

# TEKNOLOGI ZINC CARTRIDGE DAN TI-WIRE SENSOR SEBAGAI TEKNOLOGI PROTEKSI KATODIK DAN PEMANTAUAN KOROSI BAJA TULANGAN BETON PERTAMA DI INDONESIA

**Hadi Gunawan Sonjaya**

Balai Geoteknik Terowongan dan Struktur  
Direktorat Jenderal Binamarga  
Jln. A.H. Nasution No. 264  
Ujungberung-Bandung  
hadigunawan@pu.go.id

**Rahmita Sari Rafdinal**

Research and Development Division  
P.S. Mitsubishi Construction Co., Ltd  
Harumi Center Building 3F, Harumi, Chuo-Ku,  
Tokyo, Japan 104-8215

## Abstract

Corrosion of steel rebar in bridge structures is a growing issue worldwide. A pilot research project on corrosion hazards in Indonesia was carried out by employing maintenance technology using sacrificial anode cathodic protection and corrosion monitoring system based on wireless information and communication technology. This paper presents experimental studies on Zinc Cartridge as a concrete repair systems and utilization of Titanium Wire (Ti-Wire) Sensor as a reference electrode in the concrete repair system by applying them to chloride-contaminated concrete exposed to a dry-tropical climate environment. From the reported work, it can be concluded that Zinc Cartridge affords excellent corrosion protection in dry-tropical conditions, and that Ti-Wire Sensor is reliable to be used as a reference electrode for rebar corrosion monitoring in concrete.

**Keywords:** Zinc Cartridge; Ti-Wire Sensor; cathodic protection; corrosion protection; corrosion monitoring

## Abstrak

Korosi baja tulangan pada struktur-struktur jembatan telah tumbuh menjadi suatu masalah di seluruh dunia. Suatu kajian awal tentang dampak korosi di Indonesia telah dilakukan dengan menggunakan sistem pemeliharaan yang menggunakan teknologi proteksi katodik anode korban dengan dilengkapi teknologi pemantauan korosi berdasarkan sistem informasi dan komunikasi secara nirkabel. Makalah ini menyajikan suatu studi eksperimental tentang *Zinc Cartridge* sebagai sistem perbaikan beton dan pemanfaatan sensor *Titanium Wire (Ti-Wire)* sebagai elektrode referensi dalam sistem perbaikan beton, dengan menerapkannya pada beton terkontaminasi klorida yang terpapar lingkungan iklim tropis kering. Berdasarkan hasil studi dan pengamatan yang didapat, diperoleh kesimpulan bahwa *Zinc Cartridge System* mampu memberikan perlindungan korosi yang sangat baik dalam kondisi lingkungan tropis yang kering, dan sensor *Ti-Wire* dapat diandalkan untuk digunakan sebagai elektrode referensi untuk pemantauan korosi tulangan pada beton.

**Kata-kata kunci:** *Zinc Cartridge*; *Ti-Wire Sensor*; proteksi katodik; perlindungan korosi; pemantauan korosi

## PENDAHULUAN

Struktur-struktur jembatan yang dibangun di seluruh dunia, pada umumnya terekspos secara langsung terhadap kelembaban, garam, dan senyawa-senyawa lainnya, yang dapat menyebabkan terjadinya kerusakan struktur akibat korosi. Korosi pada baja tulangan telah dikenal sebagai salah satu penyebab utama terjadinya kerusakan dini pada struktur beton bertulang. Indonesia, sebagai suatu negara kepulauan, telah membangun ribuan jembatan yang menghadapi permasalahan yang sama, yaitu terjadinya kerusakan pada struktur beton, khususnya struktur beton bertulang, yang disebabkan oleh terjadinya korosi baja tulangan

akibat serangan klorida dan senyawa-senyawa agresif lainnya. Oleh karena itu, perlindungan dan pemantauan korosi terhadap struktur beton jembatan di Indonesia sangat dibutuhkan.

Kajian ini merupakan suatu kajian dasar untuk mengetahui efektivitas kinerja *Zinc Cartridge* yang dikembangkan selama ini sebagai salah satu metode perbaikan kerusakan beton melalui prinsip proteksi katodik anode korban dan kinerja sensor Titanium (*Ti-Wire Sensor*) sebagai suatu elektrode referensi untuk mengukur nilai potensial korosi tulangan baja dalam beton. Pengujian dan pengukuran dilakukan terhadap beberapa benda uji pelat beton bertulang yang mengandung senyawa garam klorida dan terpapar lingkungan kering tropis.

Baja tulangan dalam beton berada di lingkungan yang bersifat basa kuat, dengan nilai pH lebih besar dari 12,5. Lingkungan basa kuat ini memberikan perlindungan terhadap baja tulangan dalam beton dari serangan korosi, karena pada permukaan baja akan terbentuk lapisan pasif baja yang tipis. Lapisan pasif ini berguna untuk melindungi baja dari korosi. Lapisan pasif baja akan bereaksi dengan larutan asam atau akan larut dalam kondisi asam. Ion-ion senyawa yang bersifat asam, seperti ion  $Cl^-$ , dapat menghilangkan lapisan pasif baja. Permukaan baja yang lapisan pasifnya hilang menjadi anode reaksi korosi baja (Marcus dan Oudar, 1995; Ishii dan Rafdinal, 2019).

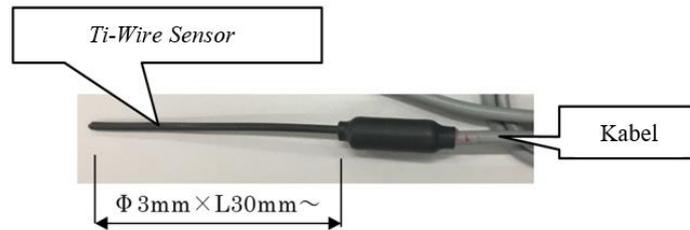
*Zinc cartridge system* adalah salah satu metode sistem perlindungan korosi baja tulangan dengan menggunakan logam seng murni sebagai anode korban. Sistem ini sangat mudah diaplikasikan, mudah diganti, dan mempunyai sifat melindungi korosi yang baik sebagai anode korban.

Laju kejadian korosi serta efektivitas *zinc cartridge* dalam menanggulangi korosivitas baja tulangan dapat diamati dan diukur secara *realtime* menggunakan sistem monitoring nirkabel dengan menggunakan sensor Titanium sebagai elektrode pengukur nilai potensial tulangan baja. Rangkaian sistem monitoring terdiri atas beberapa modul pengukur data yang ditempatkan di dalam elemen beton dan terminal pengoleksi data yang terkoneksi secara nirkabel ke sistem server yang nantinya secara berkala mengirimkan data pengukuran aktual nilai potensial baja tulangan.

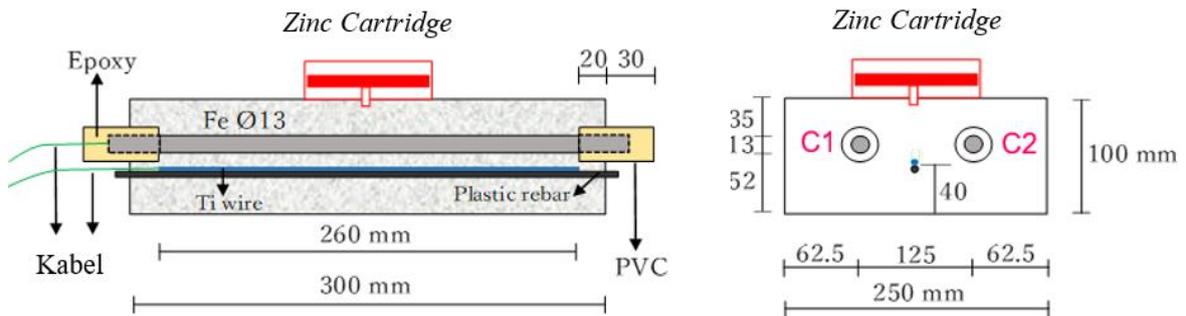
## **SPESIFIKASI BENDA UJI**

### **Dimensi Benda Uji**

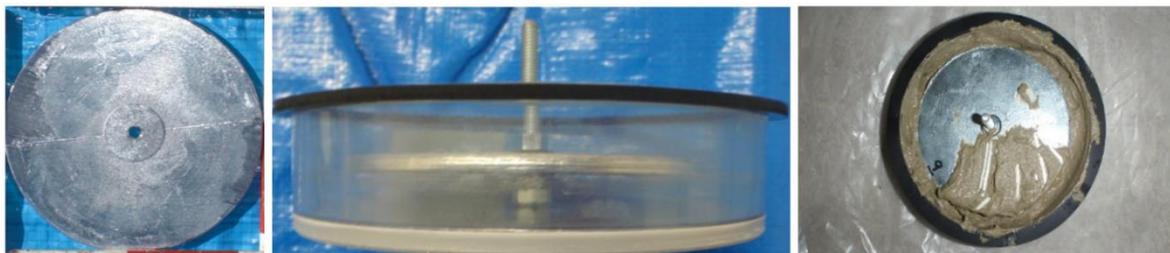
Untuk keperluan pengujian, dibuat beberapa benda uji pelat beton bertulang dengan ukuran panjang 300 mm, lebar 250 mm, dan tebal 100 mm. Di dalam benda uji tersebut ditempatkan 2 buah baja tulangan polos berukuran diameter 13 mm dan satu buah *Ti-wire Sensor*, seperti yang terlihat pada Gambar 1. Detail dimensi dan penempatan tulangan serta penempatan sensor pada benda uji diperlihatkan pada Gambar 2, dan pada Gambar 3 diperlihatkan sistem *Zinc Cartridge*, yang terdiri atas anode seng atau *zinc* dengan ukuran diameter 110 mm yang dilapisi dengan material pengisi (*backfill*) dan penutup yang terbuat dari bahan akrilik.



**Gambar 1** Detail *Ti-Wire Sensor*



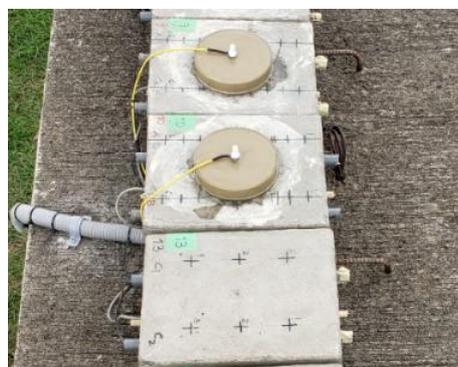
**Gambar 2** Detail Benda Uji Pelat Beton dengan *Zinc Cartridge* dan *Ti-Wire Sensor*



(a) Anode *zinc*      (b) Anode *zinc*, anode, and penutup      (c) Material pengisi

**Gambar 3** Sistem *Zinc Cartridge*

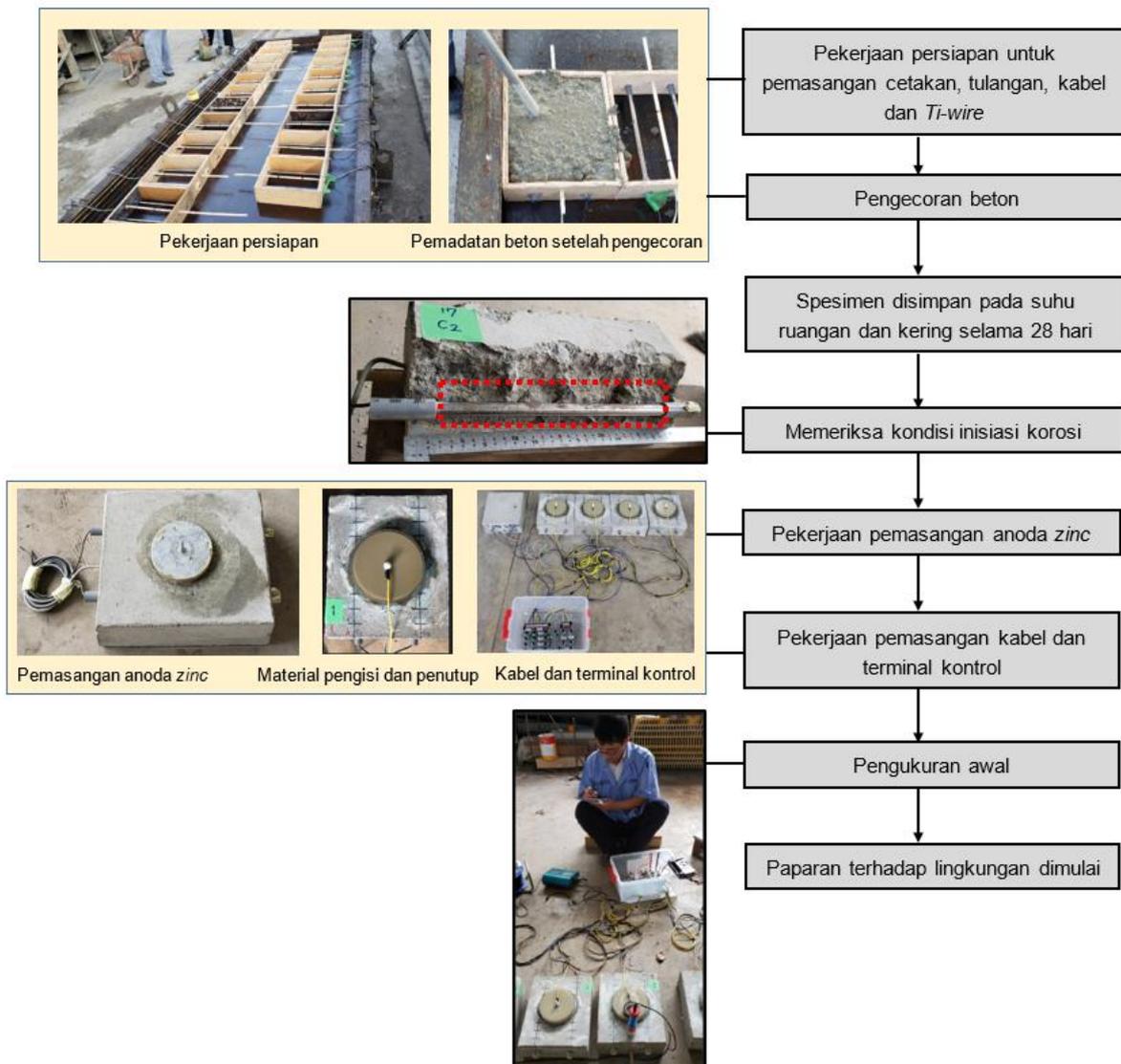
Terdapat 2 tipe benda uji yang digunakan dalam kajian ini, yaitu tipe benda uji yang dilindungi dengan *Zinc Cartridge* dan tipe benda uji tanpa menggunakan pelindung *Zinc Cartridge* (Rafdinal et al., 2017). Kedua tipe benda uji ini ditunjukkan pada Gambar 4.



**Gambar 4** Benda Uji Beton dengan dan Tanpa Sistem *Zinc Cartridge*

## Proses Instalasi dan Kondisi Ekspos Benda Uji

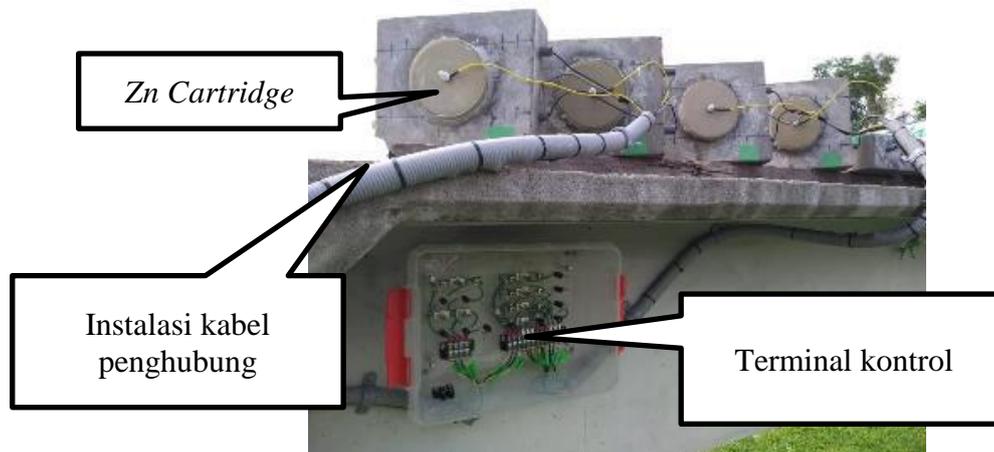
Proses pembuatan benda uji dan instalasi sistem *Zinc Cartridge* diilustrasikan pada Gambar 5. Setelah dilakukan pencetakan dan pembongkaran acuan, seluruh benda uji kemudian diekspos pada kondisi kering tropis selama 28 hari, kemudian dilakukan pengecekan apakah telah terjadi korosi pada tulangan baja yang ditanam atau belum. Apabila benda uji menunjukkan nilai potensial alami lebih dari  $-250$  mV, berarti lebih dari 90% kemungkinan terjadi korosi pada tulangan (Christodoulou et al., 2014). Hal tersebut terjadi disebabkan oleh penambahan  $10 \text{ kg/m}^3$  garam klorida pada saat pencampuran beton segar, dengan tujuan untuk mempercepat terjadinya proses korosi tulangan dalam benda uji beton.



**Gambar 5** Proses Pembuatan Benda Uji Pelat Beton dan Instalasi *Zinc Cartridge*

Setelah dilakukan pengukuran awal nilai potensial korosi pada tulangan, anode *Zinc Cartridge* kemudian dipasang di atas permukaan benda uji dan disambungkan melalui suatu sistem angkur sampai mengenai tulangan yang tertanam dalam benda uji. Terdapat 2 jenis elektrode referensi yang digunakan untuk memetakan nilai potensial korosi pada kajian

ini, yaitu elektrode Ag/AgCl untuk mengukur nilai potensial pada permukaan benda uji beton dan *Ti-Wire Sensor* untuk mengukur nilai potensial korosi yang ditempatkan dalam benda uji beton. Setelah seluruh pengukuran awal terhadap benda uji selesai dilakukan, benda-benda uji tersebut mulai diekspos pada kondisi lingkungan terbuka yang tidak terlindung dari panas maupun hujan, seperti yang terlihat pada Gambar 6.



**Gambar 6** Kondisi Ekspos Benda Uji

## **METODE PENGUKURAN**

### **Pengukuran Arus Proteksi**

Sebuah *ammeter impedance* secara berkala digunakan untuk mengukur besaran arus listrik proteksi anode *Zinc Cartridge*. British Standard EN 12696 mensyaratkan bahwa perencanaan besaran arus proteksi minimum dibagi dengan suatu luas permukaan tulangan baja harus lebih besar dari  $0,2 \mu\text{A}/\text{m}^2$ .

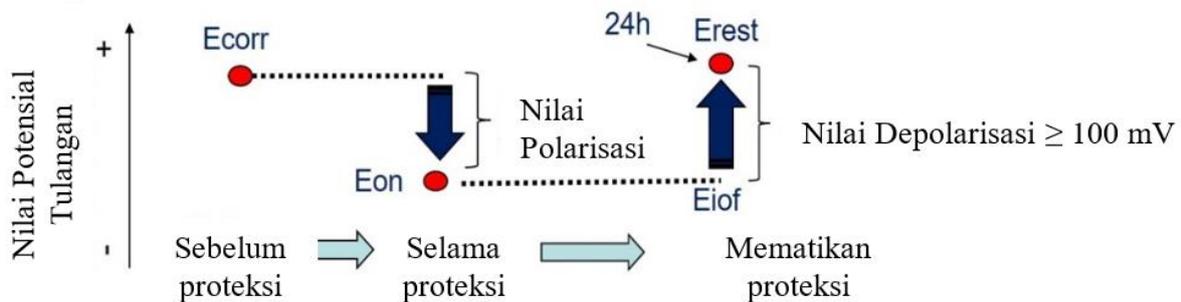
### **Pengukuran Nilai Potensial Tulangan dengan Metode *Half-Cell***

Pengukuran nilai potensial tulangan dengan metode *Half-Cell* dilakukan sesuai dengan ASTM C876-15, yang dilakukan dengan menggunakan elektrode *silver-silver chloride electrode* atau SSE (Ag/AgCl) dan voltameter pada permukaan benda uji dengan jarak antar pengukuran sebesar 30 mm. Pengukuran dilakukan dengan cara menyambungkan kutub negatif dari voltameter dengan elektrode referensi dan kutub positif dengan baja tulangan.

### **Pengukuran Efektivitas Proteksi Katodik dengan Metode Depolarisasi**

Untuk mengetahui efektif atau tidaknya kinerja suatu sistem proteksi katodik, dilakukan pengukuran nilai potensial tulangan dengan metode depolarisasi (Astuti et al., 2018). Nilai depolarisasi yang digunakan sebagai kriteria standar kinerja proteksi katodik anode korban terhadap tulangan baja dan terhadap anode korban adalah lebih atau sama dengan 100 mV. Skema pengukuran depolarisasi dapat dilihat pada Gambar 7. *Instan-off*

*potential* ( $E_{iof}$ ) diukur segera setelah dilakukan pemutusan sambungan antara anode dengan baja tulangan dan nilai potensial sisa ( $E_{rest}$ ) diukur 24 jam setelah pemutusan sambungan. Beda potensial antara  $E_{rest}$  dan  $E_{iof}$  menjadi nilai depolarisasi tulangan untuk mengukur efektivitas proteksi sistem proteksi katodik anode korban, yang biasa dikenal dengan istilah nilai *potential decay* tulangan.



**Gambar 7** Mekanisme Pengukuran Nilai Potensial dengan Metode Depolarisasi

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Kinerja Zinc Cartridge terhadap Perlindungan Korosi

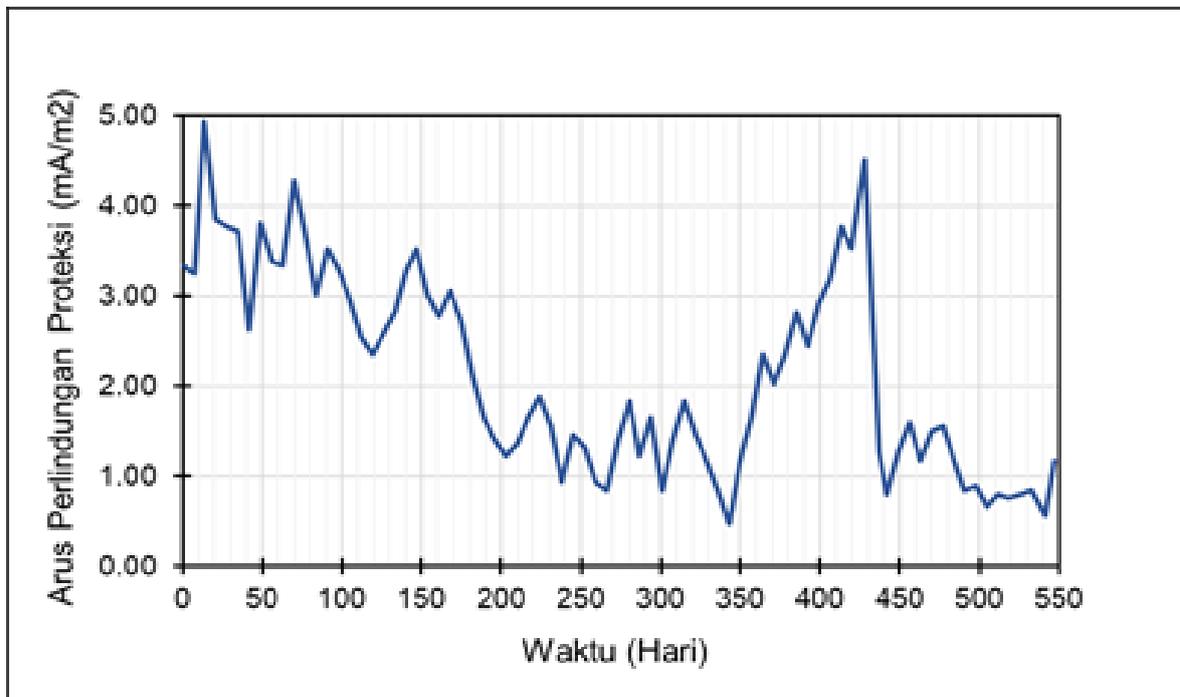
Hasil penyelidikan awal tulangan secara visual pada salah satu spesimen ditunjukkan pada Gambar 8. Benda uji ini memiliki nilai potensial tulangan awal sebesar  $-332\text{mV}$ , yang berarti tulangan baja sudah mengalami korosi. Pada penyelidikan ini juga bisa dilihat bahwa produk korosi mulai terbentuk pada baja dalam beton yang terkontaminasi klorida. Setelah 28 hari terpapar di lingkungan kering-tropis, semua spesimen pada penelitian ini menunjukkan nilai potensial tulangan yang lebih negatif dari  $-250\text{mV}$ , yang berarti kemungkinan terjadinya korosi sudah lebih besar dari 90%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem *Zinc Cartridge* sebagai proteksi katodik yang diterapkan akan sesuai untuk diterapkan terhadap perlindungan korosi pada beton.

Setelah *Zinc Cartridge* mulai dihubungkan ke tulangan pada beton yang sudah tercemar klorida atau rusak akibat korosi, arus proteksi *Zinc Cartridge* mulai terlihat. Gambar 9 menunjukkan jumlah arus proteksi yang dikirim anode *Zinc Cartridge* ke seluruh koneksi tulangan, mulai dari nol hari waktu paparan sampai 550 hari pengamatan, yang menunjukkan bahwa rapat arus perlindungan korosi cenderung turun seiring waktu dan masih dalam pertanda normal.

Meskipun aliran arus perlindungan korosi menurun dan kurang dari batas desain minimum perlindungan proteksi katodik berdasarkan BS EN ISO 12696, namun *Zinc Cartridge* dapat mempolarisasi tulangan dalam beton lebih dari  $100\text{mV}$  dalam uji depolarisasi, seperti terlihat pada Gambar 10, yang mana hal ini menunjukkan perlindungan proteksi katodik *Zinc Cartridge* yang baik.

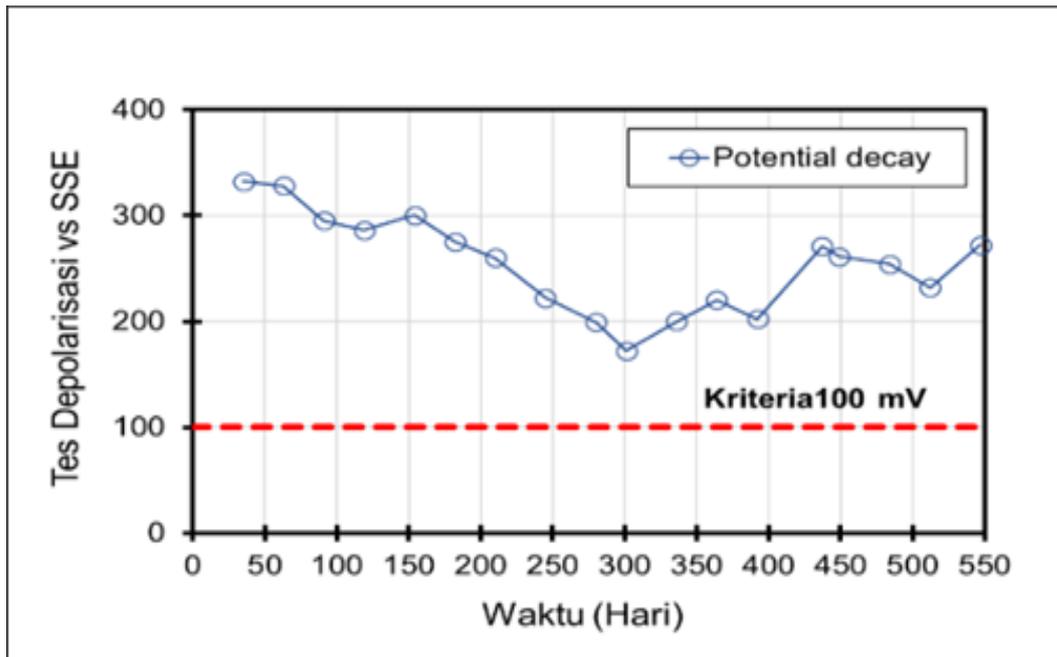


**Gambar 8** Produk Korosi yang Terbentuk pada Baja Dalam Beton dengan Kandungan Ion Klorida  $10 \text{ kg/m}^3$  dan Terekspos Kondisi Kering Tropis Selama 28 Hari

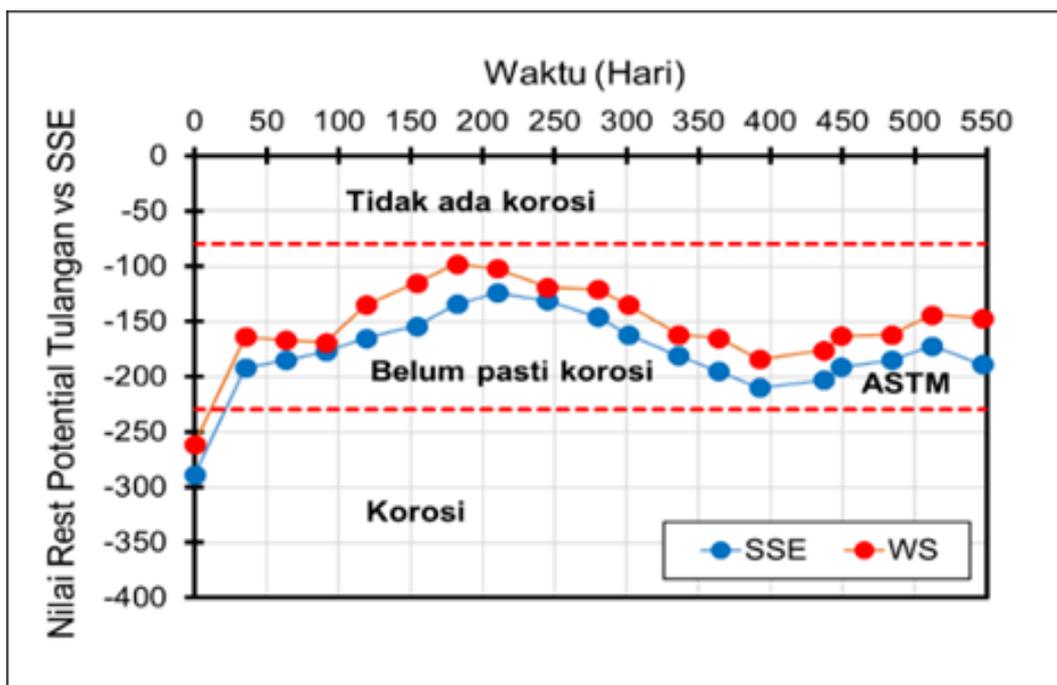


**Gambar 9** Arus Perlindungan Proteksi *Zinc Cartridge*

Gambar 10 menunjukkan nilai *potential decay* tulangan pada uji depolarisasi yang diproteksi oleh *Zinc Cartridge*. Uji depolarisasi merupakan suatu metode untuk melihat efektivitas kinerja *Zn Cartridge* sebagai sistem proteksi katodik anode korban. Pengujian depolarisasi dilakukan selama 24 jam dengan memutus aliran arus perlindungan proteksi *Zinc Cartridge* ke tulangan. Perbedaan potensial antara sebelum dimatikan arus seketika dan potensial yang diukur 24 jam kemudian setelah mematikan arus anode *Zinc Cartridge* disebut *potential decay*.



Gambar 10 Nilai *Potential Decay* dari Hasil Tes Depolarisasi



Gambar 11 Nilai *Rest Potential Tulangan* yang Diukur dengan Menggunakan Elektrode SSE dan *Ti-Wire Sensor*

*Potential decay* merupakan parameter penting yang digunakan untuk mengevaluasi efektivitas proteksi katodik. Umumnya, depolarisasi 100 mV yang direkam selama periode 24 jam adalah kriteria yang paling diterima untuk proteksi korosi. Gambar 10 menunjukkan nilai *potential decay* tulangan memenuhi kriteria potensial efektif, yaitu lebih dari 100 mV.

Hal ini berarti bahwa *Zinc Cartridge* menunjukkan perlindungan korosi yang sangat baik pada tulangan selama waktu terekspos, yaitu mulai dari nol hari terekspos sampai 550 hari terekspos.

### **Kinerja *Ti-Wire Sensor* terhadap Pemantauan Korosi**

Dua data pemantauan potensial tulangan dibandingkan, yaitu nilai potensial tulangan yang diukur dengan elektrode referensi umum yang disebut SSE dan elektrode nirkabel *Ti-Wire Sensor* (WS) setelah uji depolarisasi selesai dilakukan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11. Data tersebut disebut potensial alami atau *rest potential* tulangan.

Pada grafik terlihat bahwa hasil pengukuran *Ti-Wire Sensor* stabil dalam beton dan dapat mendeteksi potensial tulangan sama seperti elektrode SSE. Dari hasil ini dapat dinyatakan bahwa *Ti-Wire Sensor* tahan lama, stabil, andal, dan ekonomis untuk digunakan pada struktur beton dalam hal pemantauan korosi rebar secara nirkabel untuk pemanfaatan jangka panjang.

## **KESIMPULAN**

Pada penelitian ini, kinerja *Zinc Cartridge* dan *Ti-Wire Sensor* pada beton yang sudah terkontaminasi klorida dan terpapar di bawah iklim tropis kering telah dilakukan dengan sangat baik. Dari hasil pengujian terlihat bahwa *Zinc Cartridge* memberikan perlindungan korosi yang sangat baik pada kondisi kelembaban menengah di lingkungan tropis kering, dan ini adalah solusi yang layak untuk perbaikan, perawatan, dan perlindungan korosi tulangan beton dalam struktur beton yang terekspos lingkungan air garam.

Hasil pengukuran *Ti-Wire Sensor* juga setara dengan sensor biasa selama masa pengamatan 550 hari. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa *Ti-Wire Sensor* tahan lama, stabil, andal, dan ekonomis untuk digunakan pada struktur beton dalam hal pemantauan korosi tulangan untuk penggunaan jangka panjang.

## **DAFTAR PUSTAKA**

- Astuti, P., Rafdinal, R.S., Mahasiripan, A., Hamada, H., Sagawa, Y., dan Yamamoto, D. 2018. *Potential Development of Sacrificial Anode Cathodic Protection Applied for Severely Damaged RC Beams Aged 44 Years*. Journal of Thailand Concrete Association, 6 (2): 24–31. Bangkok.
- British Standards Institute. 2016. *ISO EN 12696-Cathodic Protection of Steel in Concrete*. London.

- Christodoulou, C., Goodier, C.I., Austin, S.A., Webb, J., dan Glass, G.K. 2014. *A New Arrangement of Galvanic Anodes for the Repair of Reinforced Concrete Structures*. *Construction and Building Materials*, 50: 300–307.
- Ishii, K. dan Rafdinal, R.S. 2019. *New Sensor for Detecting Steel-Corrosion and Its New Possibility Titanium Wire Sensor*. *Titanium Japan Journal*, 67 (1): 8–13.
- Marcus, P. dan Oudar, J. 1995. *Corrosion Mechanisms in Theory and Practice*. New York, NY: M. Dekker Publisher.
- Rafdinal, R.S., Aoyama, T., Ishii, K., dan Tori, K. 2017. *The Feasibility Study of Embedded Wire Sensor for Corrosion Monitoring of Concrete*. *Pre-stressed Concrete Symposium*, 26 (1): 1680–1684. Kobe.