

Sintesis dan Karakterisasi ZnO sebagai Coating Antikorosi ZnO/Al(OH)₃ pada Material Baja Karbon

Adhi Setiawan *

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya,
Jl. Teknik Kimia Kampus ITS Sukolilo Surabaya, Indonesia 60111

Abstrak

ZnO seringkali digunakan sebagai aplikasi pigmen anti korosi pada logam karena tidak beracun, ramah lingkungan, murah serta memiliki ketahanan korosi yang relatif baik. Artikel ini memuat penelitian dalam melakukan sintesa partikel ZnO menggunakan metode presipitasi dengan ZnCl₂ dan NaOH sebagai prekursor. Partikel ZnO yang dihasilkan memiliki morfologi berbentuk batang dengan ujung lancip. Hasil SEM menunjukkan bahwa pada konsentrasi NaOH sebesar 0,5 M dihasilkan ZnO dengan ukuran terkecil sebesar 123 nm dan hasil XRD menunjukkan bahwa ZnO memiliki kristalinitas tinggi dengan ukuran kristal mencapai 47 nm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada komposisi ZnO/Al(OH)₃ sebesar 1:3 menjadikan specimen baja karbon memiliki ketahanan korosi yang terbaik dengan nilai laju korosi terendah sebesar 0,86 mpy.

Kata kunci: ZnO; ketahanan korosi; coating; polarisasi linear; SEM

Abstract

[Title: *Synthesis and Characterization ZnO as Anticorrosion Coating ZnO/Al(OH)₃ on Carbon Steel Material*] ZnO is widely used an application of anti-corrosion pigments in metals because they are non-toxic, environmentally friendly, inexpensive and good corrosion resistance. This paper presents research in synthesizing ZnO particles using precipitation method with ZnCl₂ and NaOH as precursors. The ZnO particles produced by the method have a rod-like morphology with a pointed tip. The SEM results show that at a concentration of NaOH about 0.5 M, ZnO were produced with smallest size about 123 nm and the XRD results show that ZnO have high crystallinity with a crystallite size of 47 nm. The results show that the composition of ZnO /Al(OH)₃ about 1:3 makes the steel carbon specimen has the best corrosion resistance with the lowest corrosion rate value of 0.86 mpy.

Keywords: ZnO; corrosion resistance; coating; linear polarization; SEM

1. Pendahuluan

Korosi merupakan proses degradasi elektrokimia yang terjadi pada *interface* logam-larutan di mana logam teroksidasi (reaksi anodik) dan spesies seperti oksigen (reaksi katodik) tereduksi (Forsgren, 2006). Reaksi korosi merupakan proses yang terjadi secara spontan karena pada umumnya logam bersifat tidak stabil (Elsner dkk, 2003).

Beberapa metode pengendalian korosi yang seringkali diaplikasikan antara lain dengan pemakaian inhibitor korosi, proteksi katodik, dan pelapisan (*coating*). Tujuan dari pemakaian pelapisan adalah untuk

memisahkan substrat logam dari lingkungan yang korosif. Pelapisan organik merupakan metode terbaik dalam menciptakan lapisan pelindung terhadap spesies yang bersifat korosif (Rashvand & Ranjbar, 2013). Efisiensi pelapisan terhadap lingkungan yang korosif tergantung pada sifat material pelapis, sifat adhesi pelapis, serta tingkat korosifitas lingkungan (Sun dkk., 2008). Sifat penghalang (*barrier*) dari *coating* sangat dipengaruhi oleh integritas pengikat (*binder*) dan adhesinya pada material substrat. Adanya beberapa partikel seperti pigmen atau *filler* dapat memperbaiki sifat-sifat tersebut. Selain itu, pigmen dapat mengubah tampilan pelapis dan membantu memperbaiki sifat yang lainnya seperti ketahanan terhadap sinar UV, ketahanan terhadap korosi dan sifat

*) Penulis Korespondensi.

E-mail: adhistw23@gmail.com

mekanik seperti ketahanan terhadap goresan dan abrasi (Dhokea, Khannaa & Sinha, 2009).

Aplikasi *coating* seringkali digunakan untuk melindungi logam konstruksi yang rawan terhadap korosi. Logam baja merupakan material konstruksi yang seringkali diaplikasikan pada berbagai macam struktur karena memiliki sifat mekanik yang baik serta mudah difabrikasi (Smith & Hasmehi, 2006). Namun, struktur yang dibuat dari logam baja lebih cepat mengalami korosi dan *fouling* sehingga menimbulkan kerugian baik sifatnya langsung maupun tidak langsung yang mencapai 5% dari GNP (Gross National Product) (Kumar dkk., 2006). Oleh karena itu, mengendalikan laju korosi pada logam atau paduannya menjadi hal yang penting. Selama proses korosi, logam murni cenderung akan kembali pada keadaan sebagaimana sama dengan keadaan bijih logamnya (Jagtap, Patil & Hassan, 2008).

Berbagai usaha telah dilakukan untuk memperbaiki ketahanan korosi pada coating organik yaitu dengan menggunakan pigmen korosi seperti fosfat, kromat dan pigmen logam. Penggunaan material berbasis zink seringkali digunakan dalam coating untuk mengendalikan korosi pada logam termasuk pada baja karbon. Material zink kromate merupakan material *coating* yang cukup efektif dalam menghambat laju korosi pada baja karbon pada lingkungan yang agresif. Namun adanya kandungan kromat pada material coating tersebut dapat menimbulkan dampak yang berbahaya bagi lingkungan. Zink kromate memiliki kandungan ion kromat yang dapat terlarut di dalam air sehingga bersifat racun dan memiliki efek karsinogenik (penyebab kanker) (Jařková & Kalendová, 2012). Salah satu alternative yang dapat menggantikan zink kromate sebagai bahan coating yaitu menggunakan zink oxide (ZnO).

Beberapa kelebihan yang dimiliki oleh ZnO antara lain sifatnya yang tidak beracun, ramah lingkungan, murah, serta memiliki ketahanan korosi yang relatif baik (Mahdavian & Attar, 2006). Selain itu, ZnO memiliki efek *photovoltaic* yang dapat menghasilkan elektron yang dapat berpindah serta terakumulasi pada logam substrat ketika terpapar oleh radiasi matahari. Hal tersebut menyebabkan potensial logam bergeser menjadi lebih negatif daripada potensial korosi sehingga laju korosi dapat dihambat (Sun dkk., 2014). Sebagaimana material semikonduktor ZnO dapat meningkatkan ketahanan coating akibat degradasi oleh cahaya (Mende & Driscoll, 2007). Jagtap, Patil dan Hassan (2008) melaporkan bahwa penambahan ZnO dapat memperbaiki adhesi coating organik pada baja karbon serta memperpanjang kinerja dari Zn-rich primer.

Beberapa penelitian sebelumnya melaporkan bahwa nano komposit coating yang terbentuk dari 3% wt nano ZnO di dalam poliuretan dapat meningkatkan ketahanan korosi hingga dua kali lebih tinggi dibandingkan kondisi tanpa ZnO pada panel fosfat steel

yang tercelup di dalam larutan garam 3,5% selama 120 hari (Rahsvand dan Ranjbar, 2013). Penggunaan paduan pigmen anorganik seperti mikro-ZnO, mikro-TiO₂, dan mikro-Al₂O₃ dapat memperbaiki sifat mekanik coating serta meningkatkan ketahanan korosi pada coating organik (Yang, Liu & Han, 2005; Naderi & Attar, 2009). Ramezanzadeh dan Attar (2011) melaporkan bahwa penambahan partikel ZnO berukuran nano dan mikro dapat meningkatkan ketahanan korosi baja tergalvanisasi yang dilapisi dengan pelapis epoksi. Selain itu penggunaan ZnO berukuran nano menyebabkan adhesi dari *coating* pada permukaan logam meningkat. Fujino Miyamoto dan Noguchi (2000) melaporkan bahwa adanya pelapis Al(OH)₃ dapat memperbaiki ketahanan korosi pada conversion coating pada logam Sr. Peng dkk. (2016) menggunakan bahan Mg(OH)₂ untuk memperbaiki ketahanan korosi dan biocompatibility dari paduan Mg-Nd-Zn-Zr dengan menggunakan metode hidrotermal.

Penelitian difokuskan pada sintesis dan karakterisasi komposit ZnO/Al(OH)₃ yang belum dilakukan oleh peneliti terdahulu serta mengaplikasikannya sebagai pigmen anti korosi pada baja karbon. Penambahan bahan Al(OH)₃ pada ZnO diharapkan dapat memperbaiki ketahanan korosi pada coating melalui pembentukan lapisan pasif yang dapat menurunkan laju korosi. Metode sintesis ZnO yang digunakan pada penelitian ini adalah metode presipitasi. Parameter pengaruh konsentrasi larutan NaOH dalam proses presipitasi terhadap morfologi serta karakteristik partikel ZnO akan dijelaskan lebih lanjut dalam artikel ini.

2. Bahan dan Metode

Sintesis ZnO dilakukan dengan menggunakan metode presipitasi dengan menggunakan prekursor berupa kristal ZnCl₂ (97% berat Merck KGaA, Germany). Sebanyak 5,5 g kristal ZnCl₂ dilarutkan pada 100 ml aquades disertai dengan pengadukan dengan magnetic stirrer yang dioperasikan pada kecepatan 500 rpm. Jika larutan yang terbentuk telah homogen tahap selanjutnya dilakukan pemanasan dengan hot plate hingga suhu larutan mencapai 90°C. Larutan yang terbentuk selanjutnya ditambahkan dengan larutan NaOH 0,5 M sebanyak 200 ml. Untuk mencegah terbentuknya aglomerasi partikel maka penambahan larutan NaOH dilakukan secara perlahan dengan posisi pipet tetes menyentuh dinding beaker glass. Melakukan hal sama dengan konsentrasi NaOH dengan variasi konsentrasi 1 M dan 2 M.

Proses reaksi dilakukan selama dua jam dengan pemanasan dan pengadukan pada suhu dan kecepatan yang konstan. Setelah reaksi selesai dilanjutkan dengan mengendapkan larutan. Endapan selanjutnya dipisahkan dengan kertas saring dan dikeringkan di dalam oven dengan suhu 100 °C selama 3 jam.

ZnO yang terbentuk selanjutnya dicampur dengan serbuk Al(OH)₃ (99% berat Merck KGaA, Germany) sebagai coating pada material baja karbon. Spesifikasi ukuran rata-rata partikel Al(OH)₃ 90 µm. Pembuatan coating dilakukan dengan perbandingan massa ZnO: Al(OH)₃ sebesar 1:1, 1:2, 1:3, 1:4. Masing-masing bahan tersebut selanjutnya dilarutkan ke dalam poliuretan dengan konsentrasi ZnO/Al(OH)₃ sebesar 10% dari massa total larutan. Bahan coating tersebut selanjutnya diaplikasikan pada baja karbon dengan menggunakan metode *dip coating* (pencelupan). Dimensi dari plat baja karbon sebesar 15 mm x 15 mm x 1mm. Plat baja karbon yang telah dilapisi selanjutnya di *curing* selama 24 jam di dalam oven pada suhu 50 °C.

Partikel ZnO yang dihasilkan pada eksperimen ini berupa serbuk untuk selanjutnya dianalisa morfologi dan derajat kristalnya. Analisa kemurnian dan derajat kristalnya menggunakan XRD (X-ray Diffraction) X'Pert RINT 2200 V Philips CuKα (λ=1,5418 Å). Analisa XRD pada HAp dilakukan interval sudut 10°-60° dengan lebar step 0,01° dan laju scan 0,5 s/step. Morfologi, ukuran, komposisi dan *element mapping* partikel dianalisa dengan menggunakan SEM-EDX (*Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*) Zeiss Evo MA LS series dioperasikan pada 20 KV. Ukuran kristal dari partikel ZnO berdasarkan analisa XRD dihitung dengan persamaan Debye-Scherrer sebagai berikut (Romo dkk., 2011):

$$D_C = \frac{0,9 \cdot \lambda}{B \cdot \cos \theta} \quad (1)$$

Dengan λ merupakan panjang gelombang XRD (0,154 nm), θ sudut difraksi, dan B merupakan FWHM (*full width at half maximum*) atau lebar puncak pada setengah intensitas maksimum dalam radian

Sifat termal dari ZnO dianalisa dengan menggunakan metode TG-DTA (DTG-60H, Shimadzu). Pada prinsipnya analisa TG-DTA (*thermogravimetry and differential thermal analysis*) dapat mencatat perubahan massa dan panas material secara simultan selama proses pemanasan sehingga dapat diketahui temperatur dekomposisi material tersebut. Laju pemanasan pada analisa TG-DTA tersebut sebesar 10°C/menit dengan massa sebanyak 4 mg. Analisa TG-DTA dilakukan pada interval temperatur 25-600°C dengan atmosfer nitrogen pada laju alir 50 ml/min serta menggunakan pan aluminium sebagai tempat sampelnya

Ketahanan korosi dari baja yang telah dilapisi dengan ZnO/Al(OH)₃ di uji dengan menggunakan metode polarisasi linear (PGSTAT 32 METROHM) dengan elektroda *reference* berupa Ag/AgCl, elektode *counter* berupa platina sedangkan logam yang diuji sebagai elektroda kerja. Larutan elektrolit yang digunakan dalam

pengujian korosi yaitu larutan NaCl 3,5% wt dengan volume 100 ml. Laju scan yang digunakan pada pengujian polarisasi linear sebesar 10 mv/s. Rapat arus korosi yang dihasilkan dari pengujian selanjutnya digunakan untuk menghitung laju korosi. Laju korosi dari dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

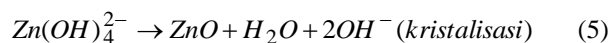
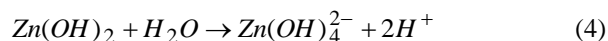
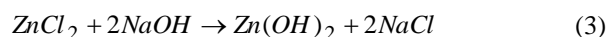
$$CR(mpy) = \frac{0,129 I_{corr} EW}{D} \quad (2)$$

Dimana CR (*Corrosion Rate*) adalah laju korosi (mpy), I_{corr} yaitu rapat arus korosi (µA/cm²), D adalah denstitas spesimen uji (g/cm³), EW berat ekivalen spesimen uji (g/mol).

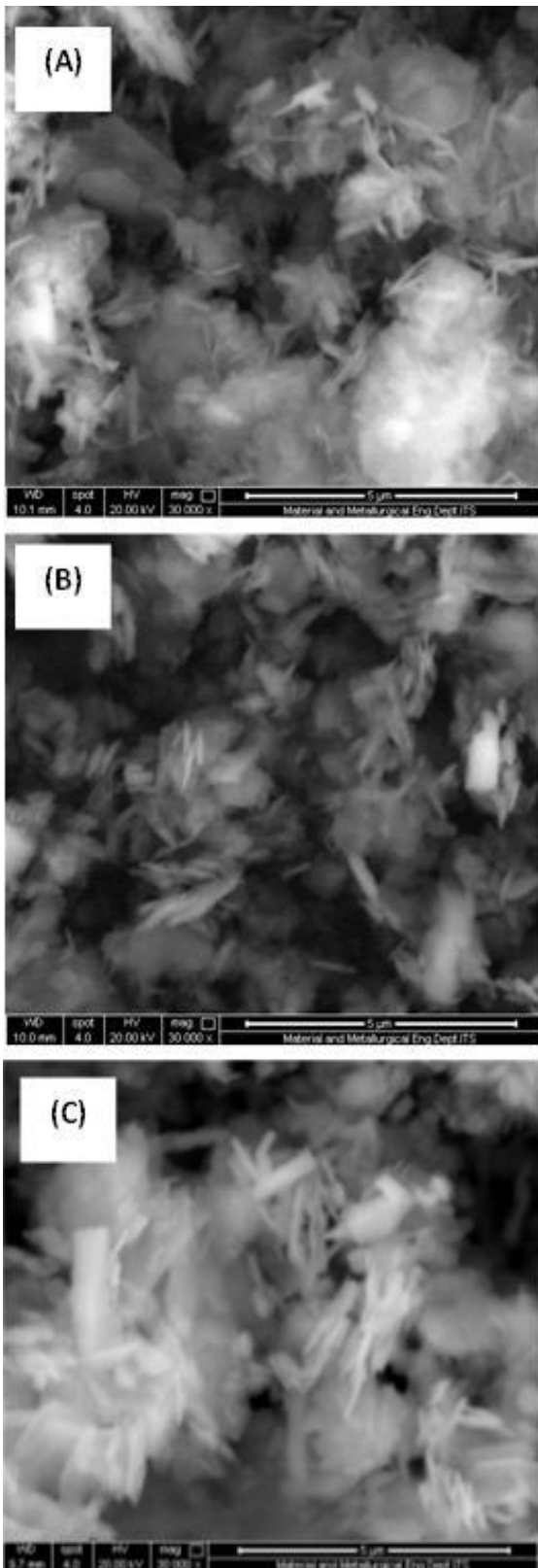
3. Hasil dan Pembahasan

Gambar 1 menunjukkan SEM dari partikel ZnO yang disintesis dengan metode presipitasi. Secara umum morfologi partikel ZnO yang terbentuk melalui proses presipitasi berbentuk seperti batang dengan ujung berbentuk lancip.

Dimensi rata-rata partikel ZnO yang disintesis pada konsentrasi NaOH 0,5 M, 1 M, dan 2M memiliki ukuran (diameter) masing-masing sebesar 123 nm, 194 nm, dan 255 nm dengan panjang rata-rata partikel masing-masing sebesar 1,5 µm, 0,82 µm, dan 0,73 µm. Hal ini menunjukkan bahwa menurunkan konsentrasi NaOH akan mengarah pada terbentuknya partikel ZnO dengan ukuran yang lebih kecil. Pada kondisi alkali ZnO terbentuk melalui *dissolution* dari Zn(OH)₂. Proses *dissolution-precipitation* terjadi hingga Zn(OH)₂ mencapai kondisi setimbang. Selanjutnya Zn(OH)₂ yang terbentuk dapat bertransformasi membentuk ZnO pada temperatur diantara 30-100 °C (Demoisson, Piolet & Bernard, 2014). Berikut mekanisme reaksi kimia dan kristalisasi langsung dengan mekanisme sebagai berikut (Conde dkk., 2011):

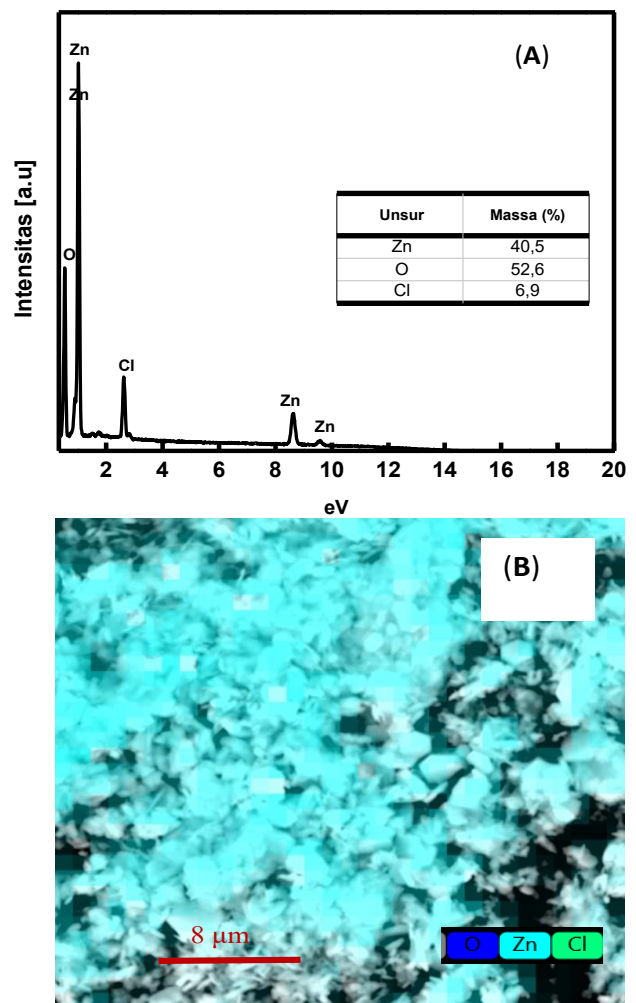


Sebagian dari kluster melekul Zn(OH)₂ tersebut menghasilkan inti kristal (*nukleus*). Selanjutnya inti dapat tumbuh melalui dua mekanisme yaitu melalui penggabungan kluster dan agregasi sebagai akibat dari tumbukan antar partikel (Romo dkk., 2011). Meningkatnya konsentrasi larutan NaOH dapat menyebabkan penggabungan kluster menjadi lebih cepat sehingga ukuran dari partikel akan semakin besar. Bahkan dengan konsentrasi NaOH yang semakin tinggi menyebabkan tingkat agregasi dari ZnO semakin besar akibat tumbukan antar partikel yang meningkat.



Gambar 1. SEM ZnO yang disintesis pada konsentrasi NaOH (a) 0,5 M (b) 1 M dan (c) 2 M

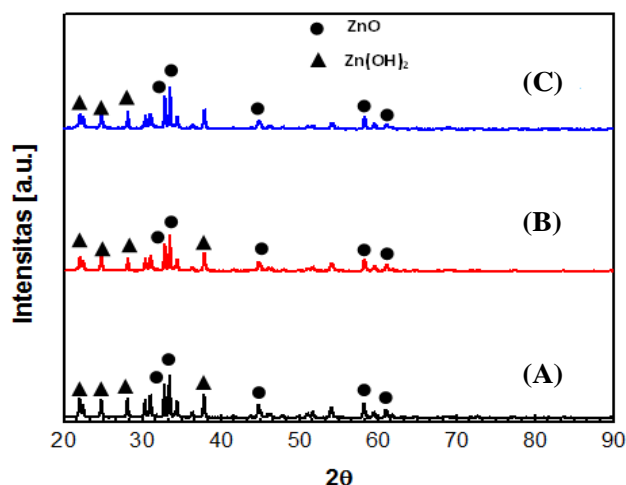
Hasil EDX pada Gambar 2 (a) menunjukkan bahwa pada sampel terdeteksi *peak* yang diidentifikasi sebagai atom O dan Zn yang merupakan penyusun utama dari partikel ZnO dengan intensitas yang signifikan. Hasil analisa menunjukkan bahwa ZnO yang disintesis dengan menggunakan metode presipitasi dengan konsentrasi NaOH 0,5 M memiliki komposisi atom yang terdiri dari atom O dan Zn dengan komposisi yang tertinggi yaitu sebesar 40,5% dan 52,6%. Selain itu pada puncak tersebut terdeteksi *peak* atom Cl sebagai kontaminan yang terdeteksi dengan konsentrasi 6,9%. Gambar 2 (b) menunjukkan bahwa distribusi atom Zn yang merupakan komponen penyusun ZnO terdistribusi secara merata dan mendominasi pada permukaan sampel.



Gambar 2. (a) EDX dan (b) *element mapping* ZnO yang disintesis pada konsentrasi NaOH 0,5 M

Gambar 3 menunjukkan bahwa partikel ZnO yang terbentuk memiliki tingkat kristalinitas yang tinggi di mana semua *peak* ZnO terdeteksi dengan jelas pada hasil XRD tersebut. Ukuran kristal ZnO yang dihasilkan pada

konsentrasi NaOH 0,5 M, 1 M, dan 2 M masing sebesar 47,1 nm, 49,2 nm, dan 49,5 nm. Perbedaan ukuran dari masing-masing kristal tersebut tidak terlalu signifikan. Struktur kristal ZnO yang terbentuk merupakan struktur wurtzite (JCPDS 36-1451) dengan intensitas *peak* maksimal pada sudut 2θ sebesar $33,51^\circ$.



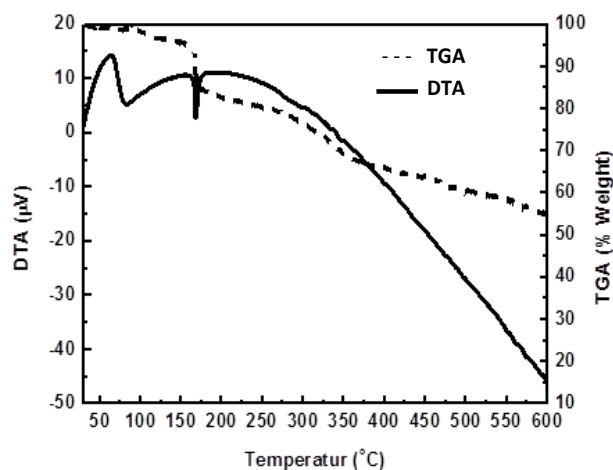
Gambar 3. XRD ZnO yang disintesis pada konsentrasi NaOH (a) 0,5 M (b) 1 M dan (c) 2 M

Selain itu pada fase XRD tersebut terdeteksi fase $Zn(OH)_2$. Fase tersebut bersifat metastabil pada temperature rendah serta dapat bertransformasi membentuk ZnO dengan laju yang rendah. Hal ini sesuai dengan penelitian Demoisson, Piolet dan Bernard (2014) yang melaporkan bahwa pada temperature sintesis ZnO kurang dari $100^\circ C$ akan mengarah pada pembentukan partikel produk dengan komposisi yang terdiri dari ZnO dan $Zn(OH)_2$.

Hasil uji TG-DTA pada Gambar 4 menunjukkan bahwa pada suhu $50^\circ C$ hingga suhu $70^\circ C$ terjadi proses penguapan air yang terkandung dalam ZnO. Adanya penguapan air ini terdeteksi pada peak grafik DTA. proses penguapan tersebut mengakibatkan sampel mengalami penurunan massa sebesar 5% dari massa sampel mula-mula. Selanjutnya pada suhu $150^\circ C$ terjadi penurunan massa secara signifikan akibat proses dehidrasi dari $Zn(OH)_2$ yang terkandung pada sampel membentuk ZnO. Hal tersebut terdeteksi pada grafik DTA yang menunjukkan munculnya *peak* pada suhu sekitar $150^\circ C$. Total massa sampel yang hilang akibat pemanasan hingga suhu $600^\circ C$ mencapai 45% dari massa awal sampel.

Hasil pengujian rapat arus korosi sebagaimana yang ditunjukkan pada Tabel 1 menunjukkan bahwa penggunaan komposit *coating* dengan paduan ZnO / $Al(OH)_3$ dapat melindungi baja karbon terhadap korosi pada media larutan NaCl 3,5%. Berdasarkan hasil SEM sebelumnya menunjukkan bahwa morfologi ZnO yang

disintesis dengan larutan NaOH 0,5 M memiliki ukuran rata-rata partikel terkecil yaitu sebesar 123 nm bila dibandingkan dengan dua variabel NaOH yang lainnya. Oleh karena itu, dalam pembuatan komposit ZnO/ $Al(OH)_3$ dipilih berdasarkan ukuran partikel yang terkecil. Ramezanzadeh dan Attar (2011) melaporkan dalam penelitiannya bahwa semakin kecil ukuran partikel ZnO pada *coating* maka ketahanan korosi akan semakin meningkat.

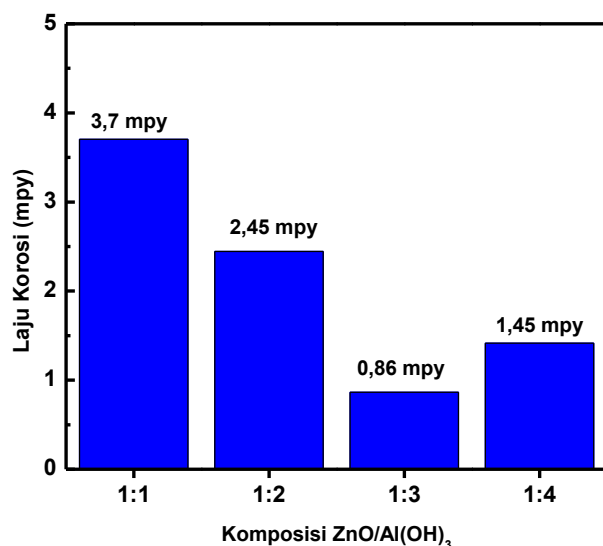


Gambar 4. TG-DTA ZnO yang disintesis pada konsentrasi NaOH 0,5 M

Penggunaan ZnO dengan ukuran nano mampu meningkatkan sifat penghalang (*barrier*) terhadap degradasi hidrolitik dalam lingkungan elektrolit bila dibandingkan dengan ZnO berukuran mikro karena luas permukaan partikel yang relatif besar (Ramezanzadeh & Attar, 2011). Hasil pengukuran rapat arus korosi pada Tabel 1 secara umum menunjukkan bahwa meningkatkan rasio ZnO/ $Al(OH)_3$ dari 1:1 hingga 1:3 cenderung menurunkan rapat arus korosi yang mengakibatkan menurunnya laju korosi logam sebagaimana terlihat pada Gambar 5. Penurunan laju korosi ini disebabkan adanya lapisan $Al(OH)_3$ yang bertindak sebagai lapisan pasif yang melindungi logam dari korosi. Partikel $Al(OH)_3$ tersebut memiliki kelarutan yang relatif kecil di dalam air serta memiliki volume yang tinggi sehingga dapat menutup lubang korosi yang terbentuk sehingga laju korosi dapat diperlambat (Dejun, Xuequana & Jinchun, 2015).

Tabel 1. Rapat arus korosi pada berbagai komposisi *coating*

Komposisi ZnO/ $Al(OH)_3$	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)
1:1	4,03
1:2	2,66
1:3	0,94
1:4	1,54



Gambar 5. Laju korosi baja karbon pada variasi komposisi *coating*

Hasil pengujian korosi tersebut menunjukkan bahwa kondisi terbaik dari *coating* dengan paduan Zn/Al(OH)₃ pada logam baja karbon terjadi pada komposisi 1:3 yang ditunjukkan dengan nilai laju korosi terendah yaitu sebesar 0,86 mpy. Namun pada rasio ZnO/Al(OH)₃ 1:4 terjadi kenaikan laju korosi. Hal ini disebabkan massa ZnO dalam *coating* yang semakin kecil menyebabkan porositas dari *coating* menjadi meningkat. Selain itu, pada rasio konsentrasi ZnO/Al(OH)₂ sebesar 1:4 menyebabkan komposisi *coating* pada lebih banyak didominasi oleh partikel Al(OH)₃ dengan ukuran mikron yang mengarah pada menurunnya densitas *coating* serta meningkatnya ukuran pori-pori *coating*. Meningkatnya porositas menyebabkan ion-ion elektrolit dapat memasuki lapisan penghalang untuk berkontak dengan permukaan logam yang menyebabkan laju korosi meningkat (Jagtap, Patil & Hassan, 2008).

4. Kesimpulan

Partikel ZnO yang dihasilkan dari proses sintesis dengan metode presipitasi menggunakan prekursor ZnCl₂ dan NaOH memiliki morfologi berbentuk batang dengan ujung berbentuk lancip. Hasil Uji SEM menunjukkan bahwa pada konsentrasi NaOH 0,5 M menghasilkan partikel dengan ukuran terkecil yaitu 123 nm dan XRD menunjukkan bahwa partikel ZnO yang dihasilkan memiliki tingkat kristalinitas yang tinggi dengan ukuran kristal sebesar 47,1 nm. Hasil pengujian korosi baja karbon yang telah *dicoating* dengan partikel ZnO/Al(OH)₃ paling baik adalah pada komposisi 1:3 yang memberikan nilai laju korosi minimum yaitu sebesar 0,86 mpy.

Daftar Pustaka

- Conde, N.N., Dakhsi, K., Zouihri, H., Abdelouahdi, K., Laanab, L., Benaissa, M. & Jaber, B. (2011). Preparation of ZnO Nanoparticles without Any Annealing and Ripening Treatment. *Journal of Materials Science and Engineering A*, 1(7A), 985-990
- Dejun, K., Xuequana, D. & Jinchun, W. (2015). Effects of Anodic Oxidation on Corrosion Properties of Al Coating by Arc Spraying in Seawater. *J. of Surface and Interface Analysis*, 47(9), 911-918
- Demoisson, F., Piolet, R. & Bernard, F. (2014). Hydrothermal Synthesis of ZnO Crystals from Zn(OH)₂ Metastable Phases at Room to Supercritical Conditions. *Crystal Growth and Design*, 14(11), 5388-5396
- Dhokea, Sh.K., Khannaa, A.S. & Sinha, T.J.M. (2009). Effect of nano-ZnO particles on the corrosion behavior of alkyd-based waterborne coatings. *J. of Progress in Organic Coatings*, 64(4), 371-382
- Elsner, C.L., Cavalcanti, E., Ferraz, O. & Sarli, A.R.D. (2003). Evaluation of The Surface Treatment Effect on The Anticorrosive Performance of Paint Systems on Steel. *J. of Progress in Organic Coatings*, 48(2003), 50-62
- Forsgren, A. (2006). *Corrosion Control Through Organic Coating*. United States: CRC Press.
- Fujino, T., Miyamoto, M. & Noguchi, H. (2000). Formation of chemical conversion coatings with high corrosion-resistance on aluminum in strontium hydroxide by secondary dipping treatment. *J. of Japan Institute of Light Metals*, 50(2000), 486-490
- Jagtap, R.N., Patil, P.P. & Hassan, S.Z. (2008). Effect of Zinc Oxide in Combating Corrosion in Zinc-Rich Primer. *J. of Progress in Organic Coatings*, 63(4), 389-394
- Jařsková, V. & Kalendová, A. (2012). Anticorrosive Coatings Containing Modified Phosphates. *J. of Progress in Organic Coatings*, 75(4), 328-334
- Kumar, S.A, Balakrishnan, T., Alagar, M. & Denchev, Z. (2006). Development and Characterization of Silicone/Phosphorus Modified Epoxy Materials and Their Application as Anticorrosion and Antifouling Coatings. *J. of Progress in Organic Coatings*, 55(3), 207-217
- Mahdavian, M. & Attar M.M.. (2006). Another Approach in Analysis of Paint Coatings with EIS Measurement: Phase Angle at High Frequencies. *J. of Corrosion Science*, 48(12), 4152-4157
- Mende, L.S. & Driscoll, J.L.M. (2007). ZnO-Nanostructures, Defects, and Devices. *J. of Material. Today*, 10(5), 40-48

- Naderi, R., & Attar, M.M. (2009). Electrochemical Study of Protective Behavior of Organic Coating Pigmented With Zinc Aluminum Polyphosphate as a Modified Zinc Phosphate at Different Pigment Volume Concentrations. *J. of Progress in Organic Coatings*, 66(3), 314-320
- Peng, F., Li, H, Wang, D., Tian, P., Tian, Y., Yuan, G., Xu, D. & Liu, X. (2016). Enhanced Corrosion Resistance and Biocompatibility of Magnesium Alloy by Mg-Al Layered Double Hydroxide. *ACS Application Material Interfaces*, 8(51), 35033-35044
- Ramezanzadeh, B. & Attar, M.M. (2011). Studying The Effects of Micro and Nano Sized ZnO Particles on The Corrosion Resistance and Deterioration Behavior of an Epoxy-Polyamide Coating on Hot-Dip Galvanized Steel. *J. of Progress in Organic Coatings*, 71(2011), 314-328
- Rashvand, M. & Ranjbar, Z. (2013). Effect of nano-ZnO Particles on the Corrosion Resistance of Polyurethane-Based Waterborne Coatings Immersed in Sodium Chloride Solution via EIS Technique. *J. of Progress in Organic Coatings*, 76(10), 1413-1417
- Romo, L.E., Saade, H., Puente, B., L'opez, M.L., Betancourt, R., & L'opez, R.G. (2011). Precipitation of Zinc Oxide Nanoparticles in Bicontinuous Microemulsions. *Journal of Nanomaterials*, 2011(2011), 1-9
- Sun, L., Boo, W.J., Clearfield, A., Sue, H.J. & Pham, H.Q. (2008). Barrier Properties of Model Epoxy Nanocomposites. *J. of Membrane Science*, 318(1-2), 129-136
- Sun, M., Chen, Z., Bu, Y., Yu, J. & Hou, B. (2014). Effect of ZnO on The Corrosion of Zinc, Q235 Carbon Steel and 304 Stainless Steel Under White Light Illumination. *J. of Corrosion Science*, 82, 77-84
- Smith, W.F., & Hashemi, J. (2006). *Foundations of Materials Science and Engineering*, 4th edition. New York: McGraw-Hill
- Yang, L.H., Liu, F.C. & Han, E.H. (2005). Effects of P/B on the Properties of Anticorrosive Coatings with Different Particle Size. *J. of Progress in Organic Coatings*, 53(2), 91-98