



PEDOMAN

No. 13/ P/ BM/ 2023

Bidang Jembatan dan Terowongan

PERENCANAAN PROTEKSI KATODIK ANODA KORBAN *ZINC CARTRIDGE SYSTEM* UNTUK BETON BERTULANG DI WILAYAH ATMOSFERIK



KEMENTERIAN PEKERJAAN UMUM DAN PERUMAHAN RAKYAT
DIREKTORAT JENDERAL BINA MARGA



Yth.

1. Sekretaris Direktorat Jenderal Bina Marga
2. Para Direktur di Direktorat Jenderal Bina Marga
3. Para Kepala Balai Besar/Balai Pelaksanaan Jalan Nasional
4. Para Kepala Satuan Kerja di Direktorat Jenderal Bina Marga

SURAT EDARAN

NOMOR: 27 /SE/Db/2023

TENTANG

PEDOMAN PERENCANAAN PROTEKSI KATODIK ANODA KORBAN *ZINC CARTRIDGE SYSTEM* UNTUK BETON BERTULANG DI WILAYAH ATMOSFERIK

A. Umum

Dalam merencanakan jembatan, terdapat persyaratan teknis jembatan dan ketentuan teknis lain yang harus dipenuhi, salah satunya konstruksi jembatan. Dalam rangka mencapai perencanaan teknis jembatan agar sesuai dengan persyaratan teknis, khususnya jembatan beton bertulang di wilayah atmosferik yang memenuhi ketentuan teknis konstruksi jembatan, diperlukan sistem proteksi katodik anoda korban *Zinc Cartridge System* untuk memberikan manfaat dalam melindungi tulangan baja di dalam beton dari kerusakan korosi yang terpapar garam dari lingkungan air laut dan lain-lain.

Dalam rangka memberikan panduan, Direktorat Jenderal Bina Marga perlu menyusun acuan dalam merencanakan, mempersiapkan, dan melaksanakan pemasangan sistem proteksi katodik anoda korban *zinc cartridge system* termasuk cara melakukan monitoring terhadap kinerja sistem proteksi yang menggunakan logam atau paduan *zinc* anti korosi.

Mempertimbangkan hal tersebut, perlu menetapkan Surat Edaran Direktur Jenderal Bina Marga tentang Pedoman Perencanaan Proteksi Katodik Anoda Korban *Zinc Cartridge System* Untuk Beton Bertulang di Wilayah Atmosferik.

B. Dasar Pembentukan

1. Peraturan Presiden Nomor 27 Tahun 2020 tentang Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2020 Nomor 40);
2. Keputusan Presiden Nomor 52/TPA Tahun 2020 tentang Pemberhentian dan Pengangkatan Dari dan Dalam Jabatan Pimpinan Tinggi Madya di Lingkungan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat;
3. Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 13 Tahun 2020 tentang Organisasi dan Tata Kerja Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2020 Nomor 473) sebagaimana telah diubah dengan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 11 Tahun 2022 tentang Perubahan atas Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan



Rakyat Nomor 13 Tahun 2020 tentang Organisasi dan Tata Kerja Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2022 Nomor 1382);

4. Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 16 Tahun 2020 tentang Organisasi dan Tata Kerja Unit Pelaksana Teknis Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2020 Nomor 554) sebagaimana telah diubah dengan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia Nomor 26 Tahun 2020 tentang Perubahan Atas Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 16 Tahun 2020 tentang Organisasi dan Tata Kerja Unit Pelaksana Teknis Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2020 Nomor 1144);
5. Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 5 Tahun 2023 tentang Persyaratan Teknis Jalan dan Perencanaan Teknis Jalan (Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2023 Nomor 372);
6. Surat Edaran Direktur Jenderal Bina Marga Nomor 03/SE/Db/2023 tentang Pedoman Verifikasi dan Validasi Pemeriksaan Jembatan;

C. Maksud dan Tujuan

Surat Edaran ini dimaksudkan sebagai pedoman bagi para pelaksana sistem proteksi katodik anoda korban *zinc cartridge system* dalam menetapkan ketentuan umum dan ketentuan teknis perencanaan proteksi katodik anoda korban *zinc cartridge system* untuk beton bertulang di wilayah atmosferik. Surat Edaran ini bertujuan agar perencanaan proteksi katodik anoda korban *zinc cartridge system* pada tahap perencanaan, pelaksanaan, dan monitoring sistem proteksi dapat berjalan sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

D. Ruang Lingkup

Lingkup Surat Edaran ini mencakup metode penanggulangan korosi tulangan beton termasuk struktur beton pratekan di wilayah atmosferik dengan proteksi katodik anoda korban (*Sacrificial Anode Cathodic Protection*) *Zinc Cartridge System*, yang meliputi tahap perencanaan, pelaksanaan, dan monitoring sistem proteksi di Direktorat Jenderal Bina Marga Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.

E. Pengaturan Mengenai Pedoman Perencanaan Proteksi Katodik Anoda Korban *Zinc Cartridge System* Untuk Beton Bertulang Wilayah Atmosferik

Pengaturan mengenai pedoman perencanaan proteksi katodik anoda korban *zinc cartridge system* untuk beton bertulang wilayah atmosferik, meliputi:

1. Ketentuan Umum

Bagian ini mengatur mengenai:

- a. kriteria anti korosi *zinc cartridge*;
- b. penentuan rentang mitigasi korosi dan jenis *zinc cartridge*;
- c. fitur metode konstruksi *zinc cartridge*; dan
- d. lingkup penerapan metode *zinc cartridge*.

2. Ketentuan Teknis

Bagian ini mengatur mengenai:

- a. survei pendahuluan untuk menentukan penerapan metode konstruksi;
- b. desain metode konstruksi *zinc cartridge*;
- c. prediksi masa pakai anoda *zinc cartridge*;
- d. desain titik aliran; dan
- e. desain metode pemantauan.

Ketentuan lebih lanjut mengenai Pedoman Perencanaan Proteksi Katodik Anoda Korban *Zinc Cartridge System* Untuk Beton Bertulang Wilayah Atmosferik termuat dalam Lampiran yang merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari Surat Edaran Direktur Jenderal ini.

F. Penutup

Surat Edaran ini mulai berlaku pada tanggal ditetapkan.

Demikian atas perhatian Saudara disampaikan terima kasih.

Tembusan:

1. Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
2. Sekretaris Jenderal, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
3. Inspektur Jenderal, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
4. Direktur Jenderal Bina Konstruksi, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat

Ditetapkan di Jakarta

Pada tanggal: 10 Oktober 2023

DIREKTUR JENDERAL

BINA MARGA,

HEDY RAHADIAN

NIP 19640314 199003 1 002

PRAKATA

Pedoman perencanaan proteksi katodik anoda korban *zinc cartridge system* untuk beton bertulang wilayah atmosferik disusun sebagai acuan bagi para pelaksana dalam mendesain, mempersiapkan, dan melaksanakan pemasangan sistem proteksi katodik anoda korban *zinc cartridge system*, termasuk juga cara melakukan monitoring terhadap kinerja sistem proteksi. Pedoman ini disusun, dipersiapkan, dan didiskusikan oleh tim paket kerja Teknologi Penanganan Geoteknik dan Struktur, Balai Geoteknik Terowongan dan Struktur, Direktorat Jenderal Bina Marga pada tanggal 28 Agustus 2021. Pengguna dari Pedoman ini diminta untuk menginformasikan adanya hak paten dalam dokumen ini, (bila diketahui), serta memberikan informasi pendukung lainnya (pemilik paten, bagian yang terkena paten, alamat pemberi paten, dan lain-lain).

Penyusunan pedoman ini mengacu pada standar-standar lain, baik berupa SNI maupun standar asing lainnya. Pedoman ini secara khusus dimaksudkan sebagai panduan untuk merencanakan sistem proteksi terhadap tulangan dalam beton yang berada di wilayah atmosferik dari kerusakan korosi.

Pedoman Perencanaan Proteksi Katodik Anoda Korban *Zinc Cartridge System* untuk Beton Bertulang di Wilayah Atmosferik ini disusun oleh Balai Geoteknik, Terowongan, dan Struktur, Direktorat Jenderal Bina Marga Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat dan telah dibahas dengan pakar bidang teknologi jembatan, jalan raya, pemerintah daerah, perguruan tinggi, dan asosiasi profesi.

Jakarta, 10 Oktober 2023
Direktur Jenderal Bina Marga,



Hedy Rahadian

DAFTAR ISI

PRAKATA	ii
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	v
PENDAHULUAN	vi
1. Ruang Lingkup.....	1
2. Acuan Normatif	1
3. Istilah dan Definisi.....	1
4. Ketentuan Umum	3
4.1 Kriteria Anti Korosi <i>Zinc Cartridge</i>	3
4.2 Penentuan Rentang Mitigasi Korosi dan Jenis <i>Zinc Cartridge</i>	4
4.3 Fitur Metode Konstruksi <i>Zinc Cartridge</i>	5
4.4 Lingkup Penerapan Metode <i>Zinc Cartridge</i>	5
5. Ketentuan Teknis	6
5.1 Survei Pendahuluan untuk Menentukan Penerapan Metode Konstruksi <i>Zinc Cartridge</i>	6
5.2 Desain Metode Konstruksi <i>Zinc Cartridge</i>	10
5.2.1 Bagan Alir Perencanaan.....	10
5.2.2 Perhitungan Rasio Tulangan	11
5.2.3 Pemilihan Kriteria Anti Korosi	11
5.2.4 Desain Interval Penempatan <i>Zinc Cartridge</i>	11
5.3 Prediksi Masa Pakai Anoda <i>Zinc Cartridge</i>	15
5.4 Desain Titik Aliran.....	16
5.5 Metode Pemantauan	16
Bibliografi	18
Daftar Penyusun dan Unit Kerja Pemrakarsa.....	19
Lampiran A (Informatif) Contoh Perhitungan Rasio Tulangan	20
Lampiran B (Informatif) Contoh Desain Interval <i>Zinc Cartridge</i> Tipe <i>Insert</i> pada Struktur Beto	23
Lampiran C (Informatif) Contoh Desain Interval <i>Zinc Cartridge</i> Tipe <i>Surface</i> Pada Struktur Beton	24
Lampiran D (Informatif) Contoh Perhitungan Prediksi Umur Pakai <i>Zinc Cartridge</i>	25

DAFTAR TABEL

Tabel 1 - Kriteria anti korosi <i>zinc cartridge</i>	3
Tabel 2 - Jenis dan spesifikasi <i>zinc cartridge</i>	4
Tabel 3 - Proses kerusakan struktur beton dan metoda perbaikan standar	5
Tabel 4 - Jenis survei pendahuluan untuk menentukan penerapan metode <i>zinc cartridge</i>	7
Tabel 5 - Bahan-bahan dan sifat anoda korban	8
Tabel 6 - Jumlah arus yang dihasilkan anoda <i>zinc cartridge</i>	16
Tabel A.1 - Luas permukaan tulangan pelat lantai	21
Tabel A.2 - Luas permukaan tulangan gelagar beton prategang	22

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 - <i>Zinc cartridge system (insert type)</i>	4
Gambar 2 - <i>Zinc cartridge system (surface type)</i>	4
Gambar 3 - Laju korosi terhadap umur layan struktur beton	6
Gambar 4 - Alur desain <i>zinc cartridge</i>	10
Gambar 5 - Radius efektif <i>zinc cartridge</i> jenis <i>insert</i> (untuk mitigasi korosi)	12
Gambar 6 - Radius efektif jenis pemasangan permukaan atau jenis <i>surface</i> (proses kerusakan tipe periode kemajuan) untuk mitigasi korosi	13
Gambar 7 - Radius efektif jenis pemasangan permukaan atau jenis <i>surface</i> (proses kerusakan tipe periode kemajuan dan akselerasi awal) untuk mitigasi korosi	13
Gambar 8 - Radius efektif jenis pemasangan permukaan atau jenis <i>surface</i> (proses kerusakan tipe periode kemajuan) untuk penekanan laju korosi dengan kriteria perlindungan korosi.....	14
Gambar 9 - Radius efektif pada tipe pemasangan permukaan atau jenis <i>surface</i> (proses kerusakan tipe periode kemajuan dan akselerasi awal) untuk penekanan laju korosi dengan kriteria perlindungan korosi.....	14
Gambar 10 - Detail pemasangan titik aliran	16
Gambar 11 - <i>Monitoring data logger</i>	17
Gambar A.1 - Contoh skema penulangan pelat lantai beton bertulang.....	20
Gambar A.2 - Contoh susunan batang gelagar beton prategang	22
Gambar B.1 - Contoh penataan metode <i>zinc cartridge</i> jenis <i>insert</i> pada pelat lantai beton bertulang (mitigasi korosi)	23
Gambar C.1 - Contoh susunan <i>zinc cartridge</i> tipe <i>surface</i> pada gelagar beton prategang ...	24

PENDAHULUAN

Metode *zinc cartridge* menggunakan logam atau paduan *zinc* anti korosi sebagai bahan anoda galvanik untuk melindungi tulangan baja di dalam beton dari kerusakan korosi yang disebabkan oleh paparan garam dari air laut ataupun lingkungan lainnya. Logam/paduan anoda galvanik dan tulangan dihubungkan dengan konduktor untuk mengalirkan listrik dari bahan anoda galvanik ke tulangan di dalam struktur beton. Metode *zinc cartridge* adalah metode konstruksi proteksi katodik anoda korban (*sacrificial anode cathodic protection*) yang bertujuan untuk mengurangi atau menekan laju korosi di tulangan dengan mengalirkan arus listrik lemah melalui anoda. Metode ini terbagi atas dua jenis, yaitu jenis ditanam (*inserted type*) dan jenis permukaan (*surface type*).

Pada metode jenis ditanam (*insert*), *zinc cartridge* terdiri dari bahan anoda galvanik, bahan pengisi tipe *non-curing* yang dipasang atau ditanam di dalam struktur beton bertulang yang sudah dilubangi dengan dibor, kemudian anoda galvanik dihubungkan ke tulangan struktur beton dengan baut ukuran M6. Baut M6 juga digunakan sebagai angkur untuk mengunci posisi anoda galvanik dan permukaan beton. Metode ini digunakan untuk mengurangi laju korosi di tulangan yang terletak di dekat permukaan beton, jauh di bagian dalam beton dan struktur yang memiliki tulangan yang rapat atau banyak.

Pada metode jenis permukaan (*surface*), *zinc cartridge* terdiri dari bahan anoda galvanik pengisi *non-curing*, dan kotak penutup yang dipasang di permukaan beton serta dihubungkan ke tulangan di dalam struktur beton bertulang. Jenis *surface* ini digunakan untuk mengurangi laju korosi tulangan yang sebagian besar terletak di permukaan beton.

Pedoman Perencanaan Proteksi Katodik Anoda Korban *Zinc Cartridge System* untuk Beton Bertulang di Wilayah Atmosferik

1. Ruang Lingkup

Pedoman ini menjelaskan hal-hal mengenai metode penanggulangan korosi tulangan beton termasuk struktur beton pratekan di wilayah atmosferik dengan proteksi katodik anoda korban (*sacrificial anode cathodic protection*) *zinc cartridge system* yang meliputi tahap perencanaan, pelaksanaan, dan monitoring sistem proteksi.

2. Acuan Normatif

ASTM C876-22b tentang *Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*

ASTM E 536-16 tentang *Standard Test Methods for Chemical Analysis of Zinc and Zinc Alloys*

ACI 222R- 01 tentang *Protection of Metals in Concrete Against Corrosion*

MIL-A-18001K-91 tentang *Military Specification: Anodess, Sacrificial Zinc Alloy*

EN ISO 12696-22 tentang *Cathodic Protection of Steel in Concrete*

SP0216-2016-SG tentang *Sacrificial Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures*

3. Istilah dan Definisi

3.1

anoda (*anode*)

bagian logam atau paduan yang terkorosi dan memiliki potensial lebih rendah daripada potensial bagian katoda

3.2

anoda korban (*sacrificial anode*)

logam atau paduan yang dikorbankan untuk melindungi baja yang mudah terkorosi dari lingkungan yang korosif

3.3

asam

suatu larutan atau lingkungan yang mengandung konsentrasi ion Hidrogen (H^+) yang melebihi konsentrasi ion Hidroksil (OH^-)

3.4

bahan *backfill*

merupakan bahan pengisi anoda yang juga berfungsi sebagai media elektrolit penghantar arus listrik melalui mekanisme reaksi elektrokimia, yang terdiri dari 75% *gypsum* ($CaSO_4$), 20% *bentonite clay*, dan campuran larutan ($LiNO_2$: $LiNO_3$: $Li(OH)_2 \cdot xH_2O$: H_2O)

3.5

basa

suatu larutan atau lingkungan yang mengandung konsentrasi ion Hidroksil (OH^-) yang melebihi konsentrasi ion Hidrogen (H^+)

3.6

elektrolit

larutan yang mengandung ion-ion yang bermuatan yang berfungsi sebagai penghantar arus listrik

3.7

katoda

bagian logam atau paduan yang tidak terkorosi dan memiliki potensial lebih tinggi daripada potensial bagian anoda

3.8

korosi tulangan baja

menurunnya mutu tulangan baja akibat bereaksi dengan lingkungan secara elektrokimia yang berakibat terjadinya karat

3.9

nilai pH

indek logaritma dari konsentrasi ion hidrogen (H^+) di dalam suatu elektrolit. Nilai pH berfungsi untuk mengetahui keasaman atau kebasaan dari suatu larutan atau lingkungan

3.10

potensial

dalam hal ini beda potensial, yaitu selisih energi bebas (listrik) antara anoda dan katoda

3.11

proteksi

perlindungan suatu bahan (baja) yang mudah terkorosi dari lingkungan yang korosif

3.12

proteksi katodik

perlindungan korosi pada permukaan logam (baja) dengan menjadikan permukaan logam (baja) tersebut sebagai katode sehingga logam (baja) tidak terkorosi

3.13

rapat arus

jumlah aliran muatan per satuan luas dan per satuan waktu dengan satuan mA/m^2

3.14

reaksi elektrokimia

reaksi kimia yang diikuti dengan perpindahan elektron serta diikuti dengan reaksi oksidasi dan reduksi

3.15

reaksi oksidasi

reaksi yang menunjukkan adanya kenaikan valensi atau melepaskan elektron, yang berlangsung pada Anoda. Contoh : $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{+2} + 2\text{e}$

3.16

reaksi reduksi

reaksi yang menunjukkan adanya penurunan valensi dan menerima elektron, yang berlangsung pada Katoda.

Contoh: Reduksi ion logam $\text{Fe}^{+2} + 2\text{e} \rightarrow \text{Fe}$

Reduksi oksigen (netral dan basa) $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

3.17

tahanan jenis

sifat dari suatu material (tanah, air, dan logam) pada suhu tertentu, yang menunjukkan besar hambatan tiap satuan panjang, dengan satuan ohm meter ($\Omega \cdot \text{m}$)

3.18

wilayah atmosferik

lokasi struktur jembatan yang berada pada area kering dan area pasang surut atau lokasi bangunan atas jembatan

4. Ketentuan Umum

4.1 Kriteria Anti Korosi *Zinc Cartridge*

Pada metode elektrokimia, sebagai standar anti korosi untuk menekan laju korosi pada tulangan dengan material baja, keadaan anti korosi dikontrol berdasarkan besarnya perubahan potensial tulangan sebelum dan sesudah dialiri arus proteksi. Pengukuran efektivitas anti korosi dilakukan dengan menggunakan metode depolarisasi. Standar besarnya nilai potensial tulangan dalam metode depolarisasi adalah perubahan potensial yang didasarkan pada perubahan potensial bahan tulangan baja sebelum dan sesudah dialiri arus proteksi sebesar 100 mV atau lebih. Dengan kata lain, katodik proteksi dianggap efektif melindungi tulangan dari korosi jika memiliki perubahan potensial dalam metode depolarisasi diatas 100 mV.

Zinc cartridge memiliki dua kriteria anti korosi yang dianggap efektif melindungi tulangan, yaitu mitigasi korosi dan perlindungan korosi. Jika jumlah perubahan potensial sebelum dan sesudah pemberian arus proteksi pada tulangan adalah sekitar 25 mV ~ 99 mV, maka akan dianggap sebagai kriteria **mitigasi korosi**. Sementara jika melebihi 100 mV, maka akan dianggap memenuhi kriteria **perlindungan korosi** pada tulangan.

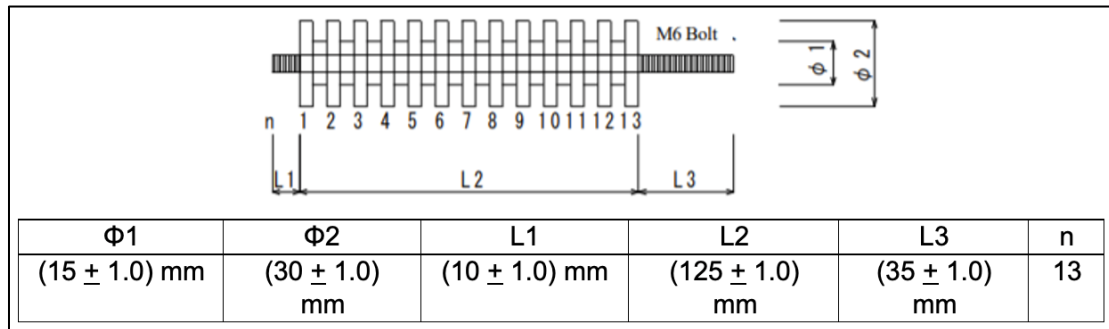
Kriteria mitigasi dan perlindungan korosi (Tabel 1) pada tulangan tergantung pada seberapa parahnya kondisi korosi di tulangan dan lingkungan, yang mana juga akan berpengaruh pada jumlah anoda yang dipasang.

Tabel 1 - Kriteria anti korosi *zinc cartridge*

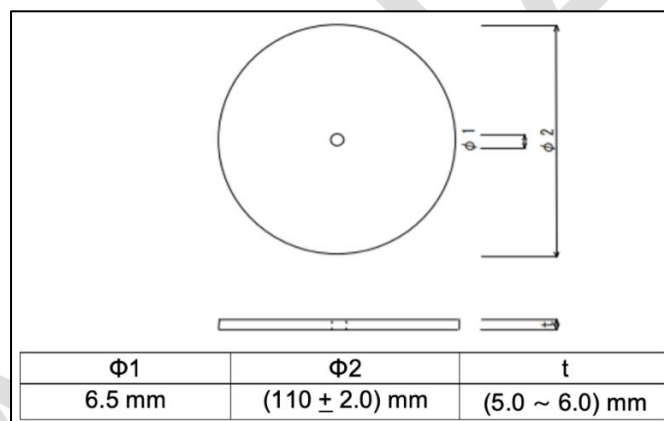
	Mitigasi Korosi	Perlindungan Korosi
Jumlah perubahan potensial yang diharapkan	Jumlah perubahan potensial sekitar 25 mV atau lebih sebelum dan sesudah pemberian energi.	Jumlah perubahan potensial sekitar 100 mV atau lebih sebelum dan sesudah pemberian energi.

4.2 Penentuan Rentang Mitigasi Korosi dan Jenis *Zinc Cartridge*

Jika tulangan yang terletak di permukaan atau di dalam beton adalah tulangan untuk mitigasi korosi, maka digunakan "tipe *insert*", dan untuk tulangan yang terletak di permukaan beton, maka dapat dipilih "tipe *surface*". Jenis-jenis anoda korban *zinc cartridge* ditunjukkan dalam Gambar 1 dan Gambar 2, sedangkan contoh penempatannya pada beton ditunjukkan dalam Tabel 2.



Gambar 1 - *Zinc cartridge system (insert type)*



Gambar 2 - *Zinc cartridge system (surface type)*

Tabel 2 - Jenis dan spesifikasi *zinc cartridge*

	Jenis Ditanam (<i>Insert</i>)	Jenis Permukaan (<i>Surface</i>)
Gambar Pemasangan		

	Jenis Ditanam (<i>Insert</i>)	Jenis Permukaan (<i>Surface</i>)
Target Penanggulangan Korosi	Tulangan yang dekat dengan permukaan beton, jauh di bagian dalam beton dan struktur yang memiliki tulangan yang rapat atau banyak.	Tulangan yang dekat dengan permukaan beton.

4.3 Fitur Metode Konstruksi *Zinc Cartridge*

Fitur pada metode *Zinc Cartridge* ditunjukkan sebagai berikut:

- Konstruksi dan penggantian yang mudah
Karena bahan anoda galvanik dipasang dengan baut sekrup yang diangkur ke beton dan menggunakan bahan pengisi non-perekat, bahan ini dapat dengan mudah dipasang dan diganti.
- Perbaikan sebagian dimungkinkan
Korosi dapat dikurangi dengan menghubungkan tulangan di dalam lokasi target dan material anoda galvanik sehingga memungkinkan untuk memperbaiki kerusakan penampang akibat korosi tulangan baja yang kecil sekalipun.
- Perawatan yang andal
Setelah konstruksi, jumlah arus dihasilkan dari anoda galvanik *zinc cartridge* di lokasi tertentu (tergantung pada kondisi), dimana potensial tulangan baja yang diukur melalui sensor kawat titanium dan *Easy M Monitor* (EMM) digunakan untuk mengukur waktu penggantian *zinc cartridge* dan tulangan terkorosi, serta dimungkinkan juga untuk memantau efek mitigasi.

4.4 Lingkup Penerapan Metode *Zinc Cartridge*

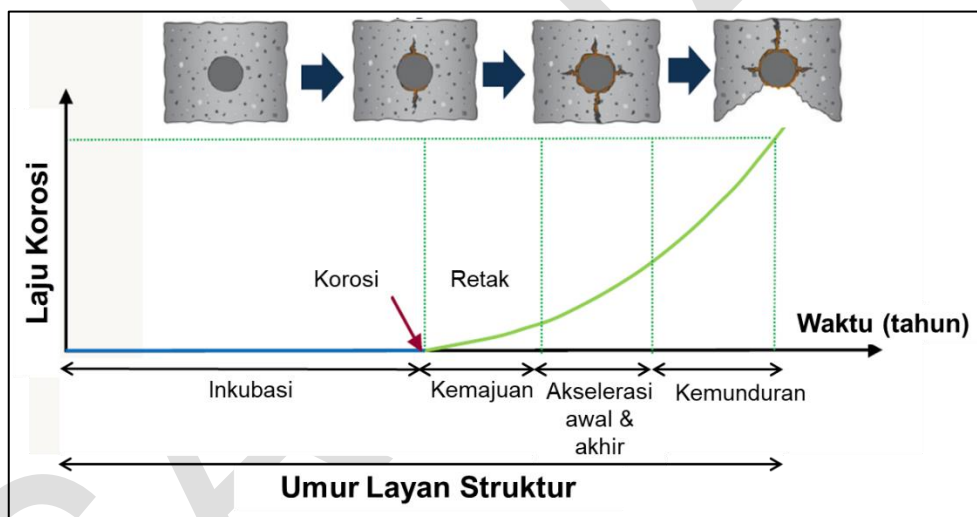
Kerusakan korosi akibat terpapar garam pada struktur adalah karena adanya ion klorida dalam beton yang mendorong korosi tulangan pada beton. Ekspansi volume produk korosi berupa karat menyebabkan keretakan, pengelupasan, atau pengurangan penampang beton dan penurunan kinerja struktur seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3.

Tabel 3 menunjukkan proses kerusakan struktur akibat terpapar lingkungan korosif air garam yang dibagi menjadi periode inkubasi, periode kemajuan, periode akselerasi, dan periode kemunduran. Metode *zinc cartridge* terutama berlaku untuk periode inkubasi, periode kemajuan, dan periode akselerasi awal di antara struktur yang rusak oleh garam.

Tabel 3 - Proses kerusakan struktur beton dan metoda perbaikan standar

Proses Kerusakan	Keadaan	Contoh Metode Perbaikan Standar
Periode inkubasi	Tidak ada perubahan dalam penampang struktur beton, memiliki konsentrasi ion klorida kurang dari batas izin (perbandingan terhadap berat semen, maksimum 0.06% untuk beton pratekan dan 0,15% untuk beton bertulang) yang bisa mengakibatkan korosi tulangan baja.	Perbaikan di permukaan.

Proses Kerusakan	Keadaan	Contoh Metode Perbaikan Standar
Periode kemajuan	Tidak ada penurunan penampang struktur beton yang terlihat, mulai memiliki konsentrasi ion klorida lebih dari batas izin yang bisa mengakibatkan korosi tulangan baja.	Perawatan permukaan, desalinasi, perlindungan elektrokimia, dan perbaikan penampang.
Periode akselerasi awal	Retakan korosi dan pengelupasan penampang terjadi, produk korosi berupa karat dapat dilihat.	Perbaikan penampang, desalinasi, perlindungan elektrokimia.
Periode akselerasi akhir	Lebar dan panjang retak korosi besar dan banyak terjadi, dan selimut beton terkelupas sebagian atau terkelupas karena adanya retakan korosi.	Perbaikan penampang (termasuk pemulihan kinerja mekanis).
Periode kemunduran	Pengelupasan kecil atau pengelupasan skala besar karena adanya retakan korosi, pengurangan penampang yang signifikan dari tulangan diamati, dan mutasi atau defleksi besar.	Perbaikan penampang (termasuk pemulihan kinerja mekanis).



Gambar 3 - Laju korosi terhadap umur layan struktur beton

Hubungan antara laju korosi tulangan baja dalam beton dan proses kerusakan struktur terhadap umur layan struktur ditunjukkan pada Gambar 3. Dari gambar terlihat bahwa korosi di tulangan baja dalam beton bisa menyebabkan retak pada beton hingga terkelupas.

5. Ketentuan Teknis

5.1 Survei Pendahuluan untuk Menentukan Penerapan Metode Konstruksi Zinc Cartridge

Jenis survei pendahuluan untuk menentukan penerapan metode *zinc cartridge* ditunjukkan dalam Tabel 4 sebagai berikut.

Tabel 4 - Jenis survei pendahuluan untuk menentukan penerapan metode *zinc cartridge*

<i>Item Survei</i>		Penyelidikan	
Dokumen dan Catatan desain	Lingkungan lokasi	Pedalaman, laut, cuaca, kondisi laut, suhu, kelembapan.	
	Bentuk struktural	Jenis struktur.	
	Lingkungan struktur	Zona atmosferik (<i>atmospheric zone</i>), zona percikan (<i>splash zone</i>), zona pasang surut (<i>tidal zone</i>), zona laut (<i>central sea zone or full immersion zone</i>).	
	Jenis tulangan	Tulangan utama, tulangan PC, tulangan berlapis resin, dan tulangan lainnya.	
	Tata letak tulangan	Jumlah tulangan, penempatan tulangan, selimut beton.	
	Riwayat perbaikan	Ada atau tidak adanya perawatan permukaan dan perbaikan penampang.	
Lokal	Eksterior	Survei visual	Perubahan warna, ada atau tidak adanya tulangan yang terbuka, retak, terkelupas.
	Beton	Konsentrasi ion klorida	Distribusi salinitas dalam arah kedalaman beton yang berfungsi untuk mengecek sedalam apa ion klorida sudah masuk ke dalam beton.
		Kedalaman karbonasi	Kedalaman karbonasi dalam beton.
	Tulangan dalam beton	Potensial alami dan tulangan (<i>Natural potential</i>)	Untuk memahami status korosi tulangan berdasarkan standar ASTM B876-15.
		<i>Chipping survey</i>	
		Posisi tulangan dan selimut beton	Untuk menentukan posisi titik pemasangan anoda galvanik dari <i>zinc cartridge</i> .
		Konduksi listrik antara tulangan dalam struktur beton	Mengukur kondisi konektivitas listrik antar tulangan baja dalam beton.

Disarankan untuk melakukan survei penempatan tulangan dari dokumen dan catatan desain, konsentrasi ion klorida dalam beton, nilai potensial tulangan dalam beton, dan survei visual dalam survei lapangan.

a. Tata letak tulangan

Dikarenakan jumlah tulangan dalam beton terkait erat dengan interval pengaturan jarak anoda *zinc cartridge*, maka perlu diperiksa posisi tulangan dan tebal selimut beton dalam dokumen desain.

b. Konsentrasi ion klorida

Tujuannya adalah untuk memperkirakan konsentrasi ion klorida pada posisi tulangan saat ini dan untuk memprediksi infiltrasi garam terhadap struktur dari waktu ke waktu.

c. Survei visual

Untuk bagian beton yang terapung atau terkelupas, efek perbaikan dengan metode *zinc cartridge* tidak dapat diperoleh kecuali diperbaiki dengan metode perbaikan penampang, dan survei visual dilakukan untuk tujuan memilih rentang perbaikan.

d. *Natural potential* (nilai potensial alami) tulangan

Metode ini menggunakan tes *half-cell potential* untuk mendeteksi tingkat kemungkinan korosi pada tulangan dengan melewati arus listrik melalui permukaan tulangan dengan menggunakan *high resistance voltmeter*. Dikarenakan potensial alami bahan anoda galvanik adalah sekitar -700 mV (vs.SSE), setidaknya potensial alami tulangan harus berada di sisi positif dari nilai ini untuk mengurangi korosi pada tulangan. Dalam kebanyakan kasus, nilai potensial alami tulangan struktur di zona atmosferik lebih positif daripada potensial bahan anoda, tetapi dalam kasus zona percikan atau zona pasang surut, nilai potensial alami tulangan mungkin dekat dengan potensi anoda yaitu sekitar -700 mV. Oleh karena itu, penting untuk memahami nilai potensial alami dari tulangan saat mengaplikasikannya pada zona percikan dan zona pasang surut.

e. Konduksi listrik antara tulangan

Dalam rentang konstruksi metode *zinc cartridge*, jika tidak ada kontinuitas antara tulangan, maka tidak ada arus yang akan mengalir melalui tulangan. Khusus untuk girder dan substruktur PC tipe pra-tarik, ada kasus dimana kontinuitas antara bahan baja tidak ditemukan, sehingga kontinuitas listrik antara tulangan harus diperiksa pada saat penyelidikan atau konstruksi.

Anoda korban harus bersifat anodik terhadap tulangan baja di dalam beton yang akan dilindungi. Beberapa contoh anoda yang dapat digunakan diperlihatkan pada Tabel 5.

Tabel 5 - Bahan-bahan dan sifat anoda korban

Sifat	Paduan Seng (zinc)*	Paduan Alumunium**	Paduan Magnesium***
1	2	3	4
Komponen	Al: 0,4 – 0,6	Al: sisa	Al: < 0,01
(%)	Cd: 0,075–0,125	Cu: < 0,006	Cu: 0,02
	Cu: < 0,005	Fe: < 0,1	Fe: < 0,03
	Fe: < 0,0014	Hg: 0,02 – 0,05	Mg: rem
	Tb: < 0,15	Si: 0,11 – 0,21	Mn: 0,5 – 1,3
	Si: < 0,125	Zn: 0,3 – 0,5	Ni: 0,001
	Zn: sisa	Lain-lain, masing-masing < 0,02	Pb: < 0,01
			Sn: < 0,01
			Zn: 0,01
Jumlah muatan <i>zinc</i>	2		
Kapasitas E_{kor} (SSE)	780 Ah-kg ⁻¹	2640 Ah-kg ⁻¹ -	1232 Ah-kg ⁻¹

Sifat	Paduan Seng (zinc)*	Paduan Aluminium**	Paduan Magnesium***
	-0,1050 mV	0,1000 mV	¹ -0,1700 mV
Kerapatan kg-m ⁻³	7060	2695	1765
Kapasitas Ah-kg ⁻¹	780	2,640	1,232
Pengausan (berat) Kg – Ay ⁻¹	10,7	3,2	4,1
Pengausan (volume) ml – Ay ⁻¹	1518	1180	1196
Keluaran Am ⁻²	6,5	6,5	10,8
E (SSE) mv	-1050	-1050	-1700

Keterangan:

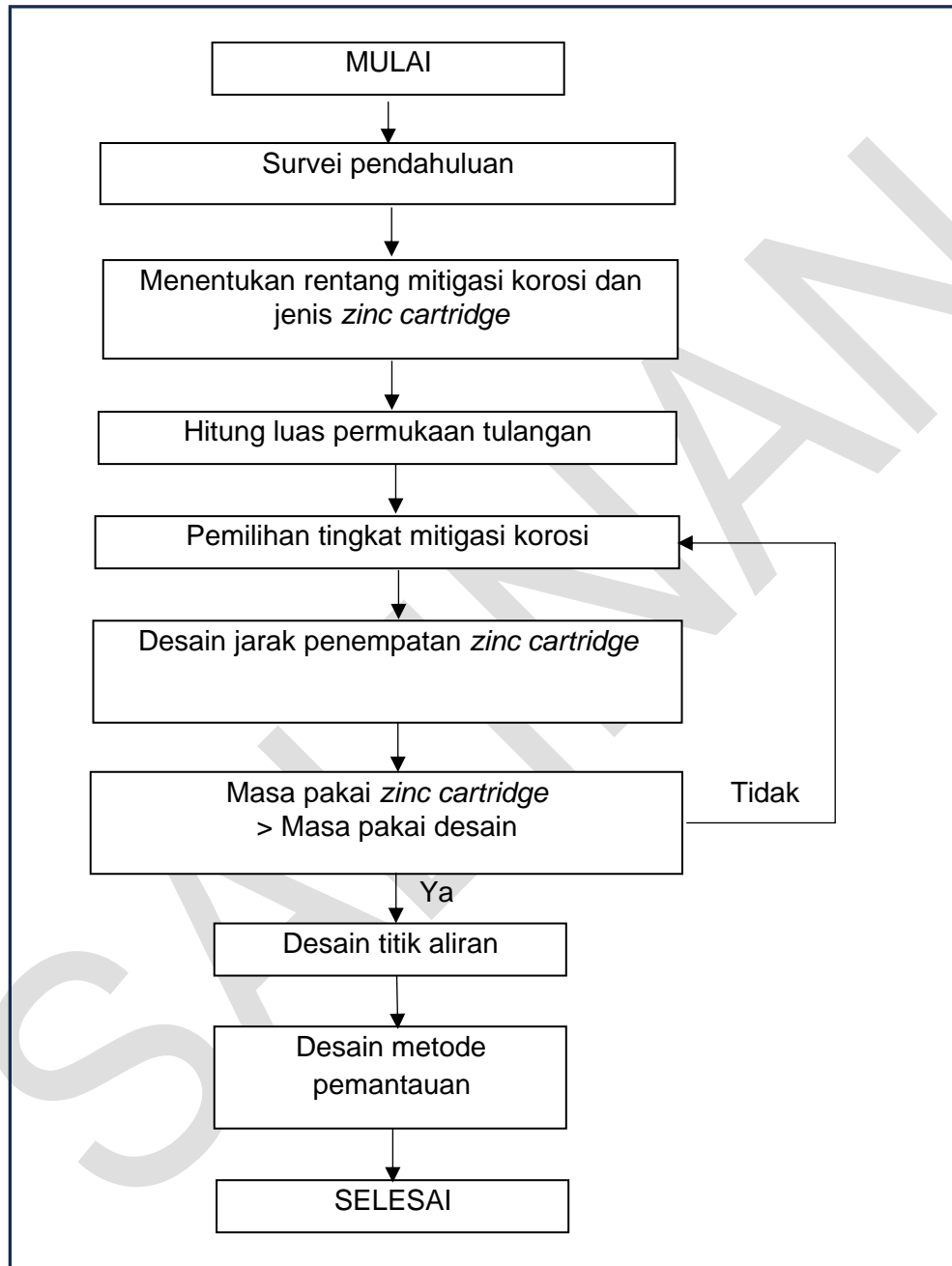
SSE (*Silver-Silver Chloride Electrode*) = Ag/AgCl

- * = Spesifikasi Departemen AS untuk bahan anoda korban seng (zinc) membutuhkan pengontrolan lebih ketat dalam hal tingkat kemurnian dari pada bahan ini
- ** = Merk dagang *Impalloy*
- *** = Merk dagang *Dow Chemical Company*

5.2 Desain Metode Konstruksi *Zinc Cartridge*

5.2.1 Bagan Alir Perencanaan

Bagan alir perencanaan sistem proteksi katodik anoda korban metode *Zinc Cartridge* ditunjukkan dalam Gambar 4 berikut.



Gambar 4 - Alur desain *zinc cartridge*

5.2.2 Perhitungan Rasio Tulangan

Rasio tulangan dihitung berdasarkan perbandingan luas permukaan beton yang akan terkorosi dengan luas permukaan tulangan, yang ditunjukkan melalui rumus-rumus perhitungan sebagai berikut:

- a. Luas permukaan pelat lantai beton adalah:

$$L = p \times l \dots\dots\dots (1)$$

Dimana:

L : Luas permukaan pelat lantai (m^2)

p : Panjang pelat lantai (m)

l : Lebar pelat lantai (m)

- b. Keliling tulangan

$$K = \pi d \dots\dots\dots (2)$$

Dimana:

K : Keliling tulangan (m)

π : 3,14

d : Diameter tulangan (m)

- c. Luas permukaan tulangan

$$Lt = K \times Pt \times n \dots\dots\dots (3)$$

Dimana:

Lt : Luas permukaan tulangan (m^2/m)

Pt : Panjang tulangan (m)

n : Jumlah tulangan dalam satu area luas (buah)

- d. Rasio tulangan

$$Rt = Lt/L \dots\dots\dots (4)$$

Dimana:

Rt : Rasio tulangan

Lt : Luas tulangan (m^2)

L : Luas permukaan pelat lantai (m^2)

5.2.3 Pemilihan Kriteria Anti Korosi

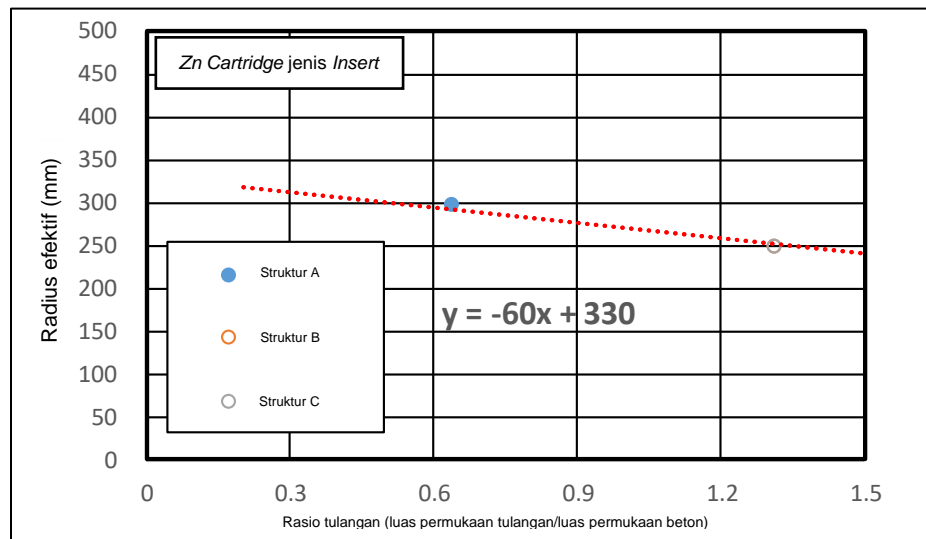
Sebagaimana dijelaskan sebelumnya bahwa metode *zinc cartridge* memiliki 2 (dua) kriteria standar anti korosi, yaitu mitigasi korosi dan perlindungan korosi, dimana jika jumlah perubahan potensial sebelum dan sesudah pemberian energi arus proteksi adalah sekitar 25 mV ~ 99 mV, maka bisa diterapkan untuk kriteria mitigasi korosi, dan 100 mV atau lebih bila diterapkan untuk kriteria perlindungan korosi. Setelah pemilihan tingkat anti korosi ditentukan, kemudian sejumlah anoda *zinc cartridge* kemudian disusun di area terkorosi sehingga jumlah perubahan potensial tulangan ditingkat anti korosi tertentu dapat diperoleh.

5.2.4 Desain Interval Penempatan Zinc Cartridge

5.2.4.1 Desain Interval Penempatan Tipe Insert

Hasil jumlah tulangan dan radius efektif pada tipe *Insert* ditunjukkan dalam Gambar 5. Rumus persamaan yang diperoleh pada grafik tersebut didasarkan pada rata-rata hasil pengukuran rasio tulangan (luas permukaan material baja/luas permukaan beton) dari struktur target dan

jumlah perubahan nilai potensial alami tulangan yang terjadi dari sejumlah benda uji selama interval waktu tertentu. Selain itu, berdasarkan data yang ditunjukkan pada Gambar 5, rumus untuk menghitung radius efektif menurut rasio tulangan ditampilkan. Perlu dicatat bahwa radius efektif dimaksudkan untuk mengatur jarak efektif pemasangan antar anoda *zinc cartridge*, semakin rapat jumlah anoda yang dipasang maka semakin besar arus proteksi yang diberikan terhadap tulangan di dalam struktur beton bertulang.



Gambar 5 - Radius efektif *zinc cartridge* jenis *insert* (untuk mitigasi korosi)

Dari grafik di atas, diperoleh persamaan untuk menentukan radius efektif pemasangan anoda *zinc* jenis *insert* sebagai berikut:

$$y = -60x + 330 \dots\dots\dots (5)$$

Dimana:

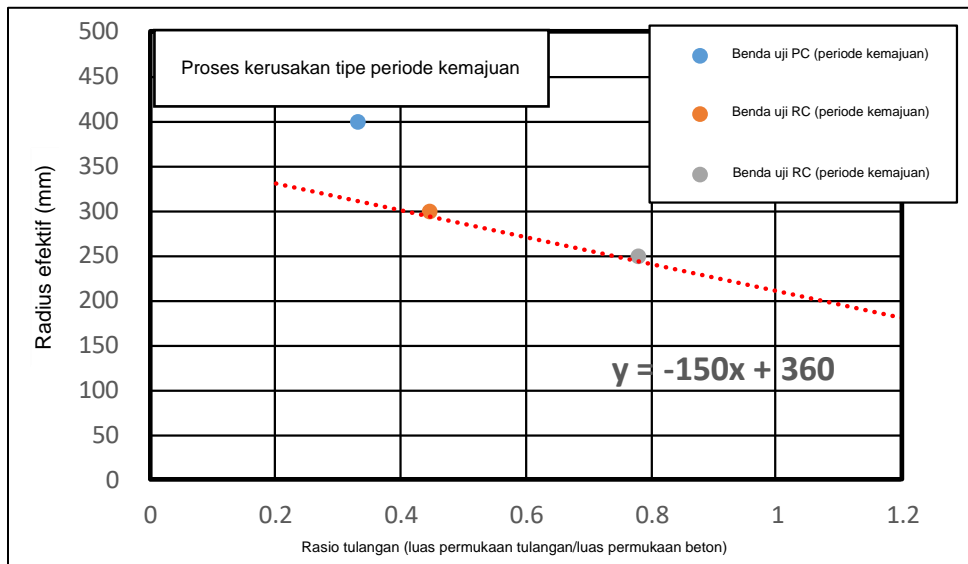
y : Radius efektif (mm)

x : Rasio tulangan (luas permukaan tulangan/luas permukaan beton)

5.2.4.2 Desain Interval Penempatan Tipe *Surface*

Radius efektif pada tipe *surface* ditunjukkan dalam Gambar 6. Data ini didasarkan pada hasil pengukuran jumlah perubahan potensial benda uji yang mensimulasikan struktur sebenarnya, yaitu rasio tulangan dari struktur target dan jumlah perubahan potensial yang sesuai dengannya. Data pengukuran radius efektif yang memenuhi kriteria sekitar 50 mV di-plot. Untuk tipe *surface* yang dipasang di permukaan, dalam kasus *mitigasi korosi* tulangan baja (perubahan potensial dalam radius efektif sekitar 25 mV), maka digunakan persamaan yang diperoleh dari grafik pada Gambar 6 dan Gambar 7, sedangkan untuk menekan korosi tulangan baja atau perlindungan korosi (perubahan potensial dalam radius efektif sekitar 100 mV) digunakan persamaan yang diperoleh dari grafik pada Gambar 8 dan Gambar 9.

Radius efektif penempatan anoda galvanik tipe *surface* ditujukan untuk bagian yang diapit di antara *zinc cartridge*, semakin rapat jumlah anoda yang dipasang maka semakin besar arus proteksi yang diberikan terhadap tulangan di dalam struktur beton bertulang. Perlu dicatat bahwa jumlah perubahan potensial semakin kecil di ujung penempatan anoda *zinc cartridge*.



Gambar 6 - Radius efektif jenis pemasangan permukaan atau jenis *surface* (proses kerusakan tipe periode kemajuan) untuk mitigasi korosi

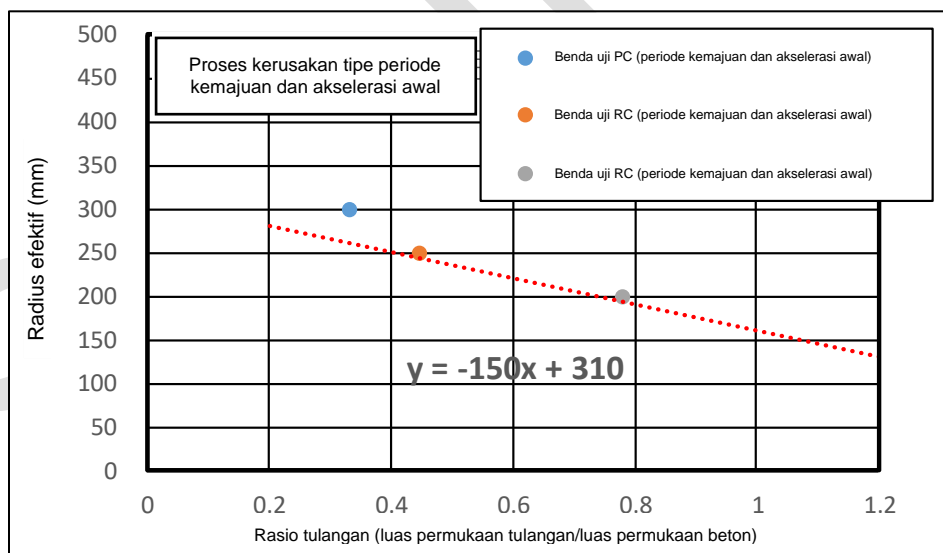
Dari grafik di atas, diperoleh persamaan untuk menentukan radius efektif pemasangan anoda *zinc* jenis *surface* dengan proses kerusakan tipe periode kemajuan dengan kriteria untuk mitigasi korosi sebagai berikut:

$$y = -150x + 360 \dots\dots\dots (6)$$

Dimana:

y : Radius efektif (mm)

x : Rasio tulangan (luas permukaan tulangan/luas permukaan beton)



Gambar 7 - Radius efektif jenis pemasangan permukaan atau jenis *surface* (proses kerusakan tipe periode kemajuan dan akselerasi awal) untuk mitigasi korosi

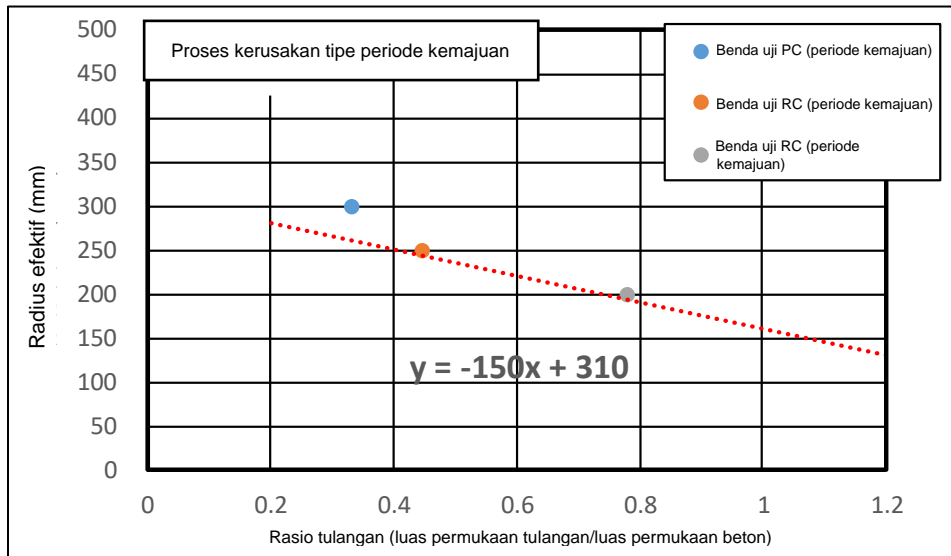
Dari grafik di atas, diperoleh persamaan untuk menentukan radius efektif pemasangan anoda *zinc* jenis *surface* dengan proses kerusakan tipe periode kemajuan dan akselerasi awal dengan kriteria untuk mitigasi korosi sebagai berikut:

$$y = -150x + 310 \dots\dots\dots (7)$$

Dimana:

y : Radius efektif (mm)

x : Rasio tulangan (luas permukaan tulangan/luas permukaan beton)



Gambar 8 - Radius efektif jenis pemasangan permukaan atau jenis *surface* (proses kerusakan tipe periode kemajuan) untuk penekanan laju korosi dengan kriteria perlindungan korosi

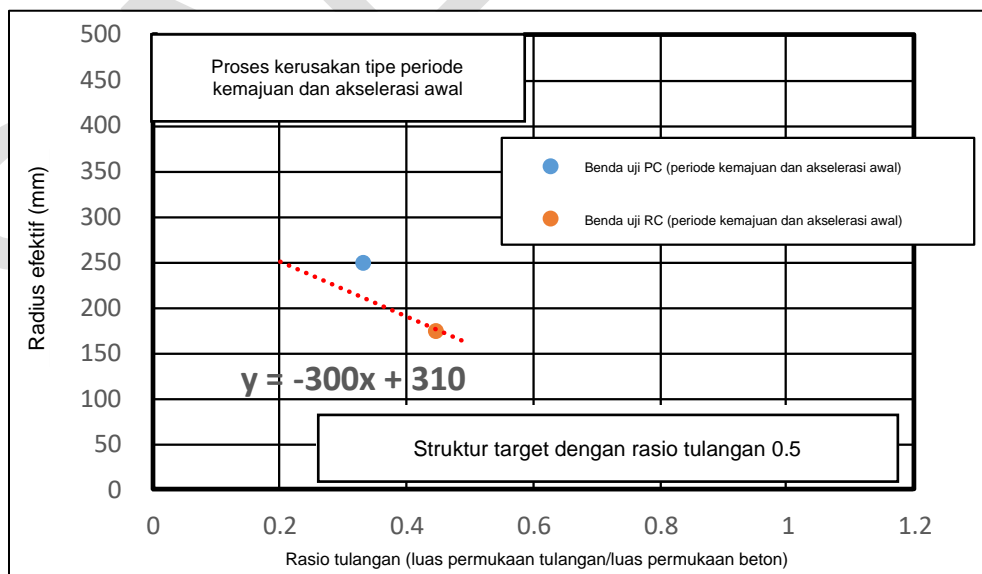
Dari grafik di atas, diperoleh persamaan untuk menentukan radius efektif pemasangan anoda *zinc* jenis *surface* dengan proses kerusakan tipe periode kemajuan dengan kriteria untuk perlindungan korosi sebagai berikut:

$$y = -150x + 310 \dots\dots\dots (8)$$

Dimana:

y : Radius efektif (mm)

x : Rasio tulangan (luas permukaan tulangan/luas permukaan beton)



Gambar 9 - Radius efektif pada tipe pemasangan permukaan atau jenis *surface* (proses kerusakan tipe periode kemajuan dan akselerasi awal) untuk penekanan laju korosi dengan kriteria perlindungan korosi

Dari grafik di atas, diperoleh persamaan untuk menentukan radius efektif pemasangan anoda *zinc* jenis *surface* dengan proses kerusakan tipe periode kemajuan dan akselerasi awal dengan kriteria untuk perlindungan korosi sebagai berikut:

$$y = -300x + 310 \dots\dots\dots (9)$$

Dimana:

y : Radius efektif (mm)

x : Rasio tulangan (luas permukaan tulangan/luas permukaan beton)

5.3 Prediksi Masa Pakai Anoda *Zinc Cartridge*

Metode *zinc cartridge* adalah metode proteksi katodik dimana arus listrik yang bersifat memberikan proteksi dilewatkan melalui tulangan menuju logam anoda galvanik sehingga logam anoda galvanik akan terkonsumsi (dikorbankan).

Nilai teoritis konsumsi logam anoda galvanik dapat dihitung dengan menggunakan hukum pertama elektrolisis Faraday yang ditunjukkan pada Persamaan (10).

$$m = \frac{Mit}{zF} \dots\dots\dots (10)$$

Dimana:

m : Berat logam anoda galvanik (gram)

M : Berat atom *zinc* (= 65,4 gram/mol)

i : Besarnya arus proteksi yang dihasilkan anoda (A)

t : Waktu (detik)

z : Jumlah muatan *zinc* (= 2) (berdasarkan standar MIL-A-18001K)

F : Konstanta Faraday (= 96500 C/mol)

Berdasarkan Persamaan (10) tersebut, maka umur prediksi masa pakai anoda *zinc cartridge* dalam tahun dapat dihitung melalui Persamaan (11) berikut.

$$t = \frac{mZF}{cMi} \times \sigma \dots\dots\dots (11)$$

Dimana:

t : Prediksi umur pakai (tahun)

m : Berat anoda *zinc cartridge* (gram)

M : Berat atom *zinc* (gram/mol)

i : Besarnya arus proteksi yang dihasilkan anoda (mA)

Z : Jumlah muatan *zinc* (2, berdasarkan standar MIL-A-18001K)

F : Konstanta Faraday (96500 C/mol)

c : konversi detik selama setahun (detik)

σ : tingkat konsumsi anoda *zinc* (%)

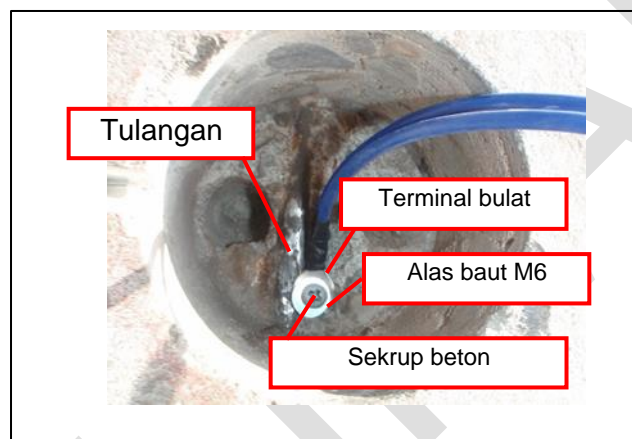
Arus yang dihasilkan dari logam anoda galvanik *zinc cartridge* berdasarkan penelitian selama ini ditunjukkan pada Tabel 6. Konsumsi arus proteksi dari anoda berkaitan dengan umur pakai anoda. Berdasarkan percobaan, dikonfirmasi bahwa umur logam anoda galvanik berfungsi hingga tingkat konsumsi sekitar 70%.

Tabel 6 - Jumlah arus yang dihasilkan anoda *zinc cartridge*

Tipe <i>Zinc Cartridge</i>	Jumlah Arus yang Dihasilkan (mA)
Jenis ditanam (<i>insert</i>)	1,5
Jenis permukaan (<i>surface</i>)	1,0

5.4 Desain Titik Aliran

Titik aliran berarti tempat di mana tulangan baja dalam beton, kabel listrik penghubung dan anoda *zinc cartridge* terhubung seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10. Pemasangan titik aliran dianjurkan seminim mungkin supaya tidak merusak ketahanan struktur. Dianjurkan untuk memasang satu titik aliran untuk beberapa jajaran anoda *zinc cartridge* dengan mempertimbangkan selimut beton tulangan dan kemudahan pemasangan kabel.



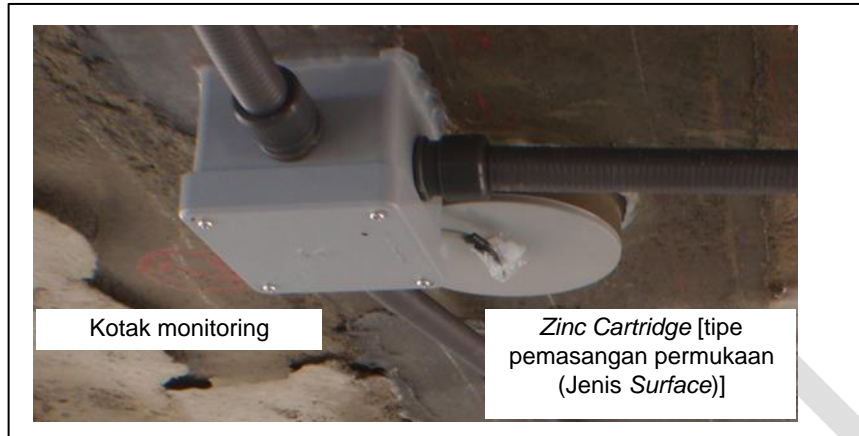
Gambar 10 - Detail pemasangan titik aliran

5.5 Metode Pemantauan

Pemantauan efektivitas sistem proteksi korosi anoda *zinc cartridge system* dapat dilakukan dengan 2 (dua) cara, yaitu cara manual dan cara nirkabel. Cara manual dilakukan dengan mengukur nilai potensial tulangan menggunakan alat *Half Cell Pontentiometer* dengan elektroda standar Cu/CuSO₄. Sistem proteksi dapat dikatakan bekerja dengan baik apabila dari hasil pengukuran potensial baja tulangan berada nilai minimum -850 mV dan nilai polarisasi minimum -100 mV.

Cara nirkabel dilakukan dengan memasang sensor potensial tulangan (misalnya *titanium wire sensor*) di dalam beton yang dihubungkan dengan alat pencatat dan pengolah data (*Monitoring Data Logger*) yang dipasang dilokasi struktur. Seluruh data yang terekam kemudian akan diteruskan kepada alat pemancar yang kemudian akan dikirimkan kepada server data secara nirkabel dan *real time*. Pemasangan *Monitoring Data Logger* dilakukan untuk memantau jumlah energi antara *zinc cartridge* dan titik aliran, serta nilai potensial tulangan baja, dan juga berfungsi untuk menilai umur anoda, serta memastikan efek mitigasi korosi yang dilakukan.

Untuk pemantauan, titik aliran dan *zinc cartridge* dihubungkan ke posisi *Monitoring Data Logger*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11, dan dilakukan pemantauan atau pengukuran arus listrik proteksi serta nilai potensial tulangan baja dilakukan secara berkala.



Gambar 11 - Monitoring data logger

Bibliografi

ASTM B876-15 *Standard Test Method for Corrosion Potentials Uncoated Reinforcing Steel In Concrete*

C. Christodoulou, C.I Goodier, S.A. Austin, J. Webb, G.K. Glass. 2014. *A New Arrangement of Galvanic Anodes for the Repair of Reinforced Concrete Structures. Construction and Building Materials*. 50, pp. 300-307.

K. Ishii, R.S Rafdinal. 2019. *New Sensor for Detecting Steel-Corrosion and Its New Possibility Titanium Wire Sensor. Titanium Japan Journal* Vol. 67, No. 1, pp. 8-13. Tokyo, Japan.

Marcus P & Oudar J.1995. *Corrosion Mechanisms in Theory and Practice*. Marcell Dekker, Inc.

P. Astuti, R.S Rafdinal, A. Mahasiripan, H. Hamada, Y. Sagawa, D. Yamamot. 2048. *Potential Development of Sacrificial Anode Cathodic Protection Applied for Severely Damaged RC Beams Aged 44 Years. Journal of Thailand Concrete Association*, Vol. 6 No. 2, pp. 24–31. Bangkok, Thailand.

R.S Rafdinal, T. Aoyama, K. Ishii, and K. Tori. 2017. *The Feasibility Study of Embedded Wire Sensor for Corrosion Monitoring of Concrete, Pre-stressed Concrete Symposium*, Vol. 26, No. 1, pp. 1680 – 1684. Kobe, Japan.

Daftar Penyusun dan Unit Kerja Pemrakarsa

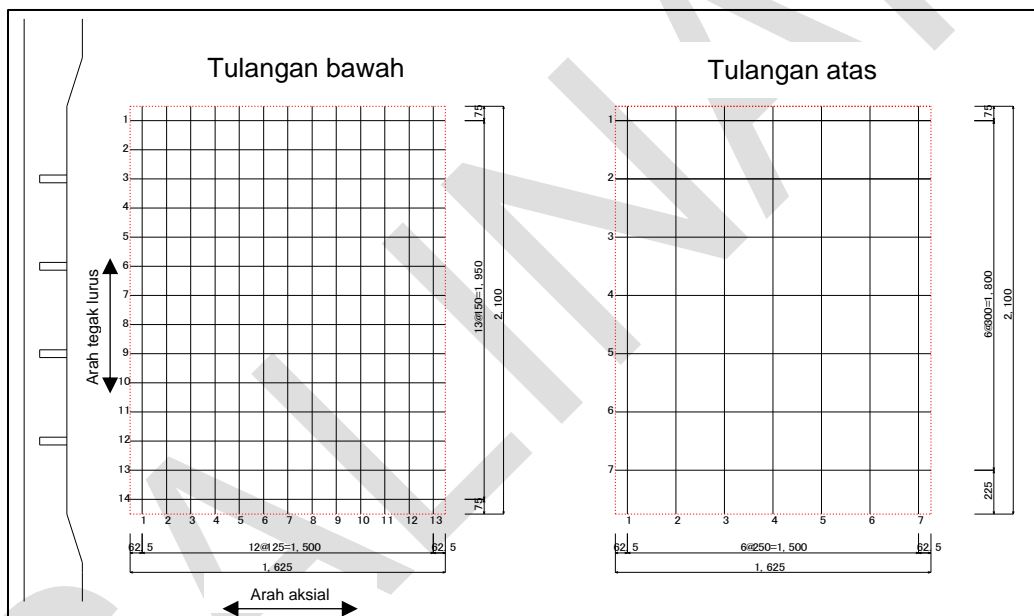
No.	Nama		Unit Kerja
1.	Pemrakarsa	Balai Geoteknik, Terowongan, dan Struktur, Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan, Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat	
2.	Koordinator	Ir. Yudha Handita Pandjiriawan, M.T., M.B.A.	Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan
3	Penyusun	Fahmi Aldiamar, S.T., M.T.	Balai Geoteknik, Terowongan, dan Struktur
4.		Hadi Gunawan Sonjaya	Balai Geoteknik, Terowongan, dan Struktur
5.		Rahmita Sari Rafdinal	PS Mitsubishi Construction, Ltd
6.	Editor Naskah	Subdirektorat Teknologi dan Peralatan Infrastruktur Bina Marga, Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan	

Lampiran A (Informatif) Contoh Perhitungan Rasio Tulangan

Berikut ini adalah contoh perhitungan rasio tulangan pada pelat lantai beton dan gelagar prategang.

A.1 Pelat Lantai Beton Bertulang

Contoh pelat lantai beton bertulang ditunjukkan pada Gambar A.1. Seperti yang ditunjukkan pada gambar, dimensi pelat lantai adalah panjang 2,1 m dan lebar 1,625 m. Diameter tulangan atas dan bawah pelat beton bertulang adalah D19, arah aksial tulangan bawah berjarak 0,150 m, dan jarak arah tegak lurus sumbu 0,125 m. Arah aksial tulangan atas berjarak 0,300 m, dan arah tegak lurus sumbu berjarak 0,250 m.



Gambar A.1 - Contoh skema penulangan pelat lantai beton bertulang

- a. Luas permukaan pelat lantai beton adalah:

$$L = p \times l \dots\dots\dots (1)$$

Dimana:

L : Luas permukaan pelat lantai (m^2)

p : Panjang pelat lantai (m)

l : Lebar pelat lantai (m)

sehingga:

$$L = 2,100 \times 1,625$$

$$L = 3,400 \, m^2$$

b. Keliling tulangan

$$K = \pi d \dots\dots\dots (2)$$

Dimana:

K : Keliling tulangan (m)

π : 3,14

d : Diameter tulangan (m)

Sehingga

$$K = 3,14 \times 19$$

$$K = 0,06 \text{ m}$$

c. Luas tulangan

$$Lt = K \times Pt \times n \dots\dots\dots (3)$$

Dimana:

Lt : Luas tulangan (m²/m)

Pt : Panjang tulangan (m)

n : Jumlah tulangan dalam satu area luas (buah)

Berdasarkan Gambar A.1, terlihat bahwa pelat beton terdiri dari dua rangkaian tulangan (atas dan bawah), dan masing-masing terdiri dari tulangan arah vertikal dan horizontal. Maka, luas permukaan tulangan pada pelat lantai tersebut ditunjukkan seperti dalam Tabel A.1. berikut.

Tabel A.1 - Luas permukaan tulangan pelat lantai

Penulangan		Diameter tulangan	Keliling tulangan	Panjang tulangan	Luas individual tulangan per panjang	Jumlah tulangan	Luas tulangan per area	
		(<i>d</i>)	(<i>K</i>)	(<i>Pt</i>)		(<i>n</i>)	(<i>Lt</i>)	
		m	m	m	m ² /m	buah	m ² /m	
Bawah	Horizontal	0,019	0,060	1,625	0,098	14	1,365	3,003
	Vertikal	0,019	0,060	2,100	0,126	13	1,638	
Atas	Horizontal	0,019	0,060	1,625	0,098	7	0,683	1,565
	Vertikal	0,019	0,060	2,100	0,126	7	0,882	
Luas total tulangan							4,568	

d. Rasio tulangan

$$Rt = Lt/L \dots\dots\dots (4)$$

Dimana:

Rt : Rasio tulangan

Lt : Luas tulangan (m²)

L : Luas permukaan pelat lantai (m²)

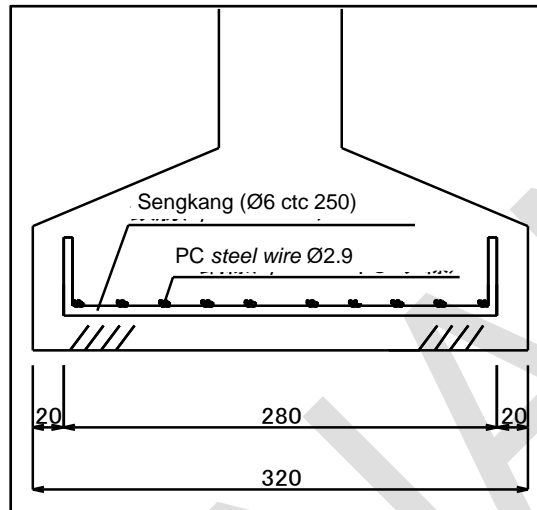
Sehingga

$$Rt = 4,568/3,4$$

$$Rt = 1,344$$

A.2 Gelagar Beton Prategang

Contoh dimensi gelagar serta sistem penulangannya ditunjukkan pada Gambar A.2. Seperti yang ditunjukkan pada gambar, dimensi lebar penampang gelagar beton prategang (PC) adalah 0,32 m dengan panjang 1 m dan tinggi 0,27 m. Diameter tulangan tarik atau sengkang adalah 6 mm sebanyak 4 (empat) buah, dan diameter tulangan tekan atau PC *steel wire* adalah 2,9 mm sebanyak 10 (sepuluh) buah.



Gambar A.2 - Contoh susunan batang gelagar beton prategang

Maka, berdasarkan rumus persamaan (1), didapat luas permukaan beton sebesar 0,32 m² dan berdasarkan rumus persamaan (2), dan (3) di atas diperoleh luas tulangan pada gelagar seperti tercantum pada Tabel A.2.

Tabel A.2- Luas permukaan tulangan gelagar beton prategang

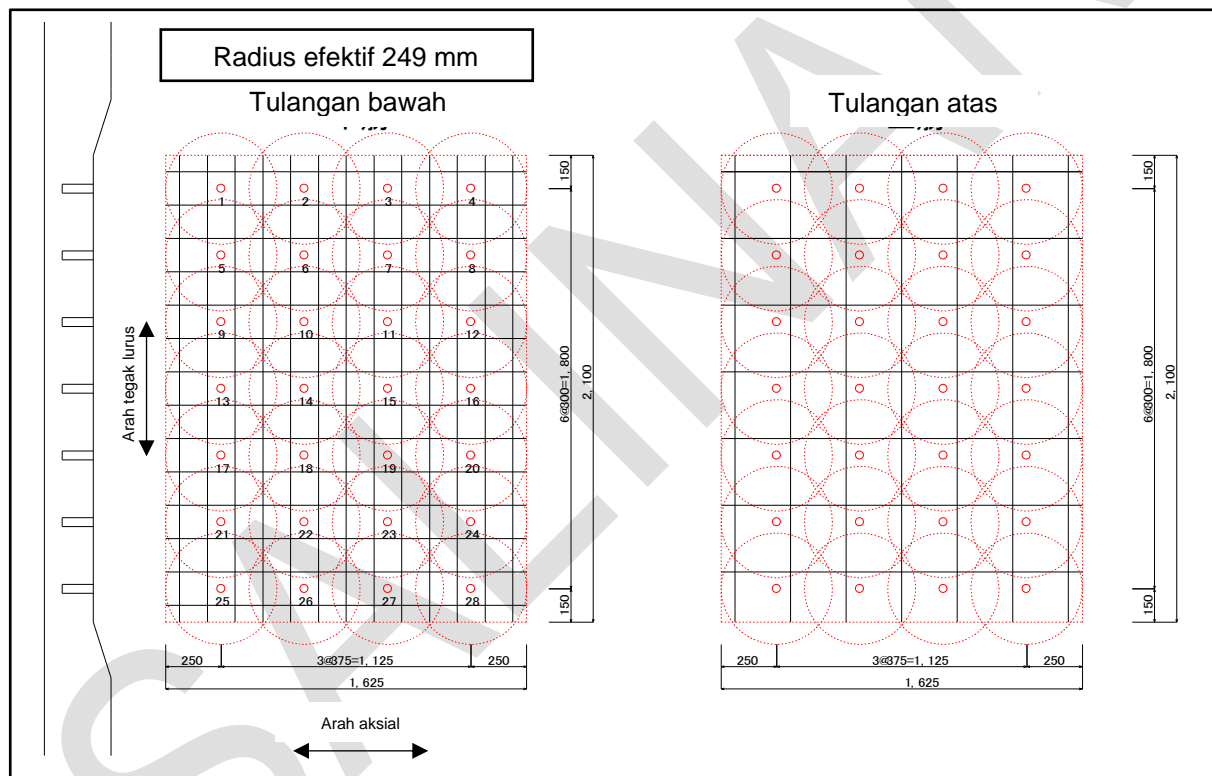
Penulangan	Diameter tulangan	Keliling tulangan	Panjang tulangan	Luas individual tulangan per panjang	Jumlah tulangan	Luas tulangan per area
	(d)	(K)	(Pt)		(n)	(Lt)
	m	m	m	m ² /m	buah	m ² /m
Tulangan Tekan (PC)	0,0029	0,009	1,000	0,009	10	0,091
Tulangan Tarik (sengkang)	0,006	0,019	0,270	0,005	4	0,020
Luas total tulangan						0,111

Berdasarkan rumus persamaan (4) di atas, diperoleh rasio tulangan pada gelagar yaitu sebesar 0,348.

Lampiran B
(Informatif)
Contoh Desain Interval *Zinc Cartridge* Tipe *Insert* pada Struktur Beton

Sebagai contoh untuk menentukan susunan *zinc cartridge* pada pelat lantai beton bertulang (Gambar A.1), rasio tulangan dari pelat lantai beton bertulang adalah 1.344, dan jika ini disubstitusikan ke dalam persamaan (5), maka diperoleh radius efektifnya adalah 249 mm. Kemudian, anoda *zinc cartridge* ditempatkan minimal dengan radius 249 mm sehingga tulangan yang terkena mitigasi korosi berada dalam radius efektif pemasangan anoda.

Secara khusus, lingkaran dengan radius 249 mm dibuat dari pusat *zinc cartridge*, dan diatur sedemikian rupa sehingga memenuhi kisaran mitigasi korosi. dalam contoh ini, seperti yang ditunjukkan pada gambar B.1, *zinc cartridge* disusun pada 300 mm dalam arah tegak lurus terhadap sumbu dan 375 mm pada arah aksial.



Gambar B.1 - Contoh penataan metode *zinc cartridge* jenis *insert* pada pelat lantai beton bertulang (mitigasi korosi)

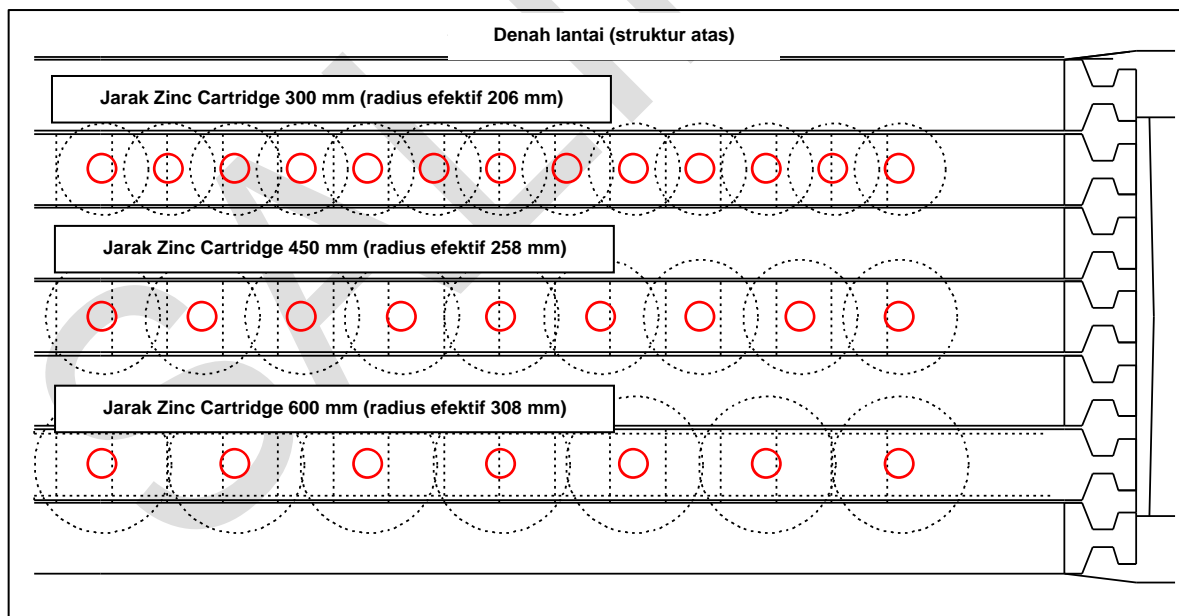
Lampiran C
(Informatif)
Contoh Desain Interval *Zinc Cartridge* Tipe *Surface* Pada Struktur Beton

Sebagai contoh, radius efektif *zinc cartridge* yang ditujukan untuk mitigasi korosi pada proses kerusakan tipe “periode kemajuan” pada gelagar beton prategang (Gambar A.2.) dengan kriteria mitigasi korosi dan untuk penekanan laju korosi dengan kriteria perbaikan korosi pada “periode kemajuan dan akselerasi awal”; rasio tulangan gelagar dalam contoh adalah 0,348; dan dalam kasus mitigasi korosi dalam “periode kemajuan”; jika ini disubstitusikan ke Persamaan (6), maka radius efektif akan menjadi 308 mm.

Demikian pula, dalam kasus mitigasi korosi pada “periode kemajuan dan periode akselerasi awal”, jika ini disubstitusikan ke dalam Persamaan (7) dan Persamaan (8), radius efektif adalah 258 mm, dan dalam kasus penekanan korosi dengan kriteria perlindungan korosi pada “periode kemajuan dan periode akselerasi awal”, jika disubstitusikan ke Persamaan (9), maka jari-jari efektif menjadi 206 mm.

Secara khusus, dibuat lingkaran dengan radius 308 mm, 258 mm, dan 206 mm dari pusat *zinc cartridge*, dan diatur sedemikian rupa sehingga memenuhi kisaran mitigasi korosi.

Dalam contoh seperti yang ditunjukkan pada Gambar C.1, interval 600 mm digunakan untuk mitigasi korosi pada “periode kemajuan”, serta interval 450 mm digunakan untuk mitigasi korosi pada kerusakan “periode akselerasi awal dan akhir” dan “periode kemunduran”. Dalam kasus penekanan laju korosi dengan kriteria perlindungan korosi pada paruh pertama periode, *zinc cartridge* akan diatur pada interval 300 mm.



Gambar C.1 - Contoh susunan *zinc cartridge* tipe *surface* pada gelagar beton prategang

Lampiran D
(Informatif)
Contoh Perhitungan Prediksi Umur Pakai Zinc Cartridge

Sebagai contoh, hasil perhitungan ketika *zinc cartridge* ditempatkan pada pelat lantai beton bertulang (Gambar B.1.) berdasarkan desain interval penempatan jenis *insert* maka prediksi umur pakai anoda dan hubungannya dengan tingkat konsumsi anoda *zinc* dapat dihitung sebagai berikut:

m : 373 g untuk tipe *Insert*
 M : 65.4 gram/mol
 i : 1,5 mA = 0.0015 A,
 Z : 2
 F : 96500 C/mol
 σ : 50%

Maka, diperoleh prediksi umur pakai anoda dan hubungannya dengan tingkat konsumsi anoda *zinc* sebesar 50% adalah selama:

$$t = \frac{373 \times 2 \times 96500}{31536000 \times 65.4 \times 0.0015} \times 50\%$$
$$t = 23 \text{ tahun}$$