

Durabilitas dan Degradasi Material Bangunan

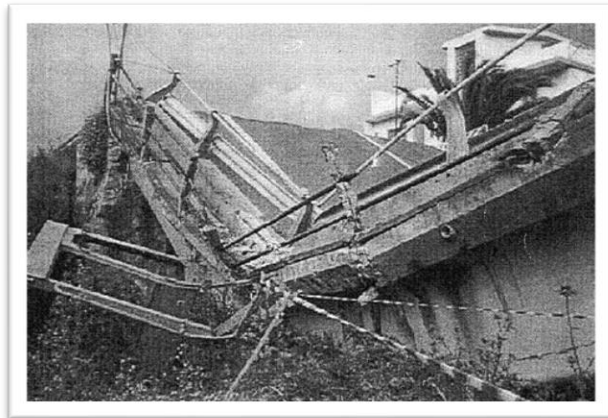
Nur Ahmad Husin

Definisi :

- **Durabilitas** (ketahanan) adalah ketahanan **beton** menghadapi segala kondisi dimana dia direncanakan, tanpa mengalami kerusakan (deteriorate) selama jangka waktu layannya (service ability). **Beton** yang demikian disebut mempunyai ketahanan yang tinggi (durable).
- **Degradasi** kemunduran, kemerosotan, penurunan, dan sebagainya (tentang mutu, dan sebagainya)

PENDAHULUAN

- ❑ Beton bertulang di lingkungan agresif tidak bebas dari korosi
- ❑ Pada awalnya hanya berpengaruh pada **serviceability struktur**, seperti **staining, cracking, dan spalling**
- ❑ apabila tidak dilakukan perawatan atau perbaikan dapat menimbulkan "kegagalan struktur"
- ❑ Definisi kegagalan struktur
 - ✓ tidak berfungsi sesuai disain awal, meskipun belum runtuh
 - ✓ runtuh



BESARNYA PERMASALAHAN



Korosi pada struktur beton bertulang



Korosi pada jetty dengan usia 20 tahun



Korosi pada jetty dengan usia 25 tahun



Korosi pada struktur dengan umur <10 tahun
(belum runtuh sudah dibongkar)



CRACKING

SPALLING

Potret cracking dan spalling di lingkungan sekitar



CRACKING

SPALLING

Potret cracking dan spalling di lingkungan sekitar

PELAYANAN (SERVICEABILITY)

Kerusakan komponen struktural di graha ITS akibat dari tipisnya selimut beton bertulang. Tulangan geser menjadi putus akibat terjadinya korosi



CORROSION

PELAYANAN (SERVICEABILITY)

Kerusakan komponen struktural di graha ITS akibat dari tipisnya selimut beton bertulang. Tulangan geser menjadi putus akibat terjadinya korosi



CORROSION



Korosi pada bangunan Grha dengan usia 20 tahun

Korosi di Indonesia

- ❑ Negara kepulauan dengan garis pantai 74.000 km
- ❑ Kelembaban, curah hujan dan temperatur rata-rata yang cukup tinggi => kecepatan korosi tinggi
- ❑ Rendahnya mutu pekerjaan beton serta tingkat pengawasan yang belum memadai
- ❑ 1,5% dari GNP (Konstruksi, 1996)
- ❑ Industri minyak mencapai 15% dari harga instalasinya
- ❑ Potensi loss akibat korosi cukup besar

Spesifikasi Masalah Keawetan Menurut Peraturan Beton Indonesia

- ❑ Tebal minimum cover
- ❑ Faktor air semen maksimum (air <<)
- ❑ Jumlah semen minimum
- ❑ Mutu beton minimum

Tidak terdapat informasi mengenai umur layan bangunan bila memenuhi spesifikasi diatas

Durabilitas dan Degradasi Material Beton

- Umur bangunan dipengaruhi :
 - Durabilitas materialnya
 - Perencanaannya
 - Pelaksanaannya
 - Pemakaian (pembebanan)
 - Kondisi lingkungan, dan
 - Kondisi perawatannya.
- Umur bangunan bukan merupakan sesuatu yang mudah diukur

Exposure condition in the marine environment

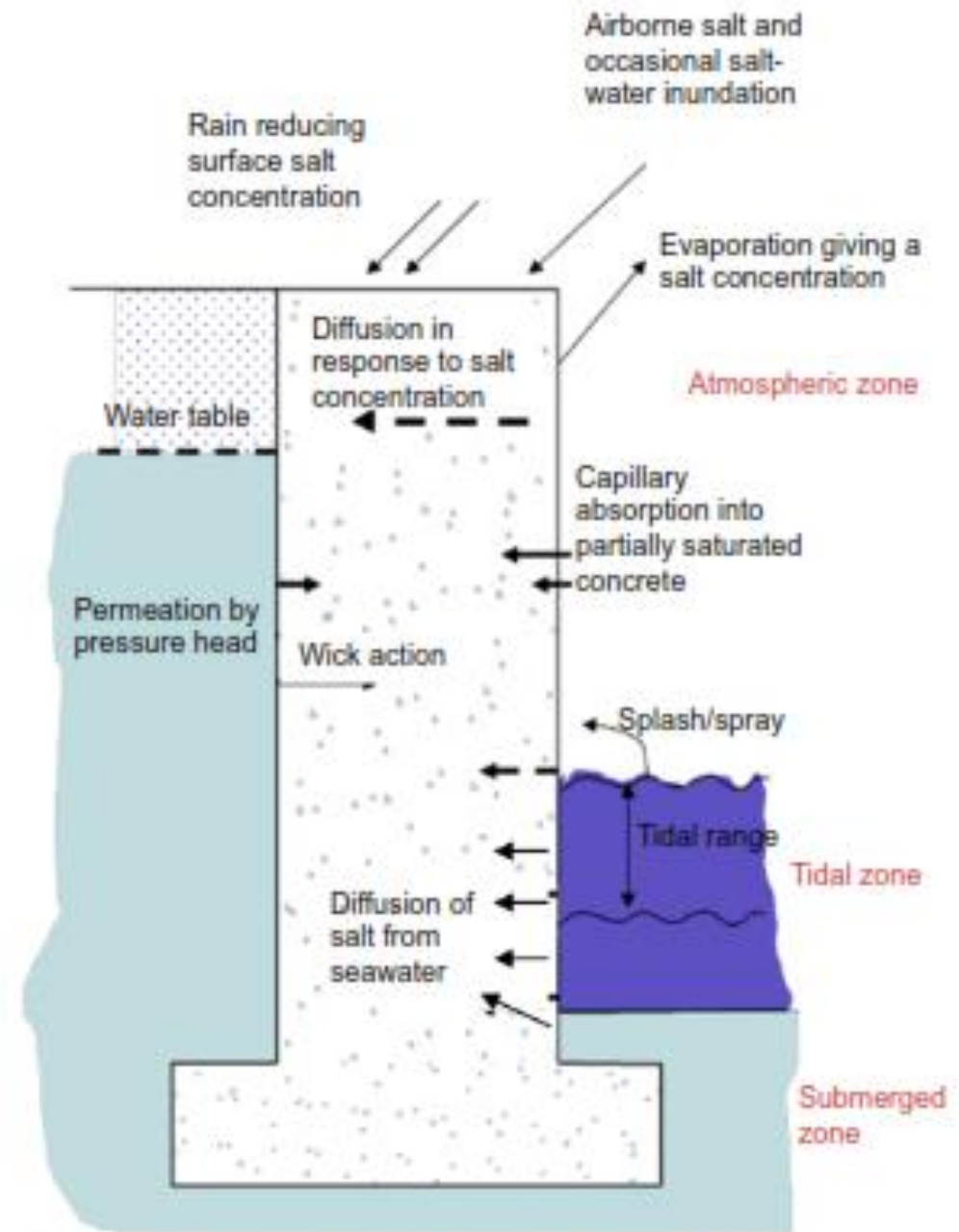
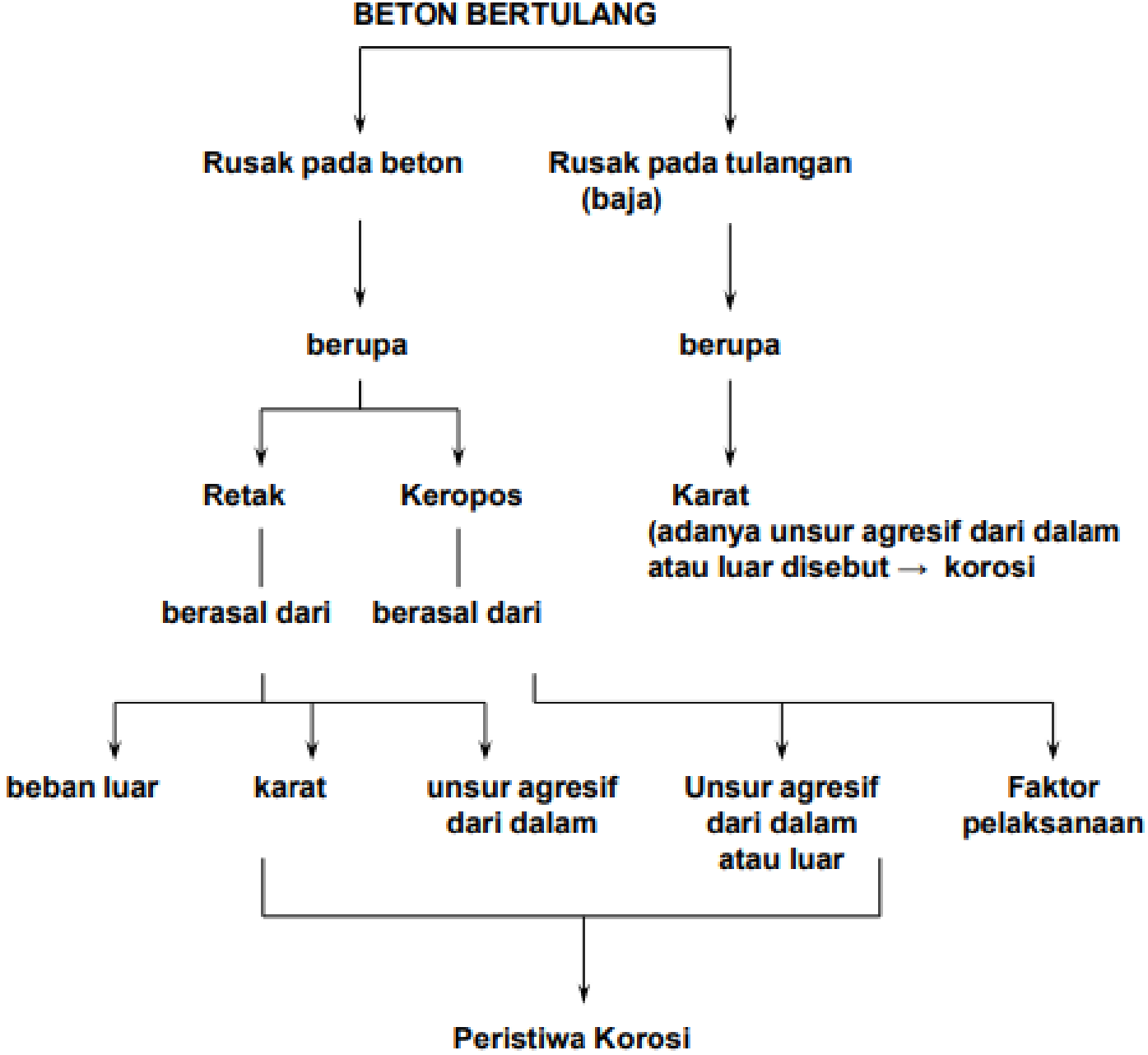


Figure 5.1 Different exposure conditions in the marine environment.
Based on BS 6349-1, 2000. Maritime Structures Part 1: Code of Practice for General Criteria.
British Standards, London.

Beton Bertulang

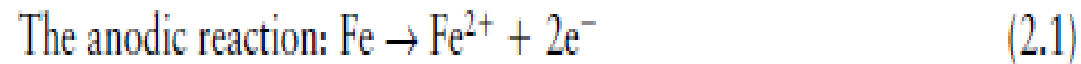


Korosi baja dalam beton

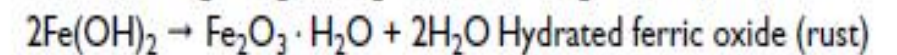
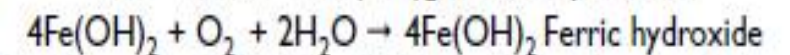
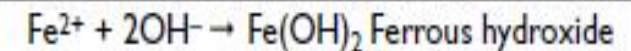
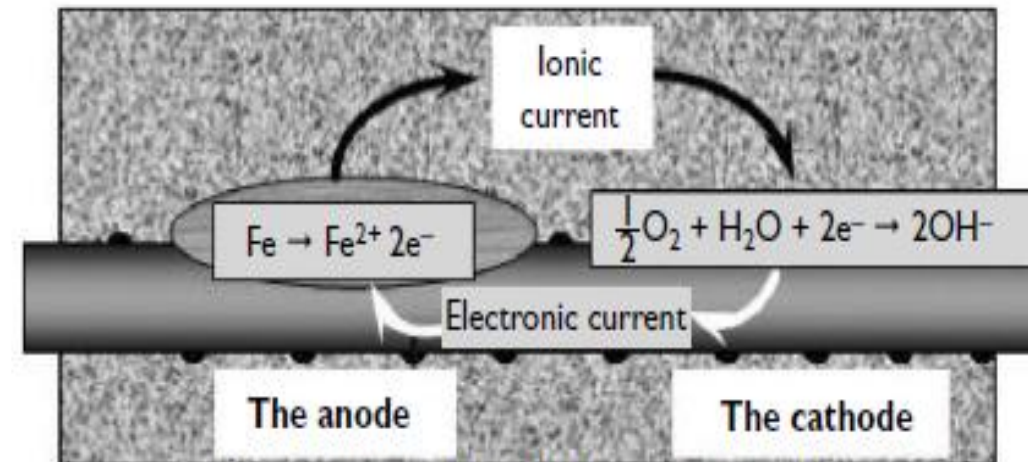
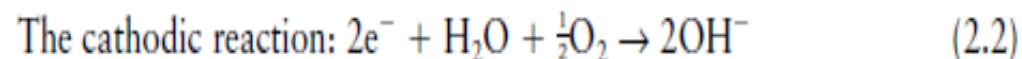
- Batang baja tulangan baja karbon mengalami korosi (berkarat) **ketika ada udara dan air.**
- **Karena beton berpori dan mengandung uap air,** mengapa baja dalam beton biasanya tidak menimbulkan korosi? Karena **beton bersifat basa.**
- **Beton bersifat basa, karena beton mengandung pori-pori mikroskopis yang mengandung konsentrasi tinggi kalsium, natrium, dan kalium oksida terlarut.** Ini membentuk hidroksida, yang sangat basa, bila ada air. Ini menciptakan kondisi pH 12-13 yang sangat basa.
- Kondisi basa menyebabkan terbentuknya **lapisan 'pasif' pada permukaan baja.** Lapisan yang terbentuk pada baja dalam beton kemungkinan adalah sebagian oksida logam/hidroksida dan sebagian mineral dari semen. **Lapisan pasif sejati adalah lapisan oksida yang sangat padat dan tipis** yang menyebabkan laju oksidasi (korosi) yang sangat lambat.
- Ilmuwan mencari cara untuk menghentikan korosi baja **dengan menerapkan lapisan pelindung.** Logam lain seperti seng, polimer seperti akrilik atau epoksi digunakan untuk menghentikan kondisi korosif sampai ke permukaan baja.

Korosi baja dalam beton

- Setelah lapisan pasif rusak maka area karat akan mulai muncul di permukaan baja. **Reaksi kimianya sama apakah korosi terjadi karena serangan klorida atau karbonasi.** Ketika baja dalam beton terkorosi, ia larut dalam air pori dan melepaskan elektron:



- **Dua elektron (2e⁻) yang dibuat dalam reaksi anodik harus dikonsumsi di tempat lain pada permukaan baja untuk menjaga netralitas listrik.** Dengan kata lain kita tidak dapat memiliki sejumlah besar muatan listrik yang menumpuk di satu tempat pada baja. Harus ada reaksi kimia lain untuk mengkonsumsi elektron. Ini adalah reaksi yang mengkonsumsi air dan oksigen:



Korosi baja dalam beton

- Hal ini diilustrasikan pada Gambar akan menghasilkan ion hidroksil dalam reaksi katodik. Ion-ion ini meningkatkan alkalinitas lokal dan oleh karena itu akan memperkuat lapisan pasif, menangkalkan efek karbonasi dan ion klorida di katoda. Perhatikan bahwa air dan oksigen diperlukan di katoda untuk terjadinya korosi.
- Reaksi anodik dan katodik ((2.1) dan (2.2)) hanyalah langkah pertama dalam proses pembentukan karat.
- Jika besi hanya larut dalam air pori (ion besi Fe^{2+} dalam persamaan (2.1) larut) kita tidak akan melihat retak dan pengelupasan beton. Beberapa tahap lagi harus terjadi agar 'karat' terbentuk. Hal ini dapat dinyatakan dalam beberapa cara dan salah satunya ditunjukkan di sini di mana besi hidroksida menjadi besi hidroksida dan kemudian oksida besi terhidrasi atau karat:
- Proses korosi penuh diilustrasikan pada Gambar 2.1. Ferric oxide Fe_2O_3 yang tidak terhidrasi memiliki volume sekitar dua kali volume baja yang digantikannya ketika padat penuh. Ketika menjadi terhidrasi itu membengkak bahkan lebih dan menjadi kerosok. Ini berarti bahwa peningkatan volume pada antarmuka baja/beton adalah enam sampai sepuluh kali seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2.

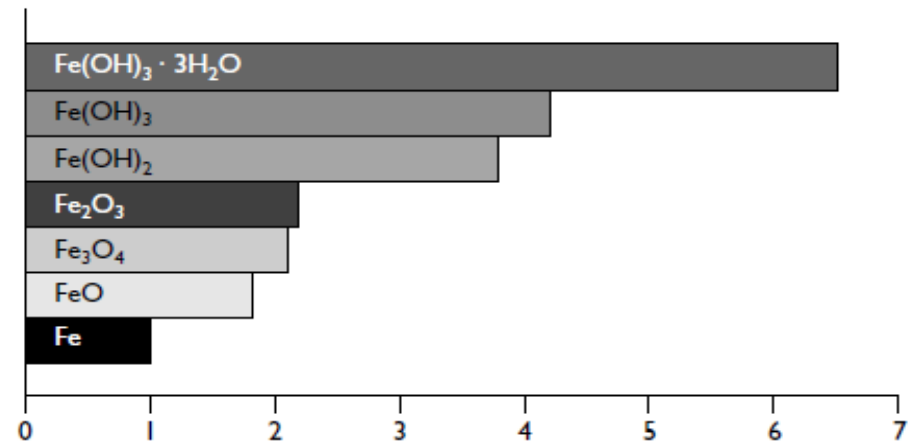
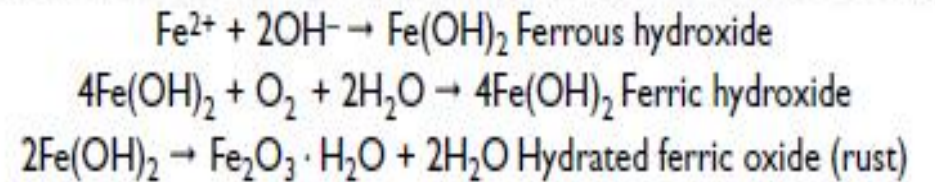
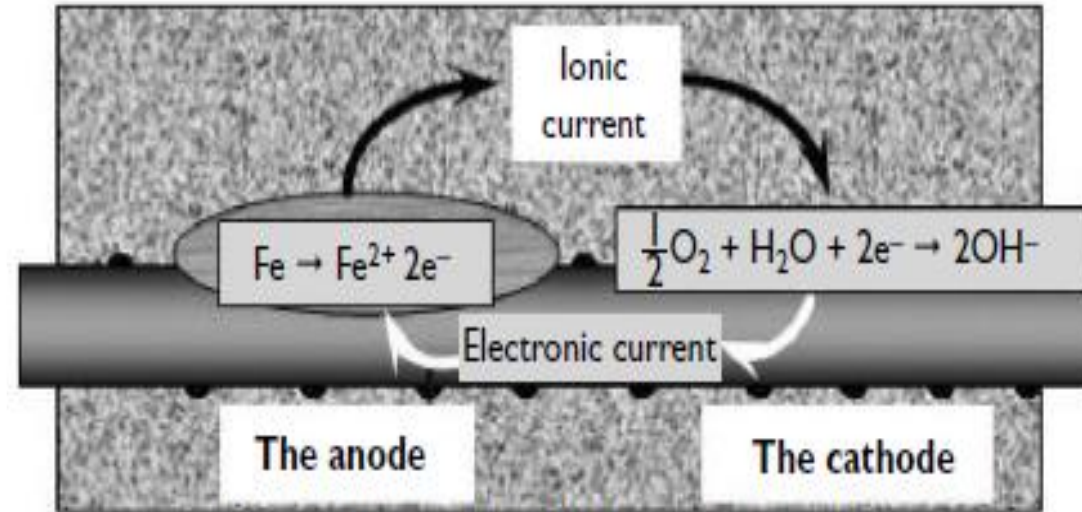


Figure 2.2 Relative volume of iron and its oxides from Mansfield Corrosion, 1981, 37(5): 301-307.

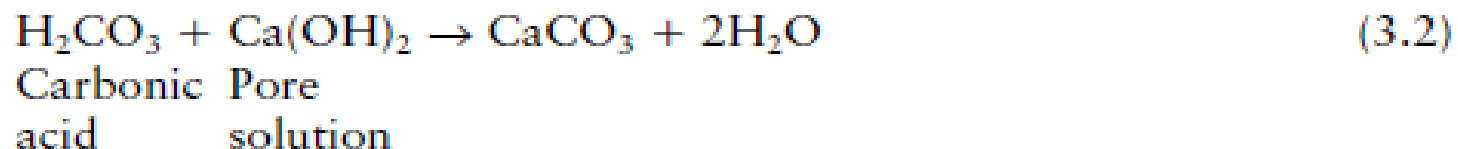
Penyebab korosi pada beton

- Serangan klorida
- Karbonasi

bagaimana serangan klorida dan karbonasi menyebabkan korosi dan bagaimana korosi kemudian berlangsung.

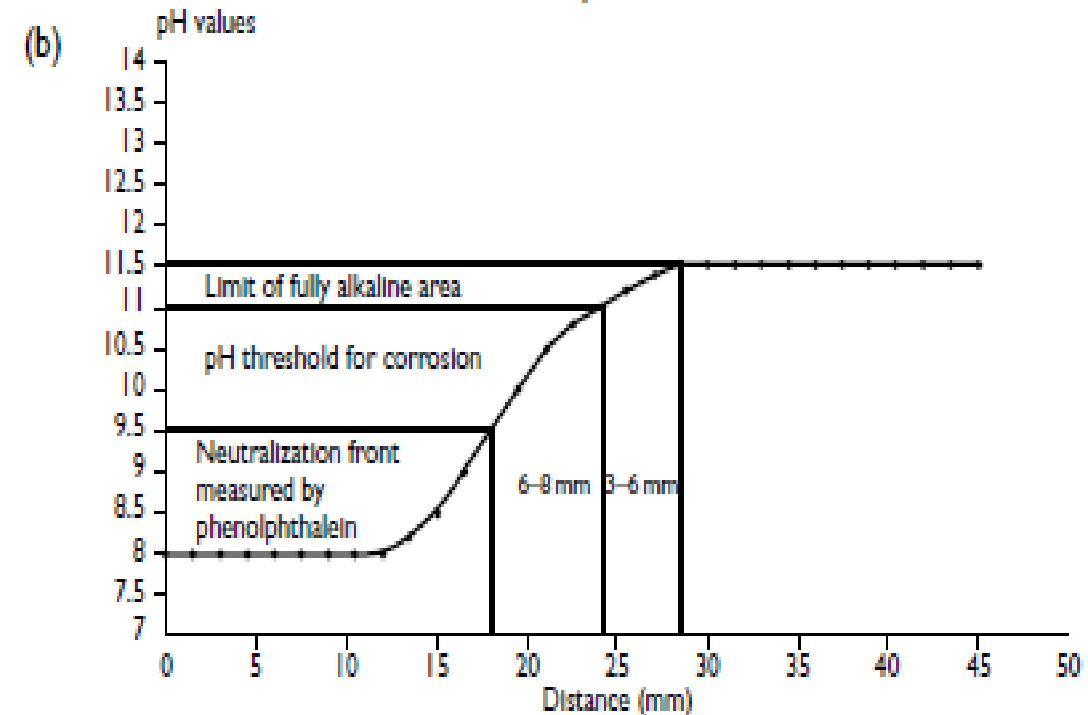
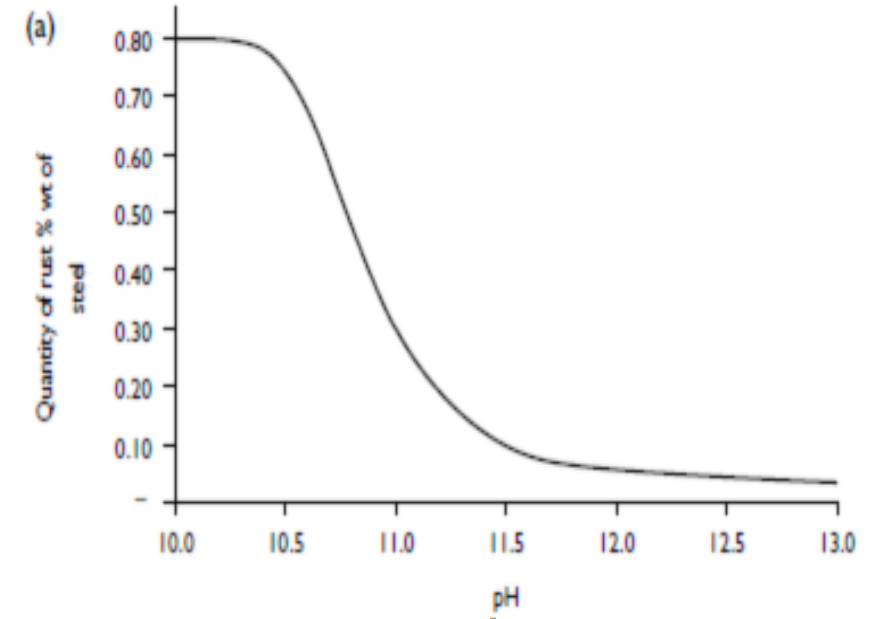
Penyebab korosi pada beton

- Penyebab utamanya korosi beton adalah **serangan klorida dan karbonasi**. Kedua mekanisme ini tidak biasa karena **tidak menyerang integritas beton**. Sebaliknya, **spesies kimia agresif melewati pori-pori dan menyerang baja**.
- **Karbonasi** adalah hasil interaksi gas karbon dioksida di atmosfer dengan alkali hidroksida dalam beton. Seperti banyak gas lainnya, karbon dioksida larut dalam air untuk membentuk asam. Tidak seperti kebanyakan asam lainnya, asam karbonat tidak menyerang pasta semen, tetapi hanya menetralkan alkali dalam air pori, terutama membentuk kalsium karbonat yang melapisi pori-pori:



Penyebab korosi pada beton

- Ada lebih banyak **kalsium hidroksida** dalam pori-pori beton yang dapat larut dalam air pori. Ini membantu menjaga pH pada tingkat biasanya 12-13 saat **reaksi karbonasi terjadi**. Namun, karena **karbon dioksida** mulai bereaksi dengan **kalsium hidroksida** dalam larutan, akhirnya semua kalsium hidroksida bereaksi, mengendapkan kalsium karbonat dan **memungkinkan pH turun** ke tingkat di mana baja akan menimbulkan korosi.
- Bagian depan karbonasi masuk ke beton secara kasar mengikuti **hukum difusi**. Ini paling mudah didefinisikan oleh pernyataan bahwa **laju sebanding dengan ketebalan**:
- Karena **laju karbonasi merupakan fungsi dari ketebalan, cover yang baik** sangat penting untuk menahan karbonasi.
- Karena proses ini merupakan salah satu proses **penetralan alkalinitas beton**, maka diperlukan **cadangan alkali yang baik, yaitu kandungan semen yang tinggi**. Proses difusi menjadi lebih mudah jika beton memiliki struktur pori terbuka.
- Karbonasi mudah dideteksi dan diukur. Indikator pH, biasanya fenolftalein dalam larutan air dan alkohol, akan mendeteksi perubahan pH pada permukaan beton yang baru dibuka.



Penyebab korosi pada beton

Serangan klorida

- 1. Klorida** dapat berasal dari beberapa sumber. Mereka dapat masuk ke dalam beton atau mereka dapat menyebar dari luar. Klorida yang masuk ke dalam beton dapat disebabkan oleh:
 - Penambahan akselerator set klorida yang disengaja (kalsium klorida CaCl_2 banyak digunakan sampai pertengahan 1970-an);
 - penggunaan air laut dalam campuran;
 - agregat yang terkontaminasi
2. Klorida masuk ke dalam beton dengan **difusi**
- 3. Laju masuknya klorida** sering didekati dengan **hukum difusi Fick**.
4. Masalah lain dengan mencoba **memprediksi laju penetrasi klorida adalah mendefinisikan konsentrasi awal karena difusi klorida adalah gradien konsentrasi**
- 5. Ion klorida menyerang lapisan pasif** meskipun dalam kasus ini (tidak seperti karbonasi) **tidak ada penurunan pH secara keseluruhan. Klorida bertindak sebagai katalis untuk korosi. Mereka tidak dikonsumsi dalam proses tetapi membantu memecah lapisan pasif oksida pada baja dan memungkinkan proses korosi berlangsung dengan cepat.**
6. Ada **'ambang klorida'** yang terkenal untuk korosi yang diberikan dalam hal **rasio klorida/hidroksil. Ini pertama kali diselidiki oleh Hausmann (1967).**

Penyebab korosi pada beton

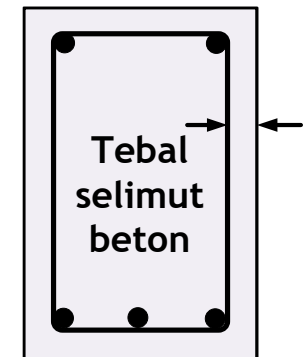
- Semua ambang batas ini adalah perkiraan karena:
 - pH beton bervariasi dengan jenis semen dan campuran beton. **Perubahan pH kecil adalah perubahan besar dalam konsentrasi OH⁻ karena pH adalah logaritma dari konsentrasi ion hidroksil** dan oleh karena itu ambang batas bergerak secara radikal dengan pH;
 - **Klorida dapat terikat secara kimia (dengan aluminat dalam beton) dan secara fisik (dengan penyerapan pada dinding pori). Ini menghilangkan mereka (sementara atau permanen) dari reaksi korosi;**
 - Dalam **beton yang sangat kering** korosi mungkin tidak terjadi bahkan pada konsentrasi Cl⁻ yang sangat tinggi karena **air hilang dari reaksi korosi.**
 - Dalam beton yang disegel (terlindungi), diresapi polimer atau jenuh air, korosi mungkin tidak terjadi bahkan pada konsentrasi Cl⁻ yang sangat tinggi **karena tidak ada oksigen** untuk memicu reaksi korosi. Hal ini juga dapat terjadi ketika ada saturasi air total, tetapi jika beberapa oksigen masuk maka korosi pitting dapat terjadi.

Lingkungan Korosif

- Tebal cover min = 50-65 mm
- f_c' min = 35 MPa
- W/C rasio max = 0.4
- Bila ke 3 aspek diatas dipenuhi maka struktur akan bebas korosi selama ± 40 tahun

3.3.2 Ukuran maksimum nominal agregat kasar harus tidak melebihi:

- 1/5 jarak terkecil antara sisi cetakan, ataupun
- 1/3 ketebalan slab, ataupun
- 3/4 jarak bersih minimum antara tulangan atau kawat, bundel tulangan, atau tendon prategang, atau selongsong.



PENGARUH KOROSI PADA BANGUNAN BETON

Dapat ditinjau dari tiga aspek utama, yaitu :

- a. Penampilan (appearance)
 - ✓ Bercak-bercak (staining)
- b. Pelayanan (serviceability)
 - ✓ Retak (cracking)
 - ✓ Pengelupasan (spalling)
 - ✓ Lendutan (deflection)
- c. Kekuatan (strength)
 - ✓ Lentur
 - ✓ Geser

Tipe Korosi

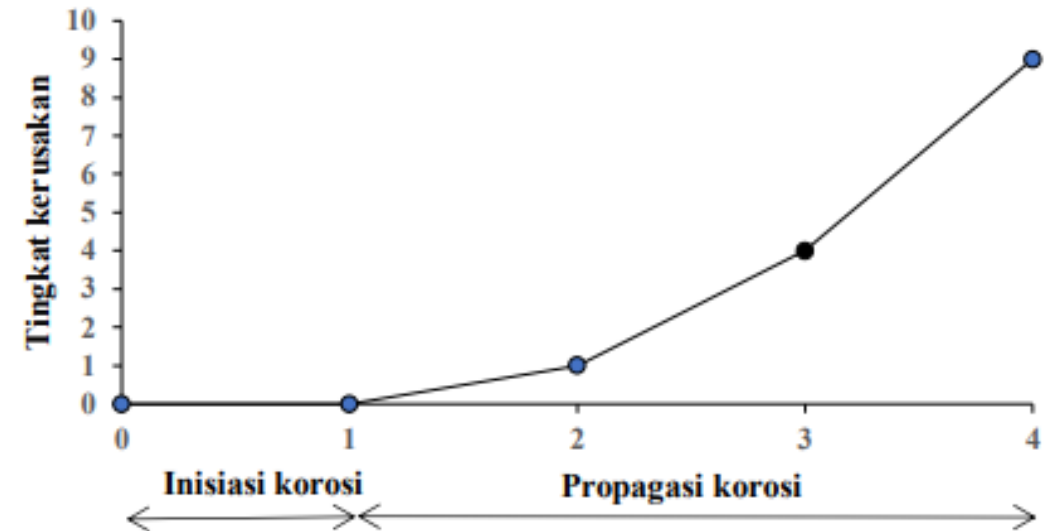
- Uniform corrosion
- Localised corrosion



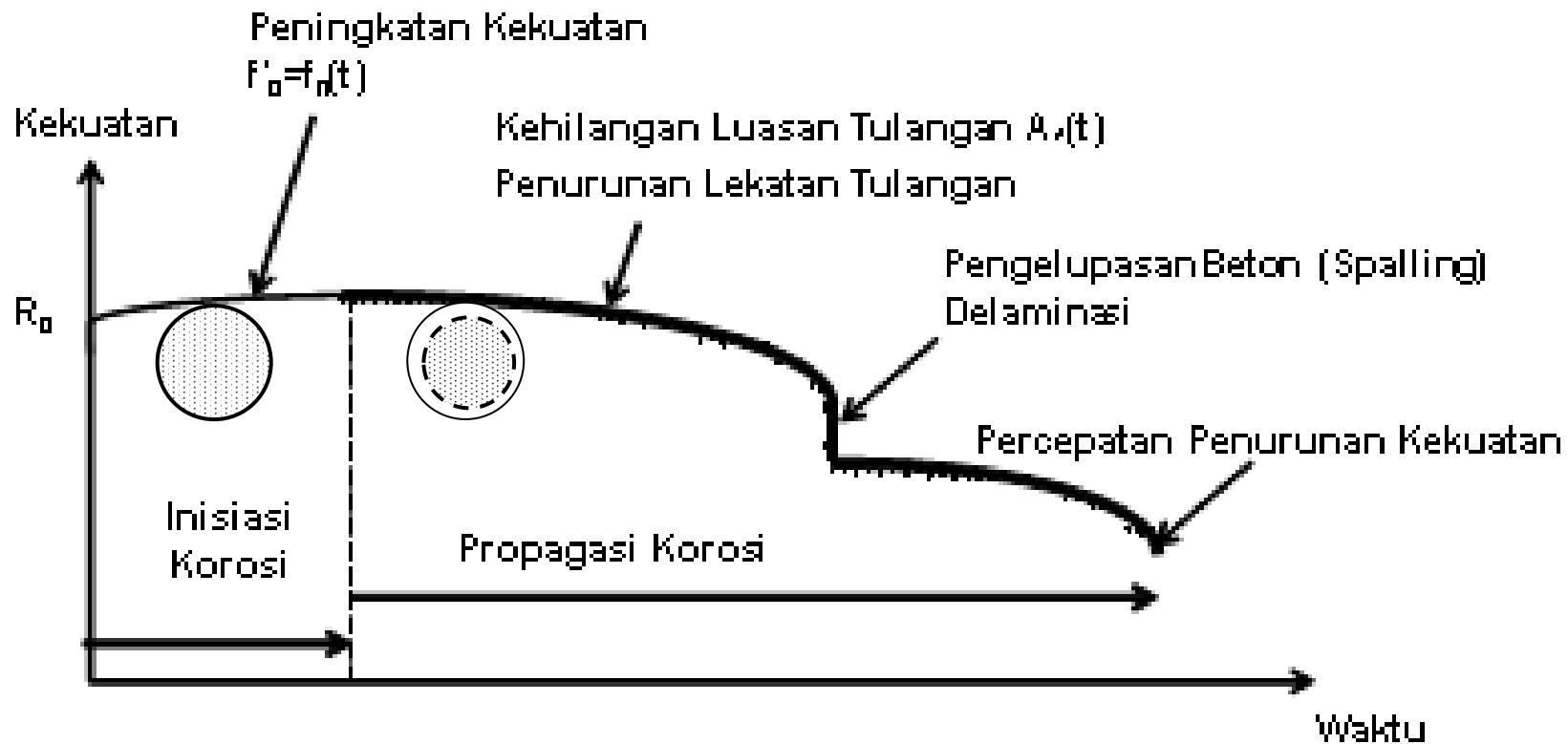
Gambar : Korosi pada tulangan pelat dermaga yang menyebabkan selimut beton terkelupas.

Tahapan korosi Beton Bertulang

- 1. Inisiasi korosi:** proses masuknya chlorida kedalam beton hingga mencapai tulangan dan berakumulasi hingga mencapai konsentrasi kritis
- 2. Propagasi korosi:** proses pengurangan luasan tulangan akibat adanya korosi



Gambar : Model korosi struktur beton bertulang (Ying and Vrouwenvelder, 2007)



Dengan anggapan tidak ada intervensi selama proses korosi berjalan (perbaikan/perkuatan struktur)

Inisiasi Korosi

- Proses difusi (hukum Fick kedua)
 - ✓ Beton dianggap sebagai material yang homogen
 - ✓ Beton dalam kondisi jenuh air
 - ✓ Permukaan dianggap semi-tak terhingga untuk proses difusi
 - ✓ Koefisien difusi dianggap konstan
 - ✓ Pengaruh retak akibat beban diabaikan
- **Anggapan diatas berbeda dengan realitas**
 - ✓ Hukum Fick kedua dimodifikasi

Hukum Fick kedua untuk waktu korosi inisiasi :

$$T_i(C_o, C_{th}, D, d_c) = \frac{d_c^2}{4D \left[\text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{th}}{C_o} \right) \right]^2}$$

Penyederhanaan Hukum Fick Kedua (Zhang and Lounis, 2006)

$$T_i(C_o, C_{th}, D, d_c) = \frac{d_c^2}{4D} \sum_{i=0}^{12} A_i \left(\frac{C_{th}}{C_o} \right)^i$$

d_c = tebal selimut beton (mm)

D = Koefisien difusi beton (m²/s)

C_o = kadar chloride di permukaan beton

C_{th} = kadar chloride kritis pada tulangan

$A_0=1.78, A_1=-7.59E+1, A_2=1.85E+3, A_3=-2.4E+4, A_4=1.95E+5, A_5=-1.04E+6,$
 $A_6=3.87E+6, A_7=-9.9E+6, A_8=1.75E+7, A_9=-2.11E+7, A_{10}=1.66E+7, A_{11}=-$
 $7.45E+6, A_{12}=1.5E+6$

Propagasi Korosi

Dua hal penting proses propagasi korosi :

- Tipe Korosi
- Kecepatan Korosi

Tipe korosi pada struktur beton :

- Korosi seragam (*uniform corrosion*)
- Korosi setempat (*localized/pitting corrosion*)

Kecepatan Korosi

Dua faktor utama yang sangat berpengaruh :

- Tahanan listrik beton (*Electrical Resistivity of Concrete*)
- Ketersediaan oksigen pada permukaan logam terkorosi (*Oxygen Availability at Steel Surface*)

Broomfield (1997) dan Bentur dkk (1997)

- kualitas beton (a.l. w/c rasio) sangat berpengaruh pada tahanan listrik beton.



- kecepatan korosi berkurang dengan menurunnya ketersediaan oksigen. Oksigen dapat masuk kedalam beton melalui proses difusi, sehingga proses ini sangat dipengaruhi oleh tebal selimut beton dan juga kualitas beton.

Penentuan Kecepatan Korosi

- Pengukuran

Teknik Polarisasi Linier (Linear Polarization Technique)



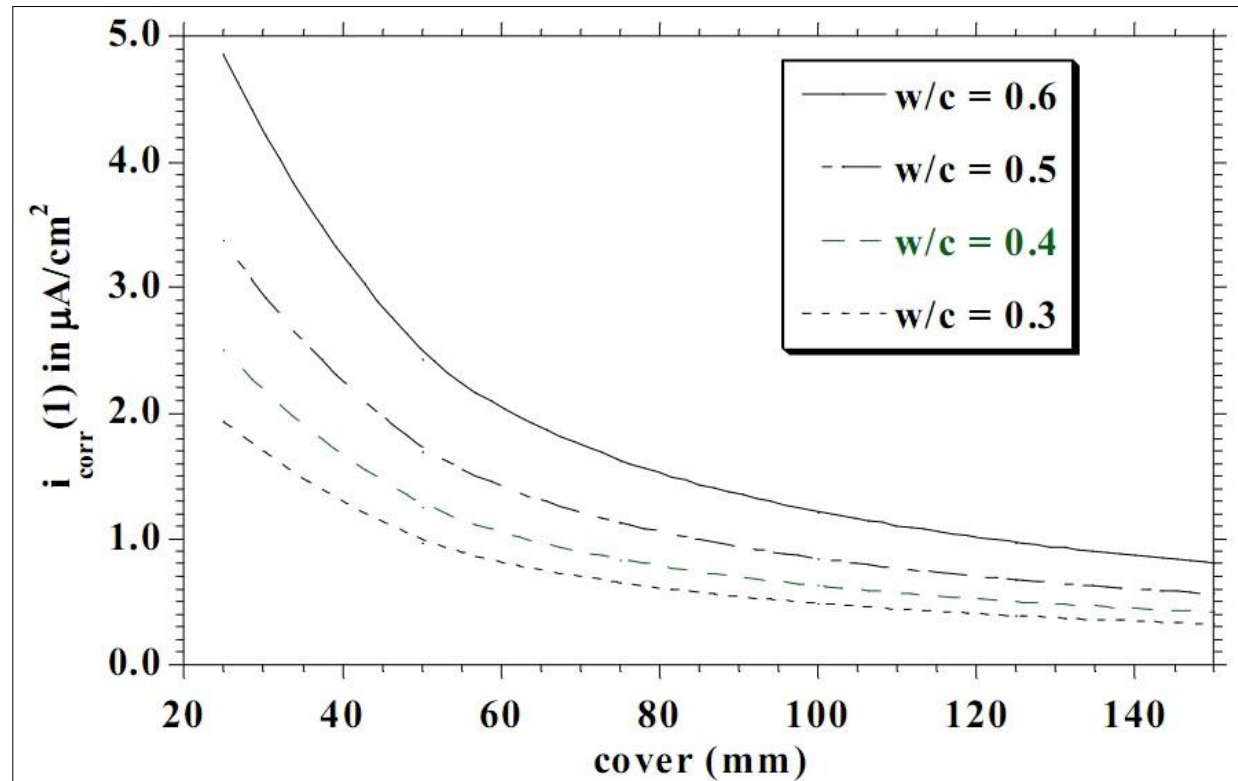
- Perumusan empiris (Vu dan Stewart, 2000)

$$i_{\text{corr}}(1) = \frac{27.0(1 - w/c)^{-1.64}}{\text{cover}} \quad (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$$

Perumusan berlaku untuk kondisi lingkungan dengan tingkat kelembaban sekitar 80% dan suhu 20°C

- Pengambilan tulangan/weight loss method (destruktif)

Kecepatan Korosi Empiris



Vu dan Stewart (2000)

$$i_{\text{corr}}(1) = \frac{27.0(1 - w/c)^{-1.64}}{\text{cover}} \quad i_{\text{corr}} = 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2 = 0,0116 \text{ mm/tahun (uniform corrosion)}$$

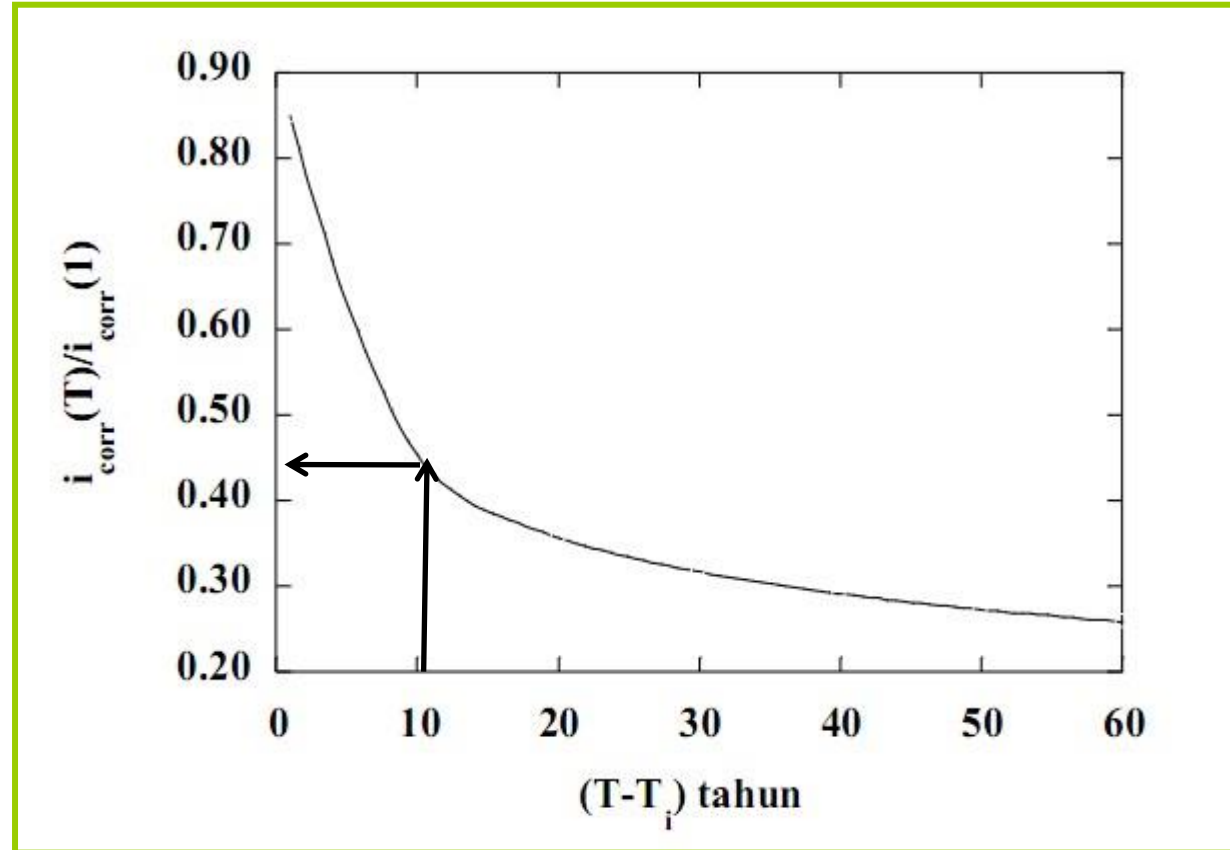
Kecepatan Korosi

Perdebatan selanjutnya mengenai kecepatan korosi :

- Kecepatan korosi tetap (konstan)
- Kecepatan korosi tidak tetap
 - ✓ Berkurang dengan waktu (decreasing with time)
 - ✓ Bertambah dengan waktu (increasing with time)

Korosi Berkurang Dengan Waktu

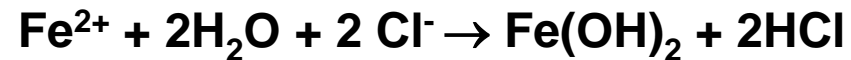
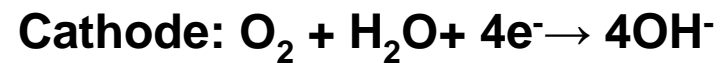
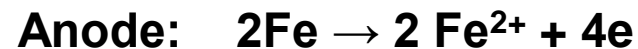
Dengan terbentuknya karat pada permukaan logam dan berakumulasi dengan waktu, akan mengurangi difusi ion yang jauh dari permukaan logam dan secara bersamaan rasio luasan anoda dan katoda juga akan berkurang dengan waktu.



$$i_{\text{corr}}(T) = i_{\text{corr}}(1) \cdot 0.85(T - T_i)^{-0.29} \quad \text{and} \quad (T - T_i) \geq 1 \text{ year}$$

Korosi Meningkat Dengan Waktu

Ketika proses korosi berjalan terjadi proses pengasaman (*acidification*) akibat proses hidrolisa. Hal ini akan meningkatkan kecepatan korosi.



Meskipun sudah terbukti secara empiris, namun masih belum ada perumusannya.

INSPEKSI BERKALA

- Perlu dilakukan utk bangunan yg sudah berumur
- Data yg diperoleh sbg input parameter prediksi umur bangunan

Data-data utk penentuan umur bangunan terkorosi :

- Kondisi bangunan saat ini (mutu, tingkat kerusakan dll)
- Kecepatan korosi
- Beban yang bekerja baik saat ini & akan datang

Dari hasil inspeksi akan diperoleh data yang lebih spesifik dan mewakili keadaan sesungguhnya.

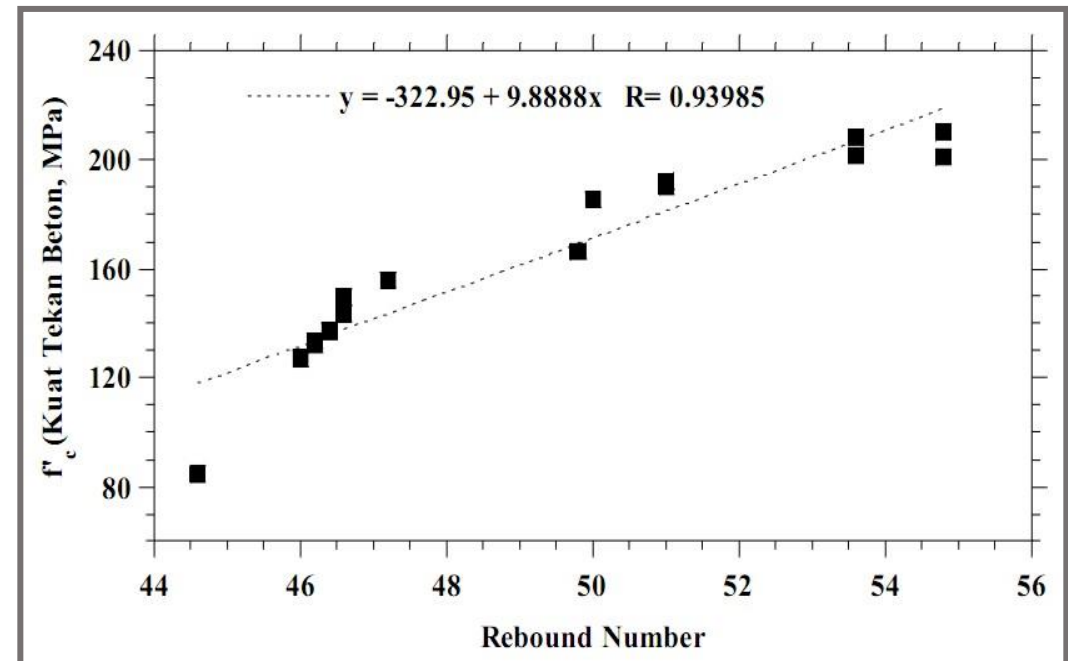
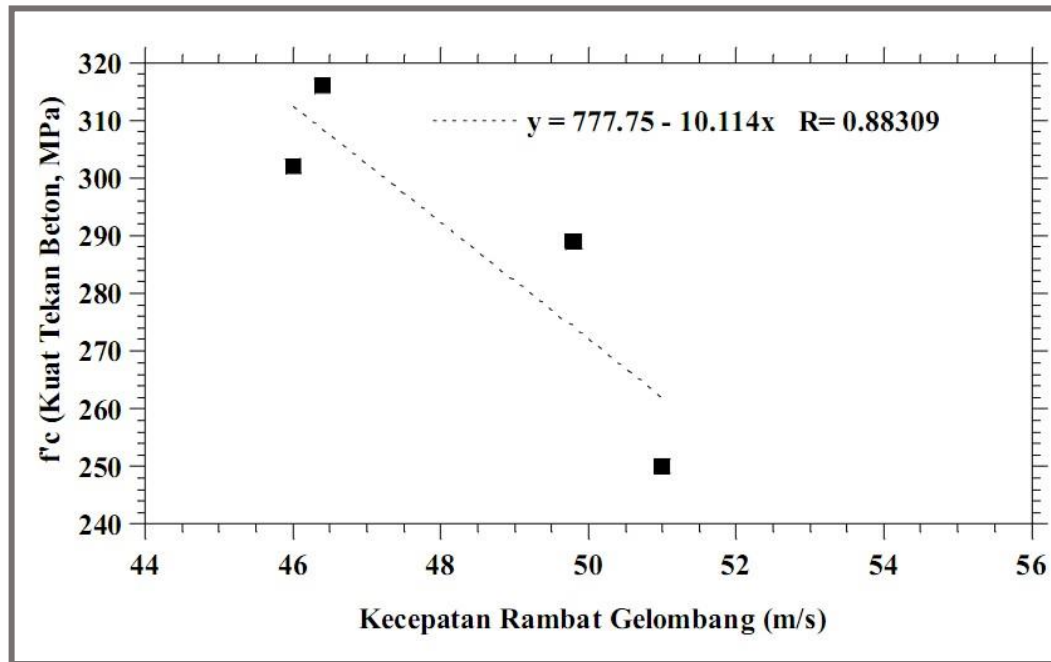
INSPEKSI BERKALA

Proses inspeksi meliputi langkah sebagai berikut:

- ✓ Pengumpulan data perencanaan & pelaksanaan
- ✓ Pengamatan visual
- ✓ Pengetesan
 - Non-destruktif
 - Mutu bahan
 - Kecepatan korosi
 - Destruktif
 - Mutu bahan
 - Kecepatan korosi

INSPEKSI BERKALA

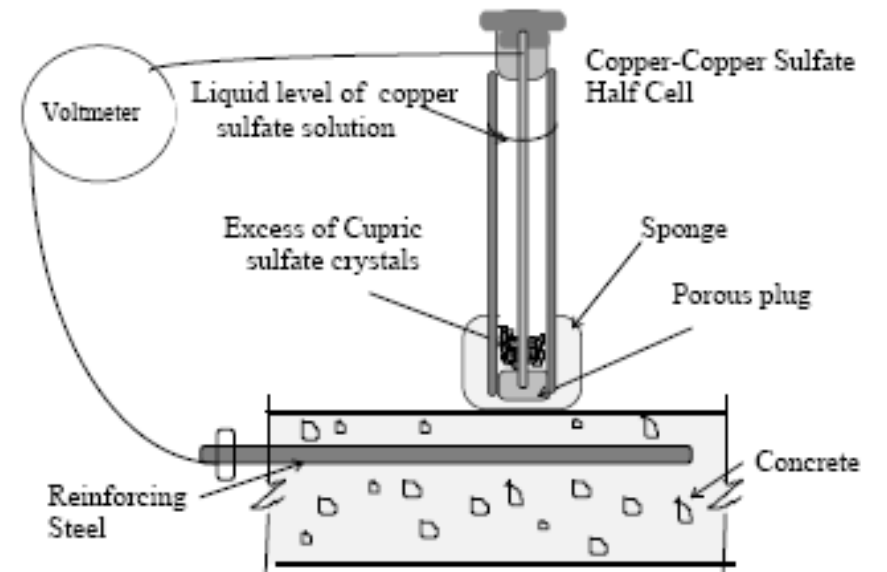
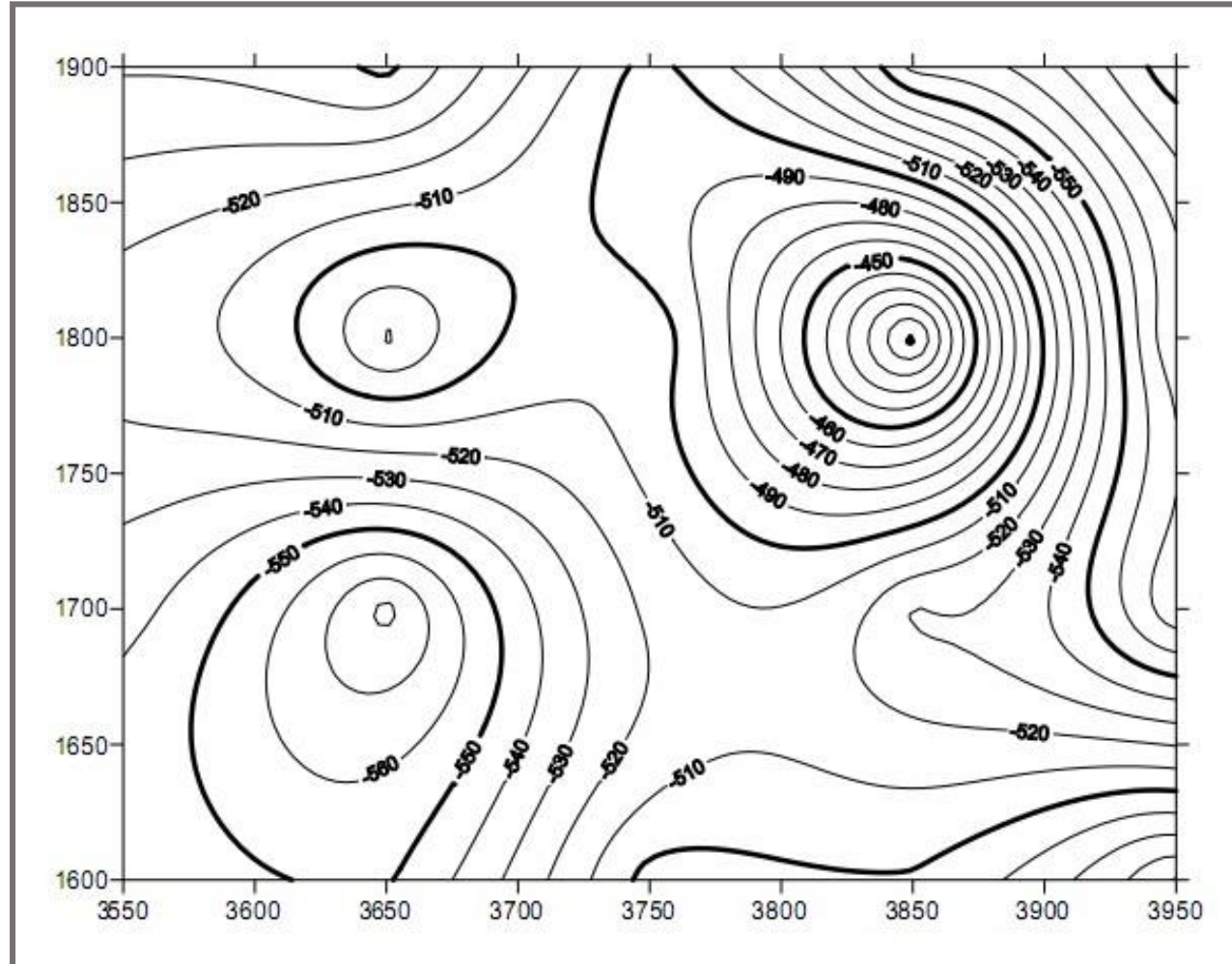
Uji destruktif untuk memastikan agar data non-destruktif dapat diinterpretasikan secara lebih baik (melakukan proses kalibrasi)



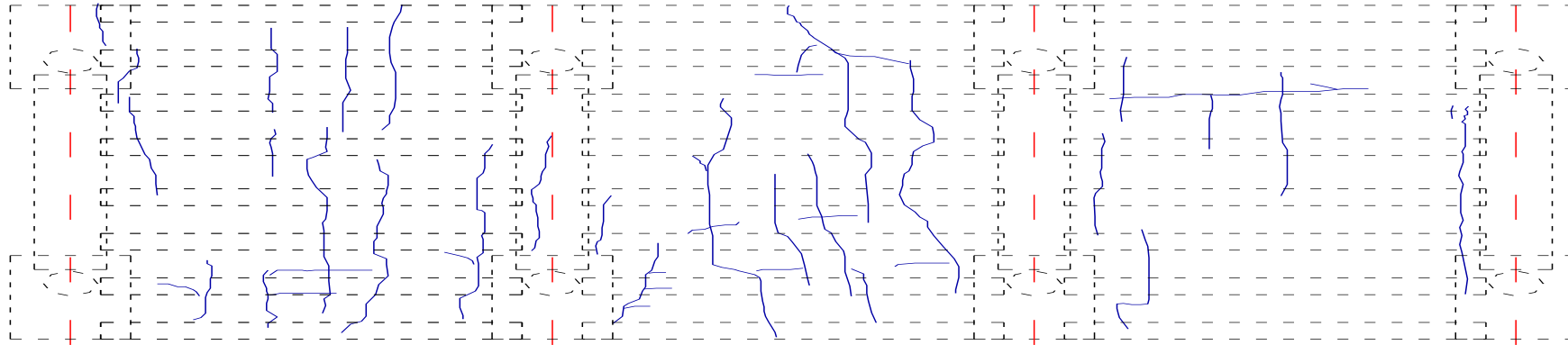
Hubungan Antara Hasil UPV & Hammer Tes dengan Hasil Uji Tekan

INSPEKSI BERKALA

Half-Cell Potential untuk menentukan area mana yang mempunyai tingkat kemungkinan mengalami korosi yang lebih tinggi



INSPEKSI BERKALA

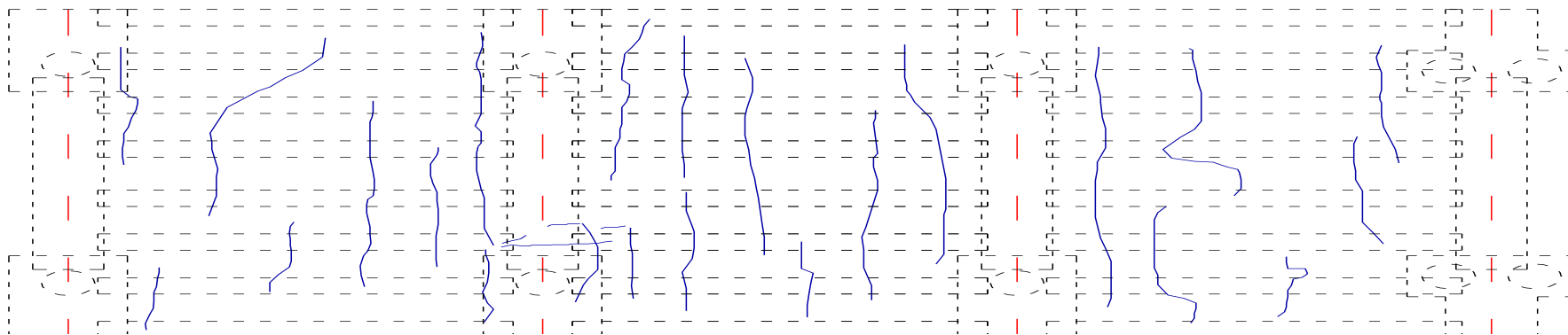


10

9

8

7



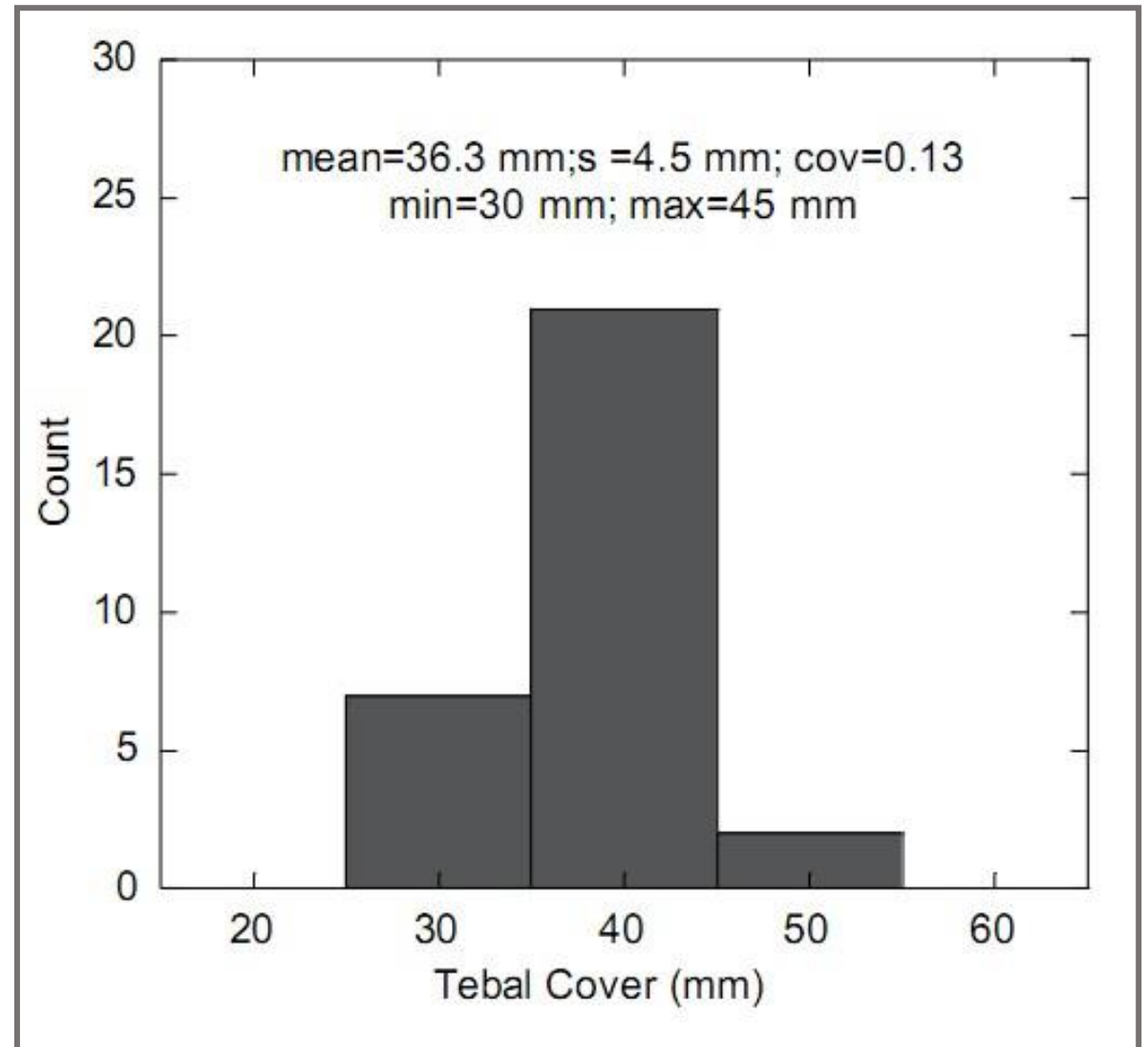
Pengamatan retak

INSPEKSI BERKALA

Apabila data-data mengenai kondisi struktur saat inspeksi telah diperoleh, dapat dipakai sebagai masukan ke dalam perumusan untuk menentukan kelayakan struktur saat ini dan perkiraan umur struktur beberapa tahun kedepan

INSPEKSI BERKALA

Hasil pengukuran tebal cover untuk pelat lantai bangunan gedung dengan memakai alat covermeter



Pengaruh lingkungan

- Klorida
- Sulfat

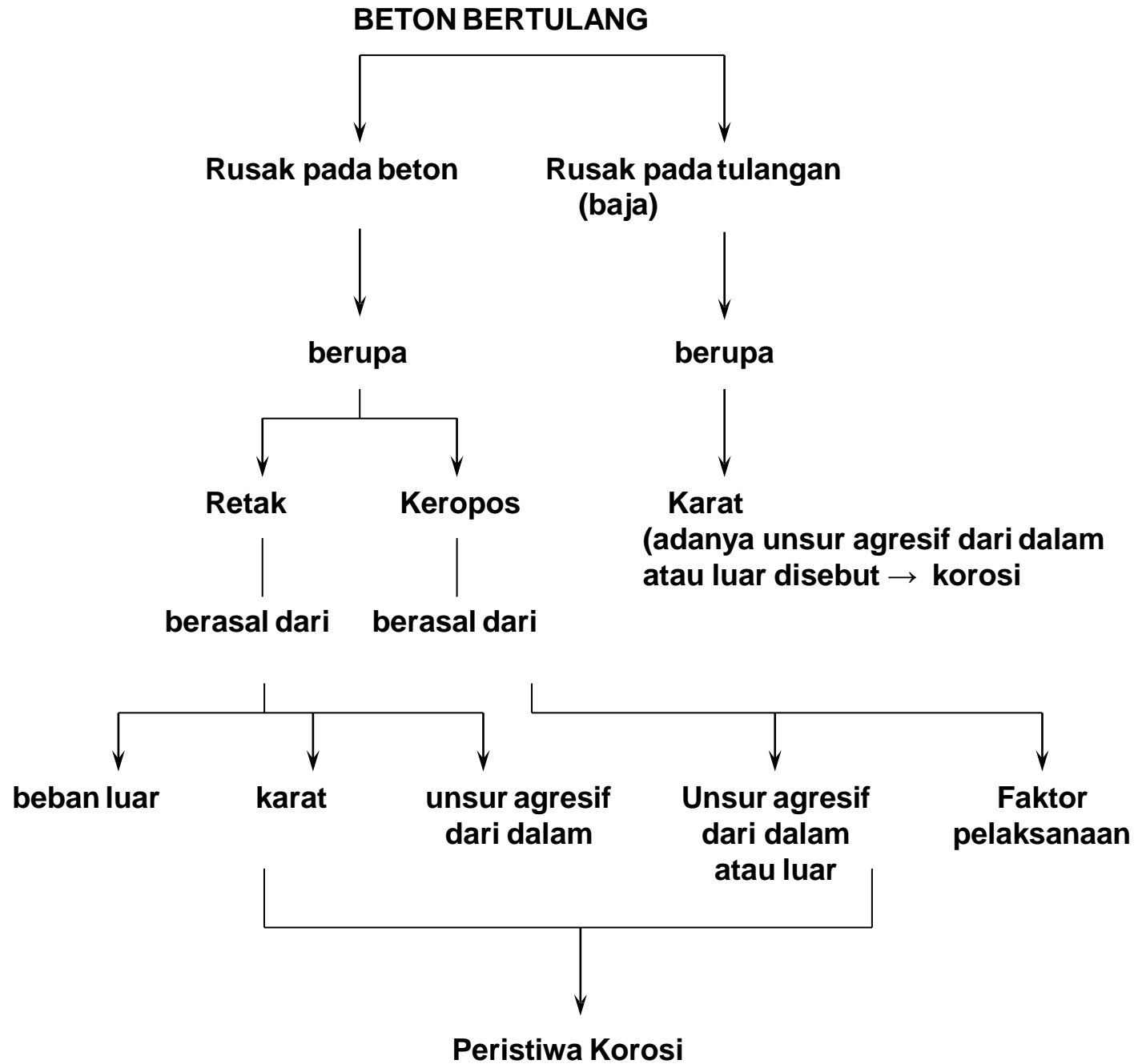
Parameter Durabilitas Beton

- Kuat tekan
- pH
- Porositas
- Resistivitas
- Permeabilitas
- Penyerapan (Absorpsi)
- Penetrasi klorida
- Koefisien difusi klorida
- Waktu inisiasi korosi
- Korosi metode dipercepat

Umur Bangunan

- **Pada umumnya tergantung dari:**
 - Durabilitas materialnya
 - Perencanaannya
 - Pelaksanaannya
 - Pemakaian (pembebanan)
 - Kondisi lingkungan, dan
 - Kondisi perawatannya.
- **UMUR SUATU BANGUNAN *BUKAN***
 - **MERUPAKAN SESUATU YANG MUDAH DIUKUR**

Kerusakan Material Bangunan



Diketahuinya secara dini dari suatu kerusakan adalah merupakan hal yang sangat menguntungkan

- Mekanisme yang baik utk memelihara durabilitas struktur yaitu dengan pengawasan secara berkala.
- Pengawasan diperkirakan memerlukan anggaran $\pm 0,1\%$ per tahun thd harga awal pembangunan.
- Pemeliharaan diperkirakan memerlukan anggaran $\pm 1\%$ s/d $1,5\%$ per tahun thd harga awal pembangunan.

SEBAB SEBAB RUSAKNYA BETON

A. Faktor Intern (Pengaruh Dari Dalam)

1. Kualitas semen

- kandungan unsur-unsur yang ada di dalamnya
- kehalusannya

2. Kualitas agregat

- bersih
- kandungan alkali (K, Na) dibatasi

3. Kualitas air

- bersih
- tidak boleh mengandung larutan agresif (larutan sulfat, larutan asam)

4. Kualitas baja tulangan

- jangan yang sudah terkena korosi

SEBAB SEBAB RUSAKNYA BETON (Lanjutan)

B. Faktor Extern (Pengaruh Dari Luar)

1. Pada proses beton mengeras

- Pengaruh kelembaban
- Pengaruh temperatur

2. Setelah beton mengeras

- *Adanya lingkungan yang agresif :*
- Kandungan CO₂ dari udara
- Larutan air hujan yang bersifat asam
- Air buangan industri yang bersifat asam atau basa
- Air laut

C. Faktor lain

- Pengaruh pelaksanaan
- Pengaruh pembebanan

Peraturan Beton Indonesia 71

Tebal penutup beton minimum.

bagian konstruksi	Tebal penutup beton minimum (cm)		
	di dalam	di luar	tidak terlihat
pelat dan selaput	1,0	1,5	2,0
dinding dan keping	1,5	2,0	2,5
balok	2,0	2,5	3,0
kolom	2,5	3,0	3,5

- (4). Tebal penutup beton yang ditentukan dalam ayat (1) s/d (3) harus ditambah dengan minimum 1 cm, apabila permukaan beton tersebut terletak di dalam lingkungan yang korosif, seperti bila :
- berhubungan dengan air laut;
 - mendapat pengaruh sulfat alkali dari tanah atau air tanah;
 - berhubungan dengan uap atau gas-gas korosif.

Dalam hal ini, maka sebelum perencanaan dimulai tebal penutup beton tersebut harus ditetapkan dulu oleh perencana berdasarkan studi mengenai sifat-sifat korosif dari lingkungan itu dengan juga berkonsultasi dengan pemberi tugas.

Peraturan Beton Indonesia 71

Jumlah semen minimum dan nilai faktor air semen maksimum.

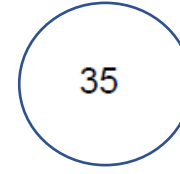
	jumlah semen minimum per m ³ beton (kg)	nilai faktor air semen maksimum.
Beton di dalam ruang bangunan:		
a. Keadaan keliling non-korosif	275	0,60
b. Keadaan keliling korosif disebabkan oleh kondensasi atau uap-uap korosif	325	0,52
Beton di luar ruang bangunan:		
a. Tidak terlindung dari hujan dan terik matahari langsung	325	0,60
b. Terlindung dari hujan dan terik matahari langsung	275	0,60
Beton yang masuk ke dalam tanah:		
a. Mengalami keadaan basah dan kering berganti-ganti	325	0,55
b. Mendapat pengaruh sulfat alkali dari tanah atau air tanah	375	0,52
Beton yang kontinu berhubungan dengan air:		
a. air tawar	275	0,57
b. air laut	375	0,52

SNI 03-2847-2002

Tabel 1 Persyaratan untuk pengaruh lingkungan khusus

Kondisi lingkungan	Rasio air – semen maksimum ¹	f'_c minimum ² MPa
Beton dengan permeabilitas rendah yang terkena pengaruh lingkungan air	0,50	28
Untuk perlindungan tulangan terhadap korosi pada beton yang terpengaruh lingkungan yang mengandung klorida dari garam, atau air laut	0,40	35

CATATAN
1. Dihitung terhadap berat dan berlaku untuk beton normal
2. Untuk beton berat normal dan beton berat ringan



K400
(cor setempat/sulit tercapai)

5) Lingkungan korosif.

Di dalam lingkungan yang korosif atau lingkungan lain yang merusak, tebal selimut beton harus ditingkatkan secukupnya, dan kepadatan serta kekedapan selimut beton harus diperhatikan, atau harus diadakan bentuk perlindungan yang lain.



Kualitatif (implementasi di lap ?)

SNI 03-2847-2002

Tabel 2 Persyaratan untuk beton yang dipengaruhi oleh lingkungan yang mengandung sulfat

Paparan lingkungan sulfat	Sulfat (SO₄) dalam tanah yang dapat larut dalam air persen terhadap berat	Sulfat (SO₄) dalam air mikron gram per gram	Jenis semen	Rasio air-semen maksimum dalam berat (beton berat normal)	f'_c minimum, (beton berat normal dan ringan) MPa
Ringan	0,00 – 0,10	0 – 150	-	-	-
Sedang	0,10 – 0,20	150-1 500	II,IP(MS), IS(MS), P(MS),I(PM)(MS), I(SM)(MS)*	0,50	28
Berat	0,20 – 2,00	1 500 – 10 000	V	0,45	31
Sangat Berat	> 2,00	>10 000	V + <i>pozzolan</i>	0,45	31
CATATAN semen campuran sesuai ketentuan ASTM C 595					

SNI 03-2847-2002

Tabel 3 Kandungan ion klorida maksimum untuk perlindungan baja tulangan terhadap korosi

Jenis komponen struktur	Ion klorida terlarut (Cl^-) pada beton persen terhadap berat semen
Beton prategang	0,06
Beton bertulang yang terpapar lingkungan klorida selama masa layannya	0,15
Beton bertulang yang dalam kondisi kering atau terlindung dari air selama masa layannya	1,00
Konstruksi beton bertulang lainnya	0,30

SNI 03-2847-2013

Tabel 4.2.1 Kategori dan kelas paparan (kategori beku dan cair tidak relevan dan dihapus, masuk Daftar Deviasi)

Kategori	Tingkat Keparahan	Kelas	Kondisi	
			Sulfat (SO ₄) larut air dalam tanah, dalam persen masa*	Sulfat (SO ₄) larut dalam air, dalam ppm [†]
S Sulfat	Tidak ada	S0	SO ₄ < 0,10	SO ₄ < 150
	Sedang	S1	0,10 ≤ SO ₄ < 0,20	150 ≤ SO ₄ < 1500 Air laut
	Parah	S2	0,20 ≤ SO ₄ ≤ 2,00	1500 ≤ SO ₄ ≤ 10.000
	Sangat parah	S3	SO ₄ > 2,00	SO ₄ > 10.000
P Mensyaratkan permeabilitas rendah	Tidak ada	P0	Kontak dengan air dimana permeabilitas rendah tidak disyaratkan	
	Disyaratkan	P1	Kontak dengan air dimana permeabilitas rendah disyaratkan	
C Proteksi korosi tulangan	Tidak ada	C0	Beton kering atau terlindung dari kelembaban	
	Sedang	C1	Beton terpapar terhadap kelembaban tetapi tidak terhadap sumber klorida luar	
	Parah	C2	Beton terpapar terhadap kelembaban dan sumber klorida eksternal dari bahan kimia, garam, air asin, air payau, atau percikan dari sumber-sumber ini	
*Persen sulfat dalam masa dalam tanah harus ditentukan dengan ASTM C1580.				
†Konsentrasi sulfat larut dalam air dalam ppm harus ditentukan dengan ASTM D516 atau ASTM D4130.				

SNI 03-2847-2013

Tabel 4.3.1 Persyaratan untuk beton dengan kelas paparan (kelas paparan F tidak relevan dan dihapus, masuk Daftar Deviasi)

Kelas Paparan	w/cm maks.	f _c min., MPa	Persyaratan minimum tambahan			
			Material semen ¹ —tipe			Material campuran tambahan kalsium klorida
			ASTM C150	ASTM C595	ASTM C1157	
S0	T/A	17	Tanpa batasan tipe	Tanpa batasan tipe	Tanpa batasan tipe	Tanpa batasan
S1	0,50	28	II ²	IP(MS), IS(<70) (MS)	MS	Tanpa batasan
S2	0,45	31	V ³	IP(HS), IS(<70) (HS)	HS	Tidak diizinkan
S3	0,45	31	V + pozzolan atau slag ⁴	IP(HS) + pozzolan atau kerak atau IS(<70) (HS) + pozzolan atau slag ⁴	HS + pozzolan atau slag ⁴	Tidak diizinkan
P0	T/A	17	Tidak ada			
P1	0,50	28	Tidak ada			

Tabel 4.3.1 Persyaratan untuk beton dengan kelas paparan (kelas paparan F tidak relevan dan dihapus, masuk Daftar Deviasi) lanjutan

Kelas Paparan	w/cm maks.	f _c min., MPa	Kadar ion klorida (Cl ⁻) larut air maksimum dalam beton, persen oleh berat semen ⁵		Ketentuan terkait
			Beton bertulang	Beton prategang	
			C0	T/A	
C1	T/A	17	0,30	0,06	7.7.6, 18.16
C2	0,40	35	0,15	0,06	

¹Untuk beton ringan, lihat 4.1.2.
²Kombinasi alternatif material semen¹ dari material yang terdaftar dalam Tabel 4.3.1 harus diizinkan bila diuji untuk ketahanan sulfat dan memenuhi kriteria dalam 4.5.1.
³Untuk paparan air laut, tipe semen Portland lainnya dengan kadar trikalsium aluminat (C₃A) sampai dengan 10 persen diizinkan jika w/cm tidak melebihi 0,40.
⁴Tipe semen tersedia lainnya seperti Tipe III atau Tipe II diizinkan dalam Kelas Paparan S1 atau S2 jika kadar C₃A masing-masing kurang dari 8 atau 5 persen.
⁵Jumlah sumber spesifik pozzolan atau slag yang digunakan tidak boleh kurang dari jumlah yang telah ditentukan oleh catatan layan untuk meningkatkan ketahanan sulfat bila digunakan dalam beton yang mengandung semen Tipe V. Sebagai alternatif, jumlah sumber spesifik pozzolan atau slag yang digunakan tidak boleh kurang dari jumlah yang diuji sesuai dengan ASTM C 1012M dan memenuhi kriteria dalam 4.5.1.
⁶Kadar ion klorida larut air yang disumbang dari material dasar termasuk air, agregat, material semen¹, dan material campuran tambahan harus ditentukan pada campuran beton oleh ASTM C 1218M saat umur antara 28 dan 42 hari.
⁷Persyaratan 7.7.6 harus dipenuhi. Lihat 18.16 untuk tendon tanpa lekatan.

Tabel 4.5.1 Persyaratan untuk pembentukan kesesuaian kombinasi material semen¹ yang terpapar terhadap sulfat larut air

Kelas Paparan	Pengembangan maksimum bila diuji menggunakan ASTM C 1012M		
	Saat 6 bulan	Saat 12 bulan	Saat 18 bulan
S1	0,10 persen		
S2	0,05 persen	0,10 persen	
S3			0,10 persen
Batas pengembangan 12 bulan berlaku hanya bila pengembangan terukur melebihi batas pengembangan maksimum 6 bulan			

Persyaratan Tebal Selimut Beton SNI 2847-2013

7.7.6 Lingkungan korosif

Pada lingkungan korosif atau kondisi paparan parah lainnya, selimut beton harus ditingkatkan bilamana diperlukan dan disyaratkan oleh insinyur profesional bersertifikat. ~~Persyaratan yang dapat diterima untuk beton didasarkan pada kategori dan kelas paparan dalam Pasal 4 harus dipenuhi, atau perlindungan lainnya harus disediakan. Sebagai tambahan, untuk proteksi korosi, selimut beton yang ditetapkan untuk tulangan tidak kurang dari 50 mm untuk dinding dan slab dan tidak kurang dari 65 mm untuk komponen struktur lainnya direkomendasikan. Untuk komponen struktur beton pracetak yang dibuat dibawah kondisi kontrol pabrik, selimut beton yang ditetapkan tidak kurang dari 40 mm untuk dinding dan slab dan tidak kurang dari 50 mm untuk komponen struktur lainnya direkomendasikan.~~

7.7.6.1 Untuk komponen struktur beton prategang yang terpapar lingkungan korosif atau ~~kategori paparan parah lainnya seperti yang didefinisikan dalam Pasal 4, dan yang diklasifikasikan sebagai Kelas T atau C dalam 18.3.3, selimut beton yang disyaratkan tidak boleh kurang dari 1,5 kali selimut untuk tulangan prategang yang disyaratkan oleh 7.7.2 dan 7.7.3. Persyaratan ini diizinkan untuk diabaikan jika daerah tarik pratekan tidak dalam kondisi tertarik dibawah beban tetap.~~

Persyaratan Durabilitas Beton SNI-03- 2847-2019

Tabel 19.3.2.1 – Persyaratan untuk beton berdasarkan kelas paparan

Kelas paparan	w/cm maks. ^[1]	f _c ' min., MPa	Material sementisius ^[2] — Tipe			Material campuran tambahan kalsium klorida
			Semen Portland ^[7]	Semen Hidrolik Campuran ^[7]	Semen Hidrolik ^[7]	
S0	T/A	17	Tanpa batasan tipe	Tanpa batasan tipe	Tanpa batasan tipe	Tanpa batasan
S1	0,50	28	II ^{[3][4]}	Tipe IP(MS), IS(MS) atau IT(MS)	MS	Tanpa batasan
S2	0,45	31	V ^[4]	IP(HS), IS(HS) atau IT(HS)	HS	Tidak diizinkan
S3	0,45	31	V + pozzolan atau slag ^[4]	IP(HS), IS(HS) atau IT(HS) dan plus pozzolan atau slag ^[4]	HS + pozzolan atau slag ^[4]	Tidak diizinkan
W0	T/A	17	Tidak ada			
W1	0,50	28	Tidak ada			
			Kandungan ion klorida terlarut maksimum (Cl ⁻) pada beton dalam persen berat semen ^[6]		Persyaratan lainnya	
			Beton nonprategang	Beton prategang		
C0	T/A	17	1,00	0,06	Tidak Ada	
C1	T/A	17	0,30	0,06		
C2	0,40	35	0,15	0,06	Selimut beton ^[6]	

Ketentuan durabilitas baja tulangan

- Persyaratan selimut beton

Tabel 20.6.1.3.1 – Ketebalan selimut beton untuk komponen struktur beton nonprategang yang dicor di tempat

Paparan	Komponen struktur	Tulangan	Ketebalan Selimut, mm
Dicor dan secara permanen kontak dengan tanah	Semua	Semua	75
Terpapar cuaca atau kontak dengan tanah	Semua	Batang D19 hingga D57	50
		Batang D16, Kawat $\varnothing 13$ atau D13 dan yang lebih kecil	40
Tidak terpapar cuaca atau kontak dengan tanah	Pelat, pelat berusuk dan dinding	Batang D43 dan D57	40
		Batang D36 dan yang lebih kecil	20
Tidak terpapar cuaca atau kontak dengan tanah	Balok, kolom, pedestal dan batang tarik	Tulangan utama, sengkang, sengkang ikat, spiral dan sengkang pengekang	40

Tabel 20.6.1.3.2 Ketebalan selimut beton untuk komponen struktur beton prategang yang dicor di tempat

Paparan	Komponen struktur	Tulangan	Ketebalan selimut, mm
Dicor dan secara permanen kontak dengan tanah	Semua	Semua	75
Terpapar cuaca atau kontak dengan tanah	Pelat, pelat berusuk, dan dinding	Semua	25
		lainnya	40
Tidak terpapar cuaca atau kontak dengan tanah	Pelat, pelat berusuk, dan dinding	Semua	20
		Balok, kolom, pedestal dan batang tarik	Tulangan utama
			Sengkang, sengkang ikat, spiral dan sengkang pengekang

Tabel 20.6.1.3.3 – Ketebalan selimut beton untuk beton pracetak nonprategang dan prategang yang diproduksi pada kondisi pabrik

Paparan	Komponen struktur	Tulangan	Ketebalan selimut, mm
Terpapar cuaca atau kontak dengan tanah	Dinding	Batang D43 dan D57; tendon dengan diameter lebih besar dari 40 mm	40
		Batang D36 dan yang lebih kecil; Kawat $\varnothing 13$ dan D13 dan yang lebih kecil; tendon dan <i>strand</i> diameter 40 mm dan yang lebih kecil	20
	lainnya	Batang D43 dan D57; tendon lebih besar dari diameter 40	50
		Batang D19 hingga D36; tendon dan <i>strand</i> lebih besar dari diameter 16 mm sampai dengan diameter 40 mm	40
		Batang D16, kawat $\varnothing 13$ atau D13 dan yang lebih kecil; tendon dan <i>strand</i> dengan diameter 16 mm atau yang lebih kecil	30
	Tidak terpapar cuaca atau kontak dengan tanah	Pelat, pelat berusuk dan dinding	Batang D43 dan D57; tendon dengan diameter lebih besar dari 40 mm
Tendon dan <i>strand</i> dengan diameter 40 mm dan yang lebih kecil			20
Batang D36, kawat $\varnothing 13$ atau D13 dan yang lebih kecil			16
Balok, Kolom, pedestal dan batang tarik		Tulangan utama	Lebih besar dari d_s dan 16 dan tidak boleh melebihi 40
	Sengkang, sengkang ikat, spiral dan sengkang pengekang	10	