

## Model Laju Korosi untuk Memprediksi Umur Pakai Tiang Pancang Baja Karbon di Lingkungan Air Laut

Agus Solehudin<sup>a\*)</sup>, Yusep Sukrawan<sup>a)</sup>, Dedi Supriawan<sup>a)</sup>, Aulia Fatin<sup>a)</sup> dan Gunawan Refiadi<sup>b)</sup>

<sup>a)</sup>Departemen Pendidikan Teknik Mesin, Universitas Pendidikan Indonesia  
Jl. Dr. Setiabudi No. 229 Bandung

<sup>b)</sup>Program Studi Pendidikan Vokasional Teknik Mesin STKIP Sebelas April Sumedang  
Jl. Angrek Situ No. 19 Sumedang

<sup>\*)</sup>Korespondensi *e-mail*: asolehudin@upi.edu

### Abstrak

Tiang pancang pipa baja karbon di lingkungan air laut umumnya berada pada zona dasar laut, lumpur, air laut, percikan dan atmosfer. Hal ini dapat menyebabkan terjadinya korosi yang dapat menurunkan kekuatan dan umur pakai struktur tersebut. Metode dalam penelitian ini dimulai dari pemodelan persamaan matematis laju dengan persamaan sebagai berikut:

$r_1 = 0,0018 [H_2S]^{0,85} \times \exp \left[ 12,6 \times 10^{-3} \left( \frac{T-373}{T} \right) \right]$  (mm/th), untuk temperatur dibatasi lebih dari 273 K dan maksimum 373 K, konsentrasi H<sub>2</sub>S dibatasi lebih dari nol dan maksimum 500 ppm.

$r_2 = 3,1 \times 10^{-5} [H^+]^{0,4} \times \exp \left[ 12,6 \left( \frac{T-373}{T} \right) \right] + 1,31 \times \log [H^+]$  (mm/th). Dimana pH = -log [H<sup>+</sup>] dan pH dibatasi lebih dari nol dan maksimum 14.

$r_3 = 0,082 \times 10^{-6} \omega^{1/2}$  mm/t h, untuk aliran dibatasi lebih dari nol dan maksimum 300 rpm.

$r_4 = 0,109 [Cl^-] \times 0,319$  mm/th, untuk konsentrasi Cl dibatasi lebih dari nol dan maksimum 5,25%.

$r_5 = 8,7 + 9,86 \times 10^{-3} (O_2) - 1,48 \times 10^{-7} (O_2)^2 - 2,37 \times 10^{-3} (H_2S)(O_2) - 1,11 \times 10^{-3} (O_2)(pH)$  (mm/th, untuk konsentrasi Oksigen dibatasi lebih dari nol dan maksimum 100 ppm.

$r_6 = 4,93 \times 10^{-2} (CO_2)(H_2S) - 4,82 \times 10^{-5} (CO_2)(O_2)$  (mm/th), untuk konsentrasi CO<sub>2</sub> dibatasi lebih dari nol dan maksimum 100 ppm.

$r_7 = [Cl^-]^{a_1} \times [SO_4^{2-}]^{a_2} \times [Ca^{2+}]^{a_3}$  (mm/th), untuk konsentrasi Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> dan Ca<sup>2+</sup> dibatasi lebih dari nol dan maksimum 100 ppm, dan konstanta a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, a<sub>3</sub>, tergantung dari pH.

Sehingga persamaan laju korosi total dipeoleh:  $r_{tot} = r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5 + r_6 + r_7$  dan persamaan umur pakai tiang pancang adalah: umur pakai =  $\frac{CA}{laju\ korosi\ total}$  dimana CA adalah *corrosion allowance*. Model laju korosi yang diperoleh diverifikasi dengan data hasil percobaan secara *curve fitting*. Hasil penelitian yang diperoleh adalah prediksi umur pakai tiang pancang pipa karbon hasil model simulasi hampir sama dengan hasil percobaan yang memberikan perbedaan dibawah 1,0%.

**Kata kunci** : tiang pancang, laju korosi, baja karbon, umur pakai, air laut

### PENDAHULUAN

Di Indonesia telah banyak dibangun struktur sipil seperti jembatan dengan komponen baja terutama jembatan rangka baja dengan pondasi tiang pancang baja. Jembatan-jembatan tersebut berada dalam lingkungan yang beriklim tropis dengan curah hujan, kelembaban dan intensitas sinar matahari yang tinggi. Beberapa jembatan ada yang berada dalam lingkungan air laut telah menunjukkan adanya kerusakan yang dipengaruhi oleh terjadinya korosi pada tiang pancang jembatan tersebut. Tiang pancang pipa baja (TPPB) di lingkungan air laut umumnya berada pada zona dasar laut (seabed), lumpur, air laut (submerged), percikan (splash zone) dan atmosfer [1]. Hal ini dapat menyebabkan terjadinya korosi yang dapat menurunkan kekuatan dan keutuhan struktur tersebut. Kerusakan struktur seperti jembatan akibat korosi ini mengarah kepada keruntuhan jembatan yang merupakan bencana, sehingga menyebabkan kerugian besar akibat perbaikan jembatan atau kontruksi ulang dan

tertundanya lalu lintas. Karena itu, perlu dilakukan penanggulangan yang cepat dan sedini mungkin apabila dikemudian hari terjadi korosi pada tiang pancang pipa baja (TPPB).

Beberapa metode proteksi yang telah dikembangkan untuk pencegahan korosi tiang pancang di lingkungan air laut seperti pengecatan [2], metode proteksi katodik [3], dan proteksi korosi dengan anoda korban [4]. Hasil penelitiannya belum menghasilkan suatu model laju korosi dan proteksi katodik yang tepat untuk berbagai zona di lingkungan air laut. Hal yang terbaru pada penelitian ini yaitu dilakukan penurunan persamaan matematik dan pembuatan algoritma model persamaan laju korosi. Model laju korosi yang diperoleh diverifikasi dengan data hasil percobaan secara *curve fitting*. Sehingga menghasilkan suatu model dan software untuk desain proteksi katodik tiang baja karbon yang nantinya dapat dipalिकासikan pada struktur-struktur teknik sipil di wilayah laut.

## KAJIAN LITERATUR

Berbagai penelitian mengenai korosi baja di lingkungan air laut telah banyak dilakukan, diantaranya : Lyle dan Schutt (1998) menjelaskan bahwa korosi yang terjadi pada baja karbon akibat gas sulfida terlarut adalah korosi lokal dan pada permukaan baja terbentuk lapisan besi sulfida yang kurang protektif [5]. Lapisan besi sulfida yang terbentuk bersifat porous sehingga tidak dapat menahan serangan korosi lanjut. Kemudian, hasil penelitian Agus Solehudin, dkk (2010) menyatakan bahwa laju korosi sulfidasi pada baja karbon AISI 1010 semakin meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi hidrogen sulfida terlarut pada berbagai temperature [6]. Meningkatkan konsentrasi hidrogen sulfida menyebabkan meningkatnya keasaman lingkungan sehingga serangan korosi semakin kuat. N.Sridhar, dkk (2001) mendukung bahwa besi sulfida merupakan lapisan produk korosi sulfidasi yang kurang protektif sehingga dapat meningkatkan laju korosi [7]. Hasil penelitian di atas dapat disimpulkan bahwa adanya gas hidrogen sulfida yang terlarut dalam larutan klorida dapat menyebabkan korosi pada permukaan material baja. Sedangkan M. Heldtberg, et al. (2004) menjelaskan bahwa laju korosi baja sebanding linier dengan akar kuadrat dari konsentrasi ion klorida dan laju korosi menurun dengan meningkatnya pH [8]. Penelitian mengenai model laju korosi telah dipelajari oleh Arthur L.C, dan Fred C.V (1997) [9], N. Sridhar, dkk (2001) [7], G.S Das dan A.S Khana (2004) [10], Wei Sun dan Srdjan Necis, (2007) [11]. Para peneliti tersebut hanya mempelajari masing-masing satu atau dua parameter saja, sedangkan penggabungan beberapa parameter terhadap model laju korosi dan model proteksi belum dipelajari.

Beberapa metode proteksi yang telah dikembangkan untuk pencegahan korosi tiang pancang di lingkungan air laut seperti pengecatan, metode proteksi katodik dan proteksi korosi dengan anoda korban [12]. Hasil penelitiannya belum menghasilkan suatu model proteksi katodik yang tepat untuk berbagai zona di lingkungan air laut. Sehingga perlu dibuat suatu model dan software untuk desain proteksi katodik tiang baja karbon yang nantinya dapat dipalिकासikan pada struktur-struktur teknik sipil di wilayah laut.

Adapun beberapa model korosi yang sudah dikembangkan oleh peneliti sebelumnya adalah sebagai berikut:

### a. Model Laju Korosi dari Athur L.C. dan Fred C. Veatch

Model laju korosi yang dikembangkan oleh Athur L.C. dan Fred C. Veatch (1997) berada dalam lingkungan korosif sistem amina [9]. Secara sederhana laju korosi dalam sistem amina merupakan fungsi dari empat factor. Faktor-faktor tersebut adalah konsentrasi gas asam, temperatur (T), laju aliran ( $v$ ), dan konsentrasi anion garam. Serara matematika dituliskan sebagai berikut :

$$\text{Laju korosi } (r) = f([\text{gas asam}], T, v, [\text{anion garam}])$$

Reaksi akhir yang terjadi dalam sistem amina tersebut adalah pembentukan FeS yang melekat pada permukaan baja dan gas hidrogen dimana spesi padatan dan gas diabaikan, sehingga persamaan laju korosi dapat ditentukan menjadi :

$$\text{Laju korosi } (r) = K_o e^{-\frac{E_a}{RT}} [H_2S]^n [HS]^p$$

Berdasarkan persamaan tersebut, maka laju korosi bergantung pada konsentrasi  $H_2S$  terlarut dan temperatur.

### b. Model Laju Korosi dari N. Sridhar, dkk

Model laju korosi yang dikembangkan oleh N. Sridhar, dkk (2001) berada dalam lingkungan air yang dijenuhkan dengan gas  $H_2S$ ,  $CO_2$ , dan  $O_2$  [7]. Secara sederhana laju korosi dalam sistem yang hanya dipengaruhi oleh gas karbondioksida ( $CO_2$ ) saja, serara matematika dituliskan sebagai berikut :

$$\log(c.r., \frac{mm}{y}) = 5,8 - \frac{1780}{T} + 0,67 \log(pCO_2)$$

Dalam persamaan 2.3 terlihat bahwa konsentrasi (tekanan parsial  $CO_2$ ) dan temperatur berpengaruh terhadap laju korosi. Selanjutnya N. Sridhar, dkk. merumuskan laju korosi dalam lingkungan tersebut dibuat berdasarkan data-data percobaan yang secara statistik, sehingga didapat laju korosi sebagai berikut :

$$CR = 8,7 + 9,86 \times 10^{-3} (O_2) - 1,48 \times 10^{-7} (O_2)^2 - 1,31(pH)$$

$$+ 4,93 \times 10^{-2} (\text{CO}_2)(\text{H}_2\text{S}) - 4,82 \times 10^{-5} (\text{CO}_2)(\text{O}_2) \\ - 2,37 \times 10^{-3} (\text{H}_2\text{S})(\text{O}_2) - 1,11 \times 10^{-3} (\text{O}_2)(\text{pH})$$

Persamaan di atas mengindikasikan bahwa  $\text{O}_2$  berpengaruh paling besar terhadap percepatan laju korosi, juga terdapat aksi sinergis antara  $\text{H}_2\text{S}$  dan  $\text{CO}_2$  dalam meningkatkan laju korosi, dan meningkatnya pH dapat menurunkan laju korosi. Dalam persamaan di atas, pengaruh temperatur tidak dilibatkan.

### c. Model Laju Korosi dari Wei Sun dan Srdjan Nesic

Model laju korosi yang dikembangkan oleh Wei Sun dan Srdjan Nesic (2007) berada dalam lingkungan 1% NaCl yang dijenuhkan dengan gas  $\text{H}_2\text{S}$  [11]. Berdasarkan hasil percobaan dan deskripsi dari proses korosi  $\text{H}_2\text{S}$  maka secara matematika dapat dirumuskan model persamaan laju korosinya. Asumsi-asumsi yang diberikan adalah : (1) proses korosi termasuk reaksi heterogen antara padatan dan larutan pada permukaan baja; (2) terbentuk lapisan tipis  $\text{FeS}$  pada permukaan baja sebagai penghalang difusi padatan yang bersifat labil; (3) semakin lama akan tumbuh kerak dibagian luar sebagai penghalang difusi yang bersifat sangat porous.

Adapun pemodelan yang akan dikembangkan menjadi model perangkat lunak adalah sebagai berikut:

**r1** =  $0,0018 [H_2S]^{0,85} \times \exp \left[ 12,6 \times 10^{-3} \left( \frac{T-373}{T} \right) \right]$  (mm/th), untuk temperatur dibatasi lebih dari 273 K dan maksimum 373 K, konsentrasi  $\text{H}_2\text{S}$  dibatasi lebih dari nol dan maksimum 500 ppm).

**r2** =  $3,1 \times 10^{-5} [H^+]^{0,4} \times \exp \left[ 12,6 \left( \frac{T-373}{T} \right) \right] + 1,31 \times \log [H^+]$  (mm/th). Dimana  $\text{pH} = -\log [H^+]$  dan pH dibatasi lebih dari nol dan maksimum 14.

**r3** =  $0,082 \times 10^{-6} \omega^{1/2}$  mm/t h, untuk aliran dibatasi lebih dari nol dan maksimum 300 rpm.

**r4** =  $0,109 [\text{Cl}^-] \times 0,319$  mm/th, untuk konsentrasi Cl dibatasi lebih dari nol dan maksimum 5,25%.

**r5** =  $8,7 + 9,86 \times 10^{-3} (\text{O}_2) - 1,48 \times 10^{-7} (\text{O}_2)^2 - 2,37 \times 10^{-3} (\text{H}_2\text{S})(\text{O}_2) - 1,11 \times 10^{-3} (\text{O}_2)(\text{pH})$  (mm/th, untuk konsentrasi Oksigen dibatasi lebih dari nol dan maksimum 100 ppm).

**r6** =  $4,93 \times 10^{-2} (\text{CO}_2)(\text{H}_2\text{S}) - 4,82 \times 10^{-5} (\text{CO}_2)(\text{O}_2)$  (mm/th), untuk konsentrasi  $\text{CO}_2$  dibatasi lebih dari nol dan maksimum 100 ppm.

**r7** =  $[\text{Cl}^-]^{a1} \times [\text{SO}_4^{2-}]^{a2} \times [\text{Ca}^{2+}]^{a3}$  (mm/th), untuk konsentrasi  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  dan  $\text{Ca}^{2+}$  dibatasi lebih dari nol dan maksimum 100 ppm, dan konstanta  $a1$ ,  $a2$ ,  $a3$ , tergantung dari pH.

Sehingga persamaan laju korosi total dipeoleh:  $r_{\text{tot}} = r1 + r2 + r3 + r4 + r5 + r6 + r7$  dan persamaan umur pakai tiang pancang adalah: umur pakai =  $\frac{CA}{\text{laju korosi total}}$  dimana CA adalah *corrosion allowance*.

## HASIL PENELITIAN

Program perancangan model laju korosi dan proteksi katodik dibuat dengan menggunakan software visual basic 6.0. Tampilan awal pada program ini menyediakan dua pilihan yaitu start atau exit untuk melanjutkan tekan start. Layar kedua pada program menampilkan dua pilihan yaitu laju korsi dan proteksi katodik anoda korban. Layar ketiga program menyediakan perhitungan proteksi katodik anoda korban sesuai dengan anoda yang dikehendaki yaitu anoda alumunium dan anoda zinc. Pada perhitungan proteksi katodik anoda korban, pengguna diminta untuk memasukan beberapa input data antara lain presentase coating, umur desain proteksi, dimesnsi yang akan diproteksi, faktor utilisasi, dimensi serta berat anoda yang akan digunakan, potensial anoda dan resistifitas lingkungan. Dari input data tersebut program akan meng-output luas area yang diproteksi, kebutuhan total arus, berat total anoda yang diperlukan, jumlah anoda yang dibutuhkan, jarak pemasangan antar anoda, kebutuhan arus proteksi tiap jarak anoda.

Layar keempat program menyediakan perhitungan laju korosi. Pada perhitungan laju korosi, pengguna diminta untuk memasukan beberapa input data sesuai dengan metode yang akan digunakan. Pada metode kehilangan berat pengguna diminta untuk memasukan beberapa input antara lain berat awal, berat akhir, densitas, dimensi benda. Pada metode elektrokimia pengguna dimminta untuk memasukan beberapa input antara lain konstanta faktor, berat atom, rapat arus, jumlah electron yang terlibat, dan massa jenis. Dari input data tersebut masing-masing metode program akan menghasilkan laju korosi. Nilai dimensi yang dimasukan pada program menggunakan satuan jarak mm, tetapi hasil yang keluar pada akhir program akan sesuai dengan satuan yang diinginkan yaitu inch untuk dimensi. Laju korosi hasil perhitungan program terdapat dua hasil satuan, yaitu mpy dan mm/y. Berikut ini pada Tabel 1 laju korosi yang merupakan hasil perhtungan dari data laboratorium dengan menggunakan kalkulator.

Tabel 1. Data Hasil Penelitian Laju Korosi Pipa Baja API 5L Grade B

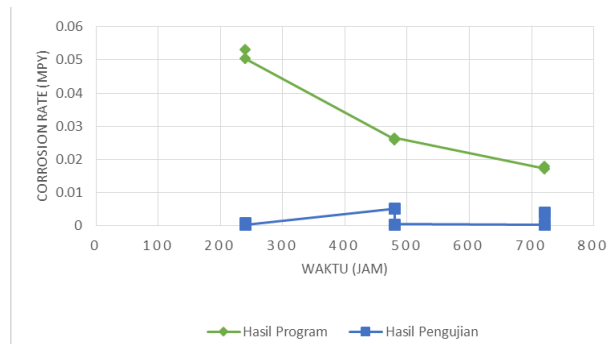
No	Berat (mg)		Dimensi (mm)			Waktu (jam)	Massa Jernis (g/cm <sup>3</sup> )	Laju Korosi (mpy)
	Awal	Akhir	Panjang	Lebar	Tinggi			
1	13,7258	13,4593	41,2	19,2	2,4	240	7,8	0,0010±0,001
2	13,2656	13,1085	40,6	18,9	2,4	240	7,8	0,0004±0,001
3	13,3976	13,1263	40,2	19,6	2,4	480	7,8	0,0052±0,001
4	13,8317	13,5910	39,7	20,2	2,4	480	7,8	0.0005±0,001
5	13,1206	12,8429	39,7	19,5	2,4	720	7,8	0.0004±0,001
6	14,0500	13,7297	40,1	19,9	2,4	720	7,8	0,0041±0,001

Berikut ini pada Tabel 2 merupakan tabel data hasil perhtungan program software.

Tabel 2 Perhitungan laju korosi program

No	Berat (mg)		Dimensi (mm)			Waktu (jam)	Massa Jernis (g/cm <sup>3</sup> )	Laju Korosi (mpy)
	Awal	Akhir	Panjang	Lebar	Tinggi			
1	13,7258	13,4593	41,2	19,2	2,4	240	7,8	0,0531±0,001
2	13,2656	13,1085	40,6	18,9	2,4	240	7,8	0,0531±0,001
3	13,3976	13,1263	40,2	19,6	2,4	480	7,8	0,0261±0,001
4	13,8317	13,5910	39,7	20,2	2,4	480	7,8	0,0265±0,001
5	13,1206	12,8429	39,7	19,5	2,4	720	7,8	0,0171±0,001
6	14,0500	13,7297	40,1	19,9	2,4	720	7,8	0,0180±0,001

Hasil perhitungan program dibandingkan dengan data pengujian ditampilkan pada gambar 1.



Gambar 1. Perbandingan laju korosi dari data pengujian dan hasil perhitungan program

Hasil laju korosi untuk memproteksi baja API 5L Grade B dalam kondisi air laut pada pengujian adalah 0,00103 mpy. Sementara hasil laju korosi yang didapat dari hasil perhitungan program adalah 0,05385 mpy. Jadi perbedaan hasil perhitungan program terhadap hasil pengujian adalah sebagai berikut:

$$\frac{Hasil_{program} - Hasil_{pengujian}}{Hasil_{Program}} \times 100\%$$

Tabel 3. Perbedaan nilai laju korosi hasil pengujian dan hasil perhitungan program

Laju Korosi (mpy)		Persentase (%)
Hasil Model Software	Hasil Pengujian	
0,0531±0,001	0,0010±0,001	0,98
0,0531±0,001	0,0004±0,001	0,99

0,0261±0,001	0,0052±0,001	0,79
0,0265±0,001	0,0005±0,001	0,98
0,0171±0,001	0,0004±0,001	0,98
0,0180±0,001	0,0041±0,001	0,77

Dapat dilihat dari tabel 1 presentase perbedaan nilai laju korosi hasil pengujian dan hasil perhitungan program tidak terlalu signifikan, rata-rata persentase perbedaan dibawah 1%.

## KESIMPULAN

Dari hasil eksperimen dan analisa yang telah dilakukan pada material pipa baja API 5L Grade B dengan zona lingkungan air laut, maka dapat disimpulkan bahwa:

- 1) Program dapat digunakan untuk menghitung laju korosi dan mendesain proteksi katodik system anoda korban pada pipa
- 2) Hasil penelitian yang diperoleh adalah prediksi umur pakai tiang pancang pipa karbon hasil model simulasi hampir sama dengan hasil percobaan yang memberikan perbedaan dibawah 1,0%.

## Ucapan terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam penulisan makalah ini. Makalah hasil penelitian ini didanai oleh Riset Hibah Dikti Tahun 2017-2018.

## Referensi

- [1]. Martin Smith and Colin Bowley, 2002, IN SITU PROTECTION OF SPLASH ZONES – 30 YEARS ON, *Journal of Corrosion*, Paper 02214
- [2]. B. R. Hou, J. Zhang, J. Z. Duan, Y. Li, J. L. Zhang, *Corr. Eng. Sci. Technol.*, 38(2003)157
- [3]. Abdoel Goffar, 2011, Rancangan Dasar Perhitungan Proteksi Katodik dengan Menggunakan Anoda Korban Pada Struktur Baja Anjungan Minyak di Lingkungan Air Laut, Peneliti Madya pada Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Minyak dan Gas Bumi “LEMIGAS”, Jakarta Selatan 12230, Indonesia.
- [4]. Jun Chen, Yanliang Huang, and Xiqing Dong, 2012, Study on the Splash Zone Corrosion Protection of Carbon Steel by Sacrificial Anode, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 7 (2012) 4114 – 4120
- [5]. Lyle, F., Schutt, H. U. (1998). CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S Corrosion under Wet Gas Pipeline Conditions in the Presence of Bicarbonate, Chloride and Oxygen, *CORROSION* 98, Paper 98011, NACE International, San Diego, California, USA.
- [6]. Agus Solehudin, Isdiriyani Nurdin, Wawang Suratno dan Muljadi Agha, (2010), Pengaruh Temperatur dan hidrogen sulfida terhadap laju korosi Baja Karbon API 5LX65 dalam Larutan NaCl 3,5%, *Berita Teknologi dan Bahan Teknik*, No. 24, Akreditasi Nomor : 106/Akred-LIPI/P2MB/10/2010. ISSN 0852-0615, hal : 10-15.
- [7]. N.Sridhar, D.S., Anderko, A.M., Lenca, M.M., and Schutt, H.U., (2001), Effect of Water and Gas Compositions on The Internal Corrosion of gas Pipeline Modeling and Experimental Studies, *Corrosion-NACE*, 57, Nomor 3 : 221- 235.
- [8]. M. Heldtberg, I.D. MacLeod, V.L. Richards, 2004, Corrosion and cathodic protection of iron in seawater: a case study of the *James Matthews* (1841), *Proceedings of Metal*, 2004 National Museum of Australia Canberra ACT 4-8 October 2004 ABN 70 592 297 967.
- [9]. Parakala, S.R., (2005), *EIS Investigation of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S Corrosion under Film Forming Conditions*, Thesis, Ohio University.
- [10]. G.S. Das dan A.S. Khana, (2004), Parametric Study of CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S Corrosion of Carbon Steel Used for Pipeline Application, *International Symposium of Research Students on Materials Science and Engineering*, Department of Metallurgical and Material Engineering, Indian Institute of technology Madras, December 20-22, 2004, Chennai, India : 1-9.
- [11]. Wei Sun dan Srdjan Nesic, (2007), A Mechanistic Model of H<sub>2</sub>S Corrosion of Mild Steel, *Corrosion-NACE*, Paper No : 07655: 1-26.
- [12]. Jun Chen, Yanliang Huang, and Xiqing Dong, 2012, Study on the Splash Zone Corrosion Protection of Carbon Steel by Sacrificial Anode, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 7 (2012) 4114 – 4120