

Mesh Sensitivity Study of Boundary Element Inverse Analysis for Detecting the Reinforced Concrete Corrosion

Syarizal Fonna^{1*}, M. Fadhil Azkya¹, Syifaul Huzni¹ dan Gunawarman²

¹Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala

²Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Andalas

*Corresponding author: syarizal.fonna@unsyah.ac.id

Abstract. The purpose of this research is to study the mesh sensitivity to the performance of Boundary Element Inverse Analysis (BEIA) in detecting corrosion location of reinforcing steel in concrete. BEIA was developed by combining Boundary Element Method (BEM) and Particle Swarm Optimization (PSO). BEM was used to calculate the electrical potential on the whole surface of reinforced concrete. PSO was used to evaluate objective function for locating reinforcing steel corrosion in concrete. BEIA was performed using fifteen electrical data potential on surface of reinforced concrete that could be measured from half-cell potential measurement. Numerical simulation of reinforced concrete with a single reinforced steel show that the mesh size in range 0.5 – 1.25 mm would result in excellent solution accuracy with error $\leq 5\%$. Meanwhile, the time to perform the simulation will be longer as the mesh size decreases. Therefore, the performance of BEIA in detecting corrosion location of reinforcing steel in concrete was affected by the mesh size.

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi pengaruh sensitivitas mesh terhadap kinerja *Boundary Element Inverse Analysis* (BEIA) untuk mendeteksi lokasi korosi pada baja tulangan dalam beton. BEIA telah dikembangkan dengan menggunakan *Boundary Element Method* (BEM) dan *Particle Swarm Optimization* (PSO). BEM dimanfaatkan untuk menghitung nilai potensial pada seluruh permukaan beton bertulang. Sementara, PSO digunakan untuk mengevaluasi fungsi objektif guna mendapatkan lokasi korosi pada baja tulangan dalam beton. BEIA telah dijalankan dengan menggunakan lima belas data potensial pada permukaan beton bertulang yang dapat diperoleh dari pengukuran dengan menggunakan *half-cell potential meter*. Simulasi numerik terhadap beton bertulang dengan single baja tulangan memperlihatkan bahwa ukuran mesh dalam rentang 0,5 – 1,25 mm memberikan hasil lokasi korosi dengan tingkat akurasi yang baik (error $\leq 5\%$). Sementara itu, waktu yang diperlukan untuk menjalankan simulasi numerik menjadi lebih lama ketika ukuran mesh lebih kecil. Oleh karena itu, kinerja BEIA ketika mendeteksi korosi baja tulangan dalam beton dipengaruhi oleh ukuran mesh yang digunakan.

Kata kunci: korosi, BEM, PSO, BEIA, beton bertulang, ukuran mesh.

© 2019. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Korosi merupakan salah satu permasalahan utama dalam dunia infrastruktur [1]. Hal ini karena korosi menyebabkan penurunan kualitas suatu material yang mengakibatkan umur layanan yang telah ditentukan menjadi lebih singkat seperti rubuhnya gedung selasar Bursa Efek Indonesia (BEI) yang berada di Jakarta [2]. Kerugian tersebut dapat diperburuk oleh bencana alam yang sering terjadi di Indonesia. Oleh karena itu, korosi pada beton bertulang harus segera dideteksi seawal mungkin agar dapat diambil tindakan perbaikan.

Metode deteksi korosi yang paling umum digunakan oleh khalayak ramai yaitu metode *half-cell potential mapping* yang menggunakan standar ASTM C876 [3-5]. Metode ini digunakan untuk memberikan informasi berupa nilai potensial pada

permukaan beton. Setiap nilai potensial yang diberikan oleh metode tersebut menjadi acuan dalam terjadinya korosi pada baja yang terdapat pada beton bertulang [4]. Namun, metode tersebut mempunyai kekurangan seperti interpretasi data yang perlu dipertimbangkan [5], waktu yang digunakan dan butuh banyak pekerja lapangan [6], dan nilai dari metode tersebut hanya dapat memberikan informasi untuk kemungkinan korosi dan tidak dapat menunjukkan laju korosi [5]. Oleh karena itu, metode tersebut harus ditingkatkan kapasitasnya agar dapat mengatasi kekurangan yang ada.

Salah satu metode yang sedang dikembangkan yang dapat mengatasi kekurangan pada *half-cell potential mapping* yaitu *Boundary Element Inverse Analysis* (BEIA) [7]. BEIA menggunakan simulasi

numerik yang berbasis *Boundary Element Method* (BEM) dan *Particle Swarm Optimization* (PSO). Penggunaan BEM dalam BEIA ialah bertujuan untuk mencari nilai potensial pada seluruh permukaan beton. Sedangkan penggunaan PSO ialah untuk mengevaluasi nilai *objective function* untuk menemukan solusi terbaik dalam menentukan lokasi korosi.

Pada penelitian sebelumnya [7-9], BEIA telah dijalankan dan menunjukkan bahwa BEIA mampu mendapatkan lokasi korosi yang tepat dengan tingkat akurasi yang cukup baik dengan eror $\leq 5\%$. Akan tetapi penelitian tersebut hanya mengkaji pengaruh parameter PSO pada kinerja BEIA. Sedangkan pengaruh parameter BEM seperti sensitivitas mesh belum dipelajari. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh ukuran mesh terhadap BEIA dalam mendeteksi lokasi korosi pada baja beton bertulang.

Korosi pada Beton Bertulang

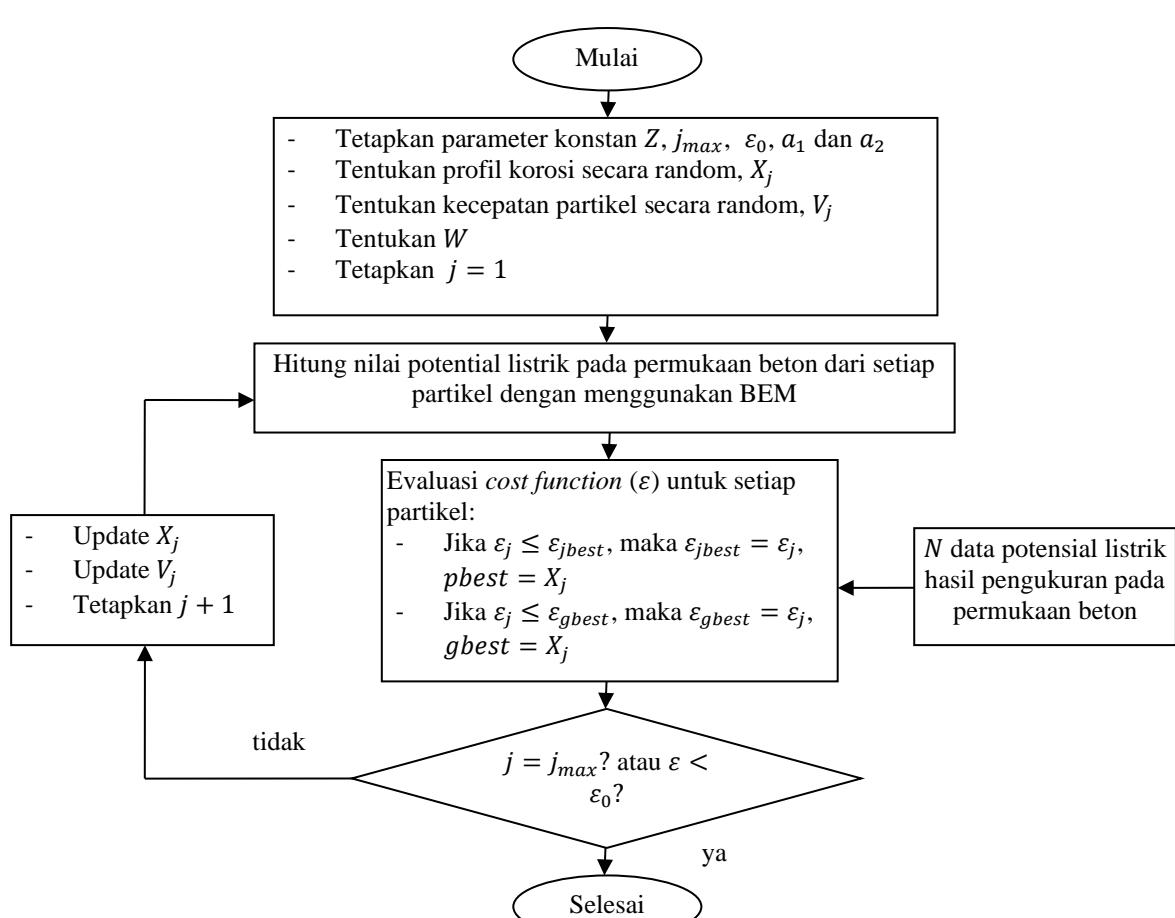
Menurut Roberge, korosi merupakan peristiwa rusaknya logam karena bereaksi dengan lingkungan sekitar [10]. Dalam definisi lain menurut Fontana, korosi merupakan kehancuran atau kerusakan material karena terjadinya reaksi antara logam dan lingkungannya [11]. Pada kasus beton bertulang,

tulangan baja terkorosi akibat berinteraksi dengan lingkungan beton yang telah terkontaminasi.

Tulangan baja dalam beton sebenarnya tahan terhadap korosi karena sifat alkali dari beton (pH 12-13) yang memfasilitasi terbentuknya lapisan pasif dipermukaan baja tulangan dalam beton [12]. Korosi terjadi pada beton bertulang disebabkan oleh dua hal, yaitu penetrasi ion atau zat-zat korosif yang dilakukan oleh ion-ion klorida dan gas CO_2 . Proses penetrasi ion klorida (Cl^-) dan karbonisasi (*carbonation*) ke dalam beton merupakan faktor penyebab rusaknya lapisan tersebut yang berlanjut dengan terkorosinya tulangan di dalam beton [13].

Boundary Element Inverse Analysis (BEIA)

Boundary Element Inverse Analysis (BEIA) dikembangkan dengan kombinasi *Boundary Element Method* (BEM) dan *Particle Swarm Optimization* (PSO) untuk deteksi korosi pada beton bertulang. Penelitian tentang BEIA sudah dilakukan pada penelitian sebelumnya [7-9]. *Inverse Analysis* pada BEIA dilakukan dengan meminimalkan *objective function* untuk mendapat profil korosi yaitu lokasi korosi pada beton bertulang. *Objective function* dievaluasi oleh PSO dalam metode BEIA yang digunakan.



Gambar 1. Diagram Alir BEJA [14]

BEIA dijalankan berdasarkan diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 1. Langkah awal yang dilakukan adalah dengan menentukan parameter yang diperlukan seperti Z , j_{max} , ε_0 , a_1 , a_2 , dan W . Parameter Z adalah jumlah partikel, j_{max} adalah iterasi maksimum, a_1 dan a_2 adalah nilai konstan, W adalah nilai *Weight Inertia*. Kata partikel dalam metode BEIA digunakan untuk menyatakan kandidat solusi. 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 adalah memasukkan N data potensial listrik pada permukaan beton hasil pengukuran lapangan ($\bar{\phi}$). Nilai *objective function* (ε) untuk setiap partikel dihitung dengan mengikuti Pers. (1).

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

Pada persamaan tersebut, C adalah profil korosi yang terletak pada baja tulangan dan N adalah nilai potensial yang dimasukkan dalam 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 *objective function* dievaluasi untuk setiap partikel dari setiap iterasi dengan ketentuan yang sudah ditentukan.

Bila 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 Pers. (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 = *Weight Inertia*, 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.

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

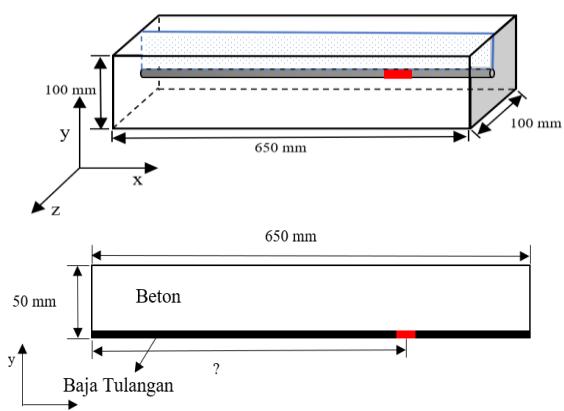
$$V_{j+1} = W_j V_j + a_1 r_1 (pbest - X_j) + a_2 r_2 (gbest - X_j) \quad (3)$$

Nilai ε terus dievaluasi mengikuti diagram alir pada Gambar 1 sehingga posisi setiap partikel sudah menumpu di titik yang sama atau iterasi maksimum yang telah ditentukan sudah tercapai.

Metode Penelitian

Model geometri dibangun dalam studi kasus ini dibentuk dalam dua dimensi yang mewakili dari bentuk tiga dimensi. Pada kasus ini, bentuk tiga dimensi adalah beton dengan ukuran panjang 650 mm, lebar 100 mm, dan tinggi 100 mm yang memiliki tulangan di tengahnya dan hanya memiliki satu tempat lokasi korosi seperti tampak pada Gambar 2. Kemudian, geometri tersebut dimodelkan dalam dua dimensi dengan panjang 650 mm sepanjang baja tulangan dan lebar 50 mm seperti tampak pada Gambar 2.

Dapat dilihat pada Gambar 2, lokasi korosi masih belum diketahui. Pada penelitian ini, korosi dideteksi dengan menggunakan metode BEIA yang dikembangkan.



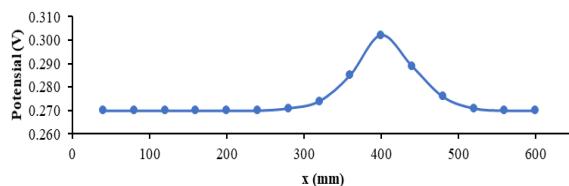
Gambar 2. Beton bertulang dengan tulangan tunggal ditengahnya

Tabel 1. Variasi Ukuran Mesh

No	Ukuran mesh (mm)	Jumlah Elemen
1	0,5	2800
2	0,625	2240
3	1	1400
4	1,25	1120
5	1,5	936
6	2	700
7	2,5	560
8	5	280
9	10	140

Untuk menjalankan simulasi BEIA, input parameter yang perlukan adalah data hasil *meshing* dari geometri dua dimensi yang tampak pada Gambar 2 dengan beberapa variasi ukuran mesh pada Tabel 1 dan data potensial pada permukaan beton dari hasil pengukuran lapangan. Akan tetapi pada kasus ini, data potensial hasil pengukuran lapangan tersebut diambil dari hasil simulasi BEM dengan mengasumsikan korosi berada pada $x = 405$ mm.

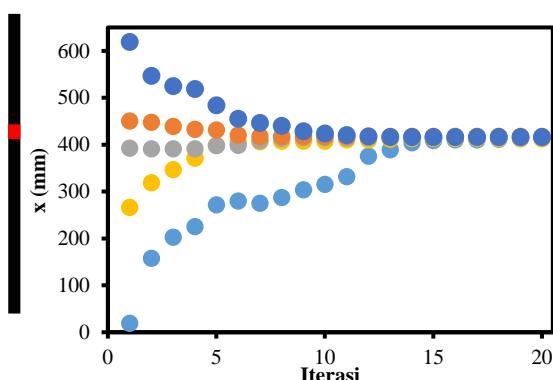
Data potensial dari hasil simulasi didapatkan seperti pada Gambar 3 dengan menggunakan salah satu ukuran mesh 0,5 mm. Data potensial dengan presisi tiga digit di belakang koma digunakan sebagai data pengukuran dalam simulasi menggunakan BEIA.



Gambar 3. Nilai pengukuran potensial pada permukaan beton

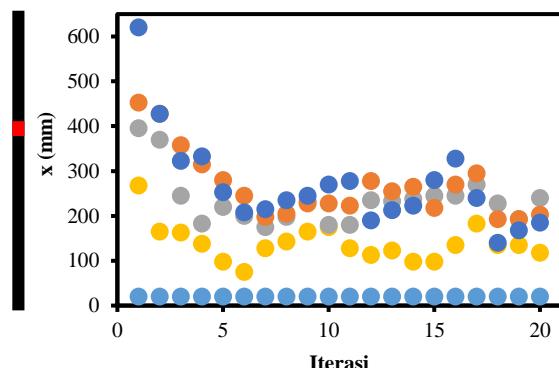
Hasil dan Pembahasan

Data yang dihasilkan dari simulasi Boundary Element Inverse Analysis (BEIA) dengan ukuran mesh 1,25 mm dan 2,5 mm dapat dilihat pada Gambar 4 dan 5. Gambar tersebut menunjukkan pergerakan setiap partikel untuk setiap iterasi yang dilakukan.



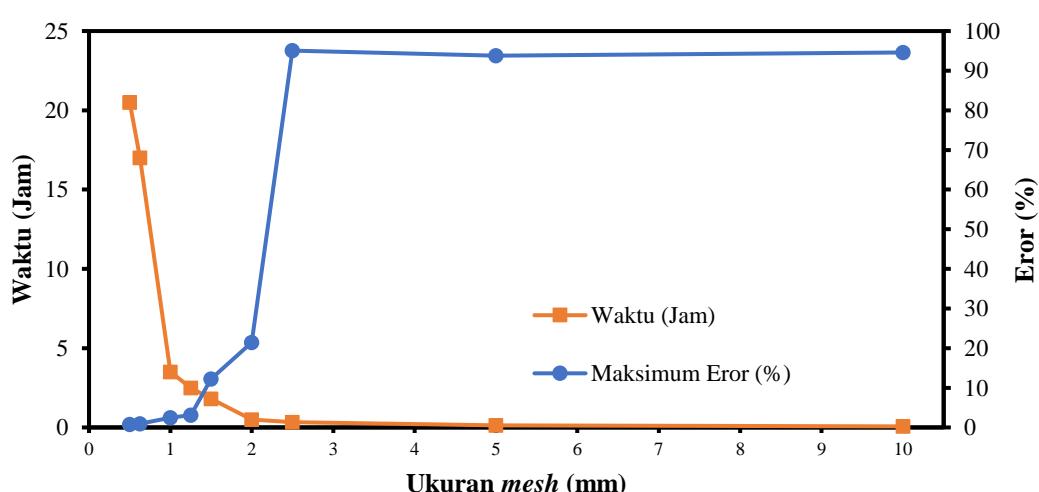
Gambar 4. Hasil simulasi BEIA dengan ukuran mesh 1,25 mm

Gambar 4 menunjukkan hasil simulasi BEIA dengan menggunakan ukuran mesh 1,25 mm. Dapat dilihat pada iterasi ke – 15 bahwa semua partikel telah berkumpul di satu lokasi. Ketika iterasi terus dilakukan sampai iterasi maksimum yaitu iterasi ke – 20, partikel terus berada pada kedudukan yang sama. Pada kondisi tersebut, telah menunjukkan bahwa lokasi korosi dapat dideteksi oleh BEIA dengan eror maksimum sebesar 3,08% dari lokasi aktual.



Gambar 5. Hasil simulasi BEIA dengan ukuran mesh 2,5 mm

Sedangkan, Gambar 5 menunjukkan hasil simulasi BEIA dengan menggunakan ukuran mesh 2,5 mm. Dapat dilihat bahwa pada iterasi pertama, lima partikel disebar secara random. Ketika iterasi terus dilakukan sampai iterasi maksimum, beberapa partikel terus menyebar untuk mencari lokasi korosi dan satu partikel terus berada di posisi yang sama sehingga iterasi maksimum sudah tercapai. Pada kondisi ini dapat dikatakan bahwa lokasi korosi tidak dapat dideteksi oleh BEIA karena *objective function* dari setiap partikel tidak mencapai $\leq \epsilon_0$ dan menghasilkan eror maksimum sebesar 95,06% dari lokasi aktual.



Gambar 6. Efek ukuran mesh terhadap waktu yang diperlukan dan eror dari solusi aktual

Gambar 6 menunjukkan rangkuman dari seluruh simulasi variasi ukuran mesh terhadap waktu untuk menjalankan simulasi dan eror dari lokasi aktual korosi. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa semakin besar ukuran mesh maka waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan simulasi semakin singkat. Sedangkan dengan bertambahnya ukuran mesh akan berdampak pada eror yang dihasilkan yaitu nilai eror $> 5\%$. Dengan demikian perlu ada kompromi antara waktu untuk menjalankan simulasi dan eror yang diberikan.

Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diperoleh melalui hasil penelitian yang telah dilakukan, yaitu :

1. Ukuran mesh memberikan pengaruh terhadap kinerja BEIA dalam mendeteksi lokasi korosi.
2. Ukuran mesh yang direkomendasikan untuk mencari lokasi korosi adalah dengan rentang: $0,5 < \text{ukuran mesh} \leq 1,25 \text{ mm}$.

Penghargaan

Penelitian ini dibiayai melalui skema “Penelitian Dasar 2019” No: 80/UN11.2/PP/SP3/2019.

Referensi

- [1] Informasi dari <https://www.g2mtlabs.com/corrosion/cost-of-corrosion/> (diakses pada 25 September 2019)
- [2] Informasi dari <https://mediaindonesia.com/read/detail/14107-8-korosi-penyebab-selasar-bei-runtuh> (diakses pada 26 September 2019)
- [3] Sagüés, A.A. et al., 2012. Kelvin probe electrode for contactless potential measurement on concrete – properties and corrosion profiling application. Corrosion Science 56, 26-35.
- [4] Ridha, M. et al., 2013. Corrosion risk assessment of public buildings affected by the 2004 tsunami in banda aceh. Jurnal of Earthquake and Tsunami 7 (1), 1-22.
- [5] Song, H.W. and Saraswathy, V., 2007. Corrosion monitoring of reinforced concrete structures-a review. *Int. J. Electrocjem. Sci.* 2, 1-28.
- [6] Ridha, M. et al., 2005 Boundary element simulation for identification of steel corrosion in concrete by magnetic field measurement. Corrosion 61 (8), 784-791.
- [7] Fonna, S. et al., 2018. Boundary element inverse analysis for rebar corrosion detection:Study on the 2004 tsunami-affected structure in Aceh, Case Studies in Construction Materials 8, 292–298.
- [8] Fonna, S. et al., 2018. Study of inertia weight parameter for boundary element inverse analysis to detect RC corrosion, MATEC Web Conferences 195, 02030.
- [9] Fonna, S. et al., 2019, The influence of number of solution candidate on performance of boundary element inverse analysis in detecting rebar corrosion. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 602, 012066.
- [10] Roberge, P. 2000. Handbook of corrosion engineering, McGraw-Hill, Inc., New York.
- [11] Fontana, M. G. 1986. Corrosion engineering, McGraw-Hill Book Co., Singapore.
- [12] Broomfield, J. P. 2007. Corrosion of steel in concrete – understanding, investigation, and repair, 2nd edition, Taylor and Francis, New York.
- [13] Hussain, R.R. 2011. Underwater half-cell corrosion potential bench mark measurement of corroding steel in concrete influenced by a variety of material science and environmental engineering variables. Measurement 44, 274-280.