

## Analisa Masalah Korosi Menggunakan Metode Elemen Batas 2 Dimensi

N.Islami<sup>1</sup>, Safuadi<sup>2</sup>, M.Ridha<sup>1</sup>.

<sup>(1)</sup>Laboratorium Material, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Syiah Kuala

<sup>(2)</sup>Departemen Mekanika dan Bahan, Universiti Kebangsaan Malaysia.  
ridha.mh@gmail.com

### ABSTRAK

*Korosi telah menjadi masalah serius dalam dunia industri dan telah menelan biaya yang sangat besar, baik kerugian akibat korosi maupun biaya perawatan struktur terhadap serangan korosi. Para peneliti dan praktisi telah memberikan perhatian yang sangat serius agar proses korosi dapat dicegah dan dikendalikan. Metode elemen batas (boundary element method-BEM) merupakan suatu metode numerik yang telah digunakan secara luas dalam bidang rekayasa. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisa beberapa kasus korosi dengan menggunakan metode elemen batas 2 dimensi. Dalam hal ini, potensial pada domain direpresentasikan dengan persamaan Laplace dengan asumsi tidak adanya akumulasi ion di dalam domain dan nilai konduktifitas homogen di seluruh domain. Dengan mengetahui kondisi batas di permukaan domain, BEM-2D dapat digunakan untuk memecahkan persamaan Laplace, sehingga potensial dan densitas arus diseluruh permukaan dan bagian dalam domain dapat ditentukan. Dalam penelitian ini, beberapa studi kasus telah dianalisa, (1) Sebaran Potensial dan densitas arus yang terjadi akibat korosi galvanis; (2) Sebaran Potensial dan densitas arus dipermukaan beton akibat korosi pada baja tulangan; (3) Proteksi katodik anoda korban pada tangki bagian dalam.*

**Kata kunci:** korosi, metode elemen batas, persamaan Laplace, potensial, densitas arus.

### PENDAHULUAN

Korosi adalah proses alami yang terjadi pada logam untuk kembali ke alam dengan bentuk sulfida dan oksida. Dalam reaksi elektrokimia, korosi dapat terjadi antara logam dengan logam seperti baja dengan seng, atau dapat juga terjadi antara butir dengan butir logam lainnya selama masih terjadi perpindahan elektron, reaksi ini mengakibatkan turunnya mutu logam.

Secara elektrokimia proses korosi terjadi akibat adanya perbedaan potensial antara daerah anoda dan daerah katoda, berada pada lingkungan elektrolit serta adanya konduktor antara anoda dan katoda. Perbedaan potensial antara anoda dan katoda diakibatkan faktor di dalam logam antara lain berupa ukuran butir logam yang berbeda-beda, batas butir, cacat struktur butir dan lain-lain, sementara faktor-faktor lingkungan antara lain perbedaan konsentrasi, beda temperatur dan lain-lain. Lingkungan yang korosif seperti pada daerah pasang surut air laut dapat mempengaruhi tingkat korosifitas struktur-struktur pada daerah tersebut, seperti dermaga, jembatan, dan sebagainya.

Proses korosi merupakan salah satu penyebab besarnya kerugian dalam dunia industri. Di Amerika Serikat, kerugian akibat korosi dan biaya yang harus dikeluarkan untuk perawatan terhadap korosi mencapai 8 Miliar Dolar (Fontana, 1984). Sedangkan di Indonesia pada tahun 1992 diperkirakan kerugian akibat korosi mencapai 1 Miliar Dolar (Supardi, 1997), dan meningkat pada tahun 2005 menjadi 20 Triliun Rupiah atau sekitar 2,2 Miliar Dolar Amerika (Bambang Widyanto, 2005).

Mengingat besarnya biaya akibat korosi, dan proses korosi ini tidak dapat di cegah, maka penting untuk memberikan perhatian khusus agar korosi dapat dipantau dan dikendalikan. Tidak terpantaunya proses korosi dapat disebabkan oleh sulitnya pemantauan pada daerah-daerah terkorosi seperti rangka baja di dalam beton, struktur yang tertanam dibawah tanah, atau berada di dalam laut.

Para peneliti telah menaruh perhatian besar pada masalah ini, salah satunya dengan cara melakukan penelitian-penelitian berbasis komputasi dan simulasi. Didukung oleh pesatnya

perkembangan ilmu komputer, baik berupa program ataupun perangkat keras, menjadikan simulasi sebagai salah satu masukan yang dapat dipercaya dalam berbagai penelitian. Dalam permasalahan korosi, analisa menggunakan metode numerik telah dimulai sekitar 20 tahun yang lalu.

Metode elemen batas adalah metode numerik yang digunakan dalam menyelesaikan persamaan-persamaan integral batas, efisiensi penggunaan metode elemen batas dalam menganalisa korosi sangat baik, disebabkan karena kasus-kasus korosi hanya berkaitan dengan kondisi di permukaan logam saja. Data masukan yang diperlukan dalam penghitungan metode elemen batas dalam menganalisa masalah korosi adalah potensial, geometri, dan konduktifitas elektrolit. Konduktifitas pada setiap penghitungan dalam metode elemen batas merupakan parameter bahan. Data potensial diperoleh dari beberapa titik pengukuran.

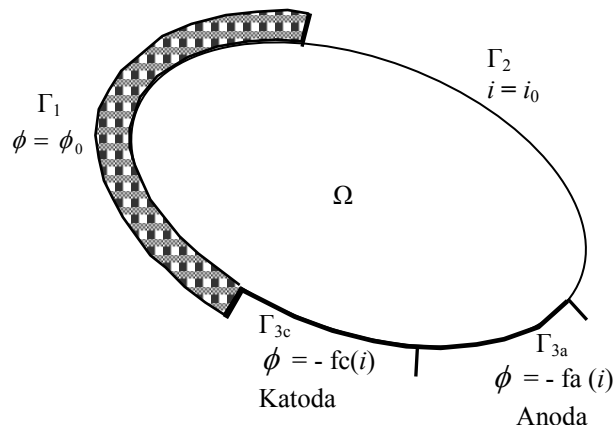
Penerapan metode elemen batas akan menghasilkan keluaran berupa distribusi potensial pada seluruh permukaan domain yang dihitung, dari sebelumnya hanya beberapa nilai hasil pengukuran yang merupakan data masukan. Jumlah nilai potensial hasil keluaran tergantung pada besaran jumlah elemen yang diterapkan dalam geometri model yang dibangun.

Disamping nilai potensial masukan yang diperoleh dari pelaksanaan kegiatan pemetaan data pengukuran lain yang diperlukan adalah data pengukuran konduktifitas. Nilai konduktifitas yang diperoleh dari pengukuran juga merupakan variabel utama dalam analisa menggunakan metode elemen batas. Jika salah satu variabel tidak lengkap, maka penghitungan menggunakan metode elemen batas tidak dapat dilaksanakan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa beberapa kasus korosi dengan menggunakan metode elemen batas 2 dimensi. Dengan kajian menggunakan program metode elemen batas 2 dimensi yang dibangun untuk memperoleh nilai potensial elektrolit. Dalam kasus ini data yang dimasukkan berupa data potensial pada posisi tertentu, geometri, dan konduktifitas elektrolit yang diasumsikan homogen diseluruh elektrolit. Kasus korosi yang dianalisa adalah korosi galvanis, korosi yang terjadi pada logam di dalam domain dan analisa efektifitas proteksi katodik metode anoda korban pada tangki.

## PERSAMAAN MATEMATIKA DAN KONDISI BATAS UNTUK PEMODELAN KOROSI

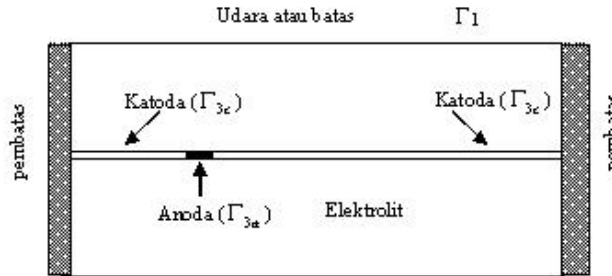
Model 2 dimensi untuk penyelesaian permasalahan korosi menggunakan metode elemen batas seperti ditunjukkan gambar 1 dan 2. Diasumsikan bahwa bahan yang akan dianalisa berada dalam lingkungan elektrolit yang homogen dan seluruh lingkungan elektrolit adalah domain ( $\Omega$ ) yang dikelilingi oleh batas  $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_{3a} + \Gamma_{3c}$ .



**Gambar 1.** Kondisi batas untuk memodelkan korosi dalam lingkungan elektrolit.

Pada bagian permukaan, lingkungan elektrolit berhubungan dengan udara, jadi arus yang mengalir hanya mencapai pada batas permukaan elektrolit. Selanjutnya, diasumsikan bahwa di dalam lingkungan elektrolit tidak terjadi penambahan ataupun kehilangan ion listrik

(penimbunan ion). Bagian tersebut seperti ditunjukkan dalam gambar 2 sebagai  $\Gamma_2$ , selanjutnya  $\Gamma_{3a}$  dan  $\Gamma_{3c}$  adalah daerah pada permukaan anoda dan katoda (Aoki & Kishimoto. 1990; Aoki & Amaya. 1997).



**Gambar 2.** Model dua dimensi untuk korosi di dalam beton.

Penggunaan metode elemen batas dalam masalah korosi bertujuan untuk menghitung distribusi potensial dan kerapatan arus yang dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan Laplace dan hukum Ohm seperti ditunjukkan dalam persamaan 1 dan 2 (Issacs & Vyas. 1981)

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

$$i = -\kappa \nabla \phi \quad (2)$$

Kerapatan arus dalam domain elektrolit untuk bentuk dua dimensi dapat mengikuti persamaan 3 seperti;

$$\frac{\partial i}{\partial x} + \frac{\partial i}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

bila  $\nabla$  ditulis dengan menggunakan koordinat segi empat ( $x, y$ );

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \quad (4)$$

Selanjutnya kerapatan arus dalam domain elektrolit pada persamaan 4 dapat ditulis dengan persamaan berikut :

$$-\kappa \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = 0 \quad \Rightarrow \quad -\kappa \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \phi = 0 \quad (5)$$

Seterusnya persamaan 5 dapat disederhanakan menjadi;

$$-\kappa \nabla^2 \phi = 0 \quad (6)$$

Hubungan antara kerapatan arus dan potensial listrik dalam lingkungan elektrolit seperti ditunjukkan pada persamaan 6 dikenal juga dengan persamaan Laplace untuk permasalahan korosi, yang mana  $-\kappa$  dianggap sebagai parameter bahan.

Keadaan batas berkaitan dengan persamaan 6 adalah :

$$\phi = \phi_0 \quad \text{pada } \Gamma_1 \quad (7)$$

$$i = i_o \quad \text{pada } \Gamma_2 \quad (8)$$

$$\phi = -f_a(i) \quad \text{pada } \Gamma_{3a} \quad (9)$$

$$\phi = -f_c(i) \quad \text{pada } \Gamma_{3c} \quad (10)$$

Dalam kajian ini, beberapa studi kasus dalam permasalahan korosi disimulasikan dengan menggunakan paket program metode elemen batas 2 dimensi. Paket Program BEM 2D ini ditulis dengan bahasa fortran, dijalankan pada komputer dengan spesifikasi sebagai berikut :

*Software :*

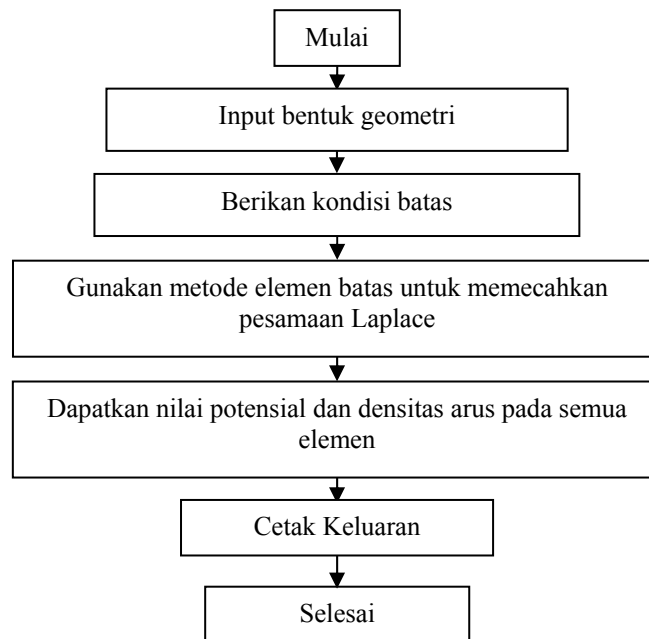
Compiler : Gfortran, G77  
Operating System : Linux, Fedora Core 5

*Hardware :*

Processor : Intel Pentium 4, LGA  
Speed : 2,66 GHz  
MainBoard : Intel 915 GAV, Intel Chipset  
Memory : DDR 1 GB

Data masukan pada program metode elemen batas untuk kasus ini adalah berupa data potensial yang diketahui di beberapa titik media elektrolit, geometri, posisi setiap elemen pada elektrolit dan nilai konduktifitas elektrolit tersebut. Bentuk elemen berupa konstan elemen, dimana nodal elemen tersebut berada di tengah elemen yang merupakan asumsi dari titik pengukuran dan hasil perhitungan metode elemen batas. Jumlah elemen untuk setiap analisa adalah 34 elemen.

Studi kasus yang dianalisa adalah : korosi galvanik, korosi lokal pada baja di dalam beton dan proteksi katodik anoda korban pada tangki.



**Gambar 3.** Diagram alir analisa permasalahan korosi dengan metode elemen batas

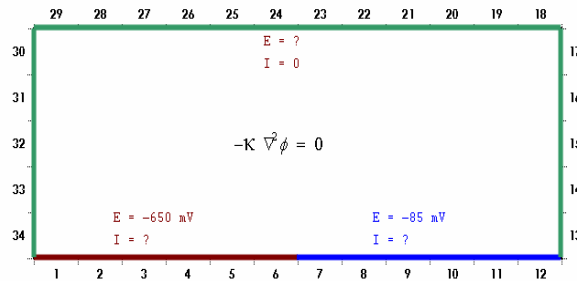
## **ANALISA NUMERIK DAN PEMBAHASAN**

### **Simulasi Korosi Galvanik**

Korosi galvanik terjadi akibat adanya perbedaan potensial antara dua logam yang saling berhubungan berada dalam media korosif. Dua logam yang berlainan jenis memiliki nilai potensial yang berbeda yang mengakibatkan timbulnya reaksi galvanis, dimana arus akan mengalir dari potensial tinggi, menuju potensial yang rendah. Pada kondisi seperti ini, tingkat korosifitas logam yang terkorosi semakin meningkat. Besarnya perbedaan potensial juga mempengaruhi arus yang mengalir pada kedua logam tersebut.

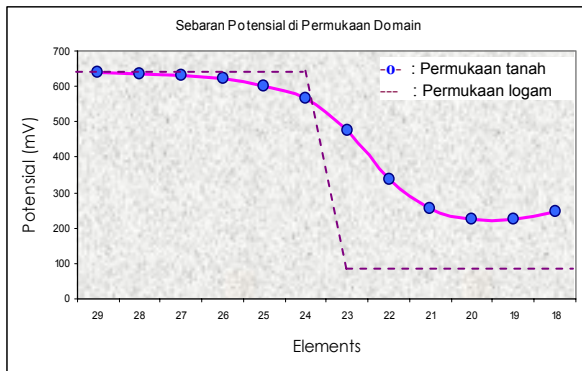
Dalam simulasi ini, dua logam yang berlainan jenis saling berhubungan berada didalam tanah dengan nilai konduktifitas sebesar  $0,002 \text{ ohm m}^{-1}$ . Kondisi ini dapat dimodelkan seperti

pada gambar 4, dimana logam pertama dengan panjang 24 cm memiliki nilai potensial sebesar -650 mV (elemen 1-6) berhubungan dengan logam kedua dengan panjang 12 cm memiliki nilai potensial sebesar -85 mV (elemen 7-12). Dibagian kiri dan kanan dari model 2 dimensi adalah batas yang diberikan agar tidak terdapat arus masuk dan arus keluar pada domain tersebut (tanah) yang kita lambangkan dengan  $I = 0$ , dan bagian atas adalah permukaan tanah ( $I = 0$ ).

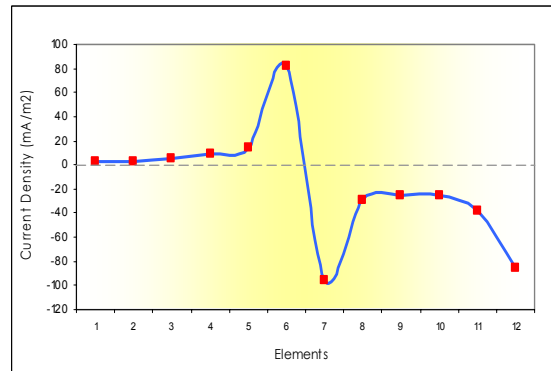


**Gambar 4.** Pemodelan 2 dimensi untuk korosi galvanik pada pipa didalam tanah.

Dengan menggunakan persamaan Laplace, yang diselesaikan dengan metode elemen batas 2 dimensi, maka didapat distribusi potensial di permukaan tanah. Hasil simulasi menunjukkan adanya perbedaan potensial antara daerah anoda dan daerah katoda seperti pada gambar 5. Perbedaan distribusi potensial pada permukaan tanah diantara dua area ini menunjukkan adanya reaksi galvanis antara daerah katoda dan daerah anoda.



**Gambar 5.** Distribusi potensial dipermukaan logam dan permukaan tanah



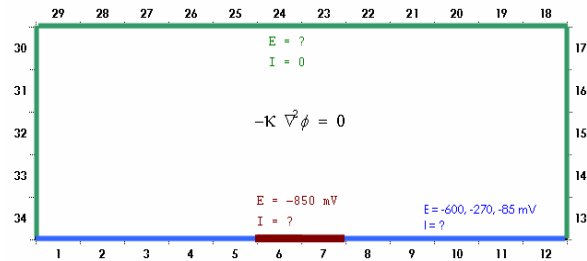
**Gambar 6.** Distribusi densitas arus pada kedua logam yang berbeda

### Simulasi Korosi Baja Tulangan Dalam Beton

Baja tulangan dalam beton dapat mengalami proses korosi, ini diakibatkan oleh proses karbonasi dan interusi ion-ion klorida kedalam beton. Mendeteksi korosi secara dini baja tulangan pada beton tidaklah mudah, beberapa kendala antara lain : Baja tidak dapat diamati secara langsung (karena berada didalam beton), sifat penghantar listrik dari beton yang jelek dan kondisi beton yang mudah berubah dipengaruhi lingkungannya. Dewasa ini pendeteksian korosi pada beton bertulang menggunakan pengukuran potensial dipermukaan beton, walaupun potensial dipermukaan beton tidak hanya dipengaruhi oleh proses korosi, namun data potensial ini dianggap cukup untuk memberikan gambaran lokasi korosi pada baja tulangan didalam beton.

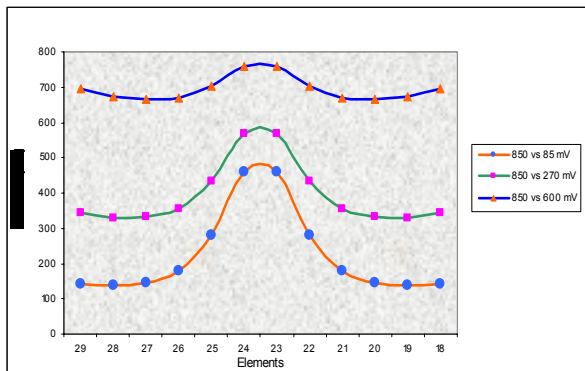
Simulasi ini untuk melihat pengaruh korosi terhadap nilai potensial dipermukaan beton, yang mana akan menentukan lokasi korosi yang terjadi pada baja. Model 2 dimensi untuk kasus ini dapat dilihat pada gambar 7. Bagian samping dari model adalah asumsi beton yang dipotong untuk memberikan batas yang dianalisa, dimana arus tidak mengalir masuk maupun keluar melalui beton tersebut ( $I = 0$ ), sedangkan bagian atas merupakan permukaan beton ( $I = 0$ ). Baja yang dianalisa sepanjang 48 cm yang dimodelkan dengan elemen 1 – 12. Pada daerah yang

diasumsikan terkorosi (elemen 6 dan 7) nilai potensial diberikan sebesar -850 mV. Untuk memberikan intensitas korosi yang berbeda-beda, maka pada daerah yang tidak terkorosi diberikan potensial dengan variasi : -85 mV, -270 mV dan -600 mV.

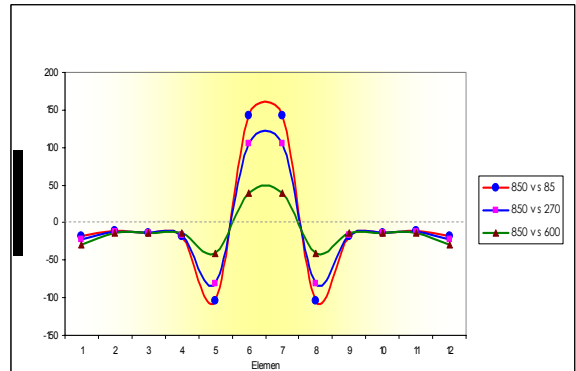


**Gambar 7.** Pemodelan dua dimensi untuk korosi pada baja tulangan dalam beton

Hasil analisa menggunakan paket program BEM 2D, menunjukkan distribusi potensial disepanjang permukaan beton dan densitas arus baja tulangan. walaupun pada intensitas korosi yang berbeda, lokasi terjadinya korosi tetap dapat ditunjukkan pada nilai potensial yang paling tinggi (gambar 8). Gambar 9 menunjukkan densitas arus pada tulangan baja dimana arus positif merupakan daerah yang mengeluarkan arus, grafik ini menunjukkan aliran arus dari daerah anoda menuju daerah katoda.



**Gambar 8.** Distribusi potensial di permukaan beton.

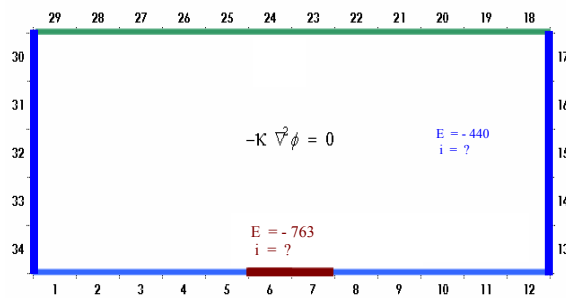


**Gambar 9.** Densitas arus pada batang baja dengan intensitas korosi yang berbeda.

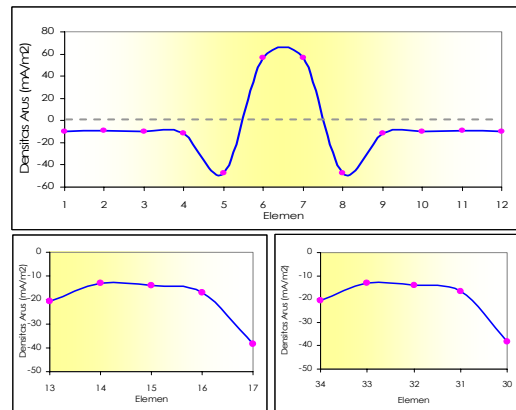
### Simulasi Proteksi Katodik Anoda Korban Pada Tangki.

Salah satu cara yang telah dikembangkan untuk melindungi struktur dari serangan korosi adalah dengan sistem proteksi katodik anoda korban. prinsip dari proteksi ini yaitu dengan mengalihkan proses korosi dari struktur pada komponen lain yang berfungsi sebagai anoda (anoda korban), dan menjadikan struktur sebagai katoda. Proteksi katodik sistem anoda korban selama ini telah banyak digunakan dan berhasil dalam menekan laju korosi yang terjadi. Namun, sistem ini memiliki kelemahan pada saat perancangan karena tidak dapat diperkirakan efektifitas sistem proteksi tersebut sebelum diterapkan langsung kelapangan.

Simulasi ini untuk menganalisa bagaimana efektifitas dari sebuah sistem proteksi katodik yang diaplikasikan pada bagian dalam tangki. Pemodelan berupa tangki yang diproteksi dengan menggunakan anoda korban seng (Zn) pada posisi bagian bawah didalam tangki. Pada pemodelan 2 dimensi anoda korban berupa elemen 6 dan 7 dengan nilai potensial -763 mV. Domain dari tangki yaitu air laut dengan nilai konduktifitas 4 ohm m<sup>-1</sup>. Daerah yang dianalisa adalah lantai dan dinding tangki bagian dalam dengan material baja (Fe) dan memiliki nilai potensial sebesar -440 mV. Pada bagian atas dari model adalah permukaan air yang mengindikasikan tidak adanya arus yang mengalir keluar ataupun masuk melalui permukaan air tersebut (I = 0).



Gambar 10. Pemodelan 2 dimensi untuk analisa proteksi katodik.



Gambar 11. Distribusi densitas arus pada daerah katoda (Fe)

Dari hasil analisa menggunakan program BEM, seperti yang ditunjukkan pada gambar 11, efektifitas proteksi dapat diketahui dengan melihat distribusi densitas arus pada daerah katoda (Fe) yaitu pada bagian dalam lantai dan dinding tangki. Pada daerah anoda korban, densitas arus berada pada kawasan positif yang menandakan bahwa terdapat arus yang mengalir keluar dari anoda. Sedangkan pada daerah katoda, densitas arus berada pada kawasan negatif yang menandakan bahwa terdapat arus yang mengalir masuk menuju katoda.

## KESIMPULAN

Metode elemen batas 2 dimensi telah diaplikasikan untuk menganalisa beberapa kasus korosi. Persamaan Laplace digunakan untuk memodelkan potensial pada domain, dengan asumsi tidak adanya akumulasi ion pada domain dan nilai konduktifitas domain adalah homogen. Metode elemen batas 2 dimensi digunakan untuk memecahkan persamaan laplace dan menganalisa potensial dan densitas arus diseluruh domain. Dari studi kasus yang dilakukan, metode elemen batas 2 dimensi telah diaplikasikan untuk menganalisa korosi galvanis, korosi pada tulangan baja didalam beton dan aplikasi pada proteksi katodik anoda korban.

Dalam penelitian ini, tingkat korosifitas baja tulangan dipresentasikan oleh nilai potensial, sementara itu besarnya nilai potensial dipermukaan beton sebenarnya juga dipengaruhi oleh arus yang mengalir sehingga perlu penelitian lanjutan menggunakan kurva polarisasi sebagai kondisi batas dipermukaan logam.

## REFERENSI

- Boas. M.L.**, 1983, *Mathematical Methodes in the Physical Sciences*, 2<sup>nd</sup> Edition, Jhon Wiley & Sons. Inc.,
- Brebia. C.A and Dominguez. J.**, 1992, *Boundary Elements An Introductory Course*, 2<sup>nd</sup> Edition, WIT Press, Southhampton, UK
- Broomfield. J.P.**, 1997, *Corrosion of Steel in Concrete, understanding, investigation and repair*, 1<sup>st</sup> Edition, E & FN Spon, London, UK,
- Fontana. M.G.**, 1987, *Corrosion Engineering*, 3<sup>rd</sup> Edition, McGraw-Hill Book Company, Singapore.
- Islami. N.** 2007, *Analisa Masalah Korosi Menggunakan Metode Elemen Batas 2 Dimensi*, Skripsi, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Syiah Kuala
- Kreyszig. E.**, 1993, *Matematika Teknik Lanjutan*, Edisi ke-6, Gramedia, Jakarta.
- Ridha. M.**, 2002, *Inverse Analysis Methods for Identifying Corrosion of Reinforced Concrete Using Boundary Element Method*, Doctoral Dissertation, Tokyo Institute of Technology Japan.
- Safuadi**, 2005, *Penganggaran Kekonduksian untuk pengesanan kedudukan kakisan mennggunakan kaidah unsur sempadan dan algoritma genetik*, Univeristi Kebangsaan Malaysia, Malaysia.
- Stephen Kirkup**, 2007, : *BEM for Laplace problems*, www.boundary-element-method.com.
- Threthewey. K.R.**, 1991, *Korosi Untuk Mahasiswa dan Rekayasawan*, Gramedia, Jakarta.
- Wheat, H.G. & Eliezer. Z.**, 1985. *Some Electrochemical Aspects of Corrosion of Steel in Concrete*. Corrosion. 41:11 p.640.
- Wolfram Research Inc.**, 2007, *Normal Vector*, www.mathworld-wolfram.com.

