

## BOUNDARY ELEMENT METHOD (BEM) UNTUK EVALUASI DESAIN SISTEM PROTEKSI KATODIK ANODA KORBAN

M. Ridha<sup>1</sup>, Syarizal Fonna<sup>1,2</sup>, Syifaul Huzni<sup>1</sup>, Israr<sup>1</sup> dan A. K. Ariffin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering  
Syiah Kuala University  
Jl.Tgk. Syech Abdul Rauf No. 7 Darussalam, Banda Aceh  
Provinsi Aceh, Indonesia  
Phone: +62-651-7555874, E-mail: ridha@tdmrc.org

<sup>2</sup>Department of Mechanical and Materials Engineering  
National University of Malaysia  
Bangi, 43600 Selangor DE, Malaysia

### Abstrak

*Sistem proteksi katodik telah lama digunakan untuk melindungi infrakstruktur seperti pada tangki dan jaringan pipa dari serangan korosi. Namun desain yang tidak sesuai dapat menyebabkan kegagalan pada infrastruktur tersebut. Hingga saat ini sistem proteksi katodik masih didesain berdasarkan pengalaman perancang sehingga efektivitas sistem proteksi tidak dapat dievaluasi terlebih dahulu. Karena itu dibutuhkan metode untuk mensimulasikan efektivitas sistem proteksi sebelum sistem tersebut diaplikasikan di lapangan. Pada penelitian ini, Boundary Element Method (BEM) 2 dimensi digunakan untuk mensimulasikan efektivitas sistem proteksi katodik anoda korban. Persamaan Laplace digunakan untuk pemodelan potensial di dalam domain tanah. BEM digunakan untuk menyelesaikan persamaan Laplace, sehingga didapat semua nilai potensial dan densitas arus pada permukaan logam dan pada setiap titik di dalam tanah. Kondisi batas pada struktur yang diproteksi dan anoda korban direpresentasikan oleh kurva polarisasi material masing-masing. Pada penelitian ini dilakukan pemodelan untuk sistem proteksi katodik untuk sistem perpipaan bawah tanah yang menggunakan anoda korban pita. Efek dari konduktivitas tanah dan jarak antara pipa dan anoda korban dievaluasi untuk mendapatkan nilai optimal dari beberapa faktor yang mempengaruhi desain sistem proteksi katodik tersebut. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode yang diusulkan dapat digunakan untuk mensimulasikan efektivitas sistem proteksi katodik anoda korban.*

*Keywords:* Proteksi katodik, BEM, sistem perpipaan, anoda korban, kurva polarisasi

### 1. Pendahuluan

Korosi telah mengakibatkan kerugian besar. FHWA (Federal Highway Administration; Badan Jalan Raya Federal Amerika Serikat) melaporkan bahwa total kerugian langsung akibat korosi di AS adalah \$ 276 miliar (sekitar 3.1 % dari GDP AS) [1]. Selain itu korosi juga merupakan penyebab utama kerusakan dan kegagalan pada kebanyakan struktur. Karena itu, meminimalisir ongkos pemeliharaan dan memperpanjang umur struktur merupakan hal yang sangat mendesak [2].

Berbagai macam sistem proteksi telah digunakan untuk melindungi struktur dari serangan korosi. Salah

satunya adalah sistem proteksi katodik. Namun sistem proteksi katodik sulit dievaluasi tanpa terlebih dahulu mengaplikasikannya di lapangan. Hingga saat ini perancang hanya bergantung kepada pengalaman dan trial-and-error. Karena itu dibutuhkan metode untuk mengevaluasi sistem proteksi katodik sebelum sistem diaplikasikan.

Dewasa ini, metode numerik seperti Boundary Element Method (BEM) [3] telah menarik minat para ahli dan peneliti korosi untuk pemodelan dan menyelesaikan berbagai kasus korosi [4-7]. Model matematika untuk lantai tangki dengan konfigurasi anoda standar telah dikembangkan, dengan

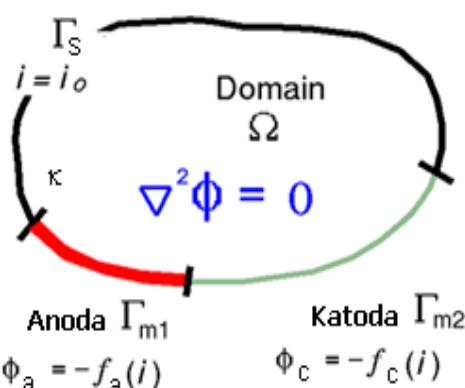


memperhatikan pengaruh kinetika polarisasi serta distribusi arus dan konsentrasi oksigen yang tidak seragam [8]. Beberapa faktor yang mempengaruhi interferensi sistem proteksi katodik juga telah dipelajari menggunakan perangkat lunak BEASY [9].

Pada penelitian ini, pengaruh konduktivitas tanah dan jarak antara pipa dan anoda terhadap distribusi potensial pada permukaan pipa yang menggunakan sistem proteksi katodik dengan anoda korban pita dianalisa menggunakan BEM.

## 2. Pemodelan Sistem Proteksi Katodik

Pemodelan sistem proteksi katodik pada sistem perpipaan dilakukan dengan mengasumsikan tanah sebagai domain dengan batas  $\Gamma_s$ . Permukaan anoda korban adalah  $\Gamma_{m1}$  dan permukaan pipa adalah  $\Gamma_{m2}$ . Gambar 1 menunjukkan model umum untuk sistem proteksi tersebut. Konduktivitas elektris tanah ( $\kappa$ ) diasumsikan seragam di seluruh bagian tanah dan tidak ada akumulasi atau kehilangan ion pada seluruh domain. Gambar 3 menunjukkan kondisi batas model.



Gambar 1. Model umum sistem proteksi anoda korban

Potensial di dalam domain tanah ( $\Omega$ ) dapat dimodelkan menggunakan persamaan Laplace :

$$\nabla^2\phi=0 \quad \text{di } \Omega \quad (1)$$

Densitas arus ( $i$ ) pada domain adalah :

$$i=-\kappa \frac{\partial \phi}{\partial n} \quad (2)$$

dimana  $\kappa$  adalah konduktivitas elektrik dan  $\partial/\partial n$  adalah turunan terhadap vektor normal.

Kondisi batas persamaan (1) adalah sebagai berikut :

$$i=0 \quad \text{di } \Gamma_s \quad (3)$$

$$-\phi_a = f_a(i) \quad \text{di } \Gamma_{m1} \quad (4)$$

$$-\phi_c = f_c(i) \quad \text{di } \Gamma_{m2} \quad (5)$$

dimana  $f_a(i)$  dan  $f_c(i)$  adalah fungsi non-linear yang merepresentasikan kurva polarisasi eksperimental untuk anoda dan katoda.

Bagian kanan persamaan (4) dan (5) berlambang minus dikarenakan potensial pada permukaan elektrolit pada daerah yang sangat dekat dengan permukaan logam,  $\phi$ , bernilai sama dengan minus dari beda potensial,  $E$ , antara logam dengan elektroda referensi (misalnya Saturated Calomel Electrode atau SCE). Selain itu potensial,  $\phi$ , didefinisikan dengan acuan terhadap logam dan dengan lambang yang sebaliknya dari yang biasa digunakan pada rekayasa korosi. Prosedur standar boundary element akan menghasilkan :

$$\kappa [H] \begin{Bmatrix} \phi_s \\ -f(i_a) \\ -f(i_c) \end{Bmatrix} - [G] \begin{Bmatrix} i_o \\ i_a \\ i_c \end{Bmatrix} = 0 \quad (6)$$

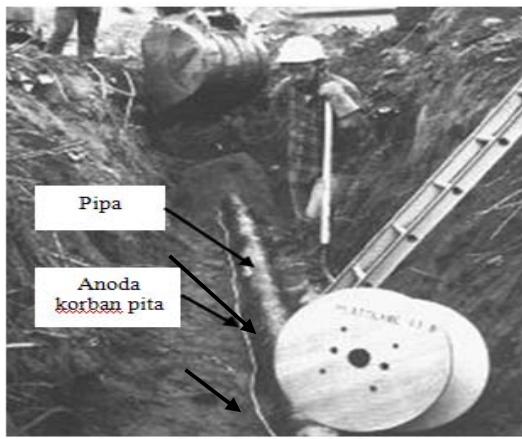
dimana penjelasan detil matriks  $[H]$  dan  $[G]$  diberikan pada referensi [10]. Subskrip s, a, c dan m merepresentasikan kuantitas pada  $\Gamma_s$ ,  $\Gamma_{m1}$ , dan  $\Gamma_{m2}$ .

Boundary Element Method digunakan untuk menyelesaikan persamaan Laplace pada persamaan (1), jika kondisi batas pada persamaan (3) hingga (5) diketahui. Dengan menyelesaikan persamaan Laplace, potensial,  $\phi$ , dan densitas arus,  $i$ , pada seluruh permukaan logam dapat diketahui.

## 3. Simulasi Numerik

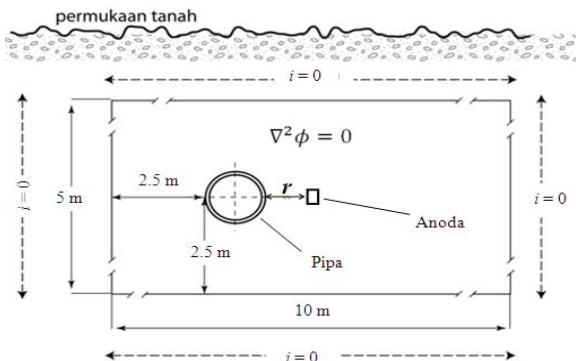
Untuk menunjukkan efektivitas metode yang digunakan, dianalisa suatu studi kasus sistem proteksi katodik pada sistem perpipaan yang menggunakan anoda korban pita. Gambar 2 menunjukkan anoda korban pita yang telah banyak digunakan. Anoda dipasang sejajar di sepanjang pipa untuk menjamin distribusi arus yang merata pada permukaan pipa. Sistem proteksi katodik ini akan optimal jika distribusi potensial dan densitas arus pada permukaan pipa mencapai nilai tertentu dan seragam di seluruh permukaan pipa.



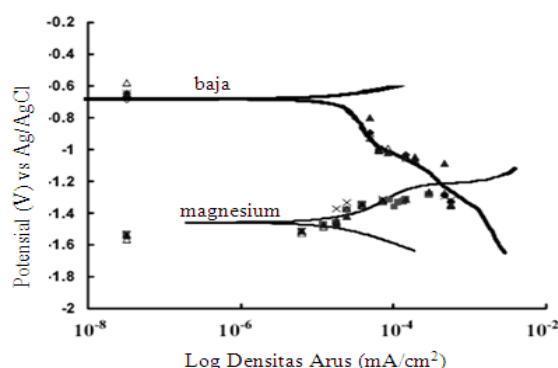


Gambar 2. Sistem proteksi katodik anoda korban menggunakan anoda korban pita [11]

Beberapa parameter dapat mempengaruhi kinerja sistem proteksi katodik misalnya konduktivitas tanah, jarak antara anoda dengan struktur dan jumlah anoda.



Gambar 3. Pemodelan sistem proteksi katodik yang menggunakan anoda



Gambar 4. Kurva polarisasi baja ringan (mild steel) dan paduan magnesium AZ19D di dalam air korosif [12]

Tabel 1. Parameter simulasi

Diameter pipa, $D$	50 cm
Diameter anoda, $d$	1 cm
Tanah	$\kappa = 200 \mu\text{S}/\text{cm}$ $\kappa = 698 \mu\text{S}/\text{cm}$ $\kappa = 1000 \mu\text{S}/\text{cm}$
Material pipa	Baja karbon sedang
Material anoda	Magnesium
Jarak pipa-anoda, $r$	5 cm, 20 cm, 60 cm, 1 m, 1.5 m

Pada penelitian ini, simulasi hanya dibatasi untuk menganalisa pengaruh konduktivitas tanah dan jarak antara pipa dan anoda terhadap kinerja sistem proteksi katodik. Gambar 3 menunjukkan model dua dimensi untuk sistem proteksi katodik pada pipa yang menggunakan anoda korban pita.

Bentuk penampang anoda pita diasumsikan berbentuk lingkaran. Kurva polarisasi yang digunakan diambil dari referensi (Gambar 4). Domain tanah diasumsikan sebagai suatu domain tunggal. Tabel 1 menunjukkan parameter-parameter yang digunakan dalam simulasi.

#### 4. Pre- dan Post-Processing Menggunakan Perangkat Lunak Open Source Pre-processing menggunakan SALOME

SALOME adalah perangkat lunak CAD *open source* yang merupakan salah satu proyek Open CASCADE [referensi: [www.salome-platform.org](http://www.salome-platform.org), [www.opencascade.org](http://www.opencascade.org)]. SALOME dapat digunakan untuk membangun model, *meshing* dan *post-processing*. SALOME pada dasarnya didesain untuk diintegrasikan atau digunakan dengan *solver* eksternal. Pada penelitian ini, SALOME digunakan untuk membangun model dan *meshing*, kemudian data geometri model dikeluarkan agar dapat digunakan oleh *solver*.

#### Post-processing menggunakan VisIt

VisIt adalah perangkat lunak *open source* untuk visualisasi data [referensi [visit.llnl.gov](http://visit.llnl.gov)]. Pengembang utama VisIt saat ini adalah Lawrence Berkeley National Laboratory. Melalui VisIt, data dapat divisualisasi dalam berbagai jenis plot dan dapat penampilkannya dapat dimodifikasi sesuai kebutuhan. Hasil kalkulasi BEM pada penelitian ini divisualisasi dalam plot skalar.

#### 5. Hasil Simulasi dan Diskusi

##### Pengaruh jarak antara pipa dan anoda ( $r$ )

Untuk menganalisa pengaruh jarak antara pipa dan anoda, digunakan konduktivitas tanah,  $\kappa = 698 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Parameter lainnya yang digunakan adalah seperti yang



diberikan pada Tabel 1.

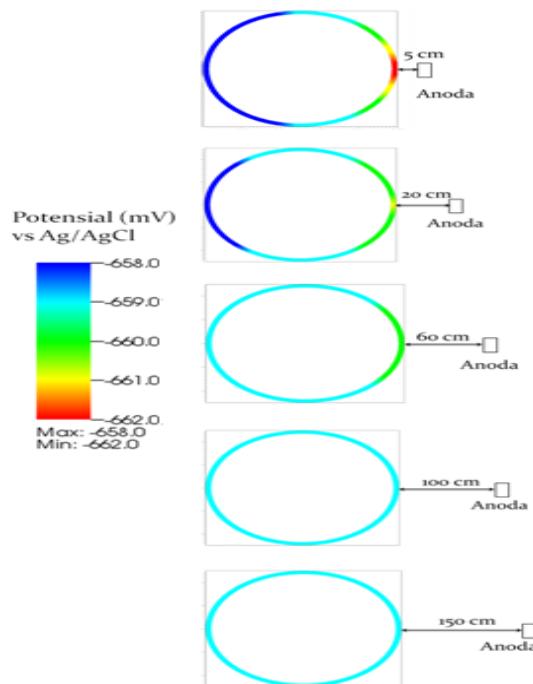
Gambar 5 menunjukkan distribusi potensial hasil simulasi BEM dengan variasi jarak. Dengan semakin dekatnya jarak antara pipa dan anoda, potensial pada permukaan pipa yang berdekatan dengan anoda semakin positif. Sedangkan pada permukaan yang berjarak paling jauh dengan anoda, potensial semakin negatif.

Ketika  $r = 5$  cm, perbedaan nilai potensial antara daerah permukaan pipa yang terdekat dan terjauh dengan anoda, sangat signifikan. Ini berarti anoda tidak menyediakan proteksi secara merata pada seluruh permukaan pipa. Dengan menambah  $r$ , perbedaan nilai potensial antara kedua daerah semakin berkurang.

Ketika  $r$  mencapai 150 cm, nilai potensial pada permukaan pipa hanya sedikit mengalami perubahan. Perbedaan nilai potensial di permukaan pipa di daerah yang terdekat dan terjauh dengan anoda tidak terlalu jauh lagi. Karena itu, dari simulasi diatas,  $r = 100$  cm dapat diambil sebagai jarak optimal.

#### Pengaruh konduktivitas tanah ( $\kappa$ )

Untuk menganalisa pengaruh konduktivitas tanah, dilakukan simulasi dengan  $r = 20$  dan 100 cm. Parameter lainnya sama dengan yang tertera pada Tabel 1.

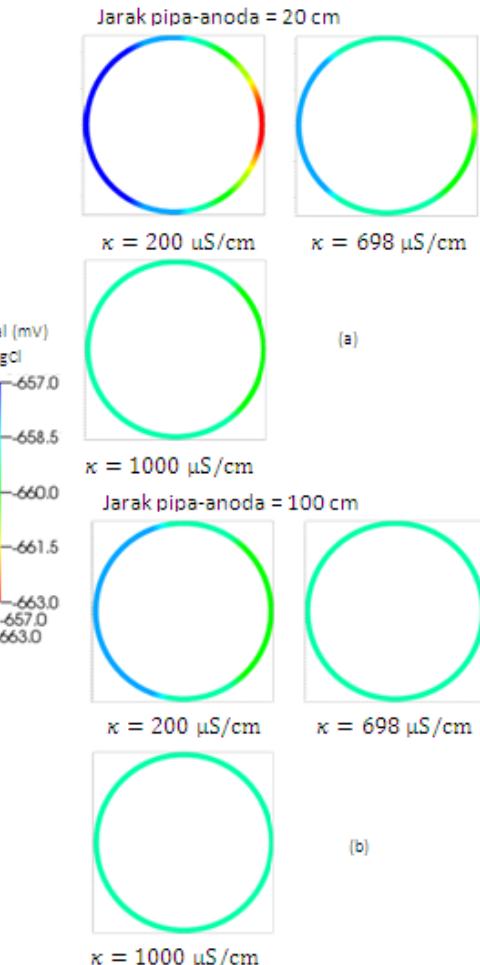


Gambar 5. Pengaruh jarak pipa-anoda,  $r$ , terhadap distribusi potensial pada permukaan pipa

Hasil simulasi BEM ditunjukkan pada Gambar 6. Dari hasil simulasi tampak bahwa semakin rendah konduktivitas tanah, semakin tinggi potensial pada

daerah permukaan pipa yang berdekatan dengan anoda. Ini menyebabkan proteksi terkonsentrasi hanya pada suatu bagian. Pada tanah dengan konduktivitas yang lebih tinggi, distribusi potensial pada permukaan pipa relatif lebih seragam.

Dengan membandingkan Gambar 6 (a) dan (b), tampak bahwa tanah dengan konduktivitas yang lebih rendah akan membutuhkan jarak antara pipa dan anoda yang lebih jauh ( $r$  yang lebih besar) untuk menghasilkan distribusi potensial seragam pada permukaan pipa.



Gambar 6. Pengaruh konduktivitas tanah terhadap distribusi potensial pada permukaan pipa

#### 5. Kesimpulan

Efektivitas sistem proteksi katodik menggunakan anoda korban pita telah dievaluasi menggunakan BEM. Potensial pada domain tanah dimodelkan menggunakan persamaan Laplace. BEM digunakan untuk menyelesaikan persamaan Laplace, sehingga didapat nilai potensial dan densitas arus pada seluruh permukaan pipa. Hasil simulasi BEM pada model dua dimensi



menunjukkan bahwa nilai potensial pada permukaan pipa akan berubah jika faktor-faktor seperti konduktivitas tanah dan jarak antara pipa dan anoda berubah. Dari hasil simulasi studi kasus, didapat  $r = 100$  cm akan menghasilkan proteksi yang optimal. Selain itu juga didapat bahwa pada tanah dengan konduktivitas yang relatif tinggi, tidak diperlukan  $r$  yang terlalu besar untuk mendapatkan proteksi yang optimal. Sementara itu, nilai  $r$  yang besar harus diterapkan pada tanah dengan konduktivitas rendah. Namun metode ini dapat ditingkatkan lagi dengan mengkombinasikannya dengan metode optimisasi seperti GA, untuk melakukan proses pencarian desain optimum sistem proteksi katodik. Dengan menggunakan metode ini, efektivitas sistem proteksi katodik dapat dievaluasi sebelum diimplementasikan.

### Penghargaan

Penelitian ini didanai oleh skim RUSNAS dengan nomor kontrak: 022/H11.2/INSENTIF-RUSNAS/III/2009.

### Daftar Pustaka

- [1] Anonymous, Cost of Corrosion Study Unveiled, *A Supplement to Material Performance*, NACE International, July 2002, p.2.
- [2] Broomfield, J.P. *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, investigation and repair*, E & FN Spon, London, pp. 40-50. 1998.
- [3] Brebbia, C.A. & Domiguez, J. *Boundary Elements – An Introductory Course*, 2<sup>nd</sup> ed., Computational Mechanics Publication. 1992.
- [4] Adey, R.A. & Niku, S.M. Computer Modeling of Corrosion Using the Boundary Element Method, *Computer Modeling in Corrosion*, ASTM STP 1154, pp. 248-264, 1992
- [5] Aoki, S., Amaya, K. & Miyasaka, M., *Boundary Element Analysis on Corrosion Problems*, Shokabo, Tokyo. 1998.
- [6] DeGiorgi, V.G., A Review of Computational Analysis of Ship Cathodic Protection System, *Boundary Element XIX*, Eds. By M. Marchetti, C.A. Brebbia, and M.H. Aliabadi, Compt. Mechanics Publication, pp.829-838, 1997.
- [7] Ridha, M., Inverse Analysis Methods for Identifying Corrosion of Reinforced Concrete Using Boundary Element Method, Doctoral Thesis, Tokyo Institute of Technology. 2002.
- [8] Riemer, D.P. & Orazem, M.E., A Mathematical Model for the Cathodic Protection of Tank Bottoms, *Corrosion Science*, 47, 849-868, 2004
- [9] Metwally, I.A., Al-Mandhari, H.M., Gastli, A., & Nadir, Z., Factors affecting cathodic-protection interference, *Engineering Analysis with Boundary Element*, 31: 485-493, 2007
- [10] Brebbia, C.A. *The Boundary Element Technique in Engineering*, Newnes-Butterworths, London. 1980.
- [11] Farwest Corrosion Control Company, Zinc Ribbon Anodes for Cathodic Corrosion Protection, <http://www.Farwestcorrosion.com/fwst/anodgalv/platt01.htm>, 2008
- [12] Jia, et al., Jimmy X., Guangling Song, and Andrej Atrens. *Boundary Element Method Predictions of the Influence of the Electrolyte on Galvanic Corrosion of AZ19D Coupled to Steel*. [www.beasy.com](http://www.beasy.com), 2007



