

## **BEM dan Pengukuran Medan Magnet untuk Pendeteksian Korosi pada Beton Tulangan**

**M. Ridha<sup>a</sup>, Syarizal Fonna<sup>b</sup>, dan S. Aoki<sup>c</sup>**

<sup>a</sup>Jurusan Teknik Mesin, Universitas Syiah Kuala  
Banda Aceh, Indonesia

<sup>b</sup>Department of Mechanical and Material Engineering  
Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi  
43600 Selangor, Malaysia

<sup>c</sup>Department of Computational Science and Engineering  
Toyo University, 2100 Kujirai, Kawagoe  
Saitama 350-8585, Japan

### **Abstrak**

*Paper ini mengetengahkan suatu konsep pendeteksian korosi pada beton tulangan dengan menggunakan inverse analysis yang berdasarkan kepada BEM dan pengukuran medan magnet. Sensor SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) digunakan untuk mengukur medan magnet yang sangat rendah pada struktur beton. Inverse analysis dijalankan dengan meminimalkan cost function yang merupakan nilai selisih densitas fluks magnet hasil penghitungan dengan hasil pengukuran. Densitas fluks magnet dihitung dengan menggunakan hukum Biot dan Savart dan dengan memperhitungkan arus yang mengalir dalam domain beton dan besi tulangan. Potensial didalam domain beton dimodelkan menggunakan persamaan Laplace. BEM digunakan untuk menyelesaikan persamaan Laplace untuk mendapatkan sebarang potensial dan densitas arus didalam dan permukaan domain beton. Hasil simulasi memperlihatkan lokasi terjadinya korosi pada besi tulangan dalam beton dapat dideteksi secara efektif.*

*Kata kunci: BEM; pendeteksian korosi; inverse problem; pengukuran medan magnet; beton tulangan*

### **Pendahuluan**

Korosi pada baja tulangan didalam beton merupakan penyebab utama terjadinya kerusakan dan kegagalan dini pada struktur beton tulangan. Hal ini telah menarik perhatian para ahli korosi karena implikasinya yang serius kepada daya tahan infrastruktur.<sup>1-3</sup>

Kebutuhan akan suatu metoda tidak merusak untuk mendiagnosa dan memonitor terjadinya korosi pada baja tulangan dalam beton diakui secara luas guna mempertahankan masa pakai yang panjang suatu struktur dan mengurangkan biaya perawatan.<sup>4-5</sup> Bagaimanapun, pendeteksian korosi pada baja tulangan dalam beton dengan pengukuran langsung pada permukaan beton seperti teknik *potential mapping* masih kurang akurat, memerlukan banyak tenaga kerja, dan membutuhkan waktu yang lama, terutama karena ketidakmungkinan penilaian langsung baja tulangan, konduktivitas beton yang rendah dan kebutuhan akan kontak antara *probe* dengan beton selama pengukuran.

Metoda indentifikasi berdasarkan Boundary Element (BE) inverse analysis telah diperkenalkan untuk menyelesaikan permasalahan diatas.<sup>6-8</sup> Dalam metoda ini, profil korosi baja tulangan dalam beton dapat dideteksi dengan efektif dengan menggunakan beberapa data potensial yang diukur pada permukaan beton. Walaupun demikian, metoda ini masih memiliki keterbatasan untuk mendeteksi dengan tepat korosi baja tulangan yang kecil dalam struktur beton.

Arus akibat korosi memiliki komponen magnetik. Intensitas dari medan magnet ini haruslah sangat kecil akibat dari arus korosi yang kecil. Medan magnet ini dapat diukur dengan menggunakan sensor SQUID (*Superconducting Quantum Interference Device*).<sup>9-14</sup>

Dalam paper ini diperkenalkan metoda untuk mendeteksi korosi baja tulangan dalam beton dengan mengkombinasikan data medan magnet dan BE inverse analysis. Data simulasi komputer digunakan untuk mendemonstrasikan keefektifan metoda ini.

**Pemodelan Korosi dalam Beton**

Gambar 1 menunjukkan model beton tulangan dengan pengukuran medan magnet. Potensial dalam domain beton ( $\Omega$ ) dapat dimodelkan secara matematis dengan persamaan Laplace:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

Kondisi batas (*boundary conditions*) untuk Persamaan (1) diberikan seperti:

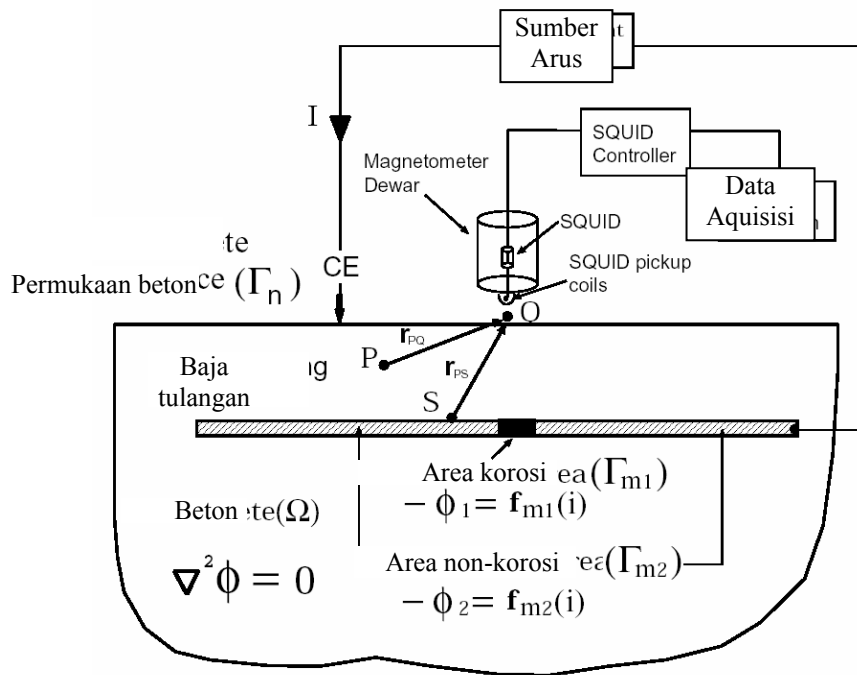
$$\mathbf{i} = \mathbf{0} \quad \text{on } \Gamma_n \quad (2)$$

$$\mathbf{i} = \mathbf{i}_{CE} \quad \text{on } \Gamma_{CE} \quad (3)$$

$$-\phi_a = f_a(i) \quad \text{on } \Gamma_{m1} \quad (4)$$

$$-\phi_c = f_c(i) \quad \text{on } \Gamma_{m2} \quad (5)$$

dimana  $f_a(i)$  dan  $f_c(i)$  adalah fungsi non-linear yang merepresentasikan kurva polarisasi secara eksperimental untuk area korosi dan non-korosi pada baja tulangan dalam beton secara berturut-turut. Potensial pada baja tulangan ditentukan sebagai potensial rujukan (0 volt) untuk kalkulasi numerik.



Gambar 1 Model beton tulangan dengan pengukuran medan magnet.

Dengan menyelesaikan persamaan Laplace dalam Persamaan (1), potensial dan densitas arus pada seluruh permukaan dan setiap lokasi domain dapat ditentukan.<sup>15</sup> Dalam hal ini, BEM digunakan untuk menyelesaikan persamaan tersebut dengan area korosi dan non-korosi pada baja tulangan serta kurva polarisasinya telah ditetapkan. Suatu prosedur standar BEM memberikan persamaan:

$$\kappa [H] \begin{Bmatrix} \phi_n \\ -f(i_a) \\ -f(i_c) \end{Bmatrix} - [G] \begin{Bmatrix} i_o \\ i_a \\ i_c \end{Bmatrix} = 0 \quad (6)$$

dimana detil dari matrik [H] dan [G] diberikan dalam referensi<sup>16</sup> dan lambang n, a, c dan m menunjukkan nilai pada  $\Gamma_n$ ,  $\Gamma_{m1}$  and  $\Gamma_{m2}$ , berturut-turut.

### Medan Magnet pada Permukaan Beton

Pengukuran medan magnet untuk pendeteksian korosi baja tulangan dalam struktur beton ditunjukkan dalam Gambar 1. Korosi terjadi pada salah satu bagian dari baja tulangan. Area korosi sangat kecil dibandingkan dengan area non-korosi. Dalam terjadinya proses korosi, arus mengalir dari area korosi ke area non-korosi pada baja tulangan. Bagaimanapun, medan magnet yang diakibatkan oleh arus ini sangat kecil akibat arus korosi yang juga sangat kecil.

Untuk meningkatkan besar medan magnet, arus luar dari *counter electrode* (CE) diberikan ke dalam struktur beton. Arus ini akan mengalir ke area korosi dan area non-korosi. Besarnya arus yang mengalir ke setiap bagian itu berbeda-beda bergantung kepada perpetaan kurva polarisasi, lokasi dan geometri area korosi. Medan magnet pada titik Q pada struktur beton akibat arus injeksi (*impressed current*) dan arus korosi dapat diukur, misalnya dengan sensor SQUID.

Dengan pertimbangan bahwa komponen magnetic pada struktur beton adalah akibat arus yang mengalir dalam domain beton dan baja tulangan, medan magnet pada titik Q dapat dihitung dengan menggunakan hukum Biot dan Savart seperti berikut ini:

$$B(Q) = \frac{\mu_o}{4\pi} \left[ \int_{\Omega} \frac{i(P)d\Omega(P) \times r(Q, P)}{|r(Q, P)|^3} + \sum_{k=1}^{N_m} \left( \int_{L_{mk}} \frac{I(S)dL(S) \times r(Q, S)}{|r(Q, S)|^3} \right) \right] \quad (7)$$

dimana B adalah densitas fluks magnet.  $i(P)$  adalah densitas arus di titik P dalam  $\Omega$ .  $\mathbf{r}$  adalah vektor jarak antara sumber dan titik observasi.  $I(S)$  adalah arus yang mengalir pada baja tulangan di titik S.

### Inverse Analysis untuk Pendeteksian Korosi

Dalam metoda inverse analysis untuk pendeteksian korosi baja tulangan dalam beton, profil korosi, C, diestimasi dari sejumlah data densitas fluks magnet yang diukur pada struktur beton. C dapat merepresentasikan jumlah, lokasi, dan bentuk area korosi pada baja dalam beton. Inverse analysis dijalankan dengan meminimalkan cost function,  $\varepsilon(C)$ , yang merupakan selisih antara nilai pengukuran dan penghitungan densitas fluks magnet.  $\varepsilon(C)$  didefinisikan seperti persamaan berikut dalam aplikasi pengukuran dengan sensor SQUID:

$$\varepsilon(C) = \sum_{j=1}^N \left( \frac{|\mathbf{B}(j; C)| - |\overline{\mathbf{B}}(j)|}{|\overline{\mathbf{B}}_{MAX}|} \right)^2 \quad (8)$$

Pada saat  $\varepsilon(C)$  dalam Persamaan (8) konvergen, C dapat ditentukan. Teknik optimisasi seperti *downhill simplex method*<sup>17</sup> dan *genetic algorithm*<sup>18</sup> dapat digunakan untuk meminimalkan  $\varepsilon(C)$ .<sup>6-7</sup>

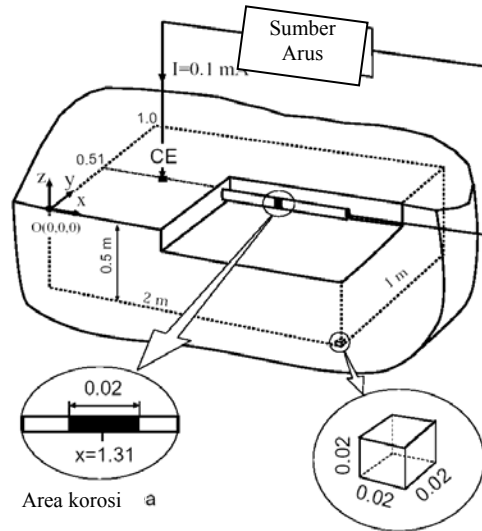
## Hasil dan Pembahasan

### a. metoda langsung menggunakan medan magnet

Metoda langsung (*direct method*) digunakan untuk mendapatkan distribusi nilai B pada permukaan struktur beton. Nilai B ini didapat dengan menggunakan Persamaan (7). BEM digunakan untuk menyelesaikan persamaan Laplace dengan menetapkan semua kondisi batas.

Spesimen beton bertulang dimodelkan seperti pada Gambar 2. Nilai konduktivitas beton ( $\kappa$ ) adalah  $7 \times 10^{-3} \text{ 1}/\Omega \cdot \text{m}$ . Baja tulangan dengan diameter 6 mm dan panjang 0.6 m dicor dalam beton

dengan kedalaman 50 mm memanjang sepanjang sumbu x (pada  $x=1$  m hingga  $x=1.6$  m) dan pada  $y=0.51$  m. Area korosi, 20 mm, pada baja ditetapkan pada  $x=1.31$  m. Arus diinjeksi ke dalam beton sebesar  $I=0.1$  mA yang dialirkan dari CE. Dua kurva polarisasi untuk baja tulangan area korosi dan non-korosi yang digunakan adalah seperti yang diberikan oleh Wheat et al.<sup>19</sup>

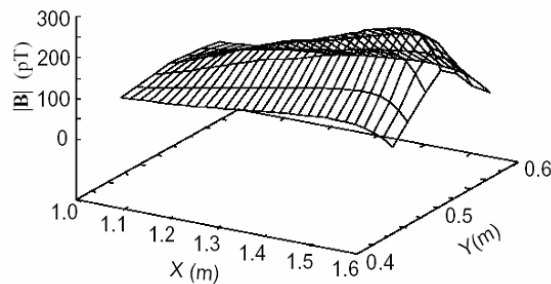


Gambar 2 Model spesimen beton bertulang dengan korosi pada baja tulangan.

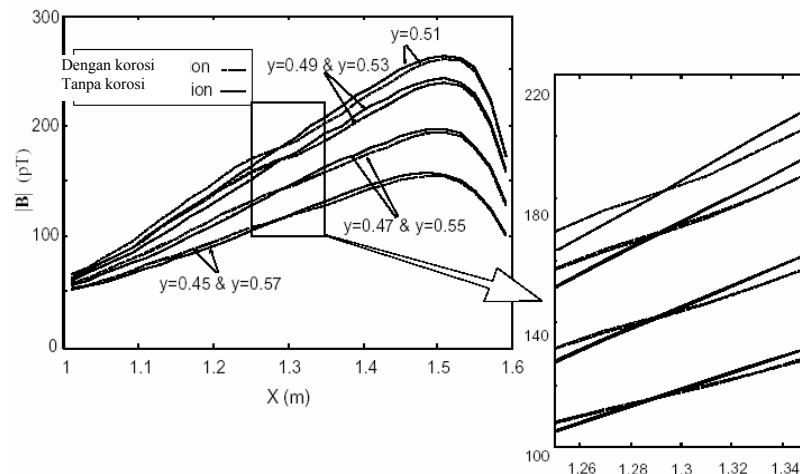
Distribusi nilai B pada permukaan beton akibat arus injeksi dan arus korosi ditunjukkan dalam Gambar 3(a). Dari gambar ini dapat dilihat bahwa kemungkinan dimana lokasi korosi belum dapat dipastikan. Distribusi B juga dihitung untuk spesimen yang baja tulangnya tidak terjadi korosi dan hanya diberikan arus injeksi. Gambar 3(b) menunjukkan perbandingan nilai B pada permukaan beton antara spesimen yang baja tulangnya terkorosi dengan yang tidak terkorosi.

Dalam gambar 3(b) dapat dilihat ada perbedaan distribusi nilai B antara spesimen yang berkorosi dengan yang non-korosi. Nilai B pada bagian sebelah kiri area korosi lebih tinggi untuk kasus ada korosi daripada yang tanpa korosi dan berkebalikan pada bagian sebelah kanan area korosi. Perpotongan kedua grafik distribusi B itu berada disekitar  $x=1.31$  m. Sehingga dari Grafik 3(b) dapat diprediksi bahwa lokasi korosi berada disekitar perpotongan kedua grafik distribusi B. Walaupun demikian, lokasi korosi secara akurat tidak dapat ditentukan bila hanya menggunakan nilai medan magnet.

Namun demikian, adanya fakta bahwa ada selisih nilai distribusi B antara spesimen berkorosi dengan non-korosi, memberikan suatu peluang diaplikasikannya *inverse analysis* untuk mendeteksi lokasi korosi pada baja tulangan dalam struktur beton dengan mengetahui beberapa data nilai B dipermukaan beton. Nilai B tersebut memungkinkan untuk diukur dipermukaan beton.



(a)



Gambar 3 (a) Distribusi densitas fluks magnet pada spesimen korosi, (b) Perbandingan nilai densitas fluks magnet antara spesimen korosi dan non-korosi.

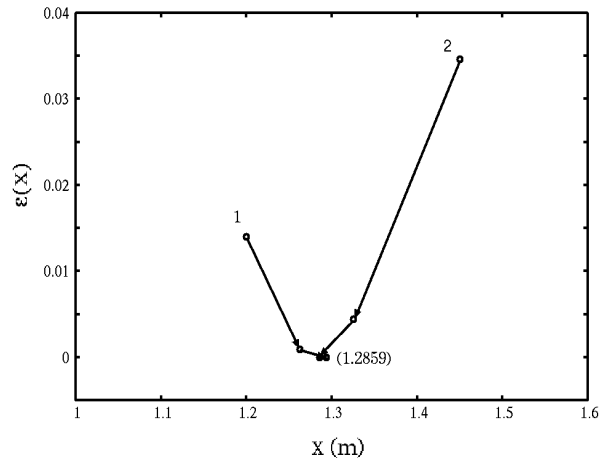
### b. *inverse analysis* untuk mendeteksi lokasi korosi

Dalam *inverse analysis*, pertama sekali diasumsikan, lokasi korosi pada baja tulangan tidak diketahui. Selanjutnya, nilai  $B$  telah dipilih untuk lima lokasi struktur beton, dan dianggap sebagai nilai  $B$  hasil pengukuran langsung. Nilai  $B$  ini ditunjukkan dalam Tabel 1. *Inverse analysis* dijalankan dengan meminimalkan perbedaan  $B$  dipermukaan beton yang didapat dengan penghitungan dan pengukuran, seperti pada Persamaan (7). Untuk penyederhanaan,  $C$  disini hanya menunjukkan lokasi terjadinya korosi baja dalam beton pada arah  $x$  saja. Sementara jumlah dan bentuk area korosi telah ditetapkan. Model spesimen beton bertulang yang digunakan adalah sama seperti pada metoda langsung.

Tabel 1 Nilai  $B$  pada lima lokasi dipermukaan beton.

No	$X$ (m)	$B$ (pTesla)
1	1.19	142
2	1.23	159
3	1.27	171
4	1.31	184
5	1.35	201

Minimalisasi cost function  $\varepsilon(C)$  pada Persamaan (7) dilakukan dengan menggunakan teknik optimisasi *downhill simplex method*.<sup>17</sup> Hasil estimasi lokasi korosi pada baja diindikasikan dengan nilai terendah  $\varepsilon(C)$ . Dua nilai awal untuk lokasi korosi ditetapkan pada  $x=1.20$  dan  $1.45$  m. Hasil setelah 11 iterasi menunjukkan lokasi estimasi korosi adalah pada  $x=1.2859375$  m seperti yang diberikan dalam Gambar 4. Hasil ini bersesuaian dengan lokasi korosi yang telah ditetapkan sebelumnya pada metode langsung. Hasil ini menunjukkan bahwa lokasi korosi yang kecil dapat dideteksi secara efektif dengan menggunakan beberapa data medan magnet pada permukaan struktur beton.



Gambar 4 Konvergensi hasil inverse analysis untuk pendeteksian lokasi korosi dalam beton dengan menggunakan *downhill simplex method*.

### Kesimpulan

Suatu metoda untuk mendeteksi korosi baja tulangan dalam struktur beton dikembangkan dengan mengkombinasikan pengukuran medan magnet dan *Boundary Element inverse analysis*. Pada metoda ini, sensitifitas pendeteksian korosi yang lebih baik dapat dicapai dengan menggunakan sensor SQUID yang mampu mengukur intensitas medan magnet yang sangat kecil akibat arus korosi dan *impressed current*.

*Inverse analysis* diformulasikan dengan meminimalkan *cost function* yang merupakan nilai selisih densitas fluks magnet hasil penghitungan dengan hasil pengukuran. Densitas fluks magnet dihitung dengan menggunakan hukum Biot dan Savart dan dengan memperhitungkan arus yang mengalir dalam domain beton dan besi tulangan. Potensial didalam domain beton dimodelkan menggunakan persamaan Laplace dan diselesaikan dengan menggunakan BEM.

Hasil inverse analysis menunjukkan bahwa lokasi korosi yang kecil dapat dideteksi secara efektif dengan menggunakan beberapa data medan magnet pada permukaan struktur beton.

### Daftar Pustaka

1. Anonymous, Corrosion Costs by Industrial Sector, Supplement to Material Performance, **41:7** (2002), p. 4.
2. E.J. Fasullo, ASTM STP 1137, "Infrastructure: The Battle of Corrosion," in Corrosion Forms and Control for Infrastructure, eds. V. Chaker (West Conshohocken, PA: ASTM, 1992), p. 1.
3. T.R. Menzies, ASTM STP 1137, "National Cost of Damage to Infrastructure from Highway Deicing," in Corrosion Forms and Control for Infrastructure, eds. V. Chaker (West Conshohocken, PA: ASTM, 1992), p. 30.
4. J.P. Broomfield: Corrosion of Steel in Concrete - Understanding, Investigation and Repair (London, U.K.: E&FN Spon, 1997), p. 1.
5. B.H. Hertlein, ASTM STP 1137, "Assessing the Role of Steel Corrosion in the Deterioration of Concrete in the National Infrastructure: A Review of the Causes of Corrosion and Current Diagnostic Techniques," in Corrosion Forms and Control for Infrastructure, eds. V. Chaker (West Conshohocken, PA: ASTM, 1992), p. 356.
6. M. Ridha, K. Amaya and S. Aoki, "Multistep Genetic Algorithm for Detecting Corrosion of Reinforcing Steels in Concrete," Corrosion, **57: 9** (2001), p. 794.
7. M Ridha, K. Amaya and S. Aoki, "Improvement of AC Impedance Method for Monitoring Corrosion of Rebar in Concrete Structure by Boundary Element Inverse Analysis," Journal of Zairyo-to-Kankyo [Corrosion Engineering], ZAKEP, **48:10** (1999), p. 654.
8. Ridha, M, Amaya, K. and Aoki, S. 2005. Boundary Element Simulation for Identification of Steel Corrosion in Concrete Using Magnetic Field measurement. *Corrosion Science Section, NACE International*, **61**: 784-791.

9. A.D. Hibbs, "A High-Resolution Magnetic Imaging System Based On a SQUID Magnetometer," *Review of Scientific Instruments*, **63**:7 (1992), p. 3652.
10. W.G. Jenks, S.S.H. Sadeghi and J.P. Wikswo Jr., "SQUIDS for Nondestructive Evaluation", *Journal Physics D: Applied Physics*, **30** (1999), p. 293.
11. W.G. Jenks, I.M. Thomas and J.P. Wikswo Jr., "SQUIDS", *Encyclopedia of Applied Physics*, **19**:3 (1997), p. 457.
12. J.P. Wikswo Jr., "The Magnetic Inverse Problem for NDE," in *SQUIDS Sensors: Fundamental, Fabrication and Application*, eds H. Weinstock, (Nederland: Kluwer Academic Publisher 1996), p.629.
13. D. Koelle, R. Kleiner, F. Ludwig, E. Dantsker and J. Clarke, "High-Transition- Temperature Superconducting Quantum Interference Devices," *Reviews of Modern Physics*, **71**:3 (1999), p. 631.
14. A. Abedi, J.J. Fellenstein, A.J. Lucas and J.P. Wikswo Jr., "A Superconducting Quantum Interference Device Magnetometer System for Quantitative Analysis and Imaging of Hidden Corrosion Activity in Aircraft Aluminum Structures," *Review of Scientific Instruments* **70**:12 (1999), p. 4640.
15. S. Aoki, K. Amaya & M. Miyasaka, *Boundary Element Analysis on Corrosion Problems* (Tokyo, Japan: Shokabo 1998), p.24 (in Japanese).
16. C.A. Brebbia, *The Boundary Elements Technique in Engineering* (London, U.K.: Newnes-Butterworth, 1980), p. 102.
17. W.H. Press, *Numerical Recipes in Fortran 77 - The Art of Scientific Computing*, 2nd ed. (New York, NY:Cambridge University Press, 1992), p. 402.
18. D.E. Goldberg, *Genetic Algorithm - In Search - Optimization and Machine Learning* (New York, NY:Addison Wesley, 1989).
19. H.G. Wheat and Z. Eliezer, "Some Electrochemical Aspects of Corrosion of Steel in Concrete", *Corrosion*, **41**:11 (1985), p. 640.