

PENGARUH LUAS PERMUKAAN *CONDUCTIVE EPOXY* TERHADAP EFEKTIVITAS *CATHODIC PROTECTION*

Kevin Jonathan Santoso¹, Jessica Agustine Widjaja², Daniel Tjandra³ and Gunawan Budi Wijaya⁴

ABSTRAK : Dalam mengatasi masalah korosi pada beton bertulang, metode yang umum digunakan adalah *Impressed Current Cathodic Protection* (ICCP). Adanya korosi pada beton bertulang membuat *serviceability* dan kekuatan ultimit struktur menurun. *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) merupakan salah satu material yang dapat digunakan sebagai anoda untuk ICCP sekaligus berfungsi sebagai perkuatan struktur (*dual system*). Pada penelitian ini, variabel yang digunakan untuk mengetahui pengaruh efektivitas sistem ICCP selama 30 hari adalah pengaplikasian luas permukaan pada campuran *epoxy* dengan grafit pada CFRP. Sebelum dilakukan perlindungan terhadap korosi, setiap spesimen beton diberikan korosi awal yang tinggi (kehilangan massa teoritis 18%). CFRP yang ditempelkan pada spesimen beton bertulang menggunakan campuran *epoxy* dengan kadar grafit 10%; 12,5%; 15%. Sedangkan, variasi pengaplikasian luas permukaan *epoxy* pada CFRP adalah 10x130 mm², 20x130 mm², dan 30x130 mm². *Half cell potential test* dilakukan selama lima hari sekali untuk mengetahui peluang terjadinya korosi pada beton. Dengan variasi pengaplikasian luas permukaan campuran *epoxy*, didapat bahwa luas permukaan 30x130 mm² menjadi luas pengaplikasian yang lebih efektif dibandingkan dengan 10x130 mm² dan 20x130 mm² ditandai dengan adanya kenaikan beda potensial hingga 31% dari sebelum ICCP diberikan.

KATA KUNCI: luas permukaan, korosi, *carbon fiber reinforced polymer*, *impressed current cathodic protection*

1. PENDAHULUAN

Korosi merupakan masalah yang paling umum terjadi pada struktur beton bertulang. Salah satu penyebab terjadi korosi adalah akibat penetrasi ion klorida pada beton (Carmona, Garces, & Climent, 2015). Jika korosi dibiarkan terus terjadi, maka ikatan antara tulangan baja dengan beton akan melemah sehingga memicu retak pada beton yang berdampak pada berkurangnya *serviceability* dan kekuatan ultimit struktur beton bertulang.

Metode yang umum digunakan untuk perlindungan struktur beton bertulang adalah metode *impressed current cathodic protection* (ICCP). Sistem ICCP ini dilakukan dengan cara menghubungkan logam yang ingin dilindungi dengan sebuah anoda eksternal dan dialiri arus searah (DC) dari sebuah power supply sehingga logam menjadi katodik dan korosi dapat dihindari (Bahevar & Gadve, 2017). Dalam sistem ICCP, pemilihan anoda merupakan salah satu faktor penting dalam mendesain sistem ICCP. Hal ini dikarenakan tingkat konduktivitas anoda akan mempengaruhi tingkat efektivitas perlindungan yang diberikan oleh ICCP (Nguyen, Mangat, Lambert, O'Flaherty, & Jones, 2014). Pada penelitian ini, anoda yang digunakan adalah CFRP karena memiliki fungsi ganda (*dual system*) yaitu sebagai anoda sistem ICCP dan sekaligus untuk perkuatan struktur (Bahekar & Gadve, 2017; Lu, Hu, Li, & Tang, 2018; Nguyen, Mangat, Lambert, O'Flaherty, & Jones, 2014). Penggunaan grafit dengan kadar 12,5% adalah kadar grafit yang paling optimum digunakan untuk merekatkan sekaligus sebagai konduktor yang baik untuk metode ICCP (Wijaya, Lays, Tanto & Tjandra, 2019). Namun, penggunaan grafit tersebut masih belum terlalu efektif. Oleh karena itu, pada penelitian ini berfokus pada variasi luas permukaan campuran *epoxy* dan kadar grafit. Hal ini diharapkan dapat meningkatkan efektivitas ICCP.

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, m21416010@john.petra.ac.id

² Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, m21416053@john.petra.ac.id

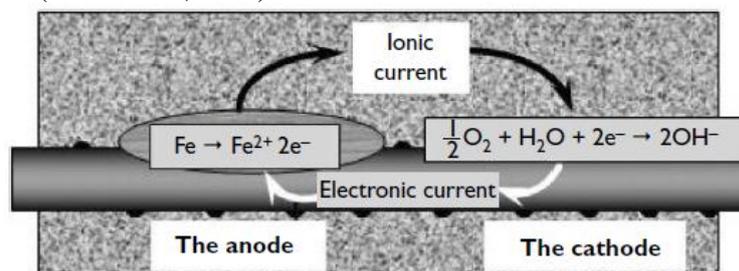
³ Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, danieljtj@petra.ac.id

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

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Korosi

Korosi merupakan penurunan kualitas yang disebabkan oleh reaksi kimia bahan logam dengan unsur-unsur lain yang terdapat di alam. Pada mulanya, elektron dari atom *Fe* dilepaskan sehingga menjadi ion Fe^{2+} atau Fe^{3+} . Elektron tersebut bereaksi dengan air dan oksigen membentuk ion hidroksil (OH^-). Dengan terbentuknya OH^- , maka sifat alkali dari beton akan meningkat dan memperkuat lapisan pasif sehingga menghambat pengaruh karbonasi dan ion klorida pada katoda. Selain itu, ion Fe^{2+} akan larut dan membentuk *Ferrous Hidroksida*. Ketika lapisan pasif rusak, *Ferrous Hidroksida* akan bereaksi dengan air dan oksigen membentuk *Ferric Hidroksida* ($Fe(OH)_3$) sehingga karat mulai terbentuk pada tulangan. Korosi dapat mengakibatkan pengurangan luas permukaan tulangan baja dan menghasilkan volume $Fe(OH)_3$ antara enam hingga sepuluh kali lipat lebih besar dari volume baja yang teroksidasi. Dengan demikian, tekanan dari dalam beton menyebabkan keretakan (*crack*) dan pengelupasan selimut beton (*spalling*) (Broomfield, 2006). **Gambar 1** menunjukkan mekanisme terjadinya korosi pada tulangan dalam beton (Broomfield, 2006).



Gambar 1. Mekanisme Terjadinya Korosi pada Tulangan dalam Beton

2.2. *Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)*

Permasalahan korosi yang umum terjadi pada struktur beton bertulang umumnya dapat diselesaikan dengan menggunakan metode ICCP. Sistem ini mengalirkan elektron menuju tulangan baja yang ingin dilindungi sehingga tulangan menjadi terpolarisasi negatif. Tulangan yang terpolarisasi negatif dapat menolak ion klorida yang dapat merusak lapisan pasif tulangan tersebut, serta terbentuk ion hidroksil (OH^-) yang menyebabkan tulangan menjadi lebih basa sehingga korosi dapat dicegah (Lu et.al, 2018). Ada dua hal yang wajib diperhatikan dalam mendesain sistem ICCP yaitu pemilihan jenis anoda dan *current density*. Dua hal tersebut sangat mempengaruhi tingkat efektivitas perlindungan yang diterima beton maupun efek samping yang dihasilkan dari ICCP.

2.3. *Half Cell Potential Test*

Half cell potential test merupakan metode pengujian yang dapat mengidentifikasi lajur korosi pada suatu struktur beton bertulang. Proses identifikasi dapat dilakukan dari besarnya nilai beda potensial tulangan dalam beton dengan sebuah *reference electrode*. Metode ini juga dapat mengukur tingkat efektivitas dari perlindungan katodik (ICCP) yang diberikan pada tulangan (ASTM Committee G01, 2009). Standar yang digunakan dalam metode *half cell potential test* mengacu pada ASTM C876 "Standard Test Method for Half Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete". *Half cell potential test* dilakukan dengan menghubungkan kutub positif sebuah voltmeter dengan tulangan yang berada di dalam beton, sedangkan kutub negatif dihubungkan dengan sebuah *reference electrode*. Lalu, *reference electrode* ditempelkan pada permukaan beton untuk mengukur nilai beda potensial beton tersebut. Peluang terjadinya korosi juga dapat diperkirakan melalui hasil pembacaan nilai beda potensial pada voltmeter. Semakin negatif beda potensial yang terbaca, maka semakin besar peluang terjadinya korosi tulangan baja dalam beton tersebut.

3. METODE PENELITIAN

3.1. Pembuatan Spesimen Beton Bertulang

Mula-mula, spesimen beton berbentuk kubus berdimensi $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ dicor dan diberi tulangan baja pada bagian tengah penampang beton. Mutu beton yang direncanakan adalah $f_c' 25 \text{ MPa}$. Selimut

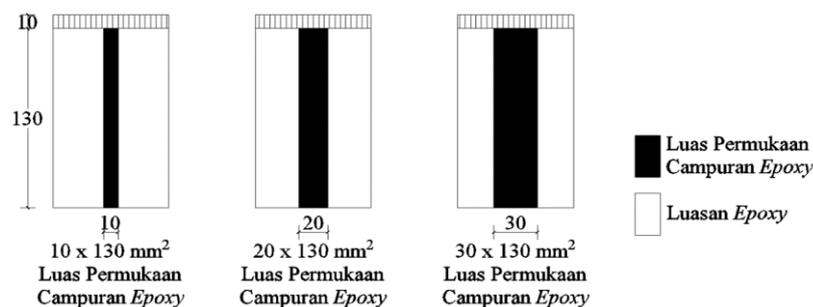
beton pada sisi samping tulangan dibuat sebesar 70 mm dan 20 mm pada sisi bawah. Tulangan yang digunakan adalah tulangan besi polos diameter 10 mm dengan panjang 200 mm. Sebelum ditanam pada spesimen, *teflon tape* terlebih dahulu direkatkan pada bagian atas dan bawah tulangan sehingga tulangan yang mengalami korosi hanya pada bagian tengah sepanjang 100 mm. Kemudian, dilakukan proses *curing* selama 28 hari dengan cara merendam spesimen tersebut dalam air.

3.2. Pemberian Korosi Awal

Setelah spesimen beton selesai di-*curing*, diperlukan pemberian korosi awal (*initial corrosion*) pada setiap spesimen untuk mensimulasikan kondisi struktur beton yang mengalami korosi. Pada bagian atas penampang tulangan, tulangan di bor dan ditanamkan sebuah baut yang berfungsi untuk mengalirkan listrik pada tulangan saat pemberian *initial corrosion* dan ICCP. Metode yang digunakan untuk pemberian korosi awal adalah metode *impressed current*. Sebuah DC *power supply* digunakan untuk mengalirkan arus yang konstan. Spesimen direndam dalam larutan NaCl 5% yang berperan sebagai elektrolit dan bertujuan untuk membuat korosi yang terjadi pada tulangan memenuhi Hukum Faraday (Ahmad, 2009). Level korosi awal yang diberikan adalah *high corrosion level* dengan *mass loss* teoritis sebesar 18%. Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan Faraday, besar arus yang diberikan pada masing-masing spesimen sebesar 74,5 mA dan durasi pemberian arus dilakukan selama 143,2 jam untuk dapat mencapai level korosi yang direncanakan.

3.3. Pemasangan CFRP Laminate pada Spesimen Beton Bertulang

Setelah tahap pemberian korosi awal selesai, spesimen kemudian dikeluarkan dari larutan NaCl lalu dikeringkan. Setelah kering, salah satu sisi permukaan beton ditempelkan CFRP *laminat* menggunakan *epoxy*. CFRP *laminat* yang digunakan memiliki dimensi 80 x 1,2 x 140 mm³. Pada bagian permukaan CFRP *laminat* yang terekspos dengan larutan NaCl, dilapisi dengan *teflon tape* agar *protective current* yang dihasilkan dari proses ICCP dapat langsung mengalir masuk ke beton. *Epoxy* yang digunakan bersifat adesif sehingga harus ditambahkan bahan konduktif agar dapat bersifat konduktif serta mampu mengalirkan arus saat proses ICCP. Dalam penelitian ini, campuran *epoxy* yang ditempelkan akan dibagi menjadi 3 macam luas permukaan campuran *epoxy* dan grafit: 10x130 mm²; 20x130 mm²; dan 30x130 mm², seperti yang bisa dilihat pada **Gambar 2**. Sedangkan bahan konduktif yang dipakai adalah bubuk grafit dengan kadar 10%, 12,5%, & 15%.

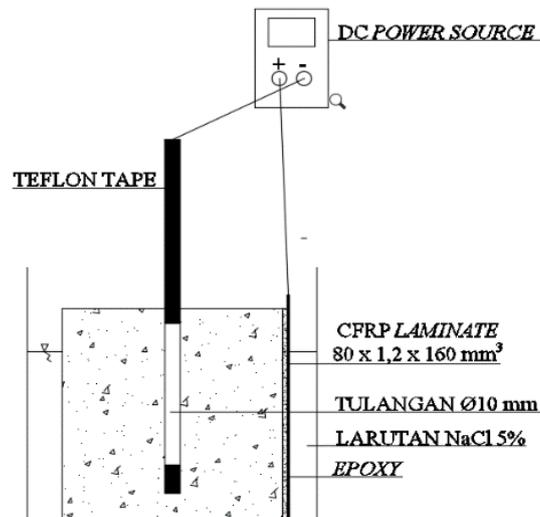


Gambar 2. Konfigurasi CFRP Laminate yang Diberi Campuran Epoxy dan Grafit

3.4. Pemberian ICCP pada Spesimen Beton Bertulang yang Telah Dipasang CFRP Laminate

Spesimen yang telah dipasang CFRP *laminat* direndam dalam larutan NaCl 5% bertujuan untuk mensimulasikan kondisi struktur pada lingkungan korosif. Perlindungan katodik dengan menggunakan CFRP pada spesimen dilakukan selama masa perendaman. Setelah spesimen direndam selama 4 hari, spesimen dikeluarkan dari larutan dan dikeringkan selama 1 hari. Siklus ini dilakukan selama 30 hari. Hal tersebut bertujuan agar tersedia oksigen yang diperlukan tulangan untuk mengalami korosi sehingga proses korosi masih terus berjalan. Pemberian ICCP ini menggunakan DC *power supply* untuk mengalirkan arus konstan. Pada penelitian ini, densitas arus sebesar 10 mA/m² dipilih karena terbukti lebih efektif dalam mengurangi lajur korosi dengan level korosi yang tinggi (Wijaya et al., 2019). Tulangan berperan sebagai katoda dan dihubungkan dengan kutub negatif sedangkan CFRP *laminat*

berperan sebagai anoda dan dihubungkan pada kutub positif. Konfigurasi spesimen saat pemberian ICCP dapat dilihat pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Konfigurasi Spesimen Saat Pemberian ICCP

3.5. Monitoring Korosi dengan *Half Cell Potential Test*

Half cell potential test dilakukan selama 5 hari sekali selama proses ICCP berlangsung, yaitu 25 jam setelah arus listrik dimatikan. Hal ini bertujuan agar beton mengalami depolarisasi dimana nilai tulangan telah stabil (BS EN 12696, 2012). *Half cell potential test* memberikan hasil bacaan berupa beda potensial yang dibaca pada sebuah voltmeter yang dihubungkan dengan *reference electrode*. *Reference electrode* dihubungkan dengan kutub negatif pada voltmeter, sedangkan tulangan pada spesimen dihubungkan dengan kutub positif voltmeter. *Reference electrode* yang digunakan untuk penelitian ini adalah *Silver/Silver Chloride* (Ag/AgCl). Berdasarkan ASTM C876-09, perlu dilakukan konversi ke *reference electrode Copper/Copper Sulfate* (Cu/CuSO₄) dengan mengurangi hasil pembacaan *half cell potential test* sebesar 66 mV. Pembacaan beda potensial dilakukan pada satu titik di bagian tengah sisi spesimen. Kemudian, nilai beda potensial yang telah dikonversi dibandingkan dengan nilai pada **Tabel 1**.

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

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

3.6. Pengamatan Visual

Pengamatan visual dilakukan sebelum dan sesudah proses ICCP diberikan. Perbandingan pada CFRP *laminat* dilakukan pada perubahan bentuk, warna, dan kondisi permukaan baik sebelum maupun sesudah proses ICCP. Selain CFRP, setiap tulangan baja pada masing-masing spesimen beton juga diamati secara visual. Setiap spesimen beton dibongkar dengan menggunakan *jack drill* untuk melihat kondisi tulangan pada bagian tengah spesimen. Setelah dibongkar, kondisi tulangan baja yang telah diberi ICCP dibandingkan dengan yang tidak diberi ICCP.

4. HASIL DAN ANALISIS

4.1. Analisa Korosi Awal pada Spesimen

Spesimen beton diberikan korosi awal dengan metode *impressed current*. Seluruh spesimen diukur beda potensialnya menggunakan *half cell potential test*. Sebelum diberi korosi awal, nilai rata-rata beda

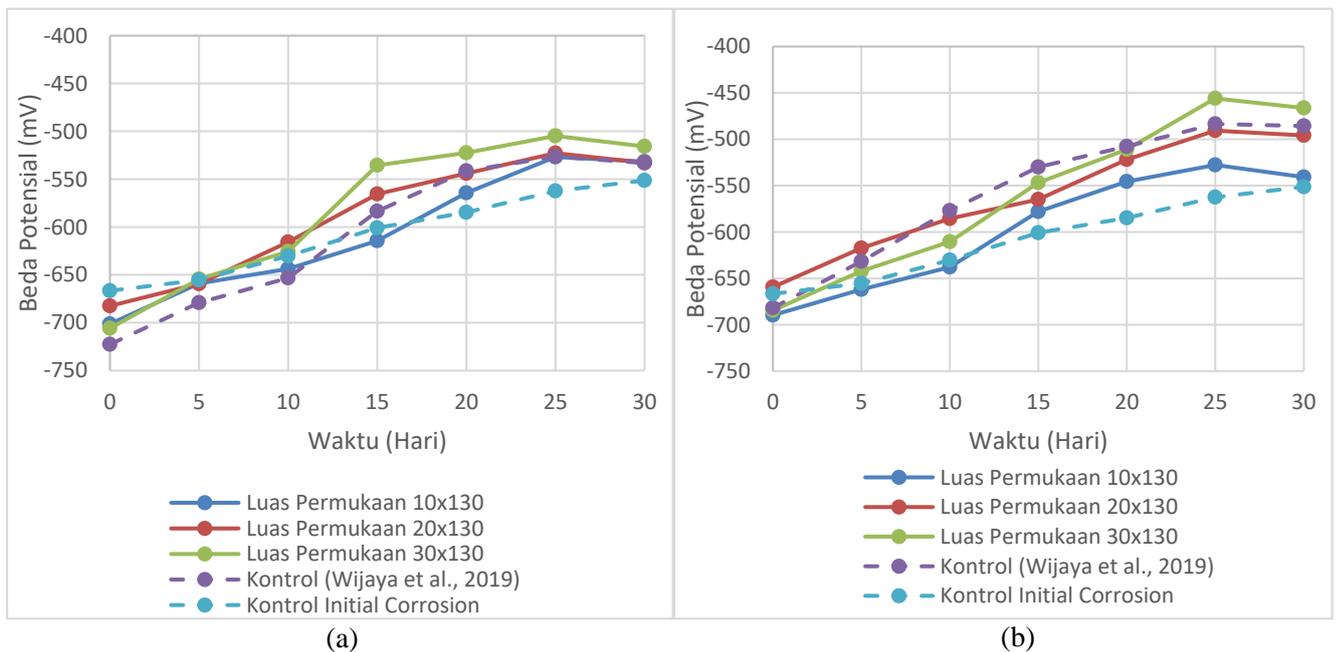
potensial tulangan adalah $-109,44$ mV (peluang korosi 10%). Sesudah diberi korosi awal, nilai rata-rata beda potensial tulangan menjadi $-680,20$ mV (peluang korosi 90%). Hal tersebut menunjukkan bahwa setiap spesimen telah sukses diberikan korosi awal. Selain kenaikan beda potensial, kondisi visual spesimen juga dapat menunjukkan keberhasilan pemberian korosi awal, seperti yang terlihat pada **Gambar 4**.

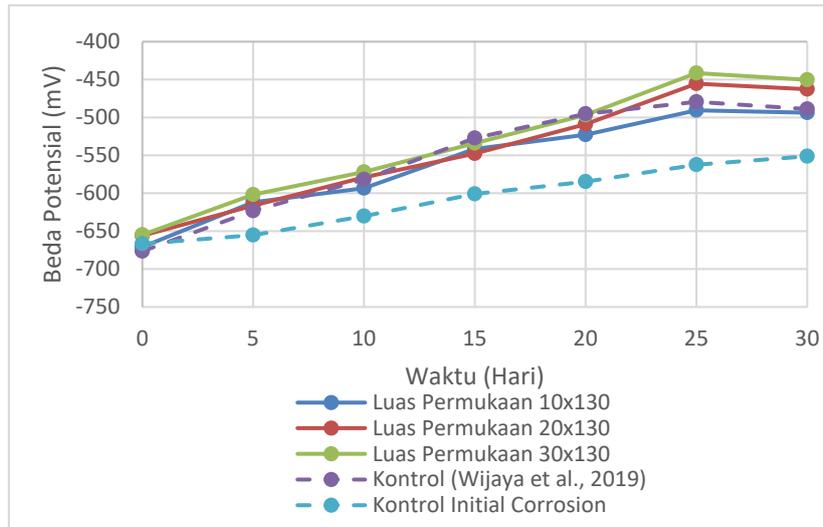


Gambar 4. Tipikal Tampak Visual Spesimen Setelah Diberi Korosi Awal

4.2. Analisa Hasil *Half Cell Potential Test*

Half cell potential test dilakukan setiap lima hari sekali dan setelah spesimen mengalami depolarisasi secara keseluruhan yaitu 25 jam setelah arus listrik dimatikan. **Gambar 5** menunjukkan perubahan beda potensial dari spesimen selama 30 hari dengan variasi luas permukaan dan variasi kadar grafit. Dari grafik tersebut, dapat disimpulkan bahwa beda potensial pada semua spesimen yang dipasang CFRP *laminat* mengalami kenaikan. Hal tersebut menunjukkan bahwa aliran listrik saat proses ICCP pada spesimen sama-sama dapat mengalir ke tulangan yang telah mengalami korosi.





(c)

Gambar 5. Beda Potensial Spesimen dengan Kadar (a) Grafit 10%; (b) Grafit 12,5%; (c) Grafit 15%

Gambar 5 juga menunjukkan bahwa luas permukaan campuran *epoxy* yang diaplikasikan pada CFRP *laminat* sangat mempengaruhi proses ICCP. Semakin luas permukaan yang diberikan, maka semakin banyak peluang listrik yang dapat dihantarkan ke tulangan yang telah mengalami korosi (Cahaya, 2011). Namun, dari grafik tersebut dapat dilihat juga bahwa efektivitas pengaplikasian luas permukaan tersebut lebih baik ditentukan kurang lebih sesuai dengan diameter dari tulangan yang digunakan. Hal ini dikarenakan semakin dekat jarak tulangan dengan campuran *epoxy*, maka semakin cepat listrik sampai pada tulangan yang mengalami korosi tersebut sehingga korosi pada tulangan juga cepat berkurang. Namun, luas permukaan yang diaplikasikan juga harus mempertimbangkan kemungkinan kemiringan pemasangan tulangan yang tidak terpantau secara kasat mata. Kemiringan pemasangan tulangan menyebabkan aliran listrik tidak bisa langsung mengenai tulangan yang telah mengalami korosi tersebut dikarenakan jarak yang ditempuh semakin jauh. Oleh karena itu, luas permukaan 30x130 mm² menjadi ukuran luas permukaan yang paling efektif untuk tulangan yang berdiameter 10 mm.

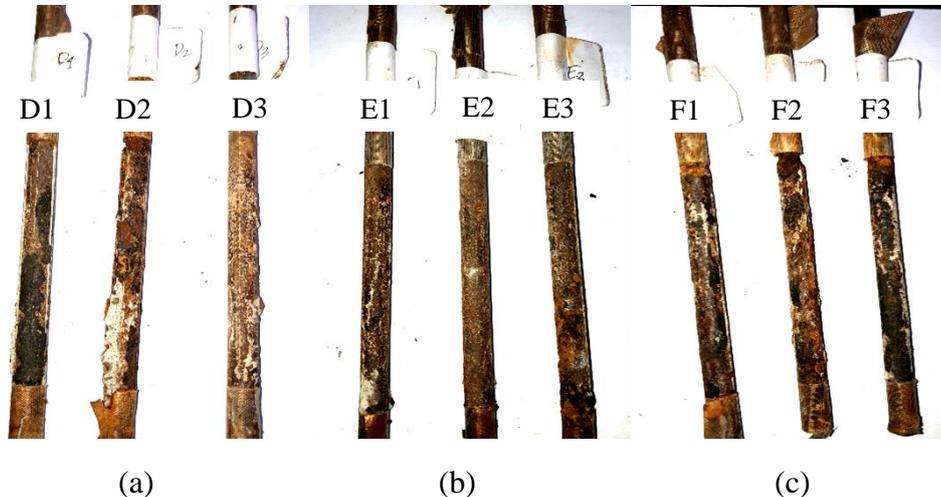
Berdasarkan **Gambar 5**, juga dapat dilihat bahwa kenaikan beda potensial untuk kadar grafit 10% tidak terlalu signifikan. Hal ini dibuktikan dengan kenaikan beda potensial pada spesimen yang diberi ICCP selama 30 hari dengan kadar grafit 10%, baik untuk luas permukaan 10x130 mm² (± 170 mA), 20x130 mm² (± 150 mA), dan 30x130 mm² (± 190 mA), tidak berbeda jauh dengan spesimen kontrol yang tidak diberi ICCP (± 115 mA). Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa kadar grafit 10% tidak cukup efektif untuk digunakan dalam proses ICCP. Spesimen kontrol (Wijaya et al., 2019) pada **Gambar 5** adalah luas pengaplikasian campuran *epoxy* yang dilakukan pada seluruh bagian CFRP *laminat* yang ditempelkan pada setiap spesimen. Dari ketiga grafik tersebut, dapat dilihat juga bahwa pengaplikasian luas permukaan membuat proses ICCP semakin efektif karena listrik bisa lebih terfokus masuk ke tulangan. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa pengaplikasian luas permukaan membuat proses ICCP semakin efektif karena listrik bisa lebih terfokus masuk ke tulangan.

4.3. Analisa Visual pada CFRP *Laminat* dan Tulangan Baja

Pengamatan visual dilakukan sebelum dan sesudah ICCP diberikan. Namun, dari hasil pengamatan visual yang dilakukan menunjukkan bahwa tidak ada perubahan visual pada CFRP *laminat* sebelum dan sesudah digunakan sebagai anoda dalam sistem ICCP. Sedangkan untuk pengamatan visual tulangan baja, beton dibongkar sehingga dapat melihat bagian tengah tulangan yang diberi perlakuan.

Dari **Gambar 6**, dapat dilihat perbedaan kondisi korosi tulangan setelah diberi ICCP selama 30 hari dengan variasi pengaplikasian luas permukaan campuran *epoxy* yang menggunakan kadar grafit 12,5%.

Selain itu, **Gambar 6** juga menunjukkan bahwa semakin besar luas permukaan yang diaplikasikan pada campuran *epoxy* maka semakin besar peluang berkurangnya korosi pada tulangan. Oleh karena itu, luas permukaan 30x130 mm² memiliki hasil yang paling bagus dibandingkan dengan luas permukaan 10x130 mm² dan luas permukaan 20x130 mm².



Gambar 6. Pengamatan Visual Tulangan Baja
(a) Luas Permukaan 10x130 mm²; (b) Luas Permukaan 20x130 mm²; (c) Luas Permukaan 30x130 mm²

Dari **Gambar 6(a)**, secara visual terlihat warna oranye terang pada hampir keseluruhan tulangan yang mengindikasikan korosi yang cukup parah pada tulangan tersebut. Sedangkan pada **Gambar 6(b)** terlihat warna oranye yang lebih pudar, dan juga pada **Gambar 6(c)** terlihat bahwa tulangan cenderung berwarna hitam (kondisi tulangan sebelum diberi *initial corossion* berwarna hitam) dan memiliki warna oranye yang lebih sedikit yang mengindikasikan bahwa korosi lebih berkurang pada tulangan tersebut. Secara visual, terlihat bahwa tulangan yang berdiameter 10 mm tersebut menjadi paling efektif untuk diberi ICCP jika menggunakan aplikasi luas permukaan 30x130 mm². Hal ini mengingat aliran listrik lebih cepat sampai ke tujuan melalui jarak terdekat. Luas permukaan 30x130 mm² menjadi variasi luas yang paling efektif dibandingkan dengan lainnya dikarenakan adanya kemungkinan kemiringan pemasangan tulangan yang tidak dapat diukur secara kasat mata sehingga dengan luas permukaan yang lebih kecil, kemungkinan jarak yang ditempuh listrik menuju tulangan menjadi lebih jauh. Semakin jauh jarak yang harus ditempuh aliran listrik menuju tulangan, maka semakin besar hambatan yang terjadi. Hambatan yang terjadi tersebut akan mempengaruhi efektivitas proses ICCP.

5. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal:

1. Pengaplikasian luas permukaan pada campuran *epoxy* dan grafit pada CFRP *laminat* dapat mempengaruhi efektivitas sistem ICCP. Luas permukaan 30x130 mm² yang merupakan luas campuran *epoxy* dengan grafit tersebut menjadi ukuran luas yang paling efektif jika dibandingkan dengan luas permukaan 10x130 mm² dan 20x130 mm². Luas permukaan 30x130 mm² memiliki perubahan beda potensial sebesar ±218 mV, lebih besar dibandingkan dengan luas permukaan 10x130 mm² (±176 mV) dan 20x130 mm² (±193 mV). Hal ini dikarenakan aliran listrik bisa terfokus langsung menuju ke tulangan mengingat jarak listrik yang ditempuh lebih dekat sehingga hambatan yang terjadi semakin kecil. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa luas permukaan campuran *epoxy* dapat meningkatkan efektivitas sistem ICCP.
2. Setelah *carbon fiber reinforced polymer* Sika® Carbodur® dan Sikadur® - 30 digunakan sebagai sistem 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. Sementara, hasil dari pengamatan visual

pada tulangan baja menunjukkan bahwa ada perbedaan antara tulangan yang hanya diberi korosi awal dengan tulangan yang diberi ICCP. Secara visual, tulangan yang diberi ICCP menunjukkan kondisi korosi yang semakin berkurang.

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>
- Cahaya, N. Y., Purba, R. Y., & Alfian, R. (2011). *Hukum Ohm dan Hukum Kirchoff (E1)*.
- 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>
- Lu, Y. yan, Hu, J. yue, Li, S., & Tang, W. shui. (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>
- Wijaya, G. B., Lays, D. P., Tanto, H. H., Tjandra, D. (2019). "Study on Graphite Powder as Conductive Pigments for Impressed Current Cathodic Protection System using Carbon Fiber Reinforced Polymer Anode." *Civil Engineering Dimension*, 21(2), 84-88.