



Struktur Kristal dan Morfologi Material *Bismuth Ferrite* Jenis *Sillenite* ($\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$); *Literature Review*

Erna Juwita^{a*}, Rona Cuana^a, Windy Andaresta^b

^aProgram Studi Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan, Jl. Almamater No.1, Padang Bulan, Kec. Medan Baru, Medan, Sumatera Utara 20155, Indonesia

^bProgram Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan, Jl. Almamater No.1, Padang Bulan, Kec. Medan Baru, Kota Medan, Sumatera Utara 20155, Indonesia

*Penulis korespondensi: ernajuwita@polmed.ac.id (E.Juwita) Tel: +62858-9380-4662

Sorotan

- Struktur kristal dan morfologi dari bismuth ferrite jenis sillenite ($\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$)
- Metode persiapan fase murni bismuth ferrite jenis sillenite ($\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$)
- Pengaruh metode persiapan terhadap struktur kristal dan morfologi bismuth ferrite

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 27 Maret 2025
Direvisi pada 11 April 2025
Disetujui pada 07 Mei 2025
Tersedia daring pada 09 Mei 2025

Kata kunci:

Bismuth Ferrite, Sillenite, Morfologi

Keywords:

Bismuth Ferrite, Sillenite, Morphology

ABSTRAK

Review artikel ini dilakukan untuk membahas metode pembuatan material *bismuth ferrite* dan struktur kristal serta morfologi yang dihasilkan. Berdasarkan hasil *review* diperoleh bahwa *bismuth ferrite* telah berhasil disintesis dengan berbagai metode sintesis, diantaranya metode hidrotermal, sol-gel, kopresipitasi, *microwave assisted* hidrotermal, *combustion*, dan lain-lain. Metode-metode sintesis tersebut dapat menghasilkan material *bismuth ferrite* dengan beberapa struktur fase. Umumnya struktur fase dari *bismuth ferrite* yang dihasilkan adalah BiFeO_3 , $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$, dan $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$. *Bismuth ferrite* jenis BiFeO_3 merupakan jenis *perovskite* dan $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ adalah jenis *mullite*. Sedangkan $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ merupakan *bismuth ferrite* jenis *sillenite*. Beberapa penelitian melaporkan telah berhasil mendapat fase $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ tunggal dengan tanpa adanya fase impuritas yang muncul. $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ memiliki struktur *body-center cubic* dan termasuk dalam kelompok grup ruang I23. Rata-rata ukuran kristalit fase tunggal $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ yang dilaporkan dari berbagai metode sintesis adalah berkisar skala puluhan hingga ratusan nanometer dengan parameter kisi (*a*) yang hampir sama yaitu 1,01000-1,01990 nm. Morfologi dari $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ bervariasi mulai dari bentuk bulat, kubik, sampai *polyhedral*. Selain itu, morfologi dari *bismuth ferrite* juga terlihat teraglomerasi dalam beberapa penelitian. Pola SAED memperlihatkan bahwa $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ memiliki struktur kristal polikristalin. Hasil yang beragam menunjukkan ada pengaruh dari metode sintesis dan parameter pemrosesan yang digunakan terhadap struktur kristal, ukuran partikel, dan morfologi dari *bismuth ferrite*. Tujuan dari *review* ini adalah menjadi acuan bagi peneliti untuk dapat menghasilkan material *bismuth ferrite* dengan berbagai sifat yang diinginkan dan dapat diaplikasikan dalam berbagai bidang.

ABSTRACT

This study was reviewed to discuss about the processes used to create bismuth ferrite materials and the morphology and crystal structure that are produced. Several synthesis techniques, such as the

hydrothermal method, sol-gel, co-precipitation, microwave-assisted hydrothermal, combustion, and others, have been effectively used to create bismuth ferrite, according to the review findings. Bismuth ferrite material with various phase structures can be produced using these synthesis techniques. Bismuth ferrite often exhibits the following phase structures: BiFeO_3 , $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$, and $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$. Whereas $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ is of the mullite type, BiFeO_3 is of the perovskite type. However, $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ is categorized as a bismuth ferrite of the sillenite type. The effective synthesis of a single-phase $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ without any impurity phases has been documented in a number of research. $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ is a member of space group I23 and has a body-centered cubic structure. With a lattice parameter (a) of roughly 1.01000–1.01990 nm, the reported average crystallite size of single-phase $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ produced by different processes varies from tens to hundreds of nanometers. $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ has a variety of morphologies, including polyhedral, cubic, and spherical forms. Furthermore, agglomeration has been noted in the morphology of bismuth ferrite in several investigations. $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ has a polycrystalline crystal structure, according to SAED patterns. The different findings imply that the crystal structure, particle size, and morphology of bismuth ferrite are influenced by the synthesis technique and processing factors. Researchers can use the evaluation as a guide to create bismuth ferrite materials with the appropriate qualities that can be used in a variety of applications.

1. Pendahuluan

Material multiferroik merupakan salah satu material yang banyak menarik perhatian para Peneliti. Material ini menunjukkan sifat yang unik dimana dapat memiliki dua atau lebih susunan *ferroic* secara bersamaan, misalnya feroelektrik, feromagnetik, dan feroelastik. Sifat feroelektrik dan magnetik yang dimiliki oleh material multiferroik membuat material tersebut menjadi bagian penting dalam banyak struktur nano [1-4]. Ada banyak material multiferroik yang telah diteliti, salah satunya adalah *bismuth ferrite*. *Bismuth ferrite* memiliki beberapa kelebihan yang unik, diantaranya polarisasi remanen yang besar ($100\text{--}230\text{ }\mu\text{C}/\text{cm}^2$), suhu Currie yang tinggi ($\sim 830^\circ\text{C}$), memiliki energi celah yang relatif rendah ($< 2,8\text{ eV}$) dan koeksistensi sifat feroelektrik dan magnetik di suhu ruang [5]. Karena kelebihannya ini *bismuth ferrite* telah banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, misalnya dalam perangkat penyimpanan, sensor magnetoelektrik, spintronik, biomedis (pencitraan, antibakteri, dan pengobatan tumor), dan fotokatalis [6-8].

Bismuth ferrite secara umum memiliki tiga jenis fase kristal diantaranya: BiFeO_3 , $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$, dan $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ [9,10]. *Bismuth ferrite* jenis BiFeO_3 atau fase utama dari *bismuth ferrite* disebut juga jenis *perovskite* memiliki struktur kristal *rhombohedral* $R3c$ [11,12]. BiFeO_3 memiliki struktur morfologi yang unik dengan ABO_3 . Atom O menempel pada permukaan, atom A terletak di bagian sudut, dan atom B terletak pada bagian tengah *body*. Atom A dan B juga disebut sebagai kation sedangkan atom O (oksigen) disebut anion [13]. Pada BiFeO_3 , susunan feroelektrik berasal dari pasangan elektron tunggal Bi^{3+} , sedangkan susunan magnetik diakibatkan dari spin Fe yang tidak berpasangan [14]. Fase kristal lainnya yaitu $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$, dan $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$, kedua fase ini kadang juga disebut sebagai fase kedua dari *bismuth ferrite* [15,16].

Fase kristal $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ atau jenis *bismuth mullite* memiliki struktur kristal *orthorhombic* dan pusat simetri dengan grup ruang Pbam [4,17]. Sedangkan *bismuth ferrite* jenis $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ merupakan material *sillenite* yang termasuk dalam grup ruang kubik $\text{I}23$. *Bismuth ferrite* jenis ini memiliki parameter kisi sebesar 1,01897 nm [9]. FeO_4 tetrahedral berada di sudut-sudut dan pusat sel satuan yang terhubung oleh kerangka polihedrik Bi-O [10]. Material dengan struktur *sillenite* memiliki beberapa kelebihan, diantaranya memiliki: 1) struktur kristal yang unik, 2) kemampuan fotoreaktif yang tinggi, 3) respon yang cepat, 4) sifat dielektrik, fotokromik, dan elektro-optik, 5) energi celah pita yang sempit yaitu kurang dari 2,9 eV, serta 5) dapat didaur ulang [18].

Saat ini para peneliti fokus dalam mengadopsi beberapa metode sintesis material *bismuth ferrite* untuk dapat mengontrol ukuran, bentuk, dan morfologi serta sifat yang diinginkan dari suatu material tersebut. *Bismuth ferrite* telah banyak diteliti dengan berbagai metode sintesis dan telah menghasilkan produk akhir dengan sifat atau karakter yang berbeda-beda. Beberapa metode sintesis yang telah diteliti untuk menghasilkan *bismuth ferrite* diantaranya metode sol gel [10], hidrotermal [19], kopresipitasi [20,21], dan pembakaran (*combustion synthesis*) [22]. Dengan beberapa keunikan dari *bismuth ferrite* jenis *sillenite* yang telah dijelaskan, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji struktur kristal dan sifat morfologi dari *bismuth ferrite* dengan struktur *sillenite* sehingga diharapkan dapat menjadi acuan dalam melakukan penelitian lebih lanjut mengenai *bismuth ferrite* dan aplikasinya.

2. Metode

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan analisis literatur dari berbagai sumber artikel ilmiah nasional maupun internasional yang membahas struktur kristal dan sifat morfologi material *bismuth ferrite* jenis *sillenite* ($\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$). Fokus utama penelitian ini adalah studi literatur mengenai sintesis *bismuth ferrite* jenis *sillenite* serta karakterisasi struktur kristal dan morfologinya.

Kajian terkait struktur kristal diperoleh melalui analisis literatur terhadap hasil pengukuran menggunakan *X-ray Diffractometer* (XRD). Sementara itu, kajian morfologi didasarkan pada analisis literatur dari hasil pengukuran menggunakan *Field Emission Scanning Electron Microscopy* (FESEM)/*Scanning Electron Microscopy* (SEM) serta *High-Resolution Transmission Electron Microscopy* (HR-TEM)/*Transmission Electron Microscopy* (TEM). Selain itu, penelitian ini juga membahas berbagai metode sintesis yang digunakan dalam memperoleh material *bismuth ferrite* berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh para peneliti sebelumnya.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Metode Sintesis *Bismuth Ferrite*

Berbagai metode telah digunakan untuk memperoleh senyawa *bismuth ferrite* dengan berbagai ukuran. Metode sintesis yang bervariasi ini dimaksudkan mengontrol ukuran, bentuk dan morfologi dengan sifat yang diinginkan dan disesuaikan. Beberapa metode yang digunakan untuk mensintesis *bismuth ferrite* ini telah menghasilkan struktur fase yang berbeda-beda. Beberapa struktur fase yang dihasilkan adalah BiFeO_3 , $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$, dan $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$, serta campuran dari ketiga fase *bismuth ferrite* tersebut. Selain struktur fase yang berbeda-beda, berbagai metode sintesis juga telah menghasilkan ukuran kristal, morfologi, sifat optik, sifat magnetik, elektrik dan sifat lainnya yang berbeda-beda dari *bismuth ferrite*. Metode yang telah digunakan untuk menghasilkan *bismuth ferrite* diantaranya metode hidrotermal [19,23,24], *microwave assisted hydrothermal* [25,26], kopresipitasi [20,21,27], sol-gel [28,29], *combustion* [22,30], *molten salt* [31]. Berikut penjelasan dari beberapa metode yang sering digunakan dalam mensintesis *bismuth ferrite*.

3.1.1. Metode hidrotermal

Metode hidrotermal ini disebut juga sebagai metode autoklaf karena melibatkan pemanasan suspensi akuatik dari garam yang tidak larut dalam autoklaf pada tekanan dan suhu sedang, sehingga dapat terjadi kristalisasi dari fase yang diinginkan. Metode ini sangat populer dalam sintesis nanopartikel *perovskite* hal ini karena efek sinergis dari pelarut, tekanan, dan suhu yang dapat membuat produk akhir yang stabil dan dapat menghambat terjadinya pembentukan fase impuritas [8]. Salah satu keuntungan dari metode tersebut ialah dapat menyintesis material mikrokristalin atau nanokristalin dengan suhu yang jauh lebih rendah jika dibandingkan dengan metode sol-gel. Pada proses sol-gel, suhu yang digunakan relatif tinggi, misalnya 500°C digunakan untuk mengalsinasi gel sehingga diperoleh *bismuth ferrite*. Sedangkan pada metode hidrotermal dengan menggunakan suhu yang lebih rendah dapat mensintesis *bismuth ferrite*. Metode ini dapat menawarkan kesempatan untuk mengontrol kemurnian, ukuran, dan material *bismuth ferrite* yang lebih baik [32]. Dibalik kelebihanannya, metode ini juga memiliki kekurangan. Kekurangan dari metode hidrotermal yaitu menggunakan autoklaf yang mahal. Selain itu, ketidakmampuan melakukan analisis *in situ* terhadap kristal yang tumbuh dikarenakan kondisi reaksi yang sangat keras [33].

P. Kumari dan N. Khare, berhasil mensintesis nanopartikel *bismuth ferrite* dengan menggunakan metode hidrotermal. *Bismuth nitrate* $[\text{Bi}(\text{NO}_3)_3]$ dan besi *nitrate* $[\text{Fe}(\text{NO}_3)_3]$ digunakan sebagai material dasar dan dilarutkan kedalam asam *nitrate* encer (HNO_3), kalium hidroksida (KOH) digunakan sebagai *mineralizer*. Suhu reaksi yang digunakan adalah 120°C dalam waktu 16 jam. Struktur fase yang dihasilkan dalam penelitian ini adalah nanopartikel

bismuth ferrite jenis *sillenite* ($\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$), dan tidak ada fase impuritas yang teramati. Rata-rata ukuran kristal dari nanopartikel $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ adalah ~ 25 nm. Nanopartikel $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ terlihat memiliki ukuran yang bervariasi, beberapa memiliki ukuran yang kecil dan yang lainnya memiliki ukuran yang besar [19]. Selain itu, X. S. Nguyen menggunakan $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ sebagai *raw material* yang dilarutkan kedalam air deionisasi. Suhu rekasi yang dibutuhkan untuk menghasilkan *bismuth ferrite* adalah 180°C selama 12 jam. Dalam penelitian ini, fase $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ dihasilkan dan tanpa adanya fase impuritas. Rata-rata ukuran kristalitnya sebesar 25,6 nm. Material *bismuth ferrite* yang dihasilkan terdiri atas sejumlah besar partikel bulat yang tersebar dengan baik [24].

3.1.2. Metode Sol Gel

Salah satu pendekatan *bottom-up* adalah proses sol-gel. Proses ini melibatkan penggunaan alkoksida logam, mengalami reaksi hidrolisis dan polimerasi kondensasi untuk memperoleh gel. Setelah proses anil, gel tersebut berubah dari gel berpori menjadi sebuah produk padat yang diinginkan. Dalam proses sol-gel ini, faktor utama yang mempengaruhi proses tersebut adalah rasio air di dalam larutan, suhu larutan, dan besarnya pH larutan [8]. Metode sol-gel memiliki keuntungan, diantaranya dapat menghasilkan serbuk berpori sangat halus yang seragam dan dapat ditingkatkan skala produksinya menjadi skala industri. Sifat fisik dan kimia dari produk akhir *bismuth ferrite* yang dihasilkan dari metode ini sangat dipengaruhi oleh langkah-langkah pada proses hidrolisis dan pengeringan [2]. Pada umumnya, metode ini merupakan cara yang sederhana untuk mensintesis nanopartikel *bismuth ferrite*. Akan tetapi, pengontrolan parameter pemrosesan harus dilakukan dengan hati-hati sehingga dapat menghasilkan fase kristal, morfologi, dan ukuran partikel yang diinginkan [32].

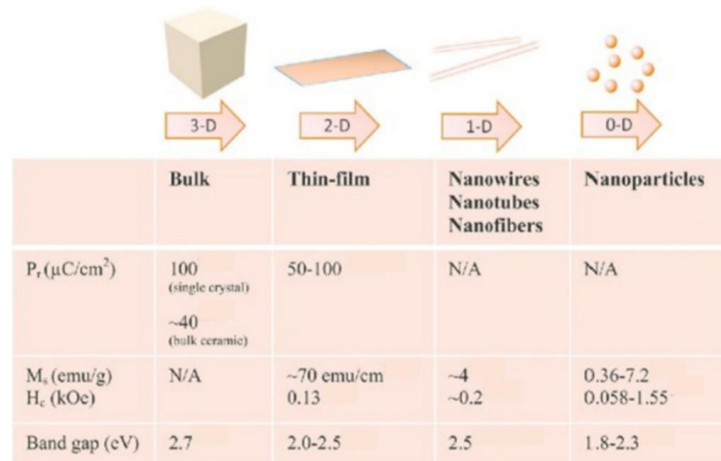
H. Wu *et al.* telah berhasil mendapatkan nanopartikel *bismuth ferrite* menggunakan metode sol-gel dengan $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (*bismuth nitrate nonahydrate*), $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (*besi nitrate pentahydrate*), dan $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ sebagai *raw material*. Larutan yang dihasilkan dari *raw material* tersebut diaduk pada suhu 70°C dalam waktu 3 jam untuk membuat gel berwarna coklat dan transparan, lalu dimasukkan ke dalam oven selama 16 jam dengan suhu 120°C untuk menghasilkan *xerogel*. *Xerogel* yang dihasilkan, kemudian digiling menjadi serbuk dan dipanaskan hingga suhu 550°C selama 2 jam. Pola XRD yang muncul menunjukkan fase *bismuth ferrite* yang sesuai dengan struktur *rhombohedral* dan tidak ditemukan fase impuritas di dalamnya. Partikel *bismuth ferrite* yang dihasilkan menampilkan morfologi yang tidak teratur dan menggumpal terhadap satu sama lain, hal ini karena sifat feromagnetik dari nanopartikel *bismuth ferrite* yang lemah. Distribusi ukuran partikel dari nanopartikel *bismuth ferrite* sangat lebar, dimana berkisar antara 30 sampai 200 nm dengan ukuran partikel rata-rata sekitar 90 nm [28].

3.1.3. Metode kopresipitasi

Metode kopresipitasi memiliki kelebihan yaitu sebagai metode yang sederhana dan efisien yang penggunaannya mudah, dan menggunakan suhu yang rendah serta membutuhkan waktu yang singkat [34]. Akan tetapi, metode ini juga memiliki kekurangan seperti sulitnya dalam mengontrol ukuran partikel dan distribusi ukurannya, kristalisasi yang buruk dan terjadi agregasi. Presipitasi yang cepat seringkali terjadi sehingga menghasilkan partikel dengan ukuran yang besar [2].

$\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ sebagai *raw material* dan KOH sebagai presipitan digunakan dalam penelitian yang dilakukan oleh S. kalikeri dan V. S. kodialbail. Partikel yang dihasilkan dalam penelitian tersebut kemudian dikalsinasi dengan suhu 400°C selama 2 jam. Fase campuran dari *bismuth ferrite* yang terdiri dari BiFeO_3 , $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$, dan $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ muncul dalam hasil analisis XRD yang dilakukan. Rata-rata ukuran kristalit dari partikel *bismuth ferrite* ini adalah 70 nm. Partikel yang terbentuk, terlihat memiliki ukuran kecil dan memiliki bentuk kuasi-bola atau oval dengan beberapa agregat besar [21]. Selain itu, penelitian sebelumnya yang telah dilakukan penulis juga menggunakan metode kopresipitasi dengan $\text{Bi}_5\text{O}(\text{OH})_9(\text{NO}_3)_4$ dan $\text{FeCl}_3(\text{OH})_9(\text{NO}_3)_4$ sebagai prekursor utama dan NaOH sebagai presipitan. Suhu reaksi dalam campuran larutan yang digunakan adalah 100°C dalam waktu 45 menit. Fase tunggal *bismuth ferrite* jenis $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ dengan ukuran kristalit 35 nm muncul dari pola XRD yang ditunjukkan dan tidak ada fase kedua yang teramati. Morfologi dari nanopartikel teraglomerasi dan nanopartikel berbentuk hampir bulat [20].

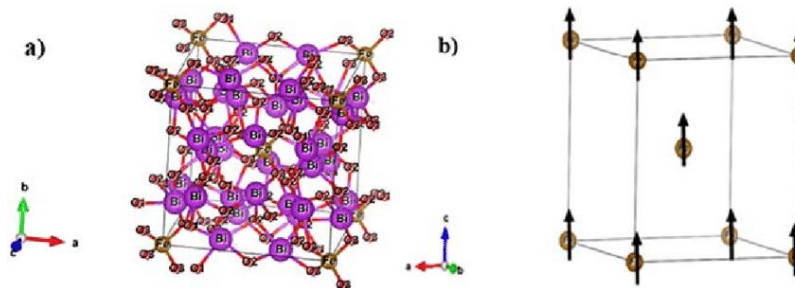
Sehingga dapat disimpulkan dari beberapa metode yang digunakan untuk mensintesis *bismuth ferrite* dapat menghasilkan ukuran butir dan morfologi yang beragam. Faktor lain yang juga dapat mempengaruhi ukuran butir dan morfologi *bismuth ferrite* adalah parameter pemrosesan [32]. Berdasarkan dimensinya, material dengan struktur nano dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kelas, diantaranya: 0 dimensi (0D), 1 dimensi (1D), 2 dimensi (2D), dan 3 dimensi (3D). Material nanostruktur dari 0D adalah nanopartikel. Nanomaterial yang termasuk 1D adalah *nanorod*, *nanowire* dan *nanotube*. Nanomaterial 2D seperti *nanoisland* dan semua material *thin film*, sedangkan untuk material 3D contohnya adalah *nanowire* dan *tubes array* [13]. Gambar 1 menunjukkan beberapa bentuk nanotruktur dari *bismuth ferrite* serta pengaruhnya terhadap sifat-sifat yang dihasilkan.



Gambar 1. Bismuth ferrite dengan berbagai struktur dimensi dan sifat-sifatnya yang dihasilkan [33]

3.2 Analisis Struktur Kristal dengan Menggunakan Difraksi Sinar X

$\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ merupakan bismuth ferrite jenis sillenite dengan struktur *body-center cubic* yang termasuk dalam kelompok grup ruang I23 [7,35]. Struktur umum dari kristal bismuth oksida sillenite didefinisikan sebuah atom bismuth (Bi^{3+}) yang dikelilingi oleh 8 atom oksigen yang berbagi sudut dengan polyhedron BiO_8 lainnya dan ion trivalent MO_4 berada di sudut-sudut dan pusat kubus [18].

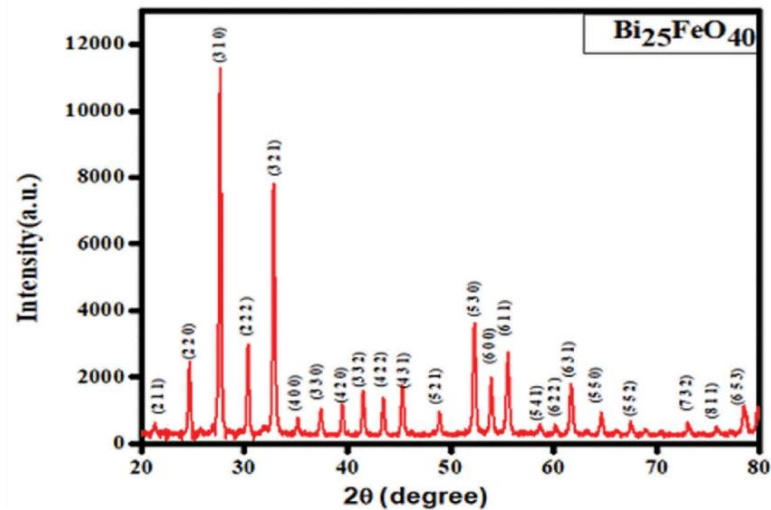


Gambar 2. (a) struktur kristal dari material $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ dan (b) struktur magnetik yang stabil dari material $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ [36].

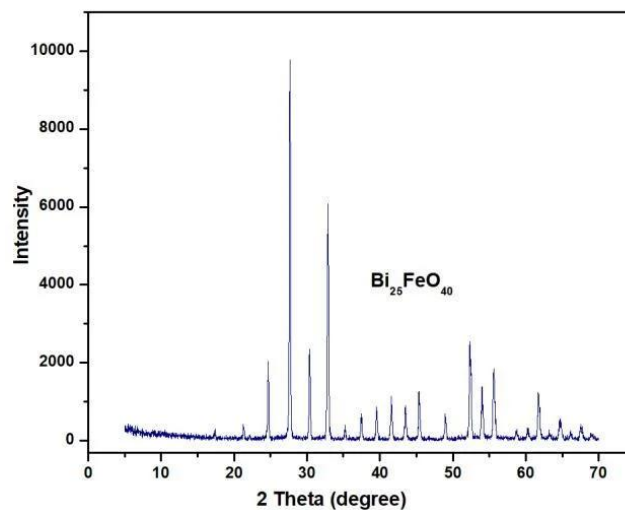
Gambar 2a menunjukkan struktur kristal dari material bismuth ferrite jenis sillenite ($\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$), sedangkan gambar 2b memperlihatkan struktur magnetik stabil dari material sillenite ($\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$). Berdasarkan analisis struktur sillenite bismuth ferrite diketahui bahwa kation Bi^{3+} menempati dua sisi kristalografi yang tidak setara, yaitu 24f (Bi1) dan 2a (Bi2). Sisi 2a ini juga ditempati kation Fe^{3+} . O^{2-} yang merupakan anion berada pada dua posisi kristalografi yang berbeda, 24 f (O2) dan 8c (O1 dan O3). Atom oksigen 8c (O3) ini memiliki koordinasi tetrahedral, disekitar kation pada posisi 2a [37].

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dari pola difraksi X-ray menunjukkan bahwa puncak difraksi dari fase $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ terletak di $2\theta = 27,68^\circ; 30,32^\circ; 32,90^\circ; 35,28^\circ; 37,55^\circ; 39,56^\circ; 41,68^\circ; 43,66^\circ; 45,47^\circ; 49,02^\circ; 52,50^\circ; 54,16^\circ; 55,68^\circ; 57,01^\circ; 61,74^\circ$; dan $63,02^\circ$. Puncak difraksi yang berada di 2θ yang telah disebutkan sebelumnya sesuai dengan bidang hkl (310); (222); (321); (400); (330); (420); (332); (422); (431); (521), (530); (600); (611); (620);

(631); dan (444) secara berurutan (JCPDS no. 46-0416) [19]. Penelitian ini sejalan dengan yang telah dilaporkan oleh M. K. Verma *et al.* dimana puncak yang paling kuat dari $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ dalam pola XRD berada pada bidang hkl (310); (220); (530); (222); (600); (611); (631); dan (333) [9]. Pola difraksi x-ray dari *bismuth ferrite* tipe *sillenite* dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. (a) Pola difraksi XRD dari keramik $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ dengan suhu *sintering* 800°C dalam waktu 8 jam [9].



Gambar 3. (b) Pola XRD mikrosfer kluster $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ [24]

Penelitian yang dilakukan oleh F. Sharmin dan M.A. Basith yang menggunakan metode hidrotermal dengan doping 10% Gd pada posisi Bi dan 10% Cr pada posisi Fe, menunjukkan adanya pengaruh suhu reaksi terhadap struktur fase dari *bismuth ferrite*. Pada suhu reaksi 120-160°C puncak difraksi yang muncul sesuai dengan struktur fase $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ dengan sedikit impuritas yaitu $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ dan $\text{Gd}(\text{OH})_3$, dimana jelas terlihat pada sintesis dengan suhu rendah. Namun untuk suhu reaksi diatas 160°C struktur kristal hampir rusak [7]. Penelitian lain yang dilakukan oleh M. Zhou *et al.* menyatakan bahwa fase $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ dapat timbul dan stabil pada

suhu hidrotermal 120-180°C, tetapi ketika suhu meningkat menjadi 200°C fase lain dari *bismuth ferrite* terbentuk yaitu BiFeO₃ [38]. Selain itu, Y. Sun *et al.* melaporkan bahwa pada suhu sintesis 100°C fase Bi₂₅FeO₄₀ tanpa impuritas muncul. Ketika suhu dinaikan menjadi 110°C teridentifikasi adanya komposit yang terdiri dari fase Bi₂₅FeO₄₀ dan BiFeO₃. Apabila suhu dinaikan menjadi 120°C, semua puncak yang muncul merupakan fase BiFeO₃ dan tidak ada impuritas yang teramati [35]. Dapat disimpulkan bahwa fase Bi₂₅FeO₄₀ adalah fase pertama yang terbentuk pada suhu yang lebih rendah, kemudian berubah menjadi fase BiFeO₃ saat suhu menjadi lebih tinggi [38].

Perhitungan ukuran kristal pada Bi₂₅FeO₄₀ dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan *Debye-Scherrer* dibawah ini.

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

Dimana D adalah rata-rata ukuran kristalit, k menunjukkan konstanta *Scherrer* (k=0,9), λ adalah panjang gelombang X-ray ($\lambda = 0,15406 \text{ nm}$), β merupakan lebar dari setengah puncak difraksi dan θ menunjukkan sudut *bragg* [39]. Berdasarkan analisis dari beberapa penelitian sebelumnya terdapat beberapa variasi ukuran kristalit dari Bi₂₅FeO₄₀, hal ini dikarenakan ada beberapa faktor yang mempengaruhinya salah satunya metode sintesis yang digunakan. Tabel 1 menunjukkan beberapa ukuran kristalit dari Bi₂₅FeO₄₀ dengan berbagai metode.

Tabel 1. Ukuran kristal Bi₂₅FeO₄₀ dari beberapa metode sintesis

Metode Sintesis	Waktu reaksi	Suhu Reaksi (°C)	Material	Ukuran Kristal/d (nm)	Ref.
Hidrotermal	16 jam	120	Bi(NO ₃) ₃ , Fe(NO ₃) ₃ , KOH	~25	[19]
Hidrotermal dan <i>Combustion</i> (Pembakaran)	6 jam	100	Bi(NO ₃) ₃ .5H ₂ O, Fe(NO ₃) ₃ .9H ₂ O, NaOH (hidrotermal) dan <i>Starch</i> (<i>combustion</i>)	75-159	[22]
Hidrotermal	12 jam	180	Bi(NO ₃) ₃ .5H ₂ O, Fe(NO ₃) ₃ .9H ₂ O, KOH, <i>Citric acid</i> , dan <i>Sodium alginate</i>	25,6	[24]
Semi-wet (<i>Glycine-assisted chemical route</i>)	Tidak disebutkan	70-80	Bi(NO ₃) ₃ .5H ₂ O, Fe(NO ₃) ₃ .9H ₂ O, dan <i>Glycine</i>	13,6	[9]
Kopresipitasi	45 menit	100	Bi ₅ (OH) ₉ (NO ₃) ₄ , FeCl ₃ .6H ₂ O, dan NaOH	35-41,5	[20]

Pada tabel 1 terlihat bahwa ukuran kristal yang berbeda-beda meskipun menggunakan metode sintesis yang sama. Hal itu karena ada perlakuan lain yang diberikan sehingga dapat mempengaruhi ukuran kristal yang diperoleh, misalnya waktu reaksi, suhu reaksi, dan perlakuan lainnya yang mungkin dapat mempengaruhi ukuran kristal dari material. Selain itu, dari pola difraksi x-ray juga dapat menentukan nilai parameter kisi dari suatu material. Nilai

parameter kisi dari *bismuth ferrite* dengan struktur fase $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ dari beberapa metode sintesis dapat dilihat pada tabel 2.

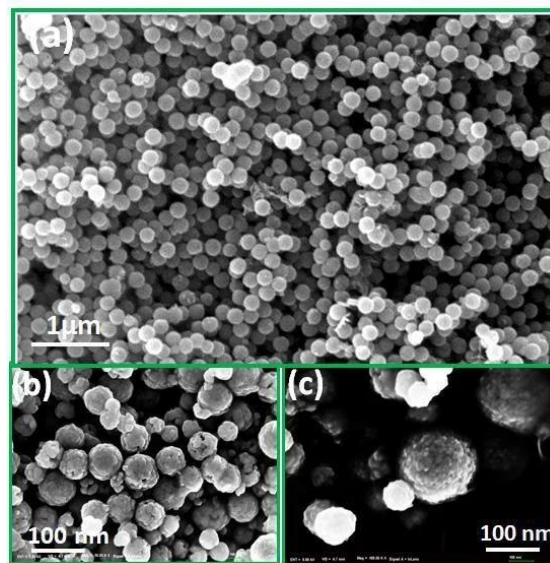
Tabel 2. Nilai parameter kisi dari fase $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$

Metode	Parameter kisi/a (nm)	Ref.
Hidrotermal	1,01990	[22]
Pembakaran (<i>combustion</i>)	1,01859	[22]
<i>Molten-salt growth</i>	1,01849	[31]
<i>Solid-state</i>	1,01835	[40]
kopresipitasi	1,01000	[20]

3.3 Analisis Morfologi

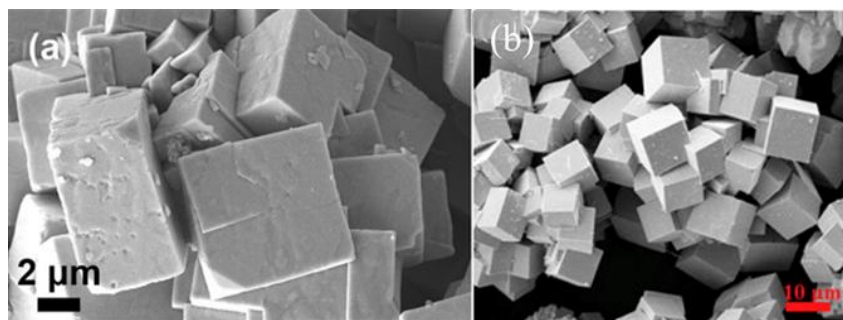
a. Analisis Morfologi dengan Menggunakan FESEM dan SEM

Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti, hasil analisis FESEM maupun SEM dari $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ memiliki morfologi dengan bentuk yang cukup beragam. Mulai dari bentuk bulat, kubik, sampai *polyhedral* [24,31,41]. Sifat permukaan dari $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ berdasarkan hasil karakterisasi SEM dan FESEM dari penelitian yang dilakukan X. S. Nguyen yang menggunakan metode sintesis hidrotemal dapat dilihat pada gambar 4. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa material terdiri dari kumpulan sejumlah besar partikel berbentuk bulat yang terdispersi dengan baik. Partikel-partikel tersebut terlihat memiliki bentuk dan ukuran yang seragam, dimana sebagian besar partikel berbentuk bola dengan ukuran 300-500 nm. Selain itu, citra FESEM dari suatu partikel bulat menunjukkan bahwa partikel $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ ini merupakan kluster nanokristal koloid dengan arsitektur hierarkis, dan tersusun dari banyak kristalit tunggal yang masing-masing memiliki ukuran sekitar 25 nm [24]. Penelitian ini juga diperkuat dengan hasil yang didapatkan oleh Y. Sun *et al.* dimana bentuk morfologi dari $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ adalah mikrosfer dengan diameter $16\mu\text{m}$ [35].



Gambar 4. (a,b) SEM dan (c) FESEM dari mikrosfer kluster $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ [24]

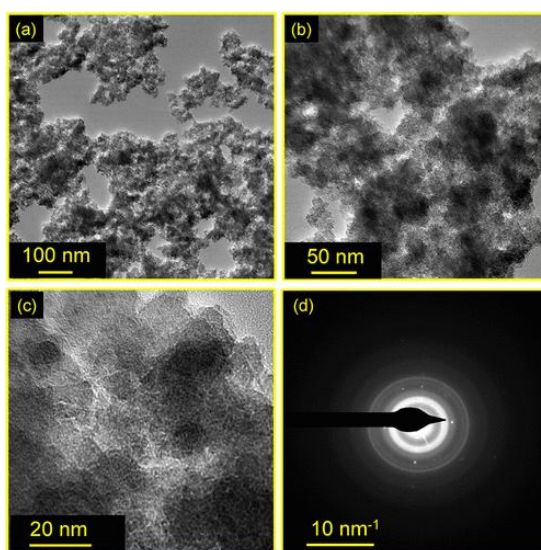
G. Wang *et al.* menunjukkan morfologi berbentuk kubik dari partikel $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ dengan rata-rata ukuran partikel sekitar $10\ \mu\text{m}$ dan permukaannya yang halus dari foto FE-SEM [42]. Hal serupa juga disampaikan oleh Z. Xiong dan L. Cao, citra SEM yang ditampilkan menunjukkan morfologi berbentuk mikrokubus teratur dengan ukuran rata-rata sekitar $8\ \mu\text{m}$ dari sampel $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ murni [41]. Selain itu, partikel $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ dengan bentuk polihedral yang memiliki ukuran tidak merata juga telah dilaporkan oleh L. Ren [31]. Gambar 6 merupakan morfologi berbentuk kubus dari $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$.



Gambar 5. (a) citra FESEM dari $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ [42] (b) citra SEM dari $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ [41]

b. Analisis Morfologi dengan Menggunakan TEM dan HRTEM

Informasi lebih rinci tentang morfologi mikroskopik dan struktur kristal dari senyawa *bismuth ferrite* dapat diperoleh dari analisis citra TEM dan HRTEM. Sampel *bismuth ferrite* yang disintesis menggunakan metode hidrotermal dengan suhu reaksi 160°C menunjukkan struktur *micron-scale plate* yang terdiri dari puluhan partikel berukuran nanometer. Selain itu gambar pola *selected area electron diffraction* (SAED) menunjukkan sifat polikristalin dari nanopartikel *bismuth ferrite*. Dari citra TEM yang diperoleh juga dipastikan bahwa sampel tersebut terdiri atas nanopartikel [7]. Citra TEM dan Pola SAED dari penelitian tersebut dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6. (a-c) Citra TEM dari pembesaran rendah hingga tinggi dan (d) pola SAED dari sampel *bismuth ferrite* yang disintesis dengan suhu reaksi 160°C [7].

Penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh penulis, citra TEM dari nanopartikel *bismuth ferrite* menunjukkan bahwa morfologi dari nanopartikel tersebut teraglomerasi dengan bentuk yang hampir bulat dan pola SAED dari sampel yang diteliti menunjukkan bahwa struktur kristal *bismuth ferrite* adalah polikristalin [20].

Y. Sun *et al.* menampilkan citra TEM dari sampel *bismuth ferrite* jenis BiFeO_3 dan $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ yang disintesis dengan metode hidrotermal. Citra TEM sampel *bismuth ferrite* dengan suhu reaksi 100°C yang diidentifikasi merupakan fase $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ dari hasil XRD menunjukkan bahwa sampel tersebut terdiri dari *nanoflakes* dengan ukuran 20 nm. Dalam penelitian ini dijelaskan bahwa proses pembentukan *bismuth ferrite* dalam sistem hidrotermal dibagi ke dalam dua tahap. Tahap pertama $\text{Bi}(\text{OH})_3$ dan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ yang larut pada suhu yang rendah dan tekanan tinggi dipengaruhi oleh Kalium hidroksida (KOH). Tahap kedua, serbuk yang tidak larut dari *bismuth ferrite* kemudian mengendap dari kondisi fluida hidrotermal yang jenuh berlebih. Pada tahap ini, sebagian besar kristalit *bismuth ferrite* bernukleasi lalu tumbuh menjadi partikel kristal benih kecil dalam larutan jenuh berlebih. Seiring dengan berjalannya reaksi, partikel kristal benih kecil tadi dapat tumbuh menjadi partikel akhir dari *bismuth ferrite*. Menurut penelitian ini, Suhu reaksi sebesar 100°C masih terlalu rendah yang mengakibatkan nukleasi kristal $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ selama proses reaksi tidak dapat tumbuh sepenuhnya, jadi hanya dapat diperoleh morfologi *nanoflakes* dengan ukuran 20 nm [35].

4. Kesimpulan

Bismuth ferrite telah banyak diteliti dengan berbagai metode sintesis, diantaranya dengan metode hidrotermal, sol-gel, kopresipitasi, *microwave assisted hidrotermal*, *combustion*, dan lain-lain. Metode sintesis yang beragam ini dimaksudkan untuk mengontrol ukuran, bentuk dan morfologi dengan sifat yang diinginkan. Beberapa metode tersebut telah berhasil mendapatkan material *bismuth ferrite* dengan beberapa struktur fase, yaitu BiFeO_3 , $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$, dan $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$. $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ merupakan *bismuth ferrite* jenis *sillenite* yang memiliki struktur *body-center cubic* dan termasuk dalam kelompok grup ruang I23. Beberapa penelitian telah berhasil mendapatkan fase $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ murni tanpa adanya impuritas. Rata-rata ukuran kristalit dari fase $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ beragam yaitu berkisar skala puluhan hingga ratusan nanometer. Selain itu, morfologi dari $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ juga beragam mulai dari bentuk bulat, kubik, sampai *polyhedral*. Morfologi dari *bismuth ferrite* juga terlihat teraglomerasi di beberapa penelitian. Pola SAED menunjukkan $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ memiliki struktur kristal polikristalin. Struktur kristal, ukuran partikel, dan morfologi yang dihasilkan oleh *bismuth ferrite* ini dapat dipengaruhi oleh metode sintesis dan parameter pemrosesan yang digunakan. Penelitian ini hanya fokus kepada struktur kristal dan morfologi dari *bismuth ferrite* tipe *sillenite* $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$, sehingga untuk menghasilkan informasi yang lebih rinci diharapkan adanya perkembangan cakupan kajian yang lebih luas lagi terhadap sifat-sifat lain dari $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$.

seperti sifat magnetik, elektrik dan optiknya, sehingga dapat dijadikan acuan bagi peneliti lain untuk mengembangkan material $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ kedalam berbagai aplikasi.

Kontribusi Penulis

E. Juwita: Menyusun draf awal, merancang konsep, investigasi, mengumpulkan data, merancang metodologi, memvisualiasi, meninjau dan menyunting naskah. **R. Cuana dan W. Andaresta:** Memvalidasi, meninjau dan menyunting naskah.

Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan bahwa tidak ada konflik kepentingan, baik secara finansial, akademik, maupun pribadi, yang dapat memengaruhi hasil penelitian dan penulisan artikel ini.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang terlibat baik secara langsung maupun tidak langsung dalam penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] M. Arifani *et al.*, "Sintesis Multiferroik BiFeO_3 Berbasis Pasir Besi dengan Metode Sol Gel," *J. Sains dan Seni ITS*, vol. 1, no. 1, pp. 1–4, 2012.
- [2] R. Safi and H. Shokrollahi, "Physics, Chemistry and Synthesis Methods of Nanostructured Bismuth ferrite (BiFeO_3) as a Ferroelectro-Magnetic Material," *Prog. Solid State Chem.*, vol. 40, pp. 6–15, 2012, doi: 10.1016/j.progsolidstchem.2012.03.001.
- [3] F. A. Sulistiani, "Kajian Struktur Kristal dan Sifat Magnetik Nanopartikel Multiferroic Bismuth Ferrite," Tesis, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia, 2020.
- [4] D. Misiurev *et al.*, "Brief Theoretical Overview of Bi-Fe-O Based Thin Films," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 24, 2022, doi: 10.3390/ma15248719.
- [5] J. Wu *et al.*, "Multiferroic Bismuth Ferrite-based Materials for Multifunctional Applications: Ceramic Bulks, Thin Films and Nanostructures," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 84, pp. 335–402, 2016, doi: 10.1016/j.pmatsci.2016.09.001.
- [6] X. Chen *et al.*, "Ferrite Bismuth-based Nanomaterials: from Ferroelectric and Piezoelectric Properties to Nanomedicine Applications," *Colloids Surfaces B Biointerfaces*, vol. 233, 2024, doi: 10.1016/j.colsurfb.2023.113642.
- [7] F. Sharmin and M. A. Basith, "Simple Low Temperature Technique to Synthesize Sillenite Bismuth Ferrite with Promising Photocatalytic Performance," *ACS Omega*, vol. 7, no. 39, 2022, pp. 34901–34911, doi: 10.1021/acsomega.2c03457.
- [8] H. Wu *et al.*, "Fabrication , Characterization , Properties , and Applications of Low-Dimensional BiFeO_3 Nanostructures," *J. Nanomater.*, vol. 2014, doi: 10.1155/2014/471485.
- [9] M. K. Verma *et al.*, " $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ Polycrystalline Ceramic as Highly Efficient Photocatalyst Synthesised via Economical Chemical Route," *Mater. Technol.*, vol. 35, no. 8, pp. 483–493, 2020, doi: 10.1080/10667857.2019.1701239.
- [10] F. E. N. Ramirez *et al.*, "Humidity Sensing Effect in $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$ Sillenite-like Compound," *J Mater. Sci*, vol. 51, pp. 10982–10989, 2016, doi: 10.1007/s10853-016-0310-0.
- [11] M. M. Rashad, "Effect of Synthesis Conditions on The Preparation of BiFeO_3 Nanopowders using Two Different Methods," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 23, no. 4,

- pp. 882–888, 2012, doi: 10.1007/s10854-011-0513-8.
- [12] M. Dziubaniuk *et al.*, “Aplication of Bismuth Ferrite Protonic Conductor for Ammonia Gas Detection,” *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 188, pp. 957–964, 2013, doi: 10.1016/j.snb.2013.08.020.
 - [13] S. Mittal *et al.*, “A Review on Recent Progressions of Bismuth Ferrite Modified Morphologies as an Effective Photocatalyst to Curb Water and Air Pollution,” *Inorg. Chem. Commun.*, vol. 144, 2022, doi: 10.1016/j.inoche.2022.109834.
 - [14] A. J. C. Buurma *et al.*, *Multiferroic Materials : Physics and Properties*. Elsevier Ltd., 2016. doi: 10.1016/B978-0-12-803581-8.09245-6.
 - [15] S. Godara *et al.*, “Combined Structural , Electrical , Magnetic and Optical Characterization of Bismuth Ferrite Nanoparticles Synthesized by Auto-Combustion Route,” *J. Asian Ceram. Soc.*, vol. 2, no. 4, pp. 416–421, 2014, doi: 10.1016/j.jascer.2014.09.001.
 - [16] H. M. Hashem and M. H. Hamed, “Preparation Parameters Optimization and Structure Investigation of Multiferroic Bismuth Ferrite,” *Mater. Chem. Phys.*, vol. 211, pp. 445–451, 2018, doi: 10.1016/j.matchemphys.2018.03.012.
 - [17] M. Pooladi *et al.*, “A review of the Structure, Magnetic and Electrical Properties of Bismuth Ferrite ($\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$),” *Ceram. Int.*, vol. 46, no. 11, pp. 18453–18463, 2020, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.04.241.
 - [18] O. Baaloudj *et al.*, “Bismuth Sillenite Crystals as Recent Photocatalysts for Water Treatment and Energy Generation: A Critical Review,” *Catalysts*, vol. 12, 2022, doi: 10.3390/catal12050500.
 - [19] P. Kumari and N. Khare, “Structural, Optical and Magnetic Properties of $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ Nanoparticles Synthesized by Hydrothermal Method,” *Springer Proc. Phys.*, vol. 178, pp. 139–143, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-29096-6_18.
 - [20] E. Juwita *et al.*, “Microstructural, Optical and Magnetic Properties and Specific Absorption Rate of Bismuth Ferrite/ SiO_2 Nanoparticles,” *Mater. Res. Express*, vol. 9, no. 7, 2022, doi: 10.1088/2053-1591/ac804e.
 - [21] S. Kalikeri and V. S. Kodialbail, “Solar Light-Driven Photocatalysis Using Mixed-phase Bismuth Ferrite ($\text{BiFeO}_3/\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$) Nanoparticles for Remediation of Dye Contaminated Water: Kinetics and Comparison with Artificial UV and Visible Light-mediated Photocatalysis,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, pp. 13881–13893, 2018, doi: 10.1007/s11356-018-1291-0.
 - [22] R. Köferstein *et al.*, “Investigations on $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ Powders Synthesized by Hydrothermal and Combustion-like Processes,” *J. Solid State Chem.*, vol. 217, pp. 50–56, 2014, doi: 10.1016/j.jssc.2014.05.006.
 - [23] A. R. Goldman *et al.*, “Exploring Reaction Pathways in the Hydrothermal Growth of Phase-pure Bismuth Ferrites,” *J. Cryst. Growth*, vol. 468, pp. 104–109, 2017, doi: 10.1016/j.jcrysgr.2016.09.054.
 - [24] X. S. Nguyen, “Crystalline $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ Cluster Microspheres as Efficient Photo-Fenton Catalysts for Rhodamine B Degradation,” *Int. J. Adv. Eng. Res. Sci.*, vol. 9, no. 12, pp. 325–330, 2022, doi: 10.22161/ijaers.912.35.
 - [25] W. Cao *et al.*, “Rapid Synthesis of Single-phase Bismuth Ferrite by Microwave-assisted Hydrothermal Method,” *Mater. Chem. Phys.*, vol. 175, pp. 1–5, 2016, doi: 10.1016/j.matchemphys.2016.02.067.
 - [26] K. Chybczynska *et al.*, “PEG-controlled Thickness of BiFeO_3 Crystallites in Microwave Hydrothermal Synthesis,” *Mater. Res. Bull.*, vol. 86, pp. 178–185, 2017, doi: 10.1016/j.materresbull.2016.10.024.

- [27] F. A. Sulistiani *et al.*, "Effects of NaOH Concentration and Temperature on Microstructures and Magnetic Properties of Bismuth Ferrite (BiFeO_3) Nanoparticles Synthesized by Coprecipitation Method," *Key Eng. Mater.*, vol. 855 KEM, pp. 9–15, 2020, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.855.9.
- [28] H. Wu *et al.*, "Microstructural, Optical and Magnetic Characterizations of BiFeO_3 Multiferroic Nanoparticles Synthesized via a Sol-Gel Process," *J. Alloys Compd.*, vol. 731, pp. 471–477, 2018, doi: 10.1016/j.jallcom.2017.10.087.
- [29] Arti *et al.*, "Improved Ferroelectric, Magnetic and Photovoltaic Properties of Pr Doped Multiferroic Bismuth Ferrites for Photovoltaic Application," *Results Phys.*, vol. 14, 2019, doi: 10.1016/j.rinp.2019.102403.
- [30] J. Penalva and A. Lazo, "Synthesis of Bismuth Ferrite BiFeO_3 by Solution Combustion method," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1143, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1143/1/012025
- [31] L. Ren *et al.*, "Enhanced Degradation of Organic Pollutants using $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ Microcrystals as a Efficient Reusable Heterogeneous Photo-Fenton like Catalyst," *Catal. Today*, pp. 1–6, 2016, doi: 10.1016/j.cattod.2016.06.028.
- [32] T. Gao *et al.*, "A review: Preparation of Bismuth Ferrite Nanoparticles and its Applications in Visible-Light Induced Photocatalyses," *Rev. Adv. Mater. Sci.*, vol. 40, no. 2, pp. 97–109, 2015.
- [33] Q. Zhang *et al.*, "Chemical Route Derived Bismuth Ferrite Thin Films and Nanomaterials," *J. Mater. Chem. C*, vol. 4, no. 19, pp. 4092–4124, 2016, doi: 10.1039/c6tc00243a.
- [34] N. Zhu *et al.*, "Surface Modification of Magnetic Iron Oxide Nanoparticles," *Nanomaterials*, vol. 8, pp. 1–27, 2018, doi: 10.3390/nano8100810.
- [35] Y. Sun *et al.*, "Study on Visible Light Response and Magnetism of Bismuth Ferrites Synthesized by a Low Temperature Hydrothermal Method," *Ceram. Int.*, vol. 39, no. 4, pp. 4651–4656, 2013, doi: 10.1016/j.ceramint.2012.10.212.
- [36] H. Jebari *et al.*, "Theoretical Investigation of Electronic, Magnetic and Magnetocaloric Properties of $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ Compound," *Phase Transitions*, vol. 94, no. 3–4, pp. 147–158, 2021, doi: 10.1080/01411594.2021.1931690.
- [37] S. S. Flores Morales *et al.*, "Synthesis of $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$ by Molten Salts Method and its Mössbauer Spectrum," *Phys. B Condens. Matter*, vol. 504, pp. 109–111, 2017, doi: 10.1016/j.physb.2016.10.019.
- [38] M. Zhou *et al.*, "Hydrothermal Synthesis of Bismuth Ferrite Fenton-like Catalysts and their Properties," *J. Nanoparticle Res.*, vol. 18, no. 11, 2016, doi: 10.1007/s11051-016-3665-x.
- [39] Y. Wang *et al.*, "Novel Nanoparticle-Assembled Tetraikadekahedron $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ as Efficient Photo-Fenton Catalysts for Rhodamine B Degradation," *Adv. Powder Technol.*, vol. 33, no. 5, pp. 103579, 2022, doi: 10.1016/j.apt.2022.103579.
- [40] A. L. Zinnatullin *et al.*, "Magnetic Dipolar Correlations in Sillenite-Structure Bismuth Ferrite: Magnetic and Mössbauer Effect Studies," *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 164, 2022, doi: 10.1016/j.jpcs.2022.110632.
- [41] Z. Xiong and L. Cao, "Tailoring Morphology, Enhancing Magnetization and Photocatalytic Activity via Cr Doping in $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$," *J. Alloys Compd.*, vol. 773, pp. 828–837, 2019, doi: 10.1016/j.jallcom.2018.09.344.
- [42] G. Wang *et al.*, "Enhanced Visible-light Responsive Photocatalytic Activity of $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}/\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ Composites and Mechanism Investigation," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 30, no. 11, pp. 10923–10933, 2019, doi: 10.1007/s10854-019-01436-4.