

JMMI

Jurnal Metalurgi dan Material Indonesia

ISSN 2654-4962

Agustus 2019

Diterbitkan oleh

***Badan Kerja Sama Pendidikan Metalurgi dan
Material (BKPMM)***

[HOME](#) / [About the Journal](#)

About the Journal

Jurnal Metalurgi dan Material Indonesia (JMMI) merupakan terbitan berkala makalah ilmiah mencakup keilmuan teknik metalurgi (*metallurgy*) dan teknik material (*materials science and engineering*). Topik-topik pilihan yang termasuk dalam lingkup JMMI antara lain adalah sebagai berikut.

1. Rekayasa struktur, sifat, dan degradasi material
2. Rekayasa proses metalurgi dan pemrosesan material
3. Pengembangan metode karakterisasi material
4. Pemodelan dan simulasi dalam rekayasa metalurgi dan material
5. Pendidikan keilmuan metalurgi dan material

JMMI diterbitkan oleh **Badan Kerja Sama Pendidikan Metalurgi dan Material Indonesia (BKPMI)** per *catur wulan* yaitu pada bulan akhir April, Agustus, dan Desember. BKPMI merupakan perkumpulan para pengajar/dosen dari program studi atau jurusan yang mengajarkan keilmuan Teknik Metalurgi dan/atau Teknik Material. Hingga tahun 2017, anggota BKPMI berasal dari:

1. Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia (UI), Depok
2. Program Studi Teknik Material, Institut Teknologi Bandung (ITB), Bandung
3. Program Studi Teknik Metalurgi, Institut Teknologi Bandung (ITB), Bandung
4. Program Studi Teknik Material dan Metalurgi, Institut Sepuluh November (ITS), Surabaya
5. Jurusan Teknik Metalurgi, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa (UNTIRTA), Cilegon
6. Program Studi Teknik Metalurgi, Universitas Jenderal Achmad Yani (UNJANI), Bandung
7. Program Studi Teknik Mesin, Universitas Diponegoro (UNDIP), Semarang
8. Program Studi Teknik Mesin, Universitas Gadjah Mada (UGM), Yogyakarta
9. Program Studi Teknik Mesin, Universitas Sebelas Maret (UNS), Surakarta
10. Politeknik Manufaktur (POLMAN), Bandung
11. Program Studi Teknik Mesin, Universitas Andalas (UNAND), Padang
12. Program Studi teknik Mesin, Universitas Syiah Kuala (UNSYIAH), Aceh

Penerbitan JMMI didasari oleh keinginan para anggota BKPMI untuk memiliki jurnal ilmiah nasional yang bereputasi dan berkualitas. Selain itu, kebutuhan adanya jurnal nasional tersebut dimotivasi oleh produktivitas para anggota BKPMI yang tinggi dalam menghasilkan karya ilmiah. Hal tersebut dibuktikan dengan keberhasilan penyelenggaraan Seminar Nasional Metalurgi dan Material (SENAMM), yang mana menjadi wahana diseminasi hasil penelitian pada anggota BKPMI. Hingga tahun 2017 telah diselenggarakan hingga SENAMM ke X.

Dokumentasi SENAMM X di Semarang (UNDIP)



Sejarah penyelenggaraan Seminar Nasional Metalurgi dan Material (SENAMM) adalah sebagai berikut.

1. SENAMM I 2007 - Universitas Indonesia (UI), Depok
2. SENAMM II 2008 - Institut Teknologi Bandung (ITB), Bandung
3. SENAMM III 2009 - Institut Teknologi Sepuluh November (ITS), Surabaya
4. SENAMM IV 2010 - Universitas Sultan Ageng Tirtayasa (UNTIRTA), Cilegon
5. SENAMM V 2012 - Institut Teknologi Sepuluh November (ITS), Surabaya
6. SENAMM VI 2013 - Universitas Indonesia (UI), Depok
7. SENAMM VII 2014 - Institut Teknologi Bandung (ITB), Bandung
8. SENAMM VIII 2015 - Universitas Gadjah Mada (UGM), Yogyakarta
9. SENAMM XI 2016 - Universitas Sultan Ageng Tirtayasa (UNTIRTA), Cilegon
10. SENAMM X 2017 - Universitas Diponegoro (UNDIP), Semarang
11. SENAMM XI 2018 - Institut Teknologi Bandung (ITB), Bandung
12. SENAMM XII 2019 - Universitas Trisakti (USAKTI), Jakarta

JMMI

Jurnal nasional di bidang rekayasa metalurgi dan material, diterbitkan oleh Badan Kerja Sama Pendidikan Metalurgi dan Material (BKPM)

ISSN 2654-4962



Platform &
workflow by
OJS / PKP

[HOME](#) / Editorial Team

Editorial Team

Dewan Pengarah

1. Dr. Ir. Hermawan Judawisastra (ITB)
2. Aditya trenggono, S.T, M.Sc (UNTIRTA)
3. Dr. Sri Harjanto (UI)
4. Agung Purniawan, S.T., M.Eng. (ITS)
5. Prof. Dr. Rochim Suraman (ITB)
6. Prof. Dr. Jamasri (UGM)
7. Prof. Dr. Sulistijono (ITK)

Dewan Redaksi

Ketua Dewan Editor

: Dr. Ir. Arif Basuki (ITB)

Anggota

1. Dr. Agus Suprihanto (UNDIP)
2. Sri Nugroho S.T, M.T., Ph.D. (UNDIP)
3. Dr. Ir. Aditianto Ramelan (ITB)

Editor Pelaksana

: Untung Ari Wibowo, S.T., M.T. (ITB)

JMMI

Jurnal nasional di bidang rekayasa metalurgi dan material, diterbitkan oleh **Badan Kerja Sama Pendidikan Metalurgi dan Material (BKPMMD)**

ISSN 2654-4962



Platform &
workflow by
OJS / PKP

[HOME](#) / [ARCHIVES](#) / Vol. 2 No. 2 (2019): Agustus

Vol. 2 No. 2 (2019): Agustus



PUBLISHED: 2019-08-31

ARTIKEL ILMIAH

Karakterisasi Bilah Gamelan Berbahan Kuningan Cu22Zn Melalui Proses HPDC dan *Hot Forging*

Sugeng - Slamet, Qomaruddin Qomaruddin

01-07



Pengaruh Penambahan *Hydroxyapatite* Terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Paduan Mg-Al-Zn Melalui Proses *Thixoforming*

Andy Saputro, Intan Khoerunisa, Kusharjanto Suhirman, Supono Adi Dwiwanto

08-15



Repair Welding: Pengaruh Pengelasan Perbaikan Berulang dengan Kombinasi Proses GTAW dan SMAW terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Baja Tahan Karat Dua Fasa Austenitik-Feritik (*Duplex*) UNS S31803

Febi Dwi Antony, Rini Riastuti, Winarto Winarto

16-26



Pengaruh Temperatur dan Rapat Arus Terhadap Kekerasan dan Distorsi Kisi pada *Hard Chromium Plating* pada Baja Karbon Rendah

Riska Rachmantyo, Aditianto Ramelan, Akhmad Zein Eko Mustofa, Asep Ridwan Setiawan

27-31



Pengaruh Variasi Konsentrasi CN- Pada Proses Pelindian Bijih Au Terhadap *Recovery* Au, *Gangue* Ag, Cu dan Fe

Sutarno Sutarno, Andri Kabarubun, Iskandar Muda, R.M Ario Adisaputro

32-37



Observasi *Nanofluid* dengan TiO₂ sebagai Partikel Nano dan *Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate* sebagai Surfaktan untuk Aplikasi Media *Quench*

Andreas Sugiarto, Aldi Alfarizi, Luthfi Dali Ahmad, Setyoaji Fajar Negara, Ghiska Ramahdita, Sri Harjanto, Wahyuaji Narottama putra 38-42

**ULASAN / REVIEW****Perkembangan Simulasi Korosi – Sebuah Ulasan Ringkas**

Syarizal Fonna, Gunawarman Gunawarman, Syifaul Huzni, Ahmad Kamal Ariffin 43-49

**JMMI**

Jurnal nasional di bidang rekayasa metalurgi dan material, diterbitkan oleh **Badan Kerja Sama Pendidikan Metalurgi dan Material (BKPM)**

ISSN 2654-4962



Platform &
workflow by
OJS / PKP

Perkembangan Simulasi Korosi – Sebuah Ulasan Ringkas

Syarizal Fonna^{1,a)}, Gunawarman^{2,b)}, Syifaul Huzni^{1,c)}, Ahmad Kamal Ariffin^{3,d)}

¹Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh

²Jurusan Teknik Mesin, Universitas Andalas, Padang, Sumatera Barat

³Department of Mechanical and Materials Engineering, Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi, Malaysia

a) syarizal.fonna@unsyiah.ac.id

b) gunawarman@ft.unand.ac.id

c) syifaul@unsyiah.ac.id

d) kamal@eng.ukm.my

Abstract.

Corrosion is metal loss due to interaction with the surrounding environment. The consequences of corrosion are so damaging that they can have an impact on human casualties. A report from NACE in 2002 has shown that corrosion losses in the United States was about 3.1% of Gross Domestic Product (GDP). This figure was expected to increase in 2016 to over 6.2% of GDP. Overall, the losses caused by corrosion have reached 3-4% of the GDP of the industrialized countries. The numbers are very large and therefore, corrosion control is very important to be implemented. In efforts to control corrosion, research in the area has been widely conducted. Experimental research has played a very important role. However, the development of simulations in the world of corrosion is also very promising. Corrosion simulations are developed based on numerical methods. The commonly used numerical method is the boundary element method (BEM). In subsequent developments, the optimization method has also been used in the case of inverse analysis such as corrosion detection. This paper presents briefly the development of corrosion simulation which has been performed by many researchers in efforts to solve various corrosion cases.

Keywords: BEM; corrosion; inverse analysis; numerical; simulation

1 PENDAHULUAN

Korosi adalah proses degradasi logam yang berlaku secara alami yang tidak bisa dihentikan, tetapi bisa diperlambat. Korosi terjadi akibat interaksi antara logam dengan lingkungannya [1]. Dampak yang ditimbulkan oleh peristiwa korosi sangat merugikan. Laporan dari NACE telah menunjukkan bahwa kerugian akibat korosi di Amerika Serikat pada tahun 2002 telah mencapai \$276 miliar atau 3,1% dari *Gross Domestic Product* (GDP) [2]. Angka tersebut terus meningkat dan diprediksi menjadi \$1,1 triliun pada tahun 2016 atau lebih dari 6,2% GDP [3].

Laporan lain juga menunjukkan kerugian yang besar akibat peristiwa korosi. Kajian pada tahun 1997 di Jepang telah memperlihatkan bahwa kerugian akibat korosi mencapai 5.258 miliar Yen [4]. Sementara hasil kajian di UK menunjukkan bahwa kerugian akibat korosi telah mencapai 4-5% *Gross National Product* (GNP) [5]. Untuk Indonesia belum ada data pasti mengenai kerugian korosi ini [6], namun diperkirakan kerugian ini telah mencapai Rp. 5 triliun pada sekitar tahun 1988 [7]. Secara keseluruhan, kerugian akibat korosi telah mencapai 3-4% GDP setiap negara-negara industri [8]. Oleh karena itu, pengendalian korosi sangat penting untuk dilaksanakan oleh semua pihak.

Dalam usaha pengendalian korosi, berbagai penelitian dan pengembangan telah dilakukan oleh peneliti, akademisi dan juga praktisi. Penelitian secara eksperimental telah memegang peran yang sangat vital dalam kemajuan pengendalian korosi. Namun demikian, penelitian secara komputasi/simulasi juga telah berkembang pesat dan sangat menjanjikan. Perkembangan ini didukung dengan semakin majunya perkembangan *personal computer* (PC).

Simulasi korosi berbasis pada metode numerik. Perkembangannya pun sejalan dengan perkembangan metode numerik. Makalah ini membahas perkembangan simulasi korosi yang berbasis metode numerik dalam

menyelesaikan berbagai kasus korosi. Perkembangan simulasi korosi ini dibagi menjadi dua bagian yaitu perkembangan *direct analysis* dan perkembangan *inverse analysis*.

2 DIRECT ANALYSIS

Direct analysis adalah terminologi yang digunakan untuk simulasi pada kasus dengan seluruh kondisi batas yang diperlukan sudah diketahui. Perkembangan simulasi korosi telah dimulai secara *direct analysis* sejak tahun 1980-an. Metode elemen batas atau *boundary element method* (BEM) merupakan metode numerik yang digunakan pada simulasi korosi tersebut [9], [10]. Pemodelan korosi dilakukan dengan berasas pada Persamaan Laplace yang menunjukkan potensial listrik (ϕ) yang berlaku pada seluruh domain (Ω) seperti yang diberikan dalam Persamaan (1) [9], [10].

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

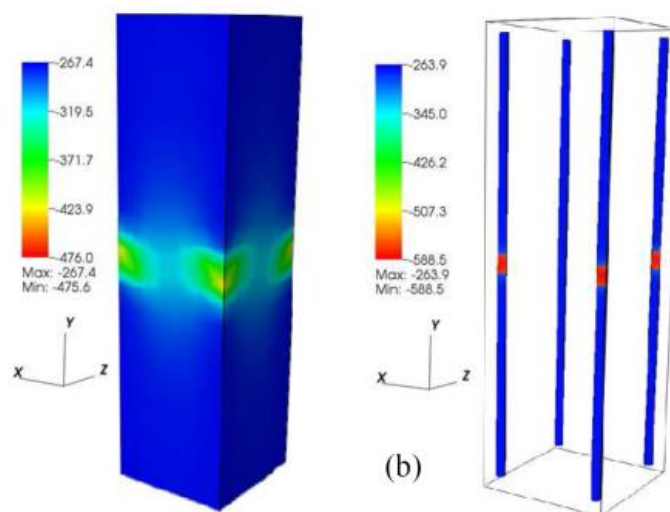
Hubungan antara potensial listrik (ϕ) dan densitas arus (i) yang berlaku bagi domain tersebut mengikuti Persamaan (2) [9], [10]. Yang mana κ adalah konduktivitas domain, dan \mathbf{n} adalah unit vector normal.

$$i = -\kappa \frac{\partial \phi}{\partial n} \quad (\text{A/m}^2) \quad (2)$$

Dengan menggunakan BEM, Aoki dkk telah melaksanakan simulasi korosi galvanik antara *stainless steel* dan *gray cast iron* dalam lingkungan larutan NaCl. Salah satu hasil simulasinya memperlihatkan bahwa hasil simulasi dengan menggunakan BEM telah menunjukkan kesesuaian dengan hasil eksperimen [9]. Namun, penelitian yang dilakukan tersebut masih terbatas pada kasus korosi galvanik saja. Walaupun demikian, penelitian tersebut telah meletakkan dasar dan pemahaman yang kuat bagi perkembangan simulasi korosi.

BEM juga telah dijalankan pada simulasi perlindungan katodik untuk jaringan pipa dan struktur lepas pantai yang dilaksanakan oleh Telles dkk. Simulasi dijalankan dengan terbatas pada kasus 2D. Hasil simulasi juga telah menunjukkan bahwa hasil simulasi dengan BEM telah sesuai dengan hasil eksperimen [10]. Penelitian ini juga telah memberikan pondasi yang kuat bagi perkembangan simulasi korosi selanjutnya.

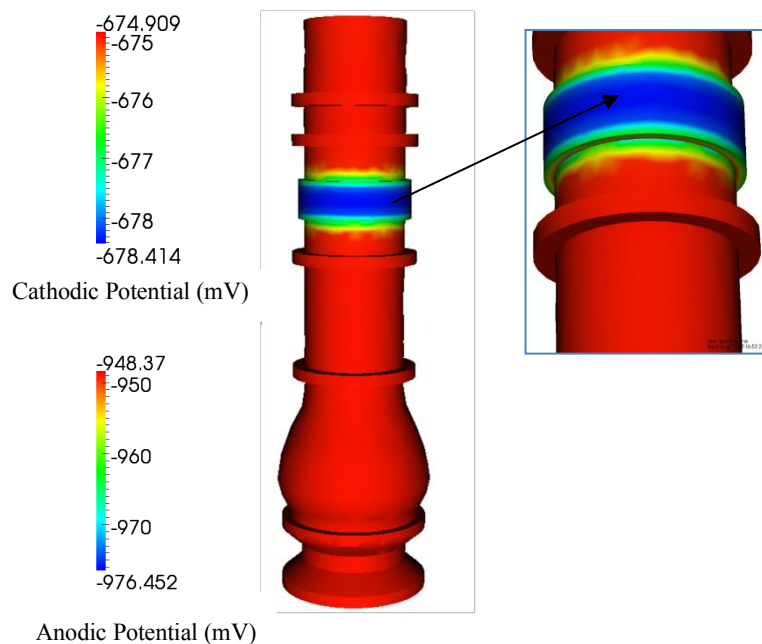
Perkembangan selanjutnya adalah pengembangan BEM untuk simulasi kasus korosi dengan domain tak-terhingga seperti lingkungan air laut dan tanah. Pengembangan BEM ini dijalankan oleh Aoki & Kishimoto pada tahun 1990 [11]. Selain itu, Aoki & Kishimoto juga telah berhasil menjalankan simulasi pada sistem proteksi katodik anoda korban bagi tanki *stainless steel* yang berisi larutan NaCl [11]. Anoda yang digunakan adalah *cast iron* dan aluminium. Hasil-hasil simulasi tersebut juga telah memperlihatkan pola yang sesuai dengan hasil eksperimen sehingga semakin memperkuat landasan bagi aplikasi BEM dalam penyelesaian kasus-kasus korosi.



Gambar 1 Distribusi potensial listrik pada permukaan beton dan baja tulangan yang merupakan hasil simulasi BEM 3D [12].

Korosi yang terjadi pada baja tulangan di dalam beton telah disimulasikan oleh Jäggi, dkk. pada tahun 2001 [13] dan Fonna, dkk. pada tahun 2011 [12] dengan menggunakan BEM. Jäggi, dkk. menggunakan *software* BEASY CP yang berbasis pada BEM. Distribusi densitas arus pada permukaan baja bertulang telah disimulasikan secara 3D. Hasil simulasi ini juga dinyatakan telah mendekati hasil eksperimen. Sedangkan Fonna dkk telah memperkenalkan penggunaan perangkat lunak *open source* yaitu VisIt untuk visualisasi hasil simulasi korosi pada beton bertulang seperti ditunjukkan dalam Gambar 1 [12]. Di samping itu, pada tahun 2011 Ridha dkk juga telah memanfaatkan BEM untuk mempelajari pengaruh beberapa parameter beton bertulang terhadap distribusi potensial listrik pada permukaan beton akibat adanya korosi pada baja tulangan [14]. Parameter yang dipelajari melalui simulasi tersebut adalah ukuran korosi, konduktivitas beton dan tebal selimut beton. Hasil simulasi telah menunjukkan bahwa parameter-parameter tersebut memberi pengaruh terhadap distribusi potensial listrik pada permukaan beton [14].

Kemudian, pada tahun 2012 Lan dkk juga telah menjalankan simulasi secara 3D pada kasus perlindungan katodik anoda korban bagi *platform* baja yang berada dalam lingkungan *marine* [15]. Hasil simulasi ini juga menunjukkan kesesuaian dengan hasil eksperimen. Sementara itu, Ihsan, dkk. telah berhasil melakukan simulasi pengaruh profil anoda terhadap distribusi potensial listrik pada beton bertulang secara 3D pada tahun 2013 [16]. Hasil simulasi ini menggambarkan bahwa pengukuran potensial secara eksperimental seperti menggunakan *half-cell potential technique* memerlukan data pengukuran yang banyak dan menyeluruh untuk menjamin hasil yang akurat. Melalui simulasi yang dijalankan tersebut telah membawa perkembangan simulasi korosi ke ranah baru yaitu simulasi 3D.



Gambar 2 Distribusi potensial listrik pada permukaan *submersible pump* dengan menggunakan formulasi infinite domain [17].

Seterusnya, penelitian-penelitian yang lain juga telah melaporkan penggunaan BEM untuk simulasi korosi pada sistem proteksi katodik dari *submersible pump* dan beton bertulang. Pada tahun 2014, Safuadi, dkk. telah melakukan perbandingan antara hasil simulasi menggunakan *finite domain* dengan hasil simulasi menggunakan *infinite domain* pada proteksi katodik *submersible pump* [17]. Distribusi potensial listrik pada permukaan *submersible pump* dapat dilihat pada Gambar 2. Hasilnya menunjukkan bahwa formulasi *infinite domain* lebih unggul digunakan pada kasus yang memiliki domain yang sangat luas. Perkembangan formulasi *infinite domain* 3D semakin memperkaya aplikasi BEM dalam simulasi korosi. Sementara, pada tahun 2017, Fonna dkk juga telah menggunakan BEM 3D untuk mempelajari pengaruh parameter ukuran anoda dan konduktivitas beton terhadap distribusi potensial listrik pada sistem proteksi katodik baja tulangan dalam beton [18]. Melalui simulasi ini telah memperlihatkan bahwa BEM memiliki potensi untuk dimanfaatkan dalam proses desain sistem proteksi katodik sehingga dapat meningkatkan level keberhasilannya.

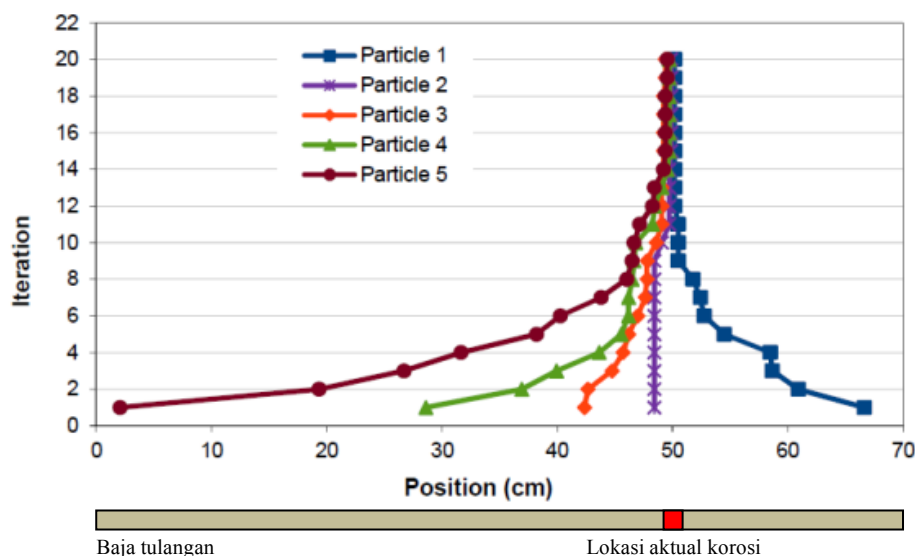
Dengan demikian, perkembangan simulasi korosi secara *direct analysis* menggunakan BEM telah menunjukkan keberhasilan dalam menyelesaikan berbagai kasus korosi baik secara 2D dan 3D. Potensi BEM telah diperlihatkan sebagai teknik penyelesaian persoalan korosi seperti dalam area proteksi katodik dan analisis parameter-parameter dalam sistem. Namun, *direct analysis* memiliki keterbatasan yaitu semua kondisi batas harus diketahui agar simulasi dapat dijalankan. Padahal, dalam kondisi aktual, terkadang kondisi batas tidak diketahui semuanya dan merupakan parameter yang akan dicari. Oleh karena itu, *inverse analysis* berkembang untuk mengisi celah tersebut.

3 INVERSE ANALYSIS

Inverse analysis adalah metode untuk mencari solusi atau parameter yang tidak diketahui dari suatu objek melalui pengamatan terhadap respon yang diberikan objek. Pada kasus korosi, parameter-parameter dari kondisi batas bisa saja tidak diketahui seperti lokasi korosi, ukuran korosi, dan jarak optimum anoda korban terhadap katoda. Pada kondisi seperti ini, *direct analysis* tidak bisa dijalankan. Oleh karena itu, *inverse analysis* perlu dikembangkan.

Aoki & Amaya telah memaparkan optimasi sistem proteksi katodik dengan menggunakan BEM pada tahun 1997 [19]. Optimasi dilakukan untuk mendapatkan lokasi optimum dari elektroda/anoda pada sistem proteksi katodik arus paksa. Oleh karena salah satu kondisi batas (lokasi anoda) tidak diketahui, *direct analysis* menggunakan BEM tidak bisa dijalankan. Untuk mengatasi hal tersebut, BEM disandingkan dengan salah satu metode optimasi yang populer yaitu *genetic algorithm* (GA). Gabungan BEM dan GA ini adalah kesatuan yang menjadi *inverse analysis*. Salah satu kasus yang diselesaikan oleh Aoki & Amaya adalah optimasi lokasi 3 unit anoda pada struktur tanki penyimpanan (*storage tank*) [19]. Kemudian, pada tahun 2011 Safuadi, dkk. juga telah melakukan simulasi untuk mendapatkan jarak optimum antara anoda korban dan pipa [20]. Simulasi ini juga menggunakan gabungan BEM dan GA.

Sementara itu, Ridha dkk (2001), Amaya, dkk. (2007) dan Minagawa, dkk. (2008) juga telah menggunakan gabungan BEM dan GA untuk menyelesaikan kasus deteksi korosi pada beton bertulang [21], [22], [23]. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa *inverse analysis* yang dijalankan berhasil mendeteksi korosi yang ada pada baja tulangan di dalam beton. Namun, GA memiliki keterbatasan seperti struktur algoritma yang relatif lebih kompleks [24] yang dapat menyebabkan waktu simulasi yang lebih lama. Oleh karena itu diperlukan adanya pengembangan lebih lanjut dengan mengimplementasikan metode optimasi lainnya.

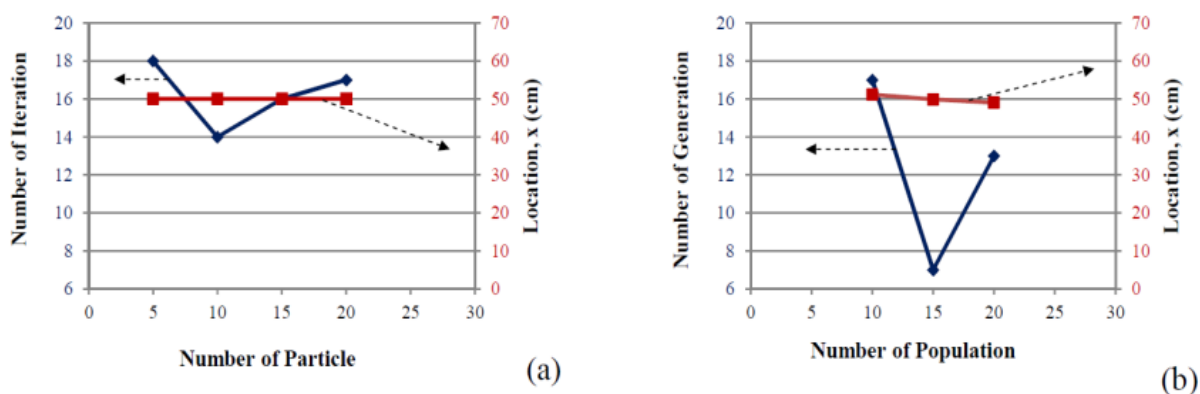


Gambar 3 Pergerakan lima partikel dalam menemukan lokasi korosi seiring pertambahan iterasi dengan menggunakan $W=0,1$ [25].

Salah satu metode optimasi yang sangat menjanjikan adalah *particle swarm optimization* (PSO) yang terinspirasi dari pergerakan kawanan burung atau ikan dalam mencari makan. PSO diperkenalkan pertama sekali oleh Kennedy dan Eberhart pada tahun 1995 [26]. Penggunaan PSO dan BEM dalam *inverse analysis* untuk

menyelesaikan kasus korosi diperkenalkan oleh Fonna dkk pada tahun 2013 [25], [27]. Studi yang dilakukan masih terbatas pada pengaruh parameter PSO yaitu *inertia weight* (W) pada kemampuan *inverse analysis* dalam mendeteksi korosi baja tulangan dalam beton dengan model sederhana [25]. Gambar 3 memperlihatkan pergerakan kandidat lokasi korosi atau disebut juga partikel dalam mendeteksi korosi seiring pertambahan iterasi untuk $W=0,1$. Kemudian, *inverse analysis* menggunakan BEM dan PSO juga diaplikasikan dalam mendeteksi lokasi dan ukuran korosi pada struktur yang lebih kompleks [27]. Hasil simulasi menunjukkan bahwa korosi dapat dideteksi dengan tingkat akurasi yang baik dengan error $<5\%$.

Dalam perkembangan selanjutnya, pada tahun 2014 Fonna dkk menunjukkan *inverse analysis* dengan menggunakan PSO memperlihatkan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan menggunakan GA dalam deteksi korosi baja bertulang dalam beton [28]. Perbandingan tersebut seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 4. Hasil simulasi yang telah diperoleh pada penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa aplikasi *inverse analysis* dengan menggunakan BEM dan PSO sangat menjanjikan untuk terus dikembangkan.



Gambar 4 Jumlah iterasi/generasi sehingga lokasi korosi dideteksi: (a) PSO; (b) GA [28].

Pada tahun 2018, *inverse analysis* dengan menggunakan BEM dan PSO telah diaplikasikan pada satu kasus studi lapangan pada kolom bangunan beton bertulang dalam kawasan landaan tsunami 2004, Banda Aceh [29]. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *inverse analysis* mampu mendeteksi lokasi dan ukuran korosi pada kolom beton bertulang dengan error $< 5\%$ dari korosi aktual yang ada. Korosi aktual diperoleh setelah dilakukan perusakan pada kolom tersebut. Hasil ini memperlihatkan bahwa *inverse analysis* tersebut memiliki potensi yang sangat besar untuk dikembangkan lebih lanjut sehingga akhirnya dapat menjadi peralatan baru dalam deteksi korosi beton bertulang.

4 KESIMPULAN

Makalah ini memaparkan perkembangan simulasi korosi dengan menggunakan metode numerik khususnya BEM. Perkembangan tersebut dibagi menjadi dua bagian yaitu *direct analysis* dan *inverse analysis*. Perkembangan simulasi korosi ini telah dimulai sejak tahun 1980-an dan telah menunjukkan potensi yang sangat menjanjikan dalam penyelesaian kasus-kasus dalam dunia korosi seperti proteksi katodik, korosi beton bertulang, dan deteksi korosi. Pengembangan lebih lanjut sangat diperlukan untuk mendapatkan produk akhir berupa peralatan yang dapat diaplikasi dalam dunia korosi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. W. Revie and H. H. Uhlig, Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering, New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.
- [2] NACE, "Cost of Corrosion Study Unveiled," 2002. [Online]. Available: <https://www.nace.org/uploadedFiles/Publications/ccsupp.pdf>. [Accessed 27 July 2018].
- [3] 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 July 2018].



- [4] 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 July 2018].
- [5] Z. Ahmad, *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*, London: Elsevier Ltd., 2006.
- [6] "Korosi Tingkatkan Biaya Perawatan," 21 June 2007. [Online]. Available: <https://www.its.ac.id/news/2007/06/21/korosi-tingkatkan-biaya-perawatan>. [Accessed 28 July 2018].
- [7] "Korosi: Perusak yang Terabaikan," 4 March 2008. [Online]. Available: <https://bunghatta.ac.id/artikel-235-korosi-perusak-yang-terabaikan.html>. [Accessed 28 July 2018].
- [8] 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. [Accessed 28 July 2018].
- [9] S. Aoki, K. Kishimoto and M. Sakata, "Boundary Element Analysis of Galvanic Corrosion," in *Boundary Elements VII Vol. 1*, Springer-Verlag, 1984, pp. 63-71.
- [10] J. F. Telles, L. C. Wrobel, W. J. Mansur and J. S. Azevedo, "Boundary Elements for Cathodic Protection Problems," in *Boundary Elements VII Vol. 1*, Springer-Verlag, 1984, pp. 73-83.
- [11] S. Aoki and K. Kishimoto, "Application of BEM to Galvanic Corrosion and Cathodic Protection," in *Topics in Boundary Element Research*, Springer-Verlag, 1990, pp. 65-85.
- [12] S. Fonna, M. Ridha, S. Huzni, Israr and A. K. Ariffin, "Pre and Post Processing for Boundary Element Method (BEM) 3D Reinforced Concrete Corrosion Simulation," *Key Engineering Materials*, Vols. 462-463, pp. 230-235, 2011.
- [13] S. Jäggi, H. Böhni and B. Elsener, "Macrocell Corrosion of Steel in Concrete - Experiments and Numerical Modelling," 2001. [Online]. Available: <https://www.beasy.com/images/dmc/galvanic-corrosion/publications/macrocell-corrosion-of-steel.pdf>. [Accessed 28 July 2018].
- [14] M. Ridha, S. Fonna, S. Huzni, Fachrizal and A. K. Ariffin, "Application of BEM for Improving Corrosion Assessment of Public Building Stricken by Tsunami Aceh 2004," *Key Engineering Materials*, Vols. 462-463, pp. 413-418, 2011.
- [15] Z. Lan, X. Wang, B. Hou, Z. Wang, J. Song and S. Chen, "Simulation of Sacrificial Anode Protection for Steel Platform Using Boundary Element Method," *Engineering Analysis with Boundary Elements*, vol. 36, p. 903-906, 2012.
- [16] M. Ihsan, S. Fonna, M. Ridha, S. Huzni and A. K. Ariffin, "The Influence of Anode Profiles for Three Dimensions Numerical Simulation of Reinforced Concrete Corrosion Using Boundary Element Method," *Advanced Materials Research*, vol. 686, pp. 261-265, 2013.
- [17] Safuadi, S. Fonna, M. Ridha, Zebua, A. K. Ariffin and A. R. Daud, "Infinite Boundary Element Formulation for the Analysis of CP System for Submersible Pump," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 471, pp. 313-318, 2014.
- [18] S. Fonna, S. Huzni, A. Zaim and A. K. Ariffin, "Simulation of Cathodic Protection on Reinforced Concrete Using BEM," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. SI 4, no. 2, pp. 111-122, 2017.
- [19] S. Aoki and K. Amaya, "Optimization of cathodic protection system by BEM," *Engineering Analysis with Boundary Elements*, vol. 19, pp. 147-156, 1997.
- [20] Safuadi, M. Ridha, S. Huzni, S. Fonna, A. K. Ariffin and A. R. Daud, "Optimization of Cathodic Protection System Design for Pipe-Lines Structure with Ribbon Sacrificial Anode Using BEM and GA," *Key Engineering Materials*, Vols. 462-463, pp. 1267-1272, 2011.
- [21] M. Ridha, K. Amaya and S. Aoki, "A Multistep Genetic Algorithm for Detecting Corrosion of Reinforcing Steels in Concrete," *Corrosion*, vol. 57, no. 9, pp. 794-801, 2001.
- [22] K. Amaya, M. Ridha and S. Aoki, "Corrosion Detection by Multi-Step Genetic Algorithm," *WIT Transactions on Engineering Sciences*, vol. 54, pp. 299-308, 2007.
- [23] K. Minagawa, K. Hayabusa, M. Ridha, K. Amaya and S. Aoki, "Non-Destructive Inspection of Rebar Corrosion in Concrete Structures by Using BEM and GA," *Advanced Materials Research*, Vols. 33-37 PART 2, pp. 1289-1292, 2008.
- [24] 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*, vol. 51, pp. 2772-2783, 2008.
- [25] S. Fonna, M. Ridha, S. Huzni and A. K. Ariffin, "The Influence of Inertia Weight on Particle Swarm Optimization in Boundary Element Inverse Analysis for Rebar Corrosion Detection," *Advanced Materials Research*, vol. 686, pp. 266-272, 2013.
- [26] K. E. Parsopoulos and M. N. Vrahatis, *Particle Swarm Optimization and Intelligence: Advances and Applications*, New York: Information Science Reference, 2010.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.