
Efisiensi Model Mesh Kasus Deteksi Simulasi Korosi Beton Bertulang Menggunakan Metode Axisymmetric Mesh Problem

Muhammad Ihsan^{*1}, Herdi Susanto²

¹Jurusan Teknik Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Gajah Putih, Indonesia

²Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Teuku Umar, Indonesia

* e-mail: *1ihsan.crg@gmail.com, *2herdisusanto@utu.ac.id

Abstrak

Pemodelan komputasi pada simulasi korosi beton bertulang (RC) dikembangkan dalam penelitian ini. Simulasi korosi menggunakan Boundary Element Method (BEM) dan pemfokusan pada beton bertulang silinder (RC). Permasalahan utama yang dihadapi adalah diperlukannya komputer berperforma tinggi untuk menjalankan simulasi korosi beton bertulang. Oleh karena itu, tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengurangi kebutuhan komputer berkemampuan tinggi untuk simulasi korosi kolom silinder RC menggunakan Boundary Element Method (BEM). Dalam penelitian ini, pemodelan komputasi axisymmetric diintegrasikan ke dalam BEM numerik untuk mengurangi upaya komputasi. Pada penelitian ini, seluruh kolom struktur silinder beton bertulang dimodelkan dengan persamaan Laplace. Area berkarat dan tidak berkarat pada baja tulangan (tulangan) diwakili oleh kurva polarisasinya. Persamaan Laplace diselesaikan dengan BEM, sehingga potensial pada struktur dapat ditentukan. Hasil simulasi menunjukkan distribusi potensial yang hampir sama antara BEM konvensional yang menggunakan jaring elemen segitiga dan BEM yang dikembangkan menggunakan elemen mesh axisymmetric. Akan tetapi, simulasi korosi menggunakan jaring elemen axisymmetric secara signifikan mengurangi upaya komputer dalam hal memakan waktu dan tenaga komputer untuk simulasi. Oleh karena itu, pengembangan pemodelan axisymmetric untuk BEM menjadi alat yang ampuh untuk mengurangi upaya komputasi pada simulasi korosi kolom silinder RC.

Kata kunci—pemodelan korosi, BEM, kolom silinder, axisymmetric, beton bertulang

Abstract

In this study, a computational numerical modelling for corrosion simulation in reinforcing steel is developed. The corrosion simulation using Boundary element Method (BEM) and focusing for cylindrical reinforced concrete (RC). The main problem is high performance computer was required for the reinforced concrete corrosion simulation. Therefore, main purpose of this study is to reduce the needs of high-performance computer during the corrosion simulation. For the purpose, axisymmetric computational problem was integrated to the numerical BEM that considered able to reduce the computational effort. On the analysis process, the whole axial RC structures column was modeled by Laplace equation. The boundary condition for the corroded and non-corroded areas on the reinforcing steel (rebar) were represented by their established polarization curve. The Laplace equation was solved by BEM, thereby the potential on the structure can be analyzed. The simulation results show the similar potential distribution between BEM computational modelling by triangle

element mesh and improvement BEM using axisymmetric element mesh problem. The simulation shows a significant differences, thereby the corrosion simulation using axisymmetric element mesh problem significantly reduces the computer effort in term of time-consuming and computer effort for the simulation. Thus, the improvement of the axisymmetric modelling for BEM becomes a powerful method for reducing the computational effort in term of cylindrical reinforcing steel corrosion simulation.

Keywords— *corrosion modelling, axisymmetric, BEM, cylindrical column, reinforced concrete*

1. PENDAHULUAN

Korosi beton bertulang merupakan salah satu penyebab utama kerusakan beton. Hal ini disebabkan oleh terjadinya interaksi baja yang tertanam dalam beton dengan lingkungan menyebabkan proses korosi, dan proses tersebut menyebabkan kerusakan lapisan beton [1]. Hal ini menyebabkan fenomena korosi beton bertulang telah mendapat perhatian yang cukup besar dari para peneliti korosi selama bertahun-tahun, hal ini disebabkan oleh adanya fenomena degradasi ketahanan struktur bangunan secara umum[2,3,4], yang mendorong peningkatan biaya pemeliharaan korosi [5,6,7,8]. Salah satu kasus yang sangat penting untuk diteliti adalah korosi beton bertulang yang terjadi pada kolom tiang jembatan [9,10].

Pada korosi kolom jembatan, proses korosi dapat mempengaruhi hilangnya ikatan beton, pengurangan penampang beton atau berbagai efek yang mengurangi kekuatan kolom beton bertulang. Letak jembatan yang berada di lingkungan garis pantai juga merupakan suatu faktor percepatan fenomena korosi pada kolom jembatan, terjadi interaksi lingkungan beton yang memicu terjadinya korosi pada kolom baja tulangan jembatan. Hal ini juga menyebabkan kerusakan dan penuaan pada kolom beton jembatan. Oleh karena itu, pencegahan kegagalan korosi telah diterapkan secara luas terkait dengan evaluasi korosi pada kolom jembatan [11]. Banyak peneliti tertarik untuk menyelidiki korosi kolom jembatan yang memiliki beberapa tipe [12,13] termasuk kolom persegi panjang dan kolom aksial. Penelitian mendalam tentang degradasi lapisan beton akibat korosi juga terus diteliti [14,15,16,17] untuk menjelaskan pengaruh pembebanan mekanis terhadap kerusakan kolom beton bertulang menggunakan metode eksperimental. Namun, ada beberapa faktor yang menjadi kendala dalam metode eksperimental, sehingga pendekatan komputasi menjadi suatu solusi.

Saat ini banyak peneliti yang menggunakan pendekatan komputasi untuk berbagai bidang teknik termasuk untuk investigasi korosi. Pendekatan tersebut dianggap dapat meningkatkan hasil investigasi korosi [18,19]. Namun, kebutuhan high performance computer menjadi suatu tuntutan dalam menjalankan penelitian tersebut. Permasalahan tersebut juga terjadi pada kasus investigasi korosi kolom beton bertulang. Beberapa permasalahan yang timbul akibat dimensi dari kolom jembatan yang membutuhkan ruang kerja komputasi yang besar dalam proses perhitungan. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, pada penelitian ini dilakukan analisa model meshing kolom jembatan dengan menggunakan axisymmetric mesh problem. Metode tersebut dikombinasikan dengan Metode Elemen Batas (BEM) dalam simulasi korosi beton bertulang. Metode Elemen Batas adalah salah satu pendekatan komputasi yang sangat sesuai untuk simulasi korosi. Hal ini disebabkan oleh BEM hanya melakukan perhitungan di permukaan domain, sehingga proses perhitungan dapat dilakukan lebih cepat dibanding metode lain seperti Metode Elemen Hingga (FEM). Banyak peneliti yang melakukan investigasi korosi menggunakan BEM. Telles dkk. [20] dan Aoki et al. [21] telah dengan jelas menurunkan dasar dari BEM untuk analisis korosi. Berdasarkan penelitian sebelumnya, BEM untuk investigasi korosi terus berkembang [22], beberapa pengembangan BEM telah dilakukan oleh Aoki & Kishimoto [23]. Meningkatkan investigasi korosi menggunakan BEM juga telah dilakukan oleh Amaya et al. [24] dan Minagawa et al. [25,26]. Oleh sebab itu, dalam penelitian

ini, dengan menggunakan axisymmetric mesh problem dalam BEM dianggap akan mampu menurunkan waktu perhitungan simulasi korosi dan juga menurunkan kemampuan komputer dalam proses analisis. Beberapa contoh kasus dilakukan untuk menunjukkan kemampuan metode yang diusulkan. Validasi hasil simulasi akan dibandingkan dengan hasil simulasi dengan metode yang telah estabish.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Pemodelan Numerik untuk Korosi Beton Bertulang

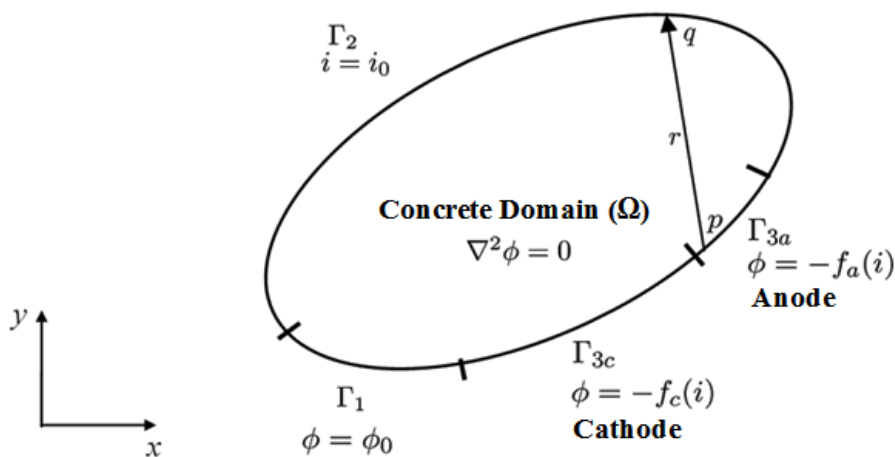
Pemodelan numerik korosi beton bertulang berdasarkan pada persamaan Laplace. Pemodelan numerik dilakukan untuk pemetaan potensial disepanjang permukaan beton, pemodelan numerik seperti pada formula berikut [1]:

$$\nabla^2 \phi \tag{1}$$

dimana ∇ dalam koordinat kartesian (x, y, z) dapat ditulis menjadi :

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \tag{2}$$

Kondisi batas model seperti yang tampak pada Gambar.1 dan persamaan Laplace dapat dijalankan dengan asumsi kondisi batas seperti berikut :



Gambar. 1. Kondisi batas korosi beton bertulang menggunakan persamaan Laplace.

Gambar 1 menunjukkan pemodelan kondisi batas korosi menggunakan domain 2 dimensi (2D). Seluruh permukaan domain beton dimodelkan dengan Γ dimana kondisi batasnya adalah $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_{3a} + \Gamma_{3c}$. Pada bagian permukaan tulangan yang telah terkorosi dimodelkan dengan Γ_{3a} , sementara bagian permukaan baja yang tidak terkorosi dimodelkan dengan Γ_{3c} . Dan juga permukaan elektrolit dimodelkan dengan Γ_1 dan Γ_2 . Variabel ϕ dan i menunjukkan nilai potensial dan densitas arus untuk anoda dan katoda. $-f_a(i)$ dan $-f_c(i)$ adalah nilai fungsi potensial korosi dan densitas arus dari daerah korosi dan non-korosi. Setiap daerah tersebut direpresentasikan dengan kurva polarisasi dan tanda minus menjelaskan bahwa

nilai potensial di elektrolit adalah sama dengan nilai potensial. Kondisi batas dalam sistem pemodelan ini adalah :

$$i = i_0 \quad \text{pada} \quad \Gamma_2 \quad (3)$$

$$\phi = \phi_0 \quad \text{pada} \quad \Gamma_1 \quad (4)$$

$$\phi = -f_a(i) \quad \text{pada} \quad \Gamma_{3a} \quad (5)$$

$$\phi = -f_c(i) \quad \text{pada} \quad \Gamma_{3c} \quad (6)$$

Nilai densitas arus yang dinotasikan dengan i seperti pada formula berikut :

$$i = -\kappa \frac{\partial \phi}{\partial n} \quad (7)$$

Nilai κ adalah konduktifitas elektrolit dari lingkungan korosi. Nilai konduktifitas korosi dalam penelitian ini dianggap konstan. Nilai n merupakan kondisi keadaan normal dan $\partial/\partial n$ merupakan derivatif dalam arah normal. Dengan menggunakan *Green Second Identity*, kondisi batas korosi beton bertulang dapat dianalisis sesuai dengan kondisi batas yang telah ditetapkan dengan menggunakan formulasi berikut [27] :

$$\frac{1}{2} \kappa \phi^j + \sum_{k=1}^N \left(\int_{\Gamma} (i_{(q,p)}^*) d\Gamma \right) \phi^k = \sum_{k=1}^N \left(\int_{\Gamma} (\phi_{(q,p)}^*) d\Gamma \right) i^k \quad (8)$$

Dimana dengan menggunakan prosedur iteratif Newton Raphson yang diturunkan dengan referensi [22] vektor fungsi kesalahan dalam penyelesaiannya diatur dalam bentuk:

$$\begin{bmatrix} h_{1,1} \\ \dots \\ h_{i,j} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_{1,1} \\ \dots \\ \phi_{i,j} \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} g_{1,1} \\ \dots \\ g_{i,j} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i_{1,1} \\ \dots \\ i_{i,j} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_1 \\ \dots \\ R_i \end{Bmatrix} \quad (9)$$

R_i adalah faktor error dalam setiap estimasi iterasi i . Penjabaran secara rinci dari matriks $[H]$ dan $[G]$ diturunkan oleh peneliti sebelumnya [23]. Pemodelan numerik pada kasus korosi pada kolom tulangan beton juga telah divalidasi dengan hasil eksperimen. Penelitian secara mendalam telah dilakukan pada penelitian sebelumnya [28]. Hasilnya menunjukkan sebaran potensial pada permukaan kolom beton yang ditentukan dengan metode pemetaan potensial. Hasil serupa juga telah dilaporkan dengan menggunakan BEM 3D untuk simulasi korosi beton bertulang.

2. 2. Pemodelan Numerik Axisymmetric problem pada korosi beton bertulang

Konsep dasar penggunaan metode ini adalah untuk mengurangi persamaan integral perhitungan. Pada konsep ini, permasalahan 3D dapat diselesaikan secara 2D dengan beberapa perlakuan numerikal seperti yang ditunjukkan pada penurunan formula dalam penelitian ini. Proses ini dijalankan dengan penggunaan *axisymmetric mesh problem* untuk korosi kolom beton bentuk silinder, dan dengan demikian secara substansial mengurangi upaya komputasi yang seharusnya diperlukan untuk menyelesaikan masalah tiga dimensi. Model numerik didasarkan pada analisis persamaan Laplace yang mewakili oleh daerah potensial dalam domain beton seperti yang diberikan oleh persamaan koordinat sumbu *axisymmetric* (r, θ, z) berikut:

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (10)$$

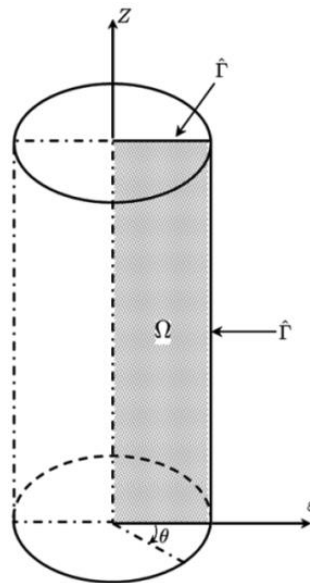
Formulasi persamaan Laplace tiga dimensi untuk kasus ini seperti pada formula berikut :

$$\phi^* = \frac{1}{4\pi r} = \frac{1}{4\pi r(\rho, \theta, Z)} \quad (11)$$

Formulasi *axisymmetric problem* adalah suatu formulasi radial atau simetri aksial tiga dimensi ($u(r, \theta_1, z) = u(r, \theta_2, z)$). Sehingga dalam proses perhitungannya, formulasi ini dapat diasumsikan dengan integral 2 dimensi yang menggabungkan persamaan batas standar ke integral garis satu dimensi. Persamaan (8) yang merupakan integral batas standar untuk identifikasi korosi dalam kasus dimensi beton silinder diturunkan menjadi Persamaan (12).

$$\frac{1}{2} \kappa \phi^j + \int_{\hat{\Gamma}} \phi \int_0^{2\pi} (i_{(q,p)}^*) d\theta \rho d\hat{\Gamma} = \int_{\hat{\Gamma}} i \int_0^{2\pi} (\phi_{(q,p)}^*) d\theta \rho d\hat{\Gamma} \quad (12)$$

Dimana (r_p, θ_p, z_p) dan (r_q, θ_q, z_q) adalah koordinat polar dari setiap p and q, dan $\hat{\Gamma}$ adalah nilai simpangan (garis potong) dari Γ dan $\theta = 0$. untuk ilustrasi *axisymmetric problem* seperti yang ditunjukkan dalam Gambar. 2. p dan q adalah *source point* dan *solution point* dalam sistem koordinat silinder polar



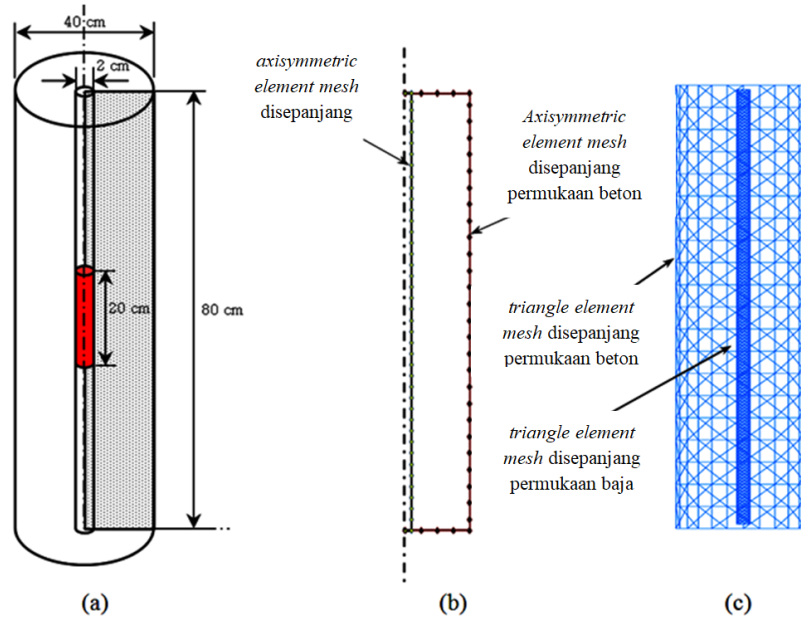
Gambar. 2 Ilustrasi konsep (*axisymmetric*)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3. 1 Simulasi Korosi Menggunakan Axisymmetric problem

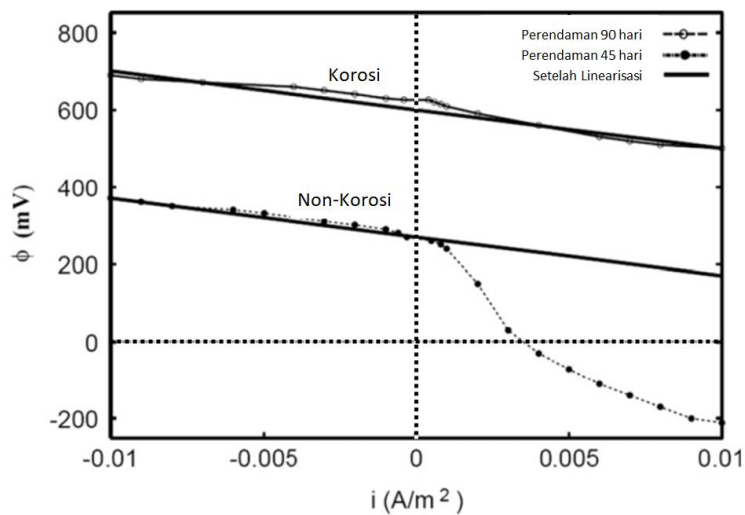
Kasus sederhana untuk simulasi korosi dijalankan dalam penelitian ini seperti pada Gambar 3. Sebuah kasus korosi pada silinder beton bertulang dijalankan. Untuk validasi dari simulasi ini, perbandingan hasil simulasi juga dilakukan dengan menggunakan 3D *triangle mesh* yang telah divalidasi dan dipublikasi hasil kerja simulasi korosi menggunakan metode

tersebut. Pada simulasi ini, terdapat sebuah baja tulangan di dalam beton bertulang dengan lokasi korosi ditentukan berada di tengah beton seperti pada Gambar. 3



Gambar 3(a) Dimensi model kolom korosi, (b) *axisymmetric element mesh* di pada silinder beton bertulang, dan (c) *Triangle element mesh* sepanjang permukaan beton dan baja

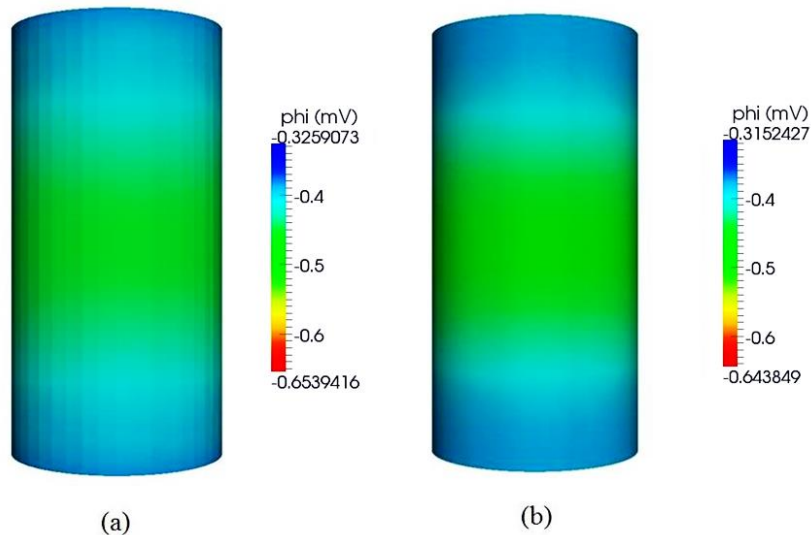
Gambar 4 menunjukkan kondisi batas dalam simulasi korosi silinder beton bertulang. Dalam simulasi ini, nilai konduktivitas beton di asumsikan konstan sebesar $0.007\Omega^{-1} m^{-1}$. Kondisi batas kurva polarisasi untuk daerah korosi dan non-korosi disepanjang tulangan baja berdasarkan linearitas dari kurva polarisasi yang ada di Grafik 1. [29,30].



Gambar 4. Kondisi batas Kurva polarisasi kasus korosi pada beton bertulang

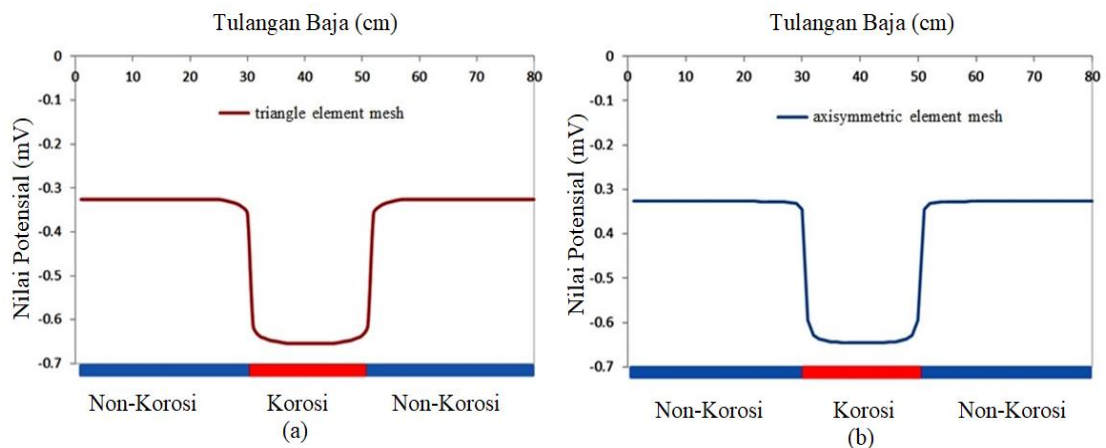
Simulasi korosi telah dijalankan dengan menggunakan kedua metode *element mesh*. Pada simulasi korosi menggunakan *triangle mesh*, seluruh permukaan beton dan tulangan baja dibagi menjadi 4406 *element mesh*, sedangkan pada model *axisymmetric*, model simulasi

permukaan baja dan beton dibagi menjadi 182 *element mesh* dengan besaran setiap *element* sebesar 1 cm. Dari hasil pembagian *element mesh*, metode yang dikembangkan dalam simulasi korosi ini telah mampu menurunkan jumlah perhitungan secara signifikan. Oleh sebab itu, metode yang dikembangkan dianggap berhasil menyelesaikan permasalahan keperluan *high performance computer* dalam simulasi korosi beton bertulang pada kasus beton silinder. Untuk perbandingan hasil simulasi korosi, dapat dilihat pada Gambar 5 berikut :



Gambar 5. (a) Sebaran potensial korosi beton bertulang menggunakan *3D triangle BEM*; (b) Sebaran potensial korosi beton bertulang menggunakan *axisymmetric problem*

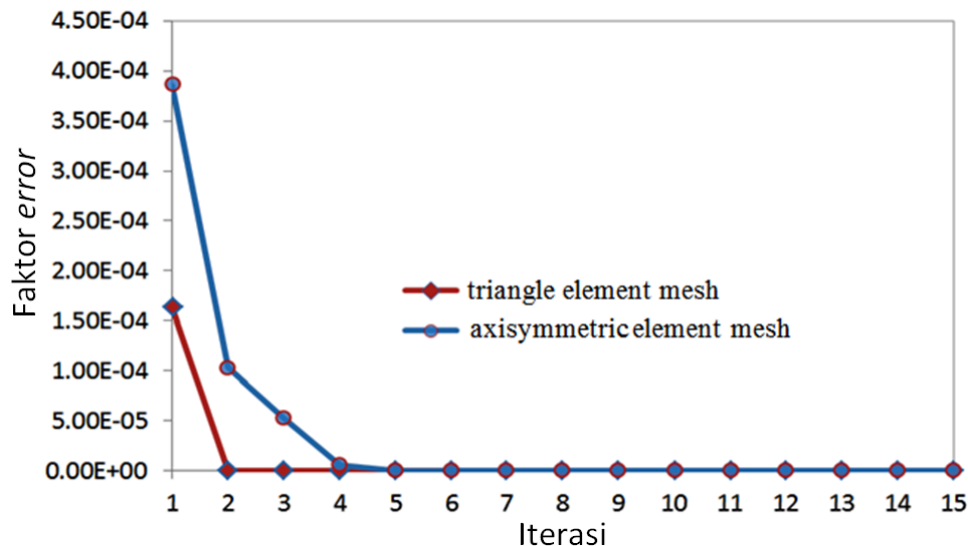
Hasil simulasi dari kedua metode menunjukkan distribusi potensial korosi pada kedua metode tersebut. Hasil simulasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5 menunjukkan sebaran potensial korosi yang sama antara kedua metode tersebut. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada daerah yang diasumsikan daerah anoda, nilai potensial korosi lebih tinggi dibandingkan dengan daerah katoda yang tidak terkorosi. Pada simulasi ini, korosi terjadi pada bagian tengah baja beton bertulang dengan nilai potensial mulai dari $-0.65mV$ sampai $-0.31mV$. Sebaran nilai potensial di atas permukaan beton dipengaruhi oleh potensial korosi yang terjadi pada baja yang tertanam di dalam beton. Sementara itu, nilai sebaran potensial korosi disepanjang baja ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6: (a) Sebaran potensial korosi permukaan baja bertulang menggunakan *3D triangle BEM*; (b) Sebaran potensial korosi permukaan baja bertulang menggunakan *axisymmetric mesh problem*

Gambar 6 menunjukkan nilai distribusi potensi korosi pada tulangan dengan menggunakan *triangle mesh* dan *axisymmetric mesh problem*. Metode tersebut menunjukkan nilai distribusi potensial yang serupa di sepanjang permukaan tulangan. Grafik tersebut menunjukkan perilaku nilai potensi di sekitar kawasan terkorosi, nilai potensial sekitar dan nilai potensial di antara kawasan tidak terkorosi. Nilai sebaran potensial pada permukaan beton dan nilai potensial pada tulangan kedua metode ini hampir sama, namun upaya komputasi dari kedua metode tersebut berbeda secara signifikan karena perbedaan jumlah elemen antara kedua metode tersebut. Metode yang diusulkan dianggap ampuh untuk mereduksi upaya komputasi untuk simulasi karena mampu mereduksi jumlah elemen secara signifikan dan juga mereduksi dimensi persamaan integral. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa identifikasi korosi kolom beton aksial (silinder) dengan metode *axisymmetric mesh problem* telah dilakukan dengan baik.

Selama proses simulasi, faktor *error* dari proses perhitungan juga dianalisis. Faktor *error* dianalisis dengan membandingkan hasil simulasi faktor *error* dengan menggunakan kedua metode meshing tersebut. Toleransi faktor *error* diasumsikan untuk perhitungan korosi. Dengan asumsi perkiraan toleransi faktor *error*, dianggap mengurangi kemungkinan perhitungan kesalahan selama proses simulasi. Faktor kesalahan untuk setiap iterasi untuk simulasi korosi dengan menggunakan kedua metode yang diusulkan ditunjukkan pada Gambar 7.



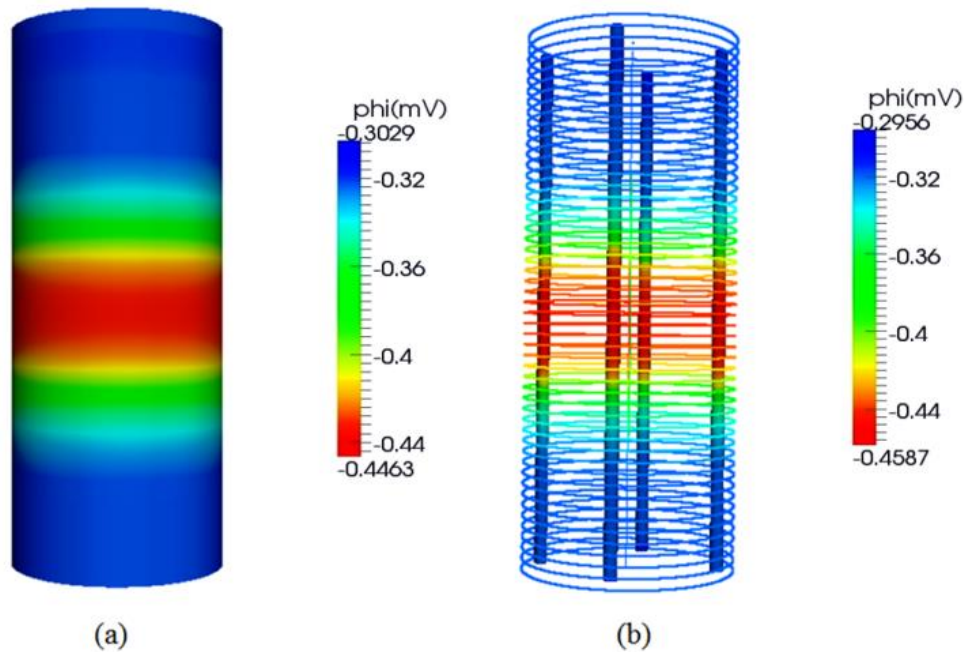
Gambar 7. Faktor *error* untuk setiap iterasi menggunakan kedua metode *triangle element mesh* dan *axisymmetri element mesh*

Gambar 7 menunjukkan perilaku toleransi faktor *error* untuk simulasi korosi dengan menggunakan *triangle element mesh* dan *axisymmetric element mesh*. Gambar tersebut menunjukkan bahwa proses perhitungan dengan menggunakan *triangle element* mencapai batas toleransi *error* iterasi pada iterasi kedua. Sedangkan simulasi korosi dengan menggunakan mesh elemen *axisymmetric* mencapai toleransi *error* iterasi pada iterasi ke-5. Banyaknya elemen menjadi satu penyebab tercapainya faktor *error* selama proses simulasi. Dengan demikian, hasil iterasi menunjukkan bahwa proses iterasi *triangle element* mampu mencapai toleransi faktor *error* dengan lebih cepat dibandingkan dengan menggunakan model *axisymmetric mesh* namun dengan waktu yang lebih lama dan kemampuan komputer yang tinggi.

3. 2. Simulasi Korosi pada Multi Baja dalam Beton

Analisis simulasi korosi pada beton dengan multi tulangan baja juga dijalankan dalam penelitian ini. analisis deteksi korosi dengan *triangle element* sulit dilakukan karena pengaruh jumlah element mash pada setiap baja. Masalah tersebut dapat diatasi dengan menggunakan *axisymmetric mesh problem*. Dengan adanya *axisymmetric element mesh* maka proses perhitungan dapat dilaksanakan dan mampu

menghasilkan hasil perhitungan seperti pada Gambar 7. Dalam proses perhitungan model studi korosi dibagi menjadi 452 axisymmetric element. Kondisi batas simulasi anoda dan katoda telah ditetapkan seperti pada grafik di atas. Nilai konduksi beton juga dianggap konstan. Kondisi batas korosi dan non korosif ditunjukkan oleh kurva polaritasnya. Pada proses perhitungan multi korosi ini kondisi batas korosi masih dibatasi pada satu kondisi korosi saja. Oleh karena itu, pada penelitian ini kondisi batas korosi pada masing-masing baja direpresentasikan oleh kurva polarisasi yang sama, ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. (a) Sebaran potensial korosi di sepanjang permukaan beton dengan metode *axisymmetric element mesh*, sedangkan (b). Sebaran potensial di sepanjang permukaan baja

Gambar 8 di atas menunjukkan perilaku distribusi potensial di sepanjang permukaan beton dan permukaan baja. Dari hasil perhitungan diketahui bahwa sebaran potensial di daerah korosi terjadi di tengah model dengan nilai potensial tertinggi dan nilai sebaran potensial pada kawasan non korosif. Distribusi potensial korosi pada permukaan baja, nilai potensial tertinggi adalah $-0.4587mV$ dan nilai potensial non korosif adalah $-0.2956mV$. Sementara itu, Pada distribusi potensial korosi di permukaan beton lebih rendah dibanding permukaan baja, dimana potensial tertinggi sebesar $-0.4463mV$ dan nilai distribusi potensial pada daerah non-korosif adalah $-0.3029mV$.

Hasil perhitungan ini menunjukkan perilaku distribusi nilai potensial yang sama antara permukaan baja dan beton. Di area yang mengalami fenomena korosi, nilai potensial lebih tinggi daripada nilai potensial di area non-korosi. Gambar 7 juga menunjukkan perbedaan kecil nilai potensial antara nilai potensial sepanjang permukaan beton dan permukaan baja. Hal ini dipengaruhi oleh jarak antara beton dengan baja.

Faktor *error* dalam simulasi multi korosi dalam beton bertulang dijalankan. Faktor *error* merupakan suatu hal terpenting dalam suatu kajian komputasi numerik. Hasil dari simulasi menunjukkan bahwa setiap iterasi menggunakan metode ini hanya menghabiskan waktu kurang dari 2 detik setiap iterasinya. Faktor *error* juga berhasil dicapai di awal iterasi yaitu pada iterasi kedua. Faktor *error* dan waktu iterasi pada simulasi multi korosi dalam beton bertulang dapat dilihat seperti pada tabel berikut.

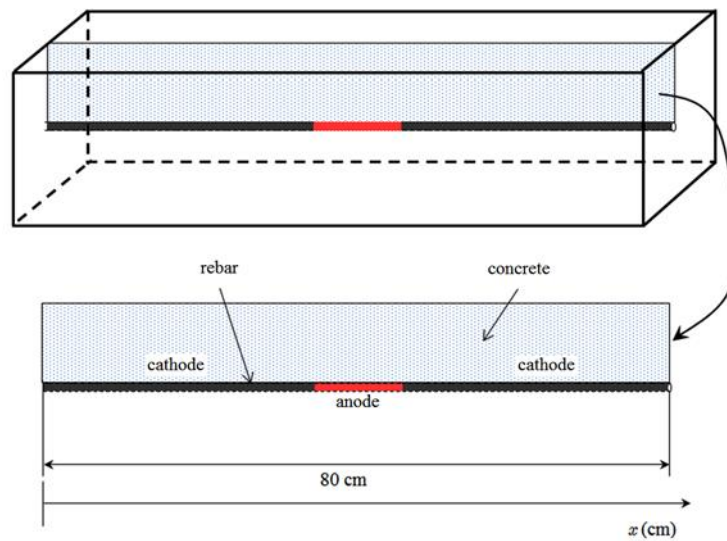
Tabel 1. Nilai faktor *error* dan waktu iterasi untuk setiap simulasi korosi pada kasus multi korosi dalam beton silinder

Iterasi	Faktor Error	Waktu iterasi (s)
1	7.30×10^{-2}	1.89
2	2.34×10^{-2}	3.79
3	1.56×10^{-3}	5.68
4	8.54×10^{-5}	7.58
5	1.99×10^{-6}	9.48
6	9.42×10^{-8}	11.39
7	4.95×10^{-9}	13.30
8	2.61×10^{-10}	15.21
9	1.37×10^{-11}	17.12
10	7.22×10^{-13}	19.04
11	3.80×10^{-14}	20.95
12	2.13×10^{-15}	22.87
13	4.70×10^{-16}	24.80
14	4.31×10^{-16}	26.72
15	3.91×10^{-16}	28.65

Hasil penurunan waktu iterasi yang sangat signifikan dapat dilihat dalam tabel berikut, dimana untuk mendapatkan hasil distribusi potensial pada seluruh model simulasi hanya memerlukan waktu 28 detik untuk 15 iterasi dan faktor *error* tercapai dengan sangat baik. Oleh sebab itu, pengembangan metode *axisymmetric problem* pada kasus korosi beton bertulang bentuk silinder dianggap mampu menyelesaikan permasalahan dengan baik. Simulasi korosi tercapai dengan sangat cepat dan faktor *error* mampu dicapai dengan baik.

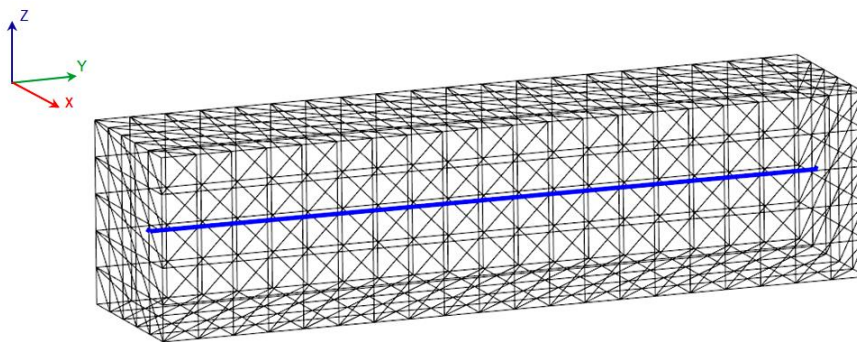
3. 3. Kombinasi Kombinasi *triangle element mesh* dan *axisymmetric element mesh* untuk simulasi korosi pada beton bertulang

Hasil simulasi yang telah dijalankan menunjukkan bahwa *axisymmetric problem* dapat dijalankan untuk kasus beton bertulang dengan bentuk silinder. Namun, tidak semua model beton bertulang dapat dijalankan dengan metode ini, sehingga penggabungan model *mesh* menjadi suatu solusi dalam rangka memaksimalkan proses perhitungan distribusi potensial korosi pada kasus beton bertulang. Dalam kajian ini, penggabungan antara *triangle element mesh* dan *axisymmetric element mesh* untuk simulasi korosi beton bertulang dilakukan.



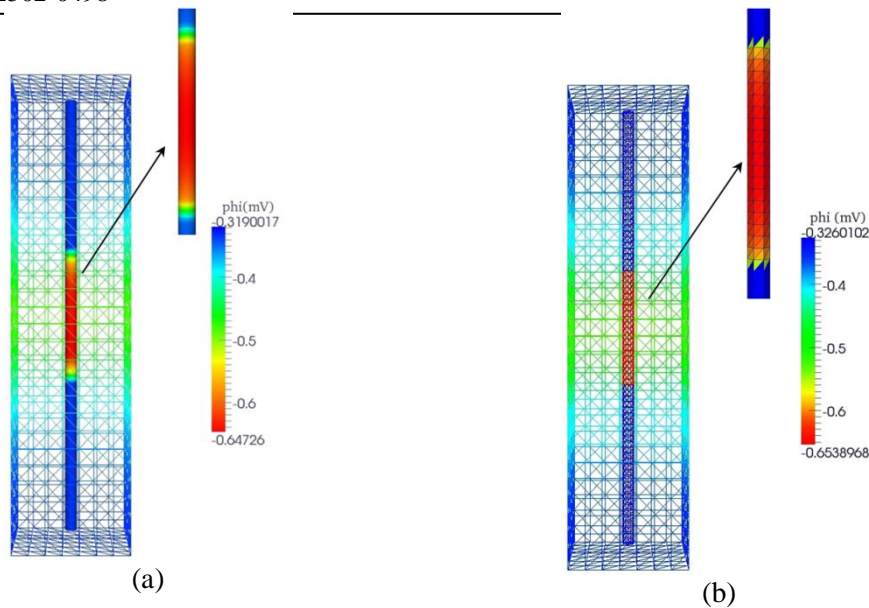
Gambar 9. Dimensi model simulasi pada beton bertulang

Model beton bertulang dikombinasikan dengan memadukan *triangle element mesh* dan *axisymmetric element mesh*. Gambar 9 menunjukkan ukuran dimensi simulasi korosi pada beton bertulang. Model beton dibagi dengan menggunakan *triangle element mesh* sementara pada tulangan baja yang ditanam pada beton dibagi dengan *axisymmetric element mesh*. Dengan menggunakan metode tersebut, jumlah elemen mesh dikurangi menjadi 654 elemen. Penerapan metode ini mempengaruhi penurunan jumlah elemen untuk hasil simulasi korosi. Penggabungan metode elemen tersebut ditunjukkan pada Gambar 10



Gambar 10. Kombinasi kedua *element mesh* untuk model simulasi korosi pada beton

Dengan menggabungkan kedua metode *element mesh*, proses simulasi korosi pada kolom beton persegi panjang disimulasikan dengan cepat dan mampu mengurangi tenaga komputer dalam proses perhitungan. Hasilnya ditunjukkan pada Gambar 11. Gambar tersebut menunjukkan distribusi potensial sepanjang permukaan beton dan tulangan. Distribusi potensial sepanjang tulangan mempengaruhi distribusi potensial pada permukaan beton. Hasilnya menunjukkan distribusi potensial yang lebih tinggi di bagian tengah tulangan.



Gambar 11. (a) Sebaran nilai potensial korosi dengan menggunakan *triangle* dan *axisymmetric element mesh*, (b) Sebaran nilai potensial korosi pada model kasus dengan menggunakan *triangle element mesh*.

Hasil simulasi menunjukkan perilaku sebaran potensial yang serupa dengan asumsi batas yaitu kawasan terkorosi diasumsikan di tengah tulangan. Pada permukaan beton juga terlihat hasil perilaku yang sama dengan sebaran potensial pada tulangan. Namun nilai potensial pada permukaan tulangan lebih tinggi dari pada permukaan beton. Perbedaan nilai potensial antara tulangan dan permukaan beton dipengaruhi oleh ketebalan beton. Gambar 11.a adalah hasil simulasi korosi dengan kombinasi element mesh, sedangkan pada Gambar 11.b adalah hasil simulasi korosi dengan menggunakan triangle element mesh yang telah ada. Hasil simulasi menunjukkan kesamaan nilai potensial yang dihasilkan namun dengan perbedaan waktu kerja yang signifikan. Dengan kombinasi element mesh, waktu pengiraan dapat diturunkan secara signifikan dan mampu menurunkan kerja komputer dalam proses pengiraan.

4. KESIMPULAN

Simulasi potensi korosi untuk model kolom silinder telah disimulasikan. Metode elemen batas (BEM) digunakan untuk hasil simulasi korosi. *Axisymmetric problem* digunakan untuk simulasi korosi model kolom beton silinder. Hasil penelitian menunjukkan dengan menggunakan *axisymmetric element mesh*, upaya komputasi untuk simulasi korosi telah berkurang secara signifikan. Hasil tersebut juga menunjukkan pengurangan yang signifikan dari waktu proses simulasi korosi. Hasilnya juga menunjukkan kemampuan *axisymmetric element mesh* untuk digabungkan dengan metode elemen mesh lainnya. Hasil penelitian menunjukkan nilai sebaran potensial korosi beton bertulang dengan menggunakan metode mesh elemen. Oleh karena itu, *axisymmetric mesh problem* telah mampu meningkatkan kemampuan BEM dalam simulasi korosi beton bertulang. Dengan menggunakan metode ini, upaya komputasi dan waktu yang dibutuhkan untuk proses penghitungan berkurang secara signifikan. Metode tersebut dapat digunakan untuk penelitian lebih lanjut yang dianggap penting untuk mengidentifikasi profil korosi yaitu ukuran atau lokasi korosi lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Broomfield J P. Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair. Second ed. Taylor & Francis 2007.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] H. Susanto, M. Ridha, S. Huzni, and S. Fonna, "Korosi Infrastruktur Beton Bertulang di Kabupaten Aceh Barat Pasca Tsunami 2004," 2015.
- [5] Mohebimoghaddam B and Dianat SH. An Assessment of Concrete Structures Exposed to Aggressive Environments. *J. Basic. Appl. Sci. Res.*, vol. 2 2012; 8155–8161.
- [6] Gao J, Wu J, Li J, and Zhao X. Monitoring of corrosion in reinforced concrete structure using Bragg grating sensing. *NDT E Int.*, vol. 44 2011; 202–215.
- [7] Biondini F & Frangopol D M. Lifetime reliability-based optimization of reinforced concrete cross-sections under corrosion. *Struct. Saf.*, vol. 31 2009; 483–489.
- [8] Koch G H, Michiel P H, Brongers, and Thompson N G. Corrosion Cost and Preventive Strategies in The United States, *Nace Int* 2003.
- [9] Seshu D R and Murthy N R D. Non Destructive Testing of Bridge Pier - A Case Study. *Procedia Eng.*, vol. 54 2013; 564–572.
- [10] Tapan M & Aboutaha R S. Strength Evaluation of Deteriorated RC Bridge Columns. *Journal of Bridge Engineering*, ASCE 2008.
- [11] Cramer S, Covino B, Bullard S, Holcomb G, Russell J, Nelson F H, Taylor, and Soltesz S. Corrosion prevention and remediation strategies for reinforced concrete coastal bridges. *Cem. Concr. Compos* vol. 24 2002; 101–117.
- [12] NACE Int. Corrosion Control plan for Bridges. A NACE International White Paper. The Corrosion Society 2012.
- [13] U.S. Departement of Transportation. Steel Bridge Design Handbook, vol. 16 2012.
- [14] Olumns C, Pantazopoulou B, Bonacci J F, Sheikh S, Thomas M D A, and Hearn N. Repair of Corrosion Damaged Columns with FRP Wraps. *Journal of composites for construction* 2001; 3–11.
- [15] Crewe A J & Alexander N A. Stress-strain Response Of Corroded Reinforcing Bars Under Monotonic And Cyclic Loading, 15th world conference of earthquake engineering 2007.
- [16] Kashani M M, Crewe A J, Alexander N A. Nonlinear cyclic response of corrosion-damaged reinforcing bars with the effect of buckling. *Constr. Build. Mater.*, vol. 41 2013;388–400.
- [17] Tapan M & Aboutaha R S. Effect of steel Corrosion and Loss of Concrete Cover on Strength of Deteriorated RC Columns. *Constr. Build. Mater.*, vol. 25 2011; 2596–2603.
- [18] Lan Z, Wang X, Hou B, Wang Z, Song J & Shengli Chen, S. Simulation of Sacrificial Anode Protection for Steel Platform Using Boundary Element Method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, vol 36 2012; 903–906.
- [19] Nataraja S E, Venkatesha T V, & Tandon H C. Computational and Experimental Evaluation of the Acid Corrosion Inhibition of Steel by Tacrine, *Corrosion Science*, Vol. 60. 2012; 214-223.
- [20] Telles J C F, Wrobel L C, Mansur W J, & Azevedo J P S. Boundary Element for Cathodic Protection Problems, *Boundary Element VII*. Vol 1 1985;1-83.
- [21] Aoki S, Kishimoto K, & Sakata M. Boundary Element Analysis of Galvanic Corrosion, *Boundary Element VII*. Springer-Verlag 1985; 1-63-1-71.
- [22] Masykuri, M. A., Ihsan, M., Fonna, S., Huzni, S., & Susanto, H. (2020). Studi Boundary Element Method dan Multi-objective Inverse Analysis untuk Simulasi Deteksi

-
- Multikorosi Beton Bertulang. *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi*, 6(2), 138-146.
- [23] Aoki S & Kishimoto K. Application of BEM to Galvanic Corrosion and Cathodic Protection. Springer -Verlag 1990.
- [24] Amaya K, Ridha M, & Aoki S. Corrosion Detection by Multistep Genetic Algorithm. WIT Trans Eng Sci, vol. 54 2007; 299–308.
- [25] Minagawa K, Suga K, Kikuchi M, & Aoki S. An efficient Inverse Analysis Considering Observation Error to Detect Corrosion in Concrete Structures Containing Multilayered Rebar. *Int. J. Mech. Mater.* , vol. 8 2012; 81–87.
- [26] Minagawa K, Hayabusa K, Ridha M, Amaya K, & Aoki S. Non-Destructive Inspection of Rebar Corrosion in Concrete Structures by Using BEM and GA. *Adv. Mater. Res.*, vol. 33–37 2008 ; 1289–1292.
- [27] Brebbia C A & Domingues J. Boundary Elements An Introductory Course, Second Edi. WITpress, 2001.
- [28] Ridha M, Fonna S, Huzni S, & Ariffin A K. Application of BEM for Improving Corrosion Assessment of Public Building Stricken by Tsunami Aceh 2004. *Key Eng. Mater.*, vol. 462–463 2011; 413–418
- [29] Wheat H G & Eliezer Z. Some Electrochemical Aspect of Corrosion of Steel in Concrete. *Corrosion-NACE*, vol. 41 1985.
- [30] Ridha M, Amaya K, & Aoki S. Boundary Element Simulation for Identification of Steel Corrosion in Concrete by Magnetic field measurement. *Corrosion-NACE*, vol. 61. 2005; 784–91.
-