

Corrosion Detection on Reinforced Steel in Concrete Using BEIA 2D

Syarizal Fonna¹, Syifaul Huzni¹ dan Gunawarman^{2,*}

¹Program Studi Teknik Mesin, Universitas Syiah Kuala - Banda Aceh

²Jurusan Teknik Mesin, Universitas Andalas - Padang

*Korespondensi: gunawarman@ft.unand.ac.id

Abstract. Corrosion of reinforcing steel in concrete is one of the causes of failure for reinforced concrete structures. The possibility for this early failure becomes larger in areas with high earthquake intensity such as most of Indonesia. Therefore, the early detection of corrosion in steel is necessary to be done. The conventional method to detect corrosion of reinforcing steel in concrete is generally done by using a Half-Cell Potential Technique. However, the method has such limitations that it required a lot of data, laborious, and only indicates the possibility level of corrosion. Therefore, another method is needed for the early detection of corrosion of reinforced concrete. This study aims to apply boundary element inverse analysis (BEIA) 2D which is a combination of boundary element method (BEM) and particle swarm optimization (PSO) as an effort to detect corrosion of reinforcing steel in concrete. The concrete domain is modeled by Laplace's Equation. The surface of the concrete has a boundary condition with constant current density. Meanwhile, the anode and cathode boundary conditions follow the polarization curve. BEM is used to calculate potential numerically. While PSO is used to optimize the objective function in corrosion detection. The case study using a simple model of reinforced concrete with single corrosion indicates BEIA 2D able to detect corrosion with error <5%. Further development is needed to enhance the capabilities of the BEIA in detecting corrosion.

Abstrak. Korosi pada baja tulangan dalam beton adalah salah satu penyebab kegagalan dini struktur beton bertulang. Potensi kegagalan dini ini menjadi semakin besar pada daerah dengan intensitas gempa bumi yang tinggi seperti sebagian besar wilayah Indonesia. Oleh karena itu, deteksi dini korosi pada baja tulangan dalam beton menjadi sangat penting untuk dilakukan. Upaya konvensional untuk deteksi korosi tulangan dalam beton secara umum dilakukan dengan menggunakan Half-Cell Potential Technique. Namun, metode ini memiliki batasan seperti memerlukan data pengukuran yang relatif banyak, tenaga lapangan yang tidak sedikit dan hasilnya hanya menunjukkan tingkat kemungkinan terjadinya korosi. Oleh karena itu, diperlukan metode yang lain untuk deteksi dini korosi beton bertulang. Penelitian ini bertujuan untuk mengaplikasikan metode *boundary element inverse analysis* (BEIA) 2D yang merupakan gabungan dari *boundary element method* (BEM) dan *particle swarm optimization* (PSO) sebagai upaya deteksi korosi pada baja tulangan dalam beton. Domain beton bertulang dimodelkan mengikuti Persamaan Laplace. Permukaan beton memiliki kondisi batas dengan densitas arus konstan. Sementara, kondisi batas anoda dan katoda mengikuti kurva polarisasinya. BEM digunakan untuk menghitung nilai potensial secara numerik. Sedangkan PSO digunakan untuk mengoptimalkan fungsi objektif dalam pendeteksian korosi. Studi kasus dengan menggunakan model sederhana beton bertulang dengan single korosi menunjukkan bahwa BEIA 2D mampu mendeteksi korosi pada tulangan dengan error <5%. Walaupun demikian, pengembangan lebih lanjut diperlukan untuk meningkatkan kapabilitas dari metode BEIA tersebut.

Kata kunci: deteksi korosi, BEIA, beton bertulang, BEM, PSO

© 2017. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Korosi pada infrastruktur akan berdampak pada kerugian suatu negara. Angka kerugian ini diperkirakan mencapai 1 triliun dolar di Amerika pada tahun 2013 [1]. Secara umum, kerugian akibat korosi pada suatu negara berkisar antara 1-5 % gross national product (GNP) [2]. Sementara, Indonesia belum memiliki data yang pasti.

Indonesia tidak terlepas dari ancaman kerugian akibat korosi mengingat fakta bahwa Indonesia

adalah salah satu negara dengan garis pantai terpanjang di dunia. Ancaman tersebut salah satunya tertuju pada infrastruktur beton bertulang yang berupa jembatan, dermaga, bangunan publik, dan struktur lainnya. Korosi pada beton bertulang tersebut menyebabkan penurunan kekuatan infrastruktur sehingga mengakibatkan umur layanan (*service life*) menjadi lebih singkat [3] seperti rubuhnya supermarket di Ontario, Kanada tahun 2012 [4] dan wahana Taman Impian Jaya Ancol

tahun 2011 [5]. Ancaman kerugian ini dapat diperburuk dengan adanya faktor eksternal seperti gempa bumi yang sering terjadi di Indonesia. Oleh karena itu, korosi pada beton bertulang ini perlu dideteksi seawal mungkin supaya tindakan perbaikan segera dapat diambil [6].

Metode half-cell potential mapping yang merujuk kepada ASTM C876 adalah salah satu contoh teknik yang umum digunakan dalam mendeteksi korosi beton bertulang [7]. Hasil yang diberikan oleh teknik ini adalah tingkat kemungkinan terjadinya korosi berdasarkan nilai potensial permukaan beton [8]. Namun, metode tersebut memiliki keterbatasan yang diantaranya adalah memerlukan data yang banyak [9], tenaga lapangan yang tidak sedikit [10] dan tidak menggambarkan kondisi aktual korosi [11]. Akibatnya, pengembangan metode lain menjadi penting dilakukan.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, metode inverse telah dikembangkan untuk keperluan deteksi korosi beton bertulang. Marinier & Isgor [11] telah membangun metode inverse berdasarkan kepada finite element method (FEM) and *conjugate gradient method*. Akan tetapi, mengingat korosi terjadi hanya pada permukaan bahan, FEM kurang sesuai untuk simulasi korosi dan boundary element method (BEM) dikatakan lebih sesuai [12]. Kemudian, investigasi korosi beton bertulang juga telah dilakukan oleh Sadowski [13] dengan menggunakan *artificial neural network* (ANN). Namun, teknik ini memerlukan banyak data pengukuran lapangan dalam menjalankan ANN untuk mendapatkan hasil yang baik.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan metode inverse dengan gabungan antara *boundary element method* (BEM) dan *particle swarm optimization* (PSO) yang kemudian diberi nama *boundary element inverse analysis* (BEIA) untuk deteksi korosi pada tulangan dalam beton.

Pemodelan Korosi pada Beton Bertulang

Korosi tulangan di dalam beton dapat dimodelkan dengan mengasumsikan domain beton (Ω) memiliki batas Γ_1 dan berjarak r seperti pada gambar 1. Pada baja tulangan, permukaan anoda (korosi) dan katoda disimbolkan dengan Γ_{m2} dan Γ_{m3} . Kemudian, konduktivitas beton (κ) bernilai tetap dan tidak ada kehilangan atau akumulasi ion pada seluruh domain.

Berdasarkan kondisi tersebut, potensial elektrik dalam domain beton dimodelkan menggunakan persamaan Laplace [6, 10] 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).

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

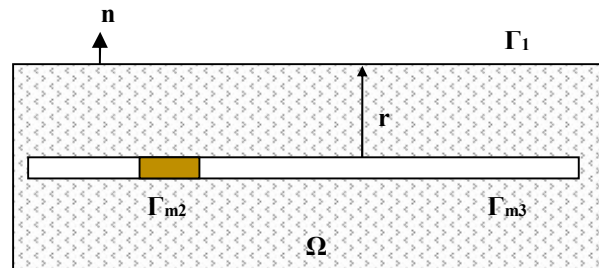
Yang mana κ adalah konduktivitas elektrik dan $\partial/\partial n$ adalah turunan terhadap vektor normal (n).

Persamaan (1) dapat diselesaikan ketika beberapa kondisi batas telah diketahui. Kondisi batas ini adalah sebagai mana yang diberikan dalam persamaan (3) untuk anoda dan persamaan (4) untuk katoda. Adapun kondisi batas bagi permukaan beton ditetapkan dengan $i=0$ mengingat rendahnya resistivitas beton.

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

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

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 korosi tulangan dalam beton.

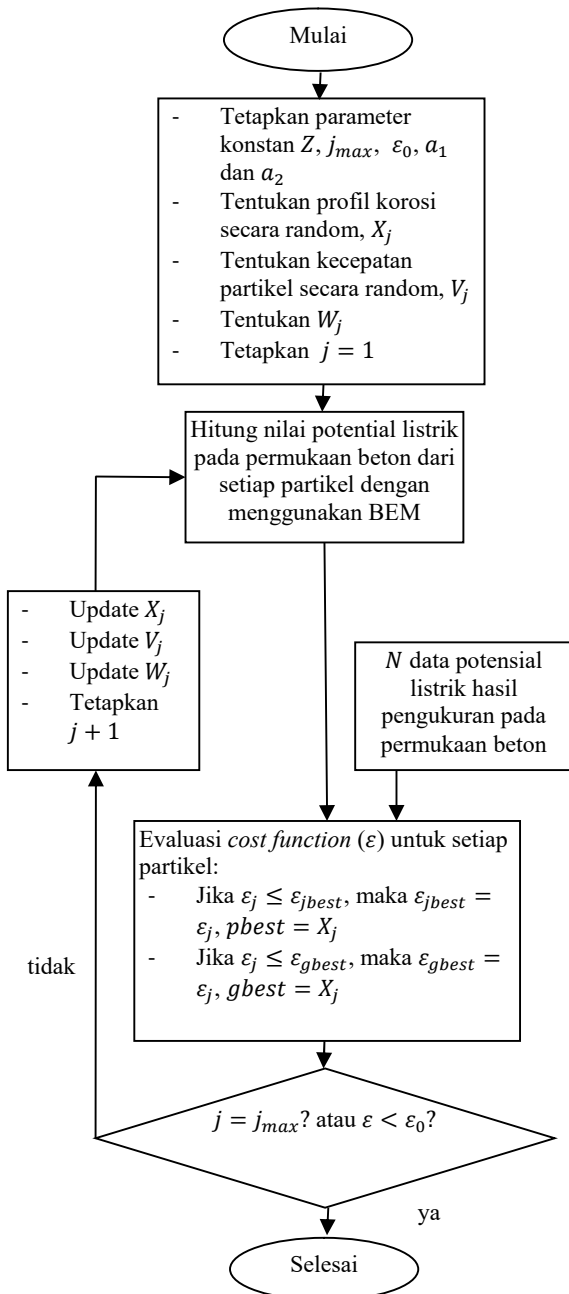
Jika seluruh kondisi batas tersebut diketahui, persamaan (1) dapat diselesaikan dengan menggunakan BEM. Dengan demikian, potensial elektrik pada permukaan beton dan baja tulangan dapat diketahui. Nilai potensial pada permukaan beton ini adalah yang digunakan dalam BEIA yang dikembangkan. Prosedur lengkap untuk penyelesaian persamaan (1) dengan BEM tersebut dapat dilihat dalam literatur [14].

Boundary Element Inverse Analysis

Boundary Element Inverse Analysis (BEIA) dikembangkan dengan menggabungkan BEM dan *Particle Swarm Optimization* (PSO). PSO adalah metode optimasi yang diperkenalkan oleh Kennedy dan Eberhart pada tahun 1995 [15]. Metode ini memiliki kesamaan dengan *Genetic Algorithm* (GA) dalam hal pencarian solusi yang dimulai

secara acak dan kemudian di-update oleh generasinya.

Gambar 2 menunjukkan diagram alir dari metode BEIA yang dikembangkan untuk deteksi korosi pada tulangan dalam beton. BEIA yang dikembangkan ini masih terbatas pada penyelesaian persoalan 2D. Pada diagram alir tersebut dapat dilihat kedudukan BEM dalam BEIA yaitu untuk mendapatkan nilai potensial elektrik pada permukaan beton.



Gambar 2. Diagram alir BEIA

Seperti yang ditunjukkan dalam gambar 2, parameter konstan BEIA ditentukan terlebih dahulu termasuk parameter *inertia wight* (W). Kemudian, profil korosi (lokasi) ditetapkan secara random.

Kecepatan dari sejumlah Z partikel (kandidat solusi) juga ditentukan secara random pada tahap ini. Berdasarkan nilai-nilai tersebut, BEM dijalankan untuk mendapatkan nilai potensial elektrik pada permukaan beton bagi setiap partikel. Selanjutnya, sejumlah N data potensial listrik pada permukaan beton hasil pengukuran lapangan dimasukkan dalam simulasi. Nilai *cost function* (ϵ) untuk setiap partikel dihitung dengan mengikuti persamaan (5).

$$\epsilon(X) = \sum_{l=1}^N \left[\left(\frac{\phi_l - \bar{\phi}_l}{\bar{\phi}_{max}} \right) \right]^2 \quad (5)$$

Nilai ϵ tersebut dievaluasi mengikuti aturan dalam gambar 2. Kemudian, bila *stopping criterion* sudah terpenuhi, maka solusi (korosi) yang dicari sudah diperoleh yaitu semua partikel telah menumpu pada kondisi yang sama. Namun, bila tidak terpenuhi, maka iterasi berlanjut dengan melakukan update pada profil korosi (X), dan kecepatan partikel (V) dengan mengikuti persamaan (6), dan (7).

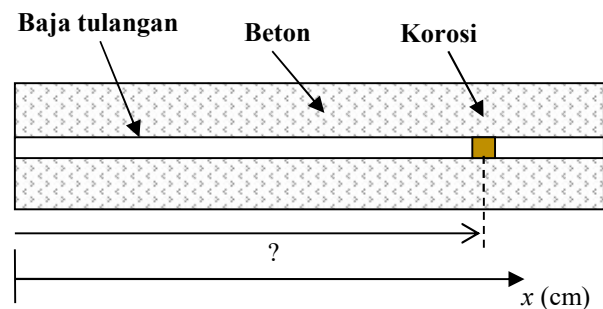
$$X_{j+1} = X_j + V_{j+1} \quad (6)$$

$$V_{j+1} = W_j V_j + a_1 r_1 (pbest - X_j) + a_2 r_2 (gbest - X_j) \quad (7)$$

Prosedur tersebut diulangi sehingga *stopping criterion* terpenuhi atau solusi telah diperoleh.

Studi Kasus Deteksi Single Korosi

Sebagai studi kasus, model sederhana beton bertulang dengan single korosi dipilih. Kasus tersebut adalah seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.

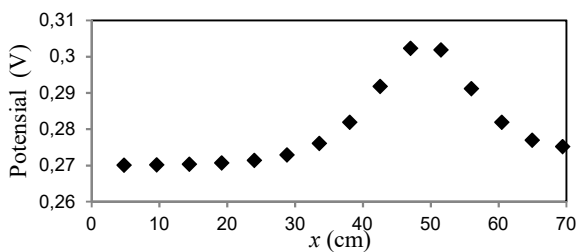


Gambar 3. Studi kasus untuk deteksi korosi dengan menggunakan BEIA.

Geometri dari model tersebut adalah dengan panjang tulangan 70 cm dengan tebal selimut beton 10 cm. Kemudian, model ini di-mesh dengan menggunakan elemen konstan sejumlah 1002 elemen.

Parameter konstan yang digunakan pada studi ini adalah $W = 0,1$; ukuran korosi = 2 cm; dan $a_1 = a_2 = 0,5$. Konduktivitas beton yang digunakan adalah sebesar $0,007 \Omega^{-1}m^{-1}$ [10]. Kondisi batas bagi anoda dan katoda untuk studi ini adalah menggunakan kurva polarisasinya masing-masing dengan merujuk pada peneliti sebelumnya [10].

Kemudian, data potensial hasil pengukuran ($\bar{\phi}$) diperoleh dengan asumsi lokasi korosi berada pada $x=50$ cm. Dengan keadaan ini, BEM bisa dijalankan sehingga nilai potensial pada permukaan beton dapat diperoleh. Dari nilai-nilai potensial tersebut, 15 data (N) nilai potensial dipilih menjadi data potensial hasil pengukuran ($\bar{\phi}$) seperti ditunjukkan dalam gambar 4.

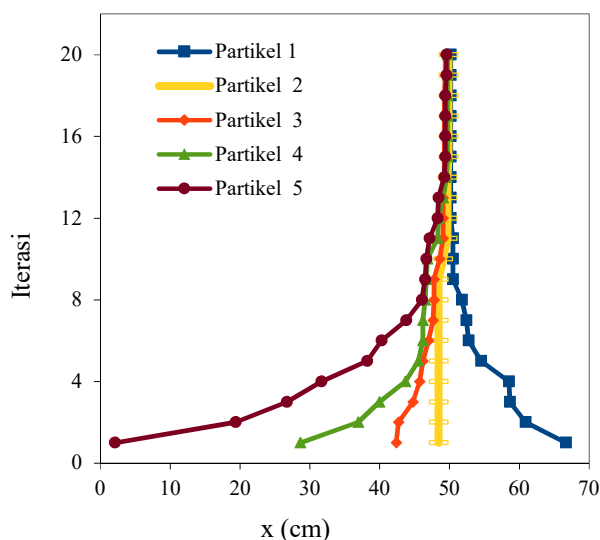


Gambar 4. Data potensial hasil pengukuran ($\bar{\phi}$) sebanyak 15 data.

Setelah seluruh kondisi bagi model tersebut terpenuhi, simulasi deteksi korosi pada beton bertulang dengan menggunakan BEIA dapat dijalankan.

Hasil Simulasi dan Pembahasan

Hasil simulasi menggunakan BEIA untuk pencarian lokasi korosi pada tulangan dalam beton dengan menggunakan 5 partikel dapat dilihat pada gambar 5. Simulasi dilakukan hingga iterasi ke-20 saja.



Gambar 5. Lokasi korosi yang diperoleh oleh setiap partikel pada setiap iterasi.

Pada gambar 5 dapat dilihat bahwa seluruh kandidat solusi atau partikel disebarkan secara acak dalam area pencarian pada iterasi pertama. Sejalan dengan bertambahnya iterasi, lokasi dari setiap partikel bergerak mengarah pada satu kedudukan tertentu. Pada iterasi ke-12, semua partikel telah membentuk satu klaster.

Kemudian, mulai iterasi ke-15, seluruh partikel tidak berubah kedudukannya lagi. Pada kondisi ini, lokasi korosi dinyatakan telah ditemukan oleh seluruh partikel dan merupakan jawaban yang dicari. Lokasi korosi yang diperoleh oleh BEIA adalah pada $x = 49,67$ cm dengan error $<5\%$.

Kesimpulan

BEIA yang merupakan gabungan BEM dan PSO telah dikembangkan untuk deteksi lokasi korosi tulangan dalam beton. Hasil simulasi menunjukkan bahwa BEIA berhasil mendeteksi lokasi korosi pada tulangan dalam beton untuk kasus yang dikaji dengan error $<5\%$. Namun, perlu adanya penelitian lanjutan guna meningkatkan kapabilitas BEIA yang dikembangkan untuk penyelesaian kasus yang lebih rumit.

Penghargaan

Penelitian ini dibiayai dengan Penelitian Pasca Doktor 2017 nomor kontrak 134/UN11.2/PP/SP3/2017.

Referensi

- [1] Information on: <http://www.g2mtlabs.com/cost-of-corrosion> (diakses pada 14 Juli 2014)
- [2] P.R. Roberge,. Corrosion Engineering: Principles and Practices. McGraw-Hill. New York, 2008.
- [3] E. Moreno, A. Cobo, G. Palomo, M.N. González, Mathematical models to predict the mechanical behaviour of reinforcements depending on their degree of corrosion and the diameter of the rebars, Construction and Building Materials, 61 (2014):156–163.
- [4] Information on: <http://www.thewhig.com/2012/06/25/corrosion-likely-culprit-in-roof-collapse-expert> (diakses pada 18 August 2013).
- [5] Information on: <http://megapolitan.kompas.com/read/2011/09/28/12185069/Struktur.Wahana.Atlantis.Dikaji.Ulang> (diakses pada 28 April 2016).
- [6] 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

- [7] Kelvin. Probe electrode for contactless potential measurement on concrete – Properties and corrosion profiling application. *Corrosion Science*. 56 (2012):26–35.
- [8] M. Ridha, S. Fonna, S. Huzni and A.K. Ariffin. Corrosion risk assessment of public buildings affected by the 2004 tsunami in banda aceh. *Journal of Earthquake and Tsunami*. 7 (2013) : 1-22.
- [9] H.W. Song and V. Saraswathy, Corrosion monitoring of reinforced concrete structures – a review. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2 (2007) 1-28.
- [10] M. Ridha, K. Amaya and S. Aoki, Boundary element simulation for identification of steel corrosion in concrete by magnetic field measurement. *Corrosion*. 61 (2005): 784-791.
- [11] P. Marinier and O.B. Isgor, Model-Assisted Non-destructive Monitoring of Reinforcement Corrosion in Concrete Structures. *Nondestructive Testing of Materials and Structure*. Editors: O. Büyüköztürk, et al. RILEM Bookseries. Springer-Verlag (2013): 719-724.
- [12] Z. Lan, X. Wang, B. Hou, Z. Wang, J. Song and Shengli Chen, Simulation of sacrificial anode protection for steel platform using boundary element method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 36 (2012): 903–906.
- [13] L. Sadowski. Non-destructive investigation of corrosion current density in steel reinforced concrete by artificial neural networks. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 13 (2013): 104-111.
- [14] 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.
- [15] K.E. Parsopoulos and M.N. Vrahatis, *Particle Swarm Optimization and Intelligence: Advances and Applications*. New York: Information Science Reference, 2010.