



**PENGARUH VARIASI WAKTU PROSES
PENCAMPURAN DAN TEMPERATUR *SINTERING*
TERHADAP SIFAT MAGNET BARIUM FERIT
BERBASIS PASIR BESI**

SKRIPSI

**Skripsi ini ditulis sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik Program Studi Teknik Mesin**

Oleh

Achmad Arif Ichwani

NIM.5212413045

**TEKNIK MESIN
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
2020**



UNNES

UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

**PENGARUH VARIASI WAKTU PROSES
PENCAMPURAN DAN TEMPERATUR *SINTERING*
TERHADAP SIFAT MAGNET BARIUM FERIT
BERBASIS PASIR BESI**

PERSETUJUAN PEMBIMBING

Nama : Achmad Arif Ichwani
NIM : 5212413045
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Pengaruh Variasi Waktu Proses Pencampuran dan
Temperatur Sintering Terhadap Sifat Magnet Barium Ferit
Berbasis Pasir Besi

Skripsi ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke sidang panitia ujian
Skripsi Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri
Semarang.

Semarang, Desember 2019

Pembimbing



Dr. Rahmat Doni Widodo, S.T., M.T.

NIP. 197509272006041002

PENGESAHAN

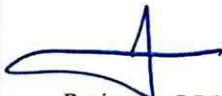
Skripsi dengan judul Pengaruh Variasi Waktu Proses Pencampuran dan Temperatur Sintering Terhadap Sifat Magnet Barium Ferit Berbasis Pasir Besi telah dipertahankan di depan sidang Panitia Ujian Skripsi Fakultas Teknik UNNES pada tanggal 14 Januari 2020.

Oleh

Nama : Achmad Arif Ichwani
NIM : 5212413045
Program Studi : Teknik Mesin

Panitia:

Ketua



Rusiyanto, S.Pd., M.T.
NIP. 197403211999031002

Sekretaris



Wahyudi, S. Pd., M. Eng.
NIP. 198003192005011001

Penguji 1



Rusiyanto, S.Pd., M.T.
NIP. 197403211999031002

Penguji2



Samsudin Anis, ST., M.T., P.hD.
NIP.197601012003121002

Penguji3/Pembimbing



Dr. Rahmat Doni Widodo, ST., M.T
NIP. 197509272006041002

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang



Dr. Nur Qudus, M.T., IPM
NIP. 196911301994031001

PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Skripsi ini, adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik Sarjana, baik di Universitas Negeri Semarang (UNNES) maupun di perguruan tinggi lain.
2. Karya tulis ini adalah murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan Pembimbing dan masukan Tim Penguji.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena karya ini, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi ini.

Semarang, Januari 2020

Yang membuat pernyataan,



Achmad Arif Ichwani

NIM.5212413045

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

MOTTO

Barang siapa yang menghendaki kehidupan dunia maka wajib baginya memiliki ilmu, dan barang siapa yang menghendaki kehidupan Akhirat, maka wajib baginya memiliki ilmu, dan barang siapa menghendaki keduanya maka wajib baginya memiliki ilmu. (HR. Turmudzi)

Barang siapa yang memudahkan kesulitan seorang mu'min dari berbagai kesulitan-kesulitan dunia, Allah akan memudahkan kesulitan-kesulitannya pada hari kiamat. Dan siapa yang memudahkan orang yang sedang dalam kesulitan niscaya akan Allah memudahkan baginya di dunia dan akhirat. (HR. Muslim)

Sebaik-baik manusia adalah yang paling bermanfaat bagi manusia. (HR. Ahmad)

PERSEMBAHAN

Untuk Bapak Sumahdi, Ibu Winarsih, Muhammad Havis Setiawan dan seluruh keluarga tercinta.

RINGKASAN

Achmad Arif Ichwani. 2019. Pengaruh Variasi Waktu Proses Pencampuran dan Temperatur Sintering Terhadap Sifat Magnet Barium Ferit Berbasis Pasir Besi. Dr. Rahmat Doni Widodo, ST., M.T. Teknik Mesin

Persebaran pasir besi di Indonesia sangatlah melimpah khususnya di pesisir pantai selatan pulau Jawa. Pada umumnya pasir besi hanya dijadikan sebagai bahan bangunan, padahal pasir besi mengandung bahan mineral magnetik yang merupakan basis untuk pengembangan alat elektronik dalam kehidupan modern. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi waktu proses pencampuran dan temperatur *sintering* terhadap densitas, ukuran kristal, dan sifat magnet *barium heksaferit* berbasis pasir besi.

Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimen, dimana Pasir besi dari pantai selatan Purworejo disaring secara mekanik menggunakan magnet permanen sebanyak 35 kali dan kemudian dipanaskan pada temperatur 800°C selama 5 jam. Kemudian pasir besi hasil pemanasan dicampur dengan barium karbonat (BaCO_3) dengan alat *shaker mill* selama 1, 3, 6, 10 jam dan hasil serbuk 10 jam dikompaksi dengan pemberian tekanan sebesar 5 ton. Serbuk yang sudah tercampur di-*sintering* pada temperature 1100°C, 1150°C dan 1200°C dan kemudian di uji nilai densitas, ukuran partikel dan sifat magnetiknya.

Hasil penelitian yang didapatkan menunjukkan nilai densitas dan ukuran kristal, seiring penambahan temperature *sintering* hasil yang didapatkan mengalami kenaikan. Ukuran partikel yang paling kecil berada pada 6 jam *milling* yaitu sebesar 18,631 μm . Pada proses *sintering* 1100 °C menghasilkan karakteristik sifat magnet yang paling baik yaitu dengan nilai magnetik remanen (Br) sebesar 20,38 emu/g, magnetik saturasi (σ_s) sebesar 42,64 dan koersifitas (Hc) sebesar 1,627 kOe.

Kata kunci: Pasir besi, *sintering*, densitas, ukuran partikel, karakteristik magnet

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena berkat rahmat dan hidayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini yang berjudul “Pengaruh Variasi Waktu Proses Pencampuran dan Temperatur Sintering Terhadap Sifat Magnet Barium Ferit Berbasis Pasir Besi”.

Pada kesempatan ini tak lupa penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang setulus-tulusnya kepada semua pihak yang telah membantu, baik dalam pelaksanaan observasi, praktik, maupun penyusunan proposal ini, diantaranya:

1. **Prof. Dr. Fathur Rokhman M.Hum, selaku Rektor** Universitas Negeri Semarang.
2. Dr. Nur Qudus, M.T., Dekan Fakultas Teknik UNNES.
3. Rusiyanto, S.Pd.,M.T., Ketua Jurusan Teknik Mesin UNNES.
4. Samsudin Anis, ST., M.T., P.hD., Ketua Program Studi Teknik Mesin S1.
5. Dr. Rahmat Doni Widodo, ST., M.T., selaku Dosen Pembimbing Skripsi yang dengan sabar membantu, memberikan waktu, dan bimbingan dalam penyusunan skripsi ini.
6. Rusiyanto, S.Pd., M.T., selaku Dosen Penguji Skripsi 1 yang berkenan membantu, memberikan waktu, dan menjadi penguji dalam penyusunan skripsi ini.
7. Samsudin Anis, ST., M.T., P.hD., selaku Dosen Penguji Skripsi 2 yang berkenan membantu, memberikan waktu, dan menjadi penguji dalam penyusunan skripsi ini.

8. Semua dosen di Jurusan Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang yang telah memberikan materi dan pembelajaran sebagai bekal pengetahuan penulis.
9. Bapak Sumahdi, Ibu Winarsih dan kakak Muhammad Havis Setiawan tersayang yang selalu memberi dukungan do'a dan segalanya untuk dapat menyelesaikan studi dengan baik.
10. Para sahabatku dan teman satu bimbingan Bagus, Imam, Rifki, Panca dan teman lainnya yang tak bisa saya sebutkan satu persatu yang telah memberikan dukungan saat penyusunan skripsi ini.
11. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Mesin S1 angkatan 2013 dengan kebersamaan dan semangatnya.
12. Seluruh pihak yang telah membantu dalam penulisan skripsi ini yang tidak bisa dituliskan satu persatu.

Semoga bantuan yang telah diberikan mendapatkan imbalan dari Allah SWT. Oleh karena itu, kritik dan saran membangun penulis terima dengan senang hati. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat, baik bagi penulis maupun pembaca.

Semarang, Desember 2019

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR BERLOGO	ii
JUDUL DALAM	iii
PERSETUJUAN PEMBIMBING.....	iv
PENGESAHAN	v
PERNYATAAN KEASLIAN.....	vi
MOTTO DAN PERSEMBAHAN	vii
RINGKASAN	viii
PRAKATA	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL.....	xviii
DAFTAR SINGKATAN TEKNIS DAN LAMBANG	xix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi Masalah	3
1.3 Pembatasan Masalah	4
1.4 Rumusan Masalah	5
1.5 Tujuan Penelitian.....	5
1.6 Manfaat Penelitian.....	5
BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI.....	7
2.1 Kajian Pustaka.....	7
2.2 Landasan Teori	9
2.2.1 Pasir Besi.....	9

2.2.2	Sifat Magnet	11
2.2.2.1	Magnet Permanen.....	20
2.2.2.2	Magnet Lunak (<i>soft magnet</i>)	24
2.2.3	<i>Barium Heksaferit</i>	25
2.2.4	<i>Mechanical Alloying</i>	26
2.2.5	Kompaksi Mekanik (<i>Mechanical compaction</i>).....	27
2.2.6	<i>Sintering</i>	29
2.2.7	<i>Density</i>	31
2.2.8	PSA (<i>particle size analyzer</i>).....	33
2.2.9	XRD (<i>X-Ray Diffraction</i>).....	34
2.2.10	VSM (<i>Vibrating Sample Magnetometer</i>)	37
BAB III METODE PENELITIAN.....		39
3.1	Waktu dan Tempat Pelaksanaan.....	39
3.1.1	Waktu Pelaksanaan.....	39
3.1.2	Tempat Pelaksanaan.....	39
3.2	Desain Penelitian.....	39
3.3	Alat dan Bahan Penelitian	41
3.3.1	Alat Penelitian	41
3.3.2	Bahan Penelitian.....	47
3.4	Parameter Penelitian.....	47
3.4.1	Variabel Bebas	47
3.4.2	Variabel Terikat.....	47
3.5	Teknik Pengumpulan Data	47
3.6	Kalibrasi Instrumen	52
3.7	Teknik Analisis Data.....	53

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	54
4.1 Deskripsi Data	54
4.2 Analisis Data	56
4.3 Pembahasan Penelitian	87
BAB V PENUTUP.....	95
5.1 Kesimpulan.....	95
5.2 Saran.....	96
DAFTAR PUSTAKA	97
LAMPIRAN.....	100

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Struktur hematit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$).....	11
Gambar 2.2	Sketsa $\frac{1}{4}$ sel satuan magnetit.....	12
Gambar 2.3	Struktur domain magnetic yang bergantung pada ukuran partikel dari superparamagnetik ke <i>single domain</i> dan <i>multi domain</i> feromagnetik.....	16
Gambar 2.4	<i>X-ray diffraction</i> pada $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ dengan perbandingan rasio Fe/Ba...	18
Gambar 2.5	<i>Loop histerisis</i> magnet keras.....	21
Gambar 2.6	<i>Loop histerisis</i> magnet $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ nanopartikel dengan rasio perbandingan Fe/Ba.....	22
Gambar 2.7	<i>Loop histerisis</i> magnet lunak.....	24
Gambar 2.8	Efek tabrakan antara dua bola pada bubuk yang terperangkap.....	27
Gambar 2.9	Aksi tunggal dan ganda penekanan serbuk.....	28
Gambar 2.10	(a) Material magnetit Fe_3O_4 (b) Material hematit Fe_2O_3	30
Gambar 2.11	Perubahan pada skala mikroskopis saat proses <i>sintering</i>	31
Gambar 2.12	Pola <i>diffraction</i> dari gelombang hamburan dari sebuah <i>spheroid</i>	33
Gambar 2.13	Prinsip kerja dari <i>Dynamic light scattering</i> (1) panjang gelombang merah <i>diode</i> laser untuk partikel $> 500\text{nm}$ (2) LED biru untuk partikel $< 5000\text{nm}$ (3) <i>detector</i> sudut rendah untuk partikel besar (4) side dan sudut kembali.....	34
Gambar 2.14	<i>X-ray Spectrometer</i>	35
Gambar 2.15	Ilustrasi difraksi sinar-X pada XRD.....	36

Gambar 2.16	Kurva histerisis.....	38
Gambar 3.1	Diagram Alir Pelaksanaan Penelitian.....	40
Gambar 3.2	Timbangan digital.....	41
Gambar 3.3	<i>Furnace</i>	42
Gambar 3.4	Mortar.....	42
Gambar 3.5	<i>Hydraulic press</i>	43
Gambar 3.6	<i>Dies</i> (Cetakan Spesimen).....	43
Gambar 3.7	<i>Shaker mill</i>	44
Gambar 3.8	Bola baja.....	44
Gambar 3.9	Magnet keras (<i>hard magnet</i>).....	45
Gambar 3.10	<i>Laser Particle Sizer LLPA-C10</i>	45
Gambar 3.11	Mesin XRD <i>Expert 3 Powder</i>	45
Gambar 3.12	Jangka Sorong.....	46
Gambar 3.13	<i>Vibrating sample magnetometer</i>	46
Gambar 3.14	Desain spesimen magnet <i>barium heksaferit</i>	50
Gambar 4.1	Hasil PSA pada pasir besi yang telah dioksidasi 800°C.....	57
Gambar 4.2	Hasil PSA pada campuran pasir besi yang telah dioksidasi 800°C + BaCO ₃ yang di- <i>milling</i> satu jam.....	58
Gambar 4.3	Hasil PSA pada campuran pasir besi yang telah dioksidasi 800°C + BaCO ₃ yang di- <i>milling</i> 3 jam.....	59
Gambar 4.4	Hasil PSA pada campuran pasir besi yang telah dioksidasi 800°C + BaCO ₃ yang di- <i>milling</i> 6 jam.....	61
Gambar 4.5	Hasil PSA pada campuran pasir besi yang telah dioksidasi 800°C + BaCO ₃ yang di- <i>milling</i> 10 jam.....	62

Gambar 4.6	Pola difraksi <i>x-ray</i> pada <i>raw material</i> pasir besi.....	63
Gambar 4.7	Hasil analisis pola difraksi <i>x-ray</i> pada <i>raw-material</i> dari pasir besi.....	64
Gambar 4.8	Kuantitatif dua senyawa utama pada <i>raw material</i> pasir besi.....	65
Gambar 4.9	Karakteristik sifat fisik <i>magnetite</i> (Fe_3O_4) pada <i>raw material</i>	66
Gambar 4.10	Karakteristik sifat fisik <i>crystalite low</i> (SiO_2) pada <i>raw material</i>	67
Gambar 4.11	Hasil analisis pola difraksi <i>x-ray</i> setelah 35 kali penyaringan.....	68
Gambar 4.12	Kuantitatif dua senyawa utama pada pasir besi setelah 35 kali penyaringan.....	69
Gambar 4.13	Karakteristik sifat fisik <i>magnetite low</i> (Fe_3O_4) pada pasir besi setelah 35 kali penyaringan.....	70
Gambar 4.14	Karakteristik sifat fisik <i>iron-alpha</i> (Fe) pada pasir besi setelah 35 kali penyaringan.....	71
Gambar 4.15	Hasil analisis pola difraksi <i>x-ray</i> setelah proses dioksidasi 800°C	72
Gambar 4.16	Kuantitatif senyawa utama pada pasir besi setelah proses oksidasi 800°C.....	73
Gambar 4.17	Karakteristik sifat fisik <i>iron (III) oxide</i> (Fe_2O_3) pada pasir besi setelah oksidasi pada temperatur 800°C.....	74
Gambar 4.18	Karakteristik sifat fisik <i>iron-alpha</i> (Fe) pada pasir besi setelah oksidasi pada temperatur 800°C.....	75
Gambar 4.19	Pola difraksi <i>x-ray</i> campuran Fe_2O_3 dengan BaCO_3 yang di- <i>sintering</i> pada temperatur 1100°C, 1150°C, dan 1200°C dan ditahan selama 2 jam.....	76
Gambar 4.20	Pola difraksi <i>x-ray</i> campuran Fe_2O_3 dengan BaCO_3 yang di- <i>sintering</i> pada temperatur 1100°C.....	77

Gambar 4.21	Kuantitatif senyawa utama pada campuran Fe_2O_3 dengan BaCO_3 yang di <i>sintering</i> pada temperatur 1100°C	78
Gambar 4.22	Karakteristik sifat fisik $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ pada temperatur 1100°C	79
Gambar 4.23	Pola difraksi <i>x-ray</i> campuran Fe_2O_3 dengan BaCO_3 yang di <i>sintering</i> pada temperatur 1150°C	80
Gambar 4.24	Kuantitatif senyawa utama pada campuran Fe_2O_3 dengan BaCO_3 yang di <i>sintering</i> pada temperatur 1150°C	81
Gambar 4.25	Karakteristik sifat fisik $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ pada temperatur 1150°C	82
Gambar 4.26	Pola difraksi <i>x-ray</i> campuran Fe_2O_3 dengan BaCO_3 yang di <i>sintering</i> pada temperatur 1200°C	83
Gambar 4.27	Kuantitatif senyawa utama pada campuran Fe_2O_3 dengan BaCO_3 yang di <i>sintering</i> pada temperatur 1200°C	84
Gambar 4.28	Karakteristik sifat fisik $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ pada temperatur 1200°C	85
Gambar 4.29	Kurva histerisis hasil analisis sifat magnet $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ yang di- <i>sintering</i> pada temperatur 1100°C , 1150°C , dan 1200°C selama 2 jam.....	86
Gambar 4.30	Grafik nilai densitas pada temperatur 1100°C , 1150°C , dan 1200°C pada $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	87
Gambar 4.31	Ukuran partikel rata-rata campuran Fe_2O_3 dan BaCO_3 sebagai fungsi waktu <i>milling</i>	88
Gambar 4.32	Grafik ukuran kristal terhadap kenaikan temperatur <i>sintering</i>	90

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Informasi dasar unsur besi.....	11
Tabel 2.2	Sifat fisik dan magnetik dari $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ dengan perbandingan rasio Fe/Ba.....	17
Tabel 2.3	Sifat fisik dari magnet keramik.....	19
Tabel 2.4	Tipe magnet ferit, sifat magnetik dan komposisi kimia bahan magnet keramik.....	20
Tabel 2.5	Sifat fisik yang dihasilkan oleh metode metalurgi serbuk dengan komposisi kimia Ba/Sr $0.6 \text{Fe}_2\text{O}_3$	20
Tabel 2.6	Data karakteristik sifat magnet komposit Ba Ferit dengan pengikat karet alam.....	23
Tabel 2.7	Kerapatan dari beberapa bahan ferit.....	32
Tabel 3.1	Jumlah Kebutuhan Spesimen.....	49
Tabel 3.2	Ukuran Partikel Bahan Pada Uji PSA.....	51
Tabel 3.3	Data Karakteristik Sifat Magnet.....	51
Tabel 4.1	Data pengukuran <i>density</i> dengan variasi temperature <i>sintering</i>	55
Tabel 4.2	Data ukuran partikel rata-rata dengan variasi waktu <i>milling</i>	56
Tabel 4.3	Hasil pengukuran <i>density</i> dengan variasi temperatur pada $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	56
Tabel 4.4	Hasil analisis sifat magnet $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ yang di- <i>sintering</i> pada temperatur 1100°C, 1150°C, dan 1200°C selama 2 jam.....	86
Tabel 4.5	Data perbandingan sifat magnetik $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ hasil penelitian dengan penelitian Xu, et al., 2007.....	92

DAFTAR SINGKATAN TEKNIS DAN LAMBANG

χ	: Suseptibilitas magnetik (m^3/kg)
μ_0	: momen magnetic ($\text{N.m/T} = \text{A.m}^2 = \text{J/T}$)
Z	: jumlah elektron per atom
e	: muatan elektronik
m_e	: massa elektronik
r	: jari-jari atom
m_k	: massa sampel setelah dikeringkan (g)
m_b	: massa sampel setelah direndam air selama 10 menit (g)
ρ	: densitas (g/cm^3)
T	: tesla (kekuatan fluks medan magnet)
Ba	: barium
λ	: Panjang gelombang (\AA)
d	: jarak antara dua bidang kisi
Oe	: oersted
θ	: sudut antara sinar datang dengan bidang normal
n	: bidang orde pembiasan
B	: fluks magnetic (T)
H	: intensitas magnet (kOe)
Br	: magnetisasi remanen (emu/g)
σ_s	: magnetisasi saturasi (emu/g)
Hc	: koersifitas (kOe)
BHmax	: <i>maximum energy product</i>
PSA	: <i>Particle Size Analyzer</i>
VSM	: <i>Vibrating Sample Magnetometer</i>
XRD	: <i>X-ray Diffraction</i>
MMPA	: <i>Magnetic Materials Producers Association</i>
ICDD	: <i>International Centre for Diffraction Data</i>

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Berbagai tempat di Indonesia telah diketahui memiliki potensi sumber daya alam yang melimpah. Salah satunya adalah unsur magnetik alam yang berada pada pasir besi. Pasir besi di Indonesia sangatlah melimpah dan banyak terdapat di pulau Jawa khususnya di pantai selatan. Salah satunya pantai selatan Kutoarjo, Kabupaten Purworejo dengan potensi pasir besinya yang diperkirakan memiliki sumber daya cadangan konsentrat 1.700.000 ton dan terbukti 250.000 ton dengan kadar Fe total 47,4% (Hilman, et al., 2015: 78). Pada umumnya pasir besi hanya dijadikan sebagai bahan bangunan, padahal pasir besi mengandung bahan mineral magnetik yang merupakan basis untuk pengembangan dalam kehidupan modern. Pemanfaatan bahan magnet untuk berbagai produk industri yang dilakukan beberapa negara maju dijadikan sebagai salah satu acuan. Untuk meningkatkan sifat bahan magnet dapat ditingkatkan atau dikembangkan melalui pendekatan nanoteknologi dalam proses sintesanya (Purwanto, 2008: 107).

Magnet yang biasanya digunakan pada hampir semua peralatan elektronika merupakan magnet ferit. Magnet ferit biasanya terbuat dari hasil sintesis pasir besi dengan menggunakan bahan dasar besi oksida. Dalam pasir besi terkandung beberapa anggota besi oksida, diantaranya magnetit (Fe_3O_4), maghemit ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) dan hematit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) (Aji, et al., 2007: 106). Maghemit dan hematit memiliki komposisi kimia yang sama (Fe_2O_3) akan tetapi memiliki struktur kristal yang berbeda.

Hasil dari olahan pasir besi dapat menghasilkan magnet keras (*hard magnet*) dan magnet lunak (*soft magnet*). Salah satu magnet keras yang biasanya digunakan dalam industri adalah *barium ferit* ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_9$) dan *strontium ferit* ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_9$) (Thompson, 1968: 315). Magnet keras banyak digunakan pada industri karena mempunyai sifat permanen setelah dimagnetisasi. *Barium ferit* memiliki nilai magnetik remanen (B_r) yang baik dan memiliki nilai koersifitas (H_c) lebih dari 200 Oe. Ini membuktikan bahwa *barium ferit* merupakan magnet keras (Wicaksono, et al., 2013: 83).

Bahan dasar pembuatan magnet *barium ferit* adalah hematit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) yang didapatkan dari proses oksidasi magnetit (Fe_3O_4). Hematit yang diperoleh dari proses sintesis dengan mengoksidasi magnetit (Fe_3O_4) pada temperatur 800 °C berwarna ungu dan memiliki struktur heksagonal (Aji, et al., 2007: 108).

Sintesis *Barium ferit* dari hematit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) dan barium karbonat (BaCO_3) dapat dilakukan menggunakan beberapa metode, diantaranya dengan metode metalurgi serbuk. Metalurgi serbuk merupakan teknik pembuatan logam dengan bahan dasar berupa serbuk halus yang kemudian dicetak pada suatu cetakan dan kemudian *disintering* di bawah titik cairnya. Dalam prakteknya, untuk mendapatkan bahan dengan kualitas yang optimal, diperlukan ukuran butir serbuk kurang dari 1 mikron (10^{-6}m) (Billah, 2006: 31). Metode metalurgi serbuk ini merupakan metode pemrosesan yang sederhana dan murah, sangat menjanjikan untuk pembuatan material barium heksaferit dengan pasir besi yang didapat dari sumber daya alam sebagai material utamanya (Widanarto, et al., 2015: 128).

Dari uraian di atas menunjukkan bahwa Indonesia memiliki jumlah pasir besi yang belum dimanfaatkan secara optimal. Peluang akan pengolahan pasir besi tersebut menjadi terbuka lebar untuk bahan kebutuhan industri, maka dalam penelitian ini penulis bermaksud melakukan penelitian dalam pembuatan dan karakterisasi magnet hasil campuran pasir besi yang berasal dari pantai Ketawang Indah, Purworejo dengan barium karbonat (BaCO_3). Adapun penelitian tentang karakteristik magnet *Barium ferit* berbasis pasir besi masih sedikit, sehingga dalam penelitian ini akan mempelajari lebih jauh tentang sintesis dan karakterisasi *Barium ferit* berbasis pasir besi. Dalam penelitian ini difokuskan pada **PENGARUH VARIASI WAKTU PROSES PENCAMPURAN DAN TEMPERATUR SINTERING TERHADAP SIFAT MAGNET BARIUM FERIT BERBASIS PASIR BESI.**

1.2 Identifikasi Masalah

Identifikasi masalah pada penelitian ini adalah:

1. Keberadaan unsur magnetik alam dalam hal ini pasir besi di Purworejo, Indonesia yang melimpah menjadikannya sangat potensial untuk dikembangkan dari segi kemagnetannya.
2. Penelitian tentang penggunaan pasir besi yang ada di Indonesia belum optimal dan masih sedikit khususnya pasir besi yang berasal dari pantai Ketawang Indah, Purworejo masih belum banyak dilakukan, untuk nantinya diaplikasikan menjadi magnet permanen (*hard magnet*).

3. Parameter-parameter yang perlu diperhatikan didalam sintesis pasir besi untuk dijadikan magnet permanen (*hard Magnet*) adalah bahan dasarnya, penambahan unsur senyawa lain dan metode pemrosesan. Untuk melihat sifat magnet permanen (*hard magnet*) yang dihasilkan dengan cara karakteristik magnet melalui pengamatan ukuran partikel, kristalit senyawa magnet, remanen dan koersifitas magnet tersebut.

1.3 Pembatasan Masalah

Pada penelitian ini peneliti perlu membatasi beberapa masalah yaitu:

1. Bahan yang digunakan yaitu pasir besi yang berasal dari Pantai Ketawang Indah, Purworejo dan barium karbonat (BaCO_3).
2. Bahan hematit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) yang digunakan adalah hasil oksidasi dari bahan magnetit (Fe_3O_4) yang diperoleh dari hasil ekstraksi pasir besi.
3. Bahan campuran yang digunakan adalah barium karbonat (BaCO_3) dengan kemurnian 98%.
4. Variasi waktu proses pencampuran (*milling*) yaitu 0, 1, 3, 6, 10 jam dengan menggunakan mesin *ball milling* atau proses *mechanical alloying*.
5. Variasi temperatur *sintering* pada material yaitu 1100 °C, 1150 °C, dan 1200 °C.
6. Tekanan yang digunakan untuk proses kompaksi yaitu 5 ton.
7. Karakterisasi bahan campuran antara pasir besi dengan BaCO_3 yang nantinya menjadi bahan magnet *Barium Ferit* meliputi:
 - a. Densitas bahan (*Bulk Density*) dengan metode *archimedes*.

- b. Ukuran partikel dari variasi waktu proses pencampuran dengan menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA).
- c. Senyawa yang terkandung dalam bahan dengan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD).
- d. Sifat magnetik bahan dengan menggunakan *Vibratory Sample Magnetometer* (VSM).

1.4 Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan dikaji pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh proses variasi waktu pencampuran terhadap sifat magnet *Barium ferit* berbasis pasir besi?
2. Bagaimana pengaruh temperatur *sintering* terhadap sifat magnet *Barium ferit* berbasis pasir besi?

1.5 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui:

1. Pengaruh proses variasi waktu pencampuran terhadap sifat magnet *Barium ferit* berbasis pasir besi.
2. Pengaruh temperatur *sintering* terhadap sifat magnet *Barium ferit* berbasis pasir besi.

1.6 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut.

1. Hasil penelitian diharapkan dapat bermanfaat sebagai bahan kajian dan informasi bagi masyarakat yang ingin mengetahui cara membuat magnet dengan bahan alam di sekitar, serta karakteristik sifat magnetik yang dihasilkan.

2. Dapat menjadi referensi bagi penelitian sejenisnya atau penelitian yang lebih luas tentang magnet permanen.
3. Hasil penelitian berupa magnet permanen *Barium Ferit* yang akan memiliki nilai jual lebih tinggi dari pada bahan asalnya yaitu pasir besi. Produk hasil penelitian ini dapat digunakan untuk bahan dasar dalam industri elektronik, misalnya: pengeras suara (*loudspeaker*), motor DC kecil, *rice cooker*, *KWH-meter*, dan industri lainnya seiring dengan perkembangan teknologi.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Kajian Pustaka

Elqudsy, et al., (2016), melakukan penelitian yang berjudul “*The Particle and Crystallite Size Analysis of BaTiO₃ Produced by Conventional Solid-state Reaction Process*”. Penelitian ini dilakukan dengan proses reaksi *solid-state* konvensional, dimana proses yang menggabungkan antara *mechanical alloying* dan proses *sintering* dengan BaCO₃ dan TiO₂. Variasi waktu penggilingan dalam penelitian ini mulai dari 1 jam hingga 60 jam. Serbuk material digiling dan diselidiki dengan menganalisa ukuran partikel (PSA) dan proses *sintering* hingga 1200 °C yang nantinya di uji dengan *X-Ray Diffraction* untuk menganalisis pembentukan fasa dan ukuran kristal. Penelitian ini memiliki persamaan dengan penelitian yang akan dilakukan, yaitu pada bagian pengujian ukuran partikel (PSA) dan *X-Ray Diffraction*.

Simbolon, et al., (2013), melakukan penelitian yang berjudul “*Sintesis dan Karakterisasi Barium M-Heksaferit dengan Doping Ion Mn dan Temperatur Sintering*”. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui karakterisasi *barium heksaferit* dengan penambahan Mn sebesar 0,1-1,5 % (mol) dan di *sintering* pada temperatur 1100 °C, 1150 °C dan 1200 °C selama 2 jam. Dari hasil pengukuran densitas dan porositas magnet, menunjukkan bahwa nilai densitas cenderung menurun dan porositas meningkat sebanding dengan jumlah *doping ion Mn*. Dari hasil foto SEM/EDX terlihat adanya cacat berupa retakan berbentuk garis dengan lebar 2,05 µm dan berpori yang memiliki diameter sebesar 2,88 µm. Penelitian

tersebut memiliki kesamaan dengan penelitian yang akan dilakukan, yaitu pada bagian variasi temperatur *sintering* mulai dari 1100 °C, 1150 °C dan 1200 °C.

Xu, et al., (2007) melakukan penelitian yang berjudul “*Effect of Stoichiometry on the Phase Formation and Magnetic Properties of BaFe₁₂O₁₉ Nanoparticles By Reverse Micelle Technique*”. Pada penelitian ini, melakukan studi tentang pengaruh *stoichiometry* untuk pembuatan nanopartikel BaFe₁₂O₁₉ terhadap sifat magnetnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa material dengan rasio Fe/Ba = 11 memiliki nilai magnetik saturasi tertinggi (63,999 *emu/g*), magnetik remanen (33,176 *emu/g*), dan memiliki *intrinsic coercivity* yang relatif tinggi (4,8341 kOe), serta Mr/Ms = 0,5 yang mengindikasikan material *singlephase* BaFe₁₂O₁₉. Penelitian ini memiliki kesamaan dengan penelitian yang akan dilakukan, yaitu pada bagian komposisi bahan yang akan dicampurkan dengan menggunakan rumus *stoichiometry*.

Billah (2006) melakukan penelitian yang berjudul “Pembuatan dan Karakterisasi Magnet *Strontium Ferit* Dengan Bahan Dasar Pasir Besi”. Pada penelitian ini, melakukan studi tentang karakterisasi magnet *Strontium Ferit* (*SrO.5,6Fe₃O₄*) terhadap karakterisasi produk komersial (PT. NX. Indonesia). Hasil karakterisasi dengan XRD menunjukkan bahwa *Strontium Ferit* hasil sintesis pasir besi memiliki struktur kristal yang bersesuaian dengan serbuk produk komersial. Sementara itu dari hasil pengukuran dengan Permagraph diperoleh bahwa magnet *Strontium Ferit* memiliki induksi remanen (Br) sebesar 1,195 kG, koersivitas (Hc) sebesar 1,4205 kOe, nilai energi produk maksimum (BH)_{maks} sebesar 0,265 MGOe dan nilai kerapatan sebesar 4,555 g/cm³. Penelitian ini memiliki kesamaan dengan

penelitian yang akan dilakukan, yaitu pada bagian pengujian XRD, pengujian kemagnetan pada material bahan dengan menggunakan Permagraph, dan pengujian densitas yang nantinya akan diketahui nilai kerapatan pada material magnet tersebut.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pasir Besi

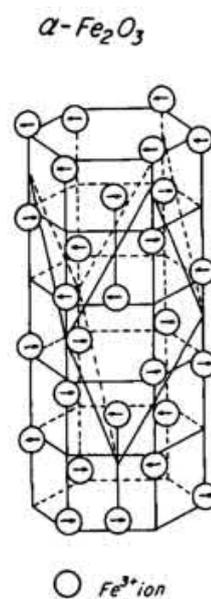
Pasir besi adalah pasir dengan konsentrasi besi yang signifikan. Pasir ini mengandung magnetit (Fe_3O_4) dan juga mengandung beberapa senyawa kecil lainnya seperti *Titanium* dan *Silika* (Jalil et al., 2014: 111). Hal ini biasanya berwarna abu-abu gelap atau berwarna kehitaman. Pada umumnya ferit dibagi menjadi tiga kelas:

1. Ferit lunak, ferit jenis ini mempunyai formula MFe_2O_4 , dimana M adalah Cu, Zn, Ni, Co, Fe, Mn, Mg dengan struktur kristal seperti mineral *spinel*. Sifat pada bahan ini biasanya mempunyai permeabilitas dan hambatan jenis yang tinggi, tetapi memiliki koersivitas yang rendah.
2. Ferit keras, ferit jenis ini mempunyai formula $\text{MFe}_{12}\text{O}_{19}$, dimana M adalah Ba, Sr, Pb. Bahan ini cocok digunakan untuk membuat *hard magnet* karena mempunyai gaya koersivitas dan remanen yang besar dan mempunyai struktur kristal heksagonal dengan momen-momen magnetik yang sejajar dengan sumbu c.
3. Ferit berstruktur garnet, bahan jenis ini mempunyai magnetisasi spontan yang bergantung pada temperatur secara khas. Strukturnya sangat rumit,

berbentuk kubik dengan sel satuan disusun tidak kurang dari 160 atom (Idayanti, 2002 dalam Billah, 2006: 12).

Material ferit juga dikenal sebagai magnet, yang berasal dari oksida besi dengan rumus kimia $MO.(Fe_2O_3)_6$, dimana M adalah Ba, Sr atau Pb. Ketika logam besi dari grup ferit (Fe_2O_3), selanjutnya ferit dapat diterapkan baik pada bahan magnet keras ataupun lunak (*soft magnet*) (Thompson, 1968: 156).

Material magnetik ferit yang memiliki sifat-sifat campuran beberapa oksida logam, dimana oksida besi hematit (Fe_2O_3) merupakan komponen yang paling utama. Hematit merupakan oksida besi dengan komposisi kimia Fe_2O_3 , salah satu mineral yang paling melimpah dipermukaan maupun di kerak bumi yang dangkal.



Gambar 2.1 Struktur hematit ($\alpha-Fe_2O_3$)
(Sumber: Dunlop dan Ozdemir, 1997: 71)

Hematit berasal dari oksidasi material magnetit (Fe_3O_4) hasil sintesis pada temperatur 800 °C yang nantinya material tersebut berubah menjadi fasa hematit (Aji, et al., 2007: 108). Perubahan fasa tersebut teridentifikasi melalui perubahan

warna dan struktur. Warna yang diperoleh dari proses oksidasi ini berwarna ungu (*purple*) dan memiliki struktur heksagonal.

Pasir besi dapat digunakan sebagai bahan pembuatan magnet. Material ini dapat menghasilkan medan magnet tanpa harus diberi arus listrik yang mengalir dalam sebuah kumparan untuk mempertahankan medan magnet yang dimilikinya. Dari mineral-mineral bijih besi magnetit adalah mineral dengan kandungan Fe yang paling tinggi, tetapi terdapat dalam jumlah kecil. Sementara hematit merupakan mineral utama yang dibutuhkan dalam industri besi.

Tabel 2.1 Informasi dasar unsur besi

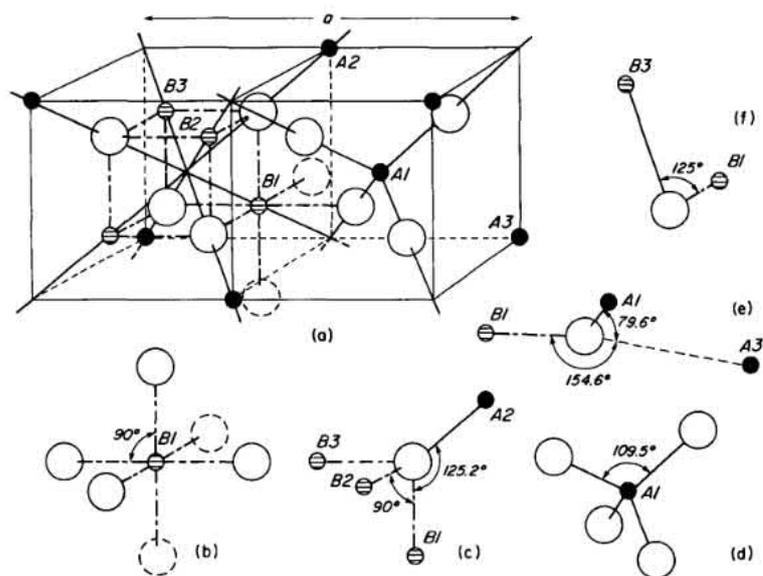
Nama Unsur	Besi
Simbol	Fe
Nomor Atom	26
Massa Atom	55,845 g/mol
Titik Didih	3143 K
Titik Lebur	1811 K
Struktur Kristal	BCC
Warna	Perak keabu-abuan
Konfigurasi Elektron	[Ar] 3d6 4s2

2.2.2 Sifat Magnet

Magnet merupakan benda yang mampu menarik benda-benda tertentu dalam jangkauannya. Setiap magnet memiliki sifat kemagnetan yaitu kemampuan benda tersebut untuk menarik besi dan bahan feromagnetik lainnya. China merupakan bangsa pertama yang memanfaatkan magnet sebagai petunjuk arah atau kompas (Dunlop dan Ozdemir, 1997: 1). Pada daerah tertentu, kutub material magnetit alami (Fe_3O_4) dari satu batu gamping akan menarik atau menolak kutub batu gamping lainnya. Polarisasi magnetik ini adalah kunci untuk penggunaannya

sebagai kompas dalam navigasi. Batu kapur yang di tangguhkan akan berotasi sampai pada poros magnetisasi polarisasi, bergabung dengan kutub utara dan selatan batu gamping. Batu gamping akan berbaris dengan garis-garis medan imajiner yang bergabung dengan kutub geomagnetik utara dan selatan.

Magnetit adalah satu-satunya mineral magnetik paling penting di bumi. Mineral magnetik tersebut terjadi di benua-benua dan di kerak samudra sebagai mineral primer atau sekunder dalam batuan, sedimen, dan tinggi rendahnya mutu metamorfik batuan beku (Dunlop dan Ozdemir, 1997: 48). Magnetit merupakan mineral kubik dengan struktur *spinel*. Anion oksigen dari kisi *face center cubic* (FCC), dengan kation Fe^{2+} dan Fe^{3+} yang terletak di interstisial. Sel satuan dengan konstanta kisi $a = 8.396 \text{ \AA}$, terdiri dari empat unit seperti gambar.



Gambar 2.2 Sketsa $\frac{1}{4}$ sel satuan magnetit.
(Sumber: Dunlop dan Ozdemir, 1997: 49)

Parameter kisi yaitu padat dan lingkaran menetas mewakili *kation* dalam *tetrahedral* pada koordinat situs A dan *oktahedral* pada koordinat situs B, masing-

masing dengan O^{2-} ion (lingkaran terbuka besar). Gambar (b) dan (f) merupakan ikatan sudut ikatan untuk pasangan kation tertentu dalam gambar (a).

Berdasarkan sifat kemagnetan bahan, dibagi menjadi beberapa golongan, yaitu diamagnetik, paramagnetik dan feromagnetik.

a) Diamagnetik

Diamagnetik adalah sifat suatu benda untuk menciptakan suatu medan magnet ketika dikenai medan magnet. Sifat dari bahan ini menyebabkan efek tolak menolak. Pada dasarnya bahan diamagnetik sangat sulit dipengaruhi oleh medan magnet luar. Apabila diberi pengaruh medan magnet dari luar, maka elektron-elektron dalam atom akan berubah gerakannya sedemikian hingga menghasilkan resultan medan magnet atomis yang arahnya berlawanan (Adhi, :6). Elemen tanpa momen magnetik elektronik atomik permanen tidak dapat menunjukkan paramagnetik atau feromagnetik. Atom atom ini telah mengisi cangkang elektron dan oleh karena itu tidak ada momen magnetik bersih. Ketika dihadapkan pada medan magnet, magnetisasi mereka menentang bidang terapan, dengan cara yang dijelaskan oleh hukum *Lenz's*, sehingga mereka memiliki kerentanan negatif (Jiles, 1991: 85).

Ketergantungan magnetisasi pada bidang terapan dalam diamagnetik, yaitu kerentanan atau susceptibilitas. Menurut teori *Langevin* Klasik diamagnetik yang diberikan:

$$\chi = -\frac{\mu_0 Z e^2 n \langle r^2 \rangle}{6m_c} \dots\dots\dots(2.1)$$

Bila n adalah jumlah atom per satuan volume, Z adalah jumlah elektron per atom, e adalah muatan elektronik, m_e adalah massa elektronik dan r^2 adalah jari-jari atom, yang bertipikal 10^{-21} m^2 . Suseptibilitas diamagnetik secara substansial bebas dari temperatur (Jiles, 1991: 85).

Material yang biasanya disebut diamagnetik umumnya berupa benda atau logam non-magnetik, seperti tembaga, merkuri, emas, bismut, timbal, antimon.

b) Paramagnetik

Magnet dengan sifat bahan paramagnetik bisa juga disebut magnet sementara atau magnet tidak tetap. Material paramagnetik dapat menarik dan menolak benda benda logam, namun jika medan magnet eksternal dijauhkan, material paramagnetik juga akan kehilangan daya magnetnya (Adhi, :6). Biasanya paramagnetik memiliki atom dan molekul dengan jumlah elektron ganjil sehingga ada *spin* elektron yang tidak berpasangan dan menghasilkan momen magnet neto. Bahan ini jika diberi medan magnet dari luar, maka elektron-elektronnya akan bergerak sedemikian rupa sehingga resultan medan magnet atomisnya searah dengan medan magnet luar. Pada material paramagnetik ini, terkadang efek diamagnetik juga dapat timbul, akan tetapi pengaruhnya sangatlah kecil.

Bahan paramagnetik dan diamagnetik mempunyai sifat kemagnetan yang lemah. Akan tetapi jika solenoida dimasuki bahan ini akan dihasilkan induksi magnetik yang lebih besar. Adapun bahan yang tergolong paramagnetik antara lain *mangan, platina, kromium, aluminium*. Dalam padatan ini sifat magnetik ditentukan oleh elektron 4f yang sangat terlokalisasi dan terikat erat dengan *nucleus* dan secara efektif terlindungi oleh elektron terluar dari medan magnet di situs *ionic* yang

disebabkan oleh atom-atom lain dalam kisi kristal, yaitu medan kristal. Semua logam feromagnetik seperti kobalt, besi dan nikel akan menjadi paramagnetik apabila berada di atas titik *curie* mereka, seperti halnya kromium logam antiferomagnetik dan mangan di atas temperatur transisi mereka masing-masing dari 35 °C dan – 173 °C (Jiles, 1991: 82). Logam paramagnetik yang tidak menunjukkan keadaan feromagnetik meliputi semua logam alkali (*seri natrium*) dan logam alkali tanah (*seri kalsium*) dengan pengecualian *beryllium*.

c) Feromagnetik

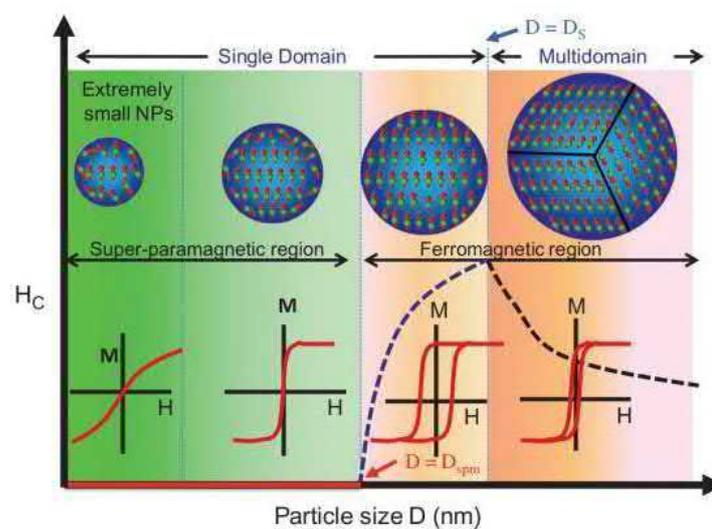
Feromagnetik merupakan benda yang dapat ditarik dengan kuat oleh suatu magnet. Benda magnetik yang bukan magnet biasanya dapat diolah menjadi magnet, akan tetapi setiap benda memiliki tingkat kesulitan yang berbeda jika ingin diubah menjadi magnet.

Pada bahan feromagnetik, masing-masing atom memiliki medan magnet yang sangat kuat, sehingga interaksi diantara atom-atom yang lainnya menyebabkan sebagian besar atom akan mensejajarkan diri membentuk *domain*. *Domain* merupakan atom-atom yang mensejajarkan dirinya dalam suatu daerah hingga membentuk kelompok. Bahan ini jika diberi medan magnet dari luar, maka *domain-domainnya* akan mensejajarkan diri searah dengan medan magnet dari luar. Sebelum diberi medan magnet dari luar, bahan feromagnetik ini mempunyai *domain* yang momen magnetiknya kuat, tetapi arah dari momen magnetiknya berbeda-beda dari satu *domain* ke *domain* yang lainnya.

Semakin kuat medan magnet dari luar, maka semakin banyak *domain-domain* yang mensejajarkan dirinya sehingga medan magnet yang ada pada bahan

feromagnetik akan semakin kuat. Apabila seluruh *domain* terarahkan, penambahan medan magnet luar tidak memberi pengaruh apa-apa karena tidak ada lagi *domain* yang perlu disearahkan, sehingga kemagnetannya merupakan magnet permanen (Adhi, :5). Pada keadaan ini, dinamakan keadaan saturasi atau jenuh. Adapun yang termasuk kedalam bahan feromagnetik yaitu besi, baja, cobalt, nikel dan lai-lain.

Terdapat empat ukuran butir partikel yang ada pada sifat magnetik yaitu *unstable single domain* (superparamagnetik / SPM), *stable single domain* (SD), *pseudo single domain* (PSD), *multi domain* (MD) (Jayanti, et al., 2013: 28). Ukuran butir partikel sangat mempengaruhi sifat magnetik. Proses *sintering* merupakan salah satu proses dimana sangat mempengaruhi perkembangan ukuran butir partikel. Proses *sintering* yang tinggi dengan waktu yang lama dapat terjadi pertumbuhan ukuran butir partikel. Pertumbuhan butir partikel yang besar dapat menurunkan harga koersivitas magnetik (H_c) karena butiran membentuk *multi domain* (Idayanti, et al., 2002: 30).



Gambar 2.3 Struktur *domain magnetic* yang bergantung pada ukuran partikel dari superparamagnetik ke *single domain* dan *multi domain* feromagnetik (Sumber: Bruck, 2018: 8)

Koersivitas magnetik (H_c) akan menjadi besar atau optimal apabila dalam magnet *single domain* dengan diameter partikel mendekati *single domain critical* (D_s). Akan tetapi koersivitas magnetik (H_c) akan menjadi nol atau kecil apabila ketika diameter partikel *single domain* lebih kecil dari diameter kritis lain (D_{spm}) yang sesuai dengan superparamagnetik (SPM). Hal ini dikarenakan ukuran butir partikel semakin kecil dalam rentang superparamagnetik (SPM) sehingga terjadi magnetisasi acak yang disebabkan energi thermal lebih besar (Bruck, 2018: 8).

Pada penelitian (Xu, et al., 2007: 1306) tentang pengaruh *stoichiometry* pada fasa dan sifat magnet yang didapatkan dapat dilihat pada Tabel 2.2.

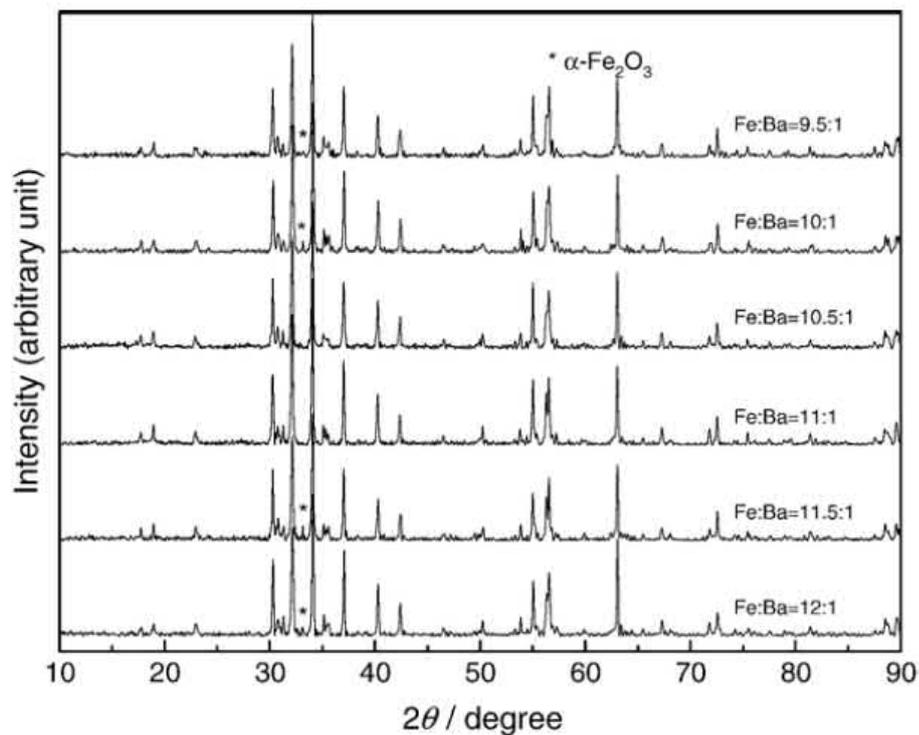
Tabel 2.2 Sifat fisik dan magnetik dari $BaFe_{12}O_{19}$ dengan perbandingan rasio Fe/Ba

Parameters	Fe/Ba =9,5	Fe/Ba =10	Fe/Ba =10,5	Fe/Ba =11	Fe/Ba =11,5	Fe/Ba =12
a (Å)	5,8866	5,8914	5,8912	5,8907	5,8917	5,8831
c (Å)	23,2707	23,2188	23,2595	23,2617	23,2403	23,2547
v (Å ³)	698,344	697,923	699,099	699,046	698,64	697,034
ρ_x (g/cm ³)	5,2876	5,2902	5,2813	5,2817	5,2848	5,2907
M_s (emu/g)	58,761	55,576	53,484	63,999	51,563	57,235
M_r (emu/g)	30,806	29,107	25,808	33,176	24,932	28,948
M_r/M_s	0,524	0,524	0,483	0,518	0,484	0,506
H_c (kOe)	5,01	4,8191	2,8316	4,8341	3,7591	3,8735

Sumber: Xu, et al., 2007

Pada Tabel 2.2 dapat diketahui pada rasio perbandingan Fe/Ba=11 memiliki hasil yang paling bagus dibandingkan rasio perbandingan yang lainnya. Pada rasio perbandingan Fe/Ba=11 mendapatkan nilai magnetik saturasi (σ_s) atau (M_s) 63,999 emu/g, nilai magnetik remanen (Br) atau (M_r) 33,176 emu/g, dan koersivitas (H_c) sebesar 4,8341 kOe. Rasio perbandingan ini memiliki M_r/M_s sebesar 0,518, hal ini mengindikasikan bahwa serbuk $BaFe_{12}O_{19}$ merupakan fasa tunggal dan memiliki

domain magnetik tunggal. Puncak-puncak difraksi dari uji XRD juga memperkuat hasil dari senyawa yang dihasilkan pada rasio perbandingan Fe/Ba=11 merupakan fasa tunggal. Tidak adanya senyawa pengotor lain yang ditampilkan pada puncak-puncak difraksi pada Gambar 2.4. Berbeda dengan rasio perbandingan yang lainnya yang masih terdapat senyawa pengotor pada serbuk BaFe₁₂O₁₉.



Gambar 2.4 X-ray diffraction pada BaFe₁₂O₁₉ dengan perbandingan rasio Fe/Ba (Sumber: Xu, et al., 2007)

Pada dasarnya magnet keramik terdiri dari unsur oksida besi, *barium* dan *strontium*. Kelas magnet ini memiliki kerapatan fluks magnet yang lebih tinggi, gaya koersif yang lebih tinggi dan ketahanan yang lebih tinggi terhadap demagnetisasi dan oksidasi dibandingkan dengan magnet permanen buni *non-rare* lainnya. Keuntungan terbesar dari magnet tersebut adalah biaya rendah, yang

membuat magnet ferit keras sangat populer di banyak aplikasi magnet permanen.

Karena sifat keramiknya, magnet ferit sangat keras dan rapuh.

Magnet permanen memiliki standar spesifikasi untuk beberapa bahan campuran material magnet keramik. Salah satunya yaitu *Magnetic Materials Producers association (MMPA Standard 0100-Standard Specifications for Permanent Magnet Materials)* yang awalnya diterbitkan pada tahun 1964, ditambah informasi penting dari dokumen terbaru yang disiapkan oleh Komite Teknis *International Electrotechnical Commission (IEC) 68*. Sifat fisik dan sifat magnetik dari campuran bahan kimia magnetik keramik dapat dilihat pada Tabel 2.3, Tabel 2.4, dan Tabel 2.5.

Tabel 2.3 Sifat fisik dari magnet keramik.

<i>Property</i>	<i>Typical Value</i>	
<i>Density</i>	0,177 lbs/in ³	4,9 g/cm ³
<i>Coefficient of thermal expansion (250°C to 450°C)</i>		
<i>Perpendicular to orientation</i>	6x10 ⁻⁶ Inch/inch•°F	10x10 ⁻⁶ cm/cm•°C
<i>Parallel to orientation</i>	8x10 ⁻⁶ Inch/inch•°F	14x10 ⁻⁶ cm/cm•°C
<i>Thermal conductivity</i>	0,018 cal/inch•Sec•°C	0,029 W/cm•°C
<i>Electrical resistivity</i>	10 ⁶ ohm•cm	10 ⁶ ohm•cm
<i>Porosity</i>	5%	5%
<i>Modulus of elasticity</i>	2,6x10 ⁷ psi	1,8x10 ¹¹ Pa
<i>Poisson ratio</i>	0,28	0,28
<i>Compressive strength</i>	130000 psi	895x10 ⁶ Pa
<i>Tensile strength</i>	5000 psi	34x10 ⁶ Pa
<i>Flexural strength</i>	9000 psi	62x10 Pa
<i>Hardness (Mohs)</i>	7	7

Sumber: MMPA Standard No. 0100-00.

Tabel 2.4 Tipe magnet ferit, sifat magnetik dan komposisi kimia bahan magnet keramik.

Original MMPA Class	IEC Code Refer ence	Chemical Composition (M represents Barium, Strontium or combination of the two)	Magnetic Properties							
			Max. Energy Product (BH) _{max}		Residual Induction Br		Coercive Force Hc		Intrinsic Coersive Force H _{cj}	
			MGOe	KJ/ m ³	gaus s	mT	oerste ds	kA/ m	oerste ds	kA/ m
Ceramic 1	SI-0-1	MO • 6Fe ₂ O ₃	1,05	8,35	2300	230	1860	150	3250	260
Ceramic 5	SI-1-6	MO • 6Fe ₂ O ₃	3,4	27,1	3800	380	2400	190	2500	200
Ceramic 7	SI-1-2	MO • 6Fe ₂ O ₃	2,75	21,9	3400	340	3250	260	4000	320
Ceramic 8	SI-1-5	MO • 6Fe ₂ O ₃	3,5	27,8	3850	385	2950	235	3050	245
-		MO • 6Fe ₂ O ₃	3,4	27,1	3800	380	3400	270	3900	310
-		MO • 6Fe ₂ O ₃	4	31,8	4100	410	2800	225	2900	230
-		MO • 6Fe ₂ O ₃	3,2	25,5	3700	370	3500	280	4800	380
-		MO • 6Fe ₂ O ₃	3,8	30,2	4000	400	3650	290	4000	320

Sumber: MMPA Standard No. 0100-00.

Tabel 2.5 Sifat fisik yang dihasilkan oleh metode metalurgi serbuk dengan komposisi kimia Ba/Sr O.6 Fe₂O₃

Curie Temperature (°C)	450
Maximum Operating Temperature (°C)	250
Hardness (Hv)	480-580
Density (g/cm ³)	4,8-4,9
Relative Recoil Permeability (μ _{rec})	1,05-1,20
Saturation Field Strength, kOe (kA/m)	10 (800)
Temperature Coefficient of Br (%/°C)	-0,2
Temperature Coefficient of iHc (%/°C)	0,3
Tensile Strenght (N/mm)	<100
Transverse Rupture Strength (N/mm)	300

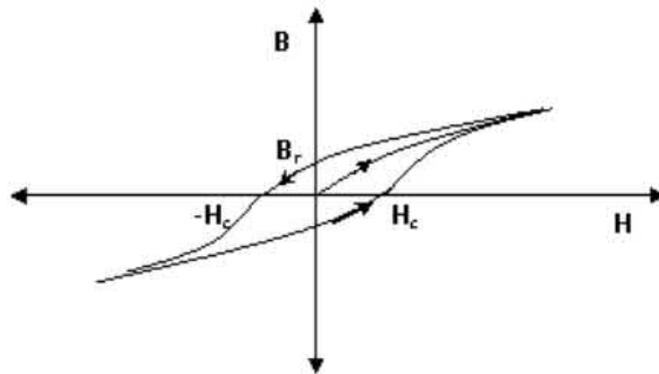
Sumber: Yang, 2006.

Magnet biasanya dibagi atas dua kelompok yaitu magnet lunak (kemagnetannya tidak kekal) dan magnet keras (magnet permanen).

2.2.2.1 Magnet Permanen

Magnet permanen atau disebut juga magnet keras, merupakan magnet yang dapat menarik bahan lain yang bersifat magnet. Selain itu sifat kemagnetannya bisa

dianggap cukup kekal. Bentuk umum kurva *loop histerisis* magnet keras dengan medan magnet (\mathbf{B}) sebagai fungsi intensitas magnet (\mathbf{H}) dapat ditunjukkan pada Gambar 2.5.

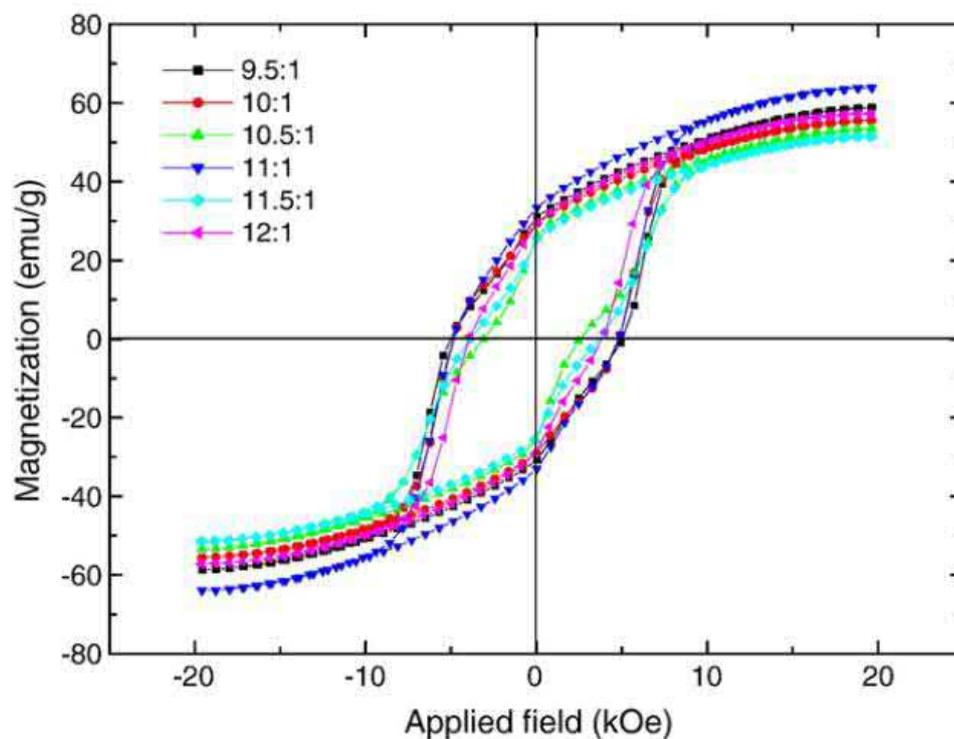


Gambar 2.5 *Loop histerisis* magnet keras
(Sumber: Jayanti, et al., 2013).

Disaat kenaikan harga H , mula-mula harga B ikut naik dengan lancar, akan tetapi mulai dari titik tertentu, harga B makin lama makin sedikit kenaikannya, hingga harga B makin konstan. Keadaan ini disebut dengan keadaan saturasi. Saturasi merupakan magnetisasi bahan yang tidak mengalami perubahan sekalipun medan aplikasi diperbesar (Jayanti, et al., 2013: 25). Harga medan magnet untuk keadaan saturasi disebut dengan B_s (σ_s) atau medan magnet saturasi. Untuk bahan yang memiliki saturasi dengan harga H tinggi disebut magnet keras seperti yang ditunjukkan pada kurva dari Gambar 2.5 *Loop histerisis* magnet keras.

Pada bahan feromagnetik, apabila kurva sudah menunjukkan saturasi dan kemudian intensitas magnet H (*coersivity*) diperkecil hingga mencapai $H = 0$, ternyata kurva B tidak melewati jalur kurva semula lagi. Apabila harga $H = 0$ medan magnet pada rapat fluks B mempunyai harga $B_r \neq 0$. Maka dari itu, untuk harga B_r

ini biasanya disebut dengan induksi remanen. *Loop histerisis* yang paling baik untuk dijadikan magnet permanen adalah kurva yang memiliki induksi remanen (Br) yang besar sehingga memiliki energi magnet yang kuat dan gaya koersivitas (Hc) yang besar sehingga magnetisasi tidak akan mudah hilang akibat medan magnet luar yang mungkin ada (Adhi, :9). Magnet permanen dapat kehilangan magnetisasi permanennya apabila magnet berada pada temperatur yang lebih tinggi dari nilai kritis yang biasa disebut temperatur *curie*. Biasanya temperatur *curie* pada bahan feromagnetik kurang lebih 500 °C (Shen dan Kong, 1987: 176).



Gambar 2.6 *Loop histerisis* magnet BaFe₁₂O₁₉ nanopartikel dengan rasio perbandingan Fe/Ba (Sumber: Xu, et al., 2007)

Pada penelitian Xu, et al., (2007), hasil dari penelitian menunjukkan bahwa material dengan rasio Fe/Ba (11:1) memiliki hasil yang paling bagus dengan nilai

magnetik saturasi (σ_s) 63,999 emu/g, magnetik remanen (Br) 33,176 emu/g, dan memiliki koersifitas (Hc) yang relatif tinggi 4,8341 kOe.

Perbandingan komposisi sifat magnetik pada penyusunnya akan mempengaruhi tinggi rendahnya nilai induksi remanen yang dihasilkan (Jayanti, et al., 2013: 28). Semakin banyak komposisi sifat magnetik yang diberikan, maka semakin besar remanensinya, gaya kersivitas dan bentuk *loop histerisis* akan semakin gemuk dan semakin besar pula energi produk maksimalnya (BH) (Billah, 2006: 30). Menurut hasil penelitian Wicaksono, et al., (2013: 82-83), semakin besar nilai *barium ferit* maka besar nilai Br pada sampel akan semakin besar.

Tabel 2.6 Data karakteristik sifat magnet komposit Ba Ferit dengan pengikat karet alam

No	Nama	Komposisi Bahan <i>Barium Ferit</i>	Br (kG)	Hc (kOe)	(BH) maks (MGOe)	ρ (g/cm ³)
1	Sampel 1	50%	0,55	1,315	0	1,97
2	Sampel 2	55%	0,52	1,311	0,06	1,99
3	Sampel 3	60%	0,53	1,084	0,05	2,02
4	Sampel 4	65%	0,5	1,1	0	2,06
5	Sampel 5	70%	0,66	1,053	0,09	2,27
6	Sampel 6	75%	0,63	1,081	0	2,32
7	Sampel 7	80%	0,79	1,017	0,02	2,25

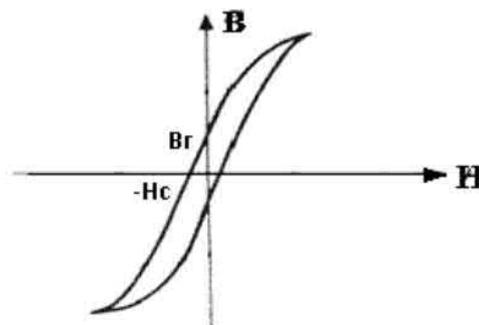
Sumber: Wicaksono, et al., 2013.

Untuk mengukur karakteristik sifat magnetik, kerapatan juga merupakan faktor penting. Nilai kerapatan dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya tingkat kemurnian bahan baku, ukuran butiran partikel, homogenitas besar butiran, homogenitas campuran bahan baku saat proses pencampuran dan proses *sintering* pada bahan (Billah, 2006: 31). Pada dasarnya kerapatan dipengaruhi oleh proses

kompaksi yang diberikan. Semakin besar gaya tekan yang diberikan pada bahan sampel, maka ikatan butiran partikel akan menjadi kuat sehingga jarak antara partikel satu dengan partikel yang lainnya menjadi semakin rapat. Jarak butiran partikel yang semakin rapat, densitas yang dihasilkan saat kompaksi akan semakin besar, porositas akan menjadi sedikit sehingga dapat meningkatkan kualitas dan sifat magnet pada magnet tersebut (Jayanti, et al., 2013: 28).

2.2.2.2 Magnet Lunak (*Soft Magnet*)

Magnet lunak atau bisa juga disebut *soft magnet* merupakan magnet dengan sifat kemagnetannya yang tidak kekal. Magnet jenis ini dapat menarik magnet lainnya, akan tetapi hanya memiliki sifat magnet bila berada dalam medan magnet atau dapat hilang kemagnetannya sewaktu-waktu. Bentuk umum kurva *loop histerisis* magnet lunak dengan medan magnet (**B**) sebagai fungsi intensitas magnet (**H**) dapat ditunjukkan pada Gambar 2.7. Magnet lunak (*soft magnet*) biasanya memiliki medan magnet saturasi dengan harga rendah. Apabila dilihat dari segi *loop histerisis*, magnet lunak (*soft magnet*) memiliki *loop histerisis* yang kurus atau kecil.



Gambar 2.7 *Loop histerisis* magnet lunak
(Sumber: Jayanti, et al., 2013: 26)

2.2.3 Barium Heksaferit

Barium heksaferrite memiliki rumus kimia $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ atau $\text{BaO}\cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ yang terbentuk dari reaksi kimia antara senyawa BaO dan Fe_2O_3 . *Barium heksaferit* ini memiliki struktur *hexagonal – closed packed* dengan parameter kisi $a = b = 5,865 \text{ \AA}$, $c = 23,099 \text{ \AA}$ (Simbolon, et al., 2013: 3). Pada umumnya *barium heksaferit* ini merupakan salah satu material feromagnetik yang digunakan untuk membuat magnet permanen dan banyak dijual di pasaran (Jayanti, et al., 2013: 27). Selain *barium heksaferit*, material yang digunakan juga bisa digantikan dengan bahan yang menyerupai (segolongan) dengannya, yaitu seperti *strontium ferit* ($\text{SrO}\cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$).

Barium heksaferit ($\text{BaO}\cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$) merupakan salah satu magnet pemanen (*hard magnet*) yang mempunyai struktur *hexagonal close-packed*. *Isotropic barium ferit* dibentuk dengan cara memanaskan campuran oksida besi dan barium oksida yang dicampur dengan baik bersama dengan pengikat. Kemudian campuran tersebut di tekan atau dipress dan di panaskan dengan temperatur sekitar $1200 \text{ }^\circ\text{C}$, yang nantinya bahan hasil *sintering* atau pemanasan akan melibatkan penyusutan pada bahan sekitar 17% (Thompson, 1968: 156).

Magnet keras yang bersifat feromagnetik, dapat berubah menjadi paramagnetik. Hal ini terjadi apabila bahan dengan sifat feromagnetik diberikan temperatur yang tinggi sehingga berubah menjadi paramagnetik. Temperatur transisi dari feromagnetik menjadi paramagnetik ini disebut juga dengan temperatur *curie*. Pada material *barium ferit* temperatur *curie* yang dibutuhkan supaya menjadi

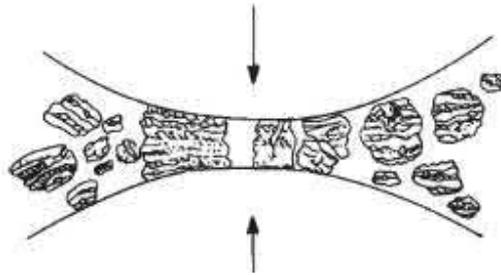
material dengan sifat paramagnetik yaitu dengan temperatur 450 °C (Jiles, 1991: 73).

2.2.4 Mechanical Alloying

Mechanical alloying merupakan teknik pemrosesan pengolahan serbuk logam, dimana dua atau lebih serbuk logam dapat dicampur untuk menghasilkan paduan super dengan menggunakan *ball mill* dan digiling sehingga logam menjadi bubuk halus dan material menjadi homogen.

Ball mill dapat dibagi menjadi dua tipe yaitu sentrifugal dan *planetary mill* (Upadhyaya, 2002: 34). Dalam sentrifugal ball mill, pengencang mangkok tunggal hanya didorong secara horisontal dan eksentrik sementara tidak berputar sendiri. Di *planetary ball mill* dua atau empat pengencang mangkuk, masing-masing menampung satu mangkuk penggilingan, ditekan pada piringan pendukung. Selama penggilingan, mangkuk penggilingan dan cakram pendukung berputar ke arah yang berlawanan, sehingga dua gaya sentrifugal yang berbeda bekerja pada isi mangkuk.

Bahan penggilingan berkurang ukurannya akibat gesekan dan tabrakan dari *ball mill*. Bola penggilingan memiliki kecepatan yang kencang, duabelas kali dari bola penggilingan di penggiling *ball mill*. Setiap medium penggilingan mempengaruhi proses penggilingan melalui berat bola yang spesifik. Semakin banyak proses pencampuran waktu penggilingan yang diinginkan, semakin kecil ukuran bola yang dipilih. Waktu penggilingan dalam kasus gilingan bola sentrifugal meningkat karena akselerasi bola yang lebih kecil.



Gambar 2.8 Efek tabrakan tunggal antara dua bola pada bubuk yang terperangkap
(Sumber: Upadhyaya, 2002: 35)

Gambar 2.8 menggambarkan efek dari tabrakan tunggal antara dua bola pada bubuk yang terperangkap diantara dua bola. Serbuk unsur ulet yang rata, dan dimana mereka tumpang tindih, permukaan yang bersih secara atomik hanya membangun lapisan serbuk komposit, antara yang terjebak *fragmen* serbuk rapuh dan *dispersoid*. Pada saat yang sama kerja fraktur bubuk elemen atau komposit menjadi mengeras.

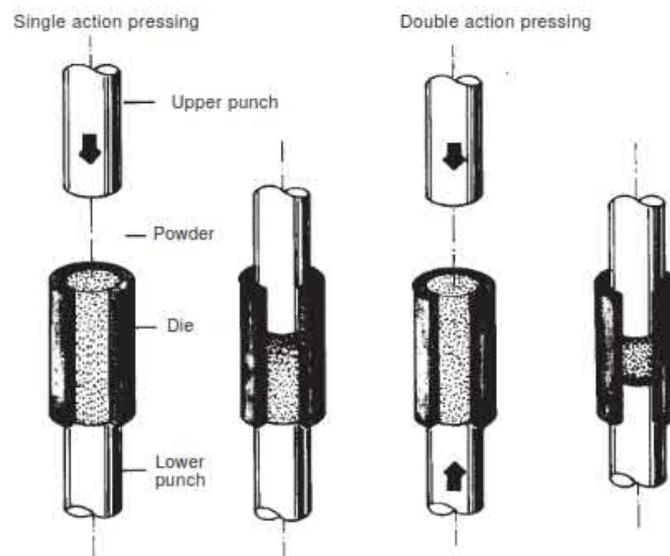
2.2.5 Kompaksi Mekanik (*Mechanical compaction*)

Proses kompaksi biasanya terjadi akibat terbebaninya lapisan akibat lapisan sedimen yang berada di atasnya, sehingga hubungan antar butir menjadi lebih dekat dan juga air yang terkandung dalam pori-pori lapisan tertekan keluar. Pematatan serbuk logam memiliki fungsi sebagai berikut (Upadhyaya, 2002: 42):

1. Untuk mengkonsolidasikan bubuk menjadi bentuk sesuai dengan yang diinginkan
2. Untuk memberikan dimensi akhir yang diinginkan dengan mempertimbangkan perubahan dimensi yang dihasilkan dari *sintering*.
3. Untuk menanamkan tingkat dan jenis porositas yang diinginkan

4. Untuk memberikan kekuatan yang memadai untuk penanganan selanjutnya.

Penggunaan teknik kompaksi dapat dicirikan oleh referensi untuk pergerakan elemen alat individu seperti tekanan atas, tekanan bawah dan cetakan relatif terhadap satu sama lain. Penekanan dalam cetakan tetap dapat dibagi menjadi penekanan aksi tunggal dan penekanan aksi ganda (Upadhyaya, 2002: 42).



Gambar 2.9 Aksi tunggal dan ganda penekanan serbuk
(Sumber: Upadhyaya, 2002: 43)

Pada penekanan aksi tunggal yaitu tekanan atas (*upper punch*) menekan kebawah mendorong serbuk material yang ada dalam cetakan. Untuk penekan dari bawah (*lower punch*) hanya diam, tidak bergerak atau mendorong serbuk material yang ada dalam cetakan. Penekanan ini memiliki kepadatan yang lebih tinggi di bagian atas daripada bagian bawah. Penekanan aksi ganda yaitu penekan atas (*upper punch*) dan penekan bawah (*lower punch*) bergerak secara bersamaan menekan serbuk material yang ada dalam cetakan. Konsekuensinya adalah

terdapatnya kepadatan tinggi di bagian atas dan bawah kompak. Di pusatnya, tetap ada zona netral yang relatif lemah.

2.2.6 *Sintering*

Sintering merupakan ikatan bersama antar partikel pada temperatur tinggi atau terjadi di bawah temperatur leleh, yang dilakukan pada temperatur 0,7 – 0,9 dari *melting point* komponen leleh paling rendah dalam paduan sehingga terjadi peristiwa transportasi atom yang melibatkan pembentukan fase cair (German, 1994: 242). *Sintering* juga sejenis perlakuan panas yang menjalani *billet* ekstrusi untuk memperoleh sifat fisik dan mekanik yang kompleks. Untuk mendapatkan material hematit ataupun maghemit, dapat dilakukan proses oksidasi pada material magnetik yang ada pada pasir besi.

Proses *sintering* hampir sama dengan kalsinasi. Kalsinasi merupakan proses pembakaran tahap awal yang merupakan reaksi dekomposisi secara endotermik dan berfungsi untuk melepaskan gas-gas dalam bentuk karbonat atau hidroksida sehingga menghasilkan serbuk dalam bentuk oksida dengan kemurnian yang tinggi. Kalsinasi dilakukan pada temperatur tinggi yang temperaturnya bergantung pada jenis bahannya. Magnet ferit (magnet keramik) biasanya diproduksi dari kalsinasi diantara temperatur 800°C hingga temperatur 1100°C (Rusianto, 2016: 37). Biasanya tujuan dari kalsinasi adalah menghilangkan *volatile element*, dekomposisi panas atau juga mendapatkan fasa baru.

Oksidasi pada material magnetik pasir besi pada temperatur 300 °C dapat mengubah fasa magnetit menjadi maghemit (Aji, et al., 2007: 108). Perubahan fasa tersebut, teridentifikasi melalui perubahan warna pada material yg dioksidasi.

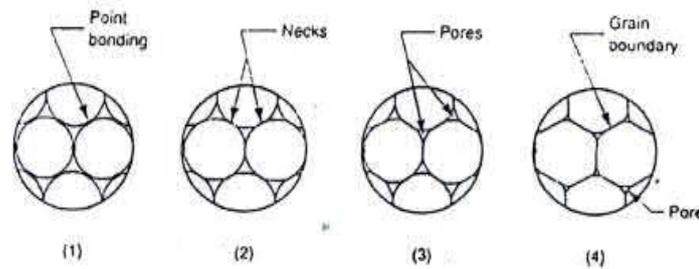
Oksidasi pada temperatur 800 °C dapat mengubah material dari fasa magnetit menjadi hematit. Perubahan fasa pada material tersebut teridentifikasi melalui perubahan warna dan struktur pada material yang dioksidasi. Material hematit yang di dapatkan dari proses ini berwarna ungu (*purple*) dan memiliki struktur heksagonal.



Gambar 2.10 (a) Material magnetit Fe_3O_4 dan (b) material hematit Fe_2O_3

Sintering adalah proses yang kompleks dan untuk setiap logam kondisi *sintering* ada kemungkinan memiliki tahap yang berbeda, kekuatan pendorong dan mekanisme transport material yang terkait dengan proses. Berbagai tahap *sintering* dapat dikelompokkan dalam urutan berikut ini (Upadhyaya, 2002: 68):

1. Ikatan awal antar partikel
2. Pertumbuhan leher
3. Penutupan saluran pori
4. Pembulatan pori
5. Densifikasi atau penyusutan pori
6. Mengentalkan pori.



Gambar 2.11 Perubahan pada skala mikroskopis saat proses *sintering*
(Sumber: Nurzal dan Siswanto, 2012: 3)

Terdapat beberapa faktor penting yang terlibat selama proses *sintering* berlangsung yaitu temperatur, waktu, dan keadaan atau suasana di dalam tungku. Adapun variabel material yang dapat menjadi faktor penting dalam *sintering* yaitu ukuran partikel, bentuk partikel, struktur partikel, komposisi partikel, kepadatan hijau (*green density*) (Upadhyaya, 2002: 70-71).

2.2.7 Densitas

Densitas atau bisa disebut juga kepadatan dari suatu material, dinyatakan dengan simbol ρ (*rho*) didefinisikan sebagai massa per satuan volume. Kompresibilitas adalah ukuran bubuk yang akan dikompresi atau kepadatan saat penerapan tekanan eksternal. Kepadatan yang nyata dari suatu bubuk biasanya dinyatakan dalam g/cm^3 , dibulatkan ke $0,01 \text{ g/cm}^3$ terdekat, pada tekanan pemadatan yang ditentukan, atau sebagai tekanan yang diperlukan untuk mencapai kepadatan tertentu (Upadhyaya, 2002: 26).

Ada dua macam densitas yaitu *bulk density* dan densitas teoritis (*true density*). *Bulk density* adalah densitas dari suatu sampel yang berdasarkan volume sampel termasuk dengan pori atau rongga yang ada pada sampel tersebut. Pengukuran *bulk density* biasanya dapat ditentukan dengan metode *Archimedes*, yaitu dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$\rho = \frac{mk}{mk - mb} \rho \text{ air} \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana : ρ = Densitas sampel (g/cm³)

ρ air = Densitas air (g/cm³)

mk = Massa sampel setelah dikeringkan (g)

mb = Massa sampel setelah direndam selama 10 menit (g)

Densitas dari bahan ferit lebih rendah dibandingkan logam-logam lain dengan ukuran yang sama. Dalam pembuatan magnet, ukuran partikel dari serbuk ferit sangat berpengaruh pada nilai densitas magnet. Dalam prakteknya pembuatan magnet memerlukan ukuran serbuk yang kecil yaitu dalam orde micrometer (10⁻⁶ m). Nilai densitas berbagai ferit dapat dilihat pada Tabel 2.7.

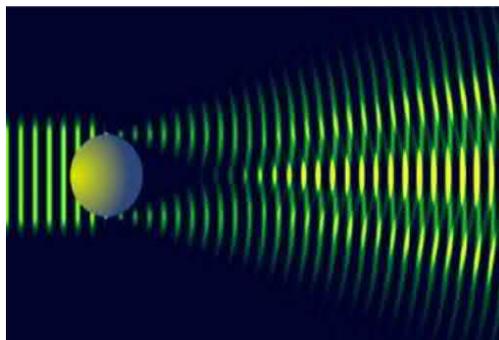
Tabel 2.7 Kerapatan dari beberapa bahan ferit (Prihatin, 2005 dalam Billah, 2006)

No	SPINELS	
	Ferrite	Kerapatan ρ (g/cm ³)
1	Zinc Ferrite	5,4
2	Cadmium	5,76
3	Ferrous	5,24
	Hexagonal	
4	Barrium	5,3
5	Strontium	5,12
	Comersial	
6	MnZn (High perm)	4,29
7	MnZn (recording head)	4,7 s/d 4,75

2.2.8 PSA (*Particle Size Analyzer*)

Ukuran partikel adalah penentuan dimensi suatu partikel yang dimana ukuran partikel tersebut tergantung pada teknik pengukuran, parameter spesifik yang diukur dan bentuk partikel (German, 1994:33). Ukuran partikel mungkin merupakan salah satu karakteristik terpenting bagi ahli metalurgi serbuk. Data ukuran paling berguna ketika disajikan dalam konteks dasar pengukuran dan bentuk partikel yang diasumsikan.

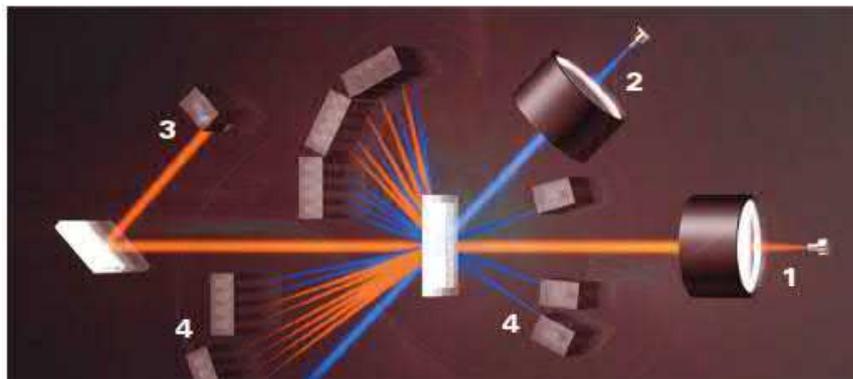
Salah satu metode untuk pengukuran dalam riset nanoteknologi adalah dengan menggunakan metode *Laser Diffraction (LAS)*, yaitu dengan alat *particle size analyzer (PSA)*. Alat ini menggunakan prinsip *dynamic light scattering (DLS)* yang berbasis *Photon Correlation Spectroscopy (PCS)*. Metode ini dapat menganalisis partikel suatu sampel yang bertujuan untuk menentukan ukuran partikel dan distribusinya dari sampel yang *representatif*.



Gambar 2.12 Pola *diffraction* dari gelombang hamburan dari sebuah *spheroid*
(Sumber: <https://www.horiba.com>)

Terdapat dua metode dalam metode *Laser Diffraction*, yaitu dengan menggunakan metode kering dan metode basah. Dalam metode kering, memanfaatkan aliran udara untuk melarutkan partikel dan membawanya ke *sensing*

zone. Metode ini lebih baik digunakan untuk ukuran partikel yang kasar, dimana hubungan antar partikel lemah dan kemungkinan untuk beraglomerasi kecil. Metode basah menggunakan media pendispersi yang digunakan untuk mendispersikan partikel material sampel atau material uji. *Particle Size Analyzer* (PSA) biasanya dalam pengukuran partikel menggunakan metode basah. Metode basah dinilai lebih akurat dibandingkan metode kering dalam hasil pengukuran partikel. Hal ini disebabkan karena partikel didispersikan ke dalam media, sehingga partikel tidak saling *beraglomerasi* (menggumpal). Material uji dalam metode ini lebih baik digunakan untuk sampel-sampel dalam orde nanometer dan *submicron* yang biasanya memiliki kecenderungan *aglomerasi* yang tinggi. Ukuran partikel yang terukur menggunakan metode basah adalah ukuran dari *single particle*.



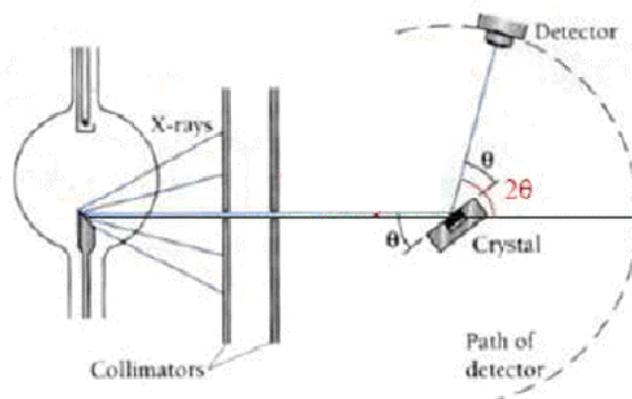
Gambar 2.13 Prinsip kerja dari *Dynamic light scattering* (1) panjang gelombang merah *diode* laser untuk partikel $> 500\text{nm}$ (2) LED biru untuk partikel $< 5000\text{nm}$ (3) *detector* sudut rendah untuk partikel besar (4) side dan sudut kembali
(Sumber: <https://www.horiba.com>)

2.2.9 XRD (*X-Ray Diffraction*)

XRD atau *X-Ray Diffraction* merupakan alat yang digunakan untuk mengkarakterisasi struktur kristal, ukuran kristal dari suatu bahan padat. Semua bahan yang mengandung kristal tertentu ketika dianalisa menggunakan XRD akan

memunculkan puncak-puncak yang spesifik. Metode difraksi umumnya digunakan untuk mengidentifikasi senyawa yang belum diketahui yang terkandung dalam suatu padatan.

Pada dasarnya prinsip dasar dari XRD adalah mendifraksi cahaya dimana cahaya tersebut melewati celah kristal. Radiasi yang digunakan berupa radiasi sinar-X, *electron* dan *neutron*. Penggunaan sinar-X dalam karakterisasi material sangatlah bagus dalam kemampuan penetrasinya, sebab sinar-X memiliki panjang gelombang elektromagnetik berkisar 0,5 sampai 2,5 Angstrom sehingga sinar-X merupakan *foton* yang memiliki *energy* tinggi. Difraksi sinar-X terjadi pada hamburan elastis *foton-foton* sinar-X oleh atom dalam sebuah kisi periodik. Berkas sinar-X yang dihamburkan tersebut ada yang saling menghilangkan dan ada yang saling menguatkan karena fasanya sama. Oleh karena itu, berkas sinar-X yang saling menguatkan itulah yang dapat disebut sebagai berkas difraksi.



Gambar 2.14 *X-ray Spectrometer*
(Sumber: Beiser dan Cheah, 2003: 91)

Dasar dari penggunaan difraksi sinar-X untuk mempelajari kisi kristal adalah dengan menggunakan persamaan *Bragg*:

$$2d \sin \theta = n \cdot \lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots \dots \dots (2.3)$$

Keterangan: λ = panjang gelombang sinar-X

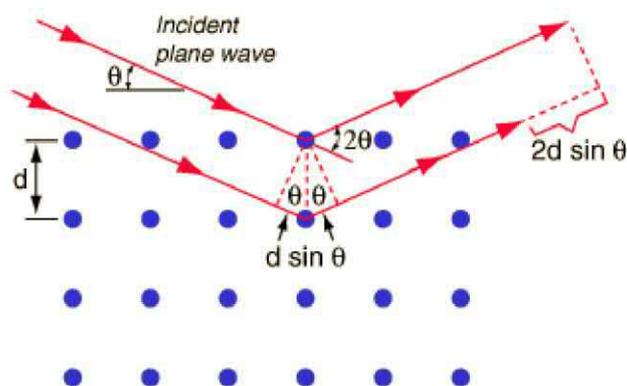
d = jarak antara dua bidang kisi

θ = sudut antara sinar datang dengan bidang normal

n = bilangan bulat yang disebut sebagai orde pembiasan

(Beiser dan Cheah, 2003: 91)

Jika seberkas sinar-X dijatuhkan pada sampel kristal, maka bidang kristal tersebut akan membiaskan sinar-X dan nantinya sinar tersebut akan ditangkap oleh detektor kemudian diterjemahkan sebagai sebuah puncak difraksi (*peak*). Semakin banyak bidang kristal pada sampel, maka semakin kuat pula intensitas pembiasan yang dihasilkan. Setiap puncak yang muncul pada pola XRD mewakili satu bidang kristal yang memiliki orientasi tertentu dalam sumbu tiga dimensi. *Peak* yang didapatkan dari data pengukuran tersebut kemudian dicocokkan dengan tabel standar difraksi sinar-X (JCPDS) untuk hampir semua jenis material.



Gambar 2.15 Ilustrasi difraksi sinar-X pada XRD
(Sumber: Beiser dan Cheah, 2003: 91)

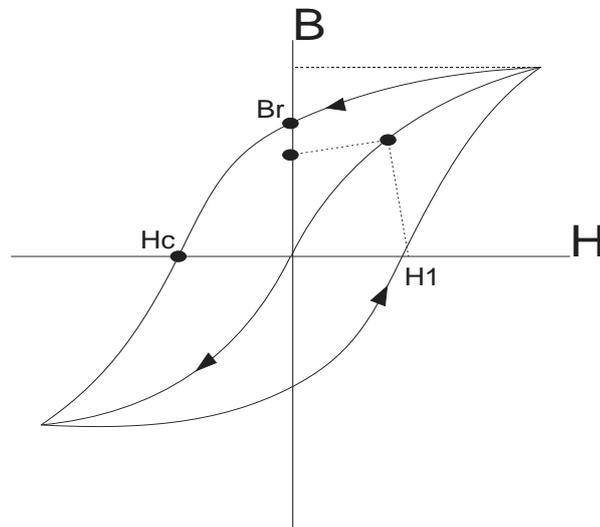
2.2.10 VSM (*Vibrating Sample Magnetometer*)

Vibrating sample magnetometer (VSM) adalah salah satu alat ukur yang digunakan untuk mengukur sifat kemagnetan dari berbagai kelompok seperti Ferrite, Alnico atau dari logam tanah jarang. Hasil pengukuran dari sifat kemagnetan oleh *Vibrating sample magnetometer* (VSM) diantaranya adalah remanensi (B_r), magnetik saturasi (σ_s) dan koersivitas (H_c).

Hasil yang didapat dari *Vibrating sample magnetometer* (VSM) nantinya akan otomatis mengukur kurva *histerisis* dari magnet tersebut (kurva B-H), yang nantinya dapat menentukan kualitas magnet seperti koersivitas, remanensi dan saturasi. Salah satu keistimewaan *Vibrating sample magnetometer* (VSM) yaitu apabila sampel bersifat *magnetic*, maka medan magnet akan memagnetisasi sampel dengan meluruskan *domain* magnet. Momen dipol magnet sampel akan menciptakan medan magnet di sekitar sampel yang bias disebut *magnetic stray field*. Ketika sampel bergetar, *magnetic stray field* dapat ditangkap oleh *coil*. Medan magnet tersebar tersebut akan menginduksi medan listrik dalam *coil* yang sebanding dengan moment magnetik sampel. Semakin besar momen magnetik, maka semakin besar pula arus induksi.

Harga medan magnet untuk keadaan saturasi disebut dengan B_s atau medan magnet saturasi. Bahan yang memiliki saturasi untuk harga rendah biasanya disebut magnet lunak, sedangkan untuk bahan yang memiliki saturasi dengan harga H tinggi disebut magnet keras. Apabila magnet tersebut memiliki koersivitas (H_c) yang tinggi, maka magnet tersebut tidaklah mudah hilang sifat kemagnetannya.

Magnet tersebut dapat dihilangkan kemagnetannya, akan tetapi memerlukan intensitas magnet H yang besar (Sutrisno, 1979: 111).



Gambar 2.16 Kurva *histerisis*
(Sumber: Sutrisno, 1979: 111)

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian ini, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan diantaranya sebagai berikut.

- 1) Lama waktu proses pencampuran antara Fe_2O_3 dengan BaCO_3 mendapatkan hasil ukuran partikel rata-rata terkecil yaitu $18,631 \mu\text{m}$ dengan waktu 6 jam *milling*.
- 2) Hasil analisis pengaruh temperatur *sintering* terhadap karakteristik magnet Barium ferit yaitu:
 - a) Sintesis dan karakterisasi bahan magnet permanen melalui proses pencampuran mekanik (*mechanical alloying*) dan proses *sintering* menghasilkan senyawa $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$.
 - b) Pada proses *sintering* $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ menghasilkan karakteristik sifat magnet yang paling baik yaitu dengan nilai magnetik remanen (Br) sebesar $20,38 \text{ emu/g}$, magnetik saturasi (σ_s) sebesar $42,64 \text{ emu/g}$ dan koersifitas (Hc) sebesar $1,627 \text{ kOe}$.
 - c) Terjadi peningkatan nilai *density* pada penambahan proses *sintering*. Pada temperatur $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ nilai densitas sebesar $4,12827 \text{ g/cm}^3$. Hal ini terjadi dikarenakan pertumbuhan butir partikel seiring penambahan temperatur *sintering*. Hal ini diperkuat dengan bertambahnya ukuran kristal sebesar $64,29 \text{ nm}$ pada temperature $1200 \text{ }^\circ\text{C}$.

5.2 Saran

- 1) Proses pembuatan magnet dari bahan alam berbasis pasir besi pada penelitian ini, dapat digunakan untuk membuat magnet.
- 2) Campuran pasir besi dengan barium karbonat pada penelitian ini direkomendasikan pada waktu proses pencampuran selama 10 jam dan temperatur *sintering* 1100°C untuk mendapatkan sifat magnet yang baik.
- 3) Masih banyak parameter lain untuk penelitian selanjutnya yaitu:
 - a. Melakukan variasi lama pencampuran dengan proses *milling* lebih dari 10 jam dan di uji karakteristik sifat kemagnetannya.
 - b. Melakukan variasi lama waktu proses *sintering* yang lebih tinggi atau yang lebih rendah untuk menghasilkan sifat magnetik yang lebih baik.
 - c. Melakukan variasi waktu dan temperatur saat proses oksidasi, supaya mendapatkan kemurnian senyawa yang tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Aji, M. P., A. Yulianto., dan S. Bijaksana. 2007. Sintesis Nano Partikel Magnetit, Maghemit dan Hematit Dari Bahan Lokal. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. Edisi Khusus: 106-108.
- Adhi, A. *Kemagnetan Purba*. Semarang: UPT UNNES PRESS.
- Beiser, A., dan K. W. Cheah. 2003. *Concepts Of Modern Physics*. 6th ed. New York: McGraw-Hill.
- Billah, A. 2006. Pembuatan dan Karakterisasi Magnet Stronsium Ferit Dengan Bahan Dasar Pasir Besi. *Skripsi*. Program S1 Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang. Semarang.
- Bruck, Ekkes. 2018. *Handbook of Magnetic Materials*. Netherlands: North-Holland.
- Dunlop, D. J, dan O. Ozdemir. 1997. *Rock Magnetism Fundamentals and Frontiers*. United Kingdom: Cambridge University Press.
- Elqudsy, M. A., R. D. Widodo., Rusiyanto dan W. Sumbodo. 2016. The Particle and Crystallite Size Analysis of BaTiO₃ Produced by Conventional Solid-state Reaction Process. *AIP Conf. Proc.* 1818: 020012-1 – 020012-6.
- German, M. R. 1994. *Powder Metallurgy Science*. 2nd ed. USA: Metal Powder Industries Federation.
- Hilman, P. M., S. J. Suprpto., D. N. Sunuhadi., A. Tampubolon., R. Wahyuningsih., D. Widhyatna., B. Pardiarto., R. Gunardi., Franklin., K. Yudawinata., D. T. Sutisna., D. Dinarsih., Sukaesih., E. T. Yuningsih., Candra., P. Oktaviani., R. Rahmawati., R. M. Ulfa., I. Sukmayana., I. Ostman. 2014. *Pasir Besi di Indonesia Geologi, Eksplorasi dan Pemanfaatannya*. Bandung: Pusat Sumber Daya Geologi – Badan Geologi Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Horiba. 2012. *A Guidebook to Particle Size Analysis*. <https://www.horiba.com>.
- Idayanti, N., Dedi., dan S. Djaja. 2002. Proses *Sintering* Dalam Pembuatan Magnet Permanen Untuk Meteran Air. *Jurnal Sains Materi Indonesia* 3(2): 29-33.
- Jalil, Z., E. N. Sari., I. AB., dan E. Handoko. 2014. Studi Komposit Fasa dan Sifat Kemagnetan Pasir Besi Pesisir Pantai Aceh yang Dipreparasi dengan Metode Mechanical Milling. *Indonesia Journal of Applied Physics* 4(1): 110-114.
- Jayanti, N. D., A. Yulianto., dan Suhaldi. 2013. Fabrikasi Magnet Komposit Berbahan Dasar Magnet Daur Ulang Dengan Pengikat Cult. *Unnes Physics Journal* 2(1): 24-29.
- Jiles, D. 1991. *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*. 1st ed. London: Chapman and Hall.

- Mambu, G. A., E. S. B. Sudrajat., Dedi., dan M. A. Hidayat. 2000. Pengaruh Kemurnian Bahan Baku (Fe_2O_3 dan BaCO_3) Dalam Pembuatan Magnet Permanen Barium Ferit. *Prosiding Seminar Nasional Bahan Magnet 1*: 37-39.
- Muhajir, M. A., dan D. Asmi. 2015. Sintesis dan Karakteristik Bahan Magnet Barium Heksaferit ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) menggunakan Bahan Dasar Barium Karbonat (BaCO_3) dan Pasir Besi dari Daerah Pesisir Pantai Selatan Pandeglang-Banten. *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika* 3(1): 9-16.
- Nurzal dan O. Siswanto. 2012. Pengaruh Proses *Wet Pressing* dan Suhu *Sinter* Terhadap Densitas dan Kekerasan *Vickers* Pada Manufactur Keramik Lantai. *Jurnal Teknik Mesin* 1(2): 1-5.
- Purwanto, S. 2008. Membangun Industri Komponen Bahan Magnet Berbasis Sumber Daya Alam Lokal Melalui Sentuhan Nanoteknologi. *Jurnal Riset Industri* 2(2): 107-133.
- Rusianto, T. 2016. Pengembangan Magnet Permanen Dari Partikel Nano Magnetit Yang Disintesis Dari Pasir Besi Pantai Selatan Yogyakarta. *Disertasi*. Program S3 Fakultas Teknik Studi Ilmu Teknik Mesin. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Safira, C. H. 2016. Sintesis dan Karakterisasi serbuk $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ Dengan Aditif FeMo Melalui Metode Mechanical Alloying. *Skripsi*. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sumatera Utara. Medan.
- Shen, L. C dan J. A. Kong. 1987. *Applied Electromagnetism*. 3rd ed. PWS Publishers. Terjemahan Garniwa, Iwa. 2001. *Aplikasi Elektromagnetik*. Cetakan pertama. Jakarta: Erlangga.
- Simbolon, S., A. P. Tetuko., P. Sebayang., K. Sebayang., dan H. Ginting. 2013. *Sintesis Dan Karakterisasi Barium M-Heksaferit Dengan Doping Ion Mn dan temperature Sintering*. Seminar dan Focus Group Discussion Material Maju: Magnet dan Aplikasinya. Solo. 25-27 Juni.
- Sugiyono. 2016. *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif & R&D*. Bandung: Alfabeta.
- Sutrisno. 1979. *Fisika Dasar: Listrik, magnet dan Termofisika*. Bandung: ITB.
- Thompson, J. E. 1969. *The Magnetic Properties of Materials*. 1st ed. The Hamlyn Publishing Group Ltd.
- Upadhyaya, G. S. 2002. *Powder Metallurgy Technology*. 1st ed. England: Cambridge International Science.
- Wicaksono, R., A. Yulianto., dan Sulhadi. 2013. Pembuatan dan Karakterisasi Magnet Komposit Berbahan Dasar Barium Ferit Dengan Pengikat Karet Alam. *Jurnal Sains Dasar* 2(1): 79-84.

- Widanarto, W., F. N. Fauzi., W. T. Cahyanto., dan M. Effendi. 2015. Peningkatan Sifat Magnetik Material Hematit Melalui Substitusi Barium dan Kontrol Temperatur Sintering. *Berkala Fisika* 18(4): 125-130.
- Xu, Ping., X. Han., H. Zhao., Z. Liang., J. Wang. 2007. Effect of Stoichiometry on the Phase Formation and Magnetic Properties of BaFe₁₂O₁₉ Nanoparticles by Reverse Micelle Technique. *Materials Letters* (62): 1305-1308