

PEMBUATAN *GUIDELINE* UNTUK *ASSESSMENT* DAN SOLUSI STRUKTUR BETON BERTULANG YANG TERDAMPAK SERANGAN KLORIDA (STUDI LITERATUR)

Jason Evan ¹, James Pringgo AdiMuljo ², Handoko Sugiharto ³ dan Gunawan Budi Wijaya ⁴

ABSTRAK : Beton merupakan bahan bangunan yang tahan lama. Namun, kondisi lingkungan yang agresif berupa *chemical attack* dapat menyebabkan kerusakan beton bertulang. Salah satu dari *chemical attack* yang membahayakan beton adalah serangan klorida. Dengan kerusakan yang ditimbulkan akibat serangan klorida, dibutuhkan panduan yang dapat memudahkan dilakukannya *assessment*, dan pertimbangan dalam pemilihan proteksi maupun perbaikan terhadap klorida. Penelitian ini dilakukan dengan studi literatur dari berbagai macam standar, dan penelitian sebelumnya yang berisi dampak klorida pada struktur beton bertulang, cara untuk melakukan *assessment*, dan juga berbagai macam proteksi untuk struktur baru dan struktur yang sudah terdampak klorida. Hasil dari penelitian ini menghasilkan *flowchart* sebagai panduan yang dapat dilakukan untuk *assessment* beton yang terdampak klorida dan tabel yang berisi informasi syarat, kelebihan, bahan, dan metode aplikasi yang dapat digunakan untuk pertimbangan memilih proteksi maupun perbaikan pada beton. Tabel *assessment* dan solusi memiliki kategori tingkat berbahayanya suatu struktur beton bertulang dan solusi yang sesuai pada kategorinya.

KATA KUNCI: *chemical attack*, serangan klorida, panduan, *assessment*, proteksi, perbaikan.

1. PENDAHULUAN

Beton merupakan bahan bangunan yang banyak digunakan pada struktur bangunan di Indonesia. Hal ini dikarenakan beton dapat dibuat dengan mudah dan memerlukan bahan yang relatif lebih murah dibandingkan bahan-bahan struktur lainnya seperti baja (Miswar, 2011). Beton juga merupakan bahan bangunan yang tahan lama, beton mampu menahan pelapukan, serangan kimia, dan abrasi dalam jangka waktu tertentu. Namun, kondisi lingkungan yang agresif dapat menyebabkan kerusakan beton bertulang (Ndahirwa, Qiao, dan Mahame, 2018). Indonesia merupakan salah satu negara yang dikelilingi oleh lingkungan yang cukup agresif dengan sifat kebasaaan yang tinggi dan mengandung unsur sulfat (SO₄) dan ion klorida (Cl) (Miswar, 2011). Pada penelitian kali ini, penulis akan membuat sebuah *guideline* mengenai dampak serangan klorida terhadap struktur beton bertulang, standar dan tahap *assessment*, serta solusinya. Hal ini digunakan untuk membantu *owner* struktur beton bertulang dalam menemukan solusi bagi gedungnya yang sudah terdampak serangan klorida, karena belum adanya *guideline* yang praktis dan mudah. Penelitian ini mengambil tiga contoh kasus bangunan, yang diberi nama gedung industri X, jembatan Y, gedung industri Z yang sudah terekspos klorida yang kemudian akan dianalisis kondisinya, standar dan tahap *assessment* yang dilakukan, serta solusi yang diambil seperti apa.

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, m21416014@john.petra.ac.id

²Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, m21416186@john.petra.ac.id

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

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

2 CHLORIDE ATTACK PADA STRUKTUR BETON BERTULANG

Menurut (ACI-222R-19, 2019), sumber klorida yang menyerang beton dapat berupa campuran, kontaminan, lingkungan laut, penggunaan air garam dalam industri, dan juga *deicing salt* (garam yang digunakan untuk mencairkan es di beberapa negara dan industri). Mekanisme kerusakan lapisan pasif pada baja yang dirusak oleh klorida tidak dapat diketahui secara detail oleh karena sulitnya untuk dilakukan penelitian dalam skala atomik pada lapisan pasif yang tipis. Menurut (*Portland Concrete Association*, 2002) bahwa baja tulangan yang ada di dalam beton berada dalam lingkungan yang bersifat basa kuat dan memiliki pH 12-13. Lingkungan basa kuat inilah yang memberikan perlindungan terhadap baja tulangan di dalam beton dari serangan korosi karena baja tulangan di dalam lingkungan basa kuat menjadi pasif (Fahirah, 2007).

Menurut (*Concrete Society*, 2000), klorida tidak memiliki pengaruh yang signifikan pada beton padat tetapi keberadaan klorida meningkatkan resiko korosi pada baja tulangan. Pada beton yang belum terkontaminasi, lapisan pasif pada baja tulangan akan terus-menerus rusak dan memperbarui dirinya sendiri. Kadar klorida pada level yang kecil hanya akan memperlambat proses pembaharuan lapisan pasif tetapi dengan level kadar klorida yang melebihi batas, maka kecepatan pembaharuan lapisan pasif tidak cukup cepat untuk menyamai kecepatan pembaharuan lapisan pasif. Pada tulangan yang memiliki lapisan pasif, laju korosi pada umumnya berjalan sebesar 0.1 μm per tahun. Tetapi ketika lapisan pasif ini hilang, baja akan terkorosi setidaknya 1000 kali lipat (ACI-222R-19, 2019). Setelah lapisan pasif baja tulangan rusak, maka baja tulangan akan dengan leluasa terekspos air dan juga oksigen yang ada di dalam beton. Meskipun klorida berperan penting dalam menginisiasi korosi (Mulyono, 2015).

3 KOROSI BAJA TULANGAN PADA BETON BERTULANG

Korosi baja tulangan adalah reaksi elektrokimia antara baja tulangan dengan lingkungannya yang meliputi perpindahan elektron. Untuk proses korosi terjadi, dibutuhkan adanya keberadaan air dan oksigen. Reaksi kimia tersebut dinyatakan sebagai berikut (ACI-222R-19, 2019):

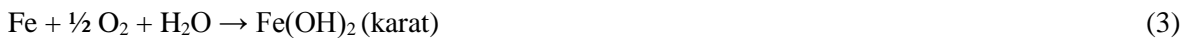
Reaksi oksidasi atau reaksi anodik:



Elektron tersebut berpindah kepada sisi yang disebut katoda dimana elektron tersebut bergabung dengan oksigen dan air dalam beton. Reaksi tersebut disebut reaksi reduksi:



Untuk mempertahankan kestabilan listrik, ion besi berpindah ke sisi katoda dan membentuk hidroksida besi atau karat:



Akibat adanya karat yang terbentuk, volume baja tulangan yang berkarat akan lebih besar dari volume baja tulangan yang tidak terkorosi dan mempengaruhi struktur (*Concrete Association*, 2000).

4 SIFAT BETON YANG MEMPENGARUHI LAJU ION KLORIDA

Tingkat masuknya ion klorida ke dalam beton tergantung pada struktur pori beton, hal ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti bahan, pelaksanaan, dan usia beton itu sendiri. Daya tembus beton terhadap ion klorida berkaitan dengan struktur pori dari pasta semen sebagai bahan dasar dari beton tersebut. Hal ini dipengaruhi oleh w/c (rasio air semen), bahan-bahan tambahan dari semen untuk membagi struktur pori, dan derajat hidrasi beton. Pengaruh lainnya pada struktur pori adalah suhu pada saat pengecoran. Tingkat penetrasi ion klorida pada beton dipengaruhi oleh kapasitas pengikatan ion klorida pada beton. Hal ini karena beton tetap bereaksi dengan klorida di dalam pori (Stanish, Hooton, dan Thomas, 1997).

5 STANDAR DAN METODE *CONDITION ASSESSMENT*

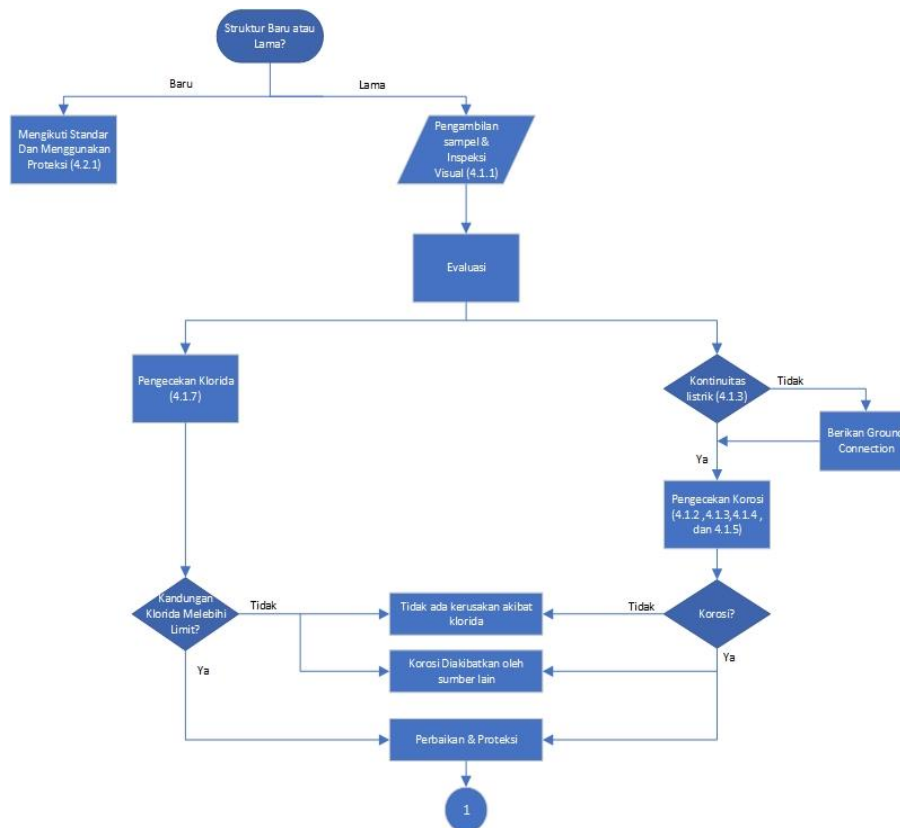
Sejak akhir tahun 1960, telah dikembangkan teknik dan prosedur untuk *condition assessment* pada struktur beton bertulang. Dengan menggunakan teknik yang tepat dan juga pengolahan data yang baik, dapat diambil kesimpulan serta dapat diterapkan tindakan perbaikan yang tepat. *Condition assessment* terdiri dari inspeksi visual, survei delaminasi, pengukuran resistivitas beton, *corrosion potential mapping*, perhitungan kecepatan dan tingkat korosi, menentukan penampang baja tulangan yang hilang akibat korosi, serta pengambilan sampel dan analisis kandungan klorida.

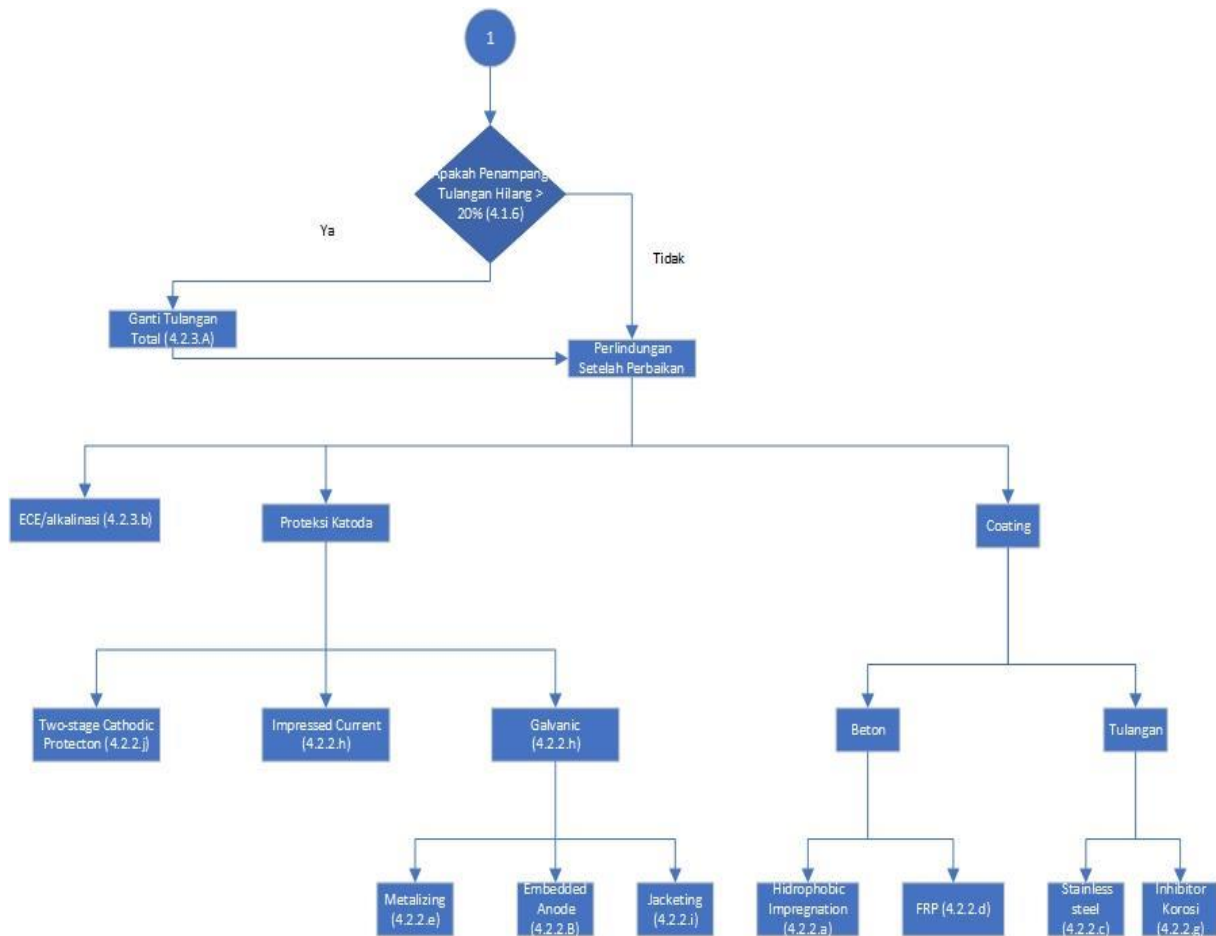
6. SOLUSI YANG MUNGKIN DILAKUKAN

Untuk struktur yang baru, mempertimbangkan ketahanan struktur terhadap korosi sangat penting untuk umur layannya. Untuk struktur yang terpapar klorida tingkat perlindungan terhadap korosi ditentukan oleh kedalaman selimut beton, keberadaan dan lebar retakan yang ada, serta laju transportasi ion klorida pada beton. Kemudian untuk proteksi struktur beton bertulang terhadap klorida, ada beberapa solusi yang bisa dipakai. Contohnya adalah, membran anti air, beton polimer, pelapisan baja tulangan, *metallizing*, perkuatan dengan lapisan epoksi ECR (*epoxy coated reinforcement*), inhibitor kimia, proteksi katoda, *jacketing*, dan *two stage cathodic protection*. Sistem proteksi ini akan dikombinasikan setelah dilakukannya perbaikan manual atau ekstraksi klorida untuk perbaikan struktur yang sudah terdampak klorida.

7. FLOWCHART DAN TABEL UNTUK ASSESSMENT DAN PERBAIKAN

Dari berbagai macam solusi yang ada, penulis membuat sebuah panduan/*guideline* untuk *assessment* yang disajikan dalam bentuk *flowchart* pada **Gambar 1**, dan tabel untuk perbaikan yang disajikan pada **Tabel 1** dan **Tabel 2**.





Gambar 1. Flowchart Assessment

Tabel 1. Assessment

Tabel Assessment					
Assessment	Sumber	Metode dan Alat	Kondisi baik	Kondisi sedang	Kondisi buruk
Inspeksi Visual	ACI 222R-19 Concrete Society, 2000	Grinder, hammer drill, covermeter, rebar locator	Beton dalam kondisi baik, tidak ada kerusakan maupun noda	Beton dalam kerusakan minor, mulai terdapat retakan	Beton rusak seperti adanya <i>spalling</i> , baja tulangan berkarat dan terekspos, dll
Survei Delaminasi	ACI 222R-19 Concrete Repair and Maintenance <i>illustrated</i> , 1994	Palu dan Rantai	Bunyi nyaring	Bunyi nyaring	Bunyi kopong
Pengukuran Resistivitas Beton	ACI 222R-19	Wenner Four Electrode	> 100, 20 - 100 kΩ-cm	10 - 20 kΩ-cm	< 5, 5 - 10 kΩ-cm
Corrosion Potential Mapping	ACI 222R-19	Half-Cell Portable	> -20 V CSE	antara - 20V sampai - 35V CSE	< -35 V CSE
Kecepatan Korosi	ACI 222R-19	LPR Method (Linear Polarization Resistance)	I _{corr} < 0,2, 0,2- 1,0 (μA/cm ²) prediksi umur layan 10-15 tahun	I _{corr} = 1,0-10 (μA/cm ²) Prediksi umur layan 2-10 tahun	I _{corr} > 10 (μA/cm ²) Prediksi umur layan < 2 tahun
Penampang Baja Tulangan yang Hilang Akibat Korosi	ACI 364.14T-17	Jangka sorong	< 20%	< 20%	> 20%
Pengambilan Sampel dan Analisa Kandungan Klorida	ACI 222R-19 <i>Acid-soluble</i> : ASTM C1152 <i>Water-soluble</i> : ASTM C1218	Pengambilan Sampel dengan pengambilan bubuk dan coring Laboratorium dengan metode <i>acid soluble</i> dan <i>water soluble</i>	<i>Acid-soluble</i> < 0.2 % <i>Water soluble</i> < 0.2%	<i>Acid-soluble</i> > 0.2 % <i>Water soluble</i> > 0.2%	<i>Acid-soluble</i> > 0.2 % <i>Water soluble</i> > 0.2%

Tabel 2. Solusi yang Ditawarkan

Solusi						
Metode Pretelasi	Jenis Bahan	Syarat	Teknik	Kelengkapan	Standar	Solusi yang Ditawarkan
Beton Polimer	Silika fume, styrene butadiene, acrylic latex	Curing selama 7 hari berturut	Menggunakan mesin manual Ditambahkan waktu pengampuran beton	Meningkatkan kekuatan kompresi dan kekuatan pengikat pada beton, menurunkan permeabilitas, beton lebih bisa menahan abrasi Menambahkan resistensi terhadap penetrasi air, garam, dan klorida	ACI 202R-19 ACI 346R-14	
Pelapasan baja tulangan	Baja anti karat	Permukaan baja bersih, kering, tidak ada esat	Ketika fibrasi sebelum pengecoran	Memiliki resistensi terhadap klorida dan korosi pada permukaan baja tulangan Tidak membutuhkan perawatan, murah untuk jangka panjang	ACI 202R-19	
ECR	Epoxy	Permukaan bersih, kering, tidak ada esat Cocok untuk interior Tidak cocok untuk struktur yang terendam air/kelembaban tinggi	Menggunakan spray, roll, cast	Menahan abrasi, menutup dan mengisi retakan yang ada	ACI 202R-19 ACI 315.2R-13	
Metallizing	Tembaga, nikel, seng, kadmium	Lelatan dengan beton perlu diperhalus Memperhalus jarak dan pemasangan Perlu dilakukan testing bila area luas	Dengan spray (are spray) /adhesive	Lapisan yang di serprokan bisa dicampur bahan yang memiliki resistensi terhadap klorida, sehingga memiliki proteksi terhadap korosi sekalipun penetrasi klorida Cocok untuk perbaikan jangka panjang Tidak adanya bahan organik yang dapat merusak struktur Tidak membutuhkan curing	ACI 202R-19 ACI 346R-14	
Inhibitor Korosi	Calcium nitrate, diazobenzene	Permukaan bersih, kering, belum ada creases Belum beton harus diperhalus Konsentrasi inhibitor > konsentrasi ion klorida Kontrol dosis penting (jika tidak, terjadi pitting)	Menggunakan spray, roll, cast pada permukaan Bisa digunakan dalam bentuk admixtures	Admixtures bisa dikontrol dosasinya, bisa dilakukan pre test, kontak langsung dengan baja tulangan untuk melindungi Permukaan mereduksi penetrasi klorida, dan aktivitas korosi	ACI 202R-19	
Cathodic Protection (Galvanic)	Galvanic	Struktur memiliki kontinuitas listrik Klorida > 0,2 persen massa semen Area delaminasi kurang dari 2% Belum beton > 13 mm Untuk beton mutu rendah	Galvanic ditanam di dalam beton	Bisa digunakan di hampir semua struktur beton bertulang Dapat digunakan tanpa membongkar tulangan atau membongkar sebagian besar dari beton Menghambat lajunya korosi	ACI 202R-19 ACI 346R-14	
Membran Anti Air	Hydrophobic impregnation (silane), sealer magnesium silicate	Tidak cocok untuk struktur yang terendam air Dapat beresponasi apa bila kondisi lingkungan terlalu panas atau becuang Lebih efektif pada w/c beton rendah	Menggunakan spray, roll, cast pada permukaan Bisa digunakan dalam bentuk admixtures	Menyempit ke dalam beton untuk melindungi beton dari klorida, air dan garam	ACI 202R-19 ACI 315.2R-13 ACI 346R-14	
Cathodic Protection (DCP)	Ingressed current	Struktur memiliki kontinuitas listrik Klorida > 0,2 persen massa semen Area delaminasi kurang dari 2% Belum beton > 13 mm Tidak direkomendasikan untuk struktur beton prestressed	Ingressed current: menggunakan power supply yang ada di luar beton	Bisa digunakan di hampir semua struktur beton bertulang Dapat digunakan tanpa membongkar tulangan atau membongkar sebagian besar dari beton Menghambat lajunya korosi	ACI 202R-19 ACI 346R-14	
Zapcoating	Galvanic, ingressed current, baja tahan karat	Semua beton yang rusak harus dikalis Retak harus diperbaiki Baja tulangan harus diperhalus Permukaan bersih, dan kering	Pemberian anoda dengan jarak tertentu mengelilingi beton Diberikan /zakar dari PVC atau bahan lainnya Dibakukan greasing	Memiliki perlindungan terhadap embak dan lingkungan laut (khususnya pada tidal zone) karena adanya perlindungan tambahan dari janket	ACI 202R-19 ACI 346R-14	
Two-stage Cathodic Protection	Galvanic, ingressed current	Struktur memiliki kontinuitas listrik Klorida > 0,2 persen massa semen Area delaminasi kurang dari 2% Belum beton > 13 mm	Galvanic: ditanam di dalam beton Ingressed current: menggunakan power supply yang ada di luar beton	Bisa digunakan di hampir semua struktur beton bertulang Dapat digunakan tanpa membongkar tulangan atau membongkar sebagian besar dari beton Menghambat lajunya korosi	ACI 202R-19 ACI 346R-14	

Catatan: Kondisi sedang (kuning), klorida harus dikeluarkan dari beton dengan ECE (*electrochemical chloride extraction*) atau mengupas beton hingga baja tulangan terekspos. Kondisi buruk (merah), beton harus dikupas, dan baja tulangan harus diganti.

8 STUDI KASUS

Dari **Tabel 1** dan **Tabel 2**, dapat digunakan untuk menentukan solusi yang cocok dengan kondisi masing-masing struktur yang terdampak klorida. Pada penelitian ini diambil tiga contoh struktur yang terdampak klorida, yaitu gedung industri X, jembatan Y, dan gedung industri Z.

9 KESIMPULAN

Dari penelitian pembuatan *guideline* untuk *assessment* dan solusi struktur beton bertulang yang terdampak serangan klorida (studi literatur), dapat ditarik beberapa kesimpulan yang di antaranya adalah:

1. Bahan kimia (berupa cairan atau gas) khususnya klorida dapat mengakibatkan kerusakan terhadap struktur beton bertulang secara tidak langsung karena klorida akan merusak lapisan pasif baja tulangan, sehingga baja tulangan akan langsung bereaksi dengan air dan oksigen yang ada di dalam beton yang kemudian akan menimbulkan korosi pada baja tulangan.
2. Perlu dilakukannya tahapan-tahapan *assessment* untuk perbaikan terhadap struktur beton bertulang yang terdampak klorida dimulai dari inspeksi visual dan pengambilan sampel, survei delaminasi, pengujian kontinuitas listrik, *corrosion potential mapping*, perhitungan kecepatan korosi, menentukan penampang baja yang hilang akibat korosi, dan analisis kandungan klorida.
3. Dapat digunakannya *flowchart*, serta **Tabel 1** dan **Tabel 2** untuk *assessment* dan melakukan tindakan perbaikan terhadap struktur yang sudah terdampak klorida.

10 DAFTAR REFERENSI

- American Concrete Institute Committee 222. (2019). *Guide to Protection of Reinforcing Steel in Concrete Against Corrosion* (ACI 222R-19).
- American Concrete Institute Committee 364. (2017). *Section Loss Determination of Damaged or Corroded Reinforcing Steel bars* (ACI 364.14T-17).
- American Concrete Institute Committee 515. (2013). *Guide for Selecting Protective Treatments for Concrete* (ACI 515.2R-13).
- American Concrete Institute Committee 546. (2014). *Guide To Concrete Repair* (ACI 546R-14).
- ASTM International. (2003). *Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete* (ASTM C1152/C 1152M).
- ASTM International. (2008). *Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete* (ASTM C1218/C 1218M).
- Concrete Society. (2000). *Diagnosis of Deterioration in Concrete Structures: Technical Report no.54*.
- Fahirah, F. (2007). *Korosi pada Beton Bertulang dan Pencegahannya*.
- Mulyono. (2015). *Kerusakan Beton*. Retrieved from [https://unjamy.sharepoint.com/personal/trimulyono_unj_ac_id/Documents/Chapter%2018%20-%20concrete%20deterioration\(kerusakan%20beton\).pdf?&originalPath=aHR0cHM6Ly91bWpYy1teS5zaGFyZXBvaW50LmNvbS86YjovZy9wZXJzb25hbC90cmJldWx5b25vX3Vual9hY19pZC9FYWY1NVppekRyVk5rLThMRUFsZ1dmZ0JhT1BSUWt4TnVMY0ZjV0c3d19KLXdnP3J0aW1PVFRZlhCcW8tMkVn](https://unjamy.sharepoint.com/personal/trimulyono_unj_ac_id/Documents/Chapter%2018%20-%20concrete%20deterioration(kerusakan%20beton).pdf?&originalPath=aHR0cHM6Ly91bWpYy1teS5zaGFyZXBvaW50LmNvbS86YjovZy9wZXJzb25hbC90cmJldWx5b25vX3Vual9hY19pZC9FYWY1NVppekRyVk5rLThMRUFsZ1dmZ0JhT1BSUWt4TnVMY0ZjV0c3d19KLXdnP3J0aW1PVFRZlhCcW8tMkVn).
- Miswar, K. (2011). *Kuat Tekan Beton terhadap Lingkungan Agresif*.
- Ndahirwa, D., Qiao, H., & Mahame, C. (2018). *Effect of Carbonation, Chloride, and Sulphate Attacks on Reinforced Concrete: A Review*.
- Portland Concrete Association. (2002). *Types and Causes of Concrete Deterioration*.
- Stanish, K. D., Hooton, R. D., & Thomas, M. D. A. (1997). *Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review*.