

Karakterisasi Fe_2O_3 Hasil Sintesis Hijau Menggunakan Ekstrak Buah Dengan (*Dillenia serrata*)

Characterization of Fe_2O_3 from Green Synthesis Using Dengen Fruit Extract (*Dillenia serrata*)

Nurmalasari¹, Nurhalima², Suaedi³, Suriyanto Bakri⁴, Syukrika Putri⁵, Yusri Prayitna⁶

^{1,4,5} Program Studi Teknik Metalurgi, Institut Teknologi Bacharuddin Jusuf Habibie

^{2,3} Program Studi Kimia, Universitas Cokroaminoto Palopo

Info Artikel

Diajukan: 15 Juli 2024

Diterima: 20 Agustus 2024

Diterbitkan: 30 September 2024

Keywords:

Fe_2O_3 ;

Nanopartikel;

Dillenia Serrata;

XRF

Kata Kunci:

Fe_2O_3 ;

Nanopartikel;

Dillenia Serrata;

XRF



Lisensi: cc-by-sa

ABSTRACT

Fe_2O_3 has many functions, including as a pigment and as a semi-conductor material. The use of this material depends on its characteristics. In this study, the characterization of Fe_2O_3 nanoparticles produced from green synthesis was carried out. Dengen fruit extract was used as a chelating agent with iron sand raw material from the Pajallesang River, Palopo City. The synthesis was carried out using the sol-gel method at pH 4.7. The gel sample was calcined at temperatures of 600°C, 700°C, and 800°C, after which it was characterized using XRD and XRF. The average crystallite size of Fe_2O_3 particles in iron sand and after being synthesized at temperatures of 600°C, 700°C, and 800°C were respectively 40.09 nm, 36.67 nm, 31.46 nm, and 69.04 nm. The increase in calcination temperature affects the Fe_2O_3 content, where the higher the temperature used, the lower the Fe_2O_3 content obtained. The Fe_2O_3 content in iron sand and after synthesis at temperatures of 600°C, 700°C, and 800°C were respectively 70.4%, 91.04%, 90.01%, and 88.82%.

ABSTRAK

Fe_2O_3 memiliki banyak fungsi diantaranya dapat digunakan sebagai pigmen hingga menjadi bahan semi konduktor. Pemanfaatan material ini bergantung pada karakternya. Pada penelitian ini dilakukan karakterisasi terhadap nanopartikel Fe_2O_3 yang dihasilkan dari sintesis hijau. Ekstrak buah dengeng dijadikan agen pengkelat dengan raw material pasir besi dari sungai pajallesang kota palopo. Sintesis dilakukan menggunakan metode sol gel pada pH 4,7. Sampel gel dikalsinasi pada suhu 600 °C, 700 °C dan 800 °C setelah itu dikarakterisasi menggunakan XRD dan XRF. Rerata ukuran kristalit partikel Fe_2O_3 pada pasir besi dan setelah di sintesis pada suhu 600°C, 700°C dan 800°C secara berurut adalah 40,09 nm; 36,67 nm; 31,46 nm; dan 69,04 nm. Kenaikan suhu kalsinasi mempengaruhi kadar Fe_2O_3 di mana semakin tinggi suhu yang digunakan semakin rendah kadar Fe_2O_3 yang didapatkan. Kadar Fe_2O_3 pada pasir besi dan setelah sintesis pada suhu 600°C, 700°C dan 800°C secara berturut-turut (70,4%), (91,04%), (90,01%), dan (88,82%).

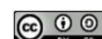
Corresponding Author:

Nurmalasari

Institut Teknologi Bacharuddin Jusuf Habibie; nur87.mipa@gmail.com

PENDAHULUAN

Nanoteknologi dapat didefinisikan sebagai proses perancangan dan pembuatan material, perangkat, serta sistem dengan kendali pada skala nanometer. Pengendalian struktur dalam dua atau tiga dimensi pada tingkat molekuler menjadi aspek utama dalam bidang nanoteknologi dan ilmu material. Penerapan nanoteknologi mencakup berbagai disiplin ilmu yang saling beririsan, seperti kimia, fisika, farmasi, dan biologi, khususnya dalam pengembangan biomedis. Material berbasis nanopartikel



sering kali memiliki karakteristik listrik, optik, magnetik, dan kimia yang unik, yang tidak ditemukan pada material dalam bentuk bulk. Secara khusus, senyawa besi oksida dan ferrite memiliki sifat yang menarik karena signifikansinya dalam berbagai aplikasi teknologi, termasuk industri informasi, agen kontras dalam pencitraan MRI, serta ferrofluida (Ahmad et al., 2023; L. Li et al., 2013).

Pasir besi dalam ukuran nanometer memiliki potensi aplikasi yang luas. Pemanfaatan pasir besi dengan ukuran partikel nano menjadi alternatif penting untuk memenuhi permintaan bahan baku industri, khususnya di sektor elektronik yang terus berkembang dan semakin meningkat kebutuhannya. Nano Fe_2O_3 memiliki berbagai kegunaan di bidang lingkungan dan industri, termasuk dalam produksi keramik, katalis, penyimpanan energi, penyimpanan data magnetik, ferrofluida, serta aplikasi dalam diagnosis medis. Penggunaan pasir besi dalam berbagai bidang ini tidak terlepas dari kemajuan penelitian nanomaterial yang menuntut material berada dalam skala nanometer (Khalil et al., 2024; Zhang et al., 2017).

Sintesis nanopartikel Fe_2O_3 dapat diperoleh dari berbagai metode. Sintesis Fe_2O_3 dapat dilakukan menggunakan Presipitasi kimia (Fouad et al., 2019; Sajjad et al., 2023). Metode paduan presipitasi dan sol-gel sering dipilih karena memiliki sifat optik, elektrik dan magnetik yang dapat diaplikasikan sebagai katalis, sensor dan pemurnian air (Tahir et al., 2023). Selain metode yang telah disebutkan, solvothermal merupakan metode yang baik digunakan karena dapat mengurangi aglomerasi dari partikel dan menghasilkan Fe_2O_3 dengan sifat superparamagnetik (Sahadevan et al., 2022). Metode yang lebih hijau menggunakan agen pengkelat dari ekstrak tanaman seperti Lenglgeng (*Leucas aspera*), Jarak Bali (*Jatropha podagrica*), Kapang hitam (*Aspergillus niger*) (Haseena et al., 2022; Naz et al., 2019; Saied et al., 2022).

Agen pengkelat yang sering digunakan dalam sintesis Fe_2O_3 adalah asam sitrat dan EDTA (J. Li et al., 2017; Utari et al., 2023). Senyawa pengkelat efektif terhadap pengikatan Fe. Penggunaan bahan kimia sebagai agen pengkelat dapat diminimalisir menggunakan asam sitrat yang terkandung pada tanaman. Asam sitrat dapat diperoleh dari buah dengan (*dillenia serrata*), sehingga pada penelitian ini sintesis nanopartikel Fe_2O_3 yang dibuat lebih ramah lingkungan. Dengan adalah salah satu buah lokal yang berasal dari Sulawesi Selatan dan banyak ditemukan di Kabupaten Luwu. Buah ini memiliki ciri khas utama berupa rasa asam yang segar serta warna yang menarik. Secara kimiawi, ketika buah dengan (*Dillenia serrata*) dihancurkan dan dicampur dengan air, asam yang terkandung di dalamnya akan mengalami ionisasi, menghasilkan ion hidrogen serta ion sisa asam yang bermuatan negatif.

Kota Palopo memiliki potensi dalam sektor pertambangan dan penggalian, meliputi sumber daya seperti pasir kerikil atau pasir timbunan, tanah urug atau sirtu, serta batu gunung, batu pecah, dan batu kali. Secara umum, lapisan tanah dan jenis batuan di Kota Palopo terdiri dari tiga jenis utama, yaitu batuan beku, batuan metamorf, dan batuan vulkanik, dengan endapan aluvial yang mendominasi sebagian besar wilayah kota. Endapan alluvial terbagi menjadi endapan alluvial timah, emas, intan, pasir besi, magnetit dan lain-lain. Salah satu sumber penghasil pasir besi yang terdapat di kota Palopo yaitu sungai Pajalesang. Berbagai upaya yang dapat dilakukan untuk memanfaatkan pasir besi, salah satunya dengan mensintesis Fe_2O_3 dari pasir besi Sungai Pajalesang dengan metode sol gel.

Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan karakterisasi Fe_2O_3 yang dihasilkan menggunakan ekstrak buah dengan (*dillenia serrata*) sebagai agen pegkelat dengan variasi suhu kalsinasi yaitu 600°C, 700°C dan 800°C.

METODE

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah gelas kimia, pipet tetes, pipet ukur, cawan porselin, timbangan digital, corong kecil, termometer, kertas saring, magnet permanent, mortal dan alu, oven, hot plate, batang pengaduk, spatula, *bulb* pipet, gelas ukur, tanur dan untuk karakterisasi digunakan XRF dan XRD. Bahan dasar yang digunakan adalah pasir besi sungai Pajalesang. Pasir yang telah di ambil dari sungai di screening menggunakan magnet permanent berkali-kali hingga di peroleh pasir besi berwarna hitam pekat.

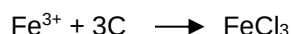
Sebanyak 30 g pasir besi yang kaya akan Fe_2O_3 dilarutkan dengan menggunakan larutan HCl 37% dengan perbandingan pasir besi dan HCl 1:2 panaskan pada suhu 90°C selama 30 menit sambil diaduk, kemudian disaring dengan menggunakan kertas saring untuk memisahkan filtrat dan residunya. Filtrat yang dihasilkan kemudian dicampurkan dengan ekstrak buah Dengan (*Dillenia Serrata Thumb.*)

diaduk hingga homogen kemudian panaskan hingga membentuk gel. Gel yang terbentuk kemudian dikalsinasi pada suhu 600°C, 700°C dan 800°C selama 5 jam hingga membentuk padatan. Padatan yang terbentuk digerus hingga halus kemudian dikarakterisasi menggunakan XRD dan XRF.

HASIL DAN PEMBAHASAN

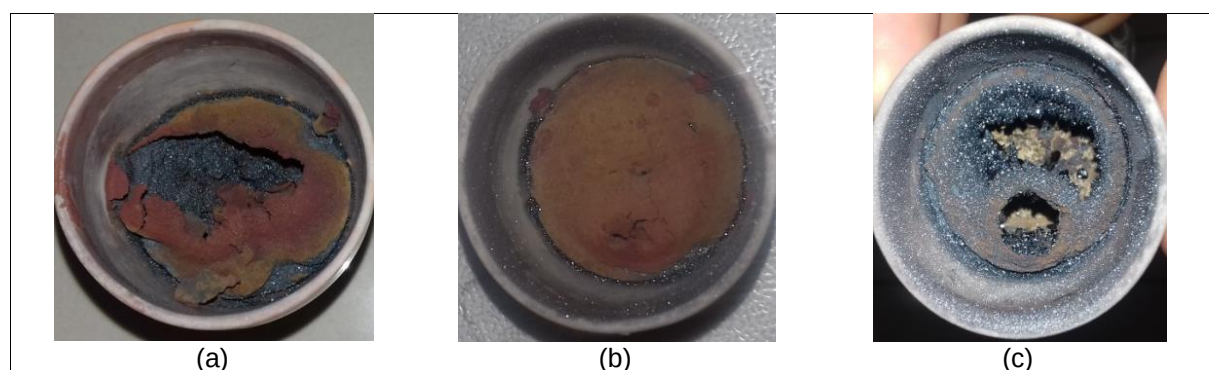
Nanopartikel Fe_2O_3 telah berhasil disintesis dari pasir besi Sungai Pajalesang menggunakan metode sol-gel dengan memanfaatkan ekstrak buah dengan (*Dillenia serrata*) sebagai agen pengkelat. Proses sintesis dilakukan dengan variasi suhu kalsinasi pada 600°C, 700°C, dan 800°C selama 5 jam. Penambahan ekstrak buah dengan berperan dalam mengikat logam divalen atau lebih, seperti Mn, Mg, dan Fe, yang berperan sebagai katalis dalam reaksi oksidasi, sehingga keberadaan asam sitrat dalam ekstrak ini dapat membantu menghambat reaksi tersebut. Kandungan asam sitrat yang tinggi dalam buah dengan menjadikannya efektif sebagai agen pengkelat. Beberapa senyawa lain yang juga dapat berfungsi sebagai agen pengkelat meliputi asam sitrat, asam tartrat, EDTA, dan asam oksalat (Dwyer, 2012).

Proses sintesis menggunakan metode sol-gel dimulai dengan melarutkan pasir besi dalam larutan HCl 37% hingga menghasilkan larutan FeCl_3 . HCl pekat digunakan melarutkan banyak jenis logam dan menghasilkan logam klorida dan gas hidrogen sesuai dengan reaksi berikut,



HCl juga bereaksi dengan senyawa dasar semacam kalsium karbonat dan tembaga (II) oksida, menghasilkan klorida terlarut yang dapat dianalisa. Larutan FeCl_3 kemudian disaring untuk memisahkan filtrat dan residu, filtrat yang dihasilkan dicampurkan dengan ekstrak buah dengan (*dillenia serrata*) pH 4,3.

Proses pencampuran dilakukan dengan pengadukan hingga terbentuk sol. Selanjutnya, campuran dipanaskan pada suhu 120°C untuk memicu proses kondensasi yang mengubah sol menjadi gel. Gel yang dihasilkan berwarna hitam dan kemudian dikalsinasi pada suhu 600°C, 700°C, dan 800°C selama 5 jam hingga terbentuk serbuk Fe_2O_3 . Kalsinasi bertujuan untuk mengeringkan gel agar menjadi padatan serta menguapkan zat-zat yang tidak diinginkan. Pada tahap ini, kompleks kation Fe^{3+} dengan asam sitrat dalam gel mengalami dekomposisi, menyisakan Fe_2O_3 . Begitu pula, asam-asam lain yang terdapat dalam ekstrak buah dengan akan terurai akibat proses pemanasan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Serbuk Fe_2O_3 setelah dikalsinasi pada suhu (a) 600°C (b) 700°C dan (c) 800°C

Berdasarkan penelitian yang dilakukan dengan variasi suhu kalsinasi 600°C, 700°C dan 800°C diperoleh hasil sebagai berikut:

1. Kandungan Oksida Logam

Setelah dilakukan uji XRF pada sampel pasir besi yang telah disintesis dengan variasi suhu kalsinasi, maka diperoleh beberapa oksida logam dengan kadar sesuai yang disajikan pada table 1. Pasir besi yang telah di karakterisasi dengan alat uji XRF (*X-Ray Fluorescence*) menunjukkan beberapa senyawa yang terkandung didalamnya, Pada tabel 3 dapat dilihat bahwa senyawa yang mengandung kadar paling tinggi yaitu Fe_2O_3 . Dimana Fe_2O_3 pada pasir besi (70,4%), tetapi setelah dilakukan proses sintesis nanopartikel diperoleh Fe_2O_3 pada suhu 600°C (91,04%), suhu 700°C (90,01%), dan suhu

800°C (88,82%) hal ini menunjukkan bahwa seiring meningkatnya suhu, kadar Fe_2O_3 yang terbentuk semakin menurun. Hal ini disebabkan karena stabilitas termal dari $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (kalsinasi 200°C) dan $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (kalsinasi 300-600°C), oksida ini bersifat feromagnetik (Saragi et al., 2018). Material keramik memiliki fasa stabil pada suhu pembentukannya, namun ketika suhu melebihi batas tertentu, struktur material akan mengalami perubahan menuju keadaan yang lebih tidak teratur. Jika pemanasan terus berlanjut, material akan mencapai titik di mana struktur kristalnya mulai kehilangan kestabilan, bertransisi menjadi cairan, dan dalam kondisi tertentu dapat menguap sepenuhnya saat mencapai suhu penguapan.

SiO_2 , TiO_2 , ZrO_2 dan As_2O_3 hanya terdapat di pasir besi namun setelah dilakukan proses sintesis tidak terdapat SiO_2 , TiO_2 , ZrO_2 dan As_2O_3 pada sampel. Kemudian senyawa lainnya seperti CaO , MnO dan K_2O memiliki kadar tidak lebih dari 2% dan untuk Nb_2O_5 , SnO_2 , In_2O_3 , P_2O_5 , Cr_2O_3 , NiO , CuO , MoO_3 , dan Y_2O_3 memiliki kadar tidak lebih dari 1%. Hal ini disebabkan karena stabilitas termal setiap logam oksida berbeda. Misalnya pada CaO stabil pada suhu 800°C dan 900°C, MnO stabil pada suhu 900°C dan CuO terdekomposisi diatas suhu 800°C.

Tabel 1. Kandungan Oksida Logam

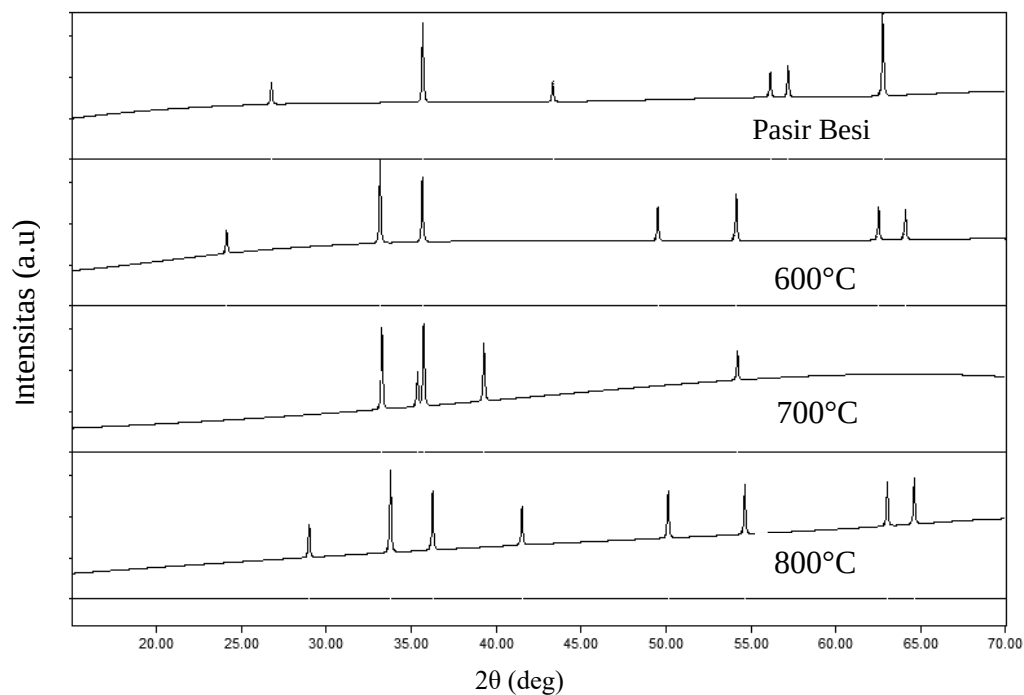
Oksida Logam	Pasir Besi	600°C	700°C	800°C
Fe_2O_3	70.40	91.04	90.01	88.82
SiO_2	19.60	-	-	-
TiO_2	6.94	-	-	-
CaO	1.28	1.18	1.54	2.05
MnO	1.04	1.33	1.38	1.51
K_2O	0.560	1.66	1.76	1.64
ZrO_2	0.0771	-	-	-
ZnO	0.0365	0.0316	-	-
As_2O_3	0.029	-	-	-
Nb_2O_5	0.0228	0.0198	0.0246	0.0185
SnO_2	0.0066	0.0052	0.0069	0.0111
In_2O_3	0.0061	0.0067	-	0.0061
Cl	-	3.20	3.49	3.61
P_2O_5	-	0.774	0.987	1.16
Cr_2O_3	-	0.52	0.57	0.86
NiO	-	0.152	0.170	0.245
CuO	-	0.0255	0.0200	0.0297
MoO_3	-	0.0165	0.0163	0.0120
Ga_2O_3	-	0.0100	-	-
Y_2O_3	-	0.0096	0.0079	0.0118
Sb_2O_3	-	-	-	0.0055
Jumlah	99.9981	99.9809	99.9827	99.9897

2. Distribusi ukuran partikel

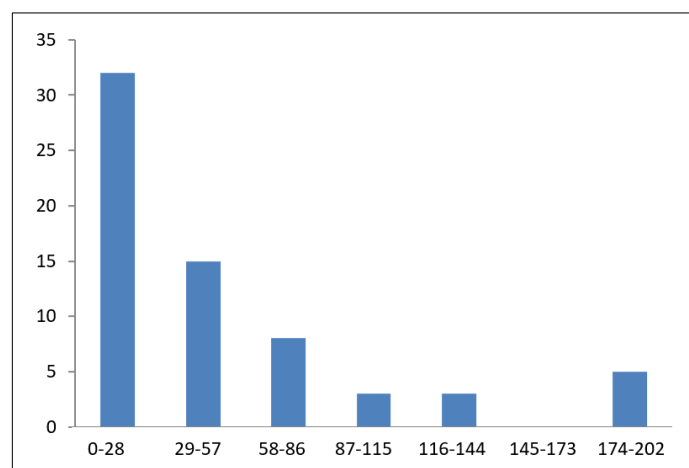
Pasir besi yang telah di screening didapatkan sangat sedikit hal ini dipengaruhi oleh kemurnian bahan, ukuran bulir (grain size) dan orientasi Kristal. Parameter kemagnetan juga dipengaruhi oleh temperatur. Koersivitas dan remenensi akan berkurang apabila temperaturnya mendekati temperature *curie* (T_c) dan akan kehilangan sifat kemagnetannya (Fiorillo, 2004). Setelah dilakukan uji XRD pada sampel pasir besi yang telah disintesis dengan variasi suhu kalsinasi, maka diperoleh difraktogram oksida logam sesuai yang diperlihatkan pada Gambar 2.

Berdasarkan pola difraksi sinar-X yang terlihat pada Gambar 2, analisis kualitatif dilakukan dengan mengidentifikasi fasa kristalin sampel. Proses ini dilakukan dengan mencocokkan posisi puncak difraksi yang terukur dengan database (daftar puncak) yang tersedia. Pencocokan puncak difraksi dengan database tersebut dilakukan menggunakan perangkat lunak Match 2. Difraktogram XRD Fe_2O_3

pada pasir besi terdapat di beberapa puncak pada sudut 2θ yaitu 33.21° ; 35.69° ; dan 57.33° dengan nilai indeks Miller (hkl) dari sudut-sudut tersebut secara berturut-turut adalah (211), (10-1) dan (332). Secara umum semakin besar harga indeks maka semakin kecil jarak antar bidang dan semakin besar sudut yang dihasilkannya. Adapun besar unit cellnya adalah $a=5.4300 \text{ \AA}$ $\alpha=55.280^\circ$, dimana *unit cell* adalah bagian terkecil dari unit struktur yang dapat menjelaskan struktur suatu kristal. Densitas sebesar 5.261 g/cm^3 , artinya besar massa jenis dari kristal kubik sebesar 5.261 g/cm^3 yang diperoleh dari massa atom per sel satuan. Kristal Fe_2O_3 berstruktur rhombohedral, sedangkan rata-rata besaran kisinya adalah $40,09 \text{ nm}$ dengan distribusi partikel paling banyak ditemukan pada ukuran $0-28 \text{ nm}$ seperti pada Gambar 3.



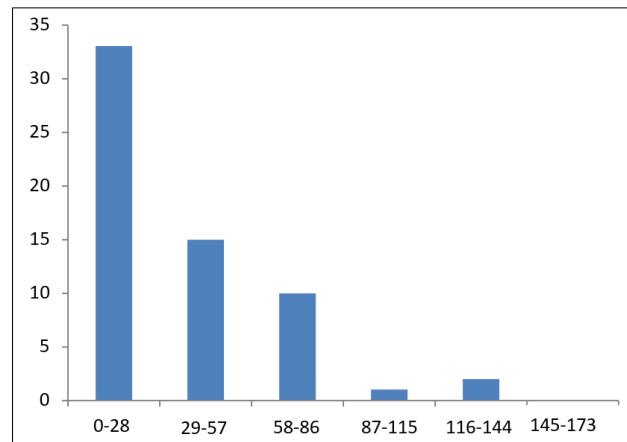
Gambar 2. Difraktogram Oksida Logam



Gambar 3. Diagram distribusi partikel pasir besi

Sampel hasil sintesis dengan suhu kalsinasi 600°C Fe_2O_3 terdapat di beberapa puncak pada sudut 2θ yaitu 24.20° ; 33.24° ; 35.71° ; 40.99° ; 49.58° ; 54.20° ; 62.61° ; dan 64.23° dengan nilai hkl setiap sudut tersebut adalah (110), (211), (10-1), (210), (202), (312), (310) dan (2-1-1). Adapun besar unit

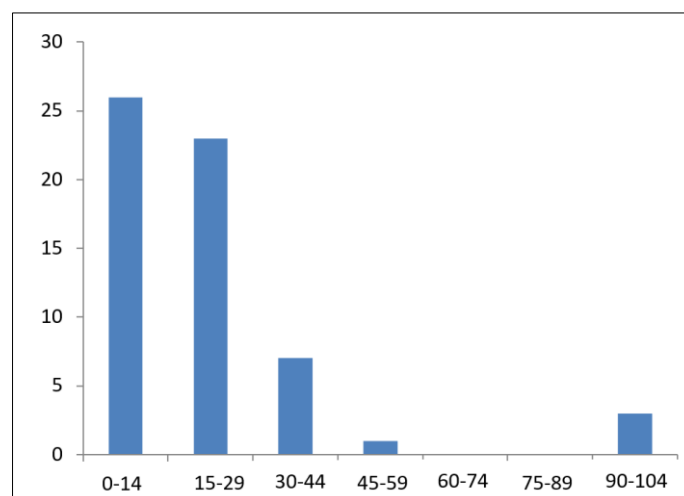
cellnya adalah $a = 5.4200 \text{ \AA}$ $\alpha = 55.280^\circ$ dengan densitas sebesar 5.291 g/cm^3 yang mengindikasikan keberadaan kristal $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ berstruktur rhombohedral dengan rata-rata besaran kisinya adalah 36.67 nm dengan distribusi partikel paling banyak ditemukan pada ukuran $0\text{-}28 \text{ nm}$ seperti pada gambar 4.



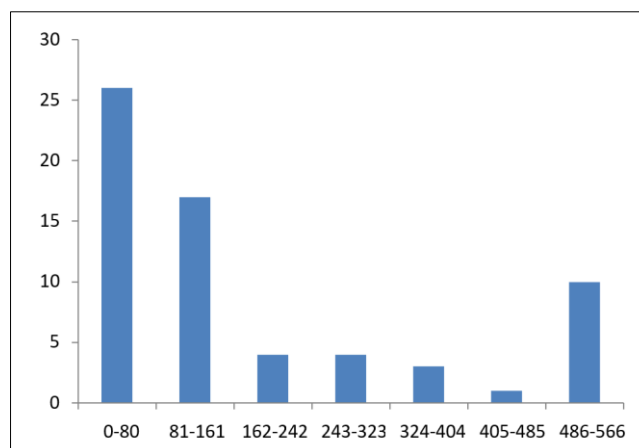
Gambar 4. Diagram distribusi partikel suhu 600°C

Selanjutnya untuk sampel hasil sintesis dengan suhu kalsinasi 700°C Fe_2O_3 terdapat di beberapa puncak pada sudut 2θ yaitu 33.31° ; 35.74° ; 39.30° ; 41.00° ; 49.56° ; 54.18° ; 56.47° ; 57.59° ; 57.72° ; 62.58° ; dan 64.08° dengan nilai indeks Miller (hkl) dari sudut-sudut tersebut secara berturut-turut adalah (211), (10-1), (222), (210), (202), (312), (20-1), (211), (332), (310) dan (2-1-1). Adapun besar unit cellnya adalah $a = 5.4200 \text{ \AA}$ $\alpha = 55.280^\circ$ dengan densitas sebesar 5.291 g/cm^3 yang mengindikasikan keberadaan kristal $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ berstruktur rhombohedral, rata-rata besaran kisinya adalah 31.46 nm dengan distribusi partikel paling banyak ditemukan pada ukuran $0\text{-}14 \text{ nm}$ seperti pada gambar 5.

Sedangkan untuk sampel hasil sintesis dengan suhu kalsinasi 800°C Fe_2O_3 terdapat di beberapa puncak pada sudut 2θ yaitu 33.57° ; 54.45° ; 62.96° ; dan 64.38° dengan nilai hkl masing-masing sudut tersebut adalah (104), (116), (214) dan (300). Adapun besar unit cellnya adalah $a = 5.0079 \text{ \AA}$ $c = 13.6467 \text{ \AA}$ dengan densitas sebesar 5.368 g/cm^3 yang mengindikasikan keberadaan kristal $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ berstruktur trigonal (*hexagonal axes*). Sedangkan rata-rata besaran kisinya adalah 69.04 nm dengan distribusi partikel paling banyak ditemukan pada ukuran $0\text{-}80 \text{ nm}$ seperti pada gambar 6.



Gambar 5. Diagram distribusi partikel 700°C



Gambar 6. Diagram distribusi partikel 800°C

Pada penelitian ini didapatkan nilai densitas yang berbeda seiring meningkatnya suhu. Hal ini disebabkan karena kenaikan suhu kalsinasi akan menaikkan densitas Fe_2O_3 . Dengan kenaikan suhu pemanasan, gel yang dikalsinasi semakin mengalami pemampatan atau perenggangan sehingga porositasnya berkurang (Xu et al., 2021). Suhu juga mempengaruhi ukuran kristal. Pada sampel sebelum kalsinasi, didapatkan rata-rata ukuran 40,09 nm setelah dikalsinasi pada suhu 600°C dan 700°C rata-rata ukuran kristal secara berurut 36,67 nm dan 31,46 nm yang artinya ukuran kristal menurun seiring meningkatnya suhu. Tetapi pada suhu 800°C ukuran kristal kembali bertambah menjadi 69,04 nm. Penelitian ini juga sejalan dengan penelitian yang dilakukan peneliti sebelumnya dimana pada suhu 800°C ukuran kristal meningkat. suhu kalsinasi yang lebih tinggi akan mengakibatkan difusi atom akan menjadi lebih cepat sehingga akan mempercepat kristalinitas dan menghasilkan ukuran kristal yang lebih besar (Husain et al., 2024; Worawong et al., 2014).

Pada penelitian ini, struktur kristal Fe_2O_3 yang terbentuk pada suhu 600°C dan 700°C adalah rhombohedral, yang berarti rasio panjang sumbu $a = b = c$ dengan sudut kristalografi $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ dan $< 120^\circ$. Ini menunjukkan bahwa sudut α dan β saling tegak lurus dan membentuk sudut 120° terhadap sumbu γ . Sementara itu, pada suhu 800°C, struktur kristal yang terbentuk adalah trigonal (sumbu heksagonal), di mana rasio panjang sumbu $a = b \neq c$ dengan sudut kristalografi $\alpha = \beta = 90^\circ$ dan $\gamma = 120^\circ$. Hematit (Fe_2O_3) sering digunakan sebagai bahan dasar dalam pembentukan senyawa magnetik ferrite.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil karakterisasi nanopartikel Fe_2O_3 , maka dapat disimpulkan bahwa rata-rata ukuran kristalit partikel Fe_2O_3 pada pasir besi dan setelah di sintesis pada suhu 600°C, 700°C dan 800°C secara berurut 40,09 nm; 36,67 nm; 31,46 nm; dan 69,04 nm dan kenaikan suhu kalsinasi mempengaruhi kadar Fe_2O_3 dimana semakin tinggi suhu yang digunakan semakin rendah kadar Fe_2O_3 yang didapatkan. Kadar Fe_2O_3 pada pasir besi dan setelah sintesis pada suhu 600°C, 700°C dan 800°C secara berturut-turut (70,4%), (91,04%), (90,01%), dan (88,82%)

REFERENSI

- Ahmad, W., Joshi, H. C., Pandey, S., Kumar, V., & Verma, M. (2023). An overview of green methods for Fe_2O_3 nanoparticle synthesis and their applications. *International Nano Letters*, 13(2), 117–130. <https://doi.org/10.1007/s40089-022-00386-w>
- Dwyer, F. (2012). *Chelating Agents and Metal Chelates*. Elsevier.
- Fiorillo, F. (2004). *Characterization and Measurement of Magnetic Materials*. Academic Press.
- Fouad, D. E., Zhang, C., Mekuria, T. D., Bi, C., Zaidi, A. A., & Shah, A. H. (2019). Effects of sono-assisted modified precipitation on the crystallinity, size, morphology, and catalytic applications of hematite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) nanoparticles: A comparative study. *Ultrasonics Sonochemistry*, 59, 104713. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104713>
- Haseena, S., Jayamani, N., Shanavas, S., Duraimurugan, J., Haija, M. A., Kumar, G. S., Kumar, A. S., Prabhuraj, T., Maadeswaran, P., & Acevedo, R. (2022). Bio-synthesize of photocatalytic Fe_2O_3

- nanoparticles using *Leucas aspera* and *Jatropha podagrica* leaf extract for an effective removal of textile dye pollutants. *Optik*, 249, 168275. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.168275>
- Husain, H., Adi, W. A., Subaer, S., Taryana, Y., Setiawan, A., Putri, S. E., Klyusubun, W., & Wannapaiboon, S. (2024). Effect of calcination temperature on structure evolution of hematite nanoparticles. *Physica Scripta*, 99(6), 065974. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad48cd>
- Khalil, M. M., Gouda, M. M., Abbas, M. I., Abd-Elzaher, M., & El-Khatib, A. M. (2024). Impact of nano Fe₂O₃ on radiation parameters of epoxy reinforced with nano carbon. *Scientific Reports*, 14(1), 21940. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73139-8>
- Li, J., Wu, Y., Yang, M., Yuan, Y., Yin, W., Peng, Q., Li, Y., & He, X. (2017). Electrospun Fe₂O₃ nanotubes and Fe₃O₄ nanofibers by citric acid sol-gel method. *Journal of the American Ceramic Society*, 100(12), 5460–5470. <https://doi.org/10.1111/jace.15164>
- Li, L., Jiang, W., Luo, K., Song, H., Lan, F., Wu, Y., & Gu, Z. (2013). Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles as MRI contrast agents for Non-invasive Stem Cell Labeling and Tracking. *Theranostics*, 3(8), 595–615. <https://doi.org/10.7150/thno.5366>
- Naz, S., Islam, M., Tabassum, S., Fernandes, N. F., Carcache de Blanco, E. J., & Zia, M. (2019). Green synthesis of hematite (α - Fe₂O₃) nanoparticles using *Rhus punjabensis* extract and their biomedical prospect in pathogenic diseases and cancer. *Journal of Molecular Structure*, 1185, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.02.088>
- Sahadevan, J., Sojiya, R., Padmanathan, N., Kulathuraan, K., Shalini, M. G., Sivaprakash, P., & Esakki Muthu, S. (2022). Magnetic property of Fe₂O₃ and Fe₃O₄ nanoparticle prepared by solvothermal process. *Materials Today: Proceedings*, 58, 895–897. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.420>
- Saied, E., Salem, S. S., Al-Askar, A. A., Elkady, F. M., Arishi, A. A., & Hashem, A. H. (2022). Mycosynthesis of Hematite (α - Fe₂O₃) Nanoparticles Using *Aspergillus niger* and Their Antimicrobial and Photocatalytic Activities. *Bioengineering*, 9(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9080397>
- Sajjad, A., Hussain, S., Jaffari, G. H., Hanif, S., Qureshi, M. N., & Zia, M. (2023). Fabrication of Hematite (α - Fe₂O₃) nanoparticles under different spectral lights transforms physio chemical, biological, and nanozymatic properties. *Nano Trends*, 2, 100010. <https://doi.org/10.1016/j.nwnano.2023.100010>
- Saragi, T., Permana, B., Saputri, M., Rahayu, I., & Risdiana. (2018). Karakteristik Optik dan Kristal Nanopartikel Magnetit. *Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika*, 2(1), 53–56. <https://doi.org/10.24198/jiif.v2i1.15438>
- Tahir, M., Fakhar-e-Alam, M., Atif, M., Mustafa, G., & Ali, Z. (2023). Investigation of optical, electrical and magnetic properties of hematite α - Fe₂O₃ nanoparticles via sol-gel and co-precipitation method. *Journal of King Saud University - Science*, 35(5), 102695. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102695>
- Utari, Maulidina, H., Arilasita, R., Widiyandari, H., Suharno, & Purnama, B. (2023). Citric acid concentration tune of structural and magnetic properties in hematite (α - Fe₂O₃) nanoparticles synthesized by sol-gel method. *Materials Research Express*, 10(3), 036101. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/acbf0c>
- Worawong, A., Jutarosaga, T., & Onreabroy, W. (2014). Influence of Calcination Temperature on Synthesis of Magnetite (Fe₃O₄) Nanoparticles by Sol-Gel Method. *Advanced Materials Research*, 979, 208–211. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.979.208>
- Xu, X., Liu, X., Wu, J., Zhang, C., Zhou, S., & Wu, C. (2021). Fabrication and characterization of porous mullite ceramics with ultra-low shrinkage and high porosity via sol-gel and solid state reaction methods. *Ceramics International*, 47(14), 20141–20150. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.020>
- Zhang, Y., Li, H., Gong, L., Dong, G., Shen, L., Wang, Y., & Li, Q. (2017). Nano-sized Fe₂O₃/Fe₃O₄ facilitate anaerobic transformation of hexavalent chromium in soil–water systems. *Journal of Environmental Sciences*, 57, 329–337. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.01.007>