

PENGARUH DENSITAS ARUS LISTRIK TINGGI DENGAN KADAR GRAFIT TERHADAP EFEKTIFITAS *CATHODIC PROTECTION* BETON MUTU TINGGI

Nathaniel Evan Wijaya¹, Calvin Limantoro², Daniel Tjandra³ and Gunawan Budi Wijaya⁴

ABSTRAK : Korosi merupakan masalah yang sering terjadi pada tulangan baja pada struktur beton bertulang. Bila dibiarkan, beton akan mengalami retak (*crack*) dan menyebabkan kegagalan struktur. Untuk mengatasi masalah tersebut, diperlukan metode perlindungan *Impressed Current Cathodic Protection* (ICCP) dengan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) *laminated* sebagai anoda sekaligus menambah kekuatan struktur (*dual system*). Korosi awal diberikan, setelah itu CFRP *laminated* ditempelkan pada spesimen beton bertulang menggunakan *epoxy* dengan kadar grafit 10% dan 12,5%. ICCP dengan 2 macam densitas arus (70 mA/m² dan 106 mA/m²) diberikan pada spesimen dengan mutu beton $f_c' = 50$ MPa. Dalam pelaksanaan, dilakukan *half cell potential test* untuk *monitoring* korosi pada spesimen dan pengamatan visual pada tulangan baja dan CFRP *laminated* diakhir pelaksanaan. Terdapat pengaruh yang signifikan terhadap peluang terjadinya korosi pada variasi mutu beton. Beda potensial pada beton mutu tinggi sangat kecil karena beton mutu tinggi memiliki *resistivity* yang tinggi. Perubahan beda potensial yang paling signifikan ditunjukkan pada kadar grafit 12,5% dengan densitas arus 70 mA/m², yaitu sebesar 191,12 mV pada $f_c' = 50$ MPa. Namun meskipun hasil yang didapat memiliki nilai yang positif, perbedaan beda potensial pada grafit 12,5% dan 10% yang menggunakan densitas arus 70 mA/m² tidak terlalu signifikan bila dibandingkan dengan densitas arus 10 mA/m².

KATA KUNCI: korosi, *impressed current cathodic protection*, mutu beton, densitas arus, kadar grafit, korosi, *carbon fiber reinforced polymer laminated*

1. PENDAHULUAN

Beton bertulang merupakan material utama pada sebuah struktur bangunan. Akan tetapi, tulangan baja dalam material beton bertulang memiliki kelemahan yaitu rentan terhadap korosi terutama pada daerah dengan kadar garam yang tinggi. Air laut mengandung ion klorida yang dapat masuk melalui pori-pori beton, kemudian menyelimuti permukaan tulangan baja dan berperan sebagai katalis dalam proses korosi (Lu, Hu, Li, & Tang, 2018). Bila tulangan baja yang ada di dalam beton mengalami korosi, maka beton yang ada di sekitar tulangan baja tersebut akan terkena dampak sehingga mengalami penurunan kekuatan.

Cathodic protection (CP) merupakan solusi yang tepat untuk melindungi tulangan baja dari korosi. *Impressed current cathodic protection* (ICCP) merupakan salah satu metode yang dapat menghentikan korosi yang disebabkan oleh kadar klorida yang tinggi sekaligus meningkatkan pH di sekitar tulangan baja (Bahekar & Gadve, 2017). Pemilihan anoda sangat penting dalam metode ICCP, terutama bila diterapkan pada beton bertulang yang memiliki *resistivity* yang tinggi (Nguyen, Mangat, Lambert, O'Flaherty, & Jones, 2014). Semakin tinggi mutu beton, maka *resistivity* yang dimiliki beton tersebut juga semakin tinggi (Kevin, Linggadiharja, Tjandra & Wijaya, 2019). Densitas arus listrik searah yang digunakan sangat mempengaruhi efektifitas sistem ICCP. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Wijaya, Lays, Tanto & Tjandra (2019), densitas arus 10 mA/m² dan 20 mA/m² tidak memberikan dampak yang

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, m21416050@john.petra.ac.id

² Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, m21416125@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

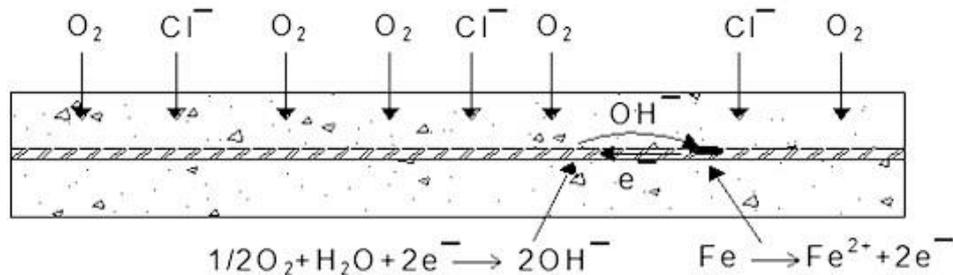
signifikan terhadap sistem ICCP karena memiliki selisih maksimal kenaikan potensial yang tidak berbeda jauh. Oleh sebab itu densitas arus listrik yang tinggi mempengaruhi efektifitas sistem ICCP agar dapat dibandingkan dengan densitas arus yang rendah.

Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) laminate merupakan material yang konduktif listrik sehingga dapat digunakan sebagai anoda dalam ICCP (Bahekar & Gadve, 2017). *CFRP laminate* dilekatkan pada permukaan beton dengan menggunakan *epoxy*, tetapi *epoxy* tidak dapat menghantarkan arus listrik. Maka dari itu perlu adanya bahan campuran sehingga *epoxy* bersifat konduktif listrik. Bubuk grafit merupakan material yang tepat untuk dicampur dengan *epoxy* karena partikel grafit dan *epoxy* dapat menyatu secara menyeluruh (Lu et al., 2018). Dengan menggunakan densitas arus yang tinggi, kadar grafit yang paling optimal belum tentu sama dibandingkan dengan sistem ICCP yang menggunakan densitas arus rendah. Variasi mutu beton yang berbeda drastis dan densitas arus yang tinggi akan mempengaruhi proses korosi yang terjadi pada sistem ICCP. Maka dari itu, pada penelitian kali ini berfokus membandingkan efektifitas sistem ICCP dengan variasi mutu beton dan variasi kadar grafit *epoxy* menggunakan densitas arus listrik yang tinggi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Korosi

Tulangan baja pada beton bertulang pada umumnya tidak akan terkorosi dikarenakan selimut beton merupakan lingkungan dengan kadar alkalinitas yang tinggi (memiliki pH 11-13) (Broomfield, 2006). Seperti yang terlihat pada **Gambar 1**, atom-atom *Fe* yang ada dalam tulangan baja melepaskan elektron dan menjadi ion Fe^{2+} yang kemudian bereaksi dengan ion hidroksil (OH^-) dan membentuk senyawa $Fe(OH)_2$ yang merupakan lapisan pasif di sekitar tulangan baja dan melindungi baja dari korosi. Proses karbonasi (*carbonation*) dan masuknya ion-ion klorida (Cl^-) ke dalam beton adalah dua faktor utama yang menyebabkan rusaknya lapisan pasif tersebut dan berlanjut pada terjadinya korosi tulangan di dalam beton (Broomfield, 2006).



Gambar 1. Mekanisme Korosi pada Tulangan dalam Beton

2.2. *Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)*

Cathodic Protection (CP) merupakan metode atau teknologi yang sudah diaplikasikan secara luas untuk mengurangi masalah teknik yang berhubungan dengan korosi pada logam. *Impressed current cathodic protection (ICCP)* merupakan metode CP yang bertujuan untuk menangkap aktivitas korosi tulangan baja dengan menghantarkan arus listrik searah/*direct current (DC)* dari sumber eksternal (*power supply*) untuk mengatasi arus korosi yang sedang berlangsung dalam struktur. ICCP melibatkan pemasangan permanen sistem listrik terkontrol bertegangan rendah yang mengalirkan arus langsung ke tulangan baja sehingga semua tulangan baja dibuat menjadi katoda, dimana katoda sendiri merupakan bagian yang terlindung dari korosi (Wilson, Jawed, & Ngala, 2013). Kemudian anoda dapat diterapkan pada permukaan atau dibor ke dalam lubang-lubang kecil dalam struktur. Komponen utama dari sistem ICCP meliputi sistem anoda, tulangan baja, elektrolit (dalam beton), kabel, perangkat pemantauan, seperti *power supply* arus searah. Perlindungan diberikan dengan menghubungkan anoda ke terminal positif dan tulangan baja ke terminal negatif dari *power supply*. Sistem ICCP adalah perawatan CP utama karena memberikan perlindungan yang dapat dipantau dan dikendalikan secara efektif dalam jangka

panjang. Kelebihan lainnya dari sistem ICCP adalah dapat menghemat biaya karena dapat mengurangi perbaikan fisik dari beton bertulang.

2.3. Half Cell Potential Test

Half cell potential test merupakan metode yang bisa digunakan untuk mengukur beda potensial antara baja tulangan dengan elektroda acuan. Perbedaan nilai potensial tersebut juga dapat digunakan untuk mengukur efektifitas dari perlindungan katodik yang diberikan pada tulangan. Nilai beda potensial diperoleh dengan bantuan voltmeter. Pengukuran korosi dengan metode *half cell potential test* dilakukan dengan menggunakan standard ASTM C876-09 “*Standart Test Method for Half Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*”. Nilai beda potensial yang dibaca oleh voltmeter menunjukkan peluang terjadinya korosi pada baja tulangan. Elektroda acuan yang umum digunakan adalah *copper/copper sulfate electrode* (Cu/CuSO₄) atau *silver/silver chloride electrode* (Ag/AgCl) (Vassie, 1978). Perbedaan tipe elektroda acuan yang digunakan akan mengakibatkan perbedaan nilai potensial permukaan. Koreksi terhadap hasil pembacaan yang sesuai dengan elektroda acuan diperlukan selama melakukan interpretasi terhadap hasil pemeriksaan.

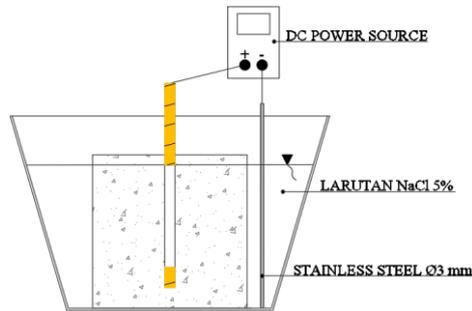
3. METODE PENELITIAN

3.1. Pembuatan Spesimen

Spesimen dibuat dalam bentuk kubus dengan dimensi $106 \times 106 \times 106 \text{ mm}^3$. Mutu beton spesimen yang digunakan sebesar $f_c' 49,8 \text{ MPa}$. Tulangan baja polos (mutu $f_y = 240 \text{ MPa}$) sepanjang 200 mm dengan diameter 10 mm ditanamkan pada bagian tengah dari spesimen beton kubus. Selimut beton pada sisi bawah direncanakan sebesar 20 mm. Selimut beton pada sisi samping direncanakan sebesar 70 mm karena beton yang terekspos cuaca memerlukan selimut beton dengan tebal minimal 40 mm (Badan Standarisasi Nasional, 2013). Setelah spesimen selesai dibuat, dilakukan proses *curing* selama 28 hari dengan cara merendam spesimen tersebut ke dalam air. Ketinggian air untuk proses *curing* dibatasi 10 mm dibawah permukaan beton untuk mencegah terjadi korosi pada pertemuan antara beton dan tulangan baja.

3.2. Pemberian Korosi Awal

Metode yang dipilih untuk pemberian korosi awal adalah metode *impressed current*. Meskipun metode tersebut memiliki mekanisme yang berbeda dengan korosi natural, metode *impressed current* terbukti cepat dan efektif dalam mempercepat dan mensimulasikan korosi tulangan pada beton (Ahmad, 2009). Pada metode ini, densitas arus listrik yang dipakai sebesar 70 mA/m^2 dan 106 mA/m^2 . Dalam pemberian korosi awal, DC *power source* digunakan untuk mengalirkan arus secara konstan. Pada proses ini, tulangan besi polos berperan sebagai anoda dan dihubungkan pada kutub positif dari DC *power source*, sedangkan batang *stainless steel* berdiameter 3 mm dengan panjang 20 cm berperan sebagai katoda dan dihubungkan pada kutub negatif. Spesimen kemudian direndam dalam larutan NaCl 5% yang berperan sebagai elektrolit (Lu, Hu, Li, & Tang, 2018). Larutan NaCl juga bertujuan agar korosi yang terjadi pada tulangan memenuhi Hukum Faraday (Ahmad, 2009). Permukaan larutan NaCl dijaga sedikit dibawah dari permukaan beton untuk mencegah terjadi korosi pada pertemuan antara beton dan tulangan (Gadve, Mukherjee, & Malhotra, 2011). Pada penelitian ini, permukaan larutan NaCl dijaga setinggi 10 mm dibawah permukaan beton. *Level* korosi yang diberikan pada penelitian ini disebut *high corrosion level*, yaitu korosi yang menyebabkan *mass loss* teoritis tulangan sebesar 18%. **Gambar 2** menunjukkan konfigurasi spesimen saat *intial corrorion* diberikan.



Gambar 2. Konfigurasi Spesimen Saat Pemberian *Intial Corroton*

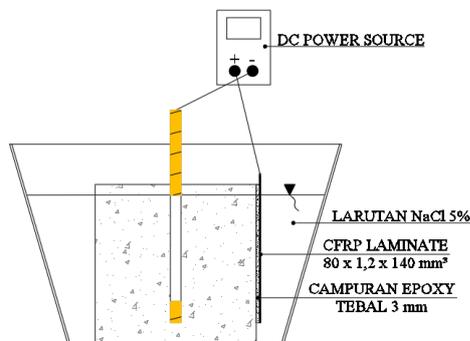
3.3. Pemasangan CFRP Laminate pada Spesimen Beton Bertulang

CFRP *laminat* yang digunakan pada penelitian adalah Sika® Carbodur® S1012 dengan dimensi $80 \times 1,2 \times 140 \text{ mm}^3$. Epoxy yang digunakan adalah Sikadur® - 30. Sebelum CFRP *laminat* ditempelkan dengan menggunakan epoxy, salah satu sisi permukaan beton dibersihkan terlebih dahulu agar epoxy dapat melekat dengan baik. Epoxy merupakan isolator yang memiliki kekuatan tarik yang tinggi. Oleh karena itu, dalam penggunaannya harus dimodifikasi agar menjadi bersifat konduktif. Tujuannya agar *protective current* saat pemberian ICCP dapat merambat dari CFRP *laminat* menuju ke tulangan beton. Modifikasi epoxy diberikan dengan cara menambahkan serbuk konduktif pada epoxy dengan kadar tertentu. Menurut Gadve, Mukherjee, & Malhotra, (2011), kadar *conductive pigment* yang disarankan berkisar antara 2 - 20%. Pada penelitian ini, kadar serbuk grafit yang dipakai untuk mencampur epoxy sebesar 7,5%; 10%; dan 12,5%.

3.4. Pemberian ICCP pada Spesimen yang Telah Dipasang CFRP Laminate

106

Setelah campur epoxy antara beton dengan CFRP *laminat* sudah melekat secara sempurna, kemudian spesimen direndam dalam larutan NaCl 5%. Tujuan dari perendaman tersebut untuk mensimulasikan kondisi struktur yang berada pada daerah korosif (Lu, Hu, Li, & Tang, 2018). Permukaan larutan NaCl dijaga sedikit dibawah dari permukaan beton untuk mencegah terjadi korosi pada pertemuan antara beton dan tulangan (Gadve, Mukherjee, & Malhotra, 2011). Pada penelitian ini, permukaan larutan NaCl dijaga setinggi 10 mm dibawah permukaan beton. Proses pemberian ICCP pada spesimen dilakukan selama 30 hari dengan 5 kali pengambilan data *Half cell potential test*. Spesimen direndam selama 4 hari, kemudian DC *power source* dimatikan. Setelah itu, spesimen dikeluarkan dari larutan dan dikeringkan selama 25 jam. Tujuannya agar oksigen yang diperlukan tulangan untuk mengalami korosi tersedia sehingga proses korosi masih terus berjalan (Kim & Ann, 2018). Pada penelitian ini, digunakan 2 macam densitas arus: 70 mA/m^2 dan mA/m^2 . Tulangan berperan sebagai katoda dan dihubungkan pada kutub negatif dari DC *power source*, sedangkan CFRP *laminat* berperan sebagai anoda dan dihubungkan pada kutub positif. Gambar 3 menunjukkan konfigurasi spesimen saat proses pemberian ICCP.



Gambar 3. Konfigurasi Spesimen Saat Pemberian ICCP

3.5. Monitoring Korosi dengan Half Cell Potential Test

Half cell potential test dilakukan setelah DC *power source* yang menghasilkan arus listrik ICCP dimatikan selama 25 jam agar tulangan mengalami depolarisasi dimana nilai potensial tulangan telah stabil (British Standards Institution, 2012). *Reference electrode* yang terhubung dengan avometer digital memberikan hasil pembacaan berupa beda potensial pada saat *Half cell potential test*. Hasil pembacaan dikatakan stabil jika beda potensial tidak berubah lebih dari 20 mV dalam waktu 1 menit (Elsener, 2003). Dalam pelaksanaannya, pembacaan dilakukan pada 1 titik (pada bagian tengah spesimen) untuk masing-masing sisi spesimen agar membuktikan bahwa beda potensial benar - benar stabil. *Half cell potential test* dilakukan berdasarkan ASTM C876-09. Tulangan spesimen dihubungkan dengan kutub positif avometer digital, sedangkan *reference electrode* dihubungkan dengan kutub negatif. *Reference electrode* yang digunakan dalam penelitian ini adalah Ag/AgCl/0,5M KCl sehingga perlu dilakukan konversi agar hasil pembacaan 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 ₄)	Peluang Terjadinya Korosi (%)
< -350	90
-200 s.d -350	50
> -200	10

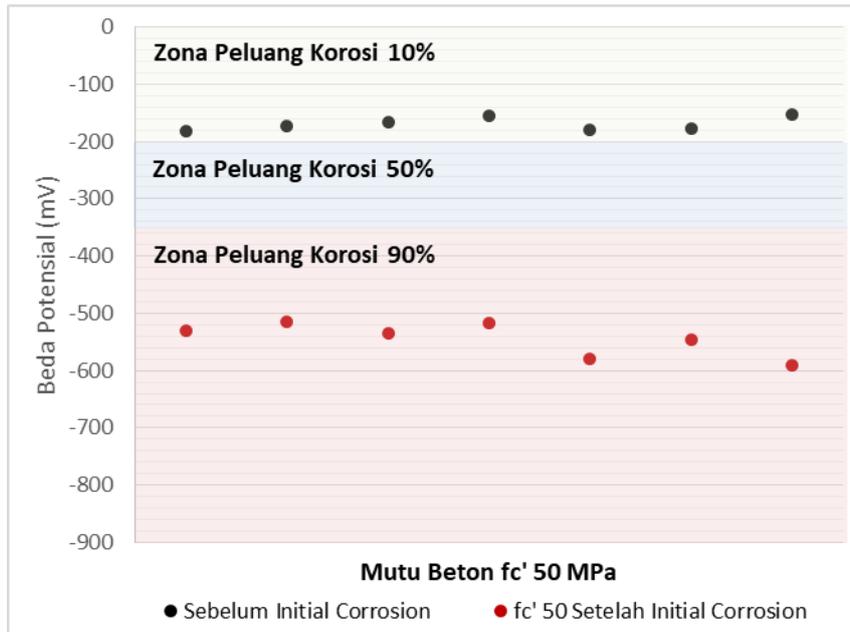
3.6. Pengamatan Visual Spesimen

Pengamatan visual dilakukan sebelum dan setelah proses ICCP dilakukan. Setelah itu dilakukan perbandingan terhadap perubahan bentuk, warna, dan kondisi permukaan dari tulangan baja dan CFRP *laminat*. Ada atau tidak adanya perubahan, merupakan salah satu indikator yang menentukan keberhasilan sistem ICCP dalam penelitian ini. Untuk mengetahui kondisi visual dari CFRP *laminat*, *teflon tape* yang melekat pada permukaan dilepas terlebih dahulu, barulah dilakukan pengamatan terhadap CFRP *laminat* sebagai anoda. Kemudian beton dihancurkan dengan menggunakan alat *jack drill* untuk mengetahui kondisi pada tulangan baja.

4. HASIL DAN ANALISIS

4.1. Analisa Korosi Awal pada Spesimen

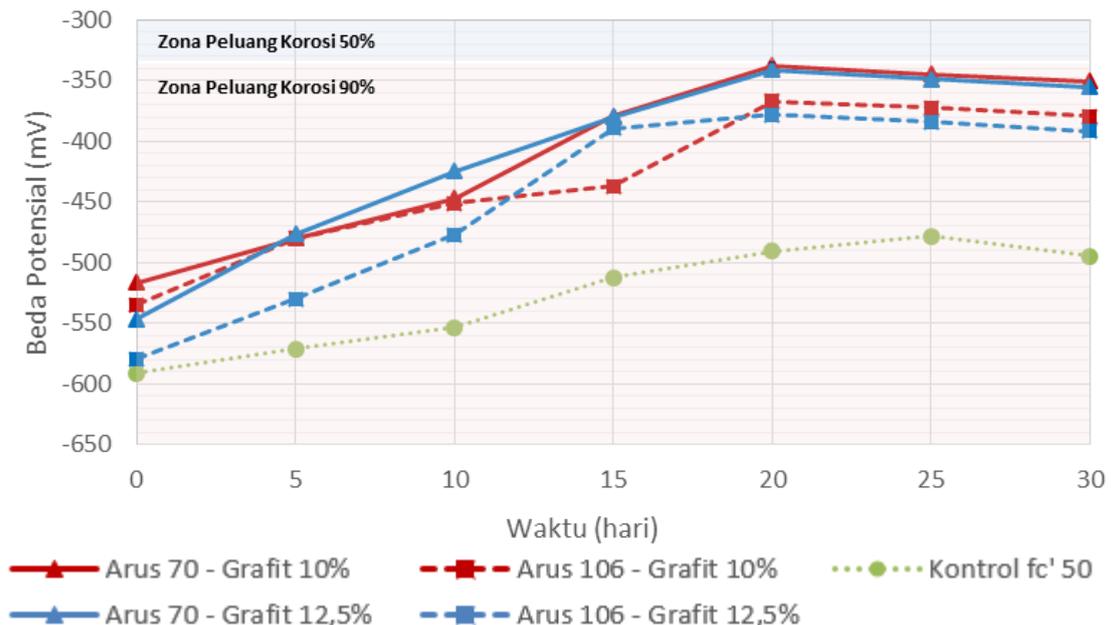
Proses *initial corrosion* dilakukan pada semua spesimen. Masing-masing spesimen diukur beda potensialnya dengan metode *half cell potential test* sebelum dan sesudah dilakukan proses *initial corrosion*. Hasil *half cell potential test* menunjukkan bahwa semua spesimen mengalami perubahan potensial menuju ke arah yang lebih negatif seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 4**. Hal ini menunjukkan bahwa metode *initial corrosion* yang dilakukan berhasil membuat tulangan baja pada spesimen beton bertulang menjadi berkarat.



Gambar 4. Beda Potensial Spesimen yang diberi *Initial Corrosion*

4.2. Analisa Hasil *Half Cell Potential Test*

Half cell potential test dilakukan setiap 5 hari sekali selama 30 hari. Dalam prosesnya, saat hari ke 4 DC power source dimatikan dan spesimen dikeluarkan lalu dibiarkan 25 jam sebelum dilakukannya proses *half cell potential test*. Hal tersebut dilakukan untuk memberi waktu spesimen dalam mengalami depolarisasi agar beda potensial pada spesimen relatif stabil karena tidak terpengaruh oleh arus polarisasi. Kemudian, dilakukan pengamatan untuk mengetahui perubahan beda potensial semua spesimen selama proses ICCP. Spesimen yang diamati merupakan benda uji dan spesimen kontrol. Dari Gambar 5 dapat dilihat bahwa jangka waktu optimum pemberian ICCP bila menggunakan densitas arus tinggi adalah 20 hari. Pada hari ke-25 dan ke-30, spesimen cenderung mengalami perubahan beda potensial yang tidak berarti, bahkan terjadi kenaikan beda potensial pada spesimen ke arah yang lebih negatif.

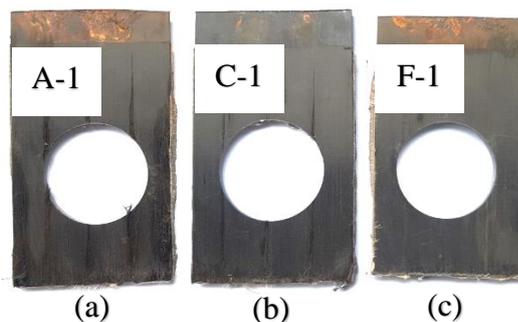


Gambar 5. Beda Potensial Spesimen Setelah ICCP

Dari hasil perubahan beda potensial yang diamati pada **Gambar 5** menunjukkan bahwa spesimen yang diberikan ICCP mengalami kenaikan beda potensial yang jauh lebih tinggi dibandingkan spesimen kontrol. Nilai beda potensial akhir (hari ke-30) dari spesimen yang menerima ICCP jauh lebih positif dibandingkan beda potensial spesimen kontrol. Hal ini menunjukkan keberhasilan dari sistem ICCP yang digunakan. Perubahan beda potensial yang paling signifikan ditunjukkan pada kadar grafit 12,5% dengan densitas arus 70 mA/m², yaitu sebesar 191,12 mV pada f_c ' 50 MPa. Densitas arus 70 mA/m² memiliki perubahan beda potensial yang lebih positif bila dibandingkan dengan densitas arus 106 mA/m². Akan tetapi perubahan beda potensial tersebut tidak signifikan karena menunjukkan hasil yang hampir sama dengan penelitian sebelumnya dengan menggunakan densitas arus yang rendah. Jadi penambahan arus yang tinggi tidak sebanding dengan peningkatan perubahan beda potensial yang dihasilkan.

4.3. Analisa Visual CFRP Laminate

Hasil pengamatan visual menunjukkan bahwa ada perubahan pada CFRP *laminate* sesudah digunakan sebagai anoda dalam sistem ICCP. Dari **Gambar 6**, dapat dilihat bahwa CFRP *laminate* yang dialiri densitas arus 106 mA/m² dan 70 mA/m² dengan kadar grafit mengalami perubahan. CFRP *laminate* tersebut mengalami kerusakan berupa terkelupasnya serat *carbon* saat *teflon tape* dilepas secara perlahan. CFRP *laminate* yang dialiri densitas arus 106 mA/m² memiliki kerusakan yang lebih parah bila dibandingkan dengan CFRP *laminate* yang dialiri densitas arus 70 mA/m². Hal ini menunjukkan bahwa densitas arus yang tinggi tidak dapat digunakan dalam sistem ICCP.



Gambar 6. Tampak Visual dari CFRP *laminate* (a) Rusak Parah (b) Rusak Ringan (c) Tidak Rusak

5. KESIMPULAN

1. Perubahan beda potensial yang paling signifikan ditunjukkan pada kadar grafit 12,5% dengan densitas arus 70 mA/m², yaitu sebesar 191,12 mV. Densitas arus 70 mA/m² memiliki perubahan beda potensial yang lebih positif bila dibandingkan dengan densitas arus 106 mA/m².
2. Beton mutu tinggi memiliki *resistivity* yang tinggi sehingga perubahan beda potensial yang dihasilkan tidak terlalu signifikan, yaitu sebesar 191,12. Oleh karena itu, spesimen beton f_c ' 50 MPa lebih susah untuk dialiri listrik selama proses ICCP.
3. Setelah *carbon fiber reinforced polymer* Sika® Carbodur® digunakan sebagai sistem anoda dalam sistem ICCP, hasil dari pengamatan visual menunjukkan bahwa ada perubahan pada CFRP *laminate* sesudah digunakan sebagai anoda dalam sistem ICCP. CFRP *laminate* yang mengalami perubahan terjadi pada densitas arus 106 mA/m² dan 70 mA/m². CFRP *laminate* tersebut mengalami kerusakan berupa terkelupasnya serat *carbon* saat *teflon tape* dilepas secara perlahan. Hal ini juga menunjukkan bahwa penggunaan densitas arus tinggi dapat merusak CFRP *laminate* yang berfungsi sebagai anoda. Berdasarkan kesimpulan diatas, pemakaian densitas arus 70 mA/m² dan 106 mA/m² tidak direkomendasikan untuk digunakan pada CFRP *laminate* sebagai anoda dalam proses ICCP karena peningkatan yang terjadi tidak signifikan.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih atas kontribusi PT. Sika Indonesia dalam penelitian ini berupa CFRP *laminat* dan *epoxy*. CFRP *laminat* yang digunakan adalah Sika® Carbodur® S1012 dan *epoxy* yang digunakan adalah Sikadur®-30.

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
- Badan Standarisasi Nasional. (2013). *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung* (SNI 2847:2013). Jakarta
- 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>
- Elsener, B. (2003). "Half-Cell Potential Measurements – Potential Mapping on Reinforced Concrete Structures." *Materials and Structures / Materiaux et Constructions*, 36(7), 461 – 471. doi: 10.707/BF02481526
- Gadve, S., Mukherjee, A., & Malhotra, S. N. (2011). "Active Protection of Fiber-Reinforced Polymer-Wrapped Reinforced Concrete Structures Against Corrosion." *Corrosion*, 67(2), 025002-1 – 025002-11. doi: 10.5006/1.3549564
- Kevin, Linggadiharja, G. C., Wijaya, G. B. & Tjandra, D. (2019). "Pengaruh Mutu Beton terhadap Efektivitas Impressed Current Cathodic Protection dengan Carbon Fiber Reinforced Polymer sebagai Anoda."
- Kim, M. J., & Ann, K. Y. (2018). "Corrosion Risk of Reinforced Concrete Structure Arising from Internal and External Chloride." *Advances in Material Science and Engineering*, 2018(2), 1–7. doi: 10.1155/2018/7539349
- 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 Against Corrosion." *Electrochimica Acta*, 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.
- 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>