

## PENGARUH KADAR GRAFIT DAN DENSITAS ARUS TERHADAP EFEKTIFITAS CARBON FIBER REINFORCED POLYMER LAMINATE SEBAGAI ANODA IMPRESSED CURRENT CATHODIC PROTECTION SYSTEM

David Pratama Lays<sup>1</sup>, Hongky Haodiwidjaya Tanto<sup>2</sup>, Daniel Tjandra<sup>3</sup> and Gunawan Budi Wijaya<sup>4</sup>

**ABSTRAK :** *Impressed current cathodic protection* (ICCP) merupakan metode yang umum digunakan untuk perbaikan struktur yang telah mengalami korosi. Penggunaan *Carbon fiber reinforced polymer* (CFRP) sebagai anoda sudah terbukti bisa digunakan dalam sistem ICCP. Namun, penelitian yang berfokus pada variabel yang mempengaruhi efektifitas perlindungan ICCP dengan menggunakan CFRP sebagai anoda masih sedikit dilakukan. Dalam penelitian ini, variabel yang diteliti adalah pengaruh dari densitas arus dan kadar bubuk grafit pada *epoxy*. Bubuk grafit berperan sebagai *conductive pigment* untuk meningkatkan konduktivitas *epoxy* sedangkan densitas arus mempengaruhi besar perlindungan yang diberikan pada spesimen. *High corrosion level* (*mass loss* teoritis 18%) diberikan ke semua spesimen beton bertulang dan CFRP *laminat* ditempelkan pada spesimen tersebut dengan menggunakan 5 macam kadar grafit: 7,5%; 10%; 12,5%; 15%; 17,5%. Selanjutnya, ICCP dengan 2 macam densitas arus (10 dan 20 mA/m<sup>2</sup>) diberikan pada spesimen. *Half cell potential test* dilakukan untuk mengukur efektifitas dari sistem ICCP tersebut. Sistem ICCP berhasil memberikan kenaikan potensial minimal pada spesimen sebesar 177 mV yang menunjukkan peluang korosi pada semua spesimen semakin mengecil. Dari hasil *half cell potential test*, disimpulkan bahwa besar densitas arus dan kadar grafit pada *epoxy* tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap efektifitas sistem ICCP.

**KATA KUNCI:** *impressed current cathodic protection*, densitas arus, kadar bubuk grafit, korosi, *carbon fiber reinforced polymer laminate*

### 1. PENDAHULUAN

Korosi pada tulangan adalah permasalahan yang sering terjadi pada struktur beton bertulang. Korosi menyebabkan ikatan antara tulangan dengan beton melemah dan menimbulkan retak. Jika dibiarkan, retak akan membesar dan menyebabkan berkurangnya *serviceability* serta kekuatan ultimit dari struktur tersebut. Korosi umumnya terjadi akibat penetrasi ion klorida pada beton (Carmona, Garces, & Climent, 2015).

*The Federal Highway Administration* Amerika Serikat menyatakan bahwa metode *impressed current cathodic protection* (ICCP) adalah salah satu metode perbaikan yang dapat menghentikan proses korosi pada beton yang tercemar ion klorida (Lu et.al, 2018). Dalam metode ICCP, anoda eksternal dihubungkan dengan tulangan yang ingin dilindungi dan sistem tersebut dialiri dengan arus listrik 1 arah sehingga tulangan menjadi bersifat katodik. Dalam mendesain sistem ICCP, pemilihan anoda merupakan salah satu faktor penting karena berhubungan dengan tingkat efektifitas perlindungan yang diberikan (Nguyen, Mangat, Lambert, O'Flaherty, & Jones, 2014). Dalam penelitian ini, *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP) *laminat* digunakan sebagai anoda dalam sistem ICCP. CFRP *laminat* dipilih karena selain bisa digunakan sebagai perkuatan struktur, sifat konduktivitas CFRP *laminat* memungkinkan CFRP *laminat* untuk mengalirkan arus perlindungan ICCP menuju ke tulangan. Banyak penelitian yang telah membuktikan keberhasilan penggunaan CFRP *laminat* sebagai anoda dalam ICCP (Bahekar & Gadve, 2017; Lu et.al, 2018; Nguyen, Mangat, Lambert, O'Flaherty, & Jones, 2014). Namun, masih sedikit penelitian yang berfokus pada variabel-variabel dalam sistem ICCP yang berpengaruh pada efektifitas dari sistem tersebut. Penelitian ini berfokus membandingkan efektifitas dari sistem ICCP dengan besar

<sup>1</sup> Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, m21415010@john.petra.ac.id

<sup>2</sup> Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, m21415130@john.petra.ac.id

<sup>3</sup> Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, danieljtj@petra.ac.id

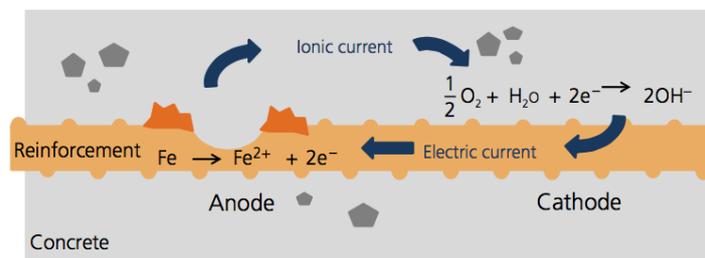
<sup>4</sup> Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, gunawanbw@petra.ac.id

densitas arus listrik dan kadar grafit pada campuran *epoxy* yang berbeda. Efektifitas sistem ICCP diukur berdasarkan hasil pengujian *half cell potential test*.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Korosi

Korosi pada tulangan terjadi jika tulangan bereaksi dengan lingkungan sekitarnya. Korosi terjadi jika lapisan pasif tulangan telah rusak. Mula-mula, atom *Fe* pada tulangan melepaskan elektronnya menjadi ion  $Fe^{2+}$  atau  $Fe^{3+}$ . Elektron tersebut bereaksi dengan air dan oksigen membentuk ion hidroksil ( $OH^-$ ). Ion tersebut bereaksi dengan  $Fe^{2+}$  atau  $Fe^{3+}$  membentuk *Ferrous Hidroksida*. Karena lapisan pasif yang telah rusak, *Ferrous Hidroksida* bereaksi dengan air dan oksigen membentuk *Ferric Hidroksida*/karat. Korosi menyebabkan pengurangan luas permukaan baja dan produk korosi memiliki volume hingga 6 kali lipat dari volume baja sehingga memberikan tegangan tarik tambahan pada beton sekitarnya dan menyebabkan keretakan dan pengelupasan selimut beton (Broomfield, 2006). **Gambar 1** menunjukkan mekanisme korosi pada tulangan dalam beton (Byrne, Homes, & Norton, 2016)



**Gambar 1. Mekanisme Korosi pada Tulangan dalam Beton**

### 2.2. *Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)*

ICCP merupakan salah satu metode yang dapat menyelesaikan permasalahan korosi. Umur perlindungan yang lama dan kemampuan untuk mengontrol korosi dalam semua kondisi merupakan alasan ICCP populer digunakan (Wilson, Jawed, & Ngala, 2013). Sistem ICCP dapat mencegah peristiwa korosi dengan cara mengaliri tulangan dengan arus listrik sehingga tulangan baja menjadi terpolarisasi negatif sehingga menjadi bersifat katodik (Lu et al., 2018). Pemilihan anoda dan densitas arus yang dipakai merupakan faktor penting dalam mendesain sistem ICCP, terutama jika sistem ICCP akan diaplikasikan pada struktur beton bertulang yang memiliki nilai *resistivity* tinggi (Nguyen, Mangat, Lambert, O'Flaherty, & Jones, 2014). Hal tersebut disebabkan karena 2 faktor tersebut sangat mempengaruhi besar arus perlindungan yang diberikan dan efek samping yang ditimbulkan oleh sistem tersebut.

### 2.3. *Half Cell Potential Test*

*Half cell potential test* merupakan metode pengujian yang menggunakan nilai beda potensial tulangan dalam beton dengan *reference electrode* sebagai dasar untuk mengidentifikasi peluang korosi dari tulangan tersebut. Metode ini umum untuk digunakan karena sifatnya yang non-destruktif dan bisa dipakai untuk semua jenis struktur beton bertulang. Standar yang digunakan dalam metode *half cell potential test* mengacu pada ASTM C876-09 "Standard Test Method for Half Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete". *Half cell potential test* dilakukan dengan cara menghubungkan kutub positif avometer dengan tulangan yang berada pada beton dan kutub negatif dengan *reference electrode*. Setelah itu, *reference electrode* ditempelkan pada permukaan beton untuk mengukur nilai beda potensial tersebut. Semakin negatif nilai beda potensial yang terbaca, maka semakin besar peluang terjadinya korosi pada tulangan. Metode ini juga dapat digunakan untuk mengevaluasi tingkat efektifitas dari ICCP yang diberikan untuk melindungi tulangan (ASTM Committee G01, 2009).

### 3. METODE PENELITIAN

#### 3.1. Pembuatan Spesimen

Mula-mula, spesimen beton berbentuk kubus berdimensi 150 x 150 x 150 mm<sup>3</sup> dicor. Mutu beton yang digunakan adalah  $f_c'$  23,1 MPa. Tulangan besi ditanamkan pada bagian tengah spesimen. Selimut beton pada sisi samping tulangan dibuat sebesar 70 mm dan 20 mm pada sisi bawah. Tulangan besi yang digunakan adalah tulangan besi polos diameter 10 mm dengan mutu  $f_y = 240$  MPa dan panjang 250 mm. Sebelum ditanam pada spesimen, *teflon tape* direkatkan pada bagian atas dan bawah tulangan sehingga bagian tengah dari tulangan sepanjang 100 mm yang tidak dilindungi *teflon tape* lebih cepat mengalami korosi. Selanjutnya, dilakukan *curing* selama 28 hari dengan cara merendam spesimen dalam air.

#### 3.2. Pemberian Korosi Awal

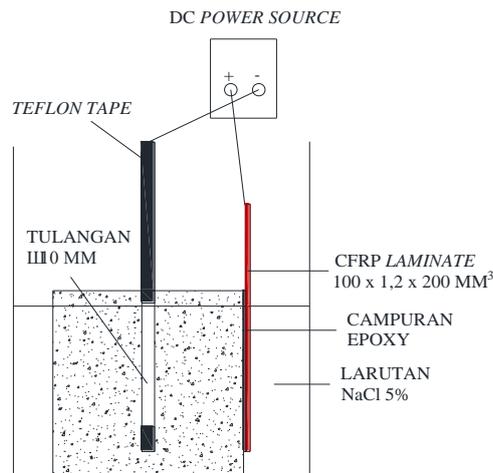
Setelah proses *curing* selesai dilakukan, penampang tulangan yang terekspos dibor kemudian ditanamkan sebuah baut dengan diameter 4 mm yang berfungsi sebagai jalan masuk listrik pada tulangan saat pemberian korosi awal dan ICCP. Setelah itu, dilakukan pemberian korosi awal pada spesimen dengan metode *impressed current*. DC *power supply* digunakan untuk mengalirkan arus yang konstan pada tulangan. Tulangan berperan sebagai anoda dan dihubungkan dengan kutub positif. Batang *stainless steel* berperan sebagai katoda dan dihubungkan dengan kutub negatif. Setelah itu, spesimen direndam dalam larutan NaCl 5% yang berperan sebagai elektrolit. Tinggi larutan NaCl dijaga sedikit dibawah dari permukaan beton. *Level* korosi awal yang diberikan adalah *high corrosion level*, yaitu korosi yang menyebabkan *mass loss* teoritis 18%. Arus yang diberikan pada masing-masing spesimen sebesar 64 mA (densitas arus 2,037 mA/cm<sup>2</sup>). Berdasarkan Hukum Faraday, pemberian arus dilakukan selama 166,55 jam untuk mencapai *level* korosi tersebut (Ahmad, 2009).

#### 3.3. Pemasangan CFRP Laminate pada Spesimen Beton Bertulang

Setelah *level* korosi tercapai, spesimen dikeluarkan dari larutan dan dikeringkan. Salah satu sisi permukaan beton yang tidak retak diampelas hingga halus dan dibersihkan sebelum ditempelkan dengan CFRP *laminate*. CFRP *laminate* yang digunakan memiliki ukuran 100 x 1,2 x 200 mm<sup>3</sup>. Sisi CFRP *laminate* yang terekspos dengan larutan NaCl saat pemberian ICCP dilapisi dengan *teflon tape* agar arus perlindungan yang dihasilkan saat proses ICCP tidak ada yang mengalir ke larutan NaCl. *Epoxy* yang digunakan untuk menempelkan CFRP *laminate* harus dimodifikasi agar menjadi bersifat konduktif dan bisa mengalirkan arus perlindungan pada saat proses ICCP diberikan. Modifikasi dilakukan dengan menambahkan *conductive pigment* berupa bubuk grafit pada campuran *epoxy*. Dalam penelitian ini, digunakan 5 macam kadar grafit: 7,5%; 10%; 12,5%; 15%; 17,5%.

#### 3.4. Pemberian ICCP pada Spesimen yang Telah Dipasang CFRP Laminate

Spesimen yang telah dipasang CFRP *laminate* direndam dalam larutan NaCl 5% untuk mensimulasikan kondisi struktur yang berada pada daerah korosif. Tinggi larutan NaCl dijaga sedikit dibawah permukaan beton. Proses pemberian ICCP dilakukan selama 30 hari. Untuk mempertahankan korosi, spesimen direndam dalam larutan selama 4 hari kemudian dikeringkan selama 1 hari. Siklus tersebut bertujuan sebagai sirkulasi oksigen. DC *power supply* digunakan untuk mengalirkan arus konstan selama proses ICCP. Tulangan besi berperan sebagai katoda dan dihubungkan dengan kutub negatif. CFRP *laminate* berperan sebagai anoda dan dihubungkan pada kutub positif. **Gambar 2** menunjukkan konfigurasi spesimen saat proses pemberian ICCP. Menurut BS EN 12696:2012, densitas arus yang perlu diberikan untuk perlindungan katodik pada tulangan yang telah mengalami korosi sebesar 2 – 20 mA/m<sup>2</sup> (British Standards Institution, 2012). Dalam penelitian ini, digunakan 2 macam densitas arus: 10 mA/m<sup>2</sup> dan 20 mA/m<sup>2</sup>.



**Gambar 2. Konfigurasi Spesimen Saat Proses Pemberian ICCP**

### 3.5. Monitoring Korosi dengan *Half Cell Potential Test*

Selama proses ICCP berlangsung, *half cell potential test* dilakukan setiap 5 hari sekali. *Half cell potential test* memberikan hasil pembacaan berupa beda potensial antara tulangan dengan *reference electrode*. *Reference electrode* yang digunakan dalam penelitian ini adalah Ag/AgCl/0,5M KCl dengan merk Silvion. Pembacaan dilakukan dengan bantuan avometer digital. *Half cell potential test* dilakukan 25 jam setelah arus ICCP dimatikan untuk memastikan spesimen telah mengalami depolarisasi secara keseluruhan. Hasil pembacaan tersebut kemudian dikonversi menjadi beda potensial yang mengacu terhadap reaksi *electrode* tembaga jenuh agar bisa dibandingkan dengan syarat pada ASTM C876-09. Dengan menggunakan nilai pada **Tabel 1.**, peluang korosi pada spesimen bisa diketahui.

**Tabel 1. Hubungan antara Nilai Potensial dengan Korosi (Berdasarkan ASTM C876)**

Nilai Pembacaan Potensial (mV) terhadap elektrode acuan (Tembaga Sulfat-CuSO <sub>4</sub> )	Peluang Terjadinya Korosi (%)
< -350	90
-200 s.d -350	50
> -200	10

## 4. HASIL DAN ANALISIS

### 4.1. Analisa Korosi Awal pada Spesimen

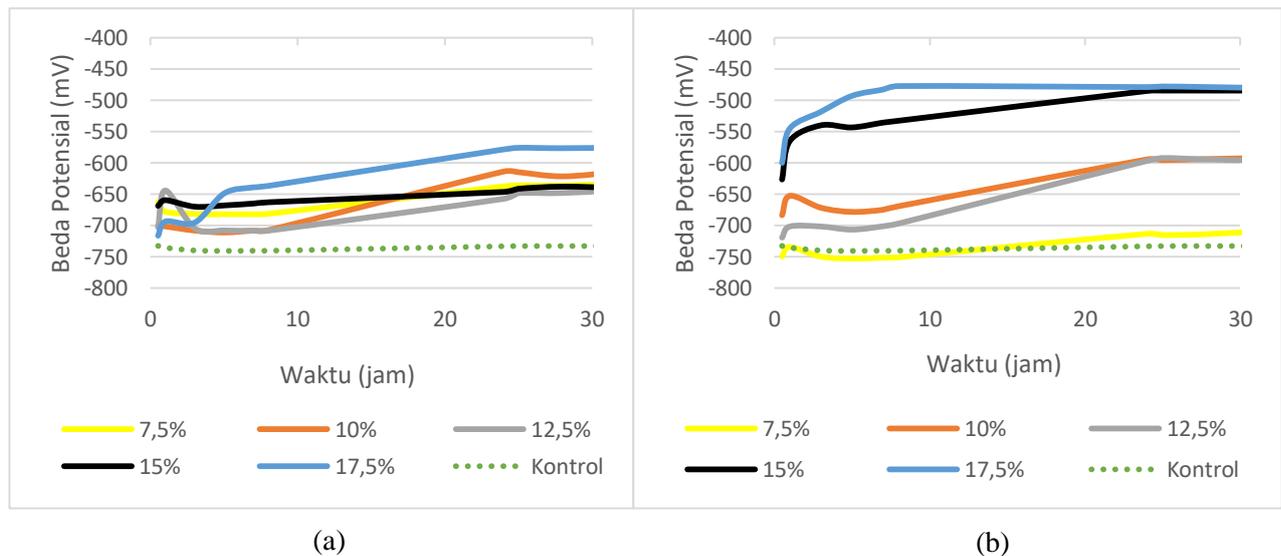
Sebanyak 75 spesimen diberikan korosi awal dengan metode *impressed current*. Untuk semua spesimen tersebut, dilakukan pengujian *half cell potential test* sebelum dan sesudah diberi korosi awal untuk mengetahui kesuksesan dari pemberian korosi awal tersebut. Sebelum diberi korosi awal, nilai rata-rata beda potensial tulangan sebesar -215 mV (zona peluang korosi 50%). Setelah pemberian korosi awal, seluruh beda potensial tulangan berubah menjadi lebih negatif. Rata-rata beda potensial menjadi sebesar -688 mV (zona peluang korosi 90%). Perubahan tersebut menunjukkan bahwa korosi awal telah sukses diberikan pada seluruh spesimen. Selain dari beda potensial, keberhasilan pemberian korosi awal juga terlihat dari tampak visual spesimen, seperti yang terlihat pada **Gambar 3.**



**Gambar 3. Tipikal Tampak Visual Spesimen yang Diberi Korosi Awal**

#### 4.2. Analisa Hasil Depolarisasi Spesimen

Sebelum *half cell potential test* dilakukan, proses depolarisasi dilakukan terlebih dahulu pada semua spesimen. Depolarisasi dilakukan dengan memutus arus listrik yang diberikan pada spesimen sehingga nilai beda potensial spesimen menjadi stabil. Untuk mengetahui bentuk kurva dan durasi depolarisasi pada spesimen, dilakukan pembacaan nilai beda potensial sesaat arus diputus hingga 30 jam setelah arus diputus. Karena keterbatasan alat, terdapat perbedaan waktu 15 – 45 menit antara pembacaan potensial sesaat dengan pemutusan arus listrik. Dari **Gambar 4**, dapat disimpulkan bahwa untuk semua spesimen, potensial tulangan telah stabil 25 jam setelah arus listrik dimatikan. Hal lain yang dapat disimpulkan adalah semua spesimen yang diberikan ICCP mengalami kenaikan potensial ke arah yang lebih positif setelah arus listrik diputus, berbeda dengan spesimen kontrol. Hal tersebut menunjukkan bahwa tulangan spesimen yang diberi ICCP telah mengalami polarisasi (arus listrik benar mengalir masuk hingga ke tulangan)

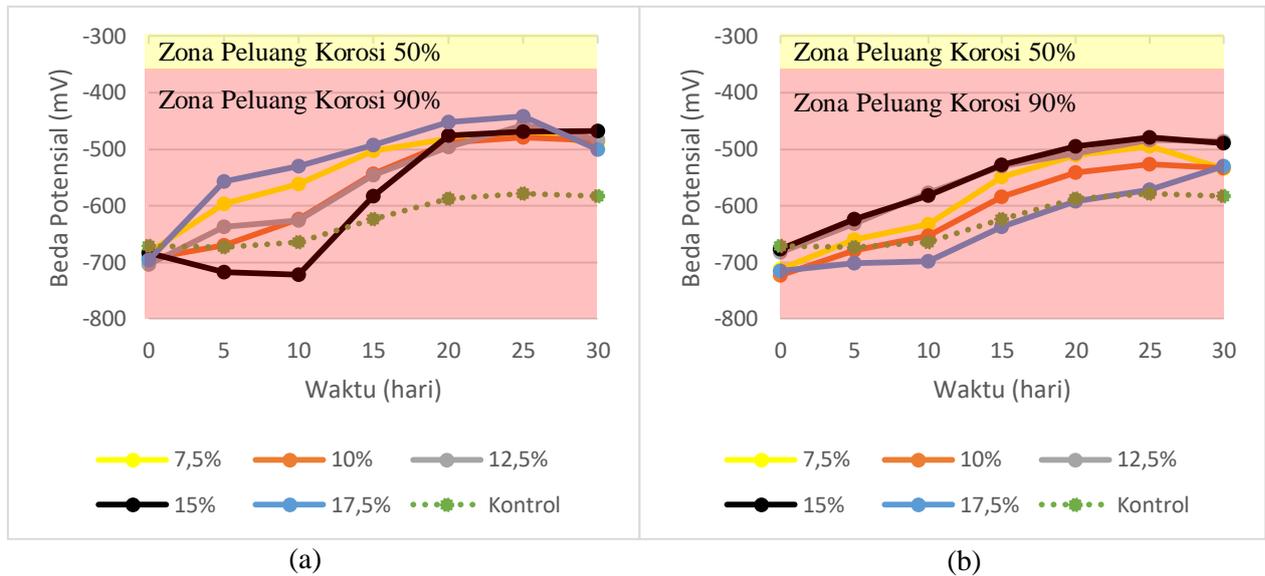


**Gambar 4. Kurva Depolarisasi Spesimen (a) Densitas Arus 10 mA/m<sup>2</sup> (b) Densitas Arus 20 mA/m<sup>2</sup>**

#### 4.3. Analisa Hasil Half Cell Potential Test

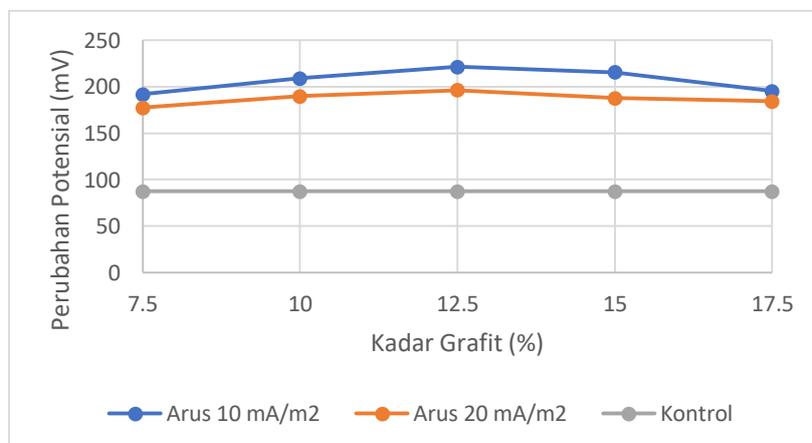
*Half cell potential test* dilakukan setelah spesimen mengalami depolarisasi secara keseluruhan. Pengujian tersebut dilakukan setiap 5 hari sekali selama proses ICCP berlangsung (30 hari). **Gambar 5** menunjukkan perubahan nilai beda potensial dari spesimen selama 30 hari. Dari kedua gambar tersebut, disimpulkan bahwa baik spesimen yang diberikan ICCP maupun spesimen kontrol sama-sama mengalami perubahan beda potensial ke arah yang lebih positif. Hal tersebut menunjukkan bahwa seiring dengan bertambahnya waktu, peluang korosi dari kedua jenis spesimen tersebut semakin berkurang.

Spesimen kontrol mengalami kenaikan beda potensial karena metode mempertahankan korosi yang dipilih kurang efektif. Siklus perendaman selama 4 hari dan pengeringan selama 1 hari masih tidak memberikan oksigen yang cukup bagi spesimen untuk mempertahankan korosinya. Alasan lain adalah karena formasi dari produk korosi yang sangat banyak di sekeliling tulangan besi, mengingat *level* korosi yang diberikan pada spesimen adalah *high corrosion level*. Hal tersebut menyebabkan naiknya hambatan antara beton dan tulangan sehingga tingkat korosi berkurang. Penelitian yang dilakukan oleh Lu et.al dan Koleva et.al juga mengamati fenomena yang sama (Lu et.al, 2018; Koleva et.al, 2009).



Gambar 5. Beda Potensial Spesimen (a) Densitas Arus 10 mA/m<sup>2</sup> (b) Densitas Arus 20 mA/m<sup>2</sup>

Meskipun demikian, bukan berarti pemberian ICCP pada spesimen tidak memiliki pengaruh apapun. **Gambar 5** menunjukkan bahwa spesimen yang diberi ICCP mengalami kenaikan beda potensial yang jauh lebih tinggi dan cepat dibandingkan spesimen kontrol. Nilai beda potensial akhir (hari ke-30) spesimen yang diberi ICCP lebih positif dan lebih mendekati zona peluang korosi 50% dibandingkan dengan spesimen kontrol. Hal ini menunjukkan bahwa peluang korosi spesimen yang diberi ICCP lebih kecil dibandingkan spesimen kontrol. Pernyataan tersebut didukung oleh **Gambar 6**. **Gambar 6** menunjukkan perubahan beda potensial antara beda potensial mula-mula (hari ke-0) dengan beda potensial saat ICCP selesai diberikan (hari ke-30). Gambar tersebut menunjukkan bahwa spesimen yang diberi ICCP mengalami kenaikan beda potensial yang jauh lebih besar dibandingkan spesimen kontrol. Hal ini menunjukkan keberhasilan sistem ICCP yang digunakan.



Gambar 6. Perubahan Potensial Spesimen Setelah Pemberian ICCP

Dari **Gambar 6**, pengaruh besar densitas arus dan kadar grafit pada *epoxy* terhadap efektifitas sistem ICCP dapat dianalisa. Baik untuk densitas arus 10 mA/m<sup>2</sup> maupun 20 mA/m<sup>2</sup>, pengaruh perbedaan kadar grafit terhadap kenaikan beda potensial menunjukkan pola yang sama, yaitu dapat digambarkan sebagai grafik dengan bentuk seperti parabola dengan kadar grafit 12,5% sebagai puncaknya. Bisa disimpulkan bahwa kadar grafit 12,5% merupakan kadar optimum untuk kedua jenis densitas tersebut. Meski demikian, perbedaan kadar grafit sebenarnya tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap sistem ICCP.

Salah satu faktor utama yang mempengaruhi besarnya nilai hambatan suatu material adalah dimensi dari material tersebut. Dalam penelitian ini, struktur beton bertulang memiliki dimensi jauh lebih besar dibandingkan sistem CFRP *laminat*. Oleh sebab itu, hambatan dari spesimen dalam penelitian ini lebih ditentukan oleh struktur beton bertulang. Untuk densitas arus 10 mA/m<sup>2</sup>, selisih maksimal perubahan kenaikan potensial hanya sebesar 29,4 mV; sedangkan untuk arus 20 mA/m<sup>2</sup> hanya sebesar 18,7 mV. ASTM C876-09 menyatakan bahwa jika perbedaan pembacaan antar spesimen sebesar ± 20 mV, maka kondisi karat pada spesimen boleh dianggap sama. Oleh karena itu, bisa disimpulkan bahwa perbedaan kadar grafit tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap efektifitas sistem ICCP.

**Gambar 6** juga menunjukkan bahwa spesimen yang diberikan ICCP dengan densitas arus 10 mA/m<sup>2</sup> mengalami kenaikan potensial yang lebih tinggi dibandingkan densitas arus 20 mA/m<sup>2</sup> untuk semua jenis kadar grafit. Sama seperti pengaruh perbedaan kadar grafit, perbedaan densitas arus juga tidak berpengaruh secara signifikan terhadap efektifitas sistem ICCP. Selisih maksimal perubahan kenaikan potensial antara densitas arus 10 mA/m<sup>2</sup> dan 20 mA/m<sup>2</sup> hanya sebesar 27,8 mV sehingga dapat disimpulkan bahwa perlindungan yang diberikan oleh kedua densitas arus tersebut relatif sama besarnya. Penelitian yang dilakukan oleh Bahekar dan Gadve mengamati fenomena yang sama (Bahekar & Gadve, 2017). Fenomena ini bisa disebabkan akibat 2 kemungkinan: *limit* perlindungan yang dapat diberikan pada tulangan yang telah mengalami korosi hanya sebesar <10 mA/m<sup>2</sup> sehingga penambahan besar densitas arus tidak menimbulkan efek apapun atau densitas arus 10 dan 20 mA/m<sup>2</sup> masih tergolong densitas arus kecil sehingga tidak terlihat perbedaan nilai *half cell potential test* dari kedua jenis densitas tersebut.

## 5. KESIMPULAN

1. Sistem ICCP dengan densitas arus 10 mA/m<sup>2</sup> memiliki nilai kenaikan beda potensial yang lebih besar dibandingkan dengan densitas arus 20 mA/m<sup>2</sup> untuk semua jenis kadar grafit. Tetapi, selisih maksimal kenaikan potensial antara kedua densitas arus tersebut hanya 27,8 mV sehingga dapat disimpulkan bahwa besar densitas arus yang diberikan memiliki dampak yang tidak signifikan terhadap efektifitas sistem ICCP.
2. Kadar grafit 12,5% merupakan kadar grafit yang optimal diantara 5 macam kadar grafit yang digunakan dalam penelitian ini. Spesimen yang menggunakan kadar grafit 12,5% mengalami kenaikan potensial yang tertinggi diantara kadar grafit yang lain. Grafik hubungan antara kadar grafit dan kenaikan potensial spesimen berbentuk seperti parabola dengan kadar 12,5% sebagai puncaknya. Meski demikian, selisih maksimal kenaikan potensial antara kelima kadar tersebut hanya sebesar 29,4 mV untuk densitas arus 10 mA/m<sup>2</sup> dan 18,7 mV untuk densitas arus 20 mA/m<sup>2</sup> sehingga dapat disimpulkan bahwa kadar grafit pada campuran *epoxy* memiliki dampak yang tidak signifikan terhadap efektifitas sistem ICCP.
3. Setelah sistem CFRP *laminat* digunakan sebagai anoda dalam sistem ICCP, hasil dari pengamatan visual menunjukkan bahwa tidak ditemui adanya kerusakan terhadap sistem CFRP tersebut. Perendaman sistem CFRP *laminat* pada larutan NaCl 5% juga tidak menimbulkan kerusakan visual apapun.

## 6. UCAPAN TERIMA KASIH

Sistem CFRP yang berupa CFRP *laminat* dan *epoxy* yang digunakan pada penelitian ini disediakan oleh PT. Sika Indonesia. CFRP *laminat* yang digunakan adalah Sika® Carbodur® S1012. *Epoxy* yang digunakan adalah Sikadur®-30. Penulis sangat berterima kasih atas kontribusi PT. Sika Indonesia dalam penelitian ini.

## 7. DAFTAR REFERENSI

- Ahmad, S. (2009). "Techniques for Inducing Accelerated Corrosion of Steel in Concrete." *Arabian Journal for Science and Engineering*. Vol. 34, No. 2, 95–104.
- ASTM Committee G01. (2009). *Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel In Concrete*. West Conshohocken, PA: America Society for Testing and Materials
- Bahekar, P. V., & Gadve, S. S. (2017). "Impressed Current Cathodic Protection of Rebar in Concrete Using Carbon FRP Laminate." *Construction and Building Materials*. Vol. 156, 242–251. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.145>
- British Standards Institution. (2012). *BSI Standards Publication Cathodic Protection of Steel in Concrete (ISO 12696 : 2012)*. United Kingdom: BSI Standards Limited 2012
- Broomfield, J. P. (2006). *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair, Second Edition*. <https://doi.org/10.4324/9780203414606>
- Byrne, A., Holmes, N., & Norton, B. (2016). "State-of-the-Art Review of Cathodic Protection for Reinforced Concrete Structures." *Magazine of Concrete Research*. Vol. 68, No. 13, 664–677. <https://doi.org/10.1680/jmacr.15.00083>
- Carmona, J., Garces, P., & Climent, M. A. (2015). "Efficiency of a Conductive Cement-based Anodic System for the Application of Cathodic Protection, Cathodic Prevention and Electrochemical Chloride Extraction to Control Corrosion in Reinforced Concrete Structures." *Corrosion Science*. Vol. 96, 102–111. <https://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2015.04.012>
- Koleva et. al. (2009). "Conventional and Pulse Cathodic Protection of Reinforced Concrete: Electrochemical Behavior of the Steel Reinforcement after Corrosion and Protection." *Materials and Corrosion*. Vol. 60, No. 5, 344–354. <https://doi.org/10.1002/maco.200805150>
- Lu et.al. (2018). "Active and Passive Protection of Steel Reinforcement in Concrete Column Using Carbon Fibre Reinforced Polymer Againsts Corrosion." *Electrochimica Acta*. Vol. 278, 124 – 136. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.05.037>
- Nguyen, C. V., Mangat, P. S., Lambert, P., O'Flaherty, F. J., & Jones, G. (2014). "Dual Function Carbon Fibre Reinforced Anode System for Concrete Structures." *Materials and structures*. Vol. 48, No. 7, 2157 – 2167. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0300-0>
- Wilson, K., Jawed, M., & Ngala, V. (2013). "The Selection and Use of Cathodic Protection Systems for the Repair of Reinforced Concrete Structures." *Construction and Building Materials*. Vol. 39, 19–25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.05.037>