

Studi Boundary Element Method dan Multi-objective Inverse Analysis untuk Simulasi Deteksi Multikorosi Beton Bertulang

M. Abrar Masykuri¹, M. Ihsan*², S. Fonna³, S. Huzni⁴, Herdi Susanto*⁵

^{1,2}Jurusan Teknik Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Gajah Putih, Indonesia

^{3,4}Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, Indonesia

⁵Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Teuku Umar, Indonesia

* e-mail: *2ihsan.crg@gmail.com, *5herdisusanto@utu.ac.id

Abstrak

Saat ini, permasalahan korosi pada struktur telah menjadi salah satu fokus utama permasalahan dunia infrastuktur. Sehingga, dalam dekade terakhir penelitian mengenai korosi pada struktur terus dilakukan. Seperti halnya pembangunan beberapa software untuk mensimulasikan korosi yang terjadi pada baja beton bertulang. Tujuan mendasar dari simulasi ini untuk memprediksi tingkat korosi yang dicapai. Salah satu metode yang telah berhasil mendeteksi korosi adalah Metode Elemen Batas (BEM). Beberapa pengembangan dari metode sebelumnya pun dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan kemampuan metode BEM dengan mempelajari kemampuan Boundary Element Inverse Analysis (BEIA) dalam mendeteksi korosi lebih dari satu lokasi atau dikenal dengan sebutan Multi lokasi korosi pada baja beton bertulang. BEIA merupakan salah satu metode yang sedang dikembangkan dalam pendektasian korosi. BEIA dikembangkan dengan menggabungkan pengaplikasian berbasis Boundary Element Method (BEM) dan Multi-objective Particle Swarm Optimization (PSO). BEM digunakan untuk menghitung nilai potensial pada permukaan beton. Sementara itu, PSO digunakan untuk mengevaluasi cost function untuk mendeteksi korosi pada baja tulangan yang berada di dalam beton. Untuk menjalankan BEIA dibutuhkan beberapa parameter input diantaranya hasil meshing dan data potensial hasil lapangan. Namun pada kasus ini data potensial lapangan yang dipakai adalah hasil dari perhitungan simulasi BEM dengan ukuran mesh 4mm dan asumsi lokasi korosi berada pada $X1 = 50$ mm dan $X2 = 350$ mm. Hasil simulasi dari BEIA memperlihatkan posisi partikel pada iterasi ke-150 sudah berada pada lokasi yang ditentukan, yaitu pada $X1 = 50$ mm dan $X2 = 350$ mm, hal ini membuktikan bahwa Multi-objective BEIA mampu mendeteksi multikorosi.

Kata kunci— Multikorosi, BEM, Multi-objective, BEIA, Deteksi Korosi, Baja Beton Bertulang

Abstract

Nowadays, corrosion problem become one of the important problem for infrastructures over the world. Therefore, over the last decades, several corrosion research has been investigated. Several software have been developed to simulate corrosion that occurs on the reinforcing steel in concrete. The fundamental goal of the simulation is to predict the degree of corrosion that achieved. Many pioneering works allowed for the successful application of the boundary element method (BEM) to simulate the corrosion. This research aims to study the ability of Boundary Element Inverse Analysis (BEIA) in detecting corrosion that more than one

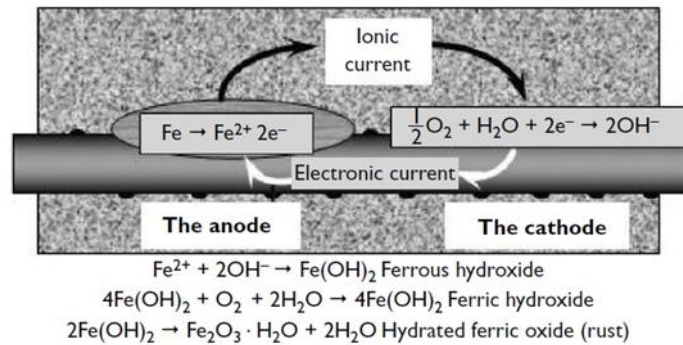
location or known as Multi corrosion on the reinforcing steel in concrete. BEIA is a method that developed to detect corrosion in reinforced concrete. BEIA developed by combining the application of Boundary Element Method (BEM) and Multi-objective Particle Swarm Optimization (PSO). BEM used to calculate potential values on concrete surfaces. Furthermore, PSO is used to evaluate the cost function to detect corrosion on reinforcing steel inside concrete. To execute BEIA, it requires several input parameters include the results of meshing and potential data from the field. However, in this case, the field potential data used is the result of the calculation of BEM simulation with a mesh size of 4mm and assuming the location of corrosion is at $X1 = 50$ mm and $X2 = 350$ mm. The simulation results from BEIA show that the position of the particles at the 150th iteration is already at the specified location, at $X1 = 50$ mm and $X2 = 350$ mm, this proves that Multi-objective BEIA can simulate multi corrosion detection that occur on a concreted surface..

Keywords—Multi corrosion, BEM, Multi-objective, BEIA, corrosion detection, reinforced concrete

1. PENDAHULUAN

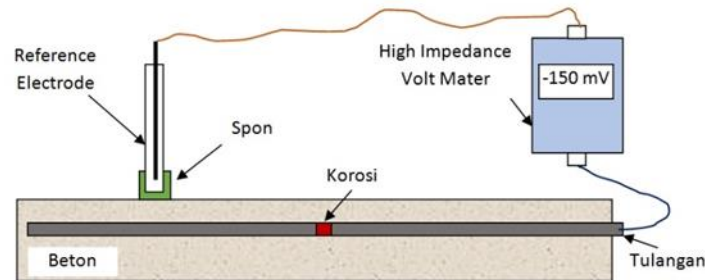
Kerugian yang ditimbulkan oleh fenomena korosi saat ini telah memasuki tahap sangat merugikan. Laporan dari NACE telah menunjukkan bahwa kerugian akibat korosi di Timur Tengah pada tahun 2013 telah mencapai 5% dari Gross Domestic Product (GDP) di beberapa negara maju [1]. Angka tersebut diprediksi terus meningkat seiring dengan berjalannya waktu. Sebagaimana kita ketahui bahwa korosi merupakan suatu fenomena alam yang tidak dapat dihindari. Di Indonesia sendiri juga merupakan suatu negara dengan tingkat kerugian akibat korosi cenderung tinggi, diperkirakan kerugian akibat korosi telah mencapai Rp. 5 triliun pada sekitar tahun 1988 [2]. Secara keseluruhan, kerugian akibat korosi yang dialami oleh negara-negara industri telah mencapai 3-4% dari GDP [3-6]. Sehingga, pentingnya pengendalian korosi secara intensif oleh pelaksana pembangunan infrastruktur. Hal ini disebabkan oleh sampai saat ini penggunaan beton bertulang pada suatu infrastruktur bangunan masih menjadi bahan utama dan dipergunakan secara masif di seluruh dunia.

Secara umum, tulangan baja dalam beton memiliki kemampuan ketahanan yang baik terhadap fenomena korosi. Hal ini disebabkan oleh karena sifat alkali dari beton yang tinggi (pH 12-13) sehingga akan terbentuk lapisan pasif di permukaan baja [7]. Namun, lapisan pasif tersebut dapat rusak akibat adanya penetrasi ion klorida (chloride attack), dan juga akibat adanya gas karbon dioksida (carbonation). Kedua peristiwa tersebut adalah penyebab utama terjadinya inisiasi korosi dari baja tulangan [8]. Reaksi pembentukan korosi pada tulangan dalam beton dapat dilihat dalam Gambar 1 [9].



Gambar 1. Reaksi pembentukan korosi pada tulangan dalam beton [9].

Korosi tulangan pada baja yang terjadi di dalam beton tersebut sangat berbahaya karena dapat mengakibatkan degradasi kualitas beton hingga akhirnya terjadi kegagalan dini [10-13] atau mempersingkat umur pakai dari infrastruktur beton bertulang [14-15]. Oleh karenanya, pendeteksian korosi secara dini dan periodik sangat penting. Salah satu teknik deteksi korosi beton bertulang yang umum digunakan adalah half-cell potential mapping.



Gambar 2. Mekanisme pengukuran potensial dengan half-cell potential mapping.

Metode ini dijalankan berdasarkan standar ASTM C876. Mekanisme pengukuran nilai potensial listrik pada permukaan beton dengan menggunakan metode tersebut seperti diberikan dalam Gambar 2. Berdasarkan nilai potensial ini, korosi beton bertulang dianalisis.

Tabel 1. Kriteria korosi beton bertulang [8].

No	Reference electrode (mV)				Risiko korosi
	Cu/CuSO ₄	Ag/AgCl	Standard Hydrogen	Calomel	
1.	> (-200)	> (-100)	> (+120)	> (-80)	Rendah (risiko korosi 10%)
2.	(-200) – (-350)	(-100) – (-250)	(+120) – (-30)	(-80) – (-230)	Pertengahan
3.	< (-350)	< (-250)	< (-30)	< (-230)	Tinggi (risiko korosi >90%)
4.	< (-500)	< (-400)	< (-180)	< (-380)	Sangat tinggi

Tabel 1 memperlihatkan kriteria untuk menilai korosi tulangan yang mungkin terjadi di dalam beton. Akan tetapi, deteksi korosi menggunakan half-cell potential mapping tersebut memiliki beberapa keterbatasan seperti halnya menunjukkan resiko korosi, banyak faktor lingkungan yang mempengaruhi hasil, waktu pengerjaan yang lama dan kesalahan interpretasi data potensial akibat ill-posed problem pada kasus beton bertulang. Oleh karena kekurangan yang dimiliki oleh metode half-cell, maka banyak penelitian telah dilakukan untuk mengembangkan metode lain yang lebih baik. Salah satu pengembangan yang telah dilakukan

adalah dengan menggunakan metode numerik seperti pengembangan metode elemen batas (BEM) untuk simulasi korosi pada beton bertulang. Hasil penelitian metode ini dianggap sangat berhasil dengan beberapa pengujian pada beberapa penelitian sebelumnya yang mampu mensimulasi korosi pada beton bertulang. Sehingga, pengembangan penelitian selanjutnya dilakukan. Salah satu metodenya adalah mensimulasi multi lokasi pada beton bertulang menggunakan metode *Multi-objective Boundary Element Inverse Analysis* (BEIA).

Metode inverse analysis telah dikembangkan oleh peneliti sebelumnya dengan penggabungan BEM dan genetic algorithm (GA) untuk keperluan deteksi korosi beton bertulang [16-17]. Hasil penggunaan metode GA Invers Analysis menunjukkan bahwa metode inverse analysis yang dikembangkan berhasil mendeteksi korosi yang ada dalam beton bertulang. Namun, Algoritma GA memiliki struktur yang rumit [18-19] sehingga penyelesaian menjadi lebih lama. Pengembangan metode inverse analysis untuk keperluan deteksi korosi beton bertulang juga telah dilakukan peneliti pengusul dengan penggabungan BEM dan PSO yang juga disebut boundary element inverse analysis (BEIA) [20-25]. BEIA dijalankan sesuai dengan diagram alir yang ditunjukkan pada gambar 1. Langkah pertama yang harus dilakukan adalah dengan menentukan parameter yang diperlukan seperti Z , j_{max} , ϵ_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 konstan, W_j adalah nilai Weight Inertia. Kata partikel dalam metode tersebut digunakan untuk solusi kandidat. Kemudian, tentukan profil korosi atau X_j secara random di permukaan beton, dan tentukan kecepatan partikel atau V_j secara random. BEM dijalankan untuk menghitung nilai potensial pada permukaan beton untuk setiap partikel.

Langkah selanjutnya, masukkan N data potensial listrik pada permukaan beton hasil pengukuran lapangan (Φ). Nilai cost function (ϵ) untuk setiap partikel dihitung dengan mengikuti Persamaan (1).

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

Pada persamaan tersebut, X adalah profil korosi yang terletak pada baja tulangan dan N adalah nilai potensial untuk diinput BEIA. ϕ 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.

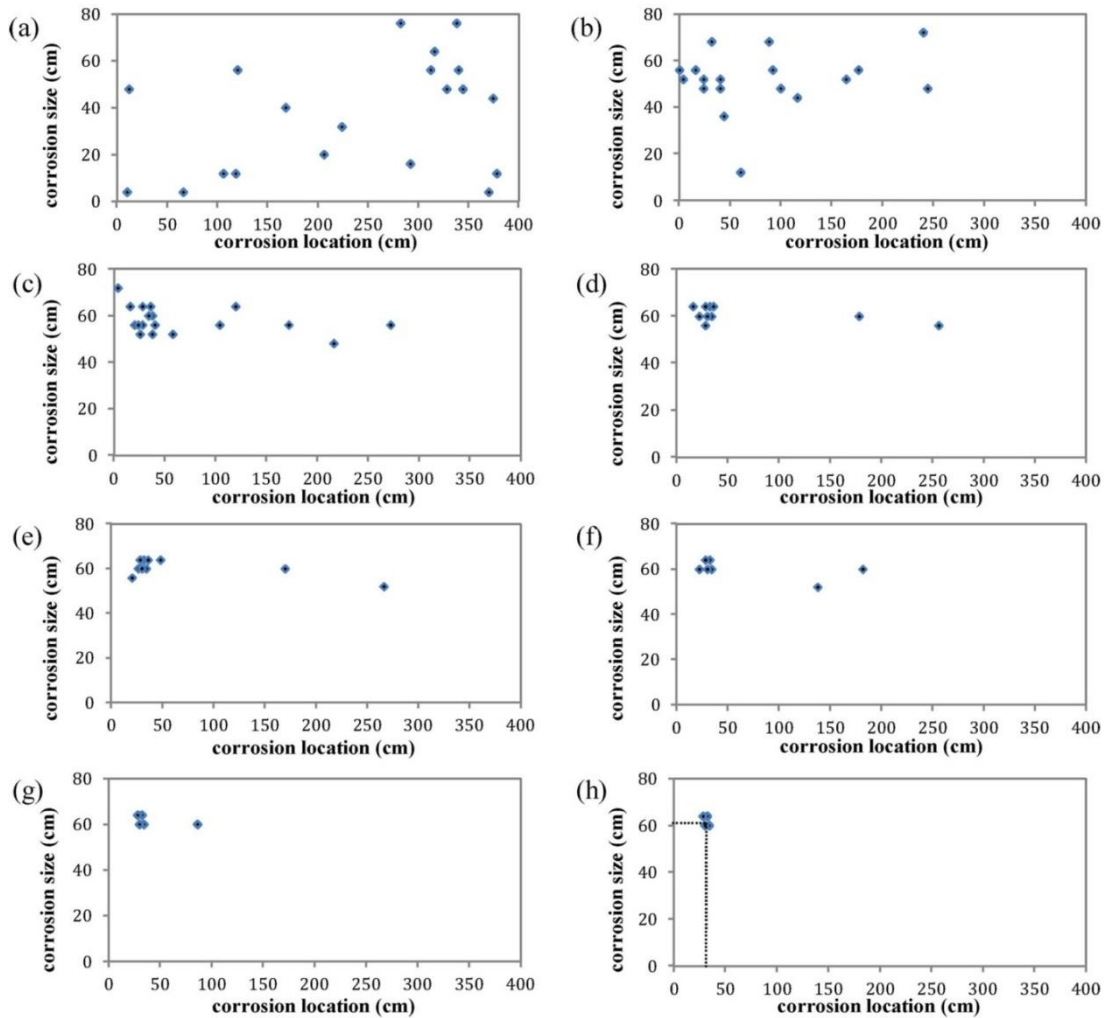
Jika iterasi maksimum sudah dicapai, maka simulasi telah selesai dilakukan. Akan tetapi, jika tidak tercapai maka iterasi berlanjut dengan melakukan pembaruan pada X_j dan V_j . Perubahan posisi dan kecepatan dari setiap partikel untuk setiap iterasi mengikuti persamaan (2) dan (3). Pada persamaan tersebut, 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 = angkat acak (0-1), $pbest$ = posisi partikel lokal terbaik, $gbest$ = posisi partikel global terbaik, dan j = iterasi.

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

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

Nilai ϵ 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. Teknik ini dijalankan dengan berdasarkan pada beberapa data pengukuran potensial listrik permukaan beton dan telah menunjukkan kemampuan yang baik dalam deteksi korosi dengan error < 5%. Namun, metode tersebut masih terbatas hanya untuk mendeteksi lokasi dan ukuran dari korosi tunggal saja seperti

diperlihatkan dalam Gambar 3 [23]. Sementara realita di lapangan, korosi dapat terjadi pada banyak tempat, berbagai ukuran dan bentuk. Dengan demikian, metode tersebut perlu dikembangkan lebih lanjut. Metode yang dianggap mampu untuk mensimulasi deteksi multi lokasi korosi tersebut dengan menggunakan metode *Multi-objective Boundary Element Inverse Analysis (BEIA)*.

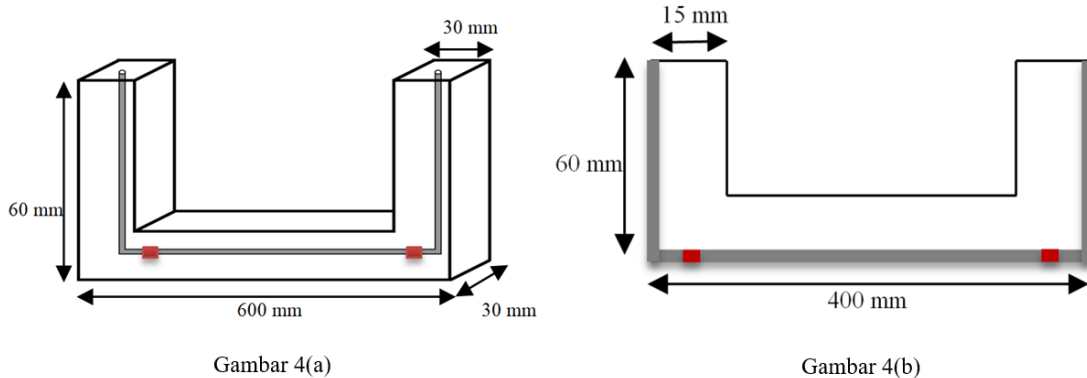


Gambar 3. Hasil deteksi single korosi oleh metode inverse analysis: (a) iterasi 1; (b) iterasi 4; (c) iterasi 8; (d) iterasi 12; (e) iterasi 16; (f) iterasi 20; (g) iterasi 38; (h) iterasi 45 (garis putus-putus menunjukkan kedudukan aktual korosi) [23]

Metode *Multi-objective Inverse Analysis* adalah metode yang dikembangkan untuk dapat menganalisa multi objek dalam satu waktu. Kajian ini merupakan penggabungan PSO dengan invers analysis [20-21,23]. Dalam simulasi deteksi korosi, metode ini dianggap mampu untuk melakukan deteksi multi lokasi korosi dengan integrasi antara BEIA yang telah dibangun dengan metode sub-rutin multi-objective yang dimiliki oleh PSO. Dengan pemutahiran algoritma BEIA dan Multi-Objective PSO, maka simulasi deteksi korosi pada tulangan beton bertulang dapat dijalankan

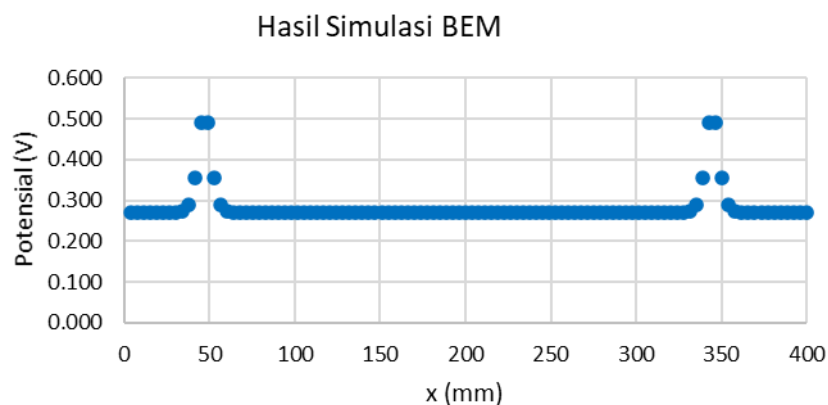
2. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini model geometri yang dibangun adalah dengan bentuk dua dimensi yang mewakili bentuk tiga dimensi. Bentuk tiga dimensi adalah beton berbentuk U dengan tulangan tunggal ditengahnya. Geometri berbentuk dua dimensi yang mewakili bentuk tiga dimensi, dengan ukuran panjang beton 600 mm, lebar 30 mm dan tinggi sisi kanan dan kiri masing-masing 60 mm seperti terlihat pada gambar 4(a). kemudian, geometri yang dimodelkan dalam bentuk dua dimensi berdimensi panjang 400 mm dan lebar 15 mm dan tinggi 60 mm. Seperti terlihat pada Gambar 4(b).



Gambar 4. Beton bertulang dengan tulangan tunggal

Dapat dilihat pada Gambar 4, terdapat dua bagian yang berwarna merah yang merupakan asumsi lokasi korosi. Tetapi pada kasus ini lokasi korosi dianggap belum diketahui sehingga perlu adanya deteksi dengan perangkat lunak BEIA. Untuk menjalankan BEIA dibutuhkan beberapa parameter input seperti hasil *meshing* dari geometri dua dimensi seperti pada gambar 4 dan data potensial hasil lapangan. Namun pada kasus ini data potensial lapangan yang dipakai adalah hasil dari perhitungan simulasi BEM dengan asumsi lokasi korosi berada pada $X_1 = 50$ mm dan $X_2 = 350$ mm. Pada simulasi ini *mesh* yang digunakan sebesar 4 mm dan jumlah element sebanyak 212 element. sehingga memperoleh data potensial seperti pada Gambar 5.

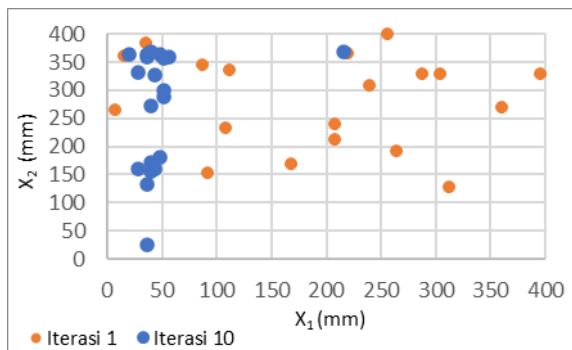


Gambar 5. Nilai pengukuran potensial pada permukaan beton

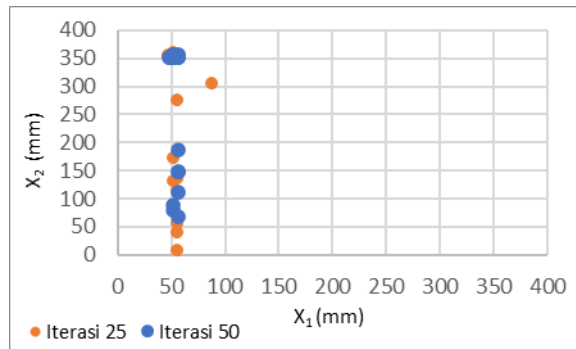
Berdasarkan grafik diatas didapatkan dua titik data potensial pada jarak 50 mm dan 350 mm. dimana pada jarak tersebut masing-masing berada pada element yang ke 200 dan 125. Hasil yang didapat untuk studi kasus ini berupa terdeteksinya lokasi korosi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

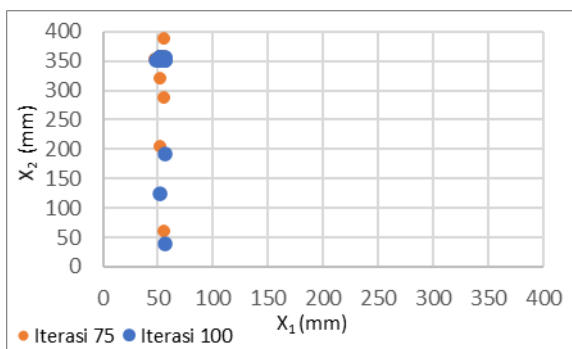
Data yang dihasilkan dari simulasi *Boundary Element Inverse Analysis* (BEIA) dengan ukuran mesh 4 mm dengan jumlah partikel 20, element 212 serta iterasi yang dijalankan sebanyak 150 iterasi memperlihatkan hasil seperti pada gambar 6. Gambar tersebut memperlihatkan persebaran pergerakan partikel secara random dalam setiap iterasi yang dijalankan.



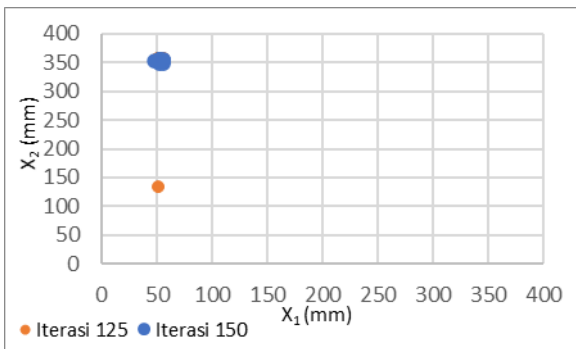
Gambar 6(a)



Gambar 6(b)



Gambar 6(c)



Gambar 6(d)

Gambar 6. Hasil simulasi multi korosi menggunakan Multi-objective BEIA

Gambar 6 menunjukkan hasil simulasi BEIA dengan ukuran *mesh* 4 mm. Dimana seperti pada hasil simulasi BEM terdapat dua lokasi korosi yang di deteksi sebagai data potensial pada beton bertulang, yaitu pada jarak $X_1 = 50$ mm dan $X_2 = 350$ mm yang mana masing-masing berada pada element ke 200 dan 125. Dapat dilihat pada gambar 6 (a) yaitu pada iterasi 1 dan iterasi 10 pergerakan partikel masih sangat menyebar, tidak beraturan dan masih sangat jauh dari lokasi korosi yang di tentukan. Gambar (b) yaitu pada iterasi ke- 25 dan iterasi 50 menunjukkan partikel sudah mulai berpola akan tetapi pada iterasi ke 25 terdapat partikel yang masih berjauhan dengan partikel lainnya. Gambar (c) yaitu pada iterasi ke- 75 dan Iterasi 100 menunjukkan distribusi pergerakan partikel sudah terpola dan sudah mulai menuju ke titik lokasi korosi yang di tentukan. Gambar (d) Iterasi 125 distribusi pergerakan partikel sudah sangat baik dan sudah tertuju pada lokasi korosi yang ditentukan akan tetapi terdapat 1 partikel yang masih sangat jauh dari partikel lainnya yang sudah tertuju pada lokasi korosi, kemudian

pada iterasi ke- 150 semua partikel yang tersebar sudah mengarah dan menetap ke lokasi korosi sebenarnya yaitu jarak $X1 = 50$ mm dan $X2 = 350$ mm. Artinya partikel tersebut sudah menemukan dua lokasi korosi yang terjadi pada beton bertulang.

4. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi deteksi multikorosi pada beton bertulang dengan menggunakan Boundary Element Inverse Analysis terhadap beton bertulang dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Metode Elemen Batas (BEM) dan Multi-objective BEIA mampu mendeteksi multikorosi atau korosi yang lebih dari satu lokasi pada beton bertulang.
2. Penyebaran partikel dalam simulasi Multi-objective BEIA mampu mendeteksi multikorosi pada iterasi 150.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. E. Jackson, "Cost of Corrosion Annually in the US Over \$1.1 Trillion in 2016," 2016. [Online]. Available: <https://www.g2mtlabs.com/corrosion/cost-of-corrosion>. [Accessed 27 Mei 2020].
- [2] D. Lestari dan A.P. Marboen, "Garis pantai Indonesia terpanjang kedua di dunia", Maret 2015. [Online]. Available: <https://www.antaraneews.com/berita/487732/>
- [3] Committee on Cost of Corrosion in Japan, "Survey of Corrosion Cost in Japan," 1997. [Online]. Available: http://www.nims.go.jp/imits/corrosion/corrosion_cost.pdf. [Accessed 27 Mei 2020].
- [4] Z. Ahmad, Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control, London: Elsevier Ltd., 2006.
- [5] B. Hou, X. Li, X. Ma, C. Du, D. Zhang, M. Zheng, W. Xu, D. Lu and F. Ma, "The cost of corrosion in China", npj Materials Degradation, 1 (4): 1-10, 2017.
- [6] E. Septe, "Korosi: Perusak yang Terabaikan," 4 March 2008. [Online]. Available: <https://bunghatta.ac.id/artikel-235-korosi-perusak-yang-terabaikan.html>. [Accessed 28 July 2018].
- [7] J. P. Broomfield, Corrosion of Steel in Concrete - Understanding, Investigation and Repair. 2nd edition. London: Taylor & Francis. 2007.
- [8] R.R. Hussain, "Underwater half-cell corrosion potential bench mark measurements of corroding steel in concrete influenced by a variety of material science and environmental engineering variables", Measurement, 44 : 274–280, 2011.
- [9] J. P. Broomfield, Corrosion of Steel in Concrete - Understanding, Investigation and Repair. 2nd edition. London: Taylor & Francis. 2007.
- [10] P. Marinier and O.B. Isgor, "Model-Assisted Non-destructive Monitoring of Reinforcement Corrosion in Concrete Structures", in: Nondestructive Testing of Materials and Structure, Editors:
- [11] H. Susanto, J. Supardi, and S. Fonna, "Degradation of reinforced concrete corrosion on coast after the 2004 tsunami," *J. Corros. Sci. Eng.*, vol. 22, 2019.
- [12] H. Susanto, S. Huzni, and S. Fonna, "Corrosion of Reinforced Concrete Structures Submerged by the 2004 Tsunami in West Aceh, Indonesia," *Int. J. Corros.*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/4318434.
- [13] H. Susanto, M. Ridha, S. Huzni, and S. Fonna, "Korosi Infrastruktur Beton Bertulang di Kabupaten Aceh Barat Pasca Tsunami 2004," 2015.

-
- [14] A.A.A. Hassan, K.M.A. Hossain, and M. Lachemi, "Corrosion resistance of self-consolidating concrete in full-scale reinforced beams", *Cement & Concrete Composites*, 31 : 29–38, 2009.
- [15] S. Fonna, I.M. Ibrahim, M. Ridha, S. Huzni, and A. K. Ariffin, "Simulation of the ill-posed problem of reinforced concrete corrosion detection using boundary element method", *International Journal of Corrosion*, Vol. 2016, article id 6392702, 2016.
- [16] K. Suga, K. Minagawa, M. Kikuchi and S. Aoki, "Corrosion detection in concrete structure including layered rebar", *Key Engineering Materials*, 462-463 : 1255-1260, 2011.
- [17] K. Minagawa, K. Suga, M. Kikuchi and S. Aoki, "An efficient inverse analysis considering observation error to detect corrosion in concrete structures containing multilayered rebar", *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 8 (1) : 81-87, 2012.
- [18] K.H. Lee, S.W. Baek and K.W. Kim, "Inverse radiation analysis using repulsive particle swarm optimization algorithm", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51: 2772-2783, 2008.
- [19] K.E. Parsopoulos and M.N. Vrahatis, *Particle Swarm Optimization and Intelligence: Advances and Applications*, New York: Information Science Reference, 2010.
- [20] S. Fonna, S. Huzni, M. Ridha and A. K. Ariffin, "Inverse analysis using particle swarm optimization for detecting corrosion profile of rebar in concrete structure," *Engineering Analysis with Boundary Elements*, vol. 37, p. 585–593, 2013.
- [21] S. Fonna, *Boundary Element Method and Particle Swarm Optimization for Inverse Analysis to Identify Reinforced Concrete Corrosion*, Doctoral dissertation, Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM), 2014 (in Malay).
- [22] S. Fonna, M. Ridha, S. Huzni and A. K. Ariffin, "Comparison of GA and PSO in Boundary Element Inverse Analysis for Rebar Corrosion Detection," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 471, pp. 319-323, 2014.
- [23] S. Fonna, Gunawarman, S. Huzni and A. K. Ariffin, "Boundary element inverse analysis for rebar corrosion detection: Study on the 2004 tsunami-affected structure in Aceh," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 8, p. 292–298, 2018.
- [24] G. Schmitt, M. Schütze, G. F. Hays, W. Burns, E. H. Han, A. Pourbaix and G. Jacobson, "Global Needs for Knowledge Dissemination, Research, and Development in Materials Deterioration and Corrosion Control," May 2009. [Online]. Available: http://corrosion.org/wco_media/Downloads/Publications/whitepaper.pdf. [diakses 18 Oktober 2020].
- [25] S. Fonna, Gunawarman, and S. Huzni, "Study of inertia weight parameter for boundary element inverse analysis to detect RC corrosion", the 4th International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering (ICRMCE), Solo, 11-12 Juli 2018.
-