

PENGARUH PERBEDAAN KOROSI AWAL TERHADAP PENGGUNAAN CARBON FRP SEBAGAI ANODA *IMPRESSED CURRENT CATHODIC PROTECTION SYSTEM*

Samuel Eric¹, Kennedy², Daniel Tjandra³ dan Gunawan Budi Wijaya⁴

ABSTRAK : Penanganan terhadap stuktur beton bertulang yang berkarat diperlukan penanganan perkuatan dan penanganan perlindungan korosi. Penanganan perlindungan korosi yang sering digunakan pada stuktur beton bertulang adalah sisten *impressed current cathodic protection*. Penggunaan sistem *impressed current cathodic protection* (ICCP) pada struktur yang berkarat selama ini dibatasi oleh mahalnnya harga material anoda. Untuk menambah nilai ekonomis dari teknik ini, *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP) yang biasanya digunakan sebagai material perkuatan dipakai juga sebagai anoda dari perlindungan aktif sistem ICCP. Dua jenis korosi awal (korosi awal rendah dan tinggi dengan kehilangan massa teoritis 6% dan 18%) diberikan ke spesimen beton dan diberikan perlindungan aktif dengan CFRP sebagai anodanya. Tes potensial *half-cell* dilakukan untuk menginvestigasi efektifitas dari perlindungan aktif. Perlindungan aktif yang diberikan berhasil memberikan polarisasi ke baja tulangan dan menghasilkan kondisi korosi yang lebih pasif pada dua jenis korosi awal. Namun, perlindungan aktif ditemui kurang efektif dalam melindungi spesimen dari korosi pada spesimen yang memiliki kehilangan massa 6%. Efisiensi dari perlindungan korosi pada spesimen yang memiliki kehilangan massa 18% kurang konklusif sehingga penelitian lebih lanjut diperlukan.

KATA KUNCI: beton bertulang, korosi, *carbon fiber reinforced polymer*, *impressed current cathodic protection*

1. PENDAHULUAN

Salah satu penyebab utama berkurangnya daya dukung beton bertulang adalah korosi pada baja tulangan, terutama korosi oleh klorida (Koleva et al., 2007). Volume produk korosi yang lebih besar ini memberikan tekanan pada beton disekitarnya dan menyebabkan retakan pada beton. Proses korosi ini jika dibiarkan akan mengurangi luas penampang tulangan dan akhirnya mengurangi daya dukung baja tulangan (Rodriguez, 1996).

Federal Highway Administration Amerika Serikat menyatakan bahwa metode *impressed current cathodic protection* (ICCP) adalah satu-satunya metode yang dapat menghentikan korosi di beton yang mengandung klorida (Barnhart, 1982). Metode ini menghubungkan anode eksternal ke logam yang akan dilindungi dengan sebuah arus listrik sehingga logam yang dilindungi menjadi katodik dan tidak mengalami korosi. Anode pada penelitian ini menggunakan *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP) yang biasanya dipakai dalam perkuatan beton. Penggunaan CFRP sebagai anoda ini menghilangkan kebutuhan penggunaan anoda konvensional lain yang relatif lebih mahal.

Hingga saat ini, sangat sedikit penelitian mengenai penggunaan praktis dari CFRP sebagai anode pada metode ICCP untuk melindungi baja tulangan pada beton dari korosi terutama percobaan yang parameternya memenuhi standar nasional Indonesia. Penelitian ini berfokus untuk meneliti penggunaan yang ideal terhadap CFRP sebagai anode pada metode ICCP dan meneliti performa CFRP selama proses polarisasi dan efeknya terhadap ikatan CFRP dengan lapisan beton.

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, m21415099@john.petra.ac.id

² Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, m21415168@john.petra.ac.id

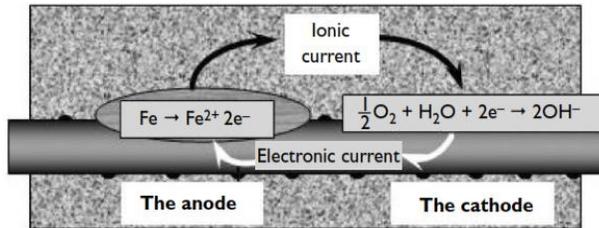
³ Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, danieljtj@petra.ac.id

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

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Mekanisme Korosi

Korosi pada baja tulangan merupakan proses bereaksinya atom-atom Fe menjadi ion Fe^{2+} atau Fe^{3+} seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1** di bawah. Dengan adanya air dan oksigen yang cukup maka ion Ferrous (Fe^{2+}) akan larut dalam air membentuk Ferrous Hidroksida. Korosi dapat mengakibatkan pengurangan luas permukaan baja tulangan dan juga menghasilkan Ferric Hidroksida $Fe(OH)_3$ yang volumenya bisa mencapai enam kali lipat lebih besar dari volume baja yang teroksidasi. Fenomena bertambahnya volume ini memberikan tekanan dari dalam beton yang mengakibatkan keretakan (*crack*) dan pengelupasan selimut beton (*spalling*) (Broomfield, 2006).



Gambar 1. Mekanisme Korosi Tulangan dalam Beton

2.2. Half Cell Potential Test

Half Cell Potential Test merupakan salah satu metode untuk mengamati korosi baja tulangan dalam beton dengan dasar beda potensial. Standar yang digunakan mengacu pada *American Standard Testing and Material (ASTM) C876 "Standard Test Method for Half Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete"*. Kabel kutub negatif dihubungkan ke *reference electrode*, dan kabel kutub positif dihubungkan ke tulangan dalam beton. Hasil pembacaan dari *half cell potential test* berupa beda potensial (mV), semakin negatif beda potensial maka semakin tinggi indikasi korosi tulangan di dalam beton. Hubungan antara nilai beda potensial dengan peluang terjadinya korosi dapat dilihat pada **Tabel 1**.

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

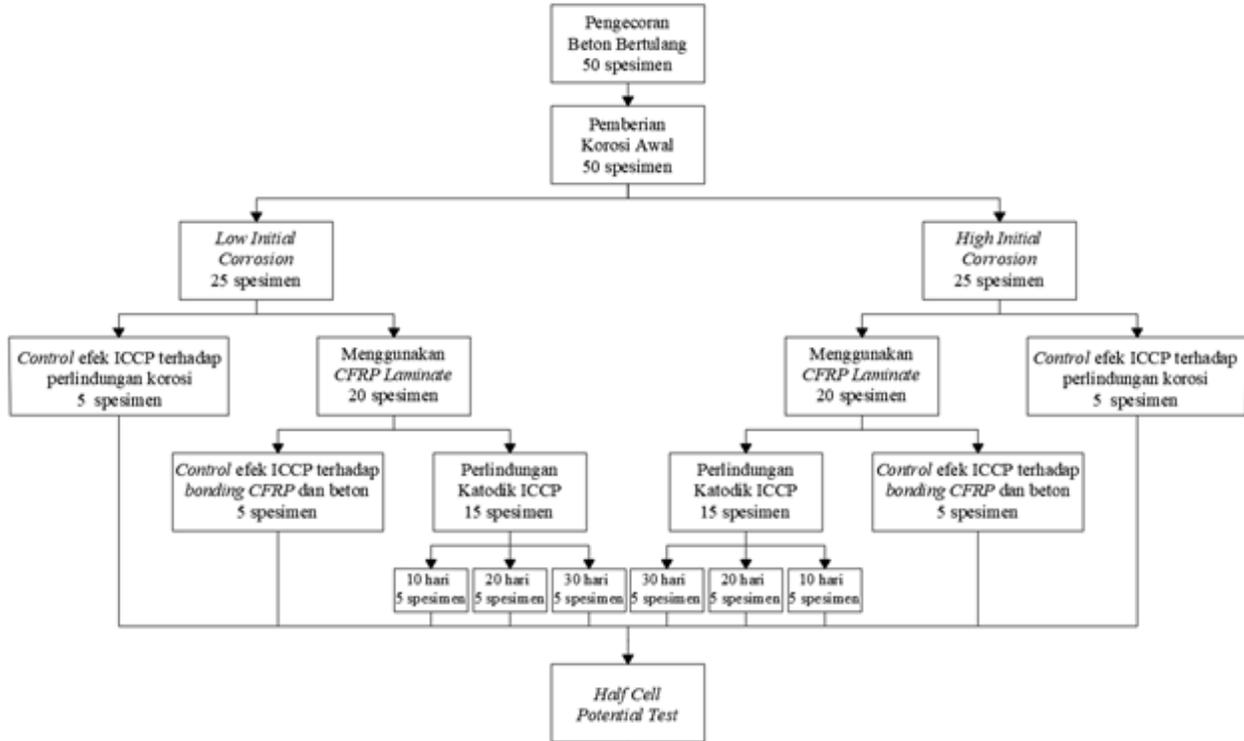
Nilai Pembacaan Potensial (mV) terhadap elektrode acuan (Tembaga Sulfat-CuSO4)	Peluang Terjadinya Korosi (%)
< -350	90
-200 s.d -350	50
> -200	10

2.3. Carbon FRP sebagai anoda *Impressed Current Cathodic Protection*

Carbon FRP sering digunakan pada perkuatan struktur beton bertulang yang rusak akibat korosi. *Carbon FRP* juga ditemukan memiliki sifat konduktif listrik sehingga juga dapat digunakan sebagai anoda pada sistem *ICCP* (Gadve, Mukherjee, & Malhotra, 2011). Selain itu, *carbon* merupakan material yang memiliki sifat lebih reaktif daripada besi sehingga dapat digunakan sebagai anoda. Secara prinsip, teknik proteksi katodik menurunkan nilai potensial baja tulangan ke arah lebih negatif daripada potensial korosinya, mengurangi perbedaan potensial antara daerah anodik dan katodik dapat menurunkan laju korosi sampai pada nilai terkecil. Hal ini dapat dicapai dengan cara memberikan arus searah (DC) pada baja tulangan dalam beton bertulang dan teknik ini dinamakan *Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)* (Yehia & Host, 2010). Dalam *Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)* di penelitian ini, sebuah anoda berupa CFRP dihubungkan ke kutub positif dari sumber arus listrik DC, sedangkan baja tulangan bertindak sebagai katoda terhubung pada kutub negatif.

3. METODE PENELITIAN

Proses Penelitian yang dilakukan ditunjukkan oleh *flowchart* pada **Gambar 2** di bawah ini.



Gambar 2. Flowchart Metode Penelitian

3.1. Pembuatan Benda Uji

Spesimen beton kubus 150 mm × 150 mm × 150 mm dicor dan baja tulangan dengan diameter 10 mm ditanamkan di tengah penampang beton. Selimut beton pada sisi samping tulangan dijaga pada jarak 70 mm (SNI 03, 2000) dan 20 mm pada bagian bawahnya. Spesimen beton yang digunakan memiliki mutu f_c' 20,75 MPa. Baja tulangan yang digunakan adalah baja tulangan polos dengan kapasitas leleh 240 MPa dengan panjang 250 mm. Pita perekat *polytetrafluoroethylene* atau *teflon* direkatkan pada bagian bawah baja tulangan dan bagian atas baja tulangan yang berbatasan dengan beton. *Teflon* bertindak sebagai perlindungan bagi baja tulangan sehingga hanya bagian tengah tulangan sepanjang 100 mm yang terbenam dalam beton yang mengalami korosi. Selanjutnya, dilakukan *curing* selama 28 hari pada beton bertulang.

3.2. Pemberian Korosi Awal

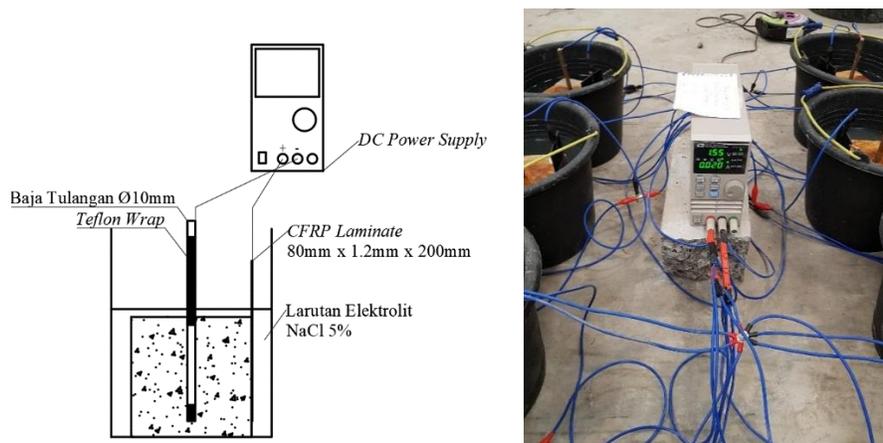
Setelah dilakukan *curing* selama 28 hari, korosi awal diberikan ke spesimen untuk mensimulasikan kondisi struktur beton yang telah mengalami korosi. Tiap spesimen direndam ke dalam wadah yang mengandung larutan NaCl 5% yang menjadi elektrolit. *Direct current (DC) power source* digunakan untuk memberikan aliran anodik ke tulangan. Kutub positif dihubungkan ke tulangan yang bertindak sebagai anoda dan kutub negatif dihubungkan ke batang *stainless steel* yang akan bertindak sebagai katoda. Dua level korosi awal diberikan yaitu: korosi awal rendah dengan kehilangan massa teoritis tulangan sebanyak 6% dan korosi awal tinggi dengan kehilangan massa teoritis tulangan sebanyak 18% (Bahekar & Gadve, 2017). Arus sebesar 80 mA (densitas arus = 2,546 mA/cm²) diberikan ke tiap spesimen beton bertulang. Durasi dari pemberian arus ditentukan berdasarkan Hukum Faraday yaitu selama 44,5 jam untuk spesimen yang diberikan korosi awal rendah dan selama 133,5 jam untuk spesimen yang diberikan korosi awal tinggi.

3.3. Pemasangan CFRP Laminate pada Spesimen Beton Bertulang

Spesimen dikeringkan sebelum dilakukan pemasangan CFRP laminate. Permukaan spesimen dihaluskan dan dibersihkan dari kotoran. CFRP laminate dengan lebar 80 mm dan tebal 1,2 mm dipasang ke permukaan spesimen beton bertulang untuk mensimulasikan perkuatan struktur beton yang mengalami korosi. Epoxy yang digunakan untuk menempelkan CFRP ke permukaan beton bukan merupakan bahan yang konduktif listrik. Oleh karena itu, epoxy dimodifikasi agar menjadi konduktif dengan mencampurkan bubuk grafit dan epoxy dengan persentase 12,5%.

3.4. Perlindungan Katodik ICCP menggunakan CFRP

Spesimen yang telah dipasangkan CFRP direndam ke dalam larutan NaCl 5% untuk mensimulasikan lingkungan korosif selama 10, 20, dan 30 hari. Selama masa perendaman, perlindungan katodik terhadap spesimen menggunakan CFRP dilakukan. Sebagai sumber listrik DC, digunakan power supply DC dengan kapasitas 0-60 V dan 5 A. British Standart European Norm (BSEN) 12696 menyarankan densitas arus ICCP sebesar 2-20 mA/m² (BSEN 12696, 2012). Pada penelitian ini digunakan arus DC dengan densitas arus sebesar 20 mA/m². Kutub positif dihubungkan ke CFRP bertindak sebagai anoda dan kutub negatif dihubungkan ke baja tulangan bertindak sebagai katoda seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema Kerja Perlindungan Katodik ICCP

3.5. Pengamatan Korosi dengan Half Cell Potential Test

Selama perendaman spesimen di dalam larutan NaCl 5%, dilakukan *half test potential test* pada semua spesimen. *Half cell potential* tulangan diukur sesuai dengan ASTM C876 menggunakan referensi ke standart Perak/Perak Klorida (Ag/AgCl) 0,5 M KCl elektroda referensi (ASTM C876, 2015). Pengukuran *Half cell potential test* pada semua spesimen dilakukan setiap lima hari selama masa perendaman. Pengamatan dilakukan pada 24 jam setelah arus listrik dimatikan untuk memastikan depolarisasi yang sempurna pada tulangan. Hasil pembacaan dari test *half cell potential* berupa beda potensial antara baja tulangan dengan elektroda acuan.

4. HASIL DAN ANALISIS

4.1. Analisa Spesimen dari Dua Level Korosi Awal

Sebanyak 20 buah spesimen dari kedua level korosi awal diukur beda potensialnya dengan metode *half cell potential test* sebelum dan setelah korosi awal. Semua spesimen mengalami perubahan potential menuju ke arah yang lebih negatif. Hal ini menunjukkan bahwa metode korosi awal yang dilakukan berhasil memberikan korosi pada spesimen beton bertulang. Perubahan beda potensial sebelum dan setelah proses korosi awal memiliki rata-rata selisih sebesar 448 mV pada spesimen dengan korosi awal tinggi (KAT) dan

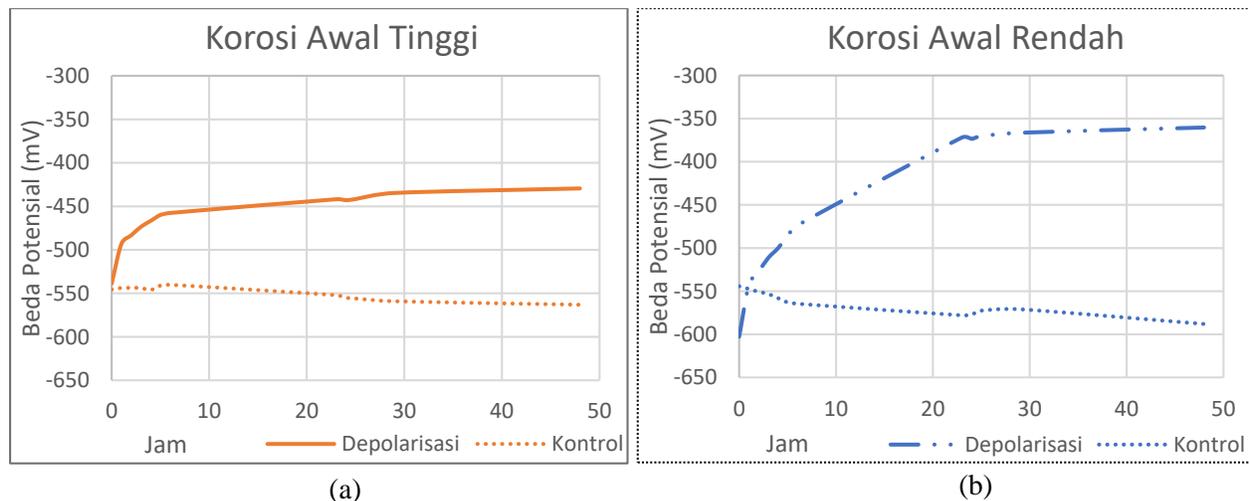
228 mV pada spesimen dengan korosi awal rendah (KAR). Selain pembacaan *half-cell potential test*, tingkat korosi yang berbeda dapat dilihat dari tampak luar spesimen seperti yang terlihat pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Kondisi Luar Spesimen (a) Spesimen Korosi Awal Tinggi (b) Spesimen Korosi Awal Rendah

4.2. Analisa Hasil *Half Cell Potential Test*

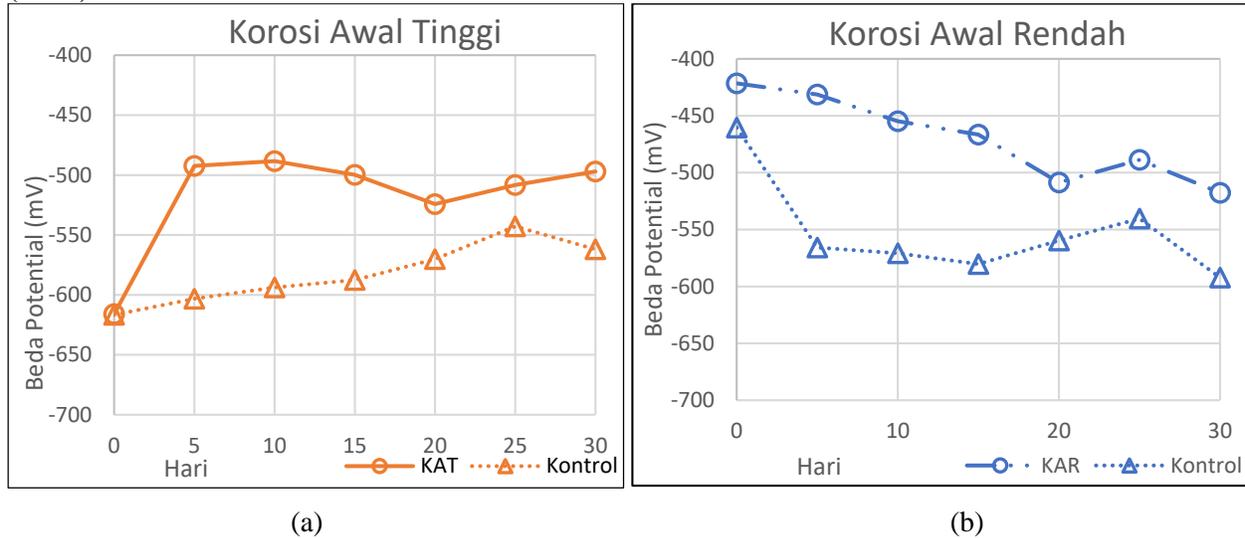
Potensial baja tulangan diukur menggunakan elektroda acuan Ag/AgCl/0,5 M KCl dan sebuah *digital voltmeter*. Pengukuran dilakukan setelah arus polarisasi dimatikan dan dilakukan setiap lima hari. Dua jenis pengukuran yaitu pengukuran sesaat setelah arus polarisasi dimatikan dan pengukuran pada waktu 24 jam setelah arus polarisasi dimatikan dilakukan. Pengukuran pada waktu 24 jam setelah arus dimatikan bertujuan untuk memberi kesempatan bagi spesimen untuk mengalami depolarisasi sehingga beda potensial yang diukur akurat dan tidak terpengaruh oleh pemberian arus polarisasi. Hasil potensial pada waktu sesaat setelah listrik dimatikan diamati lebih negatif daripada hasil potensial pada waktu spesimen telah mengalami depolarisasi. Selanjutnya, dilakukan juga pengamatan perubahan potensial selama proses depolarisasi yang terjadi pada spesimen dan dibandingkan dengan spesimen yang tidak diberikan polarisasi. **Gambar 5** menunjukkan grafik perubahan potensial saat spesimen mengalami depolarisasi. Spesimen yang diberikan arus polarisasi mengalami perubahan potensial menjadi lebih positif, sedangkan spesimen yang tidak diberikan arus polarisasi memiliki potensial yang relatif stabil. Perubahan potensial menjadi lebih positif menandakan keberhasilan pemberian polarisasi pada baja tulangan.



Gambar 5. Proses Depolarisasi pada Spesimen Korosi Awal Tinggi (a) dan Korosi Awal Rendah (b)

Selanjutnya dilakukan pengamatan perubahan potensial baja tulangan setiap 5 hari sekali untuk mengetahui kondisi korosi pada spesimen. **Gambar 6** menunjukkan perubahan potensial selama 30 hari pada spesimen

perlindungan katodik (PK) yang diberikan korosi awal tinggi (KAT) dan yang diberikan korosi awal rendah (KAR).



Gambar 6. Perubahan Potensial Spesimen Korosi Awal Tinggi (a) dan Korosi Awal Rendah (b) Selama 30 Hari

Terlihat pada spesimen yang diberi korosi awal rendah perubahan potensial menunjukkan tren semakin negatif baik pada spesimen yang diberikan perlindungan katodik ataupun spesimen kontrol yang tidak diberikan perlindungan katodik. Hal ini menunjukkan bahwa kedua jenis spesimen terus berkarat seiring waktu dan meningkatnya kondisi karat. Dapat disimpulkan bahwa perlindungan katodik pada spesimen yang memiliki korosi awal rendah kurang efektif dalam melindungi spesimen dari korosi. Sebaliknya, pada spesimen yang memiliki korosi awal tinggi cenderung semakin positif baik pada spesimen yang diberikan perlindungan katodik ataupun spesimen yang tidak memperoleh perlindungan katodik. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi karat pada kedua jenis spesimen menurun. Meskipun kondisi karat menurun, tidak dapat disimpulkan keberhasilan perlindungan katodik karena spesimen kontrol juga mengalami perubahan potensial ke arah yang sama. Dibutuhkan pengukuran laju korosi seperti pengukuran *linear polarization* untuk menentukan keberhasilan perlindungan katodik, namun pada penelitian ini pengukuran tersebut tidak dilakukan.

Penyebab dari kurang efektifnya pemberian arus polarisasi pada baja tulangan terhadap perlindungan dari korosi dapat disebabkan oleh terlalu besarnya hambatan pada epoxy. Hambatan yang terlalu besar ini menyebabkan aliran arus perlindungan tidak dapat mengalir dengan baik dari katoda (baja tulangan) ke anoda (CFRP). Di sisi lain, berkurangnya kondisi karat pada spesimen yang diberikan korosi awal tinggi, juga pada spesimen kontrolnya dapat disebabkan oleh formasi produk hasil korosi yang terlalu banyak di sekitar baja tulangan. Hal ini menyebabkan meningkatnya hambatan antara beton dan baja sehingga korosi berkurang. Penelitian lain yang dilakukan oleh Koleva et al. pada tahun 2015 juga mengamati fenomena ini. (Koleva et al., 2015)

Meskipun demikian, bukan berarti arus polarisasi perlindungan katodik yang dilakukan pada penelitian tidak memiliki efek apapun terhadap spesimen. Pada spesimen yang diberi korosi awal rendah dapat diamati spesimen kontrol mengalami penurunan beda potensial yang drastis pada hari ke-5, hal ini tidak dialami oleh spesimen yang memperoleh arus polarisasi. Perbedaan beda potensial antara spesimen kontrol dan spesimen perlindungan katodik di kedua jenis korosi awal juga diamati lebih besar pada hari ke-30 dibanding hari ke-0 dengan spesimen perlindungan katodik memiliki beda potensial yang lebih positif dari spesimen kontrol. Pada spesimen korosi awal rendah yang diberi arus polarisasi, setelah 30 hari spesimen diamati mengalami penurunan potensial sebesar 96 mV sedangkan spesimen kontrolnya mengalami

penurunan yang lebih parah sebesar 132 mV. Pada spesimen korosi awal tinggi yang diberi arus polarisasi, setelah 30 hari spesimen diamati mengalami kenaikan potensial sebesar 119 mV, kenaikan ini lebih baik daripada spesimen kontrolnya yang hanya mengalami kenaikan sebesar 54 mV. Hal ini menunjukkan kondisi karat yang lebih pasif pada spesimen yang diberi arus polarisasi perlindungan katodik pada kedua jenis korosi awal.

5. KESIMPULAN

1. *Carbon fiber reinforced polymer* Sika® Carbodur® dapat dipakai sebagai anoda dari sistem *impressed current cathodic protection*. Tercapainya polarisasi pada baja tulangan ditandai dengan terjadinya depolarisasi setelah arus polarisasi dimatikan. Pada spesimen dengan korosi awal rendah proses depolarisasi membuat perubahan potensial sebesar 229 mV. Pada spesimen dengan korosi awal tinggi proses depolarisasi membuat perubahan potensial sebesar 96 mV. Waktu yang diperlukan spesimen dengan korosi awal rendah dan spesimen dengan korosi awal tinggi untuk mengalami depolarisasi mirip yaitu sekitar 24 jam.
2. Spesimen yang diberi arus polarisasi perlindungan katodik memiliki kondisi korosi yang lebih pasif dibanding dengan spesimen yang tidak diberikan arus polarisasi perlindungan katodik. Spesimen yang diberi korosi awal rendah 6% *theoretical mass loss*, densitas arus perlindungan katodik 20 mA/m², dan kadar grafit dalam epoxy 12,5% mengalami penurunan beda potensial menjadi semakin negatif sebesar 96 mV pada spesimen dengan arus polarisasi dan sebesar 132 mV pada spesimen kontrol. Penurunan beda potensial spesimen dengan arus polarisasi ini menandakan perlindungan katodik kurang efektif dalam perlindungan terhadap korosi saat spesimen korosi awal rendah direndam selama 30 hari dalam larutan 5% NaCl.
3. Setelah digunakan sebagai anoda dalam perlindungan katodik, pengamatan visual menunjukkan *carbon fiber reinforced polymer laminate* tidak mengalami kerusakan.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

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

7. REFERENSI

- ASTM C876-09. (2015). "Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete". *ASTM*, 91(Reapproved), 1–6. <https://doi.org/10.1520/C0876-09.2>
- Bahekar, P. V., & Gadve, S. S. (2017). "Impressed Current Cathodic Protection of Rebar in Concrete Using Carbon FRP Laminate". *Construction and Building Materials*, 156, 242–251. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.145>
- Barnhart, R.A., (1982) Federal Highway Administrator, Memorandum entitled "*FHWA Position on Cathodic Protection Systems*", Federal Highway Administration, Washington, DC.
- Broomfield, J. P. (2006). *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair*, Second Edition. <https://doi.org/10.4324/9780203414606>
- BSI, B. S. I. (2012). *BSI Standards Publication Cathodic Protection of Steel in Concrete* (ISO 12696 : 2012).
- Gadve, S., Mukherjee, A., Malhotra, S.N. (2011). "Active Protection of Fiber-reinforced Polymer-wrapped Reinforced Concrete Structures Against Corrosion". *Corrosion*, 67(2), 25002–25011.
- J. Rodriguez. (1996). "Corrosion of Reinforcement and Service Life of Concrete Structures". *Proceedings of 7th International Conference on DBMC*, 1996, 1996, 1, 117–126.
- Koleva, D. A., de Wit, J. H. W., van Breugel, K., Lodhi, Z. F., & Ye, G. (2007). "Investigation of Corrosion

- and Cathodic Protection in Reinforced Concrete”. *Journal of The Electrochemical Society*, 154(5), C261. <https://doi.org/10.1149/1.2715313>
- Koleva, D.A., Z. Guo, K.V. Breugel, J.H.W. de Wit, N. Boshkov, (2015). “Conventional and pulse cathodic protection of reinforced concrete: electrochemical behavior of the steel reinforcement after corrosion and protection”. *Materials and Corrosion*, 60, 344-354.
- SNI 03-2000. 2000. *Peraturan Tata Cara Perencanaan Gedung Indonesia*, Badan Standarisasi Nasional, Bandung.
- Yehia, S., Host, J.(2010). “Conductive Concrete for Cathodic Protection of Bridge Decks”. *ACI Materials Journal*, 107(6), 578-586.