

Simulasi Pengaruh Penambahan Aluminium dan Magnesium terhadap Anoda Korban Seng untuk Aplikasi Air Laut

Zaid Sulaiman

Universitas Nusa Putra

Korespondensi penulis: zaid.sulaiman@nusaputra.ac.id

Abstract. *The parameters of the anode potential and the corrosion rate have been used to determine the ideal composition of the addition of aluminum and magnesium. Multivariate regression using second-order polynomials was used to find the model. By contrasting the coefficient of determination, standard error of the estimate, and significant P-value, a viable model was identified. The anode potential is now significantly more negatively impacted by the addition of aluminum and magnesium, whereas the addition of magnesium and aluminum caused the corrosion rate to increase and decrease, respectively. The ideal anode, which has a corrosion rate of 38,88 mpy and an anode potential of -1,098 V, has been calculated when aluminum is added at a rate of 3% and magnesium at a rate of 0.1%.*

Keywords: *corrosion rate, potential anode, Zn-Al-Mg, regression polynomial multivariate*

Abstrak. Komposisi optimal penambahan aluminium dan magnesium dipilih berdasarkan parameter potensial anoda dan laju korosi. persamaan pemodelan yang telah dipilih adalah pemodelan dengan metode regresi polinomial orde 2 multivariate. Model yang sesuai ditentukan dengan membandingkan koefisien determinasi, standar estimasi eror, dan signifikansi nilai P. Penambahan aluminium dan magnesium menyebabkan potensial anode semakin lebih negatif, sedangkan penambahan magnesium dan aluminium meningkatkan dan menurunkan laju korosi. Anoda yang paling optimal telah ditentukan ketika penambahan aluminium 3% dan magnesium 0,1% yang mana menghasilkan laju korosi 38,88 mpy dan potensial anoda -1,098 V.

Kata kunci: Laju Korosi, Potensial Anoda, Zn-Al-Mg, Regresi Polinomial Multivariate

LATAR BELAKANG

Anoda seng dapat digunakan sebagai pelapis dan proteksi katodik pada logam yang akan diproteksi. Dalam proteksi katodik, paduan seng digunakan untuk melindungi lambung kapal yang telah dibuat dari baja dan aluminium (Park & Kim, 2020). Selain paduan seng, anoda korban yang dapat digunakan adalah paduan magnesium untuk lingkungan tanah dan paduan aluminium untuk lingkungan air laut. Ketiganya dipilih karena memiliki potensial korosi yang lebih negatif dibandingkan logam besi (Pedferri, 2018).

Received Januari 27, 2022; Revised Februari 02, 2022; Februari 22, 2022

* Zaid Sulaiman, zaid.sulaiman@nusaputra.ac.id

Saat ini anoda yang digunakan oleh paduan seng adalah logam seng murni dan paduan Zn-Al-Cd (DNVGL, 2017). Penambahan aluminium pada paduan seng dapat meningkatkan rapat arus pada paduan seng (Kaewmaneekul & Lothongkum, 2013). Adanya kadmium dalam paduan seng menyebabkan potensialnya lebih stabil bila digunakan pada lingkungan air laut (Yuan et al., 2010). Selain itu, penambahan keduanya bertujuan untuk menurunkan kadar besi pada paduan seng, karena penurunan kadar besi kurang dari 15 ppm dapat menghasilkan kinerja anoda korban yang lebih optimal (Goodwin, 2010). Namun, kadmium bersifat beracun dan karsinogenik (Dubent et al., 2010).

Magnesium dapat meningkatkan derajat kehalusan mikrostruktur pada paduan seng. Sehingga ukuran dendrit seng lebih kecil dan merata di permukaan (Krieg et al., 2014). Struktur mikro yang halus membuat produk korosi lebih seragam (Prosek et al., 2016). Selain itu, penambahan magnesium pada paduan seng dapat meningkatkan rapat arus pada paduan seng (Vida et al., 2017). Sehingga penambahan magnesium diharapkan dapat menurunkan kadar pengotor seperti kadmium dan besi. Aluminium dan magnesium memiliki kapasitas arus teoritis lebih besar dari seng, 2980, dan 2200 A.h/Kg, sedangkan kapasitas arus seng adalah 820 A.h/Kg (Pedefferri, 2018). penambahan paduan dengan kapasitas arus teoritis yang lebih tinggi dapat meningkatkan kapasitas arus teoritis suatu paduan (Muazu & Yaro, 2011). Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Prosek et. al (2016), Zn-5Al dan Zn-3Al-2Mg mengalami korosi yang lebih rendah dibandingkan seng murni ketika direndam dalam larutan NaCl.

Berdasarkan American Bureau of Shipping (2017) tentang proteksi katodik kapal, parameter penting untuk anoda yang dikorbankan adalah potensi proteksi dan kapasitas arus. Berdasarkan rumus laju korosi pada ASTM G31 (Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals, 2004) dan rumus kapasitas arus pada DNVGL RP-B401 (DNVGL, 2017), keduanya memiliki hubungan berbanding terbalik. Sehingga semakin rendah laju korosi akan memiliki kapasitas arus yang tinggi. Kemudian potensial proteksi harus antara -850mV sampai -1100 mV vs Ag/AgCl potensial proteksi dapat diamati melalui potensial pada anoda. Sehingga parameter yang digunakan untuk menentukan titik optimum dalam makalah ini adalah potensial anoda dan laju korosi pada anoda yang dikorbankan. Makalah ini akan membahas untuk menentukan optimasi penambahan magnesium dan aluminium pada paduan seng yang akan diterapkan pada lambung kapal di perairan laut.

SIMULASI PEMODELAN

Simulasi pengaruh penambahan aluminium dan magnesium pada paduan seng ditentukan dengan cara mengumpulkan data pada penelitian-penelitian sebelumnya, kemudian menentukan model, dan memilih titik optimum

1. Pengumpulan Data

Aplikasi lingkungan paduan seng pada penelitian kali ini adalah air laut. Sehingga data yang digunakan adalah penelitian-penelitian sebelumnya dengan lingkungan larutan NaCl. kemudian semua data di konversi menjadi laju korosi dengan satuan mpy, dan semua potensial anoda dikonversi menjadi electrode pembanding Ag/AgCl atau SSC.

2. Penentuan Model

Model ditentukan dengan software minitab 16 dengan metode regresi polynomial multivariate. Analisis regresi digunakan untuk menentukan hubungan antara variabel pengaruh dan variabel tidak berpengaruh, selain itu analisis ini bisa memprediksi nilai dari persamaan regresi. (Alexopoulos, 2010. Regresi multivariate digunakan untuk menganalisis dua variabel. Persamaan regresi multivariate dituliskan dengan:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n + \epsilon_i \quad (1)$$

Regresi polynomial digunakan ketika variabel respon tidak linear. Regresi polynomial multivariate dengan second-order adalah sebagai berikut:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2 + \epsilon_i$$

Dimana b_1 dan b_2 adalah pengaruh parameter, b_{11} dan b_{22} adalah parameter quadratic atau pengaruh interaksi antara variabel (Sinha, 2013). Kemudian memilih model yang sesuai dengan cara membandingkan koefisien determinasi, adjusted R^2 , standard error of estimate, dan nilai P pada kedua model (Filho et al., 2011). Dimana syarat dari model yang sesuai adalah koefisien determinasi dan adjusted R^2 yang tertinggi, standard error of estimate yang paling kecil, dan nilai-P nya $< 0,05$.

3. Pemilihan Titik Optimum

setelah model yang sesuai ditemukan. Titik optimal dipilih berdasarkan parameter anoda korban. Potensial anoda harus berkisar dari -0,85 V hingga -1,10 V vs Ag / AgCl. Selama aplikasinya, semakin lama anoda yang dikorbankan digunakan maka potensial anoda cenderung positif. jadi anoda yang dikorbankan yang dipilih adalah anoda potensial paling negatif dan kurang dari 1,10V. kemudian, anoda korban dipilih dengan laju korosi yang rendah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data ini telah dipublikasikan oleh beberapa referensi yang telah meneliti tentang laju korosi dan potensi anoda pada paduan seng anoda korban. Data pada Tabel 1 merupakan data yang telah diubah menjadi satuan mpy untuk laju korosi dan vs SSC untuk anoda potensial.

Table 1 Data Laju Korosi Dan Potensial Anoda

Composition			Corrosion Rate (mpy)	Ecorr (V) VS SSC	Reference
Zn	Al	Mg			
94,9	5,1	0	14,39083	-1,152	
94,9	5,1	0	28,78166	-1,162	
94,8	5,2	0	28,78166	-1,162	
94,9	3,1	2	77,71048	-1,172	
94,9	3	2,1	66,19782	-1,162	(Prosek et al., 2016)
94,8	3,2	2	46,05066	-1,162	
100	0	0	250,4004	-1,142	
93,9	0	6,1	365,5271	-1,162	
0	100	0	17,269	-1,232	
83,8	0	16,2	391,4306	-1,152	
93	4	3	11,60477		
90	7	3	9,670638		
86	11	3	8,289118		(Morimoto et al., 2003)
89	11	0	29,01191		
88	11	1	16,57824		
86	11	3	8,289118		
99,5	0,5		48		
99,4	0,5	0,1	28,7		(Low et al., 2015)
99,2	0,5	0,3	16,6		
95,79	2,72	1,49	15,93807		
95,77	2,72	1,51	19,86484		(Wint et al., 2019)
95,82	2,67	1,51	17,70897		
99	0	1		-1,0024	
98	0	2		-1,0084	(Krieg et al., 2014)
97	0	3		-1,0094	
98,8	0	1,2		-0,925	(Vida et al., 2017)
98	0	2		-0,952	

1. Potensial anoda

Dari data pada Tabel 1, pemodelan untuk potensial anoda seperti pada Tabel 2.

Table 2 Pemodelan Untuk Potensial Anoda

Model	Modeling	R ²	adj R ²	S	Significant (P-value)
1	Y = -1,0582 - 0,001877 Al - 0,00463 Mg - 0,01457 Al*Mg	35,77%	18,25%	0,086	0,166
2	Y = -1,0006 - 0,0129 Mg - 0,0323 Al + 0,000245 MgMg + 0,0003 AlAl - 0,00495 MgAl	66,14%	47,33%	0,069	0,049

Menurut King (Filho et al., 2011), model yang cocok dapat ditentukan dengan membandingkan model. dengan membandingkan R², *adjusted* R², kesalahan standar pendugaan (S pada Tabel 2), dan nilai-P signifikan. Jika dibandingkan dengan model pertama, model kedua memiliki R² dan *adjusted* R² yang lebih tinggi, standar error estimasi yang lebih rendah, dan nilai-P yang signifikan yang dibuktikan dengan nilai-P<0,05. Jadi, model kedua memiliki model regresi yang sesuai.

Table 3 Hasil Pengujian T untuk Potensial Anoda

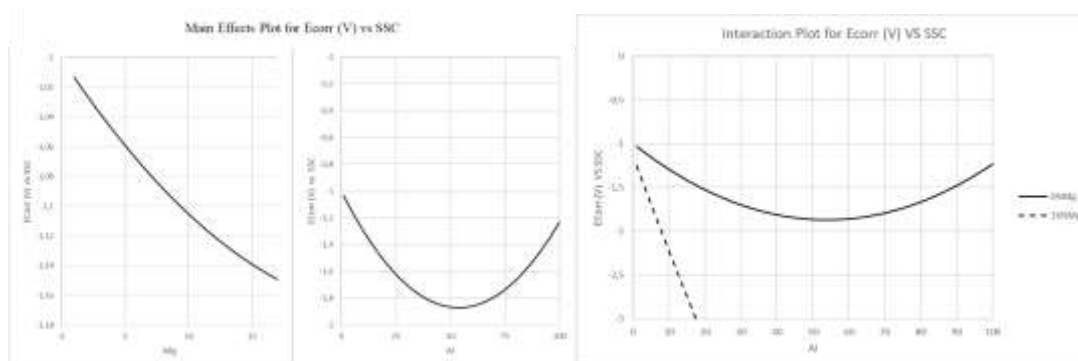
Order 2			
Term	T	P	
Constant	-21,82	0,000	
Al	-2,59	0,029	
Mg	-0,59	0,572	
Mg*Mg	0,14	0,889	
Al*Al	2,47	0,036	
Mg*Al	-0,77	0,46	

Variabel yang berpengaruh signifikan dijelaskan pada Tabel 3. Variabel aluminium dan variabel interaksi antar aluminium berpengaruh signifikan terhadap potensial anoda, hal ini dibuktikan dengan nilai P<0,05. Sedangkan variabel lain tidak berpengaruh signifikan terhadap potensial anoda.

Gambar 1 a) menunjukkan efek utama penambahan magnesium dan aluminium pada potensial anoda. penambahan aluminium dan magnesium membuat potensial anoda cenderung negatif. Gambar 1 b) menunjukkan bahwa kedua garis tidak berpotongan. Telah dijelaskan bahwa tidak ada interaksi antara variabel aluminium dan magnesium, atau kedua variabel tersebut tidak saling mempengaruhi.

Standar potensial (vs SHE) untuk aluminium, magnesium dan seng adalah -1,660, -2,360 dan -0,760 V(Pedferri, 2018). Berdasarkan standar potensial, potensi aluminium dan magnesium lebih negatif daripada seng. Potensial anoda paduan seng lebih negatif

karena penambahan aluminium dan magnesium yang memiliki potensi standar lebih negatif. dalam jurnal yang sama diterbitkan, fase kaya Mg memiliki elektronegativitas lebih tinggi daripada matriks seng. Mereka membentuk lokasi anodik dan larut secara istimewa (Prosek et al., 2016). Paduan seng yang lebih negatif karena aluminium juga telah dipublikasikan (Kaewmaneekul & Lothongkum, 2013).



Gambar 1 kiri) pengaruh utama setiap variabel, kanan) plot interaksi antara variabel pada potensial anoda

2. Laju Korosi

Dari data pada Tabel 1, pemodelan laju korosi seperti pada Tabel 4.

Tabel 4 Pemodelan laju korosi

Model	Modeling	R ²	adj R ²	S	Significant (P-value)
1	$Y = 48,8 - 0,397 Al + 23,84 Mg - 4,15 Al * Mg$	66,44%	60,85%	70,35	0,000
2	$Y = 50,9 - 5,04 Al + 39,5 Mg + 0,0471 Al * Al - 1,09 Mg * Mg - 4,20 Al * Mg$	70,20%	60,88%	70,32	0,001

Untuk model laju korosi, kedua model memiliki pengaruh yang signifikan karena P-value < 0,05. namun, model kedua memiliki R² dan *adjusted* R² yang lebih tinggi, memiliki standar perkiraan yang lebih rendah daripada model pertama. Jadi model laju korosi telah dipilih oleh model kedua. Model untuk mengetahui pengaruh penambahan aluminium dan magnesium terhadap laju korosi adalah model regresi polinomial multivariat orde dua.

Tabel 5 Hasil Pengujian T untuk Potensial Anoda

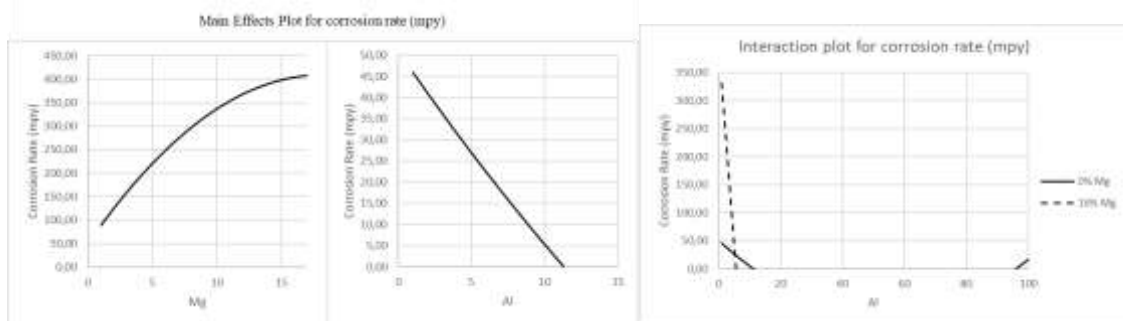
Ordo 2		
Term	T	P
Constant	-1,558	0,139
Mg	-1,377	0,187
Al	-1,546	0,142
Mg*Mg	-0,963	0,35
Al*Al	0,701	0,493
Mg*Al	-1,526	0,147

Dari hasil analisis variabel (ANOVA), tidak ada satupun variabel yang memiliki pengaruh signifikan terhadap laju korosi. hal ini ditunjukkan pada Tabel 5 dimana tidak ada nilai P kurang dari 0,05.

Pengaruh utama penambahan aluminium dan magnesium dijelaskan pada Gambar 2 a) pengaruh utama dan b) plot interaksi laju korosi. Penambahan magnesium dapat meningkatkan laju korosi, sedangkan efek utama penambahan aluminium adalah menurunkan laju korosi.

Peningkatan laju korosi disebabkan oleh peningkatan kandungan magnesium yang mengurangi daerah kaya Zn yang merupakan daerah yang lebih mulia. Sehingga daerah anodik akan bertambah. Selain itu, kandungan magnesium juga mengurangi ketahanan korosi. sehingga penambahan magnesium pada paduan seng lebih mudah mengalami korosi (Vida et al., 2017).

Aluminium memiliki efek mengurangi laju korosi. pengurangan laju korosi yang disebabkan oleh adanya aluminium mendorong pembentukan dasar seng klorida $Zn_5Cl_2(OH)_8 \cdot H_2O$ (simonkolleite) dalam lingkungan Cl^- (Rosalbino et al., 2009). Simonkolleite sedikit larut dalam air, dan produk korosi seng yang paling stabil terkena lingkungan klorida pada pH netral (Lee et al., 2019). Selain itu, kehadiran aluminium menghambat pasivasi paduan Zn-Al dan meningkatkan kerapatan arus pasif (Kaewmaneekul & Lothongkum, 2013). sehingga diperlukan penambahan aluminium untuk meningkatkan unjuk kerja paduan seng anoda korban.



Gambar 1 kiri) pengaruh utama setiap variabel, kanan) plot interaksi antara variabel pada laju korosi

3. Komposisi Optimum

Dari pemodelan potensial anoda, didapatkan potensial anoda tidak lebih dari -1100 mV ketika ditambahkan aluminium dan magnesium pada kisaran 0-3.1 Al dan 0-8.5 Mg. Dengan kisaran komposisi tersebut, laju korosi terendah dicari dengan regresi polinomial multivariat orde dua. Laju korosi terkecil adalah 38,88 mpy pada komposisi 3% aluminium dan 0,1% magnesium dengan potensial anoda -1,098 mV vs Ag/AgCl. Berdasarkan literatur, paduan Zn-3Al-0,1Mg memiliki dendrit primer fasa , eutektik terner terdiri dari partikel larutan padat Mg_2Zn_{11} dan α/β Zn-Al (Prosek et al., 2016)(Raghavan, 2007).

Berdasarkan pemodelan termodinamika menggunakan perangkat lunak Hydra-Medusa, dalam lingkungan larutan berair yang mengandung Zn^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} dan CO_3^{2-} atau pada suhu $25^\circ C$. Hasilnya menunjukkan bahwa ion Mg^{2+} lebih disukai mengendap dengan karbonat atau sulfat. sehingga menurunkan konsentrasi ion karbonat atau sulfat dan menstabilkan simonkolleite pelindung (Vu, 2013). Namun berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Prosek et. al.(2016), paduan yang memiliki volume fase Mg_2Zn_{11} rendah memiliki laju korosi yang lebih rendah. Sehingga penambahan magnesium dalam lingkungan NaCl tidak secara signifikan meningkatkan kinerja seng.

Penambahan aluminium dapat menurunkan laju korosi paduan seng, penurunan laju korosi ini disebabkan adanya lapisan simonkolleite (Rosalbino et al., 2009). fase yang kaya akan aluminium memiliki laju korosi yang relatif rendah. Fase ini merupakan tempat yang lebih efisien untuk reaksi katodik dan dapat bertindak sebagai penghalang terhadap perambatan korosi. Selain itu, daerah terkorosi antara laminar dapat menyimpan produk korosi, dan menunda korosi lapisan bawahnya pada paduan seng (Liu et al., 2013). Hal ini sesuai dengan penelitian Prosek et al. (2016), bahwa paduan Zn-Al dan Zn-Al-Mg memiliki laju korosi yang lebih rendah daripada seng murni. Namun, penambahan aluminium membuat potensi paduan seng semakin negatif. Menurut ABS (2017), kriteria potensi proteksi paling negatif adalah $-1,0 V$ vs Ag/AgCl, jika lebih negatif dari itu akan menyebabkan evolusi hidrogen atau biasa dikenal dengan overprotection (Pedferri, 2018). Sehingga penambahan aluminium menurunkan laju korosi tetapi penambahan tersebut tidak boleh menyebabkan potensial menjadi lebih negatif $-1,0 V$.

KESIMPULAN DAN SARAN

Dalam makalah ini dapat disimpulkan bahwa pemodelan laju korosi dan potensial anoda menggunakan metode regresi polinomial multivariat orde dua. Selain itu, paduan zinc anoda korban yang optimum adalah penambahan aluminium 3% dan magnesium 0,1%.

DAFTAR REFERENSI

- Alexopoulos, E. (2010). Introduction to Multivariate Regression Analysis. *HIPPOKRATIA*, 14(1), 23–28.
- American Bureau of Shipping. (2017). *Guidance Notes on Cathodic Protection of SHIPS*.
- DNVGL. (2017). *RECOMMENDED PRACTICE CATHODIC PROTECTION DESIGN*. June.
- Dubent, S., Mertens, M. L. A. D., & Saurat, M. (2010). Electrodeposition, characterization and corrosion behaviour of tin-20 wt.% zinc coatings electroplated from a non-cyanide alkaline bath. *Materials Chemistry and Physics*, 120(2–3), 371–380. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2009.11.017>
- Filho, D. B. F., Silva, J. A., & Rocha, E. (2011). What is R2 all about? *Leviathan – Cadernos de Pesquisa Política*, 3, 60–68. <https://doi.org/10.11606/issn.2237-4485.lev.2011.132282>
- Goodwin, F. E. (2010). *Corrosion of Zinc and its Alloys* (B. Cottis, M. Graham, R. Lindsay, S. Lyon, T. Richardson, D. Scantlebury, & H. B. T.-S. C. Stott (eds.); pp. 2078–2093). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-044452787-5.00100-1>
- Kaewmaneeekul, T., & Lothongkum, G. (2013). Effect of aluminium on the passivation of zinc-aluminium alloys in artificial seawater at $80^\circ C$. *Corrosion Science*, 66, 67–77.
- Krieg, R., Vimalanandan, A., & Rohwerder, M. (2014). Corrosion of Zinc and Zn-Mg Alloys with

- Varying Microstructures and Magnesium Contents. *Journal of The Electrochemical Society*, 161(3), C156–C161.
- Lee, H.-S., Singh, J. K., Ismail, M. A., Bhattacharya, C., Seikh, A. H., Alharthi, N., & Hussain, R. R. (2019). Corrosion mechanism and kinetics of Al-Zn coating deposited by arc thermal spraying process in saline solution at prolong exposure periods. *Scientific Reports*, 9(1), 3399. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39943-3>
- Liu, Y., Li, H., & Li, Z. (2013). EIS investigation and structural characterization of different hot-dipped zinc-based coatings in 3.5% NaCl solution. *International Journal of Electrochemical Science*, 8(6), 7753–7767.
- Low, H. T., Hamzah, E., Farahany, S., Bakhsheshi-Rad, H. R., & Cho, M. H. (2015). Effect of cooling rate on the corrosion behaviour of Zn-Al and Zn-Al-Mg alloy. *Materials Science Forum*, 819, 71–75. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.819.71>
- Morimoto, Y., Honda, K., Nishimura, K., Tanaka, S., Takahashi, A., Shindo, H., & Kurosaki, M. (2003). Excellent corrosion-resistant Zn-Al-Mg-Si alloy hot-dip galvanized steel sheet “SUPER DYMA.” *Nippon Steel Technical Report*, 2371(87), 24–26.
- Muazu, A., & Yaro, S. A. (2011). Effects of Zinc Addition on the Performance of Aluminium as Sacrificial Anode in Seawater. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 10(02), 185–198.
- Park, I.-C., & Kim, S.-J. (2020). Determination of Corrosion Protection Current Density Requirement of Zinc Sacrificial Anode for Corrosion Protection of AA5083-H321 in Seawater. *Applied Surface Science*, 509(January), 145346. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145346>
- Pedefferri, P. (2018). *Corrosion Science and Engineering* (L. Lazzaro & M. P. Pedefferri (eds.)). Springer International Publishing.
- Prosek, T., Hagström, J., Persson, D., Fuertes, N., Lindberg, F., Chocholatý, O., Taxén, C., Šerák, J., & Thierry, D. (2016). Effect of the microstructure of Zn-Al and Zn-Al-Mg model alloys on corrosion stability. *Corrosion Science*, 110, 71–81.
- Raghavan, V. (2007). Al-Mg-Zn (Aluminum-Magnesium-Zinc). *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 28(2), 203–208. <https://doi.org/10.1007/s11669-007-9029-6>
- Rosalbino, F., Angelini, E., Macciò, D., Saccone, A., & Delfino, S. (2009). Application of EIS to assess the effect of rare earths small addition on the corrosion behaviour of Zn-5% Al (Galfan) alloy in neutral aerated sodium chloride solution. *Electrochimica Acta*, 54, 1204–1209.
- Sinha, P. (2013). Multivariate Polynomial Regression in Data Mining: Methodology, Problems and Solutions. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(12), 962–965.
- Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals. (2004). *Astm G31-72 (Reapproved 2004)*.
- Vida, T. A., Freitas, E. S., Cheung, N., Garcia, A., & Osório, W. R. (2017). Electrochemical corrosion behavior of as-cast Zn-rich Zn-Mg alloys in a 0.06M NaCl solution. *International Journal of Electrochemical Science*, 12(6), 5264–5283.
- Vu, T. N. (2013). *Selective dissolution from Zn-Al alloy coatings on steel*. Université Pierre et Marie Curie.
- Wint, N., Cooze, N., H. Sullivan, J., William, G., & N. McMurray, H. (2019). The Effect of Microstructural Refinement on the localized Corrosion of model Zn-Al-Mg alloy coatings on steel. *Journal of The Electrochemical Society*, 166(11), C3147–C3158. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2018.02.027>.This
- Yuan, C., Liang, C., & An, X. (2010). Electrochemical performance of high purity zinc and Zn-Al-Cd alloy as reference electrodes. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 15(1), 64–70.