

## KOROSI BAJA DI MUARA BARU JAKARTA DAN INDRAMAYU DENGAN SIMULASI PASANG SURUT UJI WET-DRY

CORROSION OF STEEL IN MUARA BARU JAKARTA AND INDRAMAYU WITH SIMULATION IN THE WET-DRY TEST

Gadang Priyotomo<sup>1,\*</sup>, Siska Prifiharni<sup>1</sup>, Lutviasari Nuraini<sup>1</sup>, Sundjono<sup>1</sup>, Ibrahim Purawiardi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Pusat Penelitian Metalurgi & Material, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia  
Kawasan PUSPIPTEK, Gd.470, Setu, Tangerang Selatan, Banten, 15314, Indonesia

<sup>2</sup>Pusat Penelitian Fisika, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia  
Kawasan PUSPIPTEK, Gd.470, Setu, Tangerang Selatan, Banten, 15314, Indonesia

\*Corresponding author e-mail: gadangp@gmail.com

Submitted: 09 Januari 2019 / Revised: 04 Juni 2019 / Accepted: 27 Juni 2019

<http://doi.org/10.21107/jk.v12i1.4800>

### ABSTRACT

The corrosive destruction of steel as material of maritime infrastructure had been investigated using simulated wet-dry test, loss weight, energy dispersive X-Ray spectroscopy (EDS) and X-ray diffraction (XRD) in seawater solutions of Muara Baru, Jakarta; Karangsong and Eretan regions, Indramayu. Controlled solution used as the comparison of natural seawater are 3,5% NaCl and 5% NaCl. The results shows that uniform corrosion took place on carbon steel after the exposure. The resistance of corrosion increases rapidly on the first 7 days, then decreases with increasing exposure time. The effect of conductivity, salinity and total dissolved solids (TDS) of test solutions for steel corrosion process was almost same at each interval of exposure time. The decrease of dissolved oxygen (DO) enhances corrosion rate on the first 7 days, which indicated the formation of oxide layer as the further barrier of corrosion process. The role of high concentration for chloride ion increases corrosion rate after 7 days of exposure time, which interfere the forming of stable oxide layer on the metal surface. That interference induces corrosion rate tends to increase again. The compound of  $\gamma$  FeO(OH) (Lepidrococite) formed as predominant corrosion product.

**Keywords :** Corrosion, Infrastructure, steel, seawater, salinity, dissolved oxygen

### ABSTRAK

Kerusakan akibat korosi baja sebagai material Infrastruktur maritim diinvestigasi menggunakan uji simulasi Wet-Dry, kehilangan berat, energy dispersive X-Ray spectroscopy (EDS) dan X-ray diffraction (XRD) dalam media air laut Muara Baru Jakarta, Karangsong dan Eretan, Indramayu. Larutan kontrol digunakan sebagai perbandingan air laut alami yaitu 3,5% NaCl dan 5% NaCl. Hasil penelitian menyatakan bahwa kerusakan merata korosi terjadi pada Baja setelah ekspos. Ketahanan korosi meningkat cepat pada 7 hari pertama kemudian menurun seiring dengan meningkatnya waktu ekspos. Pengaruh nilai konduktivitas, salinitas dan total dissolved solid (TDS) terhadap proses korosi baja hampir sama di setiap waktu ekspos. Penurunan oksigen terlarut meningkatkan laju korosi pada 7 hari pertama, mengindikasikan pembentukan lapisan oksida sebagai penahan laju korosi lebih lanjut. Peran ion klorida yang tinggi, meningkatkan laju korosi setelah 7 hari waktu ekspos, mengganggu terbentuknya lapisan stabil oksida di permukaan logam. Gangguan tersebut menyebabkan laju korosi cenderung akan meningkat kembali. Senyawa  $\gamma$  FeO(OH) (Lepidrococite) terbentuk sebagai senyawa utama produk korosi.

**Kata kunci:** Korosi, Infrastruktur, baja, Air laut, Salinitas, Oksigen terlarut

### PENDAHULUAN

Melalui cara pandang bidang teknik material, air laut merupakan media yang mengganggu fungsi sebagian besar material dengan

melemahkan struktur dan komponen mesin terekspos melalui proses korosi (Diego A. Fischer *et al.*, 2016). Lebih jauh lagi, Logam baja merupakan material digunakan sebagai infrastruktur pantai dan lepas pantai

dikarenakan keunggulan kekuatan mekanik yang baik, mudah dimanufaktur, mampu las, mampu bentuk dan harga yang tidak mahal. Namun, seiring waktu, struktur yang terpapar air laut mengalami penurunan secara fungsi dan rentan terjadinya kerusakan. Oleh karena itu, prediksi atau estimasi dampak air laut terhadap material logam baja sangat diperlukan pada desain struktur yang bersentuhan dengan media air laut sebagai contoh dermaga, jembatan, perpipaan, struktur minyak lepas pantai, dan lain-lain (Robert E. Melchers, 2005).

Lebih jauh lagi, lingkungan korosif laut umumnya dibagi 5 zona antara lain atmosfer, daerah percikan (*splash*), pasang surut, immersi dan zona lumpur laut. Hasil investigasi peneliti Tiongkok mengungkapkan bahwa kerusakan struktur logam baja daerah pasang surut lebih besar dibandingkan daerah immersi dan atmosfer, namun tertinggi di zona percikan (Wu *et al.*, 2017). Disisi lain, kandungan airlaut merupakan senyawa kimia kompleks yang dipengaruhi oleh faktor-faktor antara lain konsentrasi dan akses oksigen terlarut, salinitas, konsentrasi ion-ion minor, aktivitas biologi dan polutan (ASM 1987). Fenomena korosi yang terendam di air laut juga dipengaruhi oleh beberapa faktor tersebut (Bhosle *et al.*, 1992). Air laut alami umumnya tidak mudah disimulasikan di laboratorium untuk uji korosi logam dikarenakan terjadi perubahan sifat. Sebagai tambahan, larutan 3.5% NaCl biasanya digunakan untuk tujuan tersebut dikarenakan lebih korosif dibandingkan air laut alami pada baja karbon (Jones, 1992). Beberapa penelitian terhadap korosivitas baja di air laut telah dilakukan khususnya di sub tropis khususnya investigasi pengaruh korosi baja terhadap parameter fisik air laut antara lain oksigen terlarut, salinitas, konduktivitas, padatan terlarut total, dan lainnya (Durodola *et al.*, 2011 ; Al-Moubaraki *et al.*, 2015 ; Temperley, 1965). Beberapa penelitian lainnya yang sama juga dilakukan di daerah tropis negara malaysia (Wan Nik *et al.*, 2011) and negara Indonesia (Nuraini *et al.*, 2017 ; Sundjono *et al.*, 2018). Sebagai tambahan, penelitian terdahulu telah juga menjelaskan peran lingkungan air laut khususnya kadar salinitas tinggi menyebabkan

terjadinya korosi parah yang terparah pada logam baja sebagai material infrastruktur pantai (Gadang *et al.*, 2018).

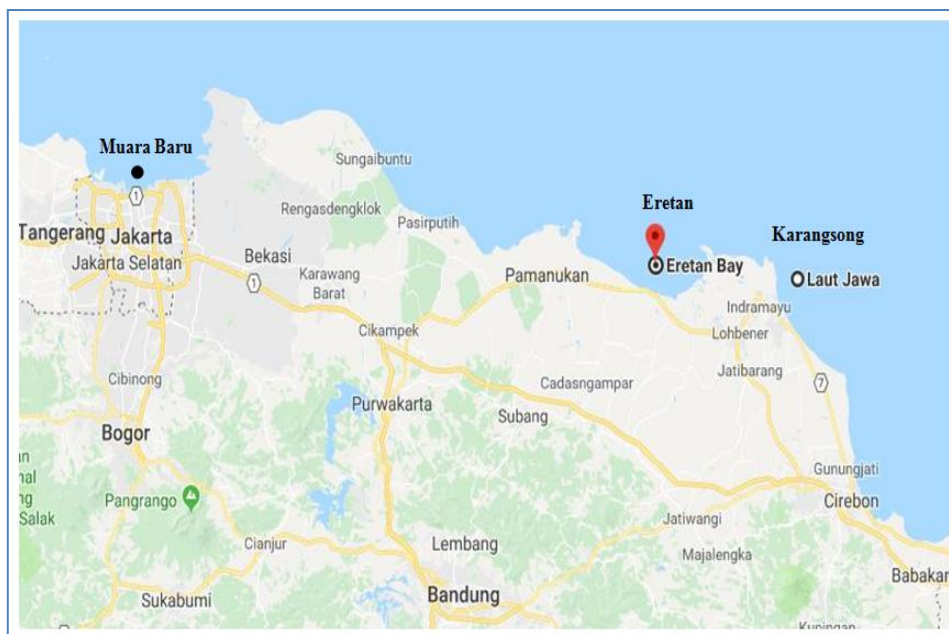
Penelitian kerusakan logam baja juga mempertimbangkan kondisi pasang surut suatu wilayah, dimana waktu kebasahan suatu logam juga mempengaruhi tingkat kerusakan suatu logam. Pada kondisi pasang surut air laut, kerusakan logam infrastruktur baja lebih parah dibandingkan kerusakan di lingkungan terendam penuh (Wu *et al.*, 2017), dimana kadar oksigen (kondisi pasang surut) lebih besar dibandingkan kondisi terendam penuh. Proses korosi merupakan proses elektrokimia, dimana reaksi anodik (daerah anoda) dan katodik (daerah katoda) terjadi. Reaksi katodik membutuhkan oksigen untuk mereduksi air ( $H_2O$ ), dimana membutuhkan elektron hasil proses oksidasi (reaksi anodik). Peningkatan laju reaksi katodik akan meningkatkan laju reaksi anodik, dimana logam baja akan terlarut dan lepas dari *bulk* baja.

Disisi lain, penelitian perilaku korosi logam baja pada kondisi pasang surut sedikit jumlahnya di Indonesia khususnya di daerah tropis pantai utara jawa barat dan Jakarta. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah menjelaskan perilaku korosi logam baja sebagai material infrastruktur pantai dan lepas pantai dengan kondisi pasang surut terkontrol berbagai daerah di Indonesia.

## MATERI DAN METODE

### A. Preparasi sampel

Spesimen dibuat dari bahan pelat yang dibentuk dengan dimensi panjang 2 cm, lebar 2 cm dan tebal 0,1 cm). Sebelum pengujian utama, produk karat, lemak, debu dan lainnya pada spesimen logam harus dihilangkan dengan metode *pickling* berdasarkan standar *American Standard Testing Machine* (ASTM) G1-03. Setelah itu, spesimen dibersihkan dengan larutan aseton, dicuci dengan air distilasi, dikeringkan dan disimpan dalam desikator vakum. Setiap sampel uji ditimbang berat awal. Media air laut sebagai media lingkungan korosif baja diambil di berbagai daerah antara lain daerah Karangsong, Eretan dan Muara Baru yang terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi pengambilan media air laut di berbagai daerah Muara Baru, Jakarta; Eretan, Indramayu dan Karangsong,Indramayu

Sebagai tambahan, larutan kontrol juga digunakan sebagai referensi antara lain larutan 3,5% NaCl dan 5% NaCl. Komposisi

unsur kimia baja karbon terlihat pada Tabel 1, dimana sama dengan penelitian sebelumnya ( Gadang *et al.*, 2018)

Tabel 1. Komposisi kimia (wt%) pada sampel uji baja (Gadang et.al.,2018)

Unsur	Prosentase
Karbon (C)	0,051
Mangan (Mn)	0,73
Silikon (Si)	0,126
Sulfur (S)	0,004
Fosfor(P)	0,016
Besi (Fe)	Sisa

### B. Pengujian simulasi wet-dry terkontrol

Alat uji simulasi *wet-dry* terkontrol merupakan alat modifikasi laboratorium dengan pengontrol waktu, dimana pengontrolan waktu kering (dry) dan waktu basah (wet). Waktu kebasahan terjadi saat spesimen tercelup penuh di dalam larutan uji dan waktu kering saat spesimen terpapar udara terbuka. Setiap sampel uji digantung dengan menggunakan tali. Posisi bak kotak yang berisi larutan uji

ditempatkan sejajar dengan sampel uji. Pengaturan fluktuasi waktu uji yaitu 8 jam waktu rendam dan 4 jam waktu ekpos udara secara simultan. Interval waktu ekpos adalah 7, 14 dan 21 hari. Setiap pengurangan level ketinggian media larutan di bak harus ditambahkan air distilasi selama pengujian berlangsung sehingga konsistensi konsentrasi larutan uji terjaga.



Gambar 2. Pengujian simulasi laboratorium uji *wet-dry* terkontrol

### C. Analisa kehilangan berat

Sampel uji yang telah disimpan di desikator vakum, dilakukan penimbangan berat sebagai data berat awal sebelum ekspos dengan menggunakan timbangan analitik (akurasi  $\pm 0.0001$  gram). Kemudian sampel uji direndam di dalam bak berisi air laut dari daerah perairan Karangsong dan Eretan. Di sisi lain, sampel juga direndam dalam Larutan kontrol. Setiap sampel uji diambil dengan interval waktu yang telah dideskripsikan di atas hingga 21 hari. Setiap interval pengambilan, sebelum ditimbang sebagai berat akhir, sampel uji dibersihkan dengan air distilasi dan dilakukan proses *pickling* berstandar ASTM G1-03 untuk menghilangkan semua produk karat di permukaan sampel. Setelah itu, dibersihkan kembali dengan air distilasi, keringkan dan timbang sebagai data berat akhir.

Dasar pengukuran kehilangan berat dilakukan karena kerusakan logam baja sebagai bahan infrastruktur laut terjadi akibat korosi merata (Ismail *et al.*, 2014 ; Gadang *et al.*, 2018). Istilah korosi merata pada logam menjelaskan bahwa kerusakan karat terjadi merata di

seluruh permukaan infrastruktur logam baja. Oleh karena itu, perhitungan laju korosi suatu logam dilakukan dengan mempertimbangkan bentuk korosi yang merata di seluruh permukaan sampel uji. Laju korosi adalah suatu nilai kecepatan kerusakan logam akibat lingkungan sekitarnya, dimana lingkungan riset ini di perairan laut tropis. Salah satu metode perhitungan nilai laju korosi yang mudah adalah kehilangan berat, dimana rumus tersebut terlihat di bawah ini (Afolabi *et al.*, 2014)

Perhitungan laju korosi spesimen dilakukan setelah proses pengambilan kupon selesai setiap interval waktu. Data kehilangan berat diperhitungkan melalui persamaan :

$$\begin{aligned} \text{Kehilangan berat } (\Delta W) \\ &= \text{Berat awal } (W_i) \\ &\quad - \text{Berat akhir } (W_f) \end{aligned}$$

Nilai kehilangan berat diperhitungkan melalui persamaan laju korosi (corrosion rate) di bawah ini :

$$\text{Laju Korosi} = \frac{\Delta w \text{ (gr)}. K}{\text{Densitas logam } \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}\right) \times \text{Luas permukaan sampel (cm}^2\text{)} \times \text{waktu ekspos (jam)}}$$

K merupakan konstanta dengan nilai  $3,45 \times 10^6$

### D. Pengukuran parameter air laut dan permukaan sampel uji

Pengukuran parameter air dilakukan sebelum dan sesudah ekspos. Pengukuran parameter air menggunakan alat HACH HQ40d *Advanced Portable Meter*, dimana data yang diambil antara lain oksigen

terlarut, konduktivitas, *total dissolved solids* (TDS) dan salinitas. Pengukuran tersebut dilakukan sebelum dan setelah pengambilan sampel uji. Disamping itu, pengukuran kondisi udara sekitar alat uji simulasi dilakukan setiap hari antara lain data temperatur udara dan kelembaban relatif udara. Setiap pengambilan sampel uji, sebelum dilakukan proses

pembersihan berstandar ASTM G1-03. Lebih jauh lagi, pengamatan berskala mikro lebih lanjut menggunakan alat *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk melihat morfologi fisik produk karat di permukaan sampel. Analisa unsur kimia produk korosi di permukaan sampel uji dilakukan dengan menggunakan alat *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS). Karakterisasi senyawa produk karat di permukaan sampel setelah ekspos juga dilakukan dengan menggunakan X-Ray Diffraction (XRD).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

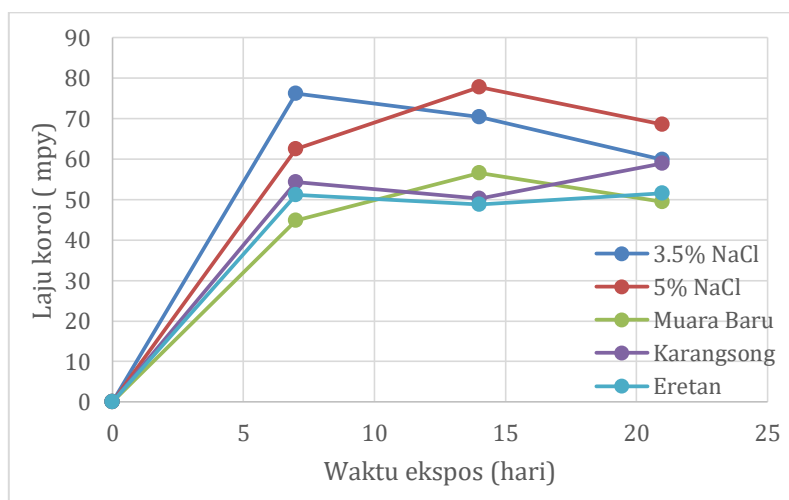
### A. Analisa Kehilangan berat

Gambar 3 memperlihatkan kurva laju korosi logam baja sebagai bahan infrastruktur kelautan dengan variasi waktu rendam hingga 21 hari di berbagai larutan uji melalui metode basah-kering (*wet-dry*). Umumnya, laju korosi baja di dalam larutan kontrol (3,5% NaCl dan 5% NaCl) lebih tinggi dibandingkan

Seiring waktu ekspos berjalan hingga 21 hari, laju korosi baja dalam variasi larutan uji mengalami penurunan. Penurunan laju korosi baja dihubungkan dengan pembentukan film pasif di permukaan logam sebagai lapisan proteksi untuk melindungi serangan korosi lebih lanjut (Eyu et al., 2016). Di sisi lain, pada waktu ekspos 7 hari dan 21 hari, laju korosi baja di daerah Karangsong lebih tinggi dibandingkan daerah Eretan dan Muara Baru, kecuali di waktu ekspos 14 hari. Anion klorida di dalam larutan NaCl dapat bersenyawa bersama kation logam hasil reaksi anodik membentuk senyawa kompleks mudah larut, yang dapat meningkatkan reaksi elektrokimia dan laju korosi secara cepat (Mousa may, 2016).

laju korosi baja di dalam variasi larutan air laut tiga daerah. Penyebab laju korosi baja di air laut lebih rendah dibandingkan dengan larutan kontrol adalah keberadaan senyawa lainnya seperti kalsium karbonat yang dapat mengurangi laju korosi baja di air laut, dimana lapisan tersebut menempel sebagai lapisan pelindung permukaan baja (Möller et al., 2006). Lebih jauh lagi, laju korosi baja dalam 5 variasi larutan meningkat secara signifikan pada 7 dan 14 hari pertama ekspos sebagai tahap inisiasi. Tahap inisiasi merupakan tahan dimana reaksi elektrokimia berjalan sangat cepat, dimana reaksi oksidasi (anoda) dan reaksi reduksi (katodik) berlangsung. Sebagai tambahan, reaksi elektrokimia tersebut membutuhkan peranan oksigen (reaksi reduksi) dan ion klorida (Sundjono et al., 2018 ; Ismail et al., 2014), dimana proses tersebut akan dijelaskan di sub bab berikutnya.

Sebagai tambahan, peranan utama oksigen juga berkontribusi untuk meningkatkan nilai laju korosi di fase awal (7 hari waktu ekspos) dan membentuk lapisan pasif, namun keberadaan senyawa ion klorida dapat memecahkan lapisan protektif baja (Sundjono et al., 2018). Disisi lain, keberadaan konsentrasi tinggi senyawa magnesium hidroksida dan kalsium karbonat di dalam air laut dapat menurunkan laju korosi sebagai endapan protektif (Xiangyu Hou et al., 2017). Oleh karena itu, efek negatif anion klorida dapat diturunkan dengan kehadiran senyawa lainnya di dalam air laut, bukan pada kedua larutan kontrol.



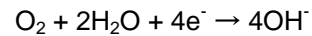
Gambar 3. Kurva laju korosi logam baja sebagai fungsi dari waktu ekspos dalam variasi larutan 3,5% NaCl, 5% NaCl, air laut Muara Baru, Jakarta, air laut Karangsong, indramayu dan air laut Eretan, Indramayu.

Lebih jauh lagi, Gambar 3 memperlihatkan laju korosi baja dengan kondisi permukaan sampel uji basah dan kering secara simultan, untuk mensimulasikan kondisi pasang surut air laut. Laju korosi baja di air laut sub tropis dengan metode simulasi basah dan kering lebih tinggi dibandingkan dengan laju korosi baja terendam penuh, dikarenakan keberadaan konsentrasi oksigen di metode basah dan kering dibandingkan terendam penuh (Wu *et al.*, 2017). Penelitian sebelumnya menjelaskan bahwa nilai rentang laju korosi baja dengan metode perendaman penuh dengan larutan air laut Muara Baru, Jakarta hingga waktu ekspos 21 hari adalah 4 mpy hingga 5 mpy (Sundjono *et al.*, 2018), sebaliknya hasil laju korosi dengan metode basah dan kering dapat meningkatkan rata-rata 12 kali lipat dibandingkan metode perendaman penuh. Penelitian sebelumnya di daerah Karangsong dan Eretan juga menunjukkan laju korosi lebih kecil (4-5) mpy (Gadang *et al.*, 2018) dengan metode perendaman penuh dibandingkan metode basah-kering. Oleh karena itu, penelitian ini membuktikan bahwa, tingkat korosifitas baja sebagai logam infrastruktur pada kondisi pasang surut lebih tinggi dibandingkan pada kondisi terendam penuh di air laut tropis, sama dengan di air laut sub tropis (Wu *et al.*, 2017).

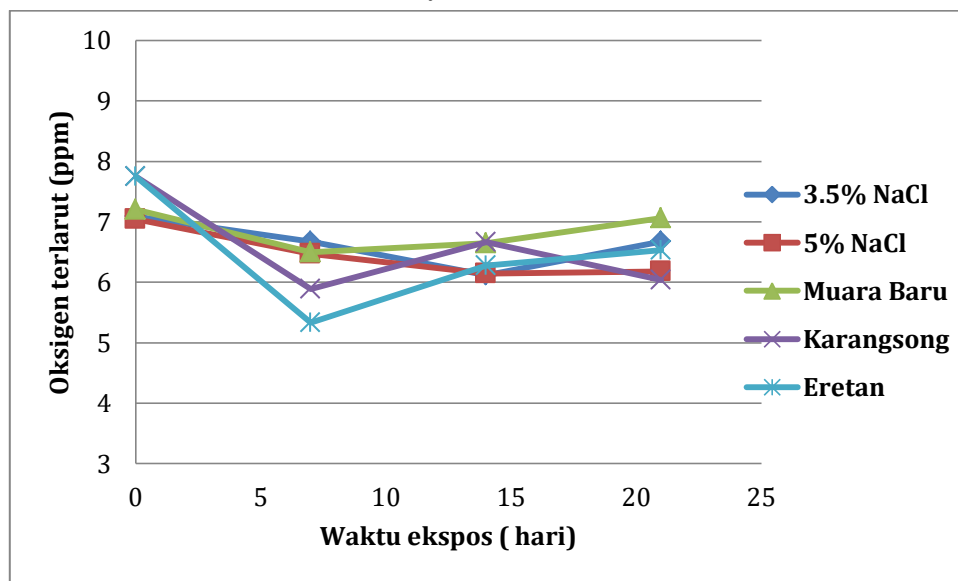
**B. Hubungan antara parameter air laut dan korosi baja**

Gambar 4 memperlihatkan kurva tingkat oksigen terlarut dalam variasi larutan uji

sebagai fungsi waktu ekspos. Pada waktu ekspos 7 hari, nilai oksigen terlarut di semua variasi larutan uji menurun seiring dengan peningkatan laju korosi baja, sama dengan penelitian sebelumnya (Gadang *et al.*, 2018; Sundjono *et al.*, 2018). Ini mengindikasikan bahwa proses elektrokimia khususnya reaksi reduksi ( sisi katodik) oksigen terlarut terjadi di semua variasi larutan uji. Peningkatan reaksi reduksi katoda) akan meningkatkan reaksi oksidasi (anoda), dimana reaksi oksidasi dapat menghilangkan substansi logam baja (kation Fe) ke larutan. Reaksi reduksi oksigen terlihat pada di bawah ini



Peningkatan perlahan tingkat oksigen terlarut terjadi dari rentang 7 hari hingga 21 hari waktu ekspos, dimana nilai laju korosi setiap larutan uji cenderung turun atau stabil. Lebih jauh lagi, kelarutan maksimum oksigen terlarut cenderung relatif rendah dibandingkan udara terbuka, sekitar 8 ppm pada suhu ruang,dimana hasil pengukuran suhu pada rentang 27,5°C hingga 31°C. Ini memperlihatkan bahwa proses korosi ini dikontrol oleh difusi oksigen terlarut pada permukaan baja (Jones, 1992). Reaksi oksidasi ion besi (Fe) semakin cepat saat oksigen mendekati permukaan logam (Afolabi *et al.*, 2014). Ini menunjukkan bahwa tingkat oksigen menurun seiring dengan konsumsi oksigen dan kadar oksigen terbatas dalam larutan stagnan.

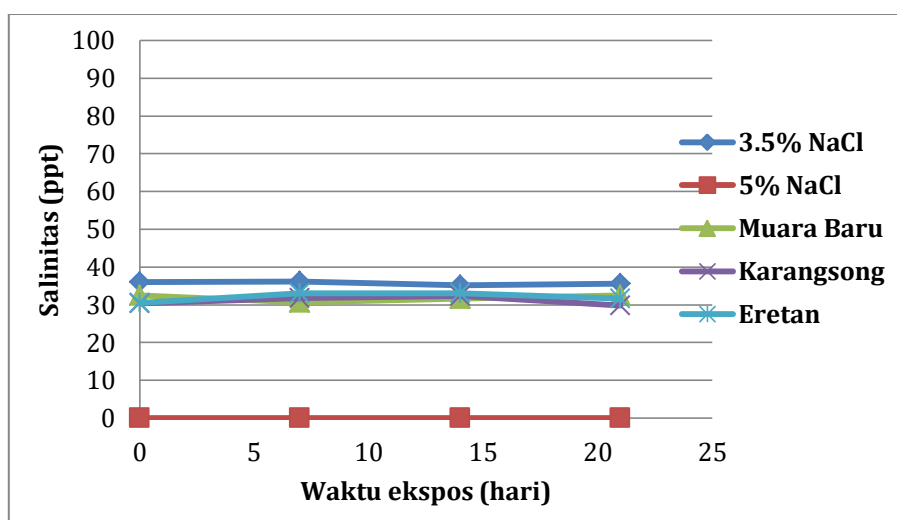


Gambar 4. Kurva oksigen terlarut sebagai fungsi waktu ekspos dalam berbagai variasi larutan uji 3,5% NaCl, 5% NaCl, air laut Muara Baru, air laut Karangsong dan air laut Eretan.



Gambar 5 memperlihatkan kurva nilai salinitas sebagai fungsi waktu ekspos dalam variasi larutan uji pada suhu ruang. Namun nilai salinitas larutan 5% NaCl tidak dapat dideteksi dikarenakan batas maksimum pengukuran alat HACH HQ40d *Advanced Portable Meter* hingga 42 ppt. Umumnya, nilai salinitas larutan uji daerah Muara Baru, Karangsong dan Eretan hampir sama di semua waktu ekspos, sementara nilai salinitas larutan 3,5% NaCl sedikit lebih tinggi, dimana nilai salinitas minimal 30 ppt merupakan tipikal air laut daerah tropis. Nilai salinitas dikalkulasi melalui perhitungan konsentrasi ion klorida (Cl<sup>-</sup>) di dalam air, yang secara empiris menjelaskan bahwa salinitas sama dengan  $1,80655 \times [\text{Cl}^-]$  (Zakowski et al., 2014). Sebagai tambahan, anion klorida dalam air laut dihubungkan

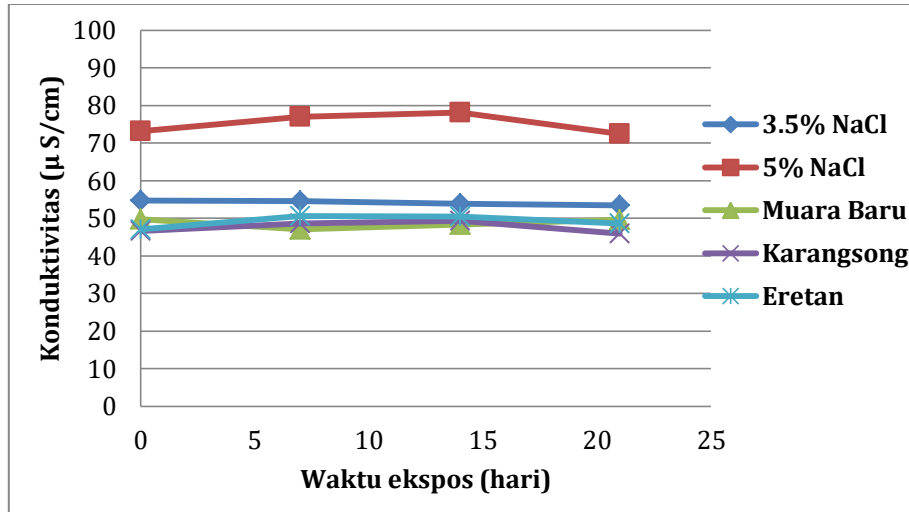
dengan konsentrasi senyawa NaCl, MgCl<sub>2</sub> dan KCl (Martin, 2016). Lebih jauh lagi, nilai salinitas larutan tiga daerah perairan sedikit lebih rendah dibandingkan larutan 3,5% NaCl, dikarenakan variasi komposisi senyawa air laut yang tidak hanya larutan NaCl, namun senyawa karbonat dan lainnya (Möller et al., 2006). Peningkatan nilai salinitas berbanding lurus dengan peningkatan laju korosi (Zakowski et al., 2014), dimana nilai laju korosi baja dalam media 3,5% NaCl lebih tinggi dibandingkan dalam larutan uji di tiga daerah perairan. Berdasarkan hasil penelitian, nilai salinitas di tiga daerah perairan hampir sama di setiap waktu ekspos. Oleh karena itu, ini mengindikasikan tingkat korosi baja di setiap larutan uji tergantung pada tingkat salinitas yang sama disetiap waktu ekspos.



Gambar 5. Grafik salinitas sebagai fungsi waktu ekspos dalam berbagai variasi larutan uji 3,5% NaCl, 5% NaCl, air laut Muara Baru, air laut Karangsong dan air laut Eretan.

Gambar 6 memperlihatkan kurva konduktivitas air sebagai fungsi waktu ekspos dalam variasi larutan uji di temperatur ruang. Nilai konduktivitas air digunakan sebagai indikator nilai salinitas (Zakowski et al., 2014), dimana ion klorida terkandung dari variasi senyawa air laut. Kehadiran garam-garam terlarut di dalam air dihubungkan dengan nilai konduktivitas, dimana menyediakan muatan muatan elektrik sebagai pergerakan ion-ion (Peinado-Guevara et al., 2012). Nilai konduktivitas tertinggi pada larutan 5% NaCl, dimana nilai konduktivitas pada larutan tiga daerah hampir sama di setiap variasi waktu ekspos. Nilai konduktivitas

larutan kontrol (5%NaCl dan 3,5% NaCl) lebih tinggi dibandingkan nilai konduktivitas larutan uji 3 daerah. Konduktivitas tertinggi pada larutan 5%NaCl memperlihatkan konsentrasi tertinggi garam-garam terlarut. Di sisi lain, nilai konduktivitas di semua larutan uji setiap periode ekspos hampir sama. Lebih jauh lagi, nilai konduktivitas yang sama disetiap larutan uji dikorelasikan pada konsentrasi yang sama ion terlarut atau total garam-garam yang terlarut. Laju korosi logam cenderung meningkat ketika nilai konduktivitas air meningkat (Zakowski et al., 2014).



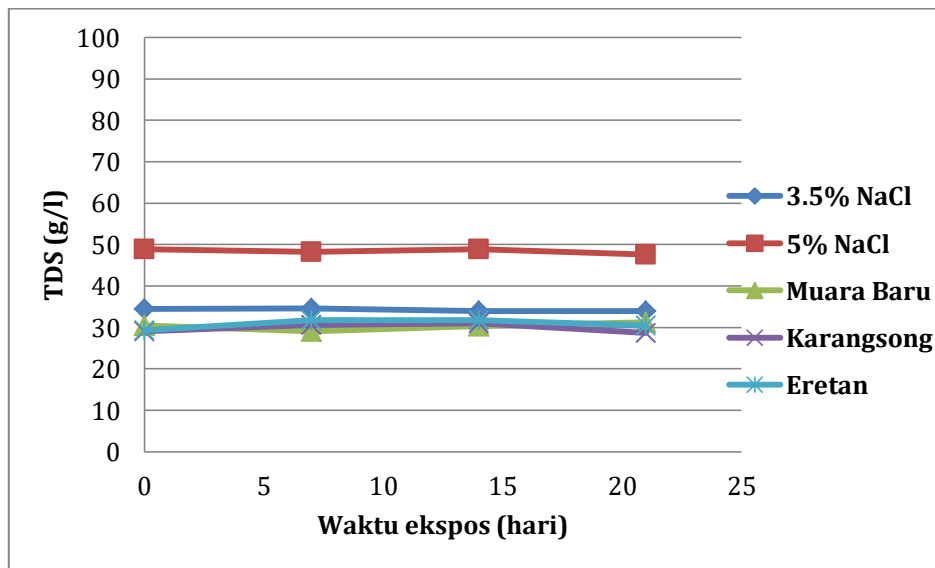
Gambar 6. Grafik konduktivitas sebagai fungsi waktu ekspos dalam berbagai variasi larutan uji 3,5% NaCl, 5% NaCl, air laut Muara Baru, air laut Karangsong dan air laut Eretan.

Gambar 7 memperlihatkan grafik nilai *total dissolved solids* (TDS) sebagai fungsi waktu ekspos larutan uji. Nilai TDS mengukur konsentrasi senyawa organik dan anorganik dalam bentuk ion, partikel atau koloid (Boerlage, 2012). Semua larutan uji dikategorikan sebagai larutan saline dikarenakan diatas nilai 5 g/l (Zakowski *et al.*, 2014).

dimana alat HACH HQ40d *Advanced Portable Meter* secara otomatis menentukan faktor konversi sebesar 0,64. Berdasarkan rumus di atas, nilai TDS secara langsung proporsional terhadap nilai konduktivitas air. Peningkatan nilai TDS bertendensi meningkatkan laju korosi baja. Nilai TDS pada variasi larutan air laut di tiga daerah hampir sama dibandingkan larutan kontrol di setiap waktu ekspos. Nilai TDS tertinggi larutan 5% NaCl memperlihatkan kandungan tinggi konsentrasi ion garam terlarut. Nilai TDS disetiap larutan uji hampir sama di setiap periode ekspos.

Pengukuran nilai TDS mengacu pada nilai konduktivitas air, dimana nilai tersebut dirumuskan di bawah ini

$$\text{TDS (ppm)} = \text{Konduktivitas } (\mu\text{S/cm}) \times \text{Faktor konversi (Al Dahaan et al. 2016)}$$



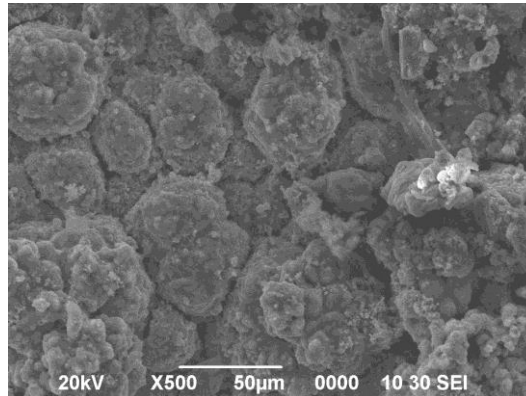
Gambar 7. Grafik *total dissolved solution* (TDS) sebagai fungsi waktu ekspos dalam berbagai variasi larutan uji 3,5% NaCl, 5% NaCl, air laut Muara Baru, air laut Karangsong dan air laut Eretan.



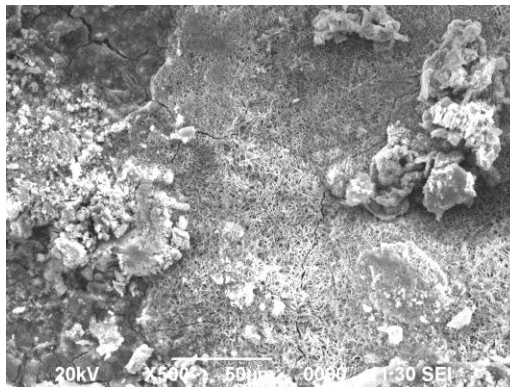
**C. Analisa unsur permukaan sampel setelah ekspos**

Gambar 8, Gambar 9 dan Gambar 10 memperlihatkan morfologi produk korosi permukaan baja hasil ekspos 21 hari di dalam larutan air laut Daerah Karangsong, Eretan dan Muara baru secara berturut-turut.

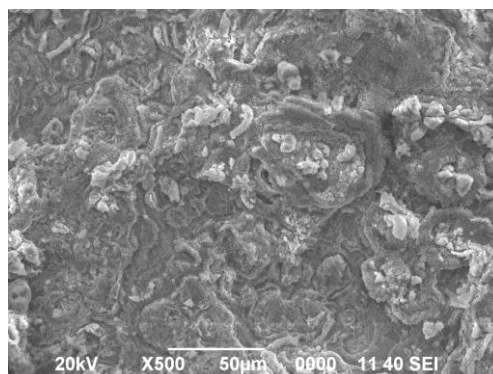
Kerusakan infrastruktur logam baja karbon disebabkan oleh proses korosi merata di semua permukaan di air laut (Ismail & Adan, 2014). Lebih jauh lagi, berdasarkan hasil pengujian, morfologi korosi merata di semua permukaan baja di tiga daerah.



Gambar 8. Morfologi produk korosi permukaan baja hasil ekspos 21 hari di dalam air laut Karangsong.



Gambar 9. Morfologi produk korosi permukaan baja hasil ekspos 21 hari di dalam air laut Eretan.



Gambar 10. Morfologi produk korosi permukaan baja hasil ekspos 21 hari di dalam air laut Muara Baru.

Tabel 2 memperlihatkan unsur-unsur yang terkandung di dalam produk korosi di permukaan baja setelah ekspos 21 hari di

dalam larutan Karangsong. Unsur tertinggi adalah besi (Fe) di permukaan baja dikarenakan logam ini merupakan campuran

besi. Kehadiran unsur kation dan anion antara lain Na, Ca, S dan Cl mengindikasikan merupakan senyawa yang terkandung didalam air laut (NaCl, CaCl<sub>2</sub> dan CaSO<sub>4</sub> (Ravisankar *et al.*, 1988 ; Shengxi and Hihara, 2014). Konsentrasi oksigen yang tinggi mengindikasikan terbentuknya korosi produk dengan senyawa logam oksida di permukaan logam baja. Senyawa oksida logam bertanggung jawab dalam meminimalkan kerusakan korosi lebih lanjut sehingga laju

korosi akan menurun seiring dengan waktu ekspos . namun, keberadaan ion klorida (Cl) memberikan efek negatif terhadap produk korosi, dimana terbentuk lapisan kurang stabil senyawa kompleks logam oksida klorida. Kemudahan senyawa kompleks untuk tidak stabil akan membuka daerah aktif (anodik) untuk terjadi proses oksidasi, dimana logam baja terlarut ke lingkungan dan meningkatkan nilai laju korosi logam.

Tabel 2. Unsur-unsur produk korosi di permukaan baja setelah ekspos di larutan air laut daerah Karangsong

Unsur produk korosi	Persentase	
	%berat	%atom
Karbon (C)	7,19	19,23
Oksigen(O)	18,50	37,16
Natrium (Na)	0,10	0,14
Magnesium (Mg)	-	-
Sulfur (S)	0,04	0,04
Klorida (Cl)	2,19	1,99
Kalsium (Ca)	0,14	0,11
Besi (Fe)	71,84	41,33

Tabel 3 memperlihatkan unsur –unsur produk korosi di permukaan baja setelah ekspos di larutan air laut daerah Eretan. Keberadaan kation dan anion didalam produk korosi antara lain Na, S, Ca dan Cl mengindikasikan berasal senyawa air laut, dimana hasil ini sama dengan air laut Karangsong. Sebagai tambahan Keberadaan anion Mg juga sebagai senyawa yang terkandung di air laut (Rao dan Indusekhar, 1989). Kandungan oksigen yang tinggi di produk korosi juga mengindikasikan

terdapat senyawa oksida yang terbentuk di permukaan logam. Lebih jauh lagi, laju korosi baja pada waktu ekspos 14 hari dan meningkat sedikit pada hari ke 21 di dalam air laut Eretan. Fenomena ini hampir sama dengan lingkungan air laut Karangsong. Seiring dengan waktu ekspos, pembentukan produk korosi terjadi tanpa ion klorida. Namun keberadaan ion tersebut menekan penurunan laju korosi dan meningkatkan kesulitan proses difusi oksigen melalui penebalan lapisan karat (Song *et al.*, 2017 )

Tabel 3. Unsur-unsur produk korosi di permukaan baja setelah ekspos di larutan air laut daerah Eretan

Unsur produk korosi	Persentase	
	%berat	%atom
Karbon (C)	6,25	16,55
Oksigen(O)	20,14	40,06
Natrium (Na)	1,07	1,48
Magnesium (Mg)	0,38	0,49
Sulfur (S)	0,18	0,18
Klorida (Cl)	0,62	0,55
Kalsium (Ca)	0,07	0,05
Besi (Fe)	71,30	40,63

Tabel 4 memperlihatkan unsur-unsur produk korosi di permukaan baja karbon setelah ekspos 21 hari di larutan daerah Muara Baru, Jakarta. Unsur-unsur pembentuk senyawa juga terdeteksi di dalam produk karat baja antara lain Na, Mg, S, Cl dan Ca, dimana sama dengan daerah Karangsong dan Eretan. Unsur-unsur tersebut merupakan komponen

senyawa-senyawa air laut. Konsentrasi oksigen yang tinggi juga menandakan terbentuknya senyawa oksida di permukaan baja. Konsentrasi ion klorida lebih rendah di Muara Baru dibandingkan di daerah Karangsong dan Eretan. Dikarena rendahnya konsentrasi ion klorida, peranan ion tersebut sebagai ion agresif terhadap lapisan oksida nampak tidak terlihat pada hari ke-7 dan ke-

21. Laju korosi baja di Muara Baru terendah dibandingkan larutan uji lainnya pada hari ke-7 dan ke-21, dimana indikasi pembentukan lapisan oksida terjadi. Namun, pada hari ke-14, laju korosi lebih tinggi dibandingkan

daerah karangsong dan Eretan, ini menunjukkan peranan ion klorida terjadi merusak lapisan protektif oksida baja.

Tabel 4. Unsur-unsur produk korosi di permukaan baja setelah ekspos di larutan air laut daerah Muara Baru

Unsur produk korosi	Persentase	
	%berat	%atom
Karbon (C)	8,94	22,56
Oksigen(O)	20,32	38,49
Natrium (Na)	0,28	0,37
Magnesium (Mg)	0,21	0,26
Sulfur (S)	0,14	0,13
Klorida (Cl)	0,45	0,39
Kalsium (Ca)	0,01	0,01
Besi (Fe)	69,64	37,79

Identifikasi senyawa produk korosi dilakukan dengan menggunakan alat X-Ray Diffraction (XRD) di berbagai daerah. Pada Tabel 5 dan Tabel 6 terlihat bahwa struktur fasa dominan adalah  $\gamma$  FeO(OH) (Lepidrococite), dimana daerah Muara Baru dimungkinkan sama

hasilnya dengan dua daerah lainnya. Produk korosi *Lepidrococite* merupakan senyawa yang terbentuk dengan keberadaan garam-garam klorida di lingkungan air laut (Shengxi Li et al., 2014)

Tabel 5. Analisa senyawa produk karat sampel baja setelah ekspos di air laut Karangsong

2 $\theta$ (deg.)	d (Å)	d <sub>ref</sub> (Å)	I/I <sub>o</sub>	hkl	Phase	Structure	Space Group
14.159	6.2500	6.2550	91.30	020	FeO(OH)	Orthorhombic	Amam
27.050	3.2940	3.2910	100.00	120	FeO(OH)	Orthorhombic	Amam
36.380	2.4676	2.4670	65.22	031	FeO(OH)	Orthorhombic	Amam
38.029	2.3642	2.3573	29.57	111	FeO(OH)	Orthorhombic	Amam
46.877	1.9366	1.9369	60.87	051/200	FeO(OH)	Orthorhombic	Amam
49.230	1.8495	1.8485	13.91	220	FeO(OH)	Orthorhombic	Amam
52.630	1.7375	1.7321	26.09	151	FeO(OH)	Orthorhombic	Amam
60.740	1.5240	1.5225	14.78	231	FeO(OH)	Orthorhombic	Amam
67.290	1.3903	1.3874	12.17	122	FeO(OH)	Orthorhombic	Amam
68.440	1.3698	1.3689	15.65	251	FeO(OH)	Orthorhombic	Amam

Tabel 6. Analisa senyawa produk karat sampel baja setelah ekspos di air laut Eretan

2 $\theta$ (deg.)	d (Å)	d <sub>ref</sub> (Å)	I/I <sub>o</sub>	hkl	Phase	Structure	Space Group
14.1707	6.25010	6.2550	100.00	020	FeO(OH)	Orthorhombic	Amam
27.1086	3.28945	3.2910	85.97	120	FeO(OH)	Orthorhombic	Amam
35.6447	2.51885	2.5171	35.60	110	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Rhombohedral	R -3 c
36.3833	2.46940	2.4670	75.58	031	FeO(OH)	Orthorhombic	Amam
46.9348	1.93592	1.9369	69.88	051/200	FeO(OH)	Orthorhombic	Amam
60.7387	1.52488	1.5225	21.22	231	FeO(OH)	Orthorhombic	Amam

## KESIMPULAN DAN SARAN

Kerentanan korosi baja sebagai material infrastruktur pesisir dan lepas pantai di daerah Muara Baru, Karangsong dan Eretan sangat

tinggi pada daerah pasang surut. Kerentanan tersebut menurun seiring dengan waktu ekspos. Walaupun penurunan korosi terjadi, kerentanan korosi baja dikategorikan tinggi. Parameter air laut antara lain konduktivitas,

salinitas, total dissolved solid hampir sama sepanjang waktu ekspos. Ion klorida mempunyai peranan untuk meningkatkan kerusakan baja, dimana terindikasi kadar salinitas yang tinggi. Peran oksigen terlarut juga memberikan dampak meningkatkan reaksi korosi baja di air laut. Morfologi baja setelah ekpos bertendensi terkorosi merata di permukaan. Tingkat korosifitas baja infrastruktur pada kondisi pasang surut lebih tinggi dibandingkan kondisi terendam penuh di lingkungan air laut. Senyawa produk korosi yang terbentuk di lingkungan air laut adalah Lepidrococite. Oleh karena itu, kerusakan korosi baja yang parah terjadi di air laut tropis harus diminimalkan dengan perlindungan lapis lindung (cat), proteksi katodik ( anoda tumbal & impressed current) dan seleksi material.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis mengucapkan terima kasih kepada semua tim kerja Laboratorium Korosi dan Proteksi logam di lingkungan kerja Pusat Penelitian Metalurgi dan Material, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI). Para penulis juga mengucapkan terima kasih atas hibah dana penelitian dari Pemerintah Indonesia melalui LIPI.

### DAFTAR PUSTAKA

- Afolabi, A. S., Muhirwa, A. C., Abdulkareem, A. S., & Muzenda, E. (2014). Weight Loss and Microstructural Studies of Stressed Mild Steel in Apple Juice. *Int. J. Electrochem. Sci*, 9, 5895 – 5906.
- Al Dahaan, S., Al-Ansari, N., & Knutsson, S. (2016). Influence of groundwater hypothetical salts on electrical conductivity total dissolved solids. *Engineering*, 8(11), 823-830.
- Al-Moubaraki, A. H., Al-Judaibi, A., & Asiri, M. (2015). Corrosion of C-Steel in the Red Sea: Effect of Immersion Time and Inhibitor Concentration. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 10, 4252 – 4278.
- ASM. (1987). ASM Metals Handbook, vol. 13: Corrosion, 9th. ed., ASM International.
- Bhosle, N. B., & Wagh, A. B. (1992). The effect of organic matter associated with the corrosion products on the corrosion of mild steel in the arabian sea. *Corrosion Science*, 33(5), 647-655.
- Boerlage, S. F. E. (2012). Measuring salinity and TDS of seawater and brine for process and environmental monitoring—which one, when? *Desalination and Water Treatment*, 42(1–3), 222–230.
- Durodola, B. M., Olugbuyiro, J. A. O., Moshood, S. A., Fayomi, O. S., & Popoola, A. P. I. (2011). Study of Influence of Zinc Plated Mild Steel Deterioration in Seawater Environment. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 6, 5605 – 5616.
- Eyu, G., Will, G., Dekkers, W., & MacLeod, J. (2016). Effect of dissolved oxygen and immersion time on the corrosion behaviour of mild steel in bicarbonate/chloride solution. *Materials*, 9(9), 748.
- Fischer, D. A., Daille, L., Aguirre, J., Galarce, C., Armijo, F., De la Iglesia, R., ... & Walczak, M. (2016). Corrosion of stainless steel in simulated tide of fresh natural seawater of South East Pacific. *Int. J. Electrochem. Sci*, 11, 6873-6885.
- Ismail, A. & Adan, N. H. (2014). Effect of Oxygen Concentration on Corrosion Rate of Carbon Steel in Seawater. *American Journal of Engineering Research*, 3(1), 64-67.
- Jones, D. A. (1992) Principles and Prevention of CORROSION. Macmilan Publishing Company
- Martin, M. M. (2016). *Industrial Chemical Process Analysis and Design*, Elsevier.
- Muller, H., Boshoff, E. T., & Froneman, H. (2006). The corrosion behavior of carbon steel in natural and synthetic
- Nuraini, L., Prifiharni, S., & Priyotomo, G. (2017). The corrosivity and performance evaluation of antifouling paint exposed in seawater Muara Baru Port, Jakarta. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 817, No. 1, p. 012068). IOP Publishing.
- Peinado-Guevara, H., Green-Ruíz, C., Herrera-Barrientos, J., Escolero-Fuentes, O., Delgado Rodríguez, O., Belmonte-Jiménez, S., & Ladrón de Guevara, M. (2012). Relationship between chloride concentration and electrical conductivity in groundwater and its estimation from vertical electrical soundings (VESs) in Guasave, Sinaloa, Mexico. *Ciencia e investigación agraria*, 39(1), 229-239.
- Priyotomo, P., Nuraini, L., Prifiharni, S., & Sundjono. (2018). Corrosion Behavior of Mild Steel in Seawater from Karangsong & Eretan of West Java Refion, Indonesia. *Jurnal Kelautan:*

- Indonesian Journal of Marine Science and Technology*, 11(2), 184-191.
- Rao, C. K., & Indusekhar, V. K. (1989). Distribution of Certain Cations and Anions in Seaweeds and seawater of Saurashtra coast and their geochemical significance. *Indian Journal of Marine Sciences*, 18, 37-42.
- Robert E. Melchers. (2005). The effect of corrosion on the structural reliability of steel offshore structures. *Corrosion Science*, 47(10), 2391-2410.
- sea water. *Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy*, 106, 585-592.
- Shengxi, L., & Hihara, L. H. (2014). Aerosol Salt Particle Deposition on Metals Exposed to Marine Environments: A Study Related to Marine Atmospheric Corrosion. *Journal of The Electrochemical Society*, 161 (5), C268-C275.
- Song, Y., Jiang, G., Chen, Y., Zhao, P., & Tian, Y. (2017). Effects of chloride ions on corrosion of ductile iron and carbon steel in soil environments. *Scientific reports*, 7(1), 6865.
- Sundjono, S., Priyotomo, G., Nuraini, L., & Prifiharni, S. (2018). Corrosion Behavior of Mild Steel in Seawater from Northern Coast of Java and Southern Coast of Bali, Indonesia. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 49(6), 770-784.
- Temperley, T. G. (1965). Corrosion phenomena in the coastal areas of the Persian Gulf. *Corrosion Science*, 5(8), 581-589.
- Wan Nik, W. B. Z., Rahman, F. M. M., & Rosliza, R. (2011). Corrosion Behavior of Mild Steel in Seawater from Two Different Sites of Kuala Terengganu Coastal Area. *International Journal of Basic & Applied Sciences IJBAS-IJENS*, 11(6), 75-80.
- Wu, J., Pang, K., Peng, D., Wu, J., Bao, Y., & Li, X. (2017). Corrosion Behaviors of Carbon Steels in Artificially Simulated and Accelerated Marine Environment. *Int. J. Electrochem. Sci*, 12, 1216-1231.
- Zakowski, K., Narozny, M., Szocinski, M., & Darowicki, K. (2014). Influence of water salinity on corrosion risk—the case of the southern Baltic Sea coast. *Environmental monitoring and assessment*, 186(8), 4871-4879