

EFEK ARUS BERLEBIH PROTEKSI KATODIK TERHADAP PENURUNAN KEKUATAN LEKATAN ANTARA BAJA TULANGAN DAN BETON

Anang Kristianto^[1], Iswandi Imran^[2], Sunara Purwadaria^[3]

ABSTRAK

Hasil dari studi pengaruh arus berlebih terhadap kekuatan lekatan antara baja tulangan dan beton disajikan dalam makalah ini. Proteksi katodik dengan rapat arus konstan, berdasarkan luas permukaan baja tulangan, diberikan pada benda uji selama 5 bulan. Campuran klorida sebesar 1.5% dan 3.0 % dari berat semen ditambahkan dalam campuran beton dalam bentuk CaCl_2 untuk menganalisis pengaruh CaCl_2 dan konsentrasi klorida terhadap kekuatan lekatan baja tulangan dan beton pada saat arus proteksi katodik diberikan. Dalam penelitian ini didapatkan bahwa arus berlebih yang mengalir ke baja tulangan mengakibatkan terjadinya penurunan kekuatan lekatan antara baja tulangan dan beton. Penurunan kekuatan lekatan pada beton normal (tanpa campuran CaCl_2) sebesar 4.33%, 9.63%, 13.29% dan 25.93% berturut-turut untuk besar rapat arus 40, 200, 500, dan 1000 mA/m^2 . Pada benda uji dengan campuran CaCl_2 sebesar 1.5% terjadi peningkatan kekuatan lekatan hingga 108% untuk rapat arus proteksi, tetapi pada rapat arus berlebih terjadi penurunan hingga 45.2%. Hasil pengujian SEM-EDS juga menunjukkan suatu akumulasi yang signifikan dari Na dan K serta berkurangnya klorida disekitar baja tulangan. Pembentukan Na dan K pada antar muka baja tulangan dan beton menyebabkan terjadinya pelunakan pada beton yang menghasilkan penurunan kekuatan lekatan antara baja tulangan dan beton

Kata-kata kunci : proteksi katodik, kekuatan lekatan, klorida, baja tulangan, beton

1. PENDAHULUAN

Korosi pada baja merupakan salah satu penyebab utama terjadinya kerusakan pada struktur beton bertulang. Pada dasarnya resiko terjadinya korosi pada baja tulangan dapat diminimalkan dengan menggunakan beton dengan mutu yang baik dan tebal selimut beton yang memadai. Selain faktor diatas permukaan baja tulangan sendiri dalam lingkungan beton akan membentuk suatu selaput pasif (*film passive*) Fe_3O_4 atau $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ yang dapat melindungi baja dari serangan korosi lebih lanjut. Meskipun begitu selaput ini dapat rusak oleh karena selimut beton yang tidak baik, karbonisasi yang mengakibatkan turunnya pH larutan pori atau akibat penetrasi klorida yang biasanya terjadi pada struktur pantai/terendam air laut.

Proteksi katodik merupakan salah satu cara efektif untuk melindungi baja terhadap serangan korosi^[2]. Selama lebih kurang 20 tahun proteksi katodik telah digunakan pada struktur beton bertulang. Beberapa alasan penggunaan proteksi katodik adalah :

1. Proteksi katodik dapat menghentikan korosi dan melindungi terhadap serangan korosi pada struktur yang telah mengalami korosi .
2. Melindungi struktur dari terjadinya korosi pada lingkungan dengan kadar klorida yang tinggi.
3. Proteksi katodik dapat melindungi struktur terhadap korosi pada area yang sangat luas selama dijamin adanya kontinuitas pada struktur yang diproteksi.

Prinsip proteksi katodik adalah mengubah potensial korosi baja tulangan dengan jalan mengaliri baja dengan elektron sehingga potensial korosi baja terhadap lingkungan turun hingga mencapai potensial proteksi, dimana tingkat korosi memiliki nilai yang tidak signifikan. Penyebab terjadinya korosi sangat kompleks sehingga prediksi besarnya arus yang diberikan sulit untuk dipastikan. Kondisi ini memungkinkan timbulnya over proteksi yang menyebabkan efek negatif pada struktur yang diproteksi.

Salah satu area yang sangat dibutuhkan studi lebih lanjut adalah kemungkinan turunnya kekuatan lekatan baja tulangan akibat arus proteksi katodik yang berlebih. Beberapa penelitian terakhir^[15] menunjukkan terjadinya *softening* beton pada daerah sekitar permukaan baja tulangan. *Softening* terjadi karena terbentuknya sodium dan potasium hidroksida disekitar permukaan baja tulangan yang dapat menghancurkan kalsium silikat.

Tujuan dari penulisan ini adalah :

1. Menganalisis pengaruh besarnya rapat arus proteksi yang berlebih pada suatu sistem proteksi katodik dengan arus dipaksakan (ICCP) terhadap kekuatan lekatan antara baja tulangan dengan selimut beton.
2. Menganalisis efek arus polarisasi katodik terhadap perubahan komposisi unsur beton disekeliling baja tulangan
3. Menganalisis pengaruh campuran CaCl_2 terhadap kondisi tulangan dalam beton dan efeknya terhadap kekuatan tegangan lekatannya

2. KOROSI PADA BAJA TULANGAN

Korosi adalah degradasi suatu logam akibat berinteraksi dengan lingkungannya. Proses korosi berlangsung secara elektrokimia akibat adanya perbedaan potensial pada area-area kecil pada permukaan logam dalam selimut beton yang lembab/basah. Perbedaan potensial terjadi karena ketidakteraturan energi dan komposisi pada permukaan baja maupun dalam lingkungan di permukaan baja. Perbedaan potensial ini menyebabkan berlangsungnya proses oksidasi dan reduksi secara berurutan pada antarmuka daerah yang potensialnya lebih rendah dan lebih tinggi.

2.1 Proteksi Katodik

Proteksi katodik adalah cara melindungi logam terhadap serangan korosi dengan cara mengaliri logam tersebut dengan elektron, sehingga potensial logam terhadap lingkungan turun sampai potensial proteksi, dimana logam secara teknis tidak terkorosi.

Proteksi katodik dapat menjadi cara yang paling efektif untuk menghentikan korosi bahkan walaupun korosi telah mulai (pada daerah basa, terkarbonasi atau kandungan klorida yang cukup tinggi)

Bila ditinjau dari sumber arus listriknya proteksi katodik dibagi menjadi dua yaitu metoda anoda korban (sacrificial anode) dan metoda arus paksa (impressed current). Masing-masing memiliki keuntungan dan keterbatasan.

2.2 Rancangan Sistem Proteksi Katodik

Beberapa hal yang harus diperhitungkan pada saat mendesain sistem proteksi katodik :

1. Luas Permukaan

Perhitungan luas permukaan struktur yang diproteksi dibutuhkan untuk menentukan kuat arus yang diperlukan . Pada kasus proteksi baja tulangan pada beton maka dihitung luas permukaan seluruh baja tulangan yang akan diproteksi.

2. Kontinuitas secara elektrik seluruh struktur

Suatu hal yang harus diperhatikan adalah bahwa seluruh struktur yang akan diproteksi dijamin kekontinuannya secara elektrik agar arus dapat mengalir. Bila diperlukan penyambungan maka dapat digunakan las.

3. Perkiraan kebutuhan arus

Jumlah kuat arus yang dibutuhkan untuk memproteksi suatu logam tergantung pada tingkat korosi dan luas permukaan yang diproteksi. Kebutuhan kuat arus proporsional terhadap kecepatan korosi. Beberapa faktor yang secara langsung memberikan pengaruh pada kecepatan korosi adalah :

1. Jumlah oksigen yang dapat terpenetrasi dan larut ke dalam selimut beton.
2. pH larutan pori beton (telah terkarbonasi atau belum)
3. Kandungan klorida
4. Hambatan dari lingkungan elektrolitnya. Elektrolit yang memiliki hambatan yang lebih rendah membutuhkan arus lebih besar daripada elektrolit dengan hambatan yang tinggi.

Kuat arus yang dibutuhkan didapat dari perhitungan luas permukaan yang diproteksi dan kebutuhan rapat arus sesuai dengan kondisi lingkungan. Tabel 2.1 memberikan perkiraan kebutuhan arus untuk proteksi katodik.

Tabel 2.1 Perkiraan Kebutuhan Rapat Arus Untuk Baja pada Berbagai Lingkungan

Lingkungan	Kebutuhan Rapat Arus (mA/m ²)
Steril, neutral soil	4.3 – 16.1
Well-aerated neutral soil	21.5 – 32.3
Dry, well-aerated soil	5.4 – 16.1
Wet soil, moderate/severe condition	26.9 – 64.6
Highly acid soil	53.8 – 161.4
Dry concrete	5.4 – 16.1
Moist concrete	53.8 – 269.0
Stationery fresh water	53.8
Moving fresh water	53.8 – 64.6
Hot water	53.8 – 161.4
Sea-water	53.8 – 269.0
Chemicals, acid or alkaline solution in process tank	53.8 – 269.0

2.3 Kriteria Proteksi Katodik Untuk Baja Tulangan dalam Beton

Kriteria yang paling umum digunakan adalah -850 mV CSE, yang dapat digunakan pada lingkungan yang bervariasi. Beberapa penelitian merekomendasikan nilai -900 mV CSE untuk kondisi imun di lingkungan alkalinitas tinggi, akan tetapi kriteria diatas sering tidak bisa tepat diaplikasikan untuk baja dalam beton karena alasan praktis dan teoritis. Untuk baja yang tertanam dalam beton dibutuhkan potensial yang lebih negatif (yaitu -1130 mV CSE)^[13]. Tidak ada kesepakatan yang jelas berapa nilai batasan potensial negatif yang diperbolehkan. Pada -1170 mV CSE pada lingkungan Ca(OH)_2 dilaporkan mulai timbul gelembung-gelembung akibat evolusi hidrogen. Kondisi ini dapat menimbulkan efek negatif yaitu baja menjadi getas terutama untuk baja mutu tinggi, serta menurunnya lekatan antara baja tulangan dengan beton karena timbulnya gelembung-gelembung hidrogen pada interface.^[1] Penelitian terakhir akibat over proteksi yang dilakukan oleh Rasheeduzzafar, dkk^[15] memperlihatkan terjadinya penurunan kekuatan lekatan karena tingginya konsentrasi ion hidroxil (OH^-) pada permukaan baja serta berkumpulnya sodium (Na^+) dan potasium (K^+) dari semen di sekitar baja tulangan. Alkali hidroksida ini dikenal dapat merusak kalsium silikat, sehingga terjadi pelunakan pada antarmuka baja

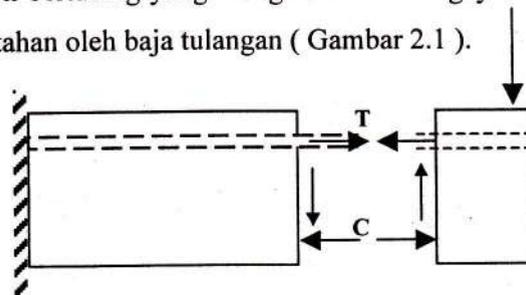
tulangan dengan beton yang dapat menurunkan kekuatannya. Tingkat akumulasi yang tinggi dari ion-ion sodium dan potasium pada daerah sekitar baja tulangan proporsional dengan kekuatan lekatannya.

2.4 Kontrol Potensial pada Proteksi Katodik

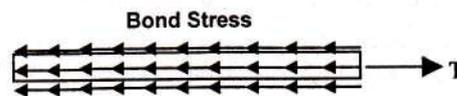
Pada sistem proteksi katodik arus paksa (ICCP) penyearah arus sebagai sumber arus memberikan arus proteksi relatif konstan. Akan tetapi bila terjadi perubahan kondisi lingkungan beton maka kebutuhan arus akan sangat bervariasi, dan struktur dapat mengalami kekurangan atau kelebihan arus proteksi. Ada dua macam metoda pengaliran arus pada struktur yang diproteksi. Metoda pertama adalah menjaga arus tetap konstan tanpa melihat perubahan potensial yang kemungkinan bisa terjadi pada struktur. Metoda ini memiliki kelemahan yaitu tidak bisa memberikan potensial yang tepat bila terjadi perubahan kondisi lingkungan, sehingga bisa terjadi struktur tidak dalam kondisi terproteksi atau over proteksi. Metoda kedua adalah potensial dijaga tetap konstan sementara arus berubah tergantung kebutuhan sistem. Sistem ini memerlukan semacam *automatic potential control rectifier*, yang dapat mengontrol arus yang diberikan sehingga potensial tetap terjaga pada kondisi proteksi. Metoda kedua ini memerlukan biaya perawatan cukup tinggi dan biasanya digunakan pada lingkungan yang memiliki kondisi lingkungan yang berubah-ubah.

2.5 Tegangan Lekatan

Pada balok beton bertulang yang mengalami lentur gaya tekan ditahan oleh beton sedangkan gaya tarik ditahan oleh baja tulangan (Gambar 2.1).



a. Gaya gaya internal pada balok lentur



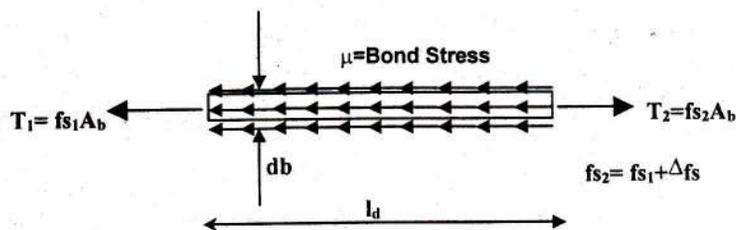
b. Gaya-gaya pada baja tulangan

Gambar 2.1. Gaya-gaya yang bekerja pada balok lentur



Agar terjadi proses diatas diperlukan suatu transfer gaya atau lekatan (bond) diantara beton dan baja tulangan. Gaya-gaya yang bekerja pada baja tulangan ditunjukkan pada Gambar 2.1.a. Supaya baja tulangan berada dalam kesetimbangan harus terjadi tegangan lekatan (bond stress). Apabila tidak ada lekatan maka baja akan tercabut keluar dari beton dan tegangan T akan turun drastis dan menyebabkan keruntuhan balok

Tegangan lekatan harus terjadi bilamana tegangan atau gaya-gaya berubah dari titik ke titik lainnya sepanjang tulangan. Hal ini dapat diuraikan dalam diagram *free body* (Gambar 2.2).



Gambar 2.2 Hubungan antara perubahan tegangan baja dengan tegangan

Bila f_{s2} lebih besar dari f_{s1} , maka tegangan lekatan μ harus bekerja pada permukaan baja sehingga dicapai kesetimbangan. Dengan menjumlahkan gaya-gaya paralel pada tulangan, dapat ditentukan μ_{avg} adalah :

$$\Delta f_s \frac{\pi d_b^2}{4} = \mu_{avg} (\pi d_b) l_d$$

dan

$$\mu_{avg} = \frac{\Delta f_s d_b}{4 l_d} \dots\dots\dots(2.1)$$

jika dalam panjang l_d diambil bagian panjang kecil dx , persamaan dapat ditulis :

$$\frac{df_s}{dx} = \frac{4\mu}{d_b}$$

dimana μ adalah tegangan lekatan (bond stress) yang bekerja sepanjang dx

Pada suatu balok gaya yang bekerja pada tulangan saat retak dapat dinyatakan sebagai :

$$T = \frac{M}{jd}$$



dimana jd adalah lengan momen dan M adalah momen yang bekerja pada penampang. Jika diperhatikan suatu panjang diantara dua retak yang terjadi maka momen-momen yang bekerja pada penampang retak adalah M_1 dan M_2 . Jika balok diberi satu tulangan dengan diameter d_b maka penjumlahan gaya-gaya horisontal didapatkan :

$$\Delta T = (\pi d_b) \mu_{avg} \Delta x$$

dengan d_b adalah diameter tulangan, atau

$$\frac{\Delta T}{\Delta x} = (\pi d_b) \mu_{avg}$$

karena

$$\Delta T = \frac{\Delta M}{jd}$$

sehingga

$$\frac{\Delta M}{\Delta x} = (\pi d_b) \mu_{avg} jd$$

dari diagram *free body* Gambar 2.6 dapat dilihat bahwa

$$\Delta M = V \Delta x \quad \text{atau} \quad \frac{\Delta M}{\Delta x} = V$$

sehingga :

$$\mu_{avg} = \frac{V}{(\pi d_b) jd} \dots\dots\dots(2.2)$$

3. PERENCANAAN BENDA UJI

Benda uji terbuat dari beton bertulang dengan dimensi 300 x 150 x 250 mm³, dengan diameter tulangan utama 13 mm (tulangan ulir) dipasang pada jarak 50 mm dari serat atas (Gambar 3.1). Dimensi diatas dibuat berdasarkan referensi penelitian yang dilakukan oleh Rasheeduzzafar,dkk.^[15] Perbandingan air semen dibuat 0.4 (persyaratan maksimum ACI318RM-95). Benda uji dibuat sebanyak 30 buah dan didesain sedemikian rupa sehingga ketika menerima pembebanan keruntuhan yang terjadi adalah akibat slip/turunnya tegangan lekatan baja. Untuk keperluan tersebut dilakukan perhitungan sebagai berikut :

Berdasarkan ACI318M bab 12.2.3, persyaratan panjang penyaluran yang harus dipenuhi agar tulangan mengalami leleh terlebih dahulu sebelum terjadinya slip adalah :

$$\frac{l_d}{d_b} = \frac{9}{10} \frac{f_y}{\sqrt{f_c'}} \left[\frac{\alpha \beta \gamma \lambda}{c + K_{tr}} \right]$$

dengan memasukkan nilai :

$$\begin{aligned}f_y &= 587,5 \text{ Mpa} \\f_c' &= 45 \text{ Mpa} \\ \alpha &= 1,3 \text{ (tulangan di cor dibagian atas)} \\ \beta &= 1,0 \text{ (tulangan tanpa pelapisan)} \\ \gamma &= 0,8 \text{ (diameter tulangan } 13,02 \text{ mm } < 19 \text{ mm)} \\ \lambda &= 1,0 \text{ (digunakan beton normal)} \\ K_{tr} &= 0 \text{ (tulangan geser tidak berfungsi sebagai pengekang)} \\ d_b &= 13,02 \text{ mm} \\ c &= 50 \text{ mm}\end{aligned}$$

maka :

$$\frac{l_d}{d_b} = \frac{9 \cdot 587,5 \cdot 1,3 \times 1,0 \times 0,8 \times 1,0}{10 \cdot \sqrt{45} \cdot \left[\frac{50 + 0}{13,02} \right]}$$

$$\frac{l_d}{d_b} = 21,346 \Rightarrow l_d = 21,346 \times d_b$$

Sehingga didapatkan $l_d = 21,346 \times 13,02 = 277,92 \text{ mm}$

Tegangan lekatan yang terjadi dapat dihitung dengan persamaan sbb :

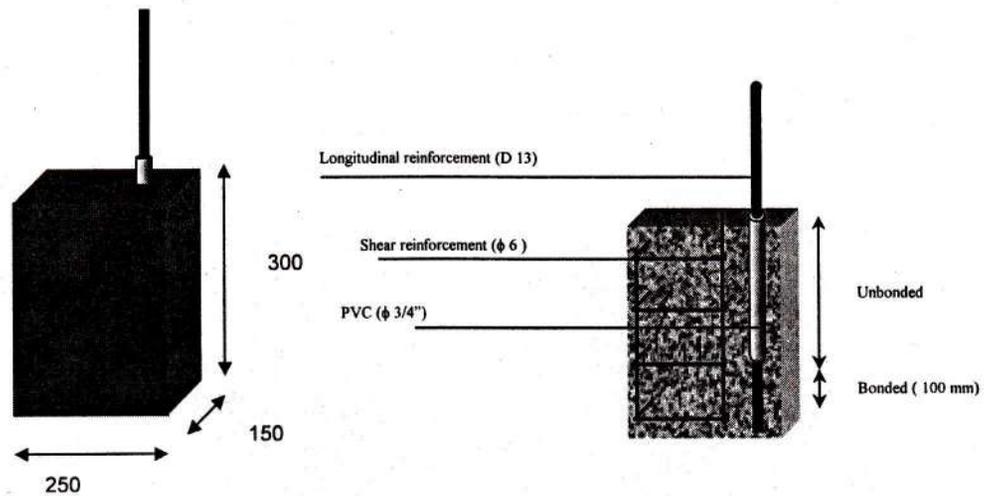
$$\mu = 13,35 \frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} = 13,35 \frac{\sqrt{45}}{13,02} = 6,88 \text{ MPa}$$

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh B.S. Hamad,dkk^[5] rata-rata efisiensi tegangan lekatan yang diberikan oleh peraturan adalah sebesar 2,38 dengan standar deviasi 0,71 (efisiensi = teg.lekatan hasil eksperimen/teg.lekatan berdasarkan ACI), sehingga dalam perhitungan ini diprediksi kekuatan lekatan yang terjadi pada pengujian adalah :

$$\mu = 6,88 \times 2,38 = 16,37 \text{ MPa}$$

Untuk membuat benda uji mengalami slip terlebih dulu sebelum tulangan utama mengalami leleh maka dibuat bagian yang tertanam pada beton (bonded) = 40% $l_d = 111,168 \text{ mm}$ dibulatkan menjadi 100 mm. (40 % diambil dengan asumsi efisiensi 2.5).

Tulangan utama ditanam dengan panjang 100 mm, sementara bagian yang tidak tertanam diselubungi dengan pipa PVC dengan diameter 3/4 in (Gambar 3.1)



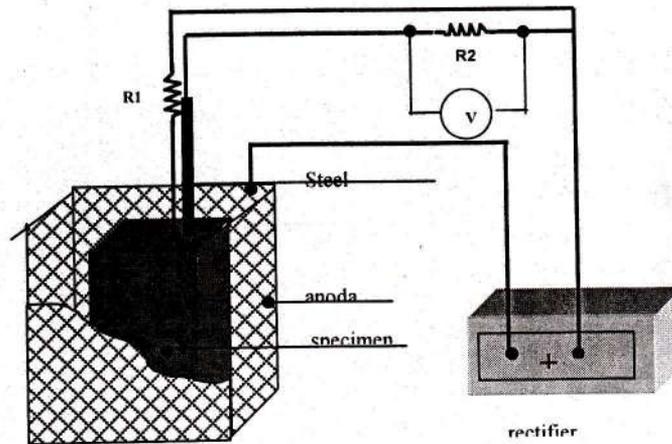
Gambar 3.1 Benda Uji

Tabel 3.1 Notasi Benda Uji

No	Nama Spesimen	Campuran CaCl_2 (%)	Rapat Arus (mA/m^2)
1	SP-0-0	0	0
2	SP-I-0	0	40
3	SP-II-0	0	200
4	SP-III-0	0	500
5	SP-IV-0	0	1000
6	SP-0-1.5	1.5	0
7	SP-I-1.5	1.5	40
8	SP-II-1.5	1.5	200
9	SP-III-1.5	1.5	500
10	SP-IV-1.5	1.5	1000
11	SP-0-3.0	3.0	0
12	SP-I-3.0	3.0	40
13	SP-II-3.0	3.0	200
14	SP-III-3.0	3.0	500
15	SP-IV-3.0	3.0	1000

3.1 Proteksi Katodik untuk Benda Uji

Setelah benda uji mengalami perawatan selama 28 hari, 24 benda uji diproteksi secara katodik dengan memasukkan benda uji ke dalam bak proteksi yang telah diisi air bersih di Laboratorium PPAU-ITB, sedangkan 6 benda uji lainnya tidak diproteksi katodik.



Gambar 3.2 Skema Proteksi Katodik pada Benda Uji

Sebagai anoda digunakan logam besi *wiremesh* yang dapat dibeli di pasaran. Sebelum digunakan, *wiremesh* direndam ke dalam larutan HCl pekat sampai seluruh lapisan luarnya larut.

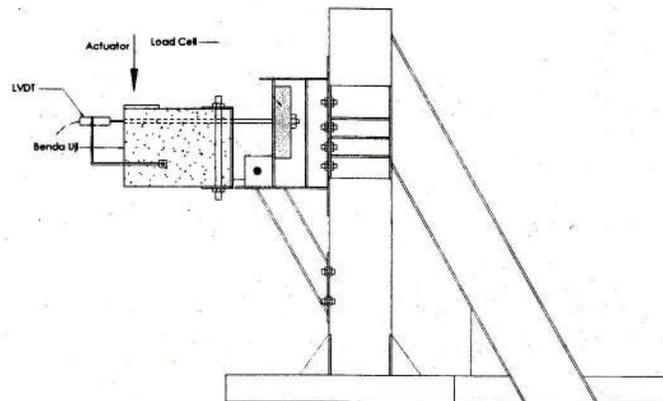
Sebagai pembangkit arus listrik digunakan *rectifier* DC yang memiliki komponen penyetabil arus searah. Setiap *rectifier* memiliki 6 saluran output sehingga digunakan 4 buah *rectifier*. Skema proteksi katodik untuk setiap benda uji dapat dilihat pada Gambar 3.2

Benda uji diproteksi katodik selama 5 bulan, setiap maksimum 3 hari sekali arus diperiksa.

3.2 Pelaksanaan Pengujian

Benda uji diletakkan mendatar pada *loading frame* yang dibuat sedemikian rupa sehingga ketika mengalami pembebanan dari aktuator benda uji dapat berputar. Adanya sendi yang dapat berputar pada perletakan dan penjepit pada ujung terjepit membuat bagian ujung terjepit dari benda uji hanya berotasi tanpa mengalami perpindahan vertikal akibat gaya dari aktuator. Perpindahan vertikal pada pengujian tidak diharapkan karena adanya perpindahan ini tulangan akan mengalami tekuk sehingga mengakibatkan tidak validnya perhitungan tegangan lekatan yang terjadi pada daerah lekatan. Aktuator dijalankan dalam mode *displacement control* dengan kecepatan 0.05 mm/detik. Data slip dari LVDT pada

ujung bebas benda uji, data gaya *actuator*, data gaya pada tulangan dari Load Cell dicatat melalui data logger dan direkam dalam komputer. Benda uji ditekan hingga dicapai slip pada benda uji (Gambar 3.3)



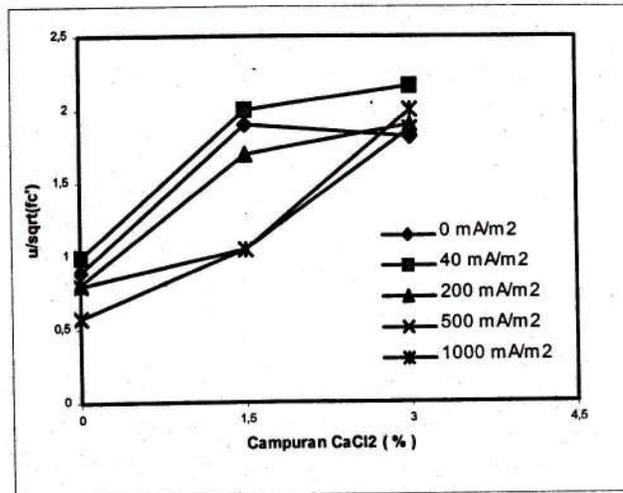
Gambar 3.3 Alat Pengujian Bond Strength

4. ANALISIS HASIL PENGUJIAN KEKUATAN LEKATAN BENDA UJI

4.1 Pengaruh Kandungan CaCl_2 pada Berbagai Rapat Arus terhadap Kekuatan Lekatan

Analisis untuk sub bab ini digunakan data-data tegangan lekatan pada saat slip mencapai 0.1 mm untuk berbagai variasi perlakuan terhadap benda uji.

Seperti disebutkan sebelumnya bahwa tegangan lekatan (μ) merupakan fungsi dari diameter tulangan (d_b) dan juga akar kuat tekan beton ($\sqrt{f_c'}$), untuk mempelajari pengaruh campuran CaCl_2 maka tegangan lekatan yang terjadi dinormalisasi terhadap $\sqrt{f_c'}$. Hal ini dilakukan mengingat perbedaan kuat tekan beton yang terjadi akibat perbedaan campuran CaCl_2 yang diberikan. Sementara tidak perlu dinormalisasi terhadap diameter tulangan karena semua benda uji menggunakan diameter tulangan yang sama. Hasil yang didapat diplot dalam grafik campuran CaCl_2 vs $\mu/\sqrt{f_c'}$.



Gambar 4.1 Pengaruh Campuran CaCl₂ pada Berbagai Arus Proteksi katodik

Dari grafik Gambar 4.1 dapat dianalisis sebagai berikut :

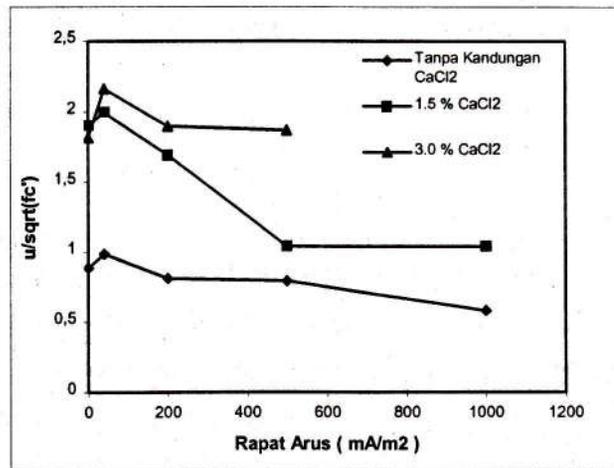
1. Dari 0% hingga 3.0 % campuran CaCl₂ memberikan kontribusi meningkatkan kekuatan tegangan lekatan pada berbagai besar rapat arus yang diberikan. Pada penambahan CaCl₂ sebesar 1.5 % untuk benda uji tanpa proteksi dan dengan arus proteksi sampai 200 mA/m² terjadi kenaikan berturut-turut 113%, 102%, dan 108% . Hal ini dapat dimengerti karena campuran CaCl₂ yang berfungsi sebagai *accelerator admixture* yang memberikan efek meningkatkan kuat tekan beton^[3], tetapi tidak bisa dipastikan bila campuran melampaui 2% dari berat semen, mengingat beberapa literatur menganjurkan pemakaian hingga 2 %.
2. Tegangan lekatan paling besar terjadi pada rapat arus 40 mA/m², sementara makin tinggi rapat arus tegangan lekatan semakin turun.
3. Pada benda uji yang tidak diproteksi katodik, campuran CaCl₂ sebesar 1.5 % meningkatkan tegangan lekatannya, tetapi penambahan campuran hingga 3.0 % mengakibatkan turun tegangan lekatannya meskipun nilainya tetap lebih besar dari pada beton normal. Hal ini kemungkinan besar disebabkan oleh terjadinya korosi pada tulangan akibat tingginya kadar CaCl₂ yang diberikan (melebihi 2 %)

4.2 Pengaruh Rapat Arus pada Berbagai Kandungan CaCl₂ terhadap Kekuatan Lekatan

Untuk menganalisis dibuat grafik rapat arus vs $\mu/\sqrt{f_c}$, hal ini dimaksud untuk mengetahui efek penambahan arus pada berbagai campuran CaCl₂ yang diberikan. Tegangan Lekatan yang diberikan adalah tegangan lekatan pada saat slip 0.1 mm, mengingat semua benda uji melewati slip 0.1 mm ini.

Dari Gambar 4.2 dapat dianalisis sebagai berikut :

1. Pada beton normal (0 % CaCl_2) dan benda uji dengan campuran 1.5 % CaCl_2 terjadi penurunan kekuatan tegangan lekatan seiring bertambah besarnya rapat arus yang diberikan. Penurunan yang terjadi untuk beton normal pada rapat arus over proteksi (200, 500, 1000 mA/m^2) sebesar 8.76%, 10.73% dan 34,68%. Sementara pada benda uji dengan campuran CaCl_2 1.5 % terjadi penurunan berturut-turut 11.03%, 45.21% dan 45.24%
2. Pada arus proteksi (40 mA/m^2) terjadi kecenderungan naiknya tegangan lekatan pada saat slip 0.1 mm pada berbagai campuran CaCl_2 . Pada benda uji tanpa campuran klorida terjadi kenaikan 11.06 %, benda uji dengan campuran 1.5 % CaCl_2 terjadi kenaikan sebesar 5.05 %.



Gambar 4.2 Pengaruh Kenaikan Rapat Arus Pada Berbagai Campuran CaCl_2

4.3 Perbandingan Kekuatan Lekatan Pada Beton Normal terhadap Standar Kekuatan Lekatan ACI318M-99

Seperti diketahui bahwa ACI318M-95 12.2.3 mensyaratkan suatu besarnya tegangan lekatan yang pada akhirnya setelah memasukkan semua konstanta-konstanta yang diperlukan merupakan fungsi dari diameter tulangan (d_b) dan $\sqrt{f_c}$.

Untuk $\alpha=1.3$, $\beta=1.0$ (tulangan tanpa pelapisan) dan $K_{tr}=0$, diberikan nilai tegangan lekatan seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya yaitu sebesar :

$$\mu = 13.35 \frac{\sqrt{f_c'}}{d_b} \dots\dots\dots(4.1)$$

Untuk menganalisis bagaimana kondisi tegangan lekatan pada beton dengan proteksi katodik bila dibandingkan dengan persyaratan ACI, maka dilakukan langkah sebagai berikut :

1. Tegangan lekatan maksimum pada beton normal (tanpa campuran CaCl_2) dinormalisasi dengan cara mengalikan dengan besarnya diameter ($d_b=13 \text{ mm}$) dan membagi dengan nilai $\sqrt{f_c'}$ (besarnya bervariasi untuk tiap jenis campuran CaCl_2). Begitu juga dengan persamaan 4.1 dinormalisasi dengan cara yang sama sehingga didapat nilai untuk persamaan 4.1 sebagai berikut :

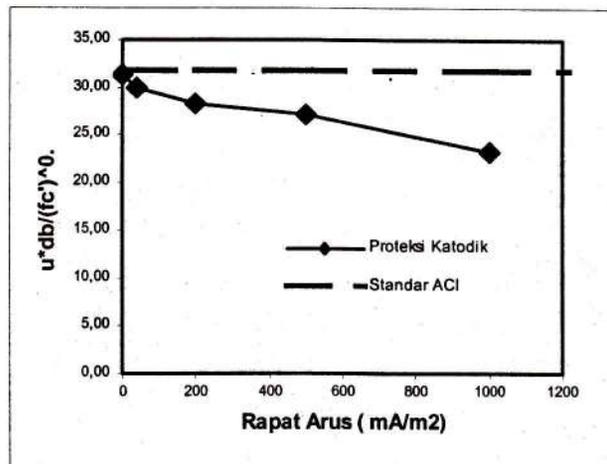
$$\mu \frac{d_b}{\sqrt{f_c'}} = 13.35$$

Hasil yang didapat untuk berbagai rapat arus dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut :

Tabel 4.1 Perbandingan Normalisasi Tegangan Lekatan Benda Uji Terhadap ACI318M-99 (Tulangan Tanpa Pelapisan)

	$\mu * d_b / \sqrt{f_c'}$	Perhitungan berdasarkan ACI318M-99	Efisiensi terhadap perhitungan ACI318M-99
SP-0-0	31.31	13.35	2.35
SP-I-0	29.95		2.24
SP-II-0	28.29		2.12
SP-III-0	27.15		2.03
SP-IV-0	23.19		1.73

2. Seperti dijelaskan pada bab sebelumnya bahwa peraturan yang diberikan memiliki faktor keamanan sehingga perlu dilakukan pengalihan terhadap faktor keamanan yang diberikan. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh B.S. Hamad,dkk^[5] rata-rata efisiensi tegangan lekatan yang diberikan oleh ACI adalah sebesar 2.38 dengan standar deviasi 0.71. Untuk membandingkannya maka nilai yang didapat pada langkah pertama dikalikan dengan 2.38 menjadi 31.77 . Hasil yang didapat diplot pada grafik seperti terlihat pada Gambar 4.3. Berdasarkan Tabel 4.1 (langkah pertama) dan Gambar 4.3 (langkah kedua) dapat dianalisis sebagai berikut :
 1. ACI memberikan nilai yang cukup konservatif untuk besarnya tegangan lekatan, hal ini terlihat dari faktor keamanan yang cukup tinggi (>2) kecuali untuk benda uji dengan rapat arus proteksi 1000 mA/m^2
 2. Bila dikalikan dengan faktor keamanan berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh B.S. Hamad,dkk^[16]sebesar 2.38 maka hanya benda uji tanpa proteksi katodik relatif masih memenuhi peraturan ACI, sementara benda uji dengan rapat arus proteksi sebesar 40, 200, dan 500 mA/m^2 tidak memenuhi standar yang diberikan ACI.

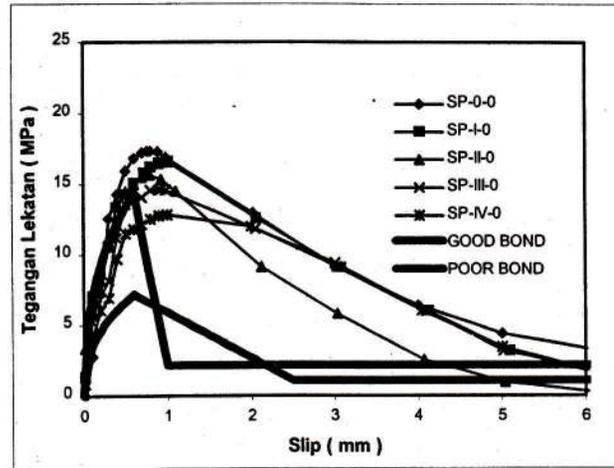


Gambar 4.3 Perbandingan Tegangan Lekatan Berdasarkan ACI dengan Hasil Pengujian untuk Benda Uji yang Mengalami Proteksi Katodik

4.4 Perbandingan Kekuatan Lekatan Benda Uji terhadap Standar CEB-FIP MC90

Berdasarkan persyaratan diatas maka dilakukan perbandingan hasil tegangan lekatan benda uji dengan model yang diberikan oleh CEB-FIP. Gambaran secara umum diberikan oleh Gambar 4.4 yang memperlihatkan kurva hubungan tegangan lekatan dan slip untuk semua benda uji beton normal (tanpa campuran CaCl_2) pada berbagai rapat arus dibandingkan dengan model tegangan lekatan yang baik (good bond) dan buruk (poor bond). Model CEB-FIP memperlihatkan penurunan yang tajam setelah tercapai tegangan lekatan maksimum, hal ini sesuai dengan asumsi dari CEB-FIP bahwa beton adalah *unconfined* sehingga dimodelkan terjadi *splitting failure* sementara benda uji sendiri mengalami pull out failure terlihat dari setelah mengalami tegangan lekatan maksimum tidak langsung drop.

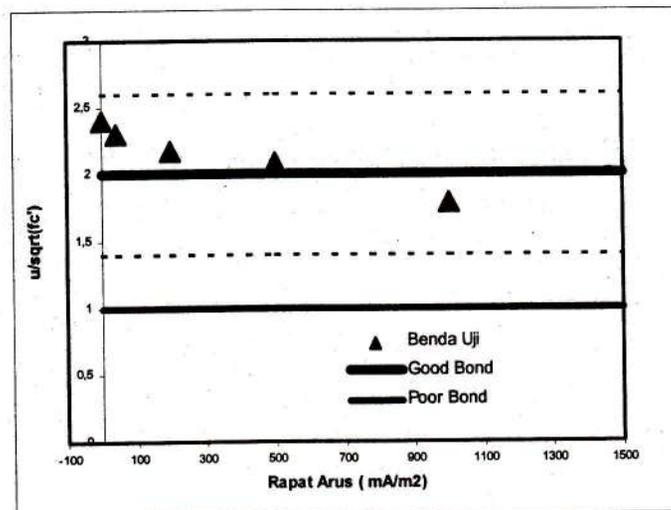
Untuk melihat bagaimana perbandingan tegangan lekatan yang terjadi pada saat tegangan lekatan maksimum tercapai maka setiap tegangan maksimum yang didapat dari benda uji dinormalisasi terhadap $\sqrt{f_c}$, begitu juga dengan model.



Gambar 4.4 Hubungan Tegangan dengan Lekatan untuk Benda Uji Normal dibandingkan dengan Model CEB-FIP

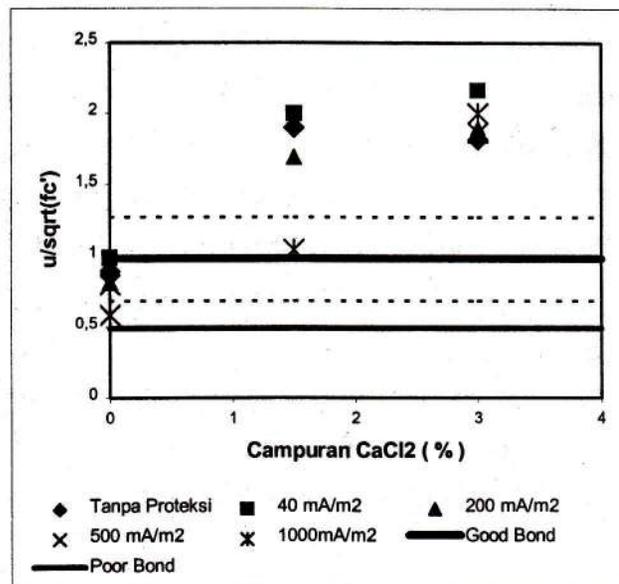
Hasilnya dapat dilihat pada gambar 4.5. yang memperlihatkan posisi tegangan lekatan untuk berbagai perlakuan rapat arus yang diberikan pada benda uji .

Secara umum seluruh benda uji untuk beton normal memenuhi persyaratan model untuk kondisi tegangan lekatan yang baik, meskipun ada perkecualian untuk benda uji dengan rapat arus 1000 mA/m^2 yang nilainya dibawah garis standar untuk tegangan lekatan yang baik. Tetapi berdasarkan catatan yang diberikan CEB-FIP^[19] bahwa nilai maksimum dari hasil eksperimen dapat bervariasi $\pm 30\%$ dari nilai maksimum yang diberikan model (garis putus-putus) maka benda uji masuk dalam kategori tegangan lekatan yang baik. Penambahan arus akan membuat kondisi tegangan masuk dalam kategori buruk.



Gambar 4.5 Perbandingan Nilai Maksimum Benda Uji Normal dengan Model CEB-FIP untuk berbagai rapat arus

Untuk mengetahui efek campuran CaCl_2 yang diberikan maka seluruh tegangan lekatan pada slip 0.1 mm setiap benda uji dinormalisasi terhadap $\sqrt{f_c}$ nya. Pada model CEB-FIP diambil juga tegangan lekatan yang terjadi pada saat slip mencapai 0.1 mm. CEB-FIP memberikan model hubungan tegangan lekatan dan slip berupa kurva sehingga hal inilah yang menguntungkan untuk bisa membandingkan kondisi pada setiap slip yang terjadi. Hasil diplot pada Gambar 4.6



Gambar 4.6 Perbandingan Kekuatan Lekatan pada Slip 0.1 mm antara Benda uji dengan Model CEB-FIP

Dari gambar ini dapat dianalisis sebagai berikut :

1. Pada saat terjadi slip 0.1 mm secara umum tegangan lekatan benda uji beton normal (0 % CaCl_2) berada dibawah garis batas good bond, meskipun masih bisa dikatakan dalam kondisi diterima sebagai kondisi tegangan lekatan yang baik (masuk dalam batas garis putus).
2. Campuran 1.5 % dan 3.0% meningkatkan kekuatan lekatan sehingga dapat dikatakan melampaui standar yang diberikan untuk *good bond*

5. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis data-data hasil pengujian dalam penelitian ini maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Proteksi katodik perlu dilakukan apabila digunakan CaCl_2 pada campuran beton dalam porsi yang tepat, tetapi besarnya arus proteksi harus dibatasi karena over proteksi dapat

menurunkan kekuatan lekatan yang terjadi antara baja tulangan dengan beton, karena merusak selimut beton disekeliling tulangan.

2. Proteksi katodik selama 5 bulan dengan rapat arus sebesar 40 mA/m^2 ($-1.316 \text{ mV vs Cu/CuSO}_4$) dan over proteksi sebesar 200, 500 dan 1000 mA/m^2 ($-2.345 \text{ mV}, -3.720 \text{ mV}, -6.735 \text{ mV vs Cu/CuSO}_4$) pada beton normal dapat menurunkan kekuatan lekatannya berturut-turut sebesar 4.33%, 9.63%, 13.29% dan 25.93%.
3. Pemberian arus proteksi pada baja tulangan sebesar 1000 mA/m^2 membuat kandungan unsur Na dan K meningkat berturut-turut sebesar 360,8% dan 588,8% di daerah sekitar tulangan yang memberi kontribusi terjadinya pelunakan pada beton disekitar tulangan.
4. Penambahan CaCl_2 dalam kadar yang tepat ($< 2\%$) pada benda uji yang diproteksi katodik akan memberikan kontribusi meningkatkan kekuatan lekatan yang terjadi hingga 108%, tetapi kondisi over proteksi ($-5.185 \text{ mV vs Cu/CuSO}_4$) cenderung akan menurunkan kembali kekuatan lekatannya hingga 34.68% untuk beton normal dan 45.24% untuk beton dengan campuran CaCl_2 1.5%.
5. Penambahan CaCl_2 memberikan kontribusi terhadap kekuatan adhesi dan *interlocking* pada waktu transfer gaya.
6. Berdasarkan peraturan ACI318M-99 tegangan lekatan pada benda uji beton normal (tidak mengandung CaCl_2) yang tidak diproteksi katodik masih memenuhi persyaratan, sementara untuk benda uji yang diproteksi katodik tidak lagi memenuhi persyaratan yang diberikan.
7. Berdasarkan CEB-FIP MC90 kekuatan lekatan benda uji yang diberi arus proteksi baik untuk beton normal maupun dengan campuran CaCl_2 hingga 3.0% masih memenuhi persyaratan lekatan yang baik untuk kondisi *unconfined concrete*, kecuali untuk arus proteksi lebih dari 500 mA/m^2

DAFTAR PUSTAKA

1. A. Bentur, S Diamond, N.S. Berke (1997), *Steel Corrosion in Concrete*, St Edmund Press.
2. ACI Commite 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318M-99) and Comentary (ACI318RM-99)* (1999), American Concrete Institute, Farmington Hills.
3. A.M. Neville, J.J. Brooks (1987), *Concrete Technology*, Longman Scientific&Technical.
4. B.S. Hamad (1995), *Comparative Bond Strength of Coated and Uncoated Bars with Different Rib Geometries*, ACI Material Journal V. 92, No.6, November-Desember 1995.

5. B.S. Hamad, J.O. Jirsa (1993), *Strength of Epoxy-Coated Reinforcing Bar Splices Confined with Transverse Reonforcement*, ACI Material Journal V.90, No.1 January-February 1993.
6. CEB-FIP (1999), *Structural Concrete, Vol 1(Introduction-Design process – Materials)*, International Federation for Structural Concrete (fib).
7. J.A.Gonzales, E. Otero, S. Feliu,A Bautista, P. Rodriguez, E. Ramirez, W. Lopez (1998), *Some Consideration on the Effect of Chloride Ions on The Corrosion of Steel Reinforcements Embedded in Concrete Structure*,Magazine of Concrete Research, No. 3, pp 189-199, September 1998.
8. J.A.Gonzales, S. Feliu, P. Rodrigues, E. Ramirez, C. Alonso, C. Andrade (1996), *Some Question on the Corrosion of Steel in Concrete*, Materials and Structures, Vol 29, pp 40-46 , Jan-Feb 1996.
9. J. Bennel, J.P. Broomfield (1997), *Analysis of studies on Cathodic Protection Criteria for steel in concrete*, Material Performance, Dec 1997
10. J.Flis, H.w.Pickering and K. Osseo-Asare (1998), *Interpretation of Impedance Data for Reinforcing Steel in Alkaline Solution Containing Chlorides an Acetates*, Electrochimica Acta. Vol 43, Nos 12-13, pp 1921-1929.
11. John P. Broomfield (1997), *Corrosion of Steel in Concrete*, , E & FN Spon.
12. MacGregor. J.G (1992), *Reinforced Concrete,Mechanics & Design*, Prentice Hall.
13. P.M.Chess (1998) , *Cathodic Protection of Steel in Concrete*, E & FN SPON.
14. Polder R.B (1998) , *Cathodic Protection of Reinforced Concrete Structures in the Netherlands- Experience and Developments*, HERON, vol 43 no.7.
15. Rasheeduzzafar, Ali M. Golam, J.A. Ghazi (1993), *Degradation of Bond between Reinforcing Steel an Concrete due to Cathodic Protection Current*, ACI Material Journal v.90 no.1, Jan-Feb 1993

RIWAYAT PENULIS

^[1] **Anang Kristianto ST.,MT.**, adalah dosen jurusan Teknik Sipil Universitas Kristen Maranatha

^[2] **Dr.,Ir.,Iswandi Imran** adalah dosen jurusan Teknik Sipil ITB

^[3] **Dr.,Ir., Sunara Purwadaria** adalah dosen jurusan Teknik Pertambangan ITB

1. B.S. Hameed, J.G. Joo (1991), A Study of Epoxy-Resin Mortar for Repair of Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 90, No. 1, pp. 1-10.

2. G. J. G. Joo, B.S. Hameed, and S. H. Lee (1992), A Study of Epoxy-Resin Mortar for Repair of Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 91, No. 1, pp. 1-10.

3. J.A. Goulet, E. Otero, S. Pelt, A. Huet, F. Rodriguez, E. Llanos, W. Lopez (1998), A Study of Epoxy-Resin Mortar for Repair of Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 1, pp. 1-10.

4. J.A. Goulet, S. Pelt, F. Rodriguez, E. Llanos, W. Lopez (1998), A Study of Epoxy-Resin Mortar for Repair of Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 1, pp. 1-10.

5. J. J. Goulet, S. Pelt, F. Rodriguez, E. Llanos, W. Lopez (1998), A Study of Epoxy-Resin Mortar for Repair of Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 1, pp. 1-10.

6. J. J. Goulet, S. Pelt, F. Rodriguez, E. Llanos, W. Lopez (1998), A Study of Epoxy-Resin Mortar for Repair of Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 1, pp. 1-10.

7. J. J. Goulet, S. Pelt, F. Rodriguez, E. Llanos, W. Lopez (1998), A Study of Epoxy-Resin Mortar for Repair of Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 1, pp. 1-10.

8. J. J. Goulet, S. Pelt, F. Rodriguez, E. Llanos, W. Lopez (1998), A Study of Epoxy-Resin Mortar for Repair of Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 1, pp. 1-10.

9. J. J. Goulet, S. Pelt, F. Rodriguez, E. Llanos, W. Lopez (1998), A Study of Epoxy-Resin Mortar for Repair of Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 1, pp. 1-10.

10. J. J. Goulet, S. Pelt, F. Rodriguez, E. Llanos, W. Lopez (1998), A Study of Epoxy-Resin Mortar for Repair of Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 1, pp. 1-10.

11. J. J. Goulet, S. Pelt, F. Rodriguez, E. Llanos, W. Lopez (1998), A Study of Epoxy-Resin Mortar for Repair of Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 1, pp. 1-10.

12. J. J. Goulet, S. Pelt, F. Rodriguez, E. Llanos, W. Lopez (1998), A Study of Epoxy-Resin Mortar for Repair of Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 1, pp. 1-10.

13. J. J. Goulet, S. Pelt, F. Rodriguez, E. Llanos, W. Lopez (1998), A Study of Epoxy-Resin Mortar for Repair of Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 1, pp. 1-10.

14. J. J. Goulet, S. Pelt, F. Rodriguez, E. Llanos, W. Lopez (1998), A Study of Epoxy-Resin Mortar for Repair of Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 1, pp. 1-10.

15. J. J. Goulet, S. Pelt, F. Rodriguez, E. Llanos, W. Lopez (1998), A Study of Epoxy-Resin Mortar for Repair of Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 1, pp. 1-10.

16. J. J. Goulet, S. Pelt, F. Rodriguez, E. Llanos, W. Lopez (1998), A Study of Epoxy-Resin Mortar for Repair of Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 1, pp. 1-10.

17. J. J. Goulet, S. Pelt, F. Rodriguez, E. Llanos, W. Lopez (1998), A Study of Epoxy-Resin Mortar for Repair of Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 1, pp. 1-10.

18. J. J. Goulet, S. Pelt, F. Rodriguez, E. Llanos, W. Lopez (1998), A Study of Epoxy-Resin Mortar for Repair of Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 1, pp. 1-10.

19. J. J. Goulet, S. Pelt, F. Rodriguez, E. Llanos, W. Lopez (1998), A Study of Epoxy-Resin Mortar for Repair of Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 1, pp. 1-10.

20. J. J. Goulet, S. Pelt, F. Rodriguez, E. Llanos, W. Lopez (1998), A Study of Epoxy-Resin Mortar for Repair of Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 1, pp. 1-10.