

## Simulation on the Effect of Anode-Cathode Distance on Reinforced Concrete Cathodic Protection Using BEM

Syarizal Fonna<sup>1,\*</sup>, Muzaiyin Arika Putra<sup>1</sup> dan Syifaul Huzni<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Mesin, Universitas Syiah Kuala - Banda Aceh

\*Korespondensi: syarizal.fonna@unsyiah.ac.id

**Abstract.** The sacrificial anode cathodic protection is one of the most common corrosion protection techniques used for steel structures such as underground tanks and submarine pipelines. This protection is also applied to reinforced concrete structures in order to protect the reinforcing steel from corrosion. However, the location of the anode relative to the structure to be protected still relies on the experience of the engineer or field operator. Therefore, a deeper understanding of the effect of anode-cathode displacement on the potential distribution of cathodic protection especially reinforced concrete is necessary. The objective of this study is to simulate the effect of anode-cathode displacement on cathodic protection of reinforced concrete using boundary element method (BEM). The cathodic protection system of reinforced concrete is modeled following Laplace's equation. The surface of the concrete has constant current density as a boundary condition. While the boundary conditions for the anodes and cathodes follow their respective polarization curves. Laplace's equation is solved by using BEM so that potential distributions across domains can be obtained. The case study using steel reinforcement as cathode and Zn as anode shows that the smaller the anode-cathode displacement causes the difference in the cathode potential value between the nearest and furthest part of the anode to become larger. Thus, the anode-cathode spacing gives effect to the potential distribution on the protected structure. Hence, it is necessary to find the anode-cathode displacement which gives optimum corrosion protection.

**Abstrak.** Proteksi katodik anoda korban merupakan salah satu teknik perlindungan korosi yang umum digunakan pada struktur baja seperti tangki bawah tanah dan jaringan pipa bawah laut. Jenis perlindungan ini juga diaplikasikan pada struktur beton bertulang guna melindungi baja tulangan dari serangan korosi. Namun, peletakan anoda korban terhadap struktur yang akan dilindungi masih mengandalkan pengalaman *engineer* atau operator lapangan. Oleh karena itu, pemahaman lebih dalam mengenai pengaruh jarak anoda-katoda terhadap distribusi potensial pada proteksi katodik khususnya beton bertulang perlu dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan simulasi pengaruh jarak anoda-katoda pada proteksi katodik beton bertulang dengan menggunakan metode elemen batas (*boundary element method* - BEM). Sistem proteksi katodik beton bertulang dimodelkan mengikuti Persamaan Laplace. Permukaan beton memiliki kondisi batas dengan densitas arus konstan. Sementara kondisi batas bagi anoda dan katoda mengikuti kurva polarisasinya masing-masing. Persamaan Laplace diselesaikan dengan menggunakan BEM sehingga distribusi potensial pada seluruh domain dapat diperoleh. Studi kasus dengan menggunakan tulangan baja sebagai katoda dan Zn sebagai anoda menunjukkan bahwa semakin kecil jarak anoda-katoda menyebabkan selisih nilai potensial katoda antara bagian terdekat dengan terjauh dari anoda menjadi semakin besar. Dengan demikian, jarak anoda-katoda memberikan pengaruh terhadap distribusi potensial pada struktur yang dilindungi. Oleh karenanya, perlu dicari jarak anoda-katoda untuk mendapatkan perlindungan korosi yang optimum.

**Kata kunci:** proteksi katodik, metode elemen batas, beton bertulang, anoda korban

© 2017. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

### Pendahuluan

Korosi adalah proses yang merusak logam melalui reaksi kimiawi yang terjadi antara logam tersebut dengan lingkungannya. Korosi dapat mengakibatkan pemborosan sumber daya yang sangat berharga, pemeliharaan/ perawatan yang mahal, penurunan efisiensi, biaya overdesign yang mahal, dan juga membahayakan keselamatan jiwa manusia [1]. Salah satu contoh kerugian akibat korosi ini adalah seperti pernyataan dari *The World*

*Corrosion Organization* (TWCO) yang menyatakan bahwa biaya tahunan untuk korosi sebesar \$ 2,2 triliun di seluruh dunia. Nilai tersebut lebih besar dari 3% dari Produk Domestik Bruto (PDB) dunia. Akan tetapi, pemangku kepentingan khususnya pemerintah dan industri masih sedikit memberikan perhatian yang serius terhadap kerugian korosi ini kecuali pada sektor berisiko tinggi seperti pesawat terbang dan jaringan pipa gas alam [2].

Salah satu aspek kerugian korosi yang semakin menjadi perhatian adalah korosi pada beton bertulang. Infrastruktur beton seperti jembatan, terowongan, gedung dan struktur beton lainnya mengalami kerugian yang tidak sedikit akibat peristiwa korosi [3]. Oleh karenanya, monitoring dan/atau pencegahan perlu dijalankan.

Proteksi katodik adalah salah satu metode yang dapat diterapkan untuk mencegah terjadinya korosi pada baja termasuk di dalam beton. Metode perlindungan korosi ini terbagi menjadi dua yaitu metode *sacrificial anode* (anoda korban) dan *impressed current* (arus paksa) [1].

Proteksi katodik anoda korban banyak digunakan termasuk pada beton bertulang. Hal ini karena tidak memerlukan sumber arus dari luar dan tidak memerlukan pengawasan khusus yang pada akhirnya berimpak pada pembiayaan yang relatif lebih murah. Namun, evaluasi efektivitas dari perlindungan korosi menggunakan metode tersebut masih bergantung kepada pengalaman operator/*engineer* dan *trial-error*. Oleh karena itu, diperlukan teknik lain untuk mengevaluasi efektivitas perlindungan korosi tersebut.

Evaluasi efektivitas anoda korban pada sistem proteksi katodik telah dikembangkan dengan menggunakan metode numerik yang salah satunya adalah metode elemen batas (*boundary element method* atau BEM). BEM digunakan karena sangat sesuai dengan kebutuhan analisis korosi mengingat korosi hanya terjadi pada permukaan logam [4].

Penelitian sebelumnya telah menjalankan simulasi efektivitas anoda korban dari proteksi katodik pada balok beton bertulang dengan menggunakan BEM [5]. Penelitian tersebut terbatas pada memodifikasi lokasi penempatan anoda korban dari balok beton. Sementara, kajian khusus mengenai pengaruh jarak anoda-katoda belum dijalankan. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut menjadi penting untuk dilakukan.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan simulasi pengaruh jarak anoda-katoda terhadap distribusi potensial dari proteksi katodik anoda korban pada beton bertulang dengan menggunakan BEM-3D merujuk pada penelitian sebelumnya.

### Pemodelan Proteksi Katodik Anoda Korban

Sistem proteksi katodik anoda korban untuk beton bertulang dapat dimodelkan dengan mengasumsikan domain beton ( $\Omega$ ) pada sekeliling baja tulangan dan anoda korban memiliki batas  $\Gamma_1$  dan berjarak  $r$  seperti pada Gambar 1. Gambar tersebut menunjukkan model umum dari sistem proteksi katodik anoda korban pada beton bertulang. Anoda korban dan baja tulangan memiliki permukaan

yang disimbolkan dengan  $\Gamma_{m2}$  dan  $\Gamma_{m3}$ . Konduktivitas beton ( $\kappa$ ) bernilai tetap dan tidak ada kehilangan atau akumulasi ion pada seluruh domain.

Berdasarkan kondisi tersebut, potensial listrik dalam domain beton dapat dimodelkan menggunakan persamaan Laplace [6, 7] seperti diberikan dalam Persamaan (1).

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

Nilai densitas arus ( $i$ ) pada domain tersebut dinyatakan melalui Persamaan (2).

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

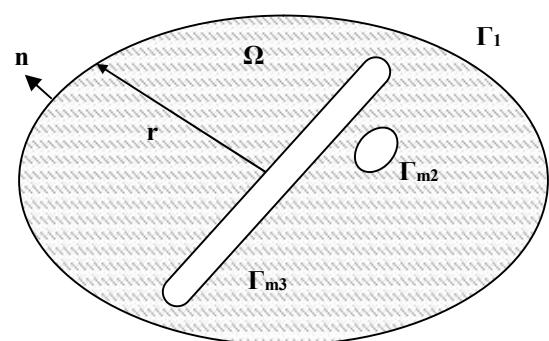
Yang mana  $\kappa$  adalah konduktivitas elektrik dan  $\partial \phi / \partial n$  adalah turunan terhadap vektor normal ( $n$ ).

Persamaan (1) dapat diselesaikan dengan mengetahui beberapa kondisi batas. Kondisi batas ini adalah sebagai mana yang diberikan dalam persamaan (3) untuk anoda korban dan persamaan (4) untuk katoda/baja tulangan.

$$-\phi_a = f_a(i) \quad \text{pada } \Gamma_{m2} \quad (3)$$

$$-\phi_c = f_c(i) \quad \text{pada } \Gamma_{m3} \quad (4)$$

Yang mana  $f_a(i)$  dan  $f_c(i)$  merupakan fungsi/data yang didapat dari kurva polarisasi anoda dan katoda melalui eksperimen.



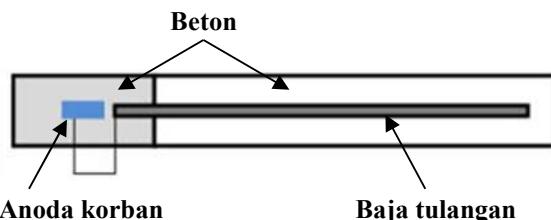
**Gambar 1.** Model umum sistem proteksi katodik anoda korban.

Dengan seluruh kondisi batas tersebut diketahui, Persamaan (1) dapat diselesaikan dengan menggunakan BEM. Oleh karena itu, potensial listrik pada permukaan baja tulangan dapat diketahui. Nilai potensial ini yang digunakan untuk evaluasi efektivitas sistem proteksi katodik. Prosedur lengkap untuk penyelesaian Persamaan

(1) dengan BEM tersebut dapat dilihat dalam literatur [8].

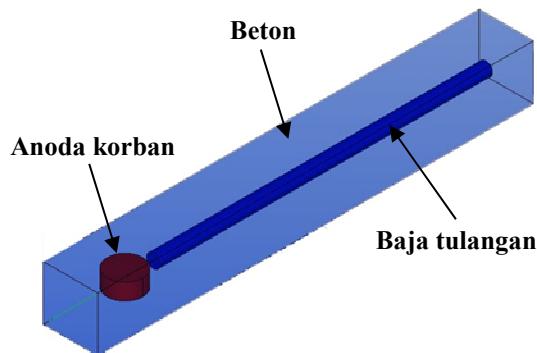
### Studi Kasus Sistem Proteksi Katodik Anoda korban

Sebagai studi kasus, satu desain sistem proteksi katodik pada balok beton bertulang dipilih berdasarkan sistem proteksi katodik yang dikaji oleh Wayne Dodds dkk. [9]. Kasus tersebut adalah seperti yang ditunjukkan pada gambar 2. Sistem tersebut terdiri dari satu batang baja tulangan dan satu anoda korban yang dicor ke dalam balok beton.



Gambar 2. Studi kasus untuk dievaluasi menggunakan BEM [9].

Seterusnya, model 3D balok beton bertulang tersebut dibangun dengan menggunakan software Salome Meca v7.2. Model ini seperti ditunjukkan dalam gambar 3.

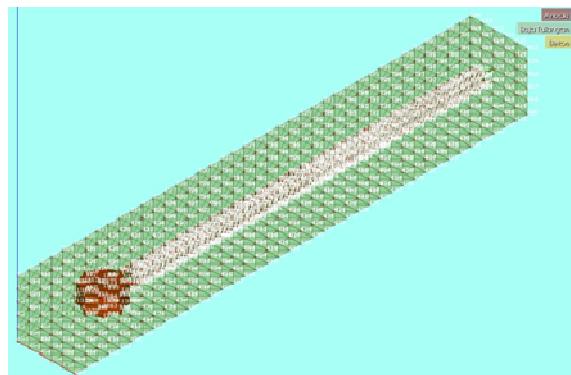


Gambar 3. Model 3D sistem proteksi katodik dari kasus yang dikaji.

Balok beton bertulang tersebut memiliki dimensi dengan panjang 800 mm, lebar 100 mm, dan tinggi 100 mm. Baja tulangan dengan dimensi panjang 610 dan diameter 25 mm. Sedangkan, anoda korban (Zn) dengan diameter 65 mm dan tebal 30 mm. Sementara, variasi jarak anoda-katoda yang digunakan dalam studi ini adalah 5; 10; dan 20 cm.

Kemudian, model balok beton bertulang tersebut di-meshing dengan menggunakan elemen segitiga. Software Salome Meca v7.2 masih digunakan pada proses ini. Jumlah elemen permukaan baja tulangan adalah 498 elemen, permukaan beton adalah 852 elemen, sedangkan pada permukaan

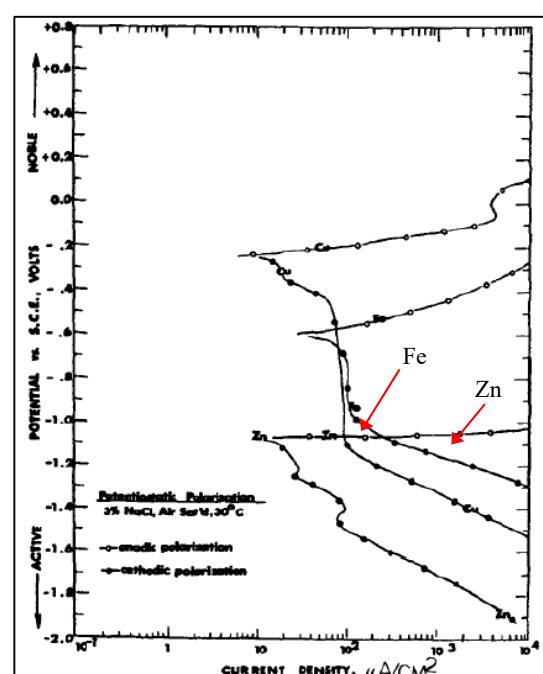
anoda korban (Zn) adalah 26 elemen. Total keseluruhan elemen bagi model tersebut adalah berjumlah 1376 elemen. Gambar 4 memperlihatkan model yang telah di-mesh.



Gambar 4. Model 3D proteksi katodik beton bertulang yang telah di-mesh.

Seterusnya, kondisi batas untuk permukaan beton ( $\Gamma_1$ ) ditetapkan dengan densitas arus sama dengan nol ( $i=0$ ). Kondisi ini dikarenakan mengingat rendahnya konduktivitas listrik yang dimiliki oleh beton. Kondisi batas untuk permukaan Zn ( $\Gamma_{m2}$ ) dan baja tulangan ( $\Gamma_{m3}$ ) mengikuti persamaan (3) dan (4). Kedua persamaan tersebut dibangun berdasarkan kurva polarisasi masing-masing logam yang diberikan dalam gambar 5.

Nilai potensial yang diberikan dalam kurva polarisasi gambar 5 merujuk kepada elektroda referensi SCE yang kemudian dikonversi menjadi rujukan terhadap elektroda referensi Cu/CuSO<sub>4</sub> agar sesuai dengan standar NACE. Konduktivitas beton yang digunakan dalam studi ini adalah sebesar  $0,007 \Omega^{-1}m^{-1}$  [7].

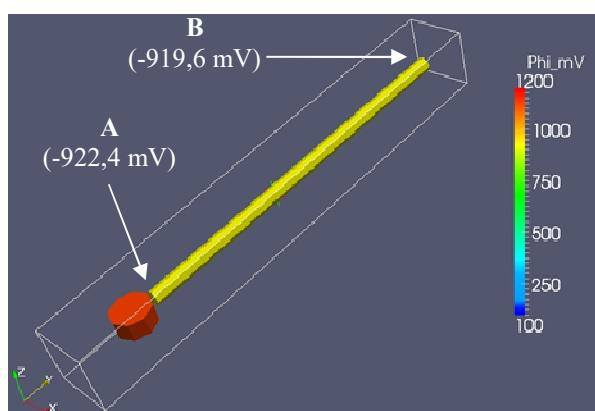


Gambar 5. Grafik polarisasi seng, tembaga, dan besi [10].

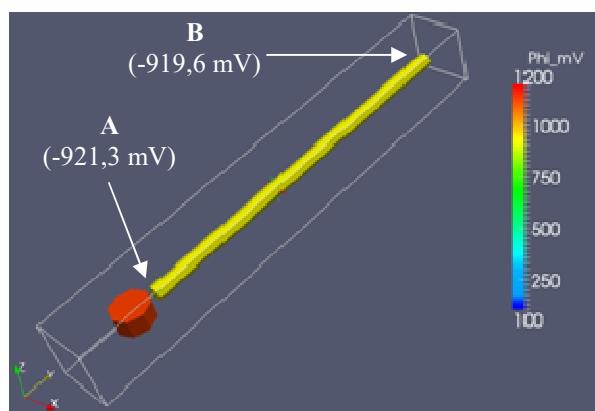
Setelah seluruh kondisi batas bagi model tersebut ditetapkan, simulasi sistem proteksi katodik dengan menggunakan BEM dapat dijalankan. Selanjutnya, distribusi nilai potensial yang diperoleh dari simulasi divisualisasikan untuk dianalisis.

## Hasil dan Pembahasan

Hasil simulasi menggunakan BEM untuk desain sistem proteksi katodik pada balok beton bertulang dengan jarak anoda-katoda 5 cm dapat dilihat pada gambar 6. Pada gambar tersebut terlihat bahwa distribusi potensial listrik pada permukaan baja tulangan menunjukkan nilai antara -922,4 s.d -919,6 mV. Nilai potensial yang paling negatif berada pada bagian permukaan baja tulangan yang paling dekat dengan anoda korban (titik A).



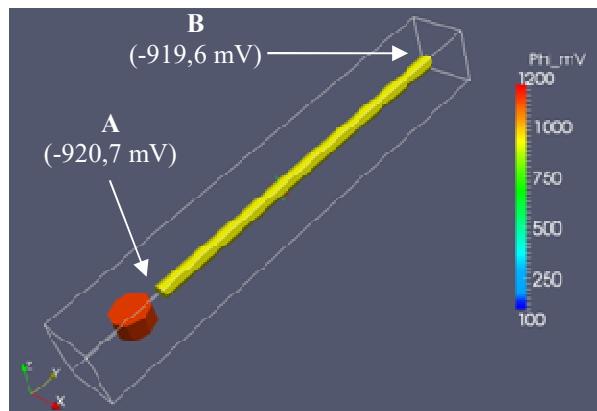
Gambar 6. Distribusi potensial pada permukaan baja tulangan dengan jarak anoda-katoda 5 cm.



Gambar 7. Distribusi potensial pada permukaan baja tulangan dengan jarak anoda-katoda 10 cm.

Gambar 7 dan 8 memperlihatkan distribusi nilai potensial listrik pada permukaan baja tulangan dengan jarak anoda-katoda 10 dan 20 cm. Distribusi nilai potensial untuk jarak anoda-katoda 10 cm adalah antara -921,3 s.d -919,6 mV. Sedangkan untuk jarak anoda-katoda 20 cm adalah dalam rentang -920,7 s.d -919,6 mV. Kedua gambar tersebut

jugalah menunjukkan bahwa nilai paling negatif berada pada bagian bawah tulangan yang terdekat dari anoda korban (titik A).



Gambar 8. Distribusi potensial pada permukaan baja tulangan dengan jarak anoda-katoda 20 cm.

Kemudian, efektivitas sistem proteksi katodik dalam melindungi korosi dapat dinilai dari tercapainya nilai potensial proteksi mengikuti standar yang ada dan juga nilai distribusi potensial yang merata. Nilai potensial proteksi umumnya mengikuti standar NACE. Sementara, distribusi potensial yang merata atau tidak merata, dapat diamati melalui besarnya selisih nilai maksimum dengan nilai minimum potensial. Semakin kecil selisih nilai tersebut, maka distribusi potensial menjadi semakin merata.

Pada kajian ini, pengaruh jarak anoda-katoda dianalisis dengan melihat selisih nilai tersebut. Melalui hasil yang ditunjukkan dalam Gambar 6, 7 dan 8 dapat dihitung nilai selisih antara potensial pada titik A dan titik B. Hasil perhitungan memberikan selisih nilai 2,8 mV untuk jarak anoda-katoda 5 cm; selisih nilai 1,7 mV untuk jarak anoda-katoda 10 cm; dan selisih nilai 1,1 mV untuk jarak anoda-katoda 20 cm.

Berdasarkan selisih nilai tersebut dapat dinyatakan bahwa semakin kecil jarak anoda-katoda memberikan dampak pada distribusi potensial yang tidak merata. Sebaliknya, semakin besar jarak anoda-katoda memberikan dampak pada distribusi potensial yang lebih merata. Namun, diduga akan ada satu jarak optimum yang akan memberikan distribusi potensial yang merata dengan tetap berada dalam rentang potensial sesuai kriteria proteksi. Dengan demikian, penelitian lanjutan perlu dijalankan untuk mendapatkan jarak optimum tersebut.

## Kesimpulan

BEM telah diaplikasikan untuk simulasi desain sistem proteksi katodik pada balok beton bertulang untuk mempelajari pengaruh jarak anoda-katoda

terhadap distribusi potensial pada tulangan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa jarak anoda-katoda memberi pengaruh pada distribusi potensial tersebut. Semakin besar jarak anoda-katoda memberikan distribusi potensial yang lebih merata. Namun, perlu adanya penelitian lanjutan guna mendapatkan jarak yang optimum yang memberikan distribusi potensial merata dengan tetap berada dalam rentang nilai potensial proteksi.

## Penghargaan

Penelitian ini dibiayai dengan Penelitian Fundamental 2017 nomor kontrak 07/UN11.2/PP/SP3/2017.

## Referensi

- [1]. P.R. Roberge, Handbook of Corrosion Engineering, McGraw-Hill, Inc., New York, 2000.
- [2]. Information on: [http://corrosion.org/wco\\_media/nowisthetime.pdf](http://corrosion.org/wco_media/nowisthetime.pdf) (diakses pada 26 September 2017).
- [3]. Information on: <https://www.openaccessgovernment.org/wp-content/uploads/2014/06/ETH-Zurich-ebook-web.pdf> (diakses pada 26 September 2017).
- [4]. Information on: <http://web.stanford.edu/class/energy281/BoundaryElementMethod.pdf> (diakses pada 26 September 2017)
- [5]. S. Fonna, M.R. Hidayatullah, S. Huzni, S. Thalib, and M. Ridha, Evaluation of CP System on Reinforced Concrete Pier Using 3D Boundary Element Method, Proceedings of The 5th Annual International Conference Syiah Kuala University (AIC Unsyiah) 2015, pp 96-100, September 9-11, 2015, Banda Aceh, Indonesia
- [6]. S. Fonna, I.M. Ibrahim, M. Ridha, S. Huzni, and A.K. Ariffin (2016) "Simulation of the Ill-Posed Problem of Reinforced Concrete Corrosion Detection Using Boundary Element Method", International Journal of Corrosion 2016 (2016): 1-5.
- [7]. S. Fonna, S. Huzni, M. Ridha, A.K. Ariffin, Inverse Analysis Using Particle Swarm Optimization for Detecting Corrosion Profile of Rebar in Concrete Structure, Engineering Analysis with Boundary Elements 37 (2013) 585–593
- [8]. S. Aoki and K. Kishimoto, Application of BEM to Galvanic Corrosion and Cathodic Protection. Topics in Boundary Element Research. Editor: Brebbia, C. A. Springer-Verlag : New York, 1990.
- [9]. W. Dodds, C. Christodoulou, C.I. Goodier, and S.A. Austin, Performance Evaluation of Galvanic Anodes Through Laboratory Testing And On-Site Monitoring, RILEM International workshop on performance-based specification and control of concrete durability, pp. 175-182, 11 - 13 June 2014, Zagreb, Croatia
- [10]. R.G. Kasper, and M.G. April, Electrogalvanic Finite Element Analysis of Partially Protected Marine Structure, Corrosion, NACE International, 39 (1983) 181-188.