

DOI: <https://doi.org/10.21009/JRSKT.102.05>

Sintesis dan Karakterisasi ZVI dari FeCl_2 dengan Polifenol dari Kulit Pisang Kepok (*Musa paradisiaca normalis*)

Sahid Hidayat^{1,*}, Setia Budi¹, Devy Nur Annisa²

¹Program Studi Kimia FMIPA Universitas Negeri Jakarta, Jalan Pemuda No. 10, Rawamangun 13220, Jakarta, Indonesia

²Program Studi Kimia, FMIPA, Universitas Lampung, Gedong Meneng, Bandar Lampung, Lampung 35141, Indonesia

*Email: sahidhidayat@gmail.com

Informasi Artikel

Diterima: 22/07/2024

Direvisi: 15/08/2024

Online: 15/08/2024

Edisi: 15/08/2024

Abstrak

Besi bervalensi nol (ZVI) telah berhasil disintesis dengan menggunakan reduktor alami polifenol dari ekstrak kulit pisang kepok. Kajian terhadap karakteristik ZVI hasil sintesis berupa ukuran, kristalinitas dan morfologi telah dilakukan dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis, particle size analyzer (PSA), X-ray diffractometer (XRD), scanning electron microscope (SEM), dan fourier transform infra-red (FT-IR). Pengukuran konsentrasi Fe^{2+} yang bereaksi dengan polifenol divariasikan terhadap waktu, yaitu: 0 jam, 3 jam, 24 jam, 48 jam dan 144 jam. Konsentrasi Fe^{2+} yang bereaksi dengan polifenol terbesar terjadi ketika waktu reaksi 3 jam, yaitu 110465,22 ppm. Distribusi ukuran partikel ZVI hasil sintesis diamati dalam waktu reaksi 0,5 jam; 1 jam; 2 jam dan 3 jam. Waktu reaksi 1 jam menghasilkan distribusi ukuran partikel yang paling rendah, yaitu $D_v 10 = 383,93 \text{ nm}$; $D_v 50 = 537,17 \text{ nm}$; dan $D_v 90 = 851,36 \text{ nm}$ dengan polydispersity Index (PDI) sebesar 0,1240. Difraksi sinar-X menunjukkan ZVI hasil sintesis merupakan amorf yang terdiri dari fasa iron dan magnetite dengan presentase masing-masing berturut-turut 17,5 % dan 82,5%.

Kata kunci: aglomerasi, besi bervalensi nol (ZVI), reduksi garam besi

Abstract

Zero valent iron (ZVI) has been synthesized by using a natural reductant polyphenols extract from peel kepok banana. The study on the characteristics ZVI synthesized in the form of size, crystallinity and morphology has been carried out by using UV-Vis spectrophotometer, particle size analyzer (PSA), X-ray diffractometer (XRD), scanning electron microscope (SEM), and fourier transform infra-red (FT-IR). Measurement of the concentration of Fe^{2+} which reacts with polyphenols varied with respect to time, ie: 0 hours, 3 hours, 24 hours, 48 hours and 144

hours. The concentration of Fe^{2+} which reacts with the largest polyphenols occur when reaction time of 3 hours, ie 110,465.22 ppm. ZVI particle size distribution of the results of the synthesis was observed within the reaction time of 0.5 hours; 1 hour; 2 hours and 3 hours. Reaction time of 1 hour to produce a particle size distribution of the lowest, ie $Dv 10 = 383.93$ nm; $Dv 50 = 537.17$ nm; and $Dv 90 = 851.36$ nm with a polydispersity index (PDI) of 0.1240. X-ray diffraction showed that synthesized ZVI is an amorphous phase consisting of iron and magnetite with the percentage of each respectively 17.5% and 82.5%.

Keywords: agglomeration, reduction of iron salt, zero valent iron (ZVI)

Pendahuluan

Menurut BPLHD (Badan Pengelola Lingkungan Hidup Daerah) pada tahun 2012 menyatakan 85% sungai-sungai yang mengalir di Jakarta telah tercemar logam berat. Salah satu cara untuk mengurangi dampak pencemaran tersebut adalah dengan menggunakan *Zero Valent Iron* (besi bervalensi nol) (Ramaswamy et al., 2022) untuk meremediasi air bawah tanah atau air permukaan (Plessl et al., 2022). ZVI biasanya didapat dengan cara mereduksi Fe^{2+} atau Fe^{3+} dengan $NaBH_4$ (natrium borohidrat) sebagai reduktornya (Wang & Aguey-Zinsou, 2019). Ion Fe^{2+} dapat berasal dari senyawa $FeSO_4 \cdot 6H_2O$ atau $FeCl_2 \cdot 4H_2O$, sedangkan Fe^{3+} dapat berasal dari senyawa $FeCl_3 \cdot 7H_2O$. Akan tetapi, penggunaan $NaBH_4$ sebagai reduktor masih memiliki beberapa kekurangan, yaitu $NaBH_4$ merupakan senyawa yang bersifat toksik, korosif, *flammable*, dan berbahaya bagi lingkungan (Kalantari et al., 2022). Belakangan ini beberapa metode untuk menggantikan $NaBH_4$ sebagai agen pereduksi Fe^{3+} atau Fe^{2+} yang berbasis *green chemistry* telah banyak dikembangkan (Wang et al., 2023). Salah satu contoh metode yang telah diterapkan adalah dengan mengganti $NaBH_4$ dengan senyawa polifenol yang lebih ramah lingkungan dan juga mudah didapat (Karavasilis & Tsakiroglou, 2019). Selain itu, polifenol juga dapat menghasilkan ZVI yang lebih stabil dan tidak mudah teroksidasi karena sifat polifenol sebagai antioksidan (Bashmil et al., 2021).

Polifenol bisa didapat dari bagian tumbuhan buah pisang (*Musa paradisiaca*) (Busatto et al., 2019). Tanaman pisang dapat tumbuh dengan baik pada daerah beriklim tropis seperti Indonesia. Pada tahun 2010, produksi pisang di Indonesia mencapai angka 5.755.073 ton (BPS, 2010). Produksi pisang yang tinggi ini akan berbanding lurus dengan jumlah kulit pisang yang ada di Indonesia. Limbah kulit pisang ini dapat dimanfaatkan sebagai sumber polifenol yang dapat dijadikan bahan pengganti $NaBH_4$ untuk mereduksi Fe^{3+} atau Fe^{2+} . Pada saat panen, kulit buah mengandung polifenol dua kali lipat dari daging buah (Benincasa et al., 2022). Pada penelitian ini, polifenol akan diekstraksi dari kulit pisang kepok (*Musa paradisiaca* Normalis) untuk digunakan sebagai reduktor Fe^{2+} yang berasal dari $FeCl_2 \cdot 4H_2O$. Selain itu, pada penelitian ini juga akan dikaji perbandingan volume polifenol dengan larutan $FeCl_2$ untuk menghasilkan ZVI secara optimal.

Metode

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah alat-alat gelas (Pyrex), neraca analitik, hotplate magnetic stirrer, buret, rotary evaporator, vacuum filtration, SEM-EDX, XRD, FTIR. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah kulit pisang kapok, $FeCl_2 \cdot 4H_2O$, kloroform, etil asetat, dan aquades.

Prosedur Penelitian

Ekstraksi Polifenol dari Kulit Pisang Kepok

Kulit pisang dipotong kecil berbentuk kubus dan ditimbang 300 gram. Lalu, kulit pisang dididihkan dalam air dengan massa air 900 gram (perbandingan massa kulit pisang dengan massa air 1:3). Campuran air dan kulit pisang kemudian dipanaskan 90°C selama 5 menit. Setelah itu diblender kemudian dipanaskan kembali pada temperatur 80°C selama 2 jam. Campuran disaring dengan kain saring dan dilanjutkan dengan kertas saring no.1. Hasil penyaringan dipekatkan dengan *rotary evaporator* hingga volumenya berkurang setengah. Kemudian diekstraksi dengan kloroform dengan perbandingan volume 1:1, *dishaker* selama 30 menit dan kemudian dipisahkan fasa air dan fasa kloroformnya. Fasa airnya diambil dan diekstraksi kembali dengan etil asetat dengan perbandingan volume 1:1, *dishaker* selama 30 menit dan kemudian dipisahkan fasa air dan fasa etil asetatnya. Fasa etil asetatnya dikeringkan dengan *rotary evaporator*. Hasil pengeringan (polifenol) ditimbang kemudian dilarutkan dengan *aqua dm* (Kharisov et al., 2012).

Sintesis ZVI

Sintesis ZVI dilakukan dengan cara mereaksikan FeSO_4 dengan polifenol menggunakan perbandingan komposisi tersebut yaitu 4:1 (mL). Reaksi tersebut dilakukan dengan *stirrer* pada kecepatan 250 rpm sesuai variasi waktu yang dilakukan. Optimasi waktu reaksi dilakukan dengan dua cara, yaitu:

1. Spektrofotometer UV-Vis;
2. *Particle Size Analyzer* (PSA).

Optimasi waktu reaksi dengan spektrofotometri UV-Vis bertujuan untuk mengetahui pengaruh waktu reaksi terhadap jumlah Fe^{2+} yang bereaksi dengan polifenol. Hal ini dilakukan dengan cara mereaksikan ZVI hasil sintesis dengan larutan pengkompleks o-fenantrolin. Larutan kompleks [Fe(fenantrolin)] tersebut kemudian diuji dengan spektrofotometer UV-Vis dengan memvariasikan waktu reaksi dalam beberapa variasi waktu, yaitu: 0 jam, 3 jam, 24 jam, 48 jam, 72 jam dan 144 jam. Optimasi pengaruh waktu reaksi dengan PSA bertujuan untuk mengetahui pengaruh waktu reaksi terhadap distribusi ukuran partikel ZVI hasil sintesis. ZVI disintesis dengan memvariasikan waktu reaksi dalam beberapa variasi waktu reaksi, yaitu: 0,5 jam; 1 jam; 2 jam; dan 3 jam. ZVI hasil sintesis tersebut kemudian diuji dengan PSA untuk mengetahui distribusi ukuran partikel ZVI hasil sintesis.

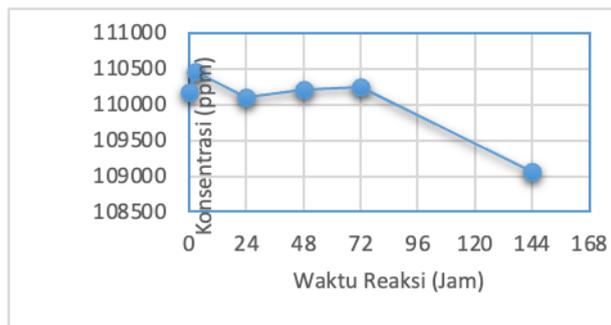
Karakterisasi ZVI

Hasil sintesis ZVI kemudian dikarakterisasi dengan FT-IR, SEM dan XRD.

Hasil dan Pembahasan

Spektrofotometer UV-Vis

Analisis kuantitatif menggunakan spektrofotometer UV-Visible berfungsi untuk mengetahui pengaruh waktu reaksi terhadap banyaknya jumlah Fe^{2+} yang bereaksi. Berdasarkan hasil penelitian, didapatkan grafik hubungan konsentrasi Fe^{2+} yang bereaksi dengan polifenol terhadap waktu yaitu:

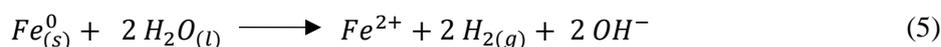


Gambar 1. Grafik hubungan antara konsentrasi ZVI yang bereaksi dengan polifenol terhadap waktu reaksi

Berdasarkan grafik di atas terlihat bahwa konsentrasi Fe^{2+} yang paling banyak bereaksi yaitu ketika waktu reaksi 3 jam. Ketika waktu reaksi 3 jam, konsentrasi Fe^{2+} yang bereaksi dengan polifenol adalah 110465,22 ppm. Konsentrasi Fe^{2+} ketika waktu reaksi telah mencapai 3 jam lebih besar dibandingkan dengan konsentrasi Fe^{2+} ketika waktu reaksi 0 jam. Hal ini disebabkan karena reaksi yang terjadi antara Fe^{2+} dengan polifenol belum sempurna sehingga konsentrasi Fe^{2+} yang bereaksi dengan polifenol ketika waktu reaksi 0 jam lebih rendah dibandingkan dengan waktu reaksi 3 jam. Konsentrasi Fe^{2+} yang bereaksi dengan polifenol relatif tidak terlalu mengalami perubahan yang signifikan pada setiap waktu pengukuran. Hal ini menandakan bahwa ZVI yang dihasilkan dari proses sintesis ini cukup stabil. Tetapi, besi bervalensi nol sangat rentan teroksidasi dalam media berair dan temperatur yang tinggi (Lament et al., 2022). Fe^0 akan teroksidasi menjadi Fe^{2+} (proses cepat) dan Fe^{3+} (proses lambat). Hal ini disebabkan karena oksigen terlarut dalam air dapat mempercepat terjadinya proses oksidasi dari Fe^0 menjadi Fe^{2+} . Selanjutnya, Fe^{2+} akan teroksidasi lebih lanjut secara lambat menjadi Fe^{3+} juga dibantu oleh oksigen terlarut yang ada dalam air (Yoon et al., 2021). Hal ini sesuai dengan persamaan reaksi berikut:



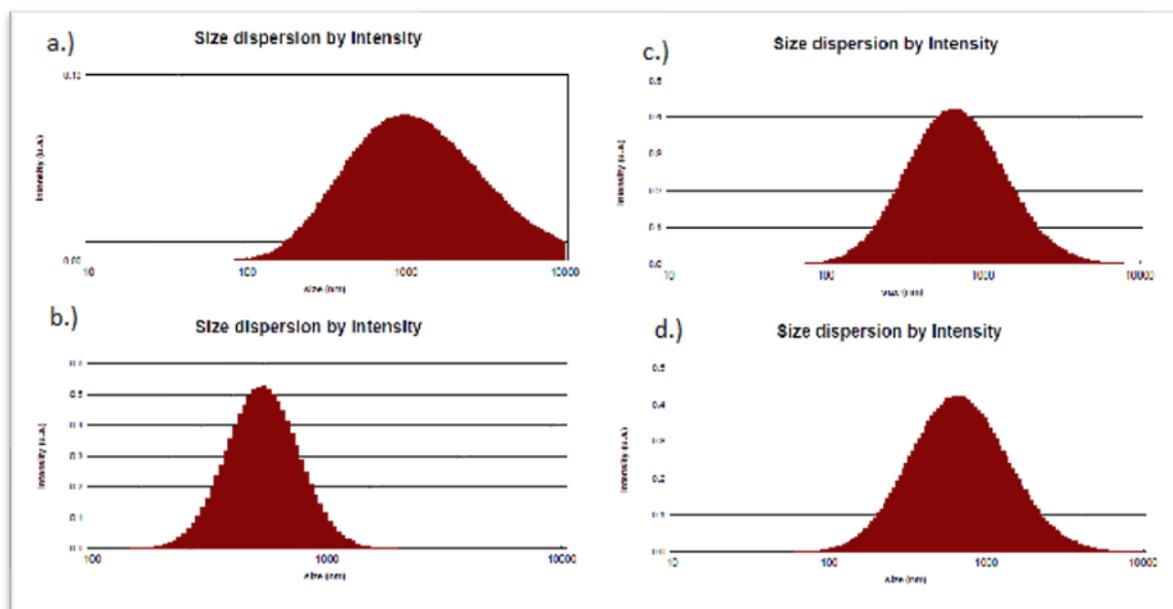
Selain itu, pada kondisi *anaerob* (tanpa oksigen), besi bervalensi nol juga dapat teroksidasi menjadi Fe^{2+} dengan menggunakan air sebagai oksidator dan menghasilkan molekul hidrogen (Lü et al., 2018).



Rentan teroksidasinya besi bervalensi nol ini juga terlihat dari grafik diatas. Ketika waktu reaksi telah mencapai 24 jam, konsentrasi Fe^{2+} yang bereaksi dengan polifenol lebih rendah dibandingkan ketika waktu reaksi mencapai 3 jam. Hal ini disebabkan karena telah teroksidasinya besi bervalensi nol yang berhasil disintesis menjadi ion Fe^{2+} kembali. Sehingga ketika direaksikan dengan reagensia orthofenantrolin menghasilkan nilai absorbansi yang lebih besar dibandingkan ketika waktu reaksi 3 jam. Hal ini disebabkan karena telah bertambahnya konsentrasi Fe^{2+} didalam larutan sampel ZVI akibat teroksidasinya Fe^0 menjadi Fe^{2+} . Ketika waktu reaksi 48 jam, konsentrasi Fe^{2+} yang bereaksi dengan polifenol sedikit meningkat jika dibandingkan dengan waktu reaksi 24 jam. Hal tersebut terus terjadi hingga waktu reaksi 72 jam, dimana terlihat pada grafik terjadi peningkatan konsentrasi Fe^{2+} yang bereaksi dengan polifenol dibandingkan ketika waktu reaksi 48 jam. Hal ini disebabkan karena Fe^{2+} yang ada didalam larutan sampel ZVI dapat bereaksi kembali dengan sisa polifenol yang masih terdapat dalam larutan sampel. Oleh karena itu, konsentrasi Fe^{2+} yang bereaksi dengan polifenol meningkat ketika waktu reaksi 48 jam hingga 72 jam. Konsentrasi Fe^{2+} yang bereaksi dengan polifenol baru berkurang ketika waktu reaksi 144 jam.

Particle Size Analyzer (PSA)

Analisis kuantitatif menggunakan *particle size analyzer* (PSA) bertujuan untuk mengetahui pengaruh waktu reaksi terhadap distribusi ukuran partikel ZVI hasil sintesis. Selain itu, pengukuran dengan PSA juga bertujuan untuk mencari waktu reaksi maksimum yang menghasilkan distribusi ukuran partikel terendah dari ZVI hasil sintesis. Berdasarkan penelitian, didapatkan hasil pengukuran dengan PSA yaitu sebagai berikut:



Gambar 1. Grafik particle size analyzer (PSA) berdasarkan intensitas, a) Waktu reaksi 0,5 jam, b) Waktu reaksi 1 jam; c.) Waktu reaksi 2 jam; d.) Waktu reaksi 3 jam

Tabel 1. Width distribution using particle size analyzer (PSA)

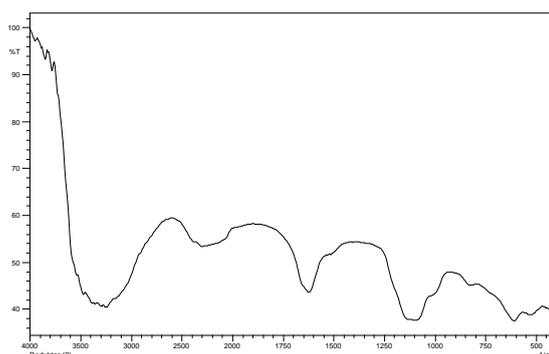
Cumulants Methode	Waktu Reaksi (Jam)			
	0,5	1	2	3
Dv 10 (nm)	708,13	338,93	389,15	338,93
Dv 50 (nm)	5371,74	537,17	813,05	851,36
Dv 90 (nm)	8513,64	851,36	2042,28	3389,34
PDI	1,8210	0,1240	0,3750	0,6000

Berdasarkan grafik distribusi partikel dan tabel *distribution width* terlihat bahwa waktu reaksi maksimum terjadi ketika waktu reaksi 1 jam. Berdasarkan hasil PSA waktu reaksi 1 jam menghasilkan distribusi ukuran partikel yang terendah jika dibandingkan dengan waktu reaksi 0,5 jam; 2 jam dan 3 jam. Pada waktu reaksi 1 jam, Dv 10 dan Dv 90 dari hasil PSA waktu reaksi 1 jam berturut-turut yaitu 338.93 nm dan 851.36 nm. Hasil ini berbeda cukup jauh dibandingkan dengan waktu reaksi 0,5 jam; 2 jam dan 3 jam. Perbedaan yang paling tinggi terjadi pada Dv 90 dimana pada waktu reaksi 1 jam, Dv 90 hanya 851.36 nm sedangkan pada waktu reaksi 0,5 jam; 2 jam dan 3 jam berturut-turut yaitu 8513.64 nm, 2042.28 nm dan 3389.34 nm. Berdasarkan hasil penelitian, dapat diduga bahwa ketika waktu reaksi 0,5 jam, reaksi yang terjadi belum sempurna dimana pengadukan dengan *stirrer* tidak dapat menghomogenkan larutan suspensi sehingga pembentukan inti dan *cluster* belum berjalan sempurna. Pada waktu reaksi 1 jam, pembentukan dan pertumbuhan inti ZVI sudah berjalan lebih baik dibandingkan dengan waktu reaksi 0.5 jam. Hal ini dapat terlihat dari nilai Dv10, Dv 50 dan Dv 90 pada waktu reaksi 1 jam yang menghasilkan distribusi ukuran partikel yang jauh lebih rendah dibandingkan waktu reaksi 0.5 jam. Sedangkan pada waktu reaksi 2 jam dan 3 jam, waktu reaksi

diduga sudah terlalu lama sehingga inti ZVI yang terbentuk, telah tumbuh cukup besar dan dimungkinkan telah terjadi aglomerasi antar inti sehingga dihasilkan distribusi ukuran partikel yang lebih besar dibandingkan ketika waktu reaksi 1 jam. Selain itu, pada waktu reaksi 1 jam juga menghasilkan PDI (*polydispersity index*) terkecil yaitu 0.1240, sedangkan pada waktu reaksi 0,5 jam; 2 jam dan 3 jam berturut-turut menghasilkan PDI sebesar 1.8210, 0.3750, dan 0.6000. PDI ini merupakan tingkat kehomogenitasan partikel dalam suatu suspensi. Semakin rendah nilai PDI maka semakin homogen distribusi ukuran partikel dalam suatu suspensi. Oleh karena itu, waktu reaksi 1 jam merupakan waktu reaksi optimum dalam pengukuran menggunakan PSA karena mempunyai PDI yang paling rendah yaitu 0.1240 sehingga perbedaan ukuran tiap partikel didalam suspensi tersebut tidak terlalu berbeda jauh.

Fourier Transform Infrared (FT-IR)

Analisis kualitatif dengan menggunakan FT-IR bertujuan untuk mengetahui gugus fungsi yang terdapat pada ZVI hasil sintesis. Berdasarkan hasil pengujian ZVI hasil sintesis dengan FT-IR didapatkan spektrum sebagai berikut:

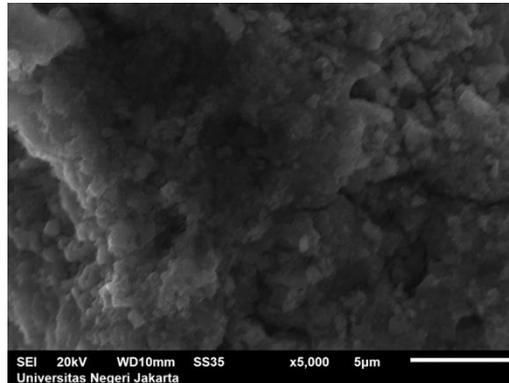


Gambar 2. Spektrum FT-IR ZVI hasil sintesis

Berdasarkan spektrum diatas dapat dilihat bahwa terdapat puncak-puncak yang lebar dengan intensitas yang tinggi. Puncak yang lebar tersebut diakibatkan karena terdapatnya molekul anorganik didalam sampel. Pada bilangan gelombang $3260,80\text{ cm}^{-1}$ terdapat puncak lebar dengan intensitas tinggi. Puncak tersebut menunjukkan adanya gugus hidroksil (-OH). Gugus hidroksil ini berasal dari polifenol yang masih tersisa dan tidak bereaksi dengan Fe^{2+} untuk membentuk partikel ZVI. Terdapat puncak dengan intensitas tinggi pada bilangan gelombang $1624,13\text{ cm}^{-1}$. Puncak tersebut menandakan adanya ikatan *stretching* C-C aromatik. Pada bilangan gelombang $1094,65\text{ cm}^{-1}$ terdapat puncak lebar dengan intensitas tinggi (Ramos-Justicia et al., 2023). Puncak tersebut menandakan adanya gugus Fe-O (Guo & Zhang, 2021). Gugus Fe-O tersebut menandakan adanya produk korosi dari besi. Hal ini mengindikasikan adanya keberadaan presipitat besi oksida dengan terdapatnya puncak yang menunjukkan ikatan *stretching* Fe-O (Blachowicz et al., 2022). Terbentuknya Fe-O tersebut disebabkan karena mudah teroksidasinya ZVI dalam larutan berair. ZVI tersebut teroksidasi menjadi besi (II) dan besi (III) oksida yang kemudian menyelimuti ZVI yang berada dibagian inti dengan membentuk struktur *core-shell*.

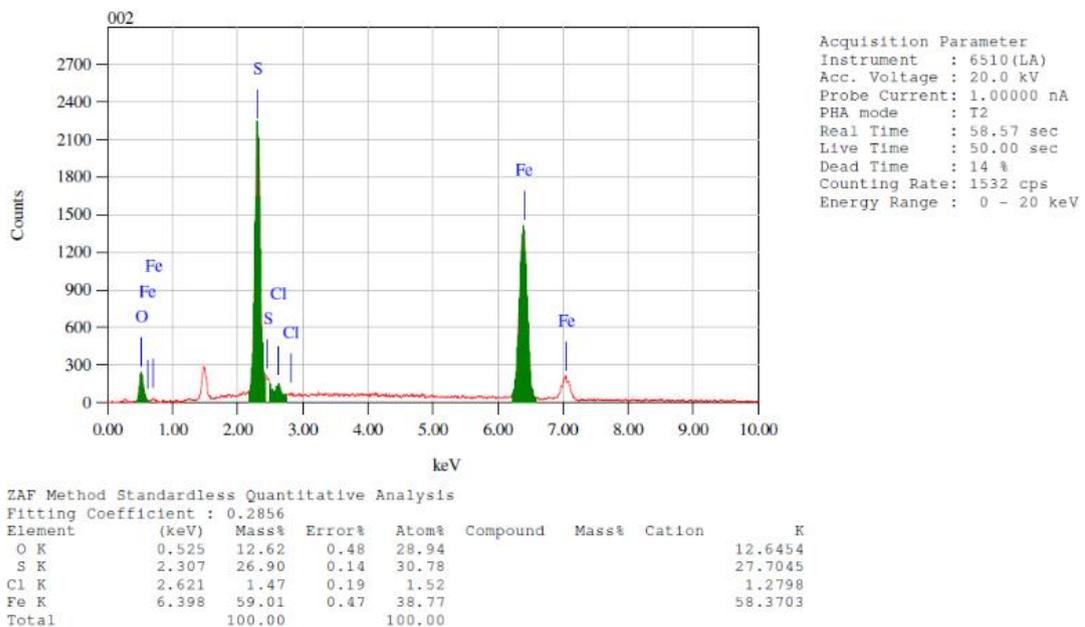
Scanning Electron Microscope (SEM)

Morfologi ZVI hasil sintesis diamati dengan menggunakan *scanning electron microscope* (SEM). Berdasarkan pengujian dengan SEM didapatkan hasil sebagai berikut:



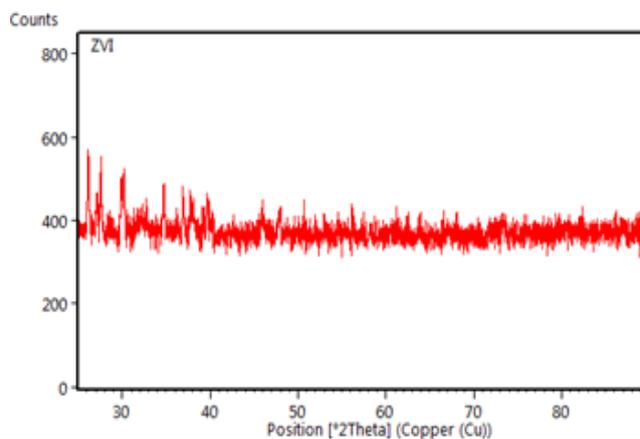
Gambar 3. Pencitraan SEM ZVI hasil sintesis

Gambar 4 Memberikan informasi mengenai morfologi dari ZVI hasil sintesis. Berdasarkan data yang diperoleh terlihat bahwa hasil SEM tersebut menunjukkan adanya gumpalan besar yang tersusun atas butiran yang berbentuk bulat seperti bola-bola yang saling menumpuk hingga membentuk sebuah gumpalan besar. Morfologi partikel ZVI berbentuk bola-bola kecil yang tersusun secara teratur dan dapat teragregat menjadi seperti rantai (Tian et al., 2021). Perbedaan ini disebabkan karena telah teraglomerasinya partikel ZVI hasil sintesis. Adanya interaksi magnetik antara partikel-partikel kecil yang sebagian besar berbentuk bola dapat menyebabkan terjadinya aglomerasi (Appel et al., 2021). Berdasarkan data EDS yang diperoleh, dapat diketahui bahwa terdapat atom oksigen dalam jumlah yang cukup besar. Hal ini menandakan bahwa ZVI hasil sintesis tidak murni dan dimungkinkan terdapat besi (II) maupun besi (III) oksida. Adanya besi (II) dan besi (III) oksida disebabkan karena mudah teroksidasinya partikel ZVI dalam larutan berair. Dalam data tersebut juga terdapat atom S dengan jumlah yang cukup besar. Hal ini kemungkinan disebabkan karena adanya FeSO_4 yang tidak bereaksi dengan polifenol. Selain itu, terdapat pengotor seperti Cl^- dalam data EDS ZVI hasil sintesis.



Gambar 4. Grafik EDS ZVI hasil sintesis

X-Ray Diffractometer (XRD)



Gambar 5. Pola Difraksi ZVI hasil sintesis

Dilakukan pengujian dengan menggunakan *X-Ray Diffractometer (XRD)* terhadap ZVI hasil sintesis. XRD digunakan untuk mengetahui struktur kristalinitas dalam partikel. XRD *pattern* diamati pada $2\theta = 20^\circ - 90^\circ$. Hal ini disebabkan karena pada jarak 2θ tersebut telah menjangkau seluruh spesi utama dari besi dan besi oksida. Hasil karakterisasi sampel dengan XRD menunjukkan pola difraksi yang khas. Pola difraksi yang dihasilkan mempunyai beberapa puncak yang tinggi dan sedikit lebar. Hal ini menandakan bahwa ZVI hasil sintesis berbentuk amorf (Kalantari et al., 2022). Berdasarkan pola difraksi tersebut, dilakukan analisis data menggunakan software *HighScore Plus* untuk mengetahui fasa kristal dari ZVI hasil sintesis. Fasa kristal yang didapatkan dari kristal ZVI hasil sintesis yaitu Iron dan Magnetite dengan presentase berturut-turut yaitu 17,5 % dan 82,5 % dengan nilai *goodness of fit* saat *fitting* yaitu sebesar 2.49685 dan *weighted R profile* sebesar 7,98046. Terdapatnya 2 fasa tersebut disebabkan karena telah teroksidasinya ZVI hasil sintesis menjadi besi oksidanya. Hal ini dikarenakan ZVI mudah teroksidasi dalam larutan berair dan temperatur yang tinggi. Akan tetapi masih terdapat partikel ZVI dalam jumlah yang rendah didalam sampel. Hal ini dapat ditunjukkan dengan adanya *peak* pada $2\theta = 45^\circ$. Karakteristik puncak yang lebar pada $2\theta = 45^\circ$ dapat mengindikasikan bahwa terdapat partikel ZVI dalam sampel.

Kesimpulan

- 1) ZVI telah berhasil disintesis dari garam besi (FeSO_4) dengan menggunakan reduktor alami polifenol yang berasal dari ekstrak kulit pisang kepok.
- 2) Konsentrasi Fe^{2+} yang bereaksi dengan polifenol terbesar yaitu ketika waktu reaksi 3 jam, yaitu 110465,22 ppm.
- 3) Distribusi ukuran partikel yang paling rendah terjadi ketika waktu reaksi 1 jam, yaitu $Dv_{10} = 338,93 \text{ nm}$; $Dv_{50} = 537,17 \text{ nm}$; dan $Dv_{90} = 851,36$ serta $PDI = 0,1240$
- 4) ZVI hasil sintesis mempunyai 2 fasa kristal, yaitu: iron dan magnetite dengan presentase berturut-turut yaitu 17,5 % dan 82,5 %.

Daftar Pustaka

Appel, C., Kuttich, B., Kraus, T., & Stühn, B. (2021). *In situ* investigation of temperature induced agglomeration in non-polar magnetic nanoparticle dispersions by small angle X-ray scattering. *Nanoscale*, 13(14), 6916–6920. <https://doi.org/10.1039/d0nr08434d>

- Bashmil, Y. M., Ali, A., BK, A., Dunshea, F. R., & Suleria, H. A. R. (2021). Screening and Characterization of Phenolic Compounds from Australian Grown Bananas and Their Antioxidant Capacity. *Antioxidants*, 10(10), 1521. <https://doi.org/10.3390/antiox10101521>
- Benincasa, C., Pellegrino, M., Romano, E., Claps, S., Fallara, C., & Perri, E. (2022). Qualitative and Quantitative Analysis of Phenolic Compounds in Spray-Dried Olive Mill Wastewater. *Frontiers in Nutrition*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.782693>
- Blachowicz, T., Grzybowski, J., & Ehrmann, A. (2022). Micromagnetic Simulations of Nanoparticles with Varying Amount of Agglomeration. *Macromolecular Symposia*, 402(1). <https://doi.org/10.1002/masy.202100381>
- Busatto, N., Matsumoto, D., Tadiello, A., Vrhovsek, U., & Costa, F. (2019). Multifaceted analyses disclose the role of fruit size and skin-russeting in the accumulation pattern of phenolic compounds in apple. *PLOS ONE*, 14(7), e0219354. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219354>
- Guo, G., & Zhang, H. (2021). The effect of morphology of ZnO particle on properties of asphalt binder and mixture. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 11(3). <https://doi.org/10.1016/j.ijst.2021.05.005>
- Har-Shemesh, O., & Di Piazza, A. (2012). Peak intensity measurement of relativistic lasers via nonlinear Thomson scattering. *Optics Letters*, 37(8), 1352. <https://doi.org/10.1364/ol.37.001352>
- Kalantari, E., Lucia, L., & Lavoine, N. (2022). Green synthesis, characterization, and catalytic application of a supported and magnetically isolable copper-iron oxide-sodium alginate. *Green Synthesis and Catalysis*, 3(2). <https://doi.org/10.1016/j.gresc.2022.04.005>
- Karavasilis, M., & Tsakiroglou, C. D. (2019). Synthesis of Aqueous Suspensions of Zero-Valent Iron Nanoparticles (nZVI) from Plant Extracts: Experimental Study and Numerical Modeling. *Emerging Science Journal*, 3(6), 344–360. <https://doi.org/10.28991/esj-2019-01197>
- Kharisov, B. I., Rasika Dias, H. V., Kharissova, O. V., Manuel Jiménez-Pérez, V., Olvera Pérez, B., & Muñoz Flores, B. (2012). Iron-containing nanomaterials: synthesis, properties, and environmental applications. *RSC Advances*, 2(25), 9325. <https://doi.org/10.1039/c2ra20812a>
- Lament, K., Nieszporek, J., & Piasecki, W. (2022). Electrochemical Analysis of Fe²⁺ Ions Behavior in the Metal Oxide Dispersions. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 95(9), 1389–1395.
- Lü, C., Amsler, M., & Chen, C. (2018). Unraveling the structure and bonding evolution of the newly discovered iron oxide FeO₂. *Physical Review*, 98(5). <https://doi.org/10.1103/physrevb.98.054102>
- Plessl, K., Russ, A., & Vollprecht, D. (2022). Application and development of zero-valent iron (ZVI) for groundwater and wastewater treatment. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(6). <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04536-7>
- Ramaswamy, K., Jule, L. T., Nagaprasad, N., Subramanian, K., R, S., Dwarampudi L, P., & Seenivasan, V. (2022). Reduction of environmental chemicals, toxicity and particulate matter in wet scrubber device to achieve zero emissions. *Scientific Reports*, 12(1), 9170. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13369-w>
- Ramos-Justicia, J. F., Ballester-Andújar, J. L., Urbieto, A., & Fernández, P. (2023). Growth of Zr/ZrO₂ Core-Shell Structures by Fast Thermal Oxidation. *Applied Sciences*, 13(6), 3714–3714. <https://doi.org/10.3390/app13063714>
- Tian, B., Li, F., Zhang, Y., Wang, S., Zhou, Z., Han, H., & Xu, C. (2021). Looking deeper: Decoding the core structure of a micron-sized S-ZVI particle. *Chemical Engineering Journal*, 417, 128092. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128092>
- Wang, R., Liu, S., & Ma, Z. (2023). Recent Development of Versatile Polyphenol Platforms in Fertilizers and Pesticides. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(25), 9599–9608. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c01952>

Wang, T., & Aguey-Zinsou, K.-F. (2019). Direct Synthesis of NaBH₄ Nanoparticles from NaOCH₃ for Hydrogen Storage. *Energies*, *12*(23), 4428. <https://doi.org/10.3390/en12234428>

Yoon, J., Kim, Y. G., Choi, I. W., Sung, J. H., Lee, H. W., Lee, S. K., & Nam, C. H. (2021). Realization of laser intensity over 10²³ W/cm². *Optica*, *8*(5), 630–630. <https://doi.org/10.1364/optica.420520>