

STUDI AWAL KARAKTERISTIK MAGNETOKALORIK $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$

SKRIPSI

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar
Sarjana Sains Pada Program Studi Fisika**



NURHIDAYAH

NIM. 08021282025042

JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS SRIWIJAYA

2024

HALAMAN PENGESAHAN

STUDI AWAL KARAKTERISTIK MAGNETOKALORIK $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$

SKRIPSI

Diajukan Untuk Melengkapi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Sains Program Studi Fisika

Oleh:


NURHIDAYAH

08021282025042

Indralaya, Juli 2024

Menyetujui

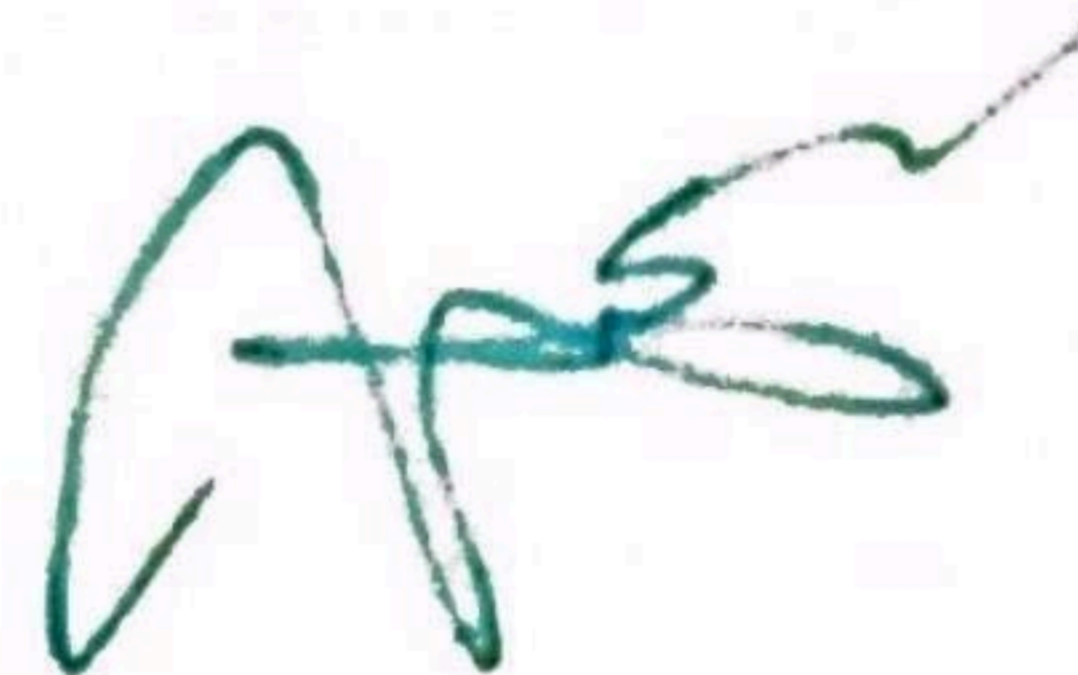
Pembimbing I



Dr. Ramlan

NIP. 196604101993031003

Pembimbing II

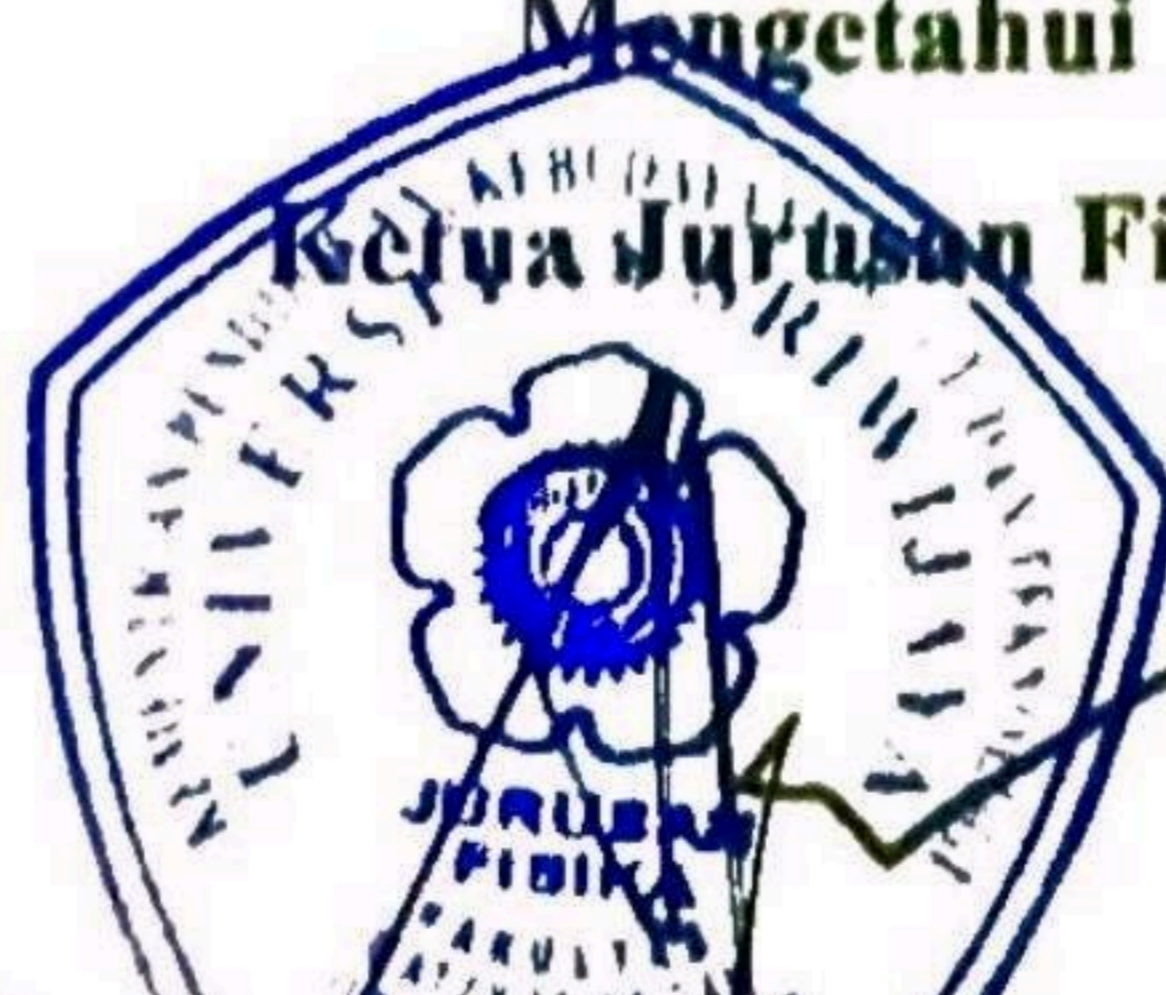


Prof. Dr. Wisnu Ari Adi

NIP. 197112131998031003

Mengetahui

Ketua Jurusan Fisika



Dr. Felisya Vico, S.Si., M.T.

NIP. 197009101994121001

HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Saya yang bertanda tangan di bawah ini, Mahasiswa Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya:

Nama : Nurhidayah

NIM : 08021282025042

Judul TA : Studi Awal Karakteristik Magnetokalorik $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$

Menyatakan bahwa skripsi saya merupakan hasil karya sendiri yang didampingi oleh dosen pembimbing dalam proses penyelesaiannya serta mengikuti etika penulisan karya ilmiah tanpa adanya tindakan plagiat, sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains di program studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan sebenar-benarnya tanpa ada paksaan dari pihak manapun. Apabila dikemudian hari ditemukan adanya unsur plagiat dalam skripsi ini, maka saya siap bertanggung jawab secara akademik dan menjalani proses hukum yang telah ditetapkan.

Indralaya, Juli 2024



Nurhidayah

NIM. 08021282025042

STUDI AWAL KARAKTERISTIK MAGNETOKALORIK $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$

Oleh:

Nurhidayah

08021282025042

ABSTRAK

Pada penelitian ini merupakan studi awal karakteristik bahan magnetokalorik dengan merekayasa *system cobalt ferrite*. Bahan *cobalt ferrite* akan di *doping* dengan unsur tembaga (Cu) yang memiliki sifat listrik yang baik. Hal ini dilakukan untuk meningkatkan sifat konduktivitasnya disamping kehadiran atom Cu ini dapat mengurangi histerisis magnetik dari bahan CoFe_2O_4 . Metode yang digunakan dalam mensintesis bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ yaitu sintesis material menggunakan metode reaksi padatan (*solid state reaction*) dengan menggunakan alat HEM (*High Energy Milling*). Hasil pengujian XRD (*X-Ray Diffraction*) menunjukkan fasa tunggal (*single phase*) dan sistem kristal kubik grup ruang Fd-3m . Dari pengujian SEM (*Scanning Electron Microscopy*) terlihat morfologi dan struktur tidak teratur dan terjadi aglomerasi, serta ukuran partikel yang dihasilkan berada pada rentang 600-2000 nm. Hasil pengujian VSM (*Vibrating Sample Magnetometer*) menunjukkan bahan tergolong *soft magnet* dan bersifat ferromagnetik. Pada komposisi $X = 0,1$ menunjukkan pengurangan histerisis magnetik dengan nilai M_r 0,709 emu/gr, M_s 3,176 emu/gr, dan H_c 746,5 Oe.

Kata Kunci: Magnetokalorik, *cobalt ferrite*, *solid state reaction*, HEM, XRD, SEM, VSM, *soft magnet*, ferromagnetik

Indralaya, Juli 2024

Pembimbing I

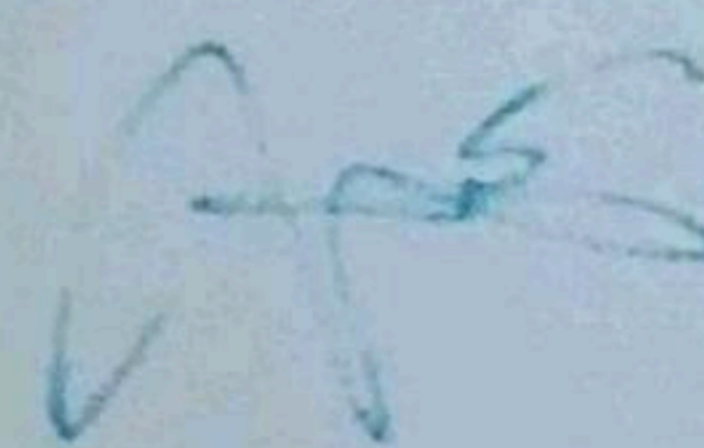


Dr. Ramlan

NIP. 196604101993031003

Menyetujui

Pembimbing II



Prof. Dr. Wisnu Ari Adi

NIP. 197112131998031003

Mengetahui

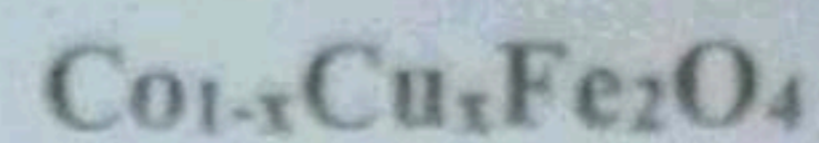
Ketua Jurusan Fisika



Dr. Fransiska Virgo, S.Si., M.T.

NIP. 197009101994121001

INITIAL STUDY OF MAGNETOCALORIC CHARACTERISTICS OF



By:

Nurhidayah

08021282025042

ABSTRACT

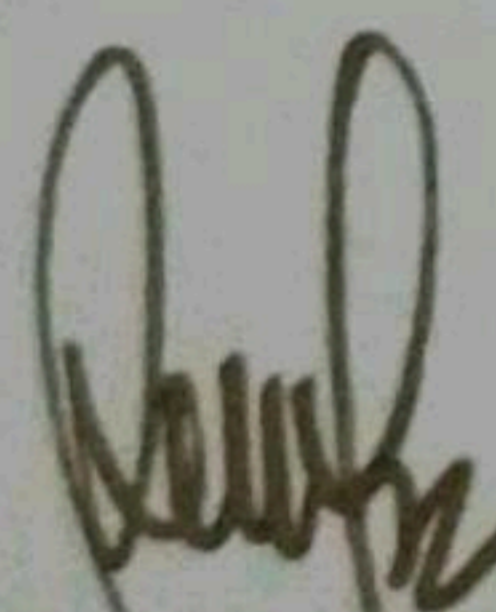
This research is an initial study of the characteristics of magnetocaloric materials by engineering the cobalt ferrite system. The cobalt ferrite material will be doped with the element copper (Cu) which has good electrical properties. This is done to improve its conductivity properties in addition to the presence of Cu atoms can reduce the magnetic hysteresis of the CoFe_2O_4 material. The method used in synthesising $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ material is material synthesis using solid state reaction method using HEM (High Energy Milling) tool. XRD (X-Ray Diffraction) test results show single phase and space group cubic crystal system Fd-3m . From SEM (Scanning Electron Microscopy) testing, the morphology and structure are irregular and agglomeration occurs, and the resulting particle size is in the range of 600-2000 nm. VSM (Vibrating Sample Magnetometer) test results show the material is classified as soft magnetic and ferromagnetic. The composition of $X = 0.1$ shows a reduction in magnetic hysteresis with M_r 0.709 emu/gr, M_s 3.176 emu/gr, and H_c 746.5 Oe.

Keywords: Magnetocaloric, cobalt ferrite, solid state reaction, HEM, XRD, SEM, VSM, soft magnet, ferromagnetic

Indralaya, Juli 2024

Menyetujui

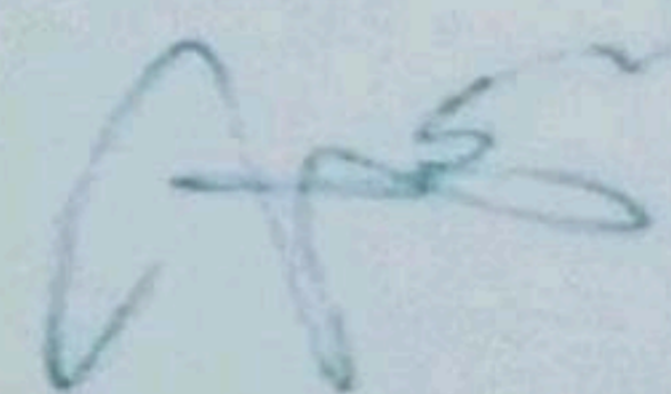
Pembimbing I



Dr. Ramlan

NIP. 196604101993031003

Pembimbing II



Prof. Dr. Wisnu Ari Adi

NIP. 197112131998031003

Mengetahui

Ketua Jurusan Fisika



Dr. Fransyah Virgo, S.Si., M.T.

NIP. 197009101994121001

KATA PENGANTAR

Allhamdulillah puji syukur kehadiran Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “**Studi Awal Karakteristik Magnetokalorik $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$** ” yang dilaksanakan di KST. BJ. Habibie, Gedung 440, Serpong, Tangerang Selatan, Banten. Skripsi ini sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana sains di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya.

Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada beberapa pihak atas saran dan arahan dalam menyelesaikan skripsi ini. oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan rasa syukur kepada Allah SWT. dan terima kasih kepada pihak-pihak yang membantu dalam menyelesaikan skripsi ini, terutama kepada Dosen Dr. Ramlan sebagai pembimbing I dan Prof. Dr. Wisnu Ari Adi sebagai pembimbing II. Penulis juga ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Keluarga, terutama orang tua yang telah memberikan dukungan moral dan materil selama penulis menempuh pendidikan dan menyelesaikan skripsi.
2. Bapak Mashadi, M.Si., selaku pembimbing laboratorium yang telah memberikan banyak masukan dan wawasan berkaitan dengan penelitian penulis.
3. Bapak Drs. Yunasfi, M.Eng., dan Bapak Ade Mulyawan, S.Si., M.Eng., selaku peneliti yang turut serta memberikan arahan, bimbingan dan masukan kepada penulis.
4. Bapak Prof. Hermansyah, S.Si., M.Si., Ph.D., selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya.
5. Bapak Dr. Frinsyah Virgo, S.Si., M.T., selaku Ketua Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya.
6. Bapak Dr. Akmal Johan, M.Si., dan Ibu Dr. Netty Kurniawati, M.Si., selaku dosen penguji skripsi yang telah memberikan masukan dan saran.

7. Bapak Dr. Fiber Monado, M.Si., selaku pembimbing akademik yang telah memberikan dukungan serta semangat selama menjalani perkuliahan hingga menyelesaikan skripsi.
8. Teman penelitian Tugas Akhir, Okta Tiara Novitasari, Annisa Intan Fhadilla, Anisa Dwi Maharani, Anggelika Br Silaban, dan Martinus Randi Turu.
9. Teman-teman KBI material 2020.
10. Almamater beserta *civitas* Universitas Sriwijaya.

Indralaya, Juli 2024

Penulis,



Nurhidayah

NIM. 08021282025042

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS.....	iii
ABSTRAK	ii
ABSTRACK.....	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR SINGKATAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Efek Magnetokalorik.....	4
2.2 Sifat Kemagnetan Bahan.....	6
2.2.1 Diamagnetik.....	6
2.2.2 Paramagnetik	7
2.2.3 Ferromagnetik.....	7
2.3 Kurva Histerisis	8
2.4 Metode Mechanical Milling.....	10
2.5 Karakterisasi Pengujian.....	11

2.5.1 X-Ray Diffraction.....	11
2.5.2 Scanning Electron Microscopy.....	12
2.5.3 Vibrating Sample Magnetometer.....	13
BAB III METODE PENELITIAN	15
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian.....	15
3.2 Alat dan Bahan Penelitian.....	15
3.2.1 Alat Penelitian.....	15
3.2.2 Bahan Penelitian.....	16
3.3 Metode Penelitian.....	16
3.4 Prosedur Penelitian.....	16
3.4.1 Preparasi Bahan.....	17
3.4.2 Proses Mechanical Milling.....	17
3.4.3 Proses Pengeringan.....	18
3.4.4 Proses Sintering.....	18
3.5 Uji Karakterisasi Bahan.....	18
3.5.1 Karakterisasi XRD (X-Ray Diffraction).....	18
3.5.2 Karakterisasi SEM (Scanning Electron Microscopy).....	19
3.5.3 Karakterisasi VSM (Vibrating Sample Magnetometer).....	20
3.6 Diagram Alir Penelitian.....	21
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	23
4.1 Hasil Karakterisasi XRD (X-Ray Diffractometer).....	23
4.2 Hasil Karakterisasi SEM (Scanning Electron Microscopy).....	28
4.3 Hasil Karakterisasi VSM (Vibrating Sample Magnetometer).....	33
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	37
5.1 Kesimpulan.....	37
5.2 Saran.....	37

DAFTAR PUSTAKA	38
LAMPIRAN	42

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema dua proses dasar pada efek magnetokalorik [15].....	5
Gambar 2.2 AMR (<i>Active Magnetic Regenerative</i>) refrigerator [18].	6
Gambar 2.3 Skema bahan diamagnetik saat tidak dan adanya medan magnet H [20].	7
Gambar 2.4 Skema bahan paramagnetik saat tidak dan adanya medan magnet H [20].	7
Gambar 2.5 Skema bahan ferromagnetik saat tidak dan adanya medan magnet H [20].	8
Gambar 2.6 Kurva histerisis dari bahan ferromagnetik [21].	9
Gambar 2.7 Kurva histerisis bahan magnet keras (<i>hard</i>) dan lunak (<i>soft</i>) [23].	10
Gambar 2.8 Alat <i>High Energy Milling</i> [Sumber: Dokumentasi Pribadi].	11
Gambar 2.9 Ilustrasi difraksi sinar-X [29].	12
Gambar 2.10 Ilustrasi cara kerja SEM [32].	13
Gambar 2.11 Ilustrasi cara kerja VSM [8].	14
Gambar 3.1 <i>X-Ray Diffraction</i> [Sumber: Dokumen Pribadi].	19
Gambar 3.2 Alat <i>Scanning Electron Microscopy</i> [Sumber: Dokumen Pribadi].	19
Gambar 3.3 Alat <i>Vibrating Sample Magnetometer</i> [34].	20
Gambar 4.1 Grafik pola difraksi XRD dari bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ dengan variasi nilai $X=0; 0,1; 0,2; \text{ dan } 0,3$	23
Gambar 4.2 Pergeseran pola difraksi XRD dari bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ dengan variasi nilai $X=0; 0,1; 0,2; \text{ dan } 0,3$	24
Gambar 4.3 Hasil <i>refinement</i> dari bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($X=0$).	25
Gambar 4.4 Hasil <i>refinement</i> dari bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($X=0,1$).	26
Gambar 4.5 Hasil <i>refinement</i> dari bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($X=0,2$).	26
Gambar 4.6 Hasil <i>refinement</i> dari bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($X=0,3$).	27
Gambar 4.7 Morfologi SEM bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($X=0$) perbesaran 5000x.	29
Gambar 4.8 Morfologi SEM bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($X=0,1$) perbesaran 5000x.	29

Gambar 4.9 Morfologi SEM bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($X=0,2$) perbesaran 5000x.	30
Gambar 4.10 Morfologi SEM bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($X=0,3$) perbesaran 5000x.	30
Gambar 4.11 Distribusi ukuran partikel bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($X=0$).	31
Gambar 4.12 Distribusi ukuran partikel bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($X=0,1$).	31
Gambar 4.13 Distribusi ukuran partikel bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($X=0,2$)	32
Gambar 4.14 Distribusi ukuran partikel bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($X=0,3$).	32
Gambar 4.15 Kurva histerisis bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($X=0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$).	34
Gambar 4.16 Perbesaran kurva histerisis bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($X=0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$).....	34

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Alat Penelitian.....	15
Tabel 3.2 Bahan Penelitian.....	16
Tabel 3.3 Perhitungan massa bahan dasar yang digunakan untuk pembuatan bahan.	17
Tabel 4.1 Hasil analisis parameter struktur bahan dari karakterisasi XRD.....	28
Tabel 4.2 Nilai magnetisasi remanen (M_r), magnetisasi saturasi (M_s), dan koersivitas (H_c).	35

DAFTAR SINGKATAN

KST	: Kawasan Sains Terpadu	H	: Medan magnet luar
BJ	: Bacharuddin Jusuf	M	: Magnetisasi
Co	: <i>Cobalt</i>	Mr	: Magnetisasi remanen
Cu	: <i>Copper</i>	Ms	: Magnetisasi saturasi
Fe	: <i>Ferrite</i>	Hc	: Koersivitas
O	: Oksigen	CFC	: <i>Chlorofluorocarbon</i>
C	: <i>Celcius</i>	HFC	: <i>Hydrofluorocarbon</i>
T	: Temperatur	MCE	: <i>Magnetocaloric effect</i>
Å	: Angstrom	PRM	: parameter
g	: gram	wRp	: <i>weighted R-factor</i>
nm	: nanometer	Rp	: <i>R-factor</i>
cm	: centimeter	GSAS	: <i>General Structure Analysis System</i>
emu	: <i>electron mass unit</i>	cif	: <i>crystallographic information file</i>
Oe	: <i>Oersted</i>	FOMT	: <i>First Order Magnetic Transition</i>
HEM	: <i>High Energy Milling</i>	SOMT	: <i>Second Order Magnetic Transition</i>
XRD	: <i>X-Ray Diffraction</i>	AMR	: <i>Active Magnetic Regenerative</i>
SEM	: <i>Scanning Electron Microscopy</i>		
VSM	: <i>Vibrating Sample Magnetometer</i>		

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Teknologi pendinginan saat ini yang digunakan luas di sektor rumah tangga dan industri masih bergantung pada model pendinginan konvensional [1]. Pendinginan konvensional ini pada umumnya menggunakan refrigeran jenis CFC (*chlorofluorocarbon*) dan HFC (*hydrofluorocarbon*). Refrigeran jenis tersebut diketahui memiliki dampak demografis yang signifikan terhadap lingkungan [2]. Sebagai contoh, refrigeran CFC berdampak besar pada kerusakan lapisan ozon sementara HFC berkontribusi sebagai sumber utama emisi gas rumah kaca [3].

Mengingat betapa besar dampak negatif yang ditimbulkan pendingin konvensional tersebut, berbagai upaya kini telah dilakukan oleh para peneliti guna mencari alternatif yang ramah terhadap lingkungan dengan memanfaatkan teknologi pendingin berbasis *magnetocaloric effect* (MCE) atau efek magnetokalorik [4]. Pada teknologi ini, suatu jenis material dapat memanaskan saat sebuah medan magnet diterapkan dan akan mendingin kembali saat medan magnet tersebut dihilangkan [5]. Dengan demikian, teknologi pendingin berbasis efek magnetokalorik ini diharapkan dapat meminimalisir dampak negatif terhadap lingkungan yang ditimbulkan oleh teknologi pendingin konvensional.

Efek magnetokalorik (MCE) merupakan sifat intrinsik dari sebuah padatan magnetik. Respon termal suatu bahan terhadap penerapan atau penghilangan medan magnet akan maksimal apabila bahan tersebut mendekati suhu *magnetic ordering*-nya atau suhu *curie*-nya. Dengan demikian, bahan yang dipertimbangkan untuk perangkat pendingin magnetik harus bahan magnetik dengan suhu transisi fase magnetik dekat dengan daerah suhu yang diinginkan. Perubahan suhu dapat semakin meningkat ketika parameter urutan transisi fase berubah secara kuat dalam kisaran suhu yang diinginkan. Besaran entropi magnetik dan perubahan suhu adiabatik sangat bergantung pada proses magnetik *ordering*-nya [6].

Pada umumnya untuk bahan antiferromagnetik dan ferrimagnetik memiliki entropi magnetik yang relatif kecil, dibandingkan dengan bahan ferromagnetik yang bisa jauh lebih besar karena mengalami transisi fase magnetik. Transisi fase orde pertama dicirikan oleh diskontinuitas perubahan magnetisasi terhadap suhu, sehingga menghasilkan panas laten. Transisi fase orde kedua tidak memiliki panas laten yang terkait dengan transisi fase magnetik. Sehingga bahan yang bersifat magnetokalorik yang baik diharapkan memiliki kriteria sebagai berikut: momen magnet berdensitas tinggi, ketergantungan yang kuat dari magnetisasi terhadap T (temperatur) dan H (medan magnet luar) sehingga menjamin perubahan suhu yang besar, transformasi fase magnetik yang terjadi di sekitar suhu kerja, dan permeabilitas tinggi sedangkan histerisis magnetik kecil untuk menghindari kehilangan energi selama siklus magnetisasi dan demagnetisasi [7].

Salah satu kandidat bahan oksida magnetik yang memiliki karakteristik efek magnetokalorik walaupun masih sangat kecil adalah *cobalt ferrite* (CoFe_2O_4). CoFe_2O_4 ini memiliki magnetisasi saturasi dan remanen yang relatif tinggi dengan medan koersivitas menengah (*semi hard magnet*). Kondisi ini mengisyaratkan bahwa bahan ini memiliki sifat permeabilitas magnetik yang sangat tinggi. Sementara bahan yang bersifat magnetokalorik itu diharapkan memiliki permeabilitas tinggi sedangkan histerisis magnetiknya kecil, sehingga diperlukan modifikasi struktur untuk merekayasa sifat magnetiknya sesuai yang diinginkan [8].

Pada penelitian ini merupakan studi awal karakteristik bahan magnetokalorik dengan merekayasa *system cobalt ferrite*. Bahan *cobalt ferrite* akan di doping dengan unsur tembaga (Cu) yang memiliki sifat listrik yang baik. Hal ini dilakukan untuk meningkatkan sifat konduktivitasnya disamping kehadiran atom Cu ini dapat mengurangi histerisis magnetik dari bahan CoFe_2O_4 . Karena ion Cu^{2+} memiliki momen dipol magnetik yang relatif kecil dibandingkan dengan ion Co^{2+} [9][10]. Sehingga diharapkan modifikasi bahan ini menjadi salah satu kandidat bahan magnetokalorik. Metode yang digunakan dalam mensintesis bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ yaitu sintesis material menggunakan metode reaksi padatan dengan menggunakan alat *High Energy Milling* (HEM).

Metode ini sangat sederhana, murah dan dapat dilakukan peningkatan pada skala industri apabila teknologi ini telah terbukti berhasil serta dapat dimanfaatkan oleh masyarakat dan industri [11].

1.2 Rumusan Masalah

Dengan demikian, penelitian ini dirancang untuk menjawab dua rumusan masalah berikut:

1. Bagaimana mensintesis bahan magnetokalorik *system* $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$?
2. Bagaimana pengaruh variasi komposisi Cu terhadap struktur kristal, struktur mikro dan morfologi, serta sifat magnetik bahan *system* $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian yakni untuk:

1. Mensintesis dan menganalisis bahan magnetokalorik *system* $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$.
2. Menganalisis pengaruh variasi komposisi Cu terhadap struktur kristal, struktur mikro dan morfologi, serta sifat magnetik bahan *system* $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalahnya yaitu:

1. Sintesis bahan magnetokalorik $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ menggunakan metode *solid state reaction* melalui teknik *mechanical milling*.
2. Penelitian ini hanya berfokus pada studi awal karakteristik bahan magnetokalorik $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$.
3. Karakterisasi yang digunakan adalah XRD (*X-Ray Diffraction*), SEM (*Scanning Electron Microscopy*), dan VSM (*Vibrating Sample Magnetometer*).

1.5 Manfaat Penelitian

Keberhasilan penelitian diharapkan sebagai langkah awal yang berarti dalam pengembangan teknologi pendingin magnetik yang ramah lingkungan. Penelitian ini juga diharapkan memberikan kontribusi dalam peningkatan efisiensi energi melalui pemanfaatan sifat magnetik dan magnetokalorik dari bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Witjahjo et al., “Uji Prestasi Mesin Pendingin Menggunakan Refrigeran Lpg,” 2009.
- [2] A. Prasanti, R. Fahdiran, S. A. Saptari, and E. Handoko, “Analisis Karakterisasi Xrd Sintesis Material $\text{La}_{0,7}\text{Ca}_{0,3}(\text{MnCo})\text{O}_3$ Melalui Metode Mechanical Alloying,” *Prosiding Seminar Nasional Fisika*, vol. IV, pp. 33–34, 2015, [Online]. Available: <http://snf-unj.ac.id/kumpulan-prosiding/snf2015/>
- [3] I. Made, R. A. Sta, I. W. Kasa, and D. I. Gede Maiardika, “Ecotrophic Dan Uji Unjuk Kerja Mesin Pendingin Studi Kasus Pada Bengkel Ac Mobil Di Denpasar-Bali” 5 (2):98-103.
- [4] S. Mellari, “Introduction to magnetic refrigeration: magnetocaloric materials,” *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, vol. 31, no. 1, 2023, doi: 10.1007/s44189-023-00021-z.
- [5] M. F. J. Boeije et al., “Efficient Room-Temperature Cooling with Magnets,” *Chemistry of Materials*, vol. 28, no. 14, pp. 4901–4905, Jul. 2016, doi: 10.1021/acs.chemmater.6b00518.
- [6] K. A. Gschneidner and V. K. Pecharsky, “Magnetocaloric Materials,” 2000. [Online]. Available: www.annualreviews.org
- [7] Y. Mozharivskyj, “Magnetocaloric Effect and Magnetocaloric Materials,” in *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*, Elsevier, 2016. doi: 10.1016/b978-0-12-409547-2.11643-9.
- [8] M. Rafique, “Study of the Magnetoelectric Properties of Multiferroic Thin Films and Composites for Device Applications”, doi: 10.13140/RG.2.2.23827.94245.
- [9] A. B. Aritonang, A. Asma, and A. Sapar, “Synthesis of The Cu(II)-doped $\text{TiO}_2/\text{Bi}_2\text{O}_3$ as a Photocatalyst for Rhodamin B Degradation Under Visible Light Illumination,” *Berkala Sainstek*, vol. 11, no. 4, p. 216, Dec. 2023, doi: 10.19184/bst.v11i4.39799.
- [10] J. Fisika, F. Sains, and M. Diponegoro, “Pengaruh Substitusi Ion Mn dan Ion Co Serta Ion Ti pada Pembentukan Fasa dan Sifat Magnetik Barium Hexaferrite BaFe Disintesis Melalui Rute Metallurgi Serbuk Priyono, Eddy Siradj, Azwar Manaf,” 2013.
- [11] Annisfiah Gayatri, 2015 “Sintesis Dan Karakterisasi Paduan Intermetalik Mg_{2}Si Dengan Penambahan Karbon Nanopartikel Melalui Teknik Powder In Sealed Tube. Skripsi.”
- [12] G. V. Brown, “Magnetic heat pumping near room temperature,” *J Appl Phys*, vol. 47, no. 8, pp. 3673–3680, 1976, doi: 10.1063/1.323176.

- [13] C. Zimm et al., “Description And Performance Of A Near-Room Temperature Magnetic Refrigerator Abstract.”
- [14] A. M. Tishin and Y. I. Spichkin, “Recent progress in magnetocaloric effect: Mechanisms and potential applications,” in *International Journal of Refrigeration*, Jan. 2014, pp. 223–229. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2013.09.012.
- [15] V. Franco, J. S. Blázquez, J. J. Ipus, J. Y. Law, L. M. Moreno-Ramírez, and A. Conde, “Magnetocaloric effect: From materials research to refrigeration devices,” Apr. 01, 2018, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.005.
- [16] S. J. Lee, J. M. Kenkel, V. K. Pecharsky, and D. C. Jiles, “Permanent magnet array for the magnetic refrigerator,” *J Appl Phys*, vol. 91, no. 10 I, pp. 8894–8896, May 2002, doi: 10.1063/1.1451906.
- [17] D. Nanto and S. C. Yu, “Relative cooling power of $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{Mn}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_3$ ($0.0 \leq x \leq 0.03$),” *International Journal of Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 417–423, 2016, doi: 10.14716/ijtech.v7i3.2959.
- [18] S. Jeong, “AMR (Active Magnetic Regenerative) refrigeration for low temperature,” *Cryogenics (Guildf)*, vol. 62, pp. 193–201, 2014, doi: 10.1016/j.cryogenics.2014.03.015.
- [19] “Investigasi Struktur Domain Dan Pengaruh Penerapan Microwave Assisted Terhadap Bahan Alloy FePt Menggunakan Simulasi Mikromagnetik”.
- [20] V. Iacovacci, G. Lucarini, L. Ricotti, and A. Menciassi, “Magnetic Field-Based Technologies for Lab-on-a-Chip Applications,” in *Lab-on-a-Chip Fabrication and Application*, InTech, 2016. doi: 10.5772/62865.
- [21] Mardiansyah D, “Analisa Sifat Ferromagnetik Material Menggunakan Metode Monte Carlo,” 2013.
- [22] “Simulasi Pengaruh Sudut Datang Medan Magnet Luar Terhadap Bentuk Kurva Histerisis Permalloy (Nife) Ferromagnetik Skripsi.”
- [23] A. Septiani and N. Idayanti, “Fabrikasi Magnet MnZn Ferit dan Barium Ferit dari Limbah Pengelasan,” *Jurnal Elektronika dan Telekomunikasi*, vol. 15, no. 1, p. 14, Jun. 2016, doi: 10.14203/jet.v15.14-17.
- [24] G. Tj Sulungbudi dan Mujamilah, “Aplikasi High Energy Milling Dalam Metalurgi Serbuk,” *Jurnal Sains Materi Indonesia Indonesian Journal of Materials Science*, vol. 6, no. 2, pp. 6–10, 2005.
- [25] M. Rifai, E. Sukirman, and Y. Sarwanto, “Structure And Magnetic Properties Of Fe/Si Nanoparticles Prepared By High Energy Milling Process,” *Indonesian Journal of Applied Physics*, vol. 11, no. 2, 2021.

- [26] A. A. Bunaciu, E. gabriela Udriștioiu, and H. Y. Aboul-Enein, "X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications," Oct. 02, 2015, Taylor and Francis Ltd. doi: 10.1080/10408347.2014.949616.
- [27] L. Hakim and D. M. Nawir, "Karakterisasi Struktur Material Pasir Bongkahan Galian Golongan C Dengan Menggunakan X-Ray Difraksi (X-RD) Di Kota Palangkaraya," 2019. [Online]. Available: <http://e-journal.upr.ac.id/index.php/JMS>
- [28] J. S. O. Evans and I. R. Evans, "Structure Analysis from Powder Diffraction Data: Rietveld Refinement in Excel," *J Chem Educ*, vol. 98, no. 2, pp. 495–505, Feb. 2021, doi: 10.1021/acs.jchemed.0c01016.
- [29] M. R. Alam et al., *Spatial Variation Of Physical And Micro-Structural Characteristics Of Coarse Aggregates In Bangladesh*. 2016. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/319005669>
- [30] A. Fachrully Septiano and N. Erna Setyaningsih, "Analisis Citra Hasil Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-Ray (SEM EDX) Komposit Resin Timbal dengan Metode Contrast to Noise Ratio (CNR)," 2021. [Online]. Available: <http://journal.unnes.ac.id/nju/index.php/JM>
- [31] A. Y. Kharin, "Deep learning for scanning electron microscopy: Synthetic data for the nanoparticles detection," *Ultramicroscopy*, vol. 219, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.ultramic.2020.113125.
- [32] A. H. M. Areef Billah, "Investigation Of Multiferroic And Photocatalytic Properties Of Li Doped Bifeo 3 Nanoparticles Prepared By Ultrasonication."
- [33] S. Tebriani, "Analisis Vibrating Sample Magnetometer (Vsm) Pada Analisis Vibrating Sample Magnetometer (VSM) Pada Hasil Elektrodeposisi Lapisan Tipis Magnetite Menggunakan Aruscontinue Direct Current".
- [34] Eramitra, "Quantum Design PPMS VersaLab Cryogen Free 3 Tesla - Universitas Malang."
- [35] M. Al-Rabi, A. Tjahjono, and S. A. Saptari, "Analisis Fasa, Struktur Kristal dan Sifat Kemagnetan Material Komposit Berbasis Nd_{0,6}Sr_{0,4}MnO₃ / Fe₂O₃," *Al-Fiziya: Journal of Materials Science, Geophysics, Instrumentation and Theoretical Physics*, vol. 3, no. 2, pp. 114–122, Dec. 2020, doi: 10.15408/fiziya.v3i2.17638.
- [36] Adinda Ardani, "Analisis Peningkatan Subtitusi Unsur Nikel Terhadap Struktur Kristal Dan Sifat Magnet Material Lantanum Barium Manganat," Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta, Jakarta, 2020.
- [37] B. H. Toby, "R factors in Rietveld analysis: How good is good enough?," *Powder Diffr*, vol. 21, no. 1, pp. 67–70, Mar. 2006, doi: 10.1154/1.2179804.

- [38] A. T. M. dan G. B. B. J. S.-H. S. Mukminin, "Analisis Kuantitatif Fasa Dan Parameter Kristal Abu Cangkang Keong Mas (*Pomacea Canaliculata* L) Hasil Kalsinasi Suhu Tinggi Menggunakan Metode Rietveld," 2018.
- [39] L. A. Melinia, E. Puspita, M. Naibaho, R. Ramlan, and M. Ginting, "Analisa Pasir Besi Alam dari Sungai Musi Sumatera Selatan," *Jurnal Penelitian Sains*, vol. 24, no. 3, p. 122, Dec. 2022, doi: 10.56064/jps.v24i3.716.
- [40] D. S. Winatapura et al., "Karakterisasi BaFe₁₂O₁₉ Koersivitas Tinggi Hasil Sintesis dengan Metode Kopresipitasi Kimia ISSN."
- [41] Wahyuni L, "The Analysis Of Crystal Size, Magnetic Properties And Microwave Absorption In X And Ku-Band Magnetite Material (Fe₃O₄) Made By Milling Method," 2015.
- [42] "Sintesis Bahan Magnetik Pseudobrookite Fe₂TiO₅ Berbasis Sumber Daya Mineral Lokal (Prijo Sardjono)."
- [43] "Sintesis dan Karakterisasi Sifat Magnetik Nanokomposit Fe₃O₄ Montmorilonit Berdasarkan Variasi Suhu".