

ANALISIS GUGUS FUNGSI, MORFOLOGI DAN UKURAN PARTIKEL MANGANESE FERRITE YANG DISINTESIS DARI PASIR BESI

HERI KISWANTO^{1*}, INDAH NURHIDAYATI², ARIO HENDARTO³, PRIJO HARSONO⁴,
NGATMIN⁵

^{1,3,4}Program Studi Teknika, Politeknik Maritim Negeri Indonesia
Jl. Pawiyatan Luhur I No 1 Bendan Duwur, Kec. Gajahmungkur, Semarang 50233, Jawa Tengah

²Program Studi Nautika, Politeknik Ilmu Pelayaran Semarang
Jl. Singosari Raya No 2A, Wonodri, Kec. Semarang Selatan, Semarang 50242 Jawa Tengah

⁵Program Studi Nautika, Politeknik Maritim Negeri Indonesia
Jl. Pawiyatan Luhur I No 1 Bendan Duwur, Kec. Gajah Mungkur, Semarang 50233, Jawa Tengah

*email: hkiswanto@polimarin.ac.id

Diserahkan: 02/04/2023

Diterima: 02/05/2023

Dipublikasikan: 11/08/2023

Abstrak. *Manganese ferrite (Mn ferrite)* telah berhasil disintesis dengan metode kopresipitasi pada suhu 60 °C. *Mn ferrite* disintesis dari pasir besi sebagai prekursor. Tujuan dari penelitian ini untuk mensintesis *Mn ferrite* dari pasir besi dan menganalisis gugus fungsi serta morfologinya. Sampel dibuat dengan memvariasikan NaOH yaitu 3 M, 6 M dan 9 M. Struktur kristal, gugus fungsi dan morfologi dikarakterisasi dengan *X-ray Diffractometer (XRD)*, *Fourier Transform Infra Red (FTIR)*, dan *Transmission Electron Microscopy (TEM)*. Hasil spektra FTIR mengkonfirmasi adanya gugus fungsi metal-oxide (M-O) pada kisi tetrahedral dan oktahedral pada bilangan gelombang masing-masing 462 cm⁻¹ dan 578 cm⁻¹. Hal ini diidentifikasi sebagai gugus Mn-O dan Fe-O sekaligus mengkonfirmasi pembentukan struktur spinel. Pengamatan morfologi menunjukkan bahwa sampel terlihat mengalami aglomerasi karena adanya interaksi magnetik. Hasil pengamatan TEM menunjukkan bahwa ukuran partikel berada pada kisaran 30 – 50 nm yang diukur menggunakan *software Image-J*. Ukuran butir terlihat lebih besar dibandingkan hasil perhitungan ukuran kristalit berdasarkan data XRD karena sampel mengalami aglomerasi sehingga beberapa butir menggumpal menjadi satu dan terlihat seperti satu partikel.

Kata Kunci: *Mn-ferrite*, gugus fungsi, morfologi, ukuran partikel

Abstract. Manganese ferrite (Mn ferrite) has been successfully synthesized by coprecipitation method at 60 °C. Mn ferrite was synthesized from iron sand as precursor. The purpose of the research was synthesized Mn ferrite from iron sand and analyzed the morphology, functional groups and the crystal structure. The samples were synthesized by varying NaOH i.e. 3 M, 6 M, and 9 M. Samples were characterized by X-ray diffractometer (XRD), Fourier Transform Infra-Red (FTIR) Spectroscopy, and Transmission Electron Microscopy (TEM). FTIR spectra results confirm the presence of metal-oxide (M-O) functional groups in the tetrahedral and octahedral lattices around 462 cm⁻¹ and 578 cm⁻¹ respectively. This was identified as Mn-O and Fe-O which confirm the formation of spinel structures. The morphology showed that the samples were agglomerated due to magnetic interactions. The TEM showed that the particle size was found in the range of 30-50 nm by using Image-J software. The particle size looks larger than the crystallite size because the sample was agglomerated which mean that some particles stick together thus looks like as a particle.

Keywords: Mn-ferrite, functional group, morphology, particle size

1. Pendahuluan

Kebutuhan material magnet dalam dunia industri semakin meningkat karena memiliki banyak kegunaan dalam berbagai aplikasi [1]. Meningkatnya kebutuhan material magnet dapat meningkatkan jumlah permintaan material tersebut, sehingga berpotensi menjadi industri yang cukup menjanjikan di masa mendatang. Hal ini menuntut para pelaku industri mencari solusi alternatif dalam memenuhi material magnet, salah satunya dengan memanfaatkan bahan baku dari alam misalnya pasir besi.

Sebagai negara kepulauan, Indonesia memiliki potensi pasir besi yang sangat melimpah. Pemanfaatan pasir besi sejauh ini masih tergolong sederhana yakni pemanfaatan secara langsung misalnya digunakan sebagai material bangunan sehingga nilai ekonomisnya rendah. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pasir besi kandungan Fe_3O_4 sehingga berpotensi yang untuk dikembangkan menjadi bahan magnet [2], [3]. Saat ini telah banyak model pengembangan dan metode sintesis bahan magnet untuk memperoleh material magnet dengan *performance* yang lebih baik.

Salah satu material magnet yang banyak dimanfaatkan adalah material *ferrite*. *Ferrite* merupakan salah satu material magnet banyak diteliti karena memiliki sifat yang unik dan memiliki banyak kegunaan pada perangkat elektronik, media penyimpanan data, *ferro-fluids*, bahkan di bidang kesehatan seperti sistem penghantaran obat (*drug delivery*), *cancer treatment*, maupun bidang-bidang baru yang sedang berkembang [4], [5].

Beragam pengembangan terus dilakukan misalnya dengan mensintesis dengan metode tertentu atau pada suhu rendah sehingga lebih efisien. Pengembangan lain misalnya dengan memanfaatkan bahan baku dari alam seperti pasir besi sehingga dapat menurunkan biaya produksi. Oleh karena itu, mengembangkan pasir besi menjadi *ferrite* akan membuka peluang besar guna memenuhi kebutuhan bahan magnet.

Hasil penelitian sebelumnya menyatakan bahwa dengan mengubah komposisi dan atau metode sintesis dapat mempengaruhi sifat-sifat fisis dari material *ferrite* [6]. Dengan pemilihan metodologi dan komposisi yang tepat, sifat *ferrite* dapat direayasa sesuai dengan kebutuhan atau aplikasi tertentu [7]. Material *ferrite* banyak diaplikasikan pada berbagai divais (perangkat) dalam penggunaan sehari-hari. Berbagai perangkat seperti *microwave*, perangkat elektronik, media penyimpan data inti transformator, perangkat rekayasa elektronik, industri telekomunikasi [2], [8], dan berbagai aplikasi lain banyak memanfaatkan material *ferrite*.

Pada skala nanometer material *ferrite* memiliki sifat listrik, optik, dan magnetik yang luar biasa, unik dan berbeda dibandingkan bentuk *bulk*-nya [9]. Hal tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor-faktor seperti parameter sintesis, komposisi, suhu maupun metode sintesis [10]. Selain itu, faktor keseragaman ukuran partikel, densitas yang tinggi serta kestabilan kimia yang baik dari material ini telah terbukti sangat penting dalam berbagai aplikasi [11], sehingga penelitian terkait material *ferrite* ini menjadi menarik.

Menurut sifat kemagnetannya *ferrite* dikelompokkan menjadi dua yaitu *hard ferrite* dan *soft ferrite*. Manganese ferrite dengan rumus kimia MnFe_2O_4 adalah salah satu jenis material *soft ferrite* yang banyak dimanfaatkan pada rekayasa elektronik dan industri telekomunikasi. Memiliki sifat mekanik yang kuat, dan stabil terhadap medan magnet eksternal maupun suhu merupakan salah satu keunggulan *manganese ferrite* sehingga material ini tidak mudah mengalami korosi [12]. Dalam ukuran nano, *manganese ferrite* dapat digunakan sebagai material penyerap gelombang mikro serta material anti radar.

Mn-ferrite merupakan salah satu kandidat yang cocok sebagai material *absorber* karena memiliki permeabilitas dan permitivitas yang memenuhi. Karakteristik mangan ferit

dipengaruhi oleh metode sintesis maupun komposisinya. Penentuan komposisi yang tepat akan menentukan sifat kemagnetan serta kemampuan penyerapan gelombang dari material ini. Pada penelitian ini metode sintesis yang digunakan adalah metode kopresipitasi. Metode ini dipilih karena mudah dalam mencampurkan prekursor serta dapat dilakukan dengan suhu rendah [13]. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mensintesis Mn-ferrite dari bahan alam yaitu pasir besi, menganalisis gugus fungsi, morfologi dan ukuran partikelnya. Untuk menganalisis struktur kristal sampel dikarakterisasi dengan *X-ray diffractometer* (XRD), pengamatan morfologi dan ukuran butir dilakukan dengan *Transmission Electron Microscopy* (TEM), sedangkan pengukuran sifat magnetik dilakukan dengan *Vibrating Sampel Magnetometer* (VSM).

2. Metode Penelitian

2.1 Tahap Preparasi

Pada tahap ini dilakukan proses ekstraksi pasir besi. Pasir besi yang digunakan adalah pasir besi dari Pangandaran Jawa Barat. Proses ini bertujuan untuk mendapatkan pasir besi dengan ukuran yang lebih seragam serta homogen, sekaligus untuk memisahkan pasir besi dengan pengotornya karena masih bercampur dengan berbagai batu kerikil. Proses ekstraksi dilakukan dengan magnet permanen dan ayakan hingga diperoleh pasir besi dengan ukuran 200 *mesh*.

2.2 Tahap Sintesis

Proses sintesis *Mn-ferrite* dilakukan dengan mencampurkan ekstrak pasir besi sebanyak 8,00 gram dengan $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$ Merck sebanyak 4,18 gram. Dalam proses pencampuran tersebut digunakan pelarut HCl 12 M sebanyak 25 ml pada suhu 60°C, yang dipanaskan di atas *magnetic stirrer* yang diputar dengan kecepatan 500 rpm selama 60 menit. Setelah itu dilanjutkan dengan proses titrasi yaitu meneteskan larutan pengendap NaOH. Larutan NaOH divariasikan dengan konsentrasi 3M, 6 M dan 9 M. Dalam proses ini larutan diletakkan di atas *magnetic stirrer* selama 60 menit pada suhu 80°C dengan kecepatan 500 rpm.

Hasil dari proses titrasi ini adalah endapan *Mn-ferrite* yang berbentuk *slurry*. Filtrat tersebut kemudian dicuci menggunakan aquades untuk membuang residunya. Untuk memperoleh sampel serbuk (*powder*) endapan tersebut dimasukkan dalam *furnace* pada suhu 90°C selama 4 jam untuk proses pengeringan. Tujuan dari pengeringan ini adalah untuk memperoleh sampel dalam bentuk *powder* sehingga memudahkan proses karakterisasi. Setelah itu sampel digerus untuk dilanjutkan dengan proses *annealing* pada suhu 500°C selama 2 jam.

2.3 Tahap Karakterisasi

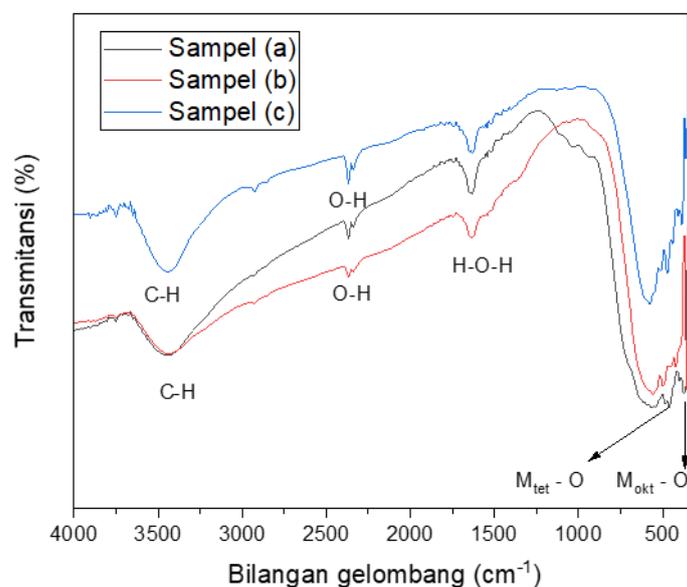
Untuk menganalisis struktur kristal, gugus fungsi dan ukuran partikel, karakterisasi sampel dilakukan dengan beberapa instrument berikut ini: *X-ray diffractometer* (XRD), Spektrokopi FTIR (*Fourier Transform Infra Red*) dan *Transmission Electron Microscopy* (TEM). Analisis struktur kristal dilakukan berdasarkan hasil pengujian XRD yang dikondisikan pada tegangan 40 kVolt, arus 30 mA, dengan nilai dua theta (2θ) antara 20° - 80°. Sinar-X (λ Cu $K\alpha$) yang digunakan memiliki nilai panjang gelombang adalah 1,5406 Å. Pengukuran spektrum FTIR digunakan untuk mengamati gugus fungsi sampel serta diamati pada bilangan gelombang antara 350 hingga 4000 cm^{-1} . TEM dioperasikan pada tegangan 200 kV untuk mengamati morfologi serta mikrostruktur. Penentuan ukuran partikel dilakukan dengan *software Image-J*.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil sintesis *Mn ferrite* dari pasir besi berbentuk *powder* (serbuk) berwarna hitam. Sampel *Mn ferrite* menunjukkan respon kemagnetan yang kuat saat diberi medan magnet eksternal. Tampak butiran sampel terlihat menempel antara satu partikel dengan partikel lain karena adanya interaksi magnetik.

3.1 Analisis Gugus Fungsi

Berdasarkan hasil karakterisasi FTIR dapat diamati bahwa pada sampel menunjukkan adanya gugus fungsi M – O (*metal-oxide*) pada kisi oktahedral maupun tetrahedral. Hal ini sekaligus mengkonfirmasi bahwa sampel memiliki struktur spinel. Hasil pola spektra FTIR ditunjukkan pada Gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1. Gugus fungsi *Mn ferrite* dengan NaOH (a) 3M (b) 6M (c) 9M

Berdasarkan Gambar 1, terdapat vibrasi *stretching* yang diidentifikasi sebagai gugus Mn – O dan Fe – O yang masing-masing menempati kisi tetrahedral ($M_{tet} - O$) dan kisi oktahedral ($M_{okt} - O$). Secara umum, tidak ada perbedaan signifikan perubahan konsentrasi NaOH terhadap gugus fungsi yang terbentuk. Namun jika dilihat lebih detail, terjadi pergeseran puncak serapan (vibrasi) pada ketiga sampel. Pergeseran puncak serapan (vibrasi) diduga karena adanya perubahan konsentrasi NaOH. Pada sampel (a) vibrasi terbentuk pada bilangan gelombang sekitar $462 - 486 \text{ cm}^{-1}$, sedangkan sampel (b) terjadi pada $501 - 555 \text{ cm}^{-1}$, sementara sampel (c) antara $533 - 578 \text{ cm}^{-1}$.

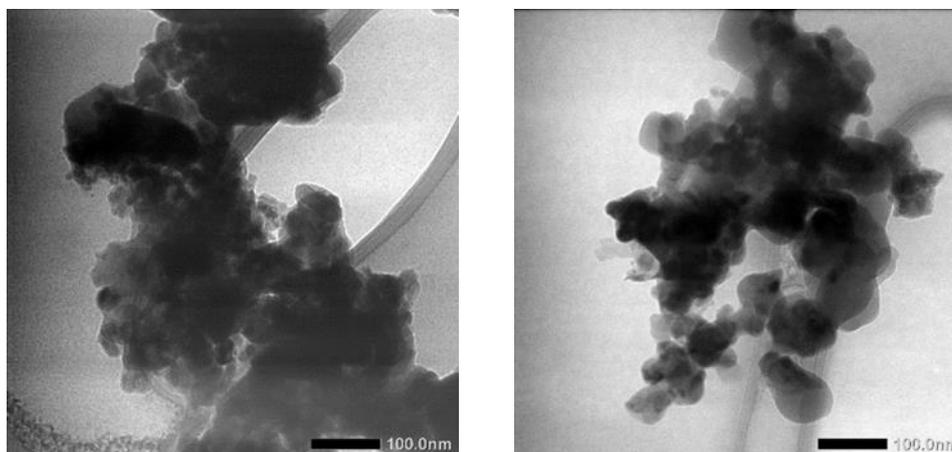
Pergeseran puncak tersebut diduga bahwa terjadi pergeseran puncak serapan akibat perbedaan konsentrasi NaOH. Perubahan puncak serapan dapat dikaitkan dengan perubahan panjang ikatan antara kation dengan anion pada kisi oktahedral ($M_{okt} - O$). Menurut Sundarajan, panjang ikatan gugus fungsi berbanding terbalik terhadap frekuensi vibrasi pada molekul, sehingga menurunnya panjang ikatan tersebut berdampak pada bergesernya frekuensi vibrasi pada frekuensi yang lebih tinggi [14]

Selain itu, perubahan puncak serapan gugus juga dipengaruhi oleh perlakuan *annealing*. Proses *annealing* diduga dapat memicu perubahan distribusi kation akibat perubahan panjang ikatan antara kation dengan oksigen [15], [16]. Keberadaan fasa hidroksil O-H mengindikasikan bahwa sampel masih mengandung kadar air yang tidak menguap secara

sempurna selama proses *annealing*. Intensitas serapan untuk gugus ini semakin kecil dengan meningkatnya suhu *annealing*, yang berarti semakin berkurang kadar air dalam sampel sampel. Vibrasi *bending* untuk gugus hidroksil O-H dan H-O-H serta *stretching* O-H muncul akibat preparasi sampel uji FTIR menggunakan KBr. Gugus *methyl C-H* tetap teridentifikasi dalam sampel pada daerah bilangan gelombang 3448 cm^{-1} . Gugus ini muncul akibat sampel bereaksi dengan gas CO_2 dan H_2 di atmosfer selama proses sintesis atau preparasi sampel uji FTIR.

3.2 Pengamatan Morfologi

Bentuk morfologi butiran *Mn-ferrite* didasarkan pada hasil karakterisasi TEM. Butiran nanopartikel *Mn-ferrite* tanpa perlakuan *annealing* mengalami aglomerasi dan membentuk agregat. Proses *annealing* dapat meningkatkan kristalinitas sampel sehingga diperoleh sampel dengan ukuran butir relatif lebih besar, mengurangi aglomerasi, serta memiliki kerapatan (*density*) yang lebih tinggi. Hasil pengamatan TEM disajikan pada Gambar 2 berikut ini.



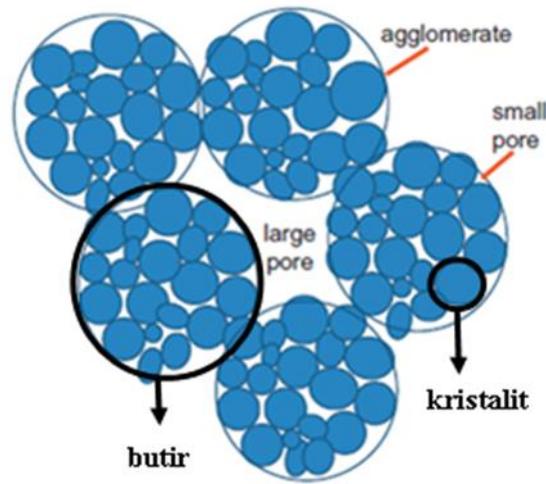
Gambar 2. TEM images *Mn ferrite* (a) tanpa *annealing* (b) *annealing* pada suhu 500°C

3.3 Analisis Ukuran Partikel

Berdasarkan Gambar 2, hasil pengamatan TEM menunjukkan bahwa ukuran butir relatif cenderung lebih besar jika dibandingkan dengan ukuran kristalit yang diperoleh dari hasil XRD. Penentuan ukuran butir dari hasil karakterisasi TEM dilakukan dengan software *Image-J* dan diperoleh kisaran nilai antara 30 – 50 nm. Sedangkan penentuan ukuran kristalit berdasarkan pola XRD dihitung menggunakan persamaan *Scherrer*. Hal ini dapat dijelaskan karena adanya aglomerasi sehingga beberapa butir menggumpal menjadi satu dan terlihat seperti satu partikel. Butir-butir partikel yang terukur dari hasil TEM merupakan kumpulan butir-butir kristalit yang mengalami aglomerasi (penggumpalan) akibat adanya interaksi magnetik diantara butiran sampel.

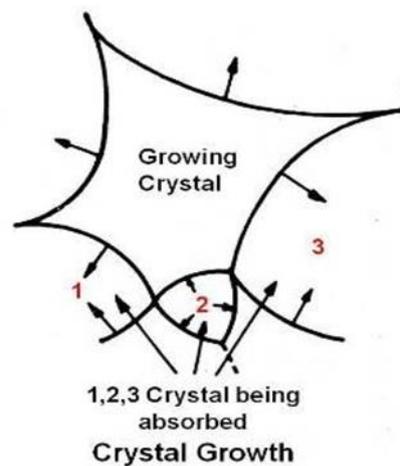
Beberapa faktor yang menyebabkan terjadinya aglomerasi antara lain karena ukuran butir yang sangat kecil, sehingga luas permukaan partikel menjadi sangat besar. Hal ini meningkatkan tegangan permukaan antar-muka partikel sehingga menyebabkan partikel menjadi tidak stabil [17]. Hal tersebut menyebabkan partikel saling berikatan agar stabil kembali. Hal tersebut yang menyebabkan terjadinya aglomerasi. Faktor lain penyebab terjadinya aglomerasi adalah adanya *exchange interaction* yaitu kondisi dimana terjadi interaksi dalam pertukaran *magnetic dipole* [18]. Hal tersebut meningkatkan reaktivitas partikel sehingga antar partikel saling berinteraksi dan membentuk agregat. Untuk mengurangi tegangan permukaan antar partikel dapat dilakukan

dengan memberikan *heating treatment* misalnya *annealing* pada suhu tinggi. Hal tersebut bertujuan agar partikel menjadi lebih terdispersi serta untuk meningkatkan derajat kristalinitas sampel karena adanya pertumbuhan butir.



Gambar 3. Estimasi perbedaan ukuran butir dan kristalit

Berdasarkan Gambar 3, dapat diamati bahwa perlakuan *annealing* dapat meningkatkan ukuran partikel. Hal ini dikarenakan sampel yang tidak diberi perlakuan *annealing* memiliki *strain* (cacat kristal) yang diduga mengakibatkan kristal memiliki permukaan yang tidak teratur (*surface disorderness*). Hal tersebut dapat mengganggu pertumbuhan kristal yang akhirnya berdampak pada ukuran butir partikel. Faktor lain adalah karena energi termal yang diberikan dalam bentuk difusi panas dapat menumbuhkan butir partikel baru seperti yang diilustrasikan pada gambar 4 di bawah ini [19].

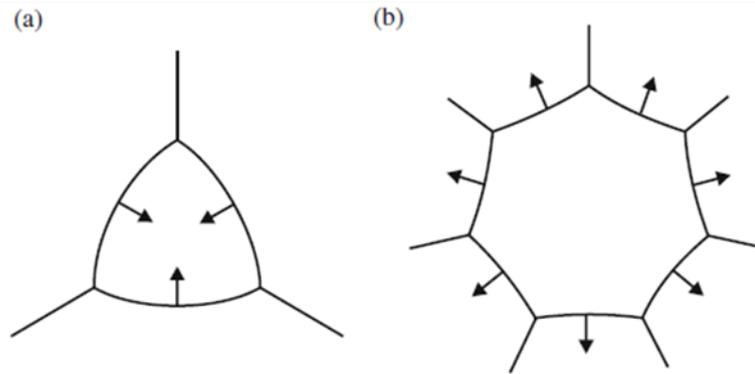


Gambar 4. Skema pertumbuhan butir pada nanopartikel

Ketika proses *annealing*, sampel *Mn-ferrite* mengalami tahap nukleasi pada saat kristal mengalami pertumbuhan butir (*grain growth*). Pada proses tersebut, kristal *Mn ferrite* mengurangi energi permukaan karena digunakan untuk membangkitkan gaya penggerak (*driving force*). Gaya tersebut diperlukan untuk berinteraksi dengan butiran partikel yang terdekat (*neighboring grain*). Interaksi tersebut merupakan proses koarsening yaitu proses pertambahan ukuran partikel [19].

Secara teoretik, ketika atom bergerak melampaui batas butir maka atom tersebut melepaskan sejumlah energi. Energi tersebut digunakan atom (butiran partikel) untuk

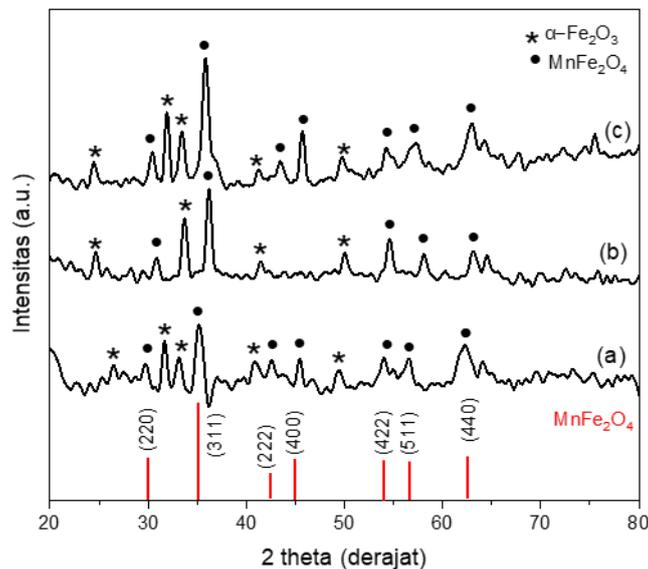
membangkitkan gaya penggerak. Arah gerakan batas butir dapat mendekati pusat maupun menjauhi pusat. Gerakan batas mendekati pusat akan membentuk permukaan cekung, dan gerakan menjauhi pusat akan membentuk permukaan cembung seperti diilustrasikan dengan Gambar 5. Ketika energi batas butir nanopartikel lebih kecil daripada energi permukaan nanopartikel, maka partikel akan bergerak menjauhi dan mendekati pusat [19].



Gambar 5. Gerakan batas butir (a) menuju (b) menjauhi pusat

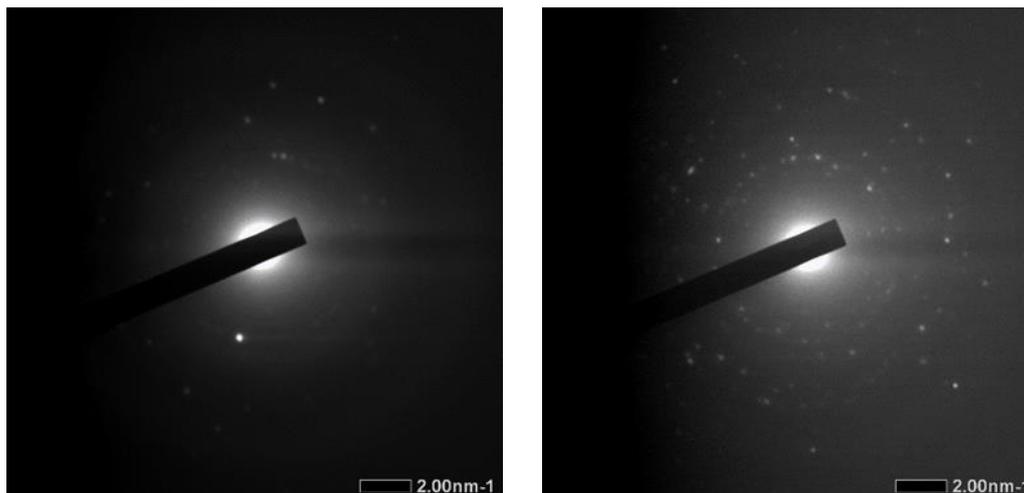
3.4 Analisis Struktur Kristal

Untuk mendukung ketiga analisis di atas, dilakukan analisis struktur kristal *Mn ferrite* berdasarkan hasil karakterisasi XRD. Pola XRD *Mn ferrite* ditunjukkan pada Gambar 6 di bawah ini [20].



Gambar 6. Pola XRD *Mn ferrite* variasi NaOH: (a) 3 M, (b) 6 M, (c) 9 M

Analisis struktur kristal didasarkan pada pola XRD yang menampilkan puncak difraksi dari masing-masing bidang kristal. Bidang yang dimaksud adalah bidang (220), (311), (222), (400), (422), (511), dan (440) berdasarkan hasil pencocokan dengan data standar difraksi *Mn ferrite* yaitu JCPDS No 10-0319 dengan struktur *face center cubic* dan termasuk ke dalam kelompok *Fd-3m* [20]. Selain itu, bidang kristal *Mn ferrite* juga dikonfirmasi oleh citra *Selected Area Electron Diffraction* (SAED) dari hasil pengamatan TEM seperti pada Gambar 7 berikut ini.



Gambar 7. Citra SAED (a) tanpa *annealing* (b) *annealing* pada suhu 500°C

Berdasarkan citra SAED pada Gambar 7, pola cincin difraksi menampilkan bentuk garis berupa titik (*spot*) yang kontinyu. Hal ini mengidentifikasi bahwa bahwa sampel berupa material polikristalin dengan jari-jari tertentu yang masing-masing mewakili suatu bidang kristal. Pada *single* kristal, pola difraksi akan berbentuk *spot*, sedangkan pada sampel polikristalin akan berupa garis atau spot yang kontinyu dan membentuk cincin. Perbedaan sampel yang diberi perlakuan *annealing* dan tanpa *annealing* terletak pada jumlah spot yang terlihat. Oleh karena itu, perlakuan *annealing* menyebabkan *spot* pada cincin difraksi semakin banyak dan terlihat terang yang mengindikasikan adanya peningkatan derajat kristalinitas.

4. Kesimpulan

Manganese ferrite telah berhasil disintesis dengan metode kopresipitasi dari pasi besi. Hasil pengujian FTIR menunjukkan terbentuknya gugus fungsi *metal oxide* yang mengkonfirmasi fase spinel *ferrite*. Pengujian TEM menyatakan bahwa sampel *manganese ferrite* mengalami aglomerasi sehingga terlihat saling terkumpul karena adanya interaksi magnetik. Akibatnya ukuran butir terlihat menggumpal sehingga beberapa butir terlihat seperti satu partikel. Sampel berupa polikristalin berdasarkan hasil pengamatan TEM yang disajikan dalam citra SAED. Berdasarkan hasil penelitian ini, masih dibutuhkan penelitian lanjutan sebelum metode pengolahan ini dapat digunakan secara komersial.

Daftar Pustaka

1. P. Thakur, D. Chahar, S. Taneja, N. Bhalla, and A. Thakur, "A review on MnZn ferrites: Synthesis, characterization and applications," *Ceramics International*, vol. 46, no. 10. Elsevier Ltd, pp. 15740–15763, Jul. 01, 2020. doi: 10.1016/j.ceramint.2020.03.287.
2. A. Yulianto and M. Prasetya Aji, "Fabrikasi Mn-Zn Ferit dari Bahan Alam Pasir Besi serta Aplikasinya untuk Core Inductor," 2010.
3. P. Muharam et al., "Pasir Besi di Indonesia, Geologi, eksplorasi dan Pemanfaatannya," 2014. [Online]. Available: <http://psdg.bgl.esdm.go.id>
4. A. R. Liandi et al., "Recent trends of spinel ferrites (MFe₂O₄: Mn, Co, Ni, Cu, Zn) applications as an environmentally friendly catalyst in multicomponent reactions: A

- review,” *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 7, p. 100303, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100303>.
5. M. Sundararajan, L. J. Kennedy, U. Aruldoss, Sk. K. Pasha, J. J. Vijaya, and S. Dunn, “Microwave combustion synthesis of zinc substituted nanocrystalline spinel cobalt ferrite: Structural and magnetic studies,” *Mater Sci Semicond Process*, vol. 40, pp. 1–10, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.06.002>.
 6. E. Muntean, M. Stoia, and C. Păcurariu, “Facile synthesis, characterization and magnetic properties of manganese ferrite/carbon composites,” *Thermochim Acta*, vol. 667, pp. 122–131, Sep. 2018, doi: [10.1016/j.tca.2018.07.015](https://doi.org/10.1016/j.tca.2018.07.015).
 7. M. Arshad et al., “Structural and magnetic properties variation of manganese ferrites via Co-Ni substitution,” *J Magn Magn Mater*, vol. 474, pp. 98–103, Mar. 2019, doi: [10.1016/j.jmmm.2018.10.141](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.10.141).
 8. X. Zhao et al., “Magnetic transformation of Zn substituted Ni-Co ferrite nanoparticles,” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 31, pp. 526–541, 2019.
 9. S. A. Mazen and N. I. Abu-Elsaad, “Structural and some magnetic properties of manganese-substituted lithium ferrites,” *J Magn Magn Mater*, vol. 324, no. 20, pp. 3366–3373, Oct. 2012, doi: [10.1016/j.jmmm.2012.05.056](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2012.05.056).
 10. K. Kondo, T. Chiba, and S. Yamada, “Effect of microstructure on magnetic properties of Ni-Zn ferrites,” *J Magn Magn Mater*, vol. 254–255, pp. 541–543, 2003, doi: [10.1016/S0304-8853\(02\)00859-4](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(02)00859-4).
 11. I. Sharifi and H. Shokrollahi, “Structural, Magnetic and Mössbauer evaluation of Mn substituted Co-Zn ferrite nanoparticles synthesized by co-precipitation,” *J Magn Magn Mater*, vol. 334, pp. 36–40, 2013, doi: [10.1016/j.jmmm.2013.01.021](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2013.01.021).
 12. H. Anwar and A. Maqsood, “Comparison of structural and electrical properties of Co²⁺-doped Mn-Zn soft nano ferrites prepared via coprecipitation and hydrothermal methods,” *Mater Res Bull*, vol. 49, no. 1, pp. 426–433, 2014, doi: [10.1016/j.materresbull.2013.09.009](https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2013.09.009).
 13. H. Kiswanto, A. Puspitasari, E. Suharyadi, T. Kato, and S. Iwata, “Effect of Zinc on Crystal Structure and Magnetic Properties of Co_{1-x}Zn_xFe₂O₄ Nanoparticles Synthesized by Coprecipitation Method,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2018, p. 012001.
 14. M. Sundararajan, L. J. Kennedy, U. Aruldoss, S. K. Pasha, J. J. Vijaya, and S. Dunn, “Microwave combustion synthesis of zinc substituted nanocrystalline spinel cobalt ferrite: Structural and magnetic studies,” *Mater Sci Semicond Process*, vol. 40, pp. 1–10, Jul. 2015, doi: [10.1016/j.mssp.2015.06.002](https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.06.002).
 15. S. Sarmah, Aakansha, P. K. Maji, S. Ravi, and T. Bora, “Effect of cation distribution and temperature variation on magnetic and dielectric properties of manganese substituted cobalt ferrites,” *Solid State Commun*, vol. 324, Feb. 2021, doi: [10.1016/j.ssc.2020.114146](https://doi.org/10.1016/j.ssc.2020.114146).
 16. H. Kiswanto, “Analisis Perubahan Struktur Kristal dan Distribusi Kation Cobalt Ferrite Akibat Substitusi Zinc,” *JIIF (Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika)*, vol. 4, no. 2, pp. 155–163, 2020.
 17. K. El-Sayed, M. B. Mohamed, Sh. Hamdy, and S. S. Ata-Allah, “Effect of synthesis methods with different annealing temperatures on micro structure, cations distribution and magnetic properties of nano-nickel ferrite,” *J Magn Magn Mater*, vol. 423, pp. 291–300, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.09.100>.

18. B. Y. Boucher, R. Buhl, and M. Perrin, "Three - Sublattice Ferrimagnetic Structure," *J Appl Phys*, vol. 38, no. 3, pp. 1109-1110, Mar. 1967, doi: 10.1063/1.1709504.
19. R. J. D. Tilley, *Crystals and Crystal Structures*. Wiley, 2006. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=iVvOYOFcx8C>
20. H. Kiswanto, A. H. P. Yuniarto, N. I. Istiqomah, and E. Suharyadi, "Struktur Kristal dan Sifat Kemagnetan Nanopartikel Mn-Ferrite yang Disintesis dari Bahan Alam Pasir Besi," *Jurnal Fisika Unand*, vol. 10, no. 4, pp. 413-420, 2021.