/tebalnya menjadi $\frac{2\alpha}{N}$, sehingga kerugian arus Eddy sekitar:

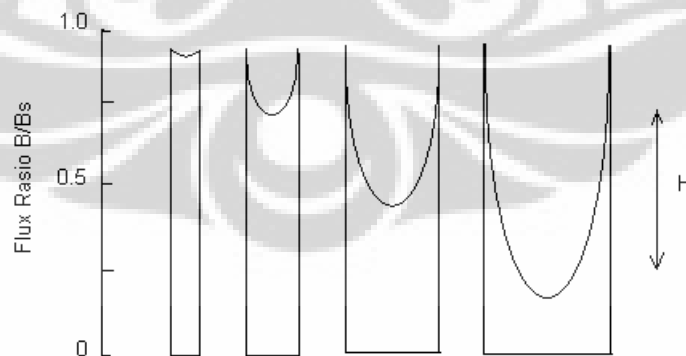
$$P = I \omega^2 B_m^2 \frac{a^3}{N^3} \frac{N}{3\rho}$$

$$P = \frac{4\pi^2 f^2 l B^2 m a^3}{3N^2 \rho} \quad (21a)$$

$$P = \frac{4\pi^2 f^2 B^2 m a^2}{3N^2 \rho} \dots \frac{1}{N^2} \quad 2-9.$$

Jadi pada lapisan dari intinya dapat menurunkan kerugian arus Eddy dengan faktor $\frac{1}{N^2}$.

Kita ketahui bahwa arus Eddy itu sendiri dapat membentuk medan magnetik yang bertentangan dengan medan yang dipakai (*Hukum Lenz*) dan menyebabkan kerapatan *fluks*. Kerapatan *fluks* dapat mengurangi kerugian arus Eddy secara progresif dari permukaan sampai lapisan bagian tengah (*O.Kelly* 1975) [10]. Pada Gambar-2.4 terlihat penetrasi *fluks* pada bahan inti transformer untuk berbagai ketebalan lapisan.



Gambar-2.4. Penetrasi fluks pada bahan inti transformer sebagai fungsi dari ketebalan lapisan. Penetrasi fluks digambarkan sebagai fraksi dari nilai maksimum pada permukaan lapisan.

Pada gambar 2-4 perbandingan *fluks* dan ketebalan lapisan, terlihat bahwa jika lapisan (*sheet*) tebal dan volume besar maka pada bagian tengah untuk perpindahan *fluks* tidak efisien karena itu untuk memaksimalkan penggunaan bahan yang efisien, kita harus memilih ketebalan kecil (tipis) agar memperoleh kemudahan menggulung juga penggunaan menjadi mekanis dan stabilitas. Kerugian listrik dapat dikurangi dengan menurunkan kerapatan *fluks* maksimum (B_m) tetapi ini akan menjadi kekalahan sendiri, karena fungsi dari bahan adalah untuk memberikan sebanyak mungkin *fluks*.

2.3 Struktur fasa dan pengaruh karbon

Kita memerlukan suatu fasa untuk mencapai titik lebur dari suatu bahan, karena itu kita harus memilih campuran dengan kandungan Si lebih besar dari 3 %, campuran yang mendekati komposisi ini (Si lebih besar 3%) dapat di rekristalisasi pada temperatur tinggi tanpa terjadi perubahan fasa pada saat pendinginan. Ini sangat penting, karena adanya fasa γ non-ferromagnetik yang bertindak sebagai hambatan terhadap pergerakan dinding *domain* (*domain wall*), dan ini dapat meningkatkan nilai koersifitas dan mobilitas dinding *domain*.

Sifat penting lainnya dari Fe-Si yaitu, adanya impuritas yang mengubah ujung *loop*. Dua alasan penting untuk menurunkan pengaruh karbon:

1. Untuk penambahan % karbon terjadi pengurangan polarisasi magnetik yang besarnya sepuluh kali lebih besar daripada pengurangan polarisasi magnetik jenuh (untuk penambahan % silikon).
2. Karbon diendapkan sebagai karbon besi, dan endapan ini akan bertindak sebagai *domain wall* yang menumpu pada bidang, sehingga menghalangi gerak dinding *domain* yang menyebabkan kerugian daya dan histerisis menjadi lebih besar.

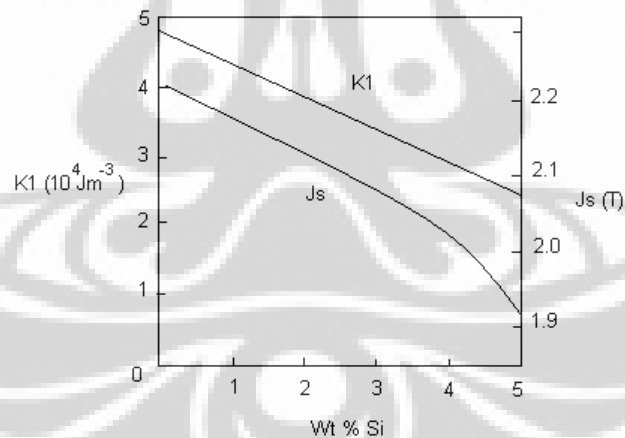
2.4 Pengaruh ukuran butir berdasarkan kerugian histerisis dan arus eddy

Kenaikan ukuran butir umumnya menguntungkan tetapi untuk ukuran butir 1-5 mm menunjukkan kerugian histerisis naik seiring dengan ukuran butir []. Ukuran butir yang besar dapat meningkatkan kerugian yang besar juga, hal ini disebabkan terjadi perubahan magnet yang berarti bahwa sejumlah kecil dinding

domain harus dipindah, perpindahan atau pergerakan dinding ini dapat menyebabkan arus mikro eddy. Akan tetapi jika ukuran butir terlalu kecil, ada kelebihan dinding dan bidang batas butir naik. Ini akan menghalangi pergerakan dinding dan dapat meningkatkan kerugian *histerisis*. Melalui berbagai penelitian yang dilakukan *Dragonshansky* (1972), *Shilling* (1970) dan *Nozawa* (1978) [11] telah memperlihatkan bahwa rugi arus eddy pada kristal tunggal (campuran Fe-Si) lebih tinggi dibandingkan pada bahan yang mengandung butiran. Jadi jelas bahwa batas-batas butiran bertindak sebagai bidang nukleasi.

2.5 Pengaruh penyekat pada sifat-sifat magnetik

Fungsi utama penyekat terhadap lapisan yaitu untuk mengurangi arus eddy yang mengalir searah bidang lapisan. *Coating* pada silikat magnesium dan *fosfat* memiliki koefisien lebih kecil dari kontraksi termal Fe-Si, dan oleh karena itu menghasilkan tegangan-regangan bila didinginkan dari pemanasan yang memiliki temperatur tinggi.

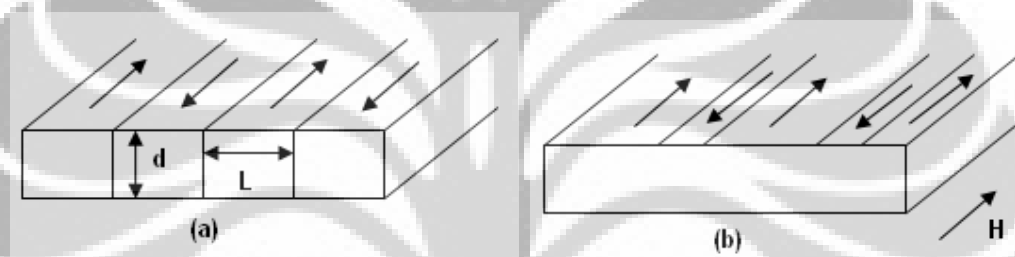


Gambar-2.5. ketergantungan konstanta magnetostriksi saturasi pada pemberian Tekanan.

Pada gambar 2.5 adanya *coating* ini dapat menurunkan sifat magnetostriksi [11]. Dan karena tekanannya *longitudinal* maka campurannya membentuk dinding *domain* berputar arah 180° dan dengan demikian permeabilitas meningkat.

2.6 Kerugian energi listrik pada transformer

Secara umum apa yang disebut “keganjilan” atau arus eddy berlebihan terkait dengan magnetisasi siklik atau lapisan inti transformer. Hal ini dapat dicirikan pada arus eddy mikro yang diinduksi oleh gerakan masing-masing dinding *domain*. Penjelasan secara rinci tentang pengaruh gerakan dinding *domain* telah diupayakan oleh beberapa peneliti dan model yang dipakai secara universal yaitu *Pry* dan *Bean* (1956), walaupun mirip dengan model *Lee* (1958) dan *Carr* (1959) yang juga menganggap dinding *domain* tegak lurus dengan lapisan ferromagnetik [11]. Pada gambar-2.6.



Gambar-2.6. magnetisasi oleh pergeseran dinding domain sederhana didalam lapisan tipis ferromagnet (a) keadaan demagnetisasi (b) termagnetisasi sebagian.

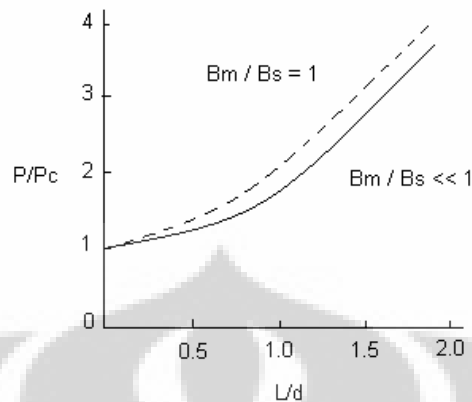
Menurut *Pry* dan *Bean*, gerakan dinding domain dan *eddy current loss* menyebabkan terjadinya rugi daya, rasio dari rugi daya adalah :

$$\frac{P}{P_c} = \frac{48L}{\pi^3 d} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \coth \frac{n\pi L}{2d} \quad 2-10.$$

misalkan luas suatu bidang ($L/d \gg 1$), persamaannya menjadi :

$$\frac{P}{P_c} = 1,628 \frac{L}{d} \quad \text{lihat Gambar-2.7}$$

P/P_c naik seiring dengan kenaikan L/d .



Gambar-2.7. Rasio rugi daya-arus eddy pada dinding domain terhadap rugi daya arus eddy klasik. P/P_e sebagai fungsi dari jarak dinding domain jarak L relatif terhadap ketebalan lapisan d .

Walaupun model *Pry* dan *Bean* cocok dengan perilaku bahan inti transformer, tapi ada satu keterbatasan yaitu bahwa dianggap dinding *domain* tetap *rigid* pada siklus magnet, hal ini ditegaskan oleh *Lee* (1960) dan *Overshoot et, Al* (1966) bahwa perubahan magnet terjadi oleh arah dan perpindahan dinding *domain*. Teori penentuan arah dinding telah diteliti oleh *Bishop*, *Carr* dan *Boon* serta *Robey* [14].

Dapat kita simpulkan bahwa total rugi inti dibagi menjadi dua komponen yaitu *histerisis loss* dan *eddy current loss*. Maka sifat-sifat fisik yang menentukan kerugian dapat diringkas sebagai berikut :

- a. Rugi *histerisis*
 1. orientasi kristal.
 2. kemurnian (endapan).
 3. tekanan internal.
 4. kondisi permukaan.
- b. Rugi arus eddy
 1. tahanan listrik (mengandung silikon).
 2. ketebalan lapisan.
 3. ukuran bidang dan ukuran butir.
 4. tekanan regang elastis (lapisan permukaan).

2.7 Spektroskopi Impedansi

Pada dasarnya, prinsip pengukuran impedansi suatu material sangat sederhana yaitu dengan memberikan sinyal tegangan AC pada material yang akan diteliti, kemudian mengukur kuat arus yang mengalir pada material tersebut. Konsep impedansi listrik pertama kali diperkenalkan oleh *Oliver Heaviside* pada tahun 1880 dan kemudian dikembangkan dalam bentuk *diagram vektor* dengan representasi kompleks oleh *A. E. Kennelly* dan *C. P. Steinmets* [1]. Konsep tahanan listrik merupakan kemampuan dari elemen rangkaian dalam menahan aliran arus listrik.

Dalam teori AC dimana tahanan yang memiliki frekuensi, didefinisikan sebagai *Hukum Ohm*:

$$E = I.R$$

$$R = \frac{E}{I} \quad 2-11$$

Persamaan ini sudah dikenal penggunaannya terbatas hanya pada satu elemen rangkaian-tahanan yang ideal.

Tahanan yang ideal memiliki beberapa sifat :

1. Mengikuti *Hukum Ohm* pada semua tingkat arus dan tegangan.
2. Nilai tahanannya bebas dari frekuensi.
3. Tanda arus AC dan tegangan yang melalui tahanan berada pada *fase* yang sama.

Dalam dunia nyata, elemen rangkaian memperlihatkan banyak perilaku kompleks. Dan ini memaksa kita harus meninggalkan konsep tahanan sederhana. Impedansi merupakan sebuah konsep yang lebih umum dari resistansi, karena diperhitungkan juga mengenai perbedaan fasa antara arus dan tegangan. Oleh karena itu, impedansi dapat didefinisikan sebagai nilai resistansi kompleks dari suatu rangkain listrik sebagai respon terhadap tegangan listrik AC pada rangkaian tersebut. Impedansi merupakan fungsi frekuensi, yaitu besar kecilnya nilai impedansi suatu rangkain bergantung pada frekuensi tegangan yang diberikan. Impedansi merupakan fungsi yang kompleks, tegangan yang diberikan pada suatu rangkaian dinyatakan sebagai :

$$E_t = E_0 e^{j\omega t} \quad 2-12$$

Dan reaksi arusnya dinyatakan sebagai :

$$I_t = I_0 e^{j\omega t - \Phi} \quad 2-13$$

Maka nilai impedansinya digambarkan sebagai bilangan kompleks :

$$Z(\omega) = \frac{E_t}{I_t} = Z_0 e^{i\Phi} = Z_0 (\cos \Phi + i \sin \Phi) \quad 2-14$$

Persamaan 2-14, untuk $Z(\omega)$ tersusun dari bilangan *riil* dan *imaginer*. Jika bagian *riil* digambarkan sebagai sumbu x dan bagian imajiner pada sumbu y, maka akan didapatkan

“nyquist plot” (lihat Gambar-2.8).

Dengan:

$$Z' = \text{Re}(Z) = Z_0 \cos \theta$$

$$Z'' = \text{Im}(Z) = Z_0 \sin \theta$$

Dimana:

$$Z_0 = |Z| = \left[(Z')^2 + (Z'')^2 \right]^{1/2}$$

$$\theta = \tan^{-1} (Z''/Z')$$

Untuk menentukan nilai dari komponen-komponen listrik yang memberikan peranan terhadap nilai impedansi yang terukur, maka harus diketahui bagaimana hubungan komponen-komponen listrik tersebut terhadap nilai impedansi. Komponen listrik yang berperan adalah *resistor*, kapasitor dan *induktor*. Hubungan ketiga komponen listrik tersebut terhadap nilai impedansi, dapat dilihat pada tabel 2.1

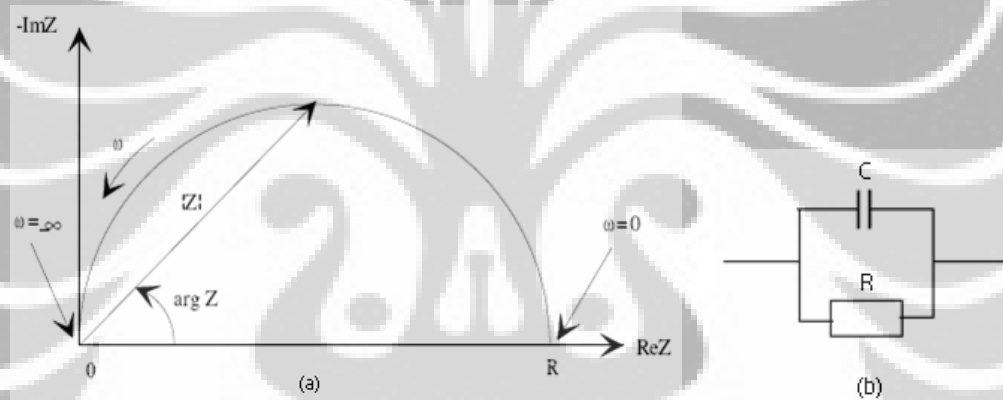
Komponen	Hubungan Arus dan tegangan	Impedansi
Resistor (R)	$V = I \cdot R$	$Z = R$
Kapasitor (C)	$I = C \cdot \frac{dV}{dt}$	$Z = \frac{1}{i\omega C}$
Inductor (L)	$V = L \cdot \frac{dI}{dt}$	$Z = i\omega L$

Tabel 2.1 Impedansi dari komponen listrik

Pada tabel di atas terlihat bagaimana hubungan masing-masing komponen terhadap nilai impedansi. Data akan menjadi dasar untuk membuat suatu permodelan rangkaian listrik ekuivalen pada material dan pengolahan data hasil pengukuran Impedansi Spektroskopi untuk mengetahui sifat kelistrikan material.

Gambar *nyquist plot* memiliki satu kelemahan utama, bila kita melihat pada titik data tersebut kita tidak tahu berapa frekuensi yang digunakan untuk titik tersebut. Pengukuran impedansi yang dilakukan pada tesis ini adalah material Fe 99.99% (besi) dengan variasi Silikon yang berbeda (1%-4%) dengan frekuensi yang berbeda-beda pula (1MHz – 600KHz).

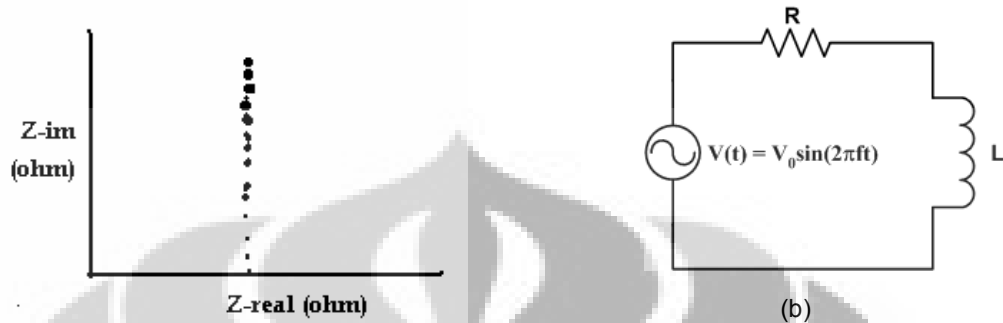
Permodelan Rangkaian Ekuivalen



Gambar-2.8. (a) Plot Nyquist yang diperoleh dari data impedansi. Setengah lingkaran merupakan ciri dari “konstanta waktu” tunggal. (b) Rangkaian ekuivalen sederhana yang diperoleh dari gambar (a).

Untuk menyelesaikan pengolahan data dan analisis data, permodelan rangkaian listrik merupakan salah satu hal yang sangat penting, karena macam informasi mengenai sifat kelistrikan dan mekanisme yang terjadi pada material dapat diketahui melalui bentuk model rangkaian dan nilai dari masing-masing komponennya [4]. Komponen-komponen tersebut (tabel 2.1) dapat disusun secara seri dan paralel. Pada gambar 2.8 (a) dan (b) adalah salah satu contoh model rangkaian listrik sederhana yang terdiri dari komponen R dan C yang disusun secara paralel. Di dalam rangkaian tersebut, resistansi menyatakan aliran konduktif, dan resistor menyatakan sebagai konduktivitas material sedangkan

kapasitansi dan induktansi dengan daerah polarisasi muatan serta proses di elektroda



Gambar-2.9. (a) Plot Nyquist yang diperoleh dari data impedansi. (b) Rangkaian ekivalen seri sederhana yang diperoleh dari gambar (a).

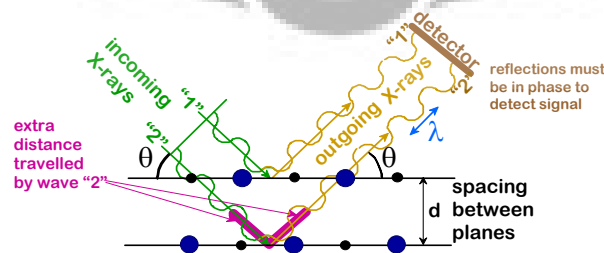
Apabila suatu material memiliki model rangkaian listrik seperti gambar 2.9(b) maka pengukuran Spektroskopi dengan menggunakan EIS *Spectrum Analyser* diperoleh bentuk tampilan grafik *cole-cole* plot seperti pada gambar 2.9 (a). Permodelan rangkaian yang digunakan pada penelitian ini adalah rangkaian seri.

2.8 DIFRAKSI SINAR-X

2.8.1 HUKUM BRAGG

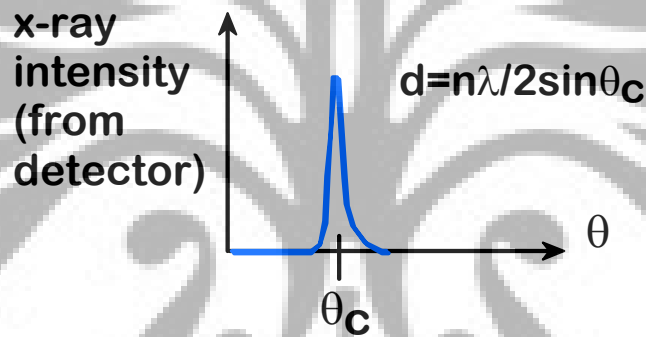
Atom-atom didalam kristal tiga dimensi berada pada bidang-bidang. Bidang-bidang atom ini disebut juga sebagai bidang-bidang kisi. Bidang-bidang ini dicirikan melalui *indeks Miller* (hkl). Sinar-X yang terdifraksi oleh bidang kristal (Gambar-2.10) mengikuti suatu hukum *Bragg* yang dirumuskan sebagai:

$$2d \sin(\theta) = n\lambda$$

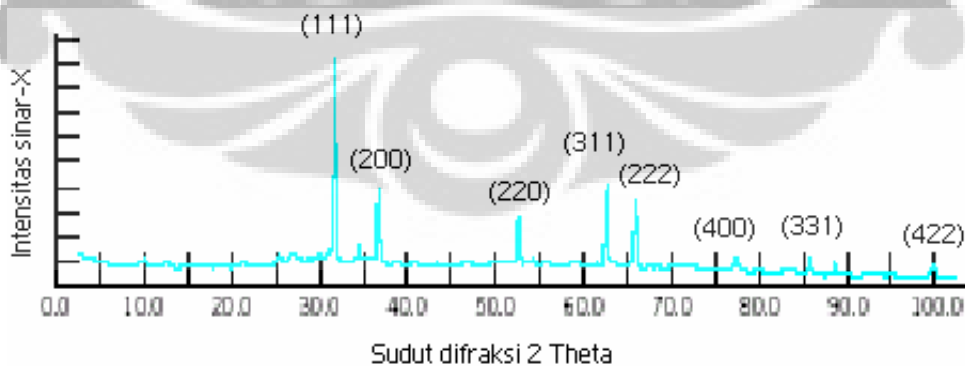


Gambar-2.10 Sinar-X yang terdifraksi oleh bidang kristal material (12)

Intensitas hasil difraksi akan tertangkap oleh detektor pada sudut-sudut tertentu (sudut difraksi /sudut *Bragg*) seperti yang diperlihatkan oleh Gambar-2.11. Untuk bahan polikristal akan diperoleh sederetan puncak-puncak difraksi (Gambar-2.12). Sehingga berdasarkan hukum *Bragg*, pola-pola intensitas yang terjadi menandakan bidang-bidang kristal yang mendifraksikan intensitas sinar-X yang datang. Pola-pola intensitas senyawa yang ada didunia ini, sebagian telah berhasil diidentifikasi oleh orang yang kemudian disimpan dalam bentuk data difraksi yang sering disebut sebagai data ICDD (*International Centre for Diffraction Data*).



Gambar-2.11. Intensitas yang terukur oleh detektor hasil difraksi oleh bidang kristal



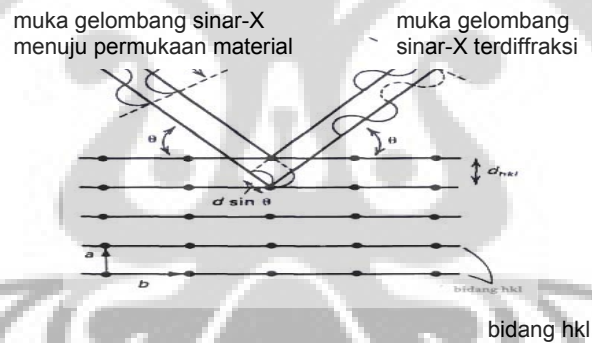
Gambar-2.12. Pola-pola intensitas terhadap posisi sudut Bragg yang menunjukkan bidang-bidang yang mendifraksikan sinar-x yang datang pada bidang.

2.8.2 Metode Difraksi Sinar-X

Bila sinar-X jatuh pada kisi kristal akan didifraksikan oleh kisi tersebut. Ini berarti sinar yang sefasa akan mengalami penguatan dan yang berlainan fasa akan saling meniadakan. Hasilnya adalah setiap kumpulan bidang kisi akan memantulkan sinar-X dengan intensitas tertentu. Menurut *Bragg* sinar yang datang dengan sudut θ akan dipantulkan oleh bidang kisi dengan persamaan.

$$2d_{(hkl)} \sin \theta_{(hkl)} = n\lambda \quad 2.15$$

Persamaan ini memberikan hubungan antara jarak antara bidang kisi $d_{(hkl)}$ dan sudut datang $\theta_{(hkl)}$ di mana radiasi pantulannya menunjukkan intensitas maksimum untuk panjang gelombang (λ) tertentu. Bila λ lebih besar dari $2d$ maka tidak ada penyelesaian untuk n atau tidak ada difraksi. Pemahaman atas hubungan antara parameter kisi (a) dan jarak antar bidang d_{hkl} dapat dilakukan melalui Gambar 2.13 berikut ini:

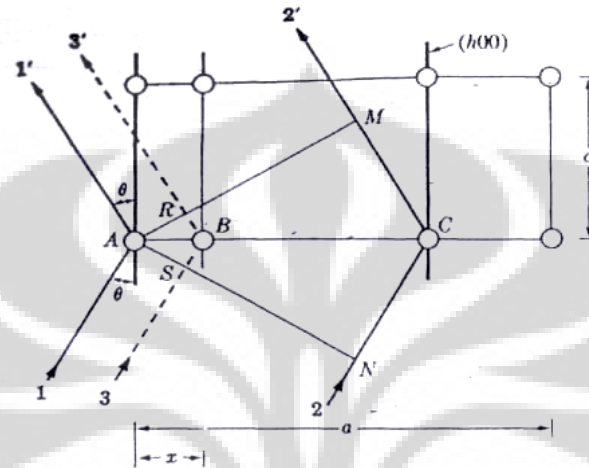


Gambar 2.13 Diagram difraksi sinar-X pada kristal tunggal.

Karena kristal memiliki banyak bidang kristal hkl dan tiap bidang dengan *indeks hkl* yang sama dipisahkan oleh jarak d_{hkl} maka jarak antara bidang yang berdekatan dan paralel merupakan fungsi *indeks Miller* dan parameter kisi yang nilainya bergantung pada struktur kristalnya. Untuk sistem kristal kubus dapat ditentukan dengan persamaan.

$$(d_{hkl})^2 = \frac{a^2}{h^2 + k^2 + l^2} \quad 2.16$$

Untuk menentukan intensitas sinar terdifraksi dilakukan dengan mengasumsikan bahwa sinar-X didifraksikan oleh unit sel atau sel satuan. Secara geometris diperlihatkan oleh Gambar 2.14 berikut ini.



Gambar 2.14 Pengaruh posisi atom pada perbedaan fase sinar-X terdifraksi (14)

Anggap A sebagai atom pusat yang terletak pada bidang $h00$ sehingga hukum Bragg dipenuhi pada bidang ini. Dengan demikian beda lintasan antara sinar $1'$ dan $2'$ adalah:

$$\delta_{2,1'} = MCN = 2d_{hkl} \sin\theta = \lambda$$

Berdasarkan definisi indeks Miller, diperoleh:

$$d_{hkl} = a \cdot h^{-1}$$

Analogi yang terjadi pada atom A akan berlaku sama pada atom B maka beda lintasan sinar $3'$ dan $1'$ adalah:

$$\delta_{3,1'} = RBS = (AB/AC) \lambda = [x/(a/h)] \lambda$$

Dalam hal ini beda fasa dinyatakan dalam sudut dan beda lintasan ditanyakan dalam panjang gelombang. Karena beda fasa ϕ dan beda lintasan δ memiliki hubungan persamaan $\phi = \frac{\delta}{\lambda} (2\pi)$, maka beda fasa gelombang terhambur oleh atom A dan B adalah:

$$\phi = \frac{\delta_{3,1'}}{\lambda} (2\pi) = \frac{2\pi hx}{a} = 2\pi hu \tag{2.17}$$

dengan u adalah posisi atom B dalam fraksi koordinat yaitu: $u = x/a$

Secara tiga dimensi atom B akan memiliki fraksi koordinat $\left(\frac{x}{a}, \frac{y}{b}, \frac{z}{c}\right) = (u, v, w)$. Maka beda fase atom B dan atom A dalam koordinat tiga dimensi x, y, z memenuhi persamaan.

$$\phi = 2\pi(hu + kv + lw)$$

Amplitudo gelombang oleh atom penghambur dinyatakan dengan f_j , sehingga faktor hamburan gelombang memiliki bentuk eksponensial:

$$Ae^{i\phi} = f e^{i(hu+kv+lw)}$$

Resultan dari semua gelombang terhambur oleh semua atom adalah faktor struktur (F) atom tersebut. Jika unit sel terdiri atas 1, 2, 3, ..., N atom maka faktor struktur yang diberikan oleh refleksi bidang hkl adalah:

$$F_{hkl} = \sum_1^N f_N e^{2\pi i(hu_n + kv_n + lw_n)}$$

atau dengan suku trigonometri.:

$$F_{hkl} = \sum_1^N f_N [\cos 2\pi(hu_n + kv_n + lw_n) + i \sin 2\pi(hu_n + kv_n + lw_n)]$$

Dimana:

$$a = \sum_1^N f_N [\cos 2\pi(hu_n + kv_n + lw_n)],$$

$$b = \sum_1^N f_N [\sin 2\pi(hu_n + kv_n + lw_n)], \text{ dan}$$

$$F = a + ib$$

Intensitas sinar terdifraksi oleh semua atom dalam sel satuan diperoleh dengan mengalikan nilai faktor kompleks dengan kompleks konjugatonya diperoleh:

$$[F]^2 = (a + ib)(a - ib) = a^2 + b^2 \quad 2.18$$

Analisa kuantitatif dengan difraksi sinar-x didasarkan fakta bahwa intensitas pola difraksi suatu fasa tertentu dalam campuran fasa-fasa tergantung pada konsentrasi dari fasa campuran tersebut. Hubungan antara intensitas dengan konsentrasi secara umum tidak linear, karena intensitas difraksi tergantung pada

koefisien penyerapan dari campuran dan variasi konsentrasi campuran tersebut. (Cullity,1978) Bentuk umum persamaan intensitas sinar terdifraksi pada material berfasa tunggal dengan metode difraktometer adalah:

$$I_{hkl} = \left(\frac{I_o A \lambda^3}{32\pi r} \right) \left[\left(\frac{\mu_o}{4\pi} \right)^2 \frac{e^4}{m^2} \left(\frac{1}{v^2} \right) \left(|F^2| P \left(\frac{1 + \cos^2 \theta}{\sin^2 \theta \cos \theta} \right) \right) \left(\frac{e^{-2M}}{2l} \right) \right]$$

Dengan I = intensitas terintegrasi per satuan panjang garis difraksi (*joule/sm*).

Lo = intensitas dari sinar yang datang (*joule/sm*).

A = luas daerah yang terkena sinar datang (m^2).

λ = panjang gelombang sinar-X (m).

r = jari-jari dari lingkaran difraktometer (m).

μ_o = $4\pi \times 10^7$ mkg⁻².

E = besaran muatan elektron (C).

M = massa elektron (kg).

v = volume sel satuan (m^3).

F = faktor stuktur.

P = faktor multiplisitas.

2.8.3 Analisis Kualitatif

Hasil pola difraksi sinar-X dianalisis secara kualitatif menggunakan *metode Hanawalt*. Analisis ini bertujuan mengetahui fasa pada sampel dan parameternya. Adapun langkah-langkah yang dilakukan adalah:

1. Mengurutkan nilai data *d* dan intensitas relatif dari zat yang tidak diketahui.
2. Menentukan tiga nilai intensitas terbesar, intensitas terbesar bernilai 100 pada nilai *d* tertentu, menunjukkan kelompok nilai pada buku Hanawalt. Setelah dipastikan kelompok nilai tersebut, maka nilai intensitas terbesar kedua yang dilihat. Kemudian melanjutkan dengan intensitas berikutnya. Dengan begitu kita dapat menemukan nama zat kimia tersebut berserta halaman PDF-nya serta tabel zat tersebut.

3. (Untuk menentukan zat yang tidak diketahui lebih jelas).
4. Membandingkan data d hasil percobaan dengan data d pada tabel. Kemungkinan kesalahan dalam setiap set nilai adalah kira-kira 0,01A.
5. Membandingkan juga intensitas relatifnya dengan nilai-nilai yang ada pada tabel.
6. Bila ada kesesuaian antara ketiga garis terkuat dengan data tabel dan membandingkan nilai d dibandingkan dengan nilai d serta nilai garis-garis yang lain. Jika inipun sesuai maka identifikasi pun selesai dilakukan. Setelah dianalisis secara kualitatif diperoleh *space group*, parameter sel, dan parameter atom.

2.8.4 Perhitungan Ukuran Butir (*Grain Calculation*)

Bentuk (tinggi dan lebar) puncak dari hasil difraksi sinar-X pada material selain memberikan informasi tentang fasa material, juga memberikan informasi mengenai ukuran osilasi termal atom-atom pada kisi kristalnya yang dicirikan oleh lebar puncaknya. Selain itu dapat juga digunakan untuk mengidentifikasi adanya kehampaan dan atau adanya konsentrasi unsur-unsur pengotor (*impuritas*) dan deformasi plastis.

Dalam hal ini ukuran butir dari material FeSi ditentukan dengan metode atau *formula Scherrer* dan *Warren-Averbach*. *Metode Scherrer* menerangkan pelebaran puncak sehubungan dengan divergensi cahaya masuk yang memungkinkan dipenuhinya kondisi Bragg untuk bidang kisi berdekatan. Sedangkan metode *Warren-Averbach* selain mengacu pada lebar puncak juga memperhitungkan bentuk puncak. Pola difraksi sebenarnya diperoleh dengan memakai *dekonvolusi Fourier* pada puncak yang diukur dan melebarnya instrumentasi agar diperoleh pola difraksi sebenarnya. Untuk menemukan ukuran butir dilakukan dengan menganggap bahwa butir berbentuk bola .

Ukuran butir dengan persamaan **Scherrer** adalah:

$$\langle L \rangle = K \cdot \lambda [B_{1/2} \cdot \cos \theta_B]^{-1/2} \quad 2.19$$

dengan $\langle L \rangle$ adalah ukuran volume berbobot, K adalah konstanta Scherrer, θ_B adalah sudut difraksi Bragg, λ adalah panjang gelombang sinar-X dan $B_{1/2}$ adalah

lebar penuh setengah maksimum (*Full Width Half Maximum*) setelah dikoreksi terhadap pelebaran yang disebabkan oleh difraktometer.

Nilai $B_{1/2}$ dapat ditentukan dengan persamaan:

$$(B_{1/2})^2 = (B_{obs})^2 - (B_m)^2$$

Di mana B_{obs} adalah lebar puncak yang diukur dan B_m adalah pelebaran maksimum oleh mesin. Berdasarkan asumsi bahwa butiran berbentuk sferis, maka diameter butir dapat diperkirakan dengan persamaan *Scherrer Warren Averbach*. Metode *Scherrer* dan *Warren-Averbach* menghasilkan karakteristik rata-rata yang berbeda dari lebar kolom L , dimana *Scherrer* menghasilkan $\langle L \rangle_{vol}$ sedangkan *Warren-Averbach* menghasilkan $\langle L \rangle_{area}$ dengan persamaan:

$$\langle D \rangle_{area} = \frac{3}{2} \langle L \rangle_{area} \quad \text{dan}$$

$$\langle D \rangle_{vol} = \frac{4}{3} \langle L \rangle_{vol} \quad 2.20$$

Dengan $\langle D \rangle_{vol}$ adalah distribusi ukuran butir tiap volum.

2.8.5 PARAMETER KISI

Untuk meminimalkan kesalahan *random* digunakan metode analitik yang diusulkan oleh *M.U Cohen* yang kemudian dikenal dengan nama metode *Cohen* metode ini digunakan untuk menghitung parameter kisi dengan teliti yang diterapkan pada sistem kristal dan non kubik.

Persamaan *Bragg* dirumuskan sebagai :

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{2d} \quad 2.21$$

Persamaan bidang untuk sistem kubus adalah :

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad 2.22$$

$$\sin^2\theta = \frac{\lambda^2}{4d^2} = \frac{\lambda^2}{4} \left(\frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \right) + K \cos^2 \theta \quad 2.23$$

dimana : $\alpha = h^2 + k^2 + l^2$

$$R = K$$

$$\delta = \cos^2\theta$$

$$P = \frac{\lambda^2}{4d^2}$$

$$\text{Maka : } \sin^2\theta = P\alpha + R\delta \quad 2.24$$

Menurut teori kuadrat terkecil, nilai terbaik dari koefisien P dan R adalah jumlah kuadrat kesalahan randomnya minimum^[1] yaitu ,

$$\Sigma (e)^2 = \Sigma [P\alpha + R\delta - \sin^2\theta]^2 \sim \text{minimum}$$

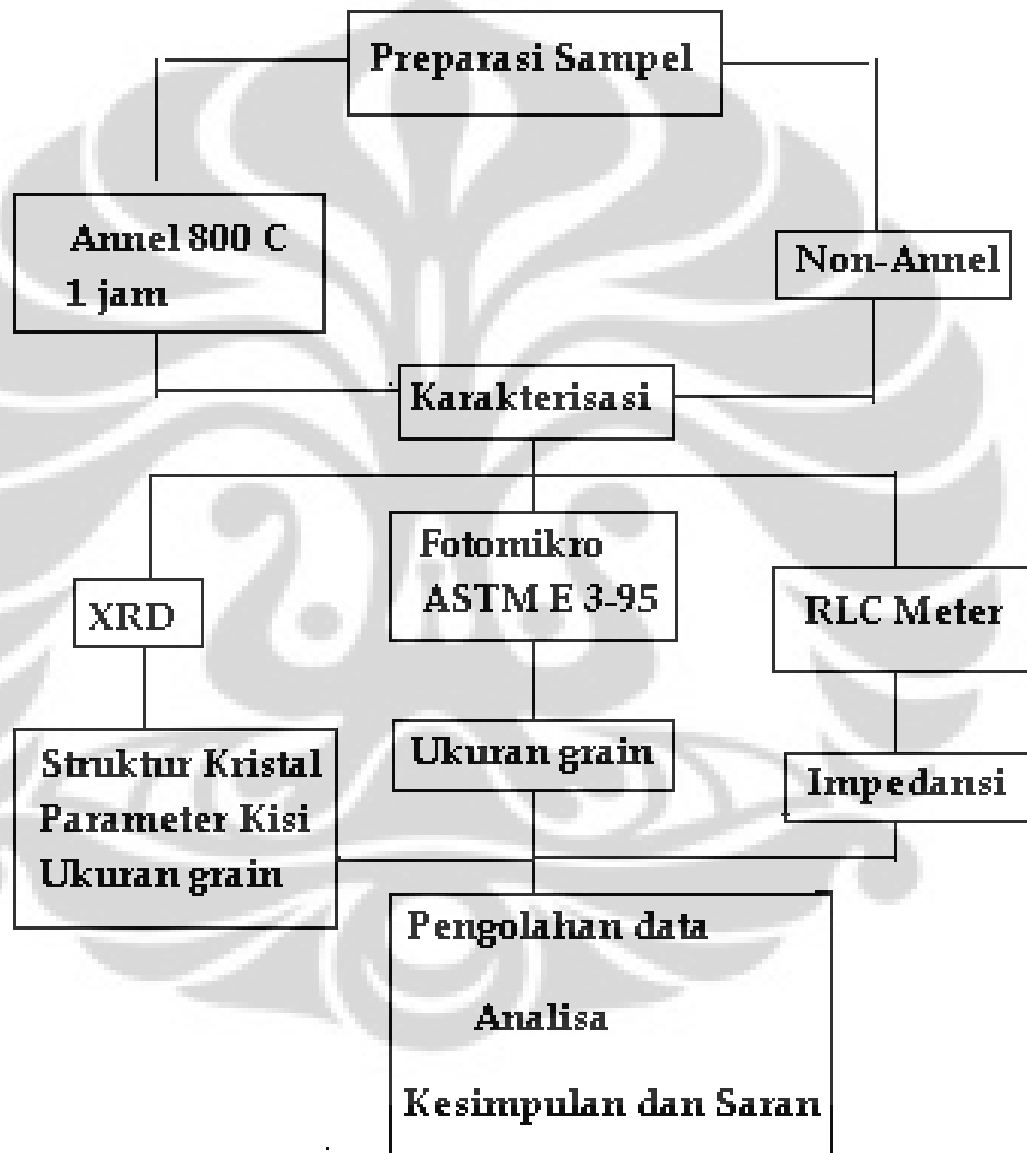
Dengan mendiferensialkan persamaan (2.24) terhadap P dan R maka akan diperoleh persamaan normalnya yakni :

$$\Sigma \alpha \sin^2\theta = P\Sigma \alpha^2 + R\Sigma \alpha\delta \quad 2.25$$

$$\Sigma \delta \sin^2\theta = P\Sigma \alpha\delta + R\Sigma \delta^2 \quad 2.26$$

BAB 3

3.1 METODOLOGI PENELITIAN



Penelitian ini dilakukan melalui 3 tahap utama yaitu Preparasi sampel $Fe_{1-x}Si_x$ ($x= 1;2;3$ dan 4 at. %), karakterisasi mikro dengan metalografi dan difraksi sinar X serta karakterisasi sifat listrik yaitu spektroskopi impedansi dengan menggunakan RCL Meter. Penelitian dilakukan di beberapa tempat yaitu Laboratorium departemen Fisika Universitas Indonesia Depok/salemba (preparasi sampel dengan teknik *arc melting*, aneal dalam vakum, pengukuran impedansi, dan difraksi sinar X) dan Laboratorium Metalurgi Fakultas Teknik UI Depok (Fotomikro). *Algoritma* penelitian diperlihatkan oleh diagram diatas.

3.2 Preparasi FeSi

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah $Fe_{100-x}Si_x$ ($x = 1,2,3,4$). Dengan kemurnian Fe 99.95% dan Silikon 1% sampai 4%. Adapun riwayat sampel yang diteliti diperlihatkan pada Tabel 3.1 komposisi sampel.

Table-3.1. Komposisi FeSi dengan variasi massa Si

Bahan	Massa Fe (gr)	Bahan	Massa Si (gr)
Fe ₉₉	8.8580	Si ₁	0.0451
Fe ₉₈	8.8086	Si ₂	0.0859
Fe ₉₇	7.9965	Si ₃	0.1243
Fe ₉₆	7.9596	Si ₄	0.1668

Komposisi bahan yang digunakan adalah paduan Fe dan Si tersebut di *Malting* dalam kondisi *Argon* dengan cara mengatur arus. Proses malting dilakukan 5 sampai 10 kali agar paduan FeSi merata. Hasil dari malting, kemudian setiap sampel dipotong menjadi 3 bagian yang berbentuk persegi panjang. Dan bahan-bahan tersebut akan diuji dengan Fotomikro, XRD dan RCL Meter.

3.2.1 Arc Melting Furnace

Bahan Fe dan Si (ingot) dipreparasi dengan alat *Arc Melting Furnace*, sehingga diperoleh hasil yang bersih, meminimalisasi oksidasi dan *homogen*. Untuk mendapatkan hasil yang dan homogen, yaitu disk dibersihkan dengan asam nitrat dilanjutkan dengan alkohol. Setelah itu letakan sampel di *disk*, siap di *melting*, kemudian furnace di vakum sampai tekanannya nol, setelah di *flash* selama 5 menit dengan memasukakan *argon* sampai tekanannya sama dengan udara luar diselingi dengan pendinginan selama 10 menit. Ulangi cara ini sebanyak 5 kali, sampai bahan menyatu dan padat. Pada saat di malting kedudukan gas 0.5, vacuum keadaan gas *argon* (sampai tekanannya sama dengan udara luar).

3.2.2 Pemotongan (*Cutting*)

Tahapan berikut yang dilakukan dalam persiapan sampel adalah tahap pemotongan. Dalam proses pemotongan FeSi dengan variasi Si 1%-4% perlu dicegah kemungkinan deformasi dan panas yang berlebih. Untuk itu dalam tiap proses pemotongan perlu diberi cairan (oli brumus) sebagai pendingin.

3.2.3 *Annealing*

Setelah dipotong Fesi dengan variasi Si 1%-4%, sampel di *anneal*. Alat yang digunakan untuk perlakuan *anneal* adalah *Furnace Thermolyne*, dimana temperatur yang digunakan adalah 0,5 kali dari titik leleh besi yaitu 800⁰C. Dengan perlakuan panas diharapkan adanya perubahan didalam mekanisme perubahan bentuk dan ukuran *grain*. Sebelum di *annealing* sampel dan tabung *kwartz* dibersihkan dengan alkohol 96% untuk menghilangkan korosi dan unsur lainnya. Sampel dimasukkan ke dalam tabung dan di vakum dari udara luar sampai tekanan di didalam tabung nol. Kemudian dimasukkan gas *argon* ke dalam tabung. Proses ini dilakukan sampai 3 kali. Setelah itu sampel yang dalam kondisi argon dimasukkan kedalam *furnace* siap diannel dengan suhu 800⁰ celsius selama 60 menit. Pertambahan suhu dari 0⁰ sampai 800⁰ diatur secara perlahan untuk kenaikan suhunya. Setelah 60 menit sampel langsung dikeluarkan. Sedang proses pendinginan sampel diletakan di udara luar sampai dingin.

3.2.4 *Mounting*

Proses *mounting* dilakukan untuk memudahkan penanganan benda kerja yang memiliki ukuran kecil dan tidak beraturan. Pemilihan bahan dan teknik *mounting* harus dipertimbangkan agar tidak merusak benda uji. Panas yang dihasilkan pada proses *mounting* kompresi dapat mempengaruhi benda kerja. Resin pada *mounting* dingin dapat menunjukkan perbedaan dalam jumlah panas yang dihasilkan selama proses polimerisasi. Jika jumlah panas akan merubah struktur mikro benda kerja, maka *mounting* yang dilakukan harus memiliki sifat eksoterm yang terendah.

Mounting kompresi akan merusak sample-sampel yang tipis. Faktor lain yang harus diperhatikan adalah ketahanan bahan *mounting* terhadap larutan dan zat etsa yang dipergunakan.

3.2.5 *Pengampelasan*

Pada pengampelasan permukaan sampel, sampel digosokkan pada lembaran pengampelas yang memiliki kekasaran tertentu. Pengampelasan dilakukan dengan mempergunakan lembaran pengampelas dengan kekasaran yang berbeda secara bertahap dari yang paling kasar ke yang paling halus. Tahapan yang biasanya dilakukan adalah mulai dari #400 #1000, #1500, dan #2000. Angka-angka ini menunjukkan kekasaran permukaan dan kedalaman kerusakan dari hasil amplas.

3.2.6 *Pemolesan (Polishing)*

Setelah proses pengampelasan, sampel kemudian dipoles untuk menghasilkan permukaan yang halus bebas goresan. Pemolesan diklasifikasikan menjadi pemolesan halus dan pemolesan kasar. Pemolesan kasar sampai halus menggunakan bahan amplas dengan no 600 sampai no 2500. Tiap proses pemolesan dialiri air untuk menghilangkan geram-geram yang ditimbulkan selama pemolesan. Pemolesan kasar dilakukan dengan tangan, arah pemolesan tegak lurus terhadap arah pengampelasan yang terakhir. Disamping itu selama proses pemolesan dianjurkan agar sampel digerakkan depan, belakang dengan maksud agar partikel-partikel yang abrasif dapat terdistribusi secara merata di piringan pemoles.

3.2.7 Etsa (Etching)

Proses pengetsaan dilakukan untuk menghasilkan permukaan halus dan mengkilap dengan tanpa goresan sebelum diamati dibawah mikroskop. Proses ini dilakukan dengan cara mencelupkan spesimen dalam larutan pengetsa. Permukaan yang di etsa menghadap kemuka kita dan digerakan agar larutan yang menyentuh permukaan spesimen selalu larutan yang “segar”. Container dari logam tidak dapat dipergunakan sebagai tempat untuk menyimpan larutan etsa jika timbul gradien potensial antara spesimen dan kontainer, karena akan menimbulkan etsa. berlebih pada. daerah tertentu pada permukaan. Proses pengetsaan pada sampel FeSi dengan variasi Si 1%-4% menggunakan 1 g picric acid + 5 ml HCl + ethanol .Setelah selesai pengetsaan selesai, sesegera mungkin spesimen dicuci dengan mempergunakan air yang bergerak kemudian dibersihkan dengan. alkohol dan dikeringkan dengan menggunakan udara panas. Hasil pengetsaan yang kurang, diperbaiki dengan proses pemolesan, akan tetapi jika berlebih, maka harus dilakukan pengampelasan kembali.

3.3 Fotomikro

Sampel yang akan di uji terlebih dahulu dilakukan proses etsa untuk melihat mikro struktur dan ukuran grain. Sebelumnya permukaan sampel yang akan di Etsa dihaluskan dengan amplas, sampai permukaan terlihat halus dan bening. Untuk FeSi dengan variasi Si 1%-4% larutan Etsa yang digunakan adalah 1 gr picric acid + 5 ml HCl + ethanol. Pengujian fotomikro dilakukan di Centre For Material Processing And Failure *Analysis*, Teknik Metalurgi Universitas Indonesia. Dengan menggunakan mesin uji *Microscope* dengan standar ASTM E3-95. Setelah proses preparasi tersebut maka pengamatan struktur mikro siap dilakukan dan kemudian struktur yang diamati di Fotomikro. Dengan pembesaran yang dilakukan 500 X dan 100 X.

3.4 X-Ray Diffraktometer (XRD)

Sampel yang telah telah dibersihkan dengan amplas sambil di aliri air siap untuk dikarakterisasi dengan peralatan XRD, yaitu untuk mengetahui komposisi fasa-fasa (struktur kristal) FeSi, alat ini menghasilkan intensitas sinar dimana

intensitas yang terukur akan ditampilkan dalam sebuah grafik, yaitu grafik intensitas terhadap sudut hamburan (2θ). Pada bahan uji dilakukan karakterisasi dengan menggunakan difraksi sinar-X. Alat yang digunakan adalah *difraktometer type Philips PW3710 BASED* dilengkapi dengan perangkat *software* APD (*Automatic Powder Diffraction*) yang ada di Laboratorium UI Salemba XRD menggunakan tabung anode Co dengan panjang gelombang 1,7889 Å. Langkah-langkah untuk memperoleh pola difraksi sampel adalah:

1. Menyiapkan seperangkat difraktometer sinar-X. Mengatur *setting* tegangan dan arus yang akan dipakai. Besar tegangan yaitu 40 kV, arus 30 mA, dan daya 2 kW.
2. Memasang sampel pada *sample holder*.
Penempatan sample perlu mempertimbangkan ukuran sample.
3. Menempatkan *sample holder* pada meja goniometer.
Untuk sampel diletakkan langsung pada meja goniometer.
4. Mengkalibrasi difraktometer sinar-X.
5. Mengisi parameter pengukuran data. Adapun contoh pengisian parameter pada difraktometer sinar-X untuk adalah *Scan mode = step scan*, *High angle = 125°*, *Low angle = 25°*, *Preset time = 1,0 s*, *Step width = 0,02°/step*, *Full Scale = ... kcps*.
6. Pengambilan data difraksi.
7. Pengolahan data difraksi dengan menggunakan *software* yang terpasang pada difraktometer sinar-X.

Pola difraksi sampel dapat diperoleh dengan menyamakan data ICCD (*International for Diffraction Data*) secara langsung dari komputer, akan diperoleh struktur kristal. Berdasarkan hasil pola difraksi kita juga dapat menghitung perubahan ukuran *grain*, ditunjukkan dengan perubahan nilai FWHM (*Full Width at Half Maximum*) yang kita peroleh dari data *program Bella*.

3.4.1 Ukuran Butir dengan Metode Difraksi Sinar X

Hasil identifikasi data sampel dapat menghitung ukuran butir dengan metode difraksi sinar -x karena adanya pelebaran puncak difraksi. Sebagai dasar

pengukuran butir adalah menggunakan persamaan Scherer sebagai berikut :

$$\sigma = k \lambda / B_{\text{obs}} \cos\theta \quad 3.1.$$

Dimana :

σ = ukuran butir rata-rata (\AA).

k = konstanta *Scherer* nilainya sekitar 0.89 – 1.

λ = panjang gelombang X-ray (1,788 \AA).

B_{obs} = lebar puncak (FWHM).

Θ = sudut puncak difraksi.

Untuk nilai B_{obs} yaitu lebar setengah puncak difraksi maksimum dinyatakan dalam satuan radian yaitu dengan $B/57,3$. Persamaan *Scherer* ini mengasumsikan bahwa kristal bebas dari *strain* dan cacat.

3.4 RLC meter

Sampel FeSi-1% -FeSi-4% baik diannel dan sebelum *Anneal* yang telah dipotong dengan ukuran lebih kurang (2 x 2 x 10) mm diberi kontak dan di patri di karakterisasi dengan alat RLC meter. Komponen-komponen listrik yang dihasilkan dari RLC meter adalah yang memberikan kontribusi terhadap nilai impedansi yaitu *resistor*, kapasitor, sudut *phase* dan induktor.

Impedansi merupakan pengukuran hambatan yang kompleks dengan tehnik ac Sebelum pengukuran dilakukan, RLC meter terlebih dahulu di kalibrasi, dengan cara menolkan display RLC. Kemudian sampel diukur dengan frekuensi 600 kHz - 1000 kHz. Pemilihan dari frekuensi ini adalah untuk menjaga kestabilan pembacaan nilai impedansi dibandingkan apabila pengukuran dimulai dengan frekuensi rendah. Besaran yang diukur adalah *impedans (Ohm)*, sudut *fase (deg)*, resistansi (*Ohm*), induktansi (*mikro Hendri*) dan kapasitansi (*milli Farad*) dari tiap sampel.

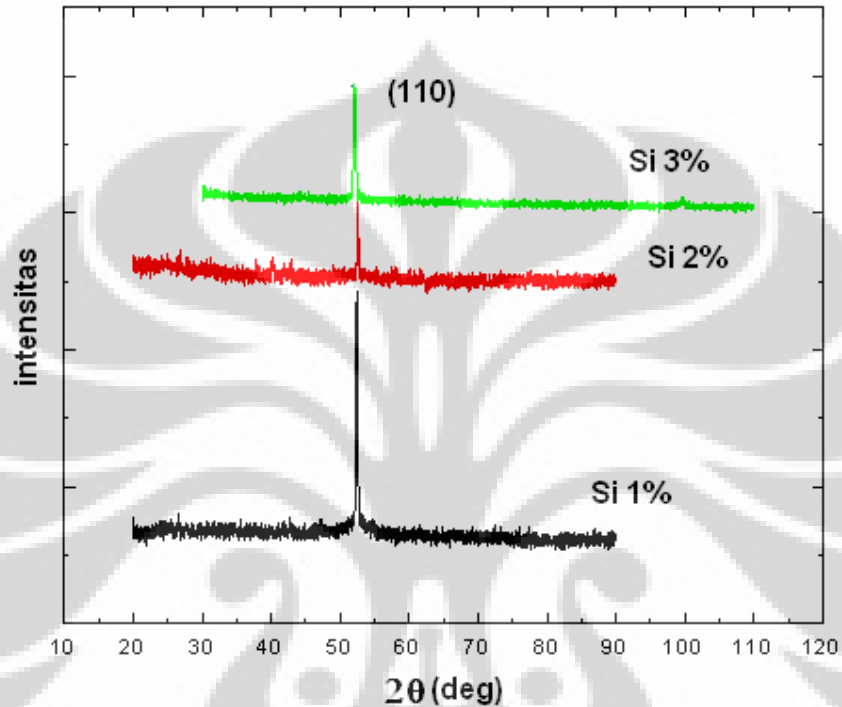


Gambar-3.1. Peralatan RLC meter untuk pengukuran impedansi

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. XRD

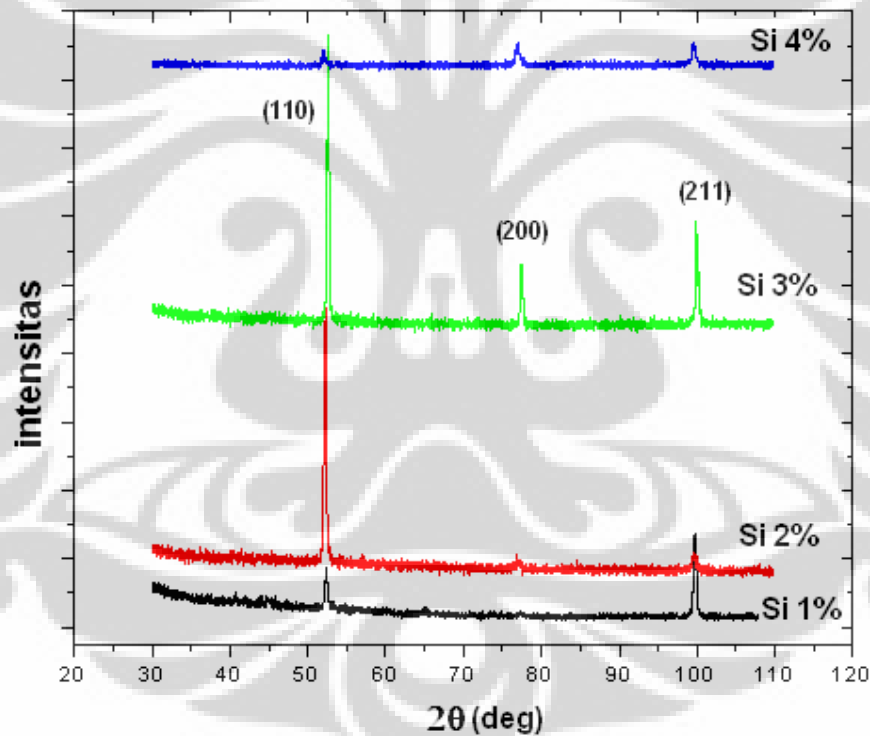


Gambar 4.1. Puncak intensitas pola difraksi sinar-X pada FeSi dengan As -Cast

Karakterisasi struktur sampel dilakukan dengan menggunakan difraktometer sinar X dengan target Co yang panjang gelombang $\lambda = 1,789 \text{ \AA}$. Pola difraksi sinar x sample *as cast* FeSi dengan berbagai macam komposisi Si diperlihatkan pada gambar 4.1 di atas. Pada gambar tersebut terlihat ada satu puncak dominan yang terjadi pada sudut sekitar 52° yang teridentifikasi sebagai refleksi dari struktur bcc pada bidang (110). Sedangkan intensitas refleksi pada bidang-bidang yang lain sangat kecil. Dapat dikatakan bahwa sampel-sampel dalam kondisi *as cast* ini mengalami *preferred orientation* pada bidang (110). Secara detil, puncak-puncak difraksi muncul pada sudut

$52,40^\circ$, $52,56^\circ$ dan $52,67^\circ$ untuk masing-masing *alloy* dengan komposisi Si-1%, Si-2% dan Si-3%. Jika dibandingkan dengan Fe murni (tanpa Si) yang

memiliki refleksi bidang (110) pada sudut $52,35^\circ$ maka substitusi Si pada Fe mengakibatkan pergeseran puncak difraksi ke sudut yang lebih besar atau mengakibatkan jarak antar bidang berkurang tanpa mengubah struktur awalnya. Semakin besar prosentasi Si yang ditambahkan semakin besar pula pergeseran puncak difraksinya atau bidang refleksinya. Hal ini juga mengindikasikan *alloy* FeSi sudah terbentuk. Efek penambahan Si juga mengakibatkan intensitas puncak difraksi cenderung menurun seiring dengan besarnya prosentasi Si pada alloy FeSi. Hal ini menunjukkan bahwa kristalinitas *alloy* FeSi dalam kondisi *As cast* cenderung menurun dengan bertambahnya Si.



Gambar-4.2. Puncak intensitas pola difraksi sinar-X pada FeSi yang di Annealing

Gambar 4-2 adalah hasil karakterisasi XRD untuk sampel yang telah dianeal. Proses *annealing* yang dilakukan pada suhu 800°C selama 1 jam mengakibatkan munculnya puncak-puncak dari bidang refleksi yang lain yang merupakan refleksi bidang dari fase FeSi, yaitu bidang (200) dan (211). Jika

dibandingkan dengan Fe murni (tanpa Si) yang memiliki refleksi bidang (110) pada sudut $52,35^{\circ}$ maka substitusi Si pada Fe mengakibatkan pergeseran puncak difraksi ke sudut yang lebih besar atau mengakibatkan jarak antar bidang berkurang tanpa mengubah struktur awalnya. Semakin besar prosentasi Si yang ditambahkan semakin besar pula pergeseran puncak difraksinya atau bidang refleksinya. Hal ini juga mengindikasikan *alloy* FeSi sudah terbentuk. Efek penambahan Si juga mengakibatkan intensitas puncak difraksi cenderung menurun seiring dengan besarnya prosentasi Si pada *alloy* FeSi. Hal ini menunjukkan bahwa kristalinitas *alloy* FeSi dalam kondisi as cast cenderung menurun dengan bertambahnya Si. Munculnya puncak-puncak Bragg dari bidang-bidang yang lain menunjukkan telah terjadi proses rekristalisasi dan pertumbuhan butir sehingga mikrostruktur FeSi menjadi lebih *homogen* dan tidak terjadi *preferred orientation*. Pada gambar 4.2 tersebut juga terlihat intensitas masing-masing puncak cenderung meningkat dengan bertambahnya Si. Dengan demikian jumlah Si dalam struktur Fe mempengaruhi proses kristalisasi.

Persamaan difraksi *Bragg* seperti tertulis pada persamaan 2.4 dapat digunakan untuk menghitung besar parameter kisi dari struktur kubus. Dengan menggunakan metode *Cohen* yang diuraikan pada 2.8.5. diperoleh nilai parameter kisi *a* yang tercantum pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Parameter kisi untuk Si 1-4% pada kondisi As Cast dan Anneal

Silikon	Parameter Kisi (Armstrong)	
	Non Annel	Annel
0 %	2,866	-
1%	2,852	2,852
2%	2,832	2,870
3%	2,858	2,880
4%	2,869	2,884

Dari tabel tersebut terlihat bahwa untuk setiap sampel sebelum dianeal (*As cast*) nilai parameter kisi FeSi cenderung tidak dipengaruhi oleh jumlah Si. Akan tetapi perlakuan *annealing* menyebabkan nilai parameter kisi *alloy* FeSi meningkat. Hal ini disebabkan oleh difusi atom-atom Si dalam struktur FeSi. Juga terlihat semakin besar prosentasi Si pada *alloy* FeSi meningkatkan parameter kisinya karena atom-atom Si yang terinterstisi/tersisip dalam struktur FeSi juga semakin banyak.

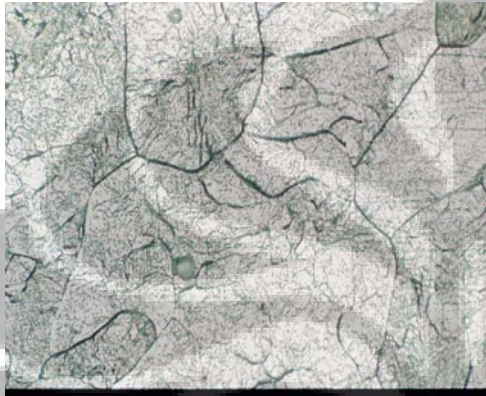
4.2. FOTOMIKRO

Hasil foto mikro sampel dalam kondisi *As-cast* dan *annealed* diberikan pada gambar 4-3 sampai dengan gambar 4-10 untuk berbagai variasi Si. Foto mikro ini dilakukan dengan perbesaran 500x dengan skala mm foto = 1/625 mm aktual. Pada gambar 4-3 sampai dengan gambar 4-6 untuk sampel *As cast* terlihat bahwa banyak *void-void* dan titik-titik hitam yang muncul dan batas-batas grain yang kurang jelas terutama untuk *alloy* dengan komposisi Si = 1%. Titik-titik hitam yang muncul diperkirakan adalah partikel-partikel Si yang belum berdifusi kedalam struktur Fe. Pada komposisi ini juga terlihat bentuk-bentuk yang mirip dengan *dendrite*, yaitu kristal yang belum jadi/sempurna. Dengan bertambahnya prosentasi Si dalam Fe maka batas-batas ukuran grain semakin jelas dan ukuran grain semakin membesar. Hal ini sesuai dengan hasil XRD yang menunjukkan kecenderungan intensitas peak pada bidang (110) yang semakin tinggi dengan bertambahnya jumlah Si pada *alloy* FeSi.

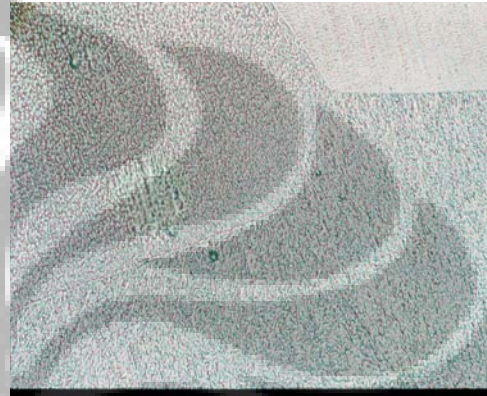
Perlakuan *annealing* menyebabkan ukuran grain semakin membesar dan batas-batas grain menjadi jelas seperti diperlihatkan pada gambar 4-7 sampai dengan gambar 4-10. Juga terlihat bahwa *mikrostruktur* sampel yang di *anneal* lebih homogen dibandingkan sampel *As-cast*. Hal ini menunjukkan proses *annealing* menyebabkan terjadinya rekristalisasi dan pertumbuhan *grain*. Selama proses rekristalisasi, butir yang terjadi semakin besar dan struktur yang lebih homogen. Selain itu proses *Anneal* juga mengakibatkan terjadinya proses difusi atom-atom Si kedalam struktur FeSi yang sesuai dengan hasil pengukuran XRD yang menunjukkan munculnya puncak-puncak *Bragg* dari bidang-bidang yang lain.

Dapat dikatakan bahwa hasil fotomikro menunjukkan kesesuaian dengan hasil pengukuran XRD.

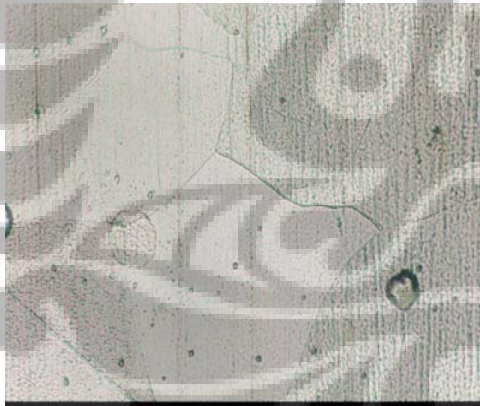
Gambar FeSi untuk 1-4 % pada kondisi *As Cast*



Gambar-4.3. FeSi-1-AS CAST



Gambar-4.4. FeSi-2-As Cast

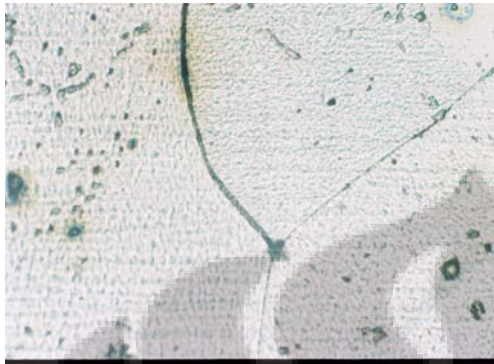


Gambar-4.5. FeSi-3-AS Cast

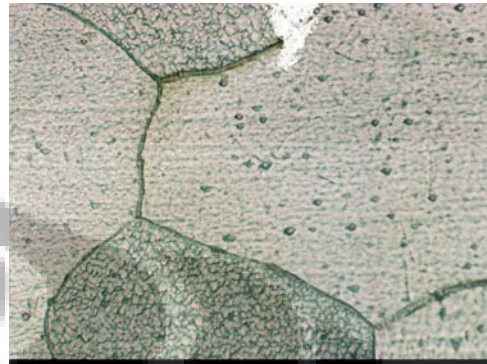


Gambar-4.6. FeSi-4-As Cast

Gambar FeSi untuk 1-4 % pada kondisi setelah diannealing



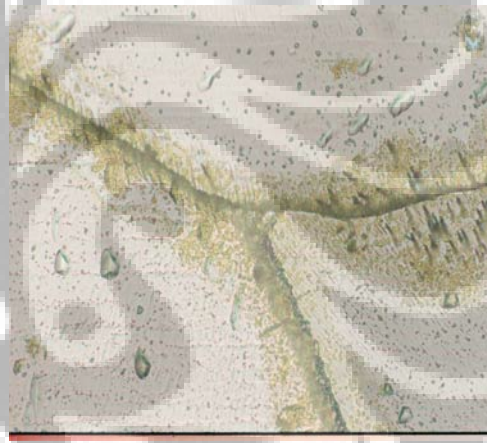
Gambar-4.7. FeSi-1-Anneal



Gambar-4.8. FeSi-2-Anneal



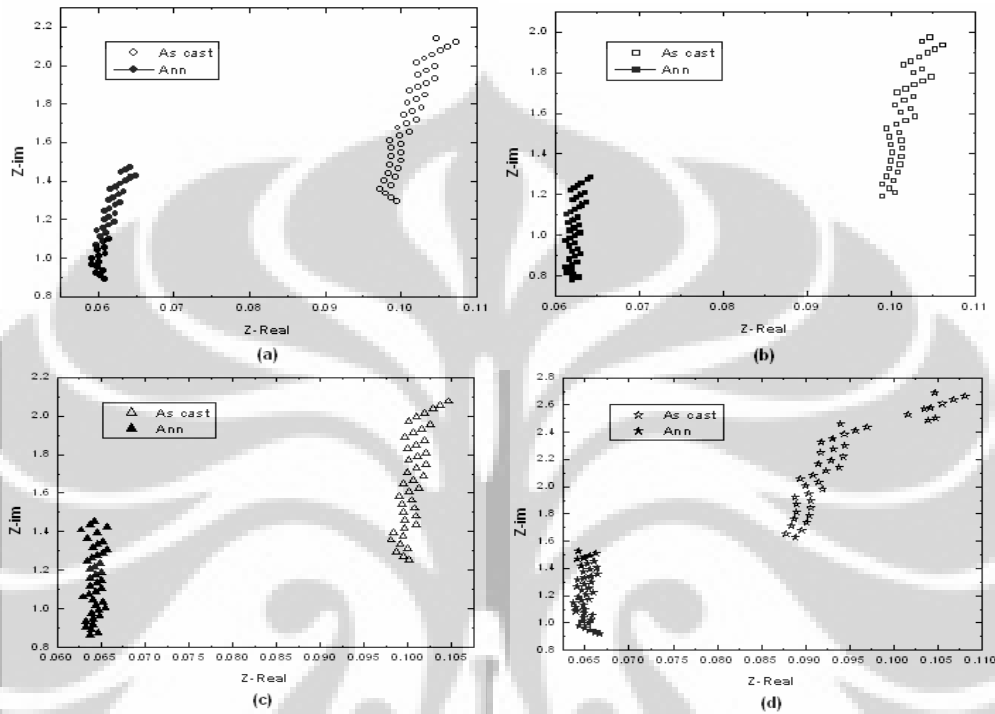
Gambar-4.9. FeSi-3-Anneal



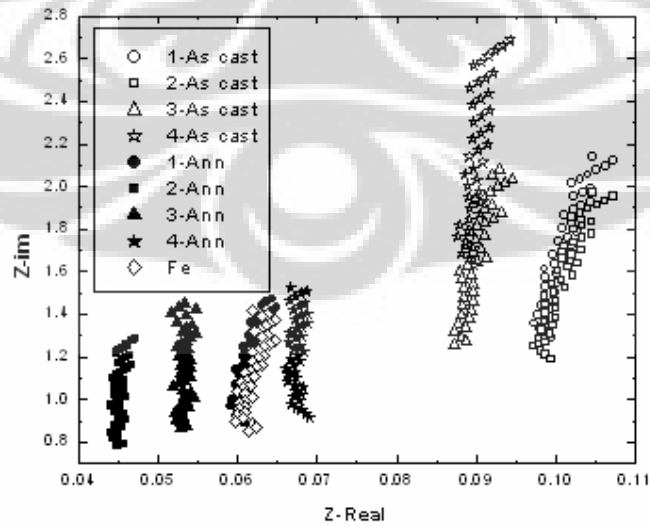
Gambar-4.10. FeSi-4-Anneal

4.3. Pengukuran RLC

4.3.1. Impedansi Imaginer terhadap Impedansi Real



Gambar-4.11. Plot Nyquist pada kondisi As Cast dan Anneal. (a) Si 1 % (b) Si 2 % (c) Si 3 % dan (d) Si 4 %

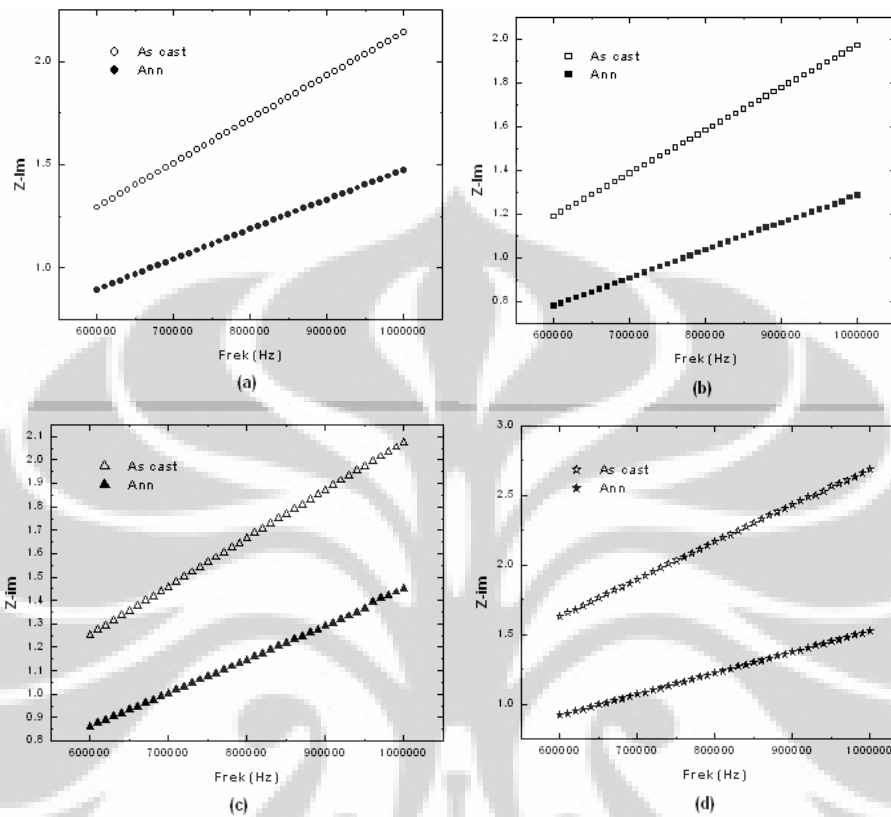


Gambar-4.12. Plot Nyquist untuk variasi Si pada kondisi As Cast dan Anneal

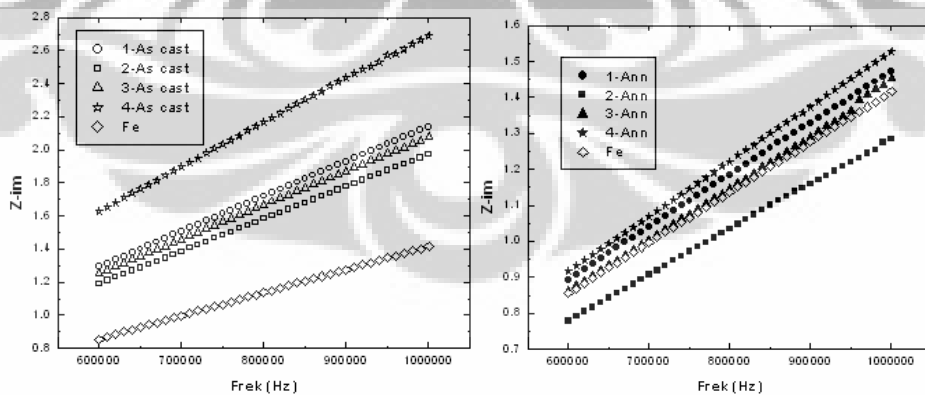
Pada gambar 4.11 dan gambar 4.12 menunjukkan hubungan impedansi imajiner terhadap impedansi real pada kondisi *As cast* dan *Anneal*, yang mana penambahan Si mengakibatkan perubahan impedansi imajiner yang berbeda baik untuk *FeSi As cast* dan *FeSi Anneal*. Pada kurva terlihat impedansinya *imaginer* menjadi lebih kecil dan cenderung lurus. Hal ini disebabkan oleh resistansi dan induktansi juga berkurang.

Hasil impedansi imajiner versus impedansi Real dengan variasi % Silikon menunjukkan nilai impedansi real bila dianggap konstan maka impedansi *imaginer* meningkat hal ini terlihat pada kondisi *As cast* dan *Anneal*. Hal ini menunjukkan resistansi pada kondisi *Anneal* lebih besar daripada Resistansi pada *As Cast*. Hal ini disebabkan pada sampel *Anneal* atom silikon sudah terlarut dalam logam besi. Dengan adanya silikon yang terlarut akan mengakibatkan naiknya permeabilitas. Untuk Si 4% menunjukkan nilai impedansi imajiner lebih besar bila dibandingkan dengan nilai impedansi imajiner 3%, 2% dan 1%. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan Si 4% pada kondisi *Anneal* akan memperbesar nilai induktivitas (L) dan sifat magnet akan bertambah. Dilihat dari bentuk grafik *cole-cole plot* yang diperoleh menunjukkan grafik yang cenderung lurus baik pada perlakuan pada perlakuan *As cast* maupun *Anneal* hal ini menunjukkan model rangkaiannya adalah seri untuk R dan L.. Di dalam permodelan ini penulis hanya memperhitungkan reaktansi induktif. Karena berdasarkan hasil pengukuran efek kapasitif tidak terlihat pada gambar.

4.3.2. Impedansi Imajiner terhadap perubahan frekuensi



Gambar-4.13. Impedansi imajiner terhadap perubahan frekuensi pada kondisi As Cast dan Anneal (a) Si 1% (b) Si 2% (c) Si 3% (d) Si 4%



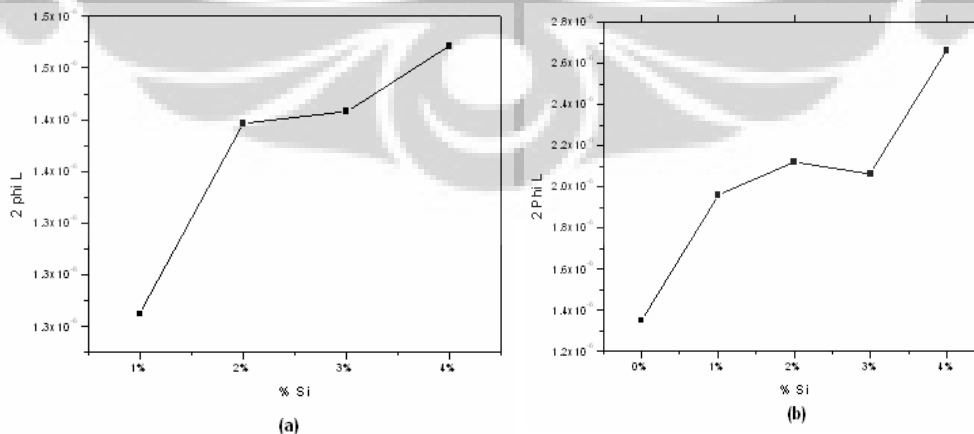
Gambar-4.14. Impedansi imajiner terhadap perubahan frekuensi untuk variasi Si pada kondisi As Cast dan Anneal dibandingkan dengan kurva Fe murni

Pada gambar 4-13 dan 4.14 menunjukkan impedansi *imaginer* terhadap perubahan frekuensi terlihat pada kondisi *As cast* mempunyai kecenderungan kemiringan lebih besar bila dibandingkan dengan kemiringan Si-1 pada kondisi *Anneal*, hal ini menunjukkan efek penambahan Si setelah *Anneal* mengurangi harga Induktansi, yang menyebabkan sifat magnet juga ikut berkurang. Ini juga bersesuaian dengan hasil Fotomikro dimana pada kondisi *Anneal* ukuran *grain* membesar dan struktur yang lebih homogen menyebabkan perubahan arus menjadi kecil sehingga hambatan menjadi kecil bila dibandingkan pada kondisi *As cast*. Pada gambar tampak seiring penambahan % Si terjadi perubahan nilai Induktansi (L).

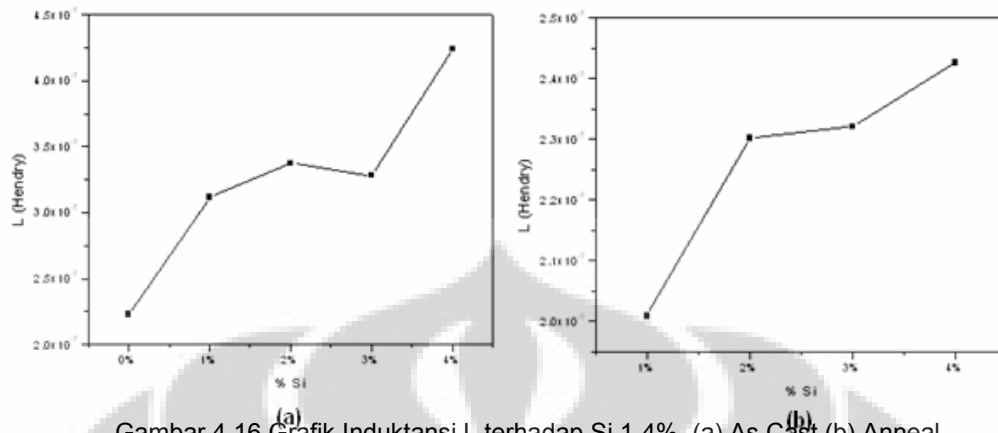
Hasil Impedansi *Imaginer* (Z_{-im}) terhadap perubahan frekuensi (f) pada *As cast* dan *Anneal* pada gambar 4.14 Z_{-im} dibuat tabel *gradiennya* dengan menggunakan persamaan $Z_{-im} = 2 \pi f L$. Dimana $m = 2 \pi f$ dan m sebagai *gradien*. Untuk *As cast* dan *Anneal* maka nilai *gradien* sebagai berikut :

Tabel 4.2 Gradien untuk Si 1-4% pada kondisi As Cast dan Anneal

Silikon	$2 \pi L$	
	Non-Annel	Annel
1%	$1.957 \cdot 10^{-6}$	$1.262 \cdot 10^{-6}$
2%	$2.119 \cdot 10^{-6}$	$1.446 \cdot 10^{-6}$
3%	$2.061 \cdot 10^{-6}$	$1.458 \cdot 10^{-6}$
4%	$2.662 \cdot 10^{-6}$	$1.521 \cdot 10^{-6}$



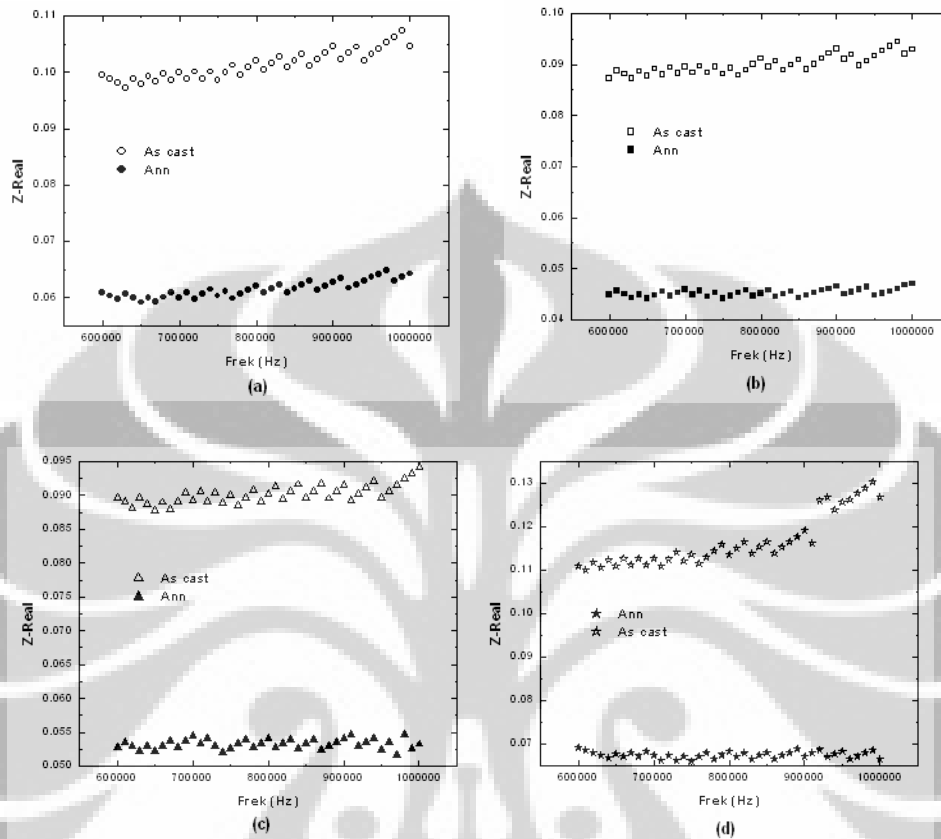
Gambar 4.15 Grafik Gradien $2\pi fL$ terhadap Si 1-4% As Cast dan Anneal



Gambar 4.16 Grafik Induktansi L terhadap Si 1-4%. (a) As Cast (b) Anneal

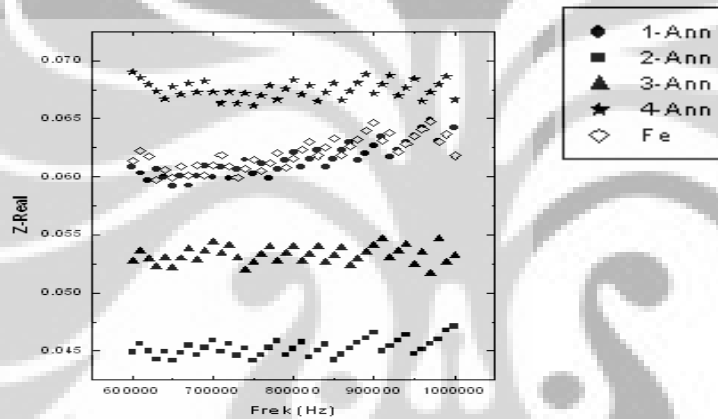
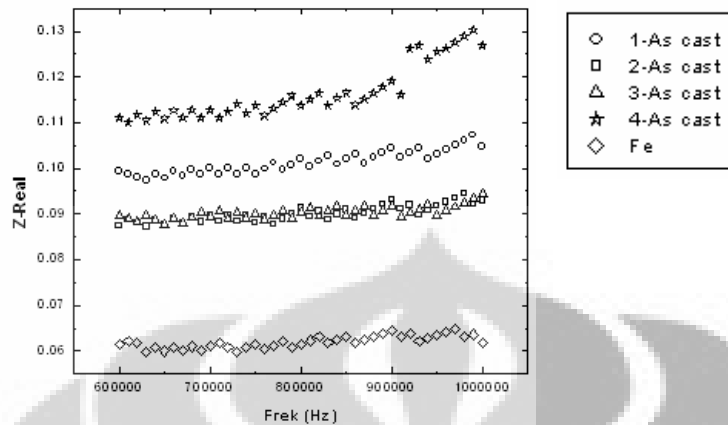
Pada tabel 4.2 dan grafik 4.14 sampai 4.15 tampak perbedaan nilai L Induktansi antara sebelum dianneal (*As cast*) dan setelah di *Anneal*, dimana nilai induktansi pada *Anneal* berkurang bila dibandingkan dengan induktansi pada sebelum *Anneal*, hal ini menunjukkan perubahan arus pada anneal lebih kecil, sehingga arus yang mengalir pada anneal lebih kecil dari pada sebelum di *Anneal* dan ini mengakibatkan arus Eddy menjadi kecil. Efek penambahan Silikon 4% kondisi *As cast* memperbesar induktansi (L) yang berarti pula sifat magnet bertambah dan hambatan pada bahan menjadi besar yang menyebabkan kerugian arus Eddy yang besar. Pada grafik 4.15 (b) tampak nilai induktansi (L) setelah dianneal kecil, sehingga hambatan untuk Si 4% *Anneal* kecil bila dibandingkan Si 4% sebelum dianneal. Pada kondisi anneal terlihat dari tabel 4.2 terjadi perubahan induktansi yang signifikan yaitu bertambahnya harga induktansi (L) seiring dengan perntambahan silikon, ini menunjukkan menurunnya *energi anisotropi magneto kristalin* dan naiknya *permeabilitas* bahan sehingga kerugian arus Eddy berkurang.

4.3.3. Impedansi Real terhadap Frekuensi



Gambar-4.17 Impedansi Real terhadap perubahan frekuensi pada kondisi As Cast dan Anneal (a) Si 1% (b) Si 2% (c) Si 3% (d) Si 4%

Hasil Pada gambar 4.16 menunjukkan hubungan impedansi *real* terhadap frekuensi dengan variasi %Si, pada kondisi *As cast* Si-4% memiliki Impedansi *real* lebih tinggi dibandingkan dengan kondisi *Anneal*. Hal ini menunjukkan untuk kondisi *As cast* memiliki nilai Resistivitas lebih besar dibandingkan dengan Si-3% *Anneal*. Pada perlakuan *Anneal* Si 3%-4% garis-garis lebih rapat dibandingkan sebelum dianneal artinya resistansi pada perlakuan *Anneal* kecil bila dibandingkan dengan sebelum dianneal ini menunjukkan kerugian Eddy *current* kecil pada Si 3% -4% di akibatnya Resistivitas (ρ) besar terutama Si3%-4%.



Gambar-4.18 Impedansi Real terhadap perubahan frekuensi untuk variasi Si pada kondisi as cast dan Anneal dibandingkan dengan kurva Fe murni

Hubungan impedansi real terhadap perubahan frekuensi untuk variasi Si terlihat pada gambar 4.16 dan 4.17. Pada Si-4% kondisi *Anneal* Impedansi *Real* terhadap perubahan frekuensi bertambah, ini menunjukkan Resistivitas (ρ) lebih besar dibandingkan pada %Si lainnya. Hal ini sesuai dengan perhitungan tabel 4.2 dimana penambahan % Si baik pada kondisi *As cast* maupun kondisi *Anneal* nilai memiliki resistivitas (ρ) besar dan menyebabkan kerugian arus Eddy berkurang. Secara umum penambahan Silikon akan memperbesar resistivitas bahan. Hal ini tampak pada tabel 4.2 dan tabel 4.4. penambahan Si untuk perlakuan *Anneal* memiliki nilai Resistivitas lebih besar bila dibandingkan dengan kondisi *As cast* dan ini menyebabkan kerugian Eddy *current* juga berkurang. Selain itu pada perlakuan *anneal* cenderung memperlihatkan garis-garis yang lebih

rapat dibandingkan dengan kondisi *As cast*. Hal ini menunjukkan resistansi menjadi kecil

4.4. Pembahasan Kerugian Arus Edd Anneal dengan $V = 1$ volt

Tabel 4.3 Resistivitas untuk Si 1-4% pada kondisi Anneal dengan tegangan 1 volt

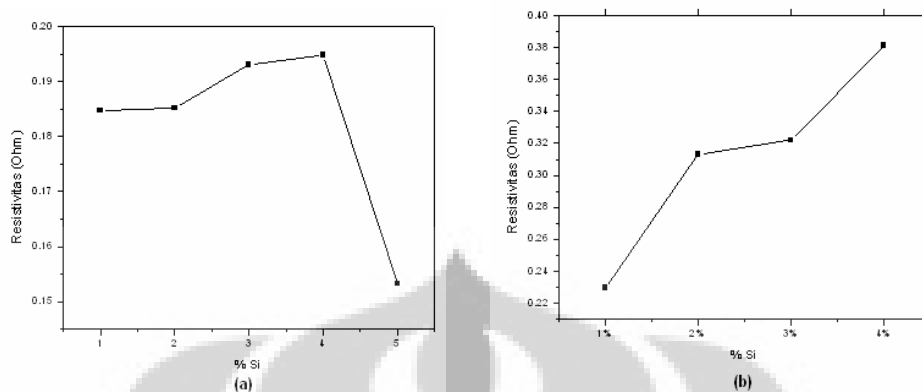
Silikon	R_{DC} (Ohm)	A/L (cm)	ρ (Ohm.cm)
1%	0.062	$4.760 \cdot 10^{-2}$	$2.295 \cdot 10^{-2}$
2%	0.055	$5.468 \cdot 10^{-2}$	$3.132 \cdot 10^{-2}$
3%	0.048	$6.738 \cdot 10^{-2}$	$3.221 \cdot 10^{-2}$
4%	0.06	$6.354 \cdot 10^{-2}$	$3.812 \cdot 10^{-2}$

As Cast dengan $V = 1$ volt

Tabel 4.4 Resistivitas untuk Si 1-4% pada kondisi *As cast* dengan tegangan 1 volt

Silikon	R_{DC} (Ohm)	A/L (cm)	ρ (Ohm.cm)
0%	0.055	$3.361 \cdot 10^{-2}$	$1.848 \cdot 10^{-2}$
1%	0.092	$2.014 \cdot 10^{-2}$	$1.852 \cdot 10^{-2}$
2%	0.078	$2.476 \cdot 10^{-2}$	$1.931 \cdot 10^{-2}$
3%	0.078	$2.499 \cdot 10^{-2}$	$1.949 \cdot 10^{-2}$
4%	0.059	$2.598 \cdot 10^{-2}$	$1.532 \cdot 10^{-2}$

Dari persamaan kerugian daya perunit, untuk kerugian arus Eddy kecil dibutuhkan Resistivitas (ρ) besar. Pada perlakuan suhu 800°C Resistivitas (ρ) bertambah besar terdapat di Si-4%. Tapi bila dibandingkan antara Si-1% sebelum *Anneal* dan Si-4% *Anneal*, nilai ρ Si-4% perlakuan *Anneal* lebih besar dari pada nilai ρ Si-1%. Hal ini menunjukkan kerugian arus Eddy berkurang untuk Si-4%, ini disebabkan silikon sudah terinersisi ke struktur FeSi membentuk *domain wall* yang berputar arah dengan demikian *permeabilitas* meningkat.



Gambar 4.19 Grafik Resisitivitas terhadap variasi Si dengan tegangan 1 volt (a) As Cast (b) Anneal

Hubungan resistivitas terhadap variasi Si ditunjukkan tabel 4.3 dan tabel 4.4 dengan kondisi *As cast* dan *Anneal*, tampak penambahan Si berpengaruh untuk nilai resistivitas (ρ). penambahan Si memiliki nilai resistivitas (ρ) bertambah besar tampak pada kondisi *Anneal*. Hal ini menunjukkan pada bahwa resistivitas tinggi mengakibatkan kerugian arus Eddy akan berkurang. Ini juga sesuai dengan hasil fotomikro dan impedansi bahwa pada kondisi *Anneal* ukuran *grain* bertambah besar (sedikitnya batas *grain*) menyebabkan nilai impedansi berkurang dan sifat magnetipun akan berkurang.

Pada Si 0% (Fe saja) mempunyai nilai $2.398 \cdot 10^{-5}$ Ohm.meter, nilai tidak berbeda jauh dengan Si 4% yaitu $2.689 \cdot 10^{-5}$ Ohm meter. Hal ini dikarenakan pada logam (Fe) tidak terjadi pengikatan kovalen maupun pengikatan ionik sehingga mempunyai konduktivitas listrik tinggi begitu juga untuk Si 4% pada *As cast* mempunyai konduktivitas tinggi.

BAB 5

KESIMPULAN

KESIMPULAN

1. Pada Penelitian ini telah berhasil dibuat *alloy* magnetik FeSi dengan konsentrasi Si = 1 at% s/d 4 at %.
2. Dari studi xrd dan fotomikro diketahui bahwa perlakuan aniling menyebabkan terjadinya rekristalisasi yang disertai dengan pertumbuhan butiran/*grain* dan difusi atom Si pada struktur bcc Fe sehingga parameter kisi *alloy* meningkat.
3. Studi impedansi pada *alloy* ini menunjukkan nilai induktansi L meningkat dengan bertambahnya konsentrasi Si dalam struktur bcc Fe. *Kurva Nyquist* nya menunjukkan bahwa rangkaian listrik *equivalen* dalam sistem *alloy* FeSi adalah rangkaian seri RL.
4. Penambahan atom Si pada struktur bcc Fe juga meningkatkan resistivitas *alloy*.

SARAN

Pada akhir tulisan ini, penulis menyarankan untuk memperoleh hasil yang lebih baik, dan menghasilkan pengukuran impedansi yang tepat dan akurat yaitu dengan frekuensi tinggi 1 Giga. Keterbatasan alat RCL meter yang ada hanya dapat mengukur frekuensi 1 MHz sampai 50 Hz yang sangat berpengaruh di dalam hasil pengukuran impedansi dalam penelitian ini.

DAFTAR REFERENSI

1. Fundamentals Of Impedance Spectroscopy.
[http://www.chem.ucdavis.edu/groups/Fundamentals
of Impedance pestroscopy.htm](http://www.chem.ucdavis.edu/groups/Fundamentals_of_Impedance_pestroscopy.htm)
2. Artur Braun, About Impedance Spectroscopy, Seminar at Barkelay. Spectroscopy Club, June 13, 2001, Ernest Orlando Lawrence, Barkeley National Laboratory.
3. A. Mored. S. Yunoki, and Edagotto, Science 283, 2034 (1999).
4. Electrochemical Impedance Spectroscopy (ELS).
<http://www.corrosiondoctors.org/electrochem/Els.htm>
5. Mpedance Spectroscopy: emphasizing solid materials and systems, edited by J.R. Macdonald, Wiley Inter-Scinece, NY 1987.
6. Esnick, Halliday, *Physics*, 3rd edition, John Wiley & Sons. Inc, 1985.
7. Braun et al., *X-ray scattering and adsorption studies of thermally oxidized glassy carbon*, J. Non-Cryst. Solids 260 1-14 (1999).
8. Stephenson, E.T. (1985)J. Appl. Phys., 57, 4226
9. Lawrence H.Van Vlack, Element of Material Science and Engineering, 6rd ED
10. William D.Caallister, Jr , Materials Science and Engineering An Introduction, hird Edition.

11. G.Y. Chin And J.H Wernick , Soft Magnetic Metallic Materials.
12. A.Thesis by A.Rachid Departement of Faculty of Sciencis University of Batna lgeria
13. C. Suryanarayana & M. Grant Norton, X-Ray Diffraction A Pratical Approach, Plenum Press.
14. B.D Cullity, Introduction To Magnetic Materials, Addison Wealey 1972.

