

## Pengaruh Jumlah Data Potensial Terhadap Kemampuan BEIA Dalam Mendeteksi Korosi Pada Beton Bertulang

Syahrul Fathi\*<sup>1</sup>, Iqbal Tanjung<sup>2</sup>, Israr Bin M. Ibrahim<sup>3</sup>, Syarizal Fonna<sup>4</sup>, Syifaul Huzni<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Teuku Umar, Indonesia

<sup>2</sup> Jurusan Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Indonesia,

<sup>3,4,5</sup> Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, Darussalam-Banda Aceh 23111, Indonesia

e-mail: \*[syahrulfathi@utu.ac.id](mailto:syahrulfathi@utu.ac.id)

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan kemampuan Boundary Element Inverse Analysis (BEIA) dalam mendeteksi korosi lokal pada beton bertulang dengan variasi data potensial dalam mendeteksi 2 lokasi korosi. Pengembangan BEIA berbasis Boundary Element Method (BEM) dan Particle Swarm Optimization (PSO). BEM digunakan untuk menghitung nilai potensial pada permukaan beton. Kemudian PSO digunakan untuk mengevaluasi cost function untuk mendeteksi korosi pada baja tulangan yang berada di dalam beton. BEIA dijalankan dengan data nilai pengukuran potensial pada permukaan beton. Hasil simulasi dari BEIA menunjukkan posisi partikel berada pada lokasi yang ditentukan. Dari hasil simulasi BEIA dengan variasi jumlah data potensial dalam mendeteksi lokasi korosi pada beton bertulang dapat disimpulkan bahwa jumlah data pengukuran nilai potensial yang lebih besar dapat meningkatkan kemampuan BEIA dalam mendeteksi lokasi korosi pada beton bertulang. Hal ini membuktikan jumlah data pengukuran nilai potensial berpengaruh pada kinerja BEIA.

**Kata kunci**—Deteksi korosi, BEM, PSO, BEIA, Beton Bertulang

### Abstract

The purpose of this research is to develop the ability of Boundary Element Inverse Analysis (BEIA) to detect corrosion locations in reinforced concrete with potential data variations in detecting 2 locations of corrosion. BEIA is based on Boundary Element Method (BEM) and Particle Swarm Optimization (PSO). BEM is used to calculate the potential value on the concrete surface. Then PSO is used to evaluate the cost function to detect corrosion of reinforcing steel in the concrete. BEIA was performed by using several electrical potential data of the concrete surface. The simulation results show that the particle position is at the specified location. BEIA simulation results with variations in potential data in detecting corrosion locations in reinforced concrete, it can be concluded that a larger amount of potential measurement data can increase the ability of BEIA to detect corrosion locations in reinforced concrete. This proves the amount of potential data has an effect on BEIA performance.

**Keywords**— Corrosion detection, BEM, PSO, BEIA, Reinforced Concrete

## 1. PENDAHULUAN

**K**orosi adalah proses degradasi logam secara elektrokimia akibat adanya reaksi kimia antara logam dengan lingkungannya [1]. Korosi adalah peristiwa alami yang tidak bisa dihindari namun dapat dikendalikan. Pada logam baja korosi biasanya disebut dengan karat. Korosi merupakan permasalahan yang telah mencapai tingkat global yang mana mengakibatkan kerugian besar secara ekonomi [2]. Pada kasus baja tulangan dalam beton, korosi merupakan peristiwa yang sangat tidak diinginkan karena dapat mengakibatkan kegagalan dini pada struktur beton tersebut [3]. Oleh karena itu, pendeteksian korosi secara dini pada struktur beton bertulang perlu dilakukan agar dapat dilakukan pencegahan dini, sehingga umur struktur beton lebih lama, dan dapat mengurangi biaya perawatan [4].

Teknik yang umum digunakan dalam mendeteksi korosi pada beton bertulang adalah Metode *half-cell potential mapping* yang mengacu kepada American Society of Testing Material (ASTM) C876 [5]. Metode ini digunakan untuk mencari suatu nilai yang berupa nilai potensial. Setiap nilai yang didapat pada beton bertulang menjadi acuan untuk memprediksi korosi yang terjadi pada baja tulangan. Namun, ditemukan permasalahan ketika mendeteksi korosi lokal yang disebabkan oleh nilai potensial beton berbeda jauh dengan permukaan tulangan [6]. Karena ditemukan permasalahan yang tidak dapat diselesaikan oleh *Half-Cell Potential Mapping*, maka banyak peneliti mengembangkan sebuah metode yang dapat mengambil sebuah penyelesaian permasalahan yang baik.

Pengembangan sebuah metode untuk deteksi korosi lokal beton bertulang telah dilakukan dengan *Boundary Element Inverse Analysis* (BEIA) yang berbasis *Boundary Element Method* (BEM) dan *Particle Swarm Optimization* (PSO) [6,7,8]. Penggunaan PSO pada BEIA ialah untuk mendeteksi korosi dengan membandingkan data hasil pengukuran dan data hasil simulasi. Dengan mengetahui potensial korosi pada permukaan beton maka inverse analisis dapat digunakan untuk memprediksi lokasi terjadinya korosi.

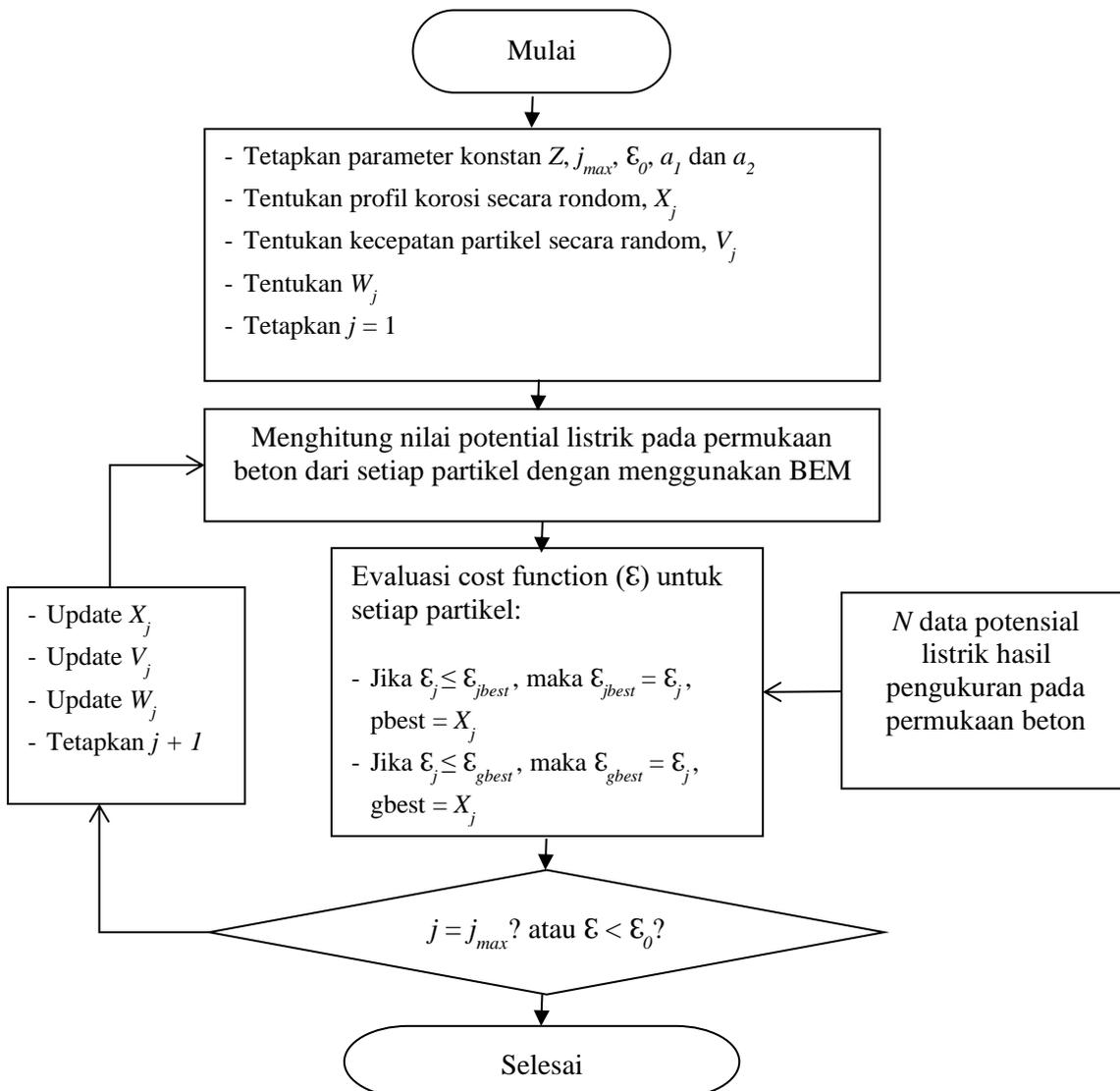
Pada penelitian sebelumnya didapatkan bahwa aplikasi BEIA pada deteksi korosi beton bertulang menunjukkan tingkat akurasi yang cukup baik dengan  $error \leq 5\%$  [7]. Parameter BEM dan PSO juga telah dioptimalisasi sehingga kemampuan BEIA dalam deteksi korosi juga semakin baik. Kemudian pada penelitian sebelumnya, BEIA juga telah dapat mendeteksi 2 lokasi korosi pada beton bertulang [9]. Hasil dari penelitian-penelitian tersebut mendapatkan rekomendasi yang baik guna meningkatkan kinerja dari BEIA dalam mendeteksi lokasi korosi beton bertulang. Namun penelitian yang telah dilakukan selama ini menggunakan jumlah data pengukuran nilai potensial yang sama, sehingga penelitian tentang pengaruh jumlah data pengukuran nilai potensial perlu dilakukan guna meningkatkan kinerja BEIA untuk mendeteksi lokasi korosi beton bertulang.

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi pengaruh jumlah data pengukuran nilai potensial terhadap kemampuan BEIA dalam menemukan lokasi korosi beton bertulang. Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai sumber data dan informasi serta rekomendasi terkait jumlah data pengukuran nilai potensial yang tepat untuk meningkatkan kemampuan BEIA dalam mendeteksi lokasi korosi beton bertulang. Batasan masalah pada penelitian ini adalah hanya menggunakan program BEIA dan melakukan variasi jumlah data nilai potensial sebanyak 4 buah yaitu 5, 10, 15, dan 20. Dengan ukuran geometri panjang 400 mm.

## 2. METODE PENELITIAN

BEIA telah dikembangkan untuk keperluan deteksi korosi pada beton bertulang dengan menggabungkan *boundary element method* (BEM) dan *particle swarm optimization* (PSO). Penelitian tentang BEIA telah dilakukan pada penelitian sebelumnya [5, 6, 7]. BEIA dijalankan berdasarkan diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Langkah awal menentukan parameter konstan BEIA seperti  $Z$ ,  $j_{max}$ ,  $\epsilon_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  dan  $W_j$ . Parameter  $Z$  adalah jumlah partikel,  $j_{max}$  adalah iterasi maksimum,  $a_1$  dan  $a_2$  adalah nilai konstanta,  $W_j$  adalah *weight inertia*.

Kemudian profil korosi awal ( $X_j$ ) dilakukan secara acak pada permukaan beton. Kata partikel dalam metode tersebut digunakan untuk solusi kandidat. BEM dijalankan untuk menghitung nilai potensial pada permukaan beton untuk setiap partikel. Langkah selanjutnya adalah memasukkan  $N$  data potensial pada permukaan beton. Untuk mendapatkan profil korosi yaitu lokasi korosi pada tulangan dalam beton, BEIA menggunakan persamaan (1).



Gambar 2.1 Diagram Alir BEIA

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

Pada persamaan ini,  $X$  adalah profil korosi yang terletak pada baja tulangan dan  $N$  adalah nilai potensial untuk diinput BEIA.  $\phi$  dan  $\bar{\phi}$  adalah nilai potensial yang dihitung menggunakan BEM dan data potensial listrik yang diukur seperti menggunakan *half-cell potential mapping*.  $\bar{\phi}_{max}$  adalah nilai potensial listrik tertinggi diantara  $N$ . Nilai *cost function* dievaluasi untuk setiap partikel dari setiap iterasi dengan ketentuan yang sudah ditentukan.

Jika iterasi maksimum sudah dicapai, maka simulasi telah selesai dilakukan. Akan tetapi, jika tidak tercapai maka iterasi berlanjut dengan melakukan pembaruan pada  $X_j$  dan  $V_j$  Perubahan posisi dan kecepatan dari setiap partikel untuk setiap iterasi mengikuti persamaan (2) dan (3). Pada persamaan tersebut,  $X_{j+1}$  = posisi partikel selanjutnya,  $X_j$  = posisi partikel saat ini,  $V_{j+1}$  = kecepatan partikel selanjutnya,  $V_j$  = kecepatan partikel saat ini,  $W_j$  = *Inertia Weight*,  $a_1$  dan  $a_2$  = konstan,  $r_1$  dan  $r_2$  = angka acak (0-1),  $pbest$  = posisi partikel lokal terbaik,  $gbest$  = posisi partikel global terbaik, dan  $j$  = iterasi.

$$X_{j+1} = X_j + V_{j+1} \quad (2)$$

$$V_{j+1} = WV_j + a_1 r_1 (pbest - X_j) + a_2 r_2 (gbest - X_j) \quad (3)$$

Nilai  $\varepsilon$  terus dievaluasi mengikuti diagram alir pada Gambar 1 sehingga posisi setiap partikel sudah menumpu dititik yang sama atau iterasi maksimum yang telah ditentukan sudah tercapai.

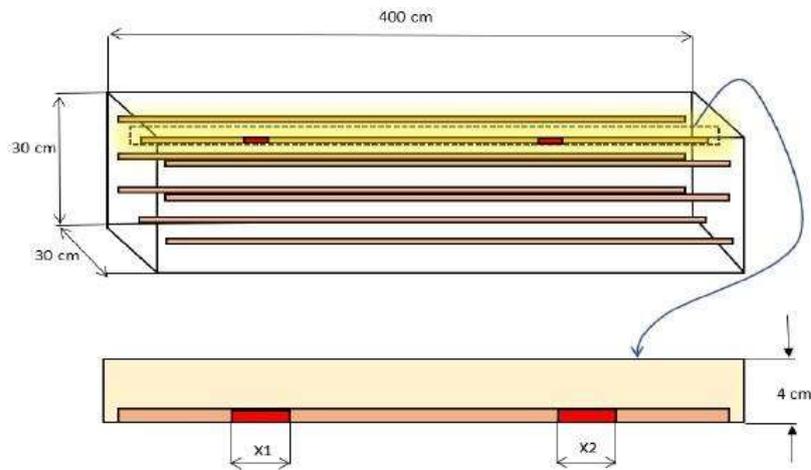
Namun pada penelitian-penelitian sebelumnya BEIA masih disimulasikan hanya terbatas pada penggunaan jumlah data pengukuran nilai potensial ( $N$ ) sebanyak 15. Kemudian untuk tahapan pengembangan BEIA dalam mendeteksi lokasi korosi, dilakukan simulasi BEIA dengan memvariasikan jumlah data pengukuran nilai potensial terhadap geometri beton. Jumlah nilai data potensial yang diinput akan divariasikan dengan beberapa jumlah data pengukuran nilai potensial seperti pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Variasi jumlah data pengukuran nilai potensial (N)

No	Jumlah Data Pengukuran Nilai Data Potensial
1	5
2	10
3	15
4	20

Selanjutnya model geometri dari studi kasus ini merujuk pada penelitian (Fonna, 2018) dengan ukuran panjang 400 cm, lebar 30 cm dan tinggi 30 cm. Kemudian geometri beton

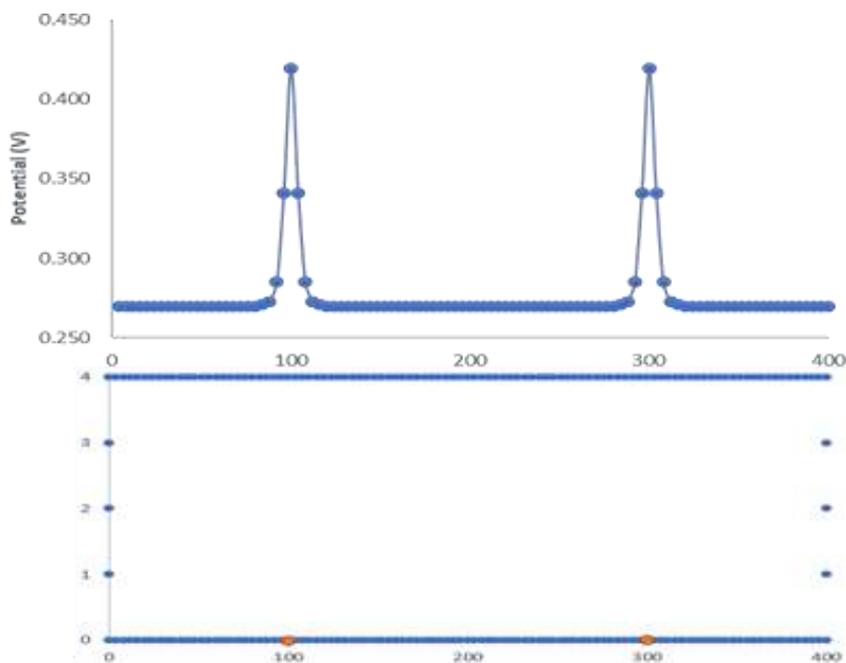
betulang disederhanakan dalam bentuk dua dimensi seperti terlihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Model geometri beton bertulang dengan tulangan

Selanjutnya geometri beton bertulang dibangun dan di mesh dengan menggunakan *MS. excel*, koordinat, *node* dan elemen diatur susunannya, kemudian di integrasikan kedalam kode BEIA. Untuk menjalankan simulasi BEIA, diperlukan data potensial pada permukaan beton yang didapat dari pengukuran lapangan. Namun, pada kasus ini data potensial hasil pengukuran lapangan tersebut diambil dari hasil simulasi BEM dengan mengasumsikan korosi berada pada  $X= 100$  dan  $300$  cm.

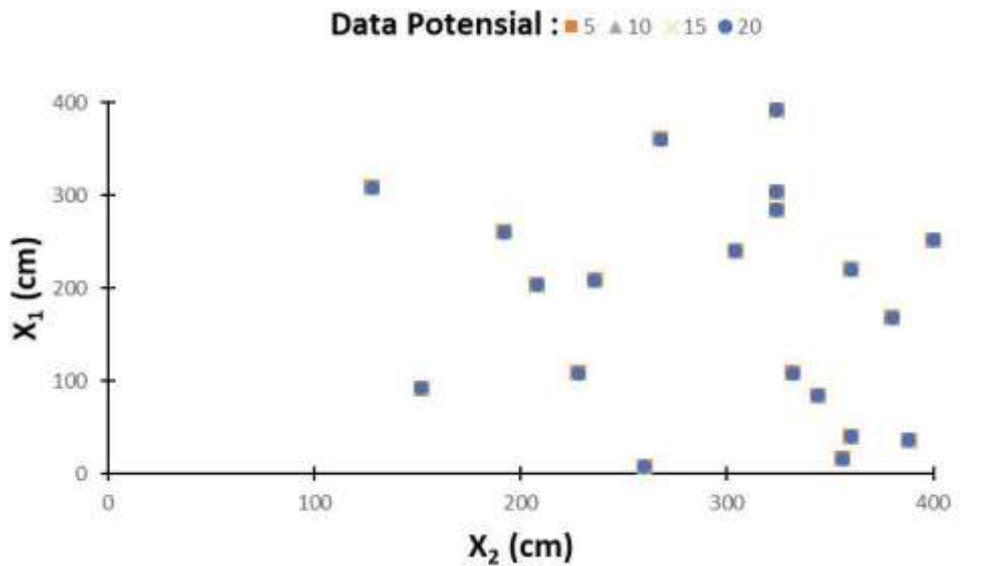
Data potensial hasil simulasi BEM didapatkan seperti pada Gambar 2.3. Data titik potensial menggunakan presisi tiga digit dibelakang koma digunakan sebagai data pengukuran dalam simulasi menggunakan BEIA.



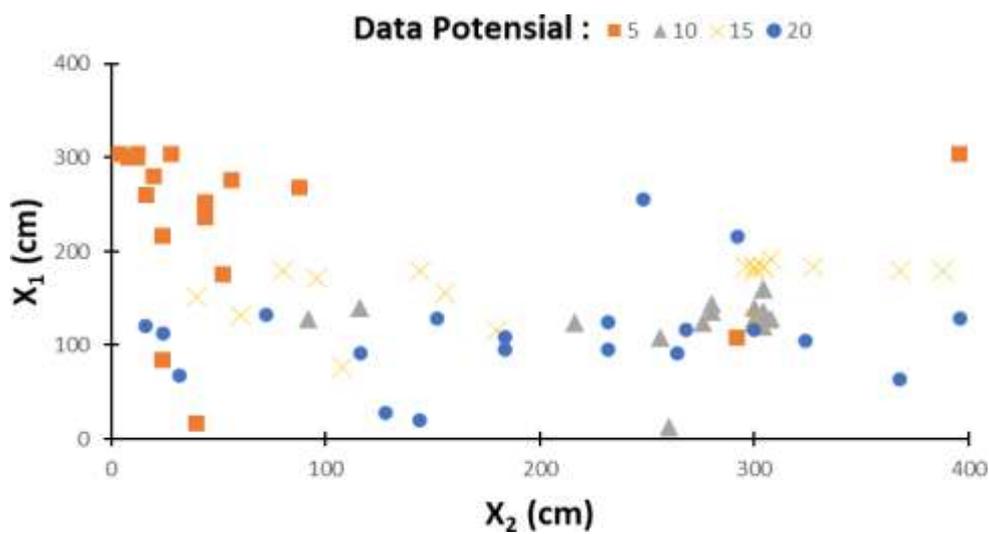
Gambar 2.3. Nilai potensial pada permukaan beton

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data yang dihasilkan dari simulasi *Boundary Element Inverse Analysis* (BEIA) dapat dilihat pada Gambar 3.1-3.3 yang menunjukkan pergerakan partikel di setiap iterasi yang dilakukan. Untuk iterasi pertama dan iterasi ke-10 Gambar 3.1 (a-b) BEIA menghasilkan 20 partikel secara random. Setiap partikel memiliki dua lokasi korosi tertentu. PSO pada BEIA mengevaluasi *cost function* pada iterasi ini dan memperbarui partikel dengan mengikuti persamaan (2) - (3) pada iterasi berikutnya.



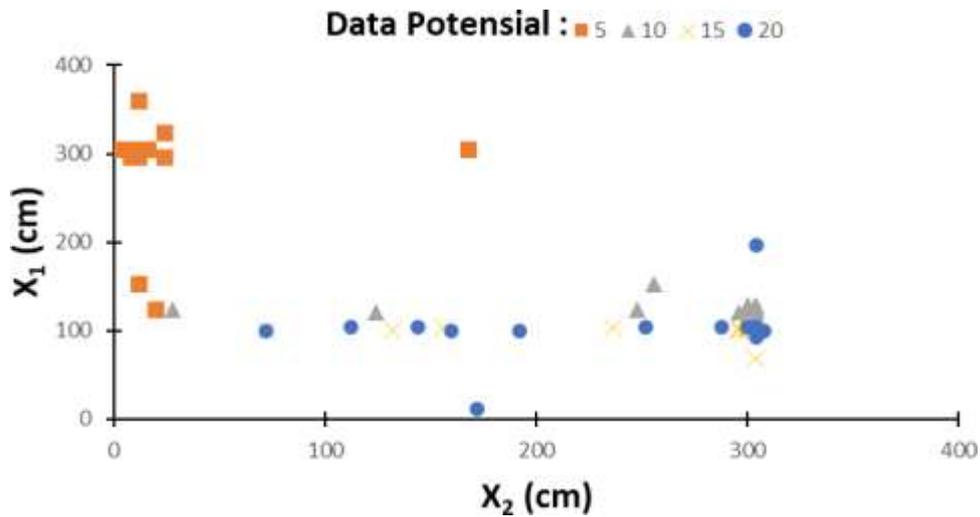
(a)



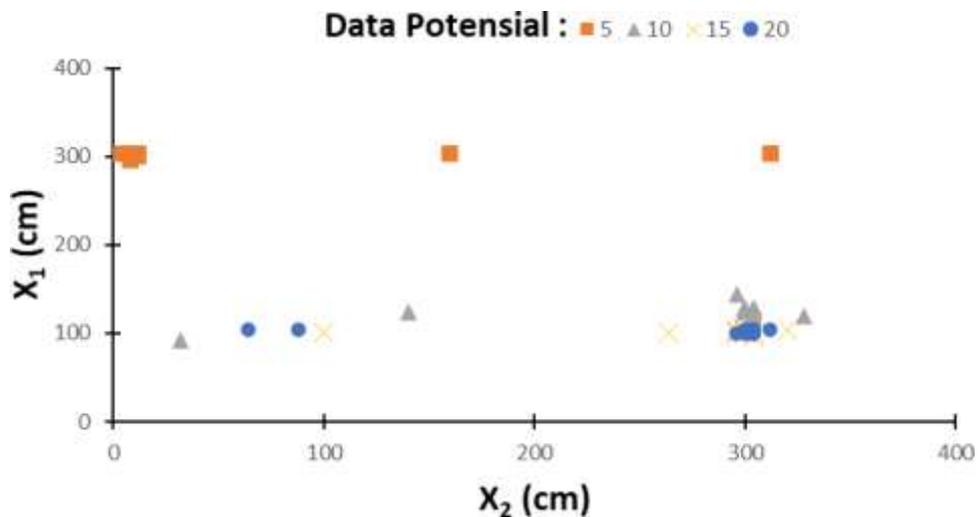
(b)

Gambar 3.1 Hasil dari simulasi BEIA: (a) Iterasi 1; (b) Iterasi 10

Kemudian Gambar 3.2 (a-b) menunjukkan iterasi partikel ke-30 dan ke-50 dari simulasi BEIA. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa partikel mulai bergerak menuju lokasi korosi yang diketahui. Tapi, untuk BEIA yang menggunakan 5 data potensial, mulai berkumpul pada satu lokasi korosi saja seperti terlihat pada gambar.



(a)

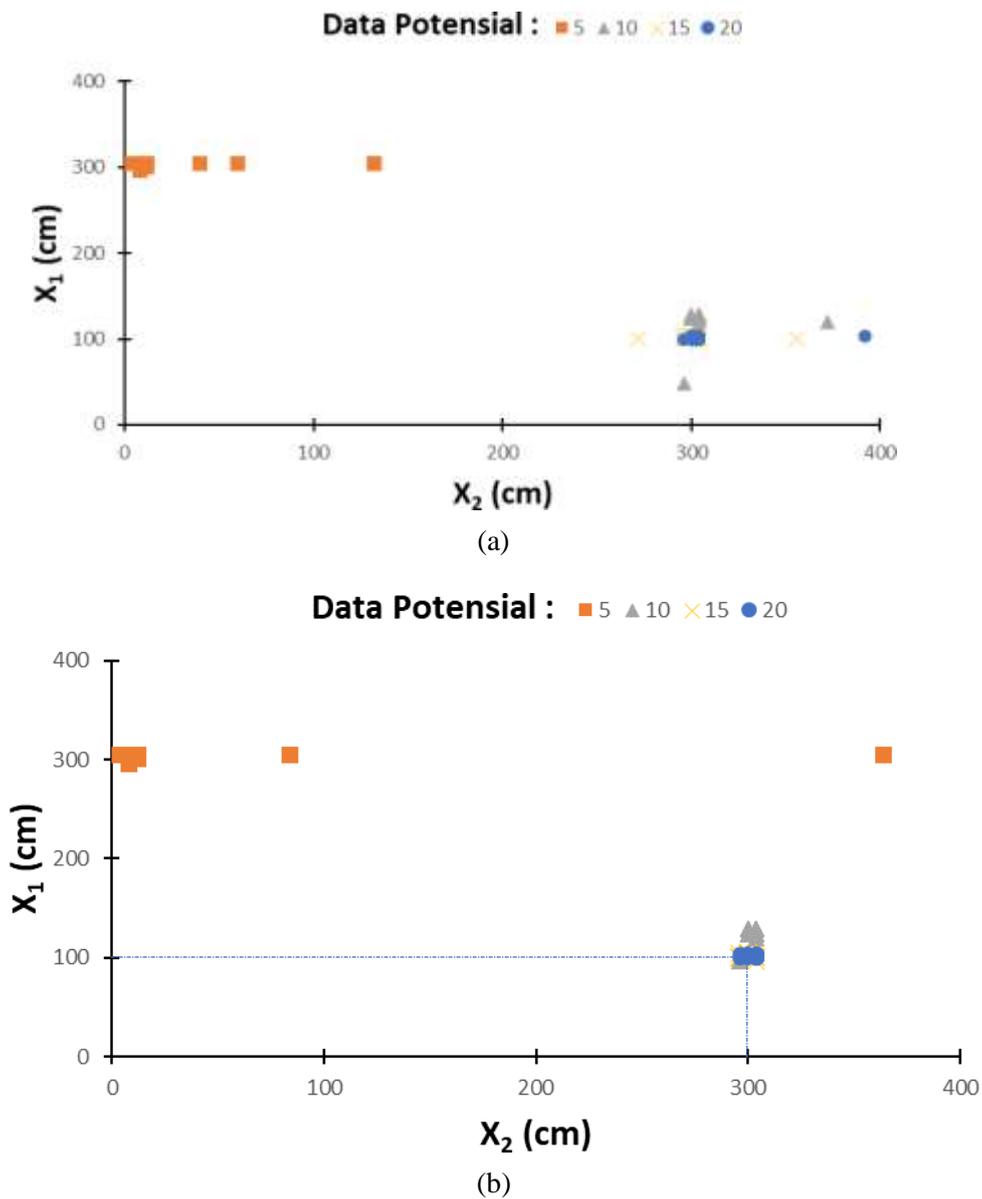


(b)

Gambar 3.2 Hasil dari simulasi BEIA: (a) Iterasi 30; (b); Iterasi 50

Pada Gambar 3.3 (a-b) menunjukkan iterasi partikel ke-65 dan ke-80 dari simulasi BEIA. Untuk BEIA dengan variasi data potensial: 10, 15 dan 20 partikel yang bergerak menuju 2 lokasi korosi yang diketahui mulai jelas disini. Dimana prtikel sudah mulai membuat *cluster* di sekitar 2 lokasi korosi yang tepat. Untuk iterasi ini *cost function* pada 2 lokasi korosi sudah mencapai toleransi minimum. Oleh karena itu 2 lokasi telah diidentifikasi. Dan pada iterasi ke-80

menunjukkan tidak ada perubahan posisi partikel yang signifikan dan menunjukkan ini sudah konvergen. 2 lokasi korosi telah ditemukan. Kecuali BEIA dengan 5 data potensial yang hanya membentuk cluster pada 1 lokasi korosi saja. Kemudian penggunaan data potensial yang berhasil mendeteksi korosi dengan error  $\leq 5\%$  yaitu 15 dan 20. Penggunaan 10 data potensial pada BEIA masih memiliki error  $\geq 5\%$ .



Gambar 3.3 Hasil dari simulasi BEIA: (a) Iterasi 65; (b); Iterasi 80

---

#### 4. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi *Boundary Element Inverse Analysis* (BEIA) dengan variasi jumlah data potensial dalam mendeteksi lokasi korosi pada beton bertulang dapat disimpulkan bahwa jumlah data pengukuran nilai potensial yang lebih besar dapat meningkatkan kemampuan BEIA dalam mendeteksi lokasi korosi pada beton bertulang. Hal ini membuktikan jumlah data pengukuran nilai potensial berpengaruh pada kinerja BEIA. Untuk mendapatkan hasil dengan  $error \leq 5 \%$  dibutuhkan minimal 15 data potensial pada simulasi BEIA.

#### 5. SARAN

Penelitian ini diharapkan dapat dilanjutkan dan dikembangkan lagi dengan memperluas beberapa parameter geometri guna mendapatkan hasil yang lebih optimal.

---

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Fontana, M, G., 1987, Corrosion Engineering, 3rd edition, McGraw-Hill, Inc., New York.
- [2] Roberge, P.R., 2008, Corrosion Engineering: Principles and Practices, McGraw- Hill, Inc., New York.
- [3] Moreno, E., Cobo, A., Palomo, G., Gonzalez, M.N., 2014. 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: 156-163.
- [4] Broomfield, J. P. 2007. Corrosion of steel in concrete – Understanding, Investigation and Repair. 2nd edition. London: Taylor & Francis.
- [5] Kelvin. 2012. Probe electrode for contactless potential measurement on concrete – Properties and corrosion profiling application. *Corrosion Science*. 56: 26-35.
- [6] Fonna, S. 2014. Boundary Element Method and Particle Swarm Optimization for Inverse Analysis to Identify Reinforced Concrete Corrosion, Doctoral dissertation, University Kebangsaan Malaysia (UKM) (in Malay).
- [7] Fonna, S., Huzni S., Ridha, M and Ariffin, A.K. 2013. Inverse analysis using particle swarm optimization for detecting corrosion profile of rebar in concrete structure, *Engineering Analysis with Boundary Element*, 37: 585-593
- [8] Fonna, S., 2018. Boundary element inverse analysis for rebar corrosion detection: Study on the 2004 tsunami – affected structure in Aceh, *Case Studies in Construction Materials*, Vol 8: 292-298.
- [9] Fathi, S., 2021. Boundary Element Inverse Analysis (BEIA) Simulation for Detecting Corrosion Location in Reinforced Concrete, *Proceedings of the 2nd International Conference on Experimental and Computational Mechanics in Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering* 161-168.