

## Simulasi Perhitungan Tebal Selimut Beton Minimum terhadap Perubahan Jarak Bangunan dari Garis Pantai

Agus Santosa Sudjono<sup>1)</sup>

### Abstrak

Masalah serangan dari klorida biasanya muncul ketika ion klorida dari luar masuk ke beton. Pada umumnya, sumber dari ion klorida adalah air laut yang bersentuhan dengan beton. Tetapi, klorida juga dapat berada di permukaan beton dalam bentuk tetesan uap air laut yang sangat halus (berasal dari penguapan yang terjadi di laut dan dibawa oleh angin) atau dalam bentuk debu yang kemudian menjadi basah karena embun. Klorida dalam bentuk itu dapat terbang sampai lebih 2km dari garis pantai. Karena itu, studi analisis ini bertujuan untuk mengetahui tebal selimut beton dan W/C yang optimal terhadap perubahan jarak bangunan dari garis pantai.

**Kata-kata kunci:** tebal selimut beton, ion klorida, korosi, kerusakan beton.

### Abstract

The problem of chloride attack arises usually when chloride ion ingress from outside to concrete. Generally, the source of chloride ions is sea water in contact with concrete. However, chloride can also be deposited on the surface of concrete in the form of air borne very fine droplets of sea water (rose from the sea by evaporation and carried by wind) or of air borne dust which subsequently become wetted by dew. The air borne chloride can travel greater than 2km from beach line. Therefore, the purpose of this analysis study is to know optimal concrete cover and W/C minimum toward change of the distance of building from beach line.

**Keywords:** concrete cover, chloride ion, corrosion, deterioration of concrete.

## 1. Pendahuluan

Pada awalnya, beton dikenal sebagai bahan bangunan yang semi-permanen. Bangunan beton dapat mencapai masa layan yang direncanakan walaupun tanpa dilakukan pemeliharaan yang khusus. Akan tetapi, hasil dari pengamatan di lapangan maupun hasil penelitian menunjukkan bahwa ketahanan beton dapat menurun atau bahkan dapat mengalami kerusakan yang berat akibat kondisi lingkungan di sekitarnya.

Beton pada umumnya adalah bahan utama bangunan infrastruktur. Di negara maju faktor keselamatan manusia menjadi prioritas utama. Karena itu, ketika kerusakan beton diketahui, hal ini membuat krisis sosial di masyarakat. Keadaan ini mendorong para ahli untuk melakukan penelitian guna menanggulangi masalah tersebut. Selain itu, peraturan perencanaan bangunan beton pun dilakukan perbaikan untuk menghasilkan kualitas dan ketahanan beton yang lebih baik.

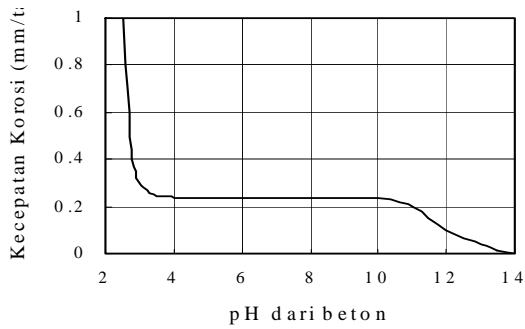
Beton juga menjadi bahan bangunan utama di negara kita. Sejak pembangunan dilaksanakan setelah negara kita merdeka, bangunan gedung maupun infrastruktur umumnya dibuat dari beton. Pembangunan di negara sudah berjalan 50 tahun lebih, tetapi bagaimanakah kondisi dari bangunan-bangunan yang ada saat ini kita tidak tahu. Hal ini disebabkan karena laporan dari hasil penelitian dan pengamatan lapangan tentang kerusakan bangunan beton di negara kita masih sedikit sekali. Karena itu, perlu lebih digalakkan lagi aktivitas tersebut.

Salah satu penyebab kerusakan bangunan beton adalah korosi tulangan beton. Beton adalah bahan yang bersifat alkali dan mempunyai pH 12-13. Dari hubungan antara pH beton dengan kecepatan korosi seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1**, dapat diketahui bahwa sebenarnya baja tulangan dalam beton aman terhadap korosi karena kecepatan korosi sangat kecil pada kondisi tersebut.

---

1) Dosen Tetap Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan

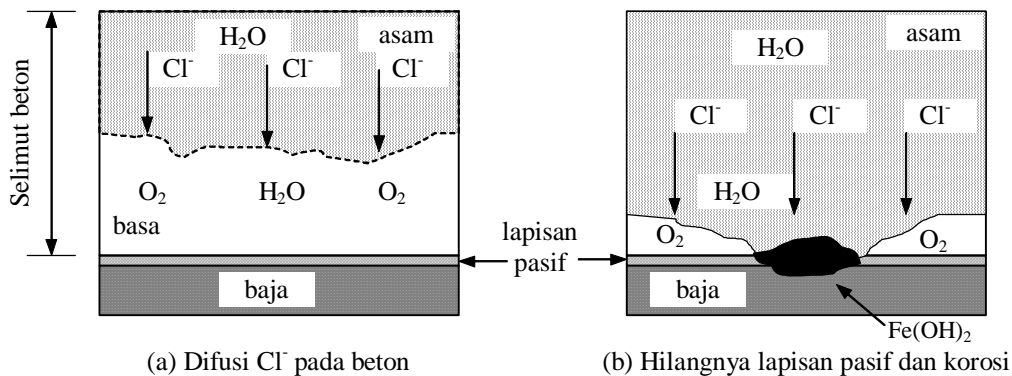
**Catatan :** Usulan makalah dikirimkan pada 31 Maret 2004 dan dinilai oleh peer reviewer pada tanggal 1 April 2004 – 5 Mei 2004. Revisi penulisan dilakukan antara tanggal 30 April 2004 hingga 19 Mei 2004.



**Gambar 1. Hubungan pH dan kecepatan korosi (Saitoh, 2000)**

Korosi baja tulangan beton diakibatkan oleh masuknya ion klorida yang ada diluar melalui pori-pori beton. Jika ion-ion klorida dapat mencapai lokasi baja tulangan maka lapisan pasif baja akan bereaksi dengan ion klorida sehingga lapisan pelidung baja menjadi hilang. Hilangnya lapisan pasif ini menyebabkan unsur utama baja Fe berubah menjadi  $Fe^{2+}$  dan elektron yang terlepas mengakibatkan reaksi antara gas  $O_2$  dan  $H_2O$  yang ada di sekitar permukaan baja tulangan yang masih mempunyai lapisan pasif, dan kemudian  $Fe^{2+}$  bereaksi dengan  $OH^-$  membentuk senyawa korosi. Proses reaksi seperti itu dinamakan reaksi korosi. **Gambar 2** mengilustrasikan proses reaksi korosi pada beton bertulang akibat ion klorida.

Di dalam tata cara perencanaan struktur beton untuk bangunan gedung yang dikeluarkan oleh Badan Standardisasi Nasional (BSN) hanya mensyaratkan tebal beton selimut dan W/C minimum untuk bangunan yang dibangun di lingkungan yang mengandung klorida. Peraturan ini tidak memberikan informasi tambahan tentang konsentrasi klorida dan lokasi yang dapat menyebabkan korosi. Tentu saja, hal ini menyulitkan kita untuk merencanakan bangunan beton yang mempunyai ketahanan yang optimal. Karena itu, diperlukan metode perhitungan tambahan untuk mengatasi hal itu.



**Gambar 2. Proses kerusakan akibat korosi yang disebabkan ion klorida**

## 2. Tujuan Studi

**Gambar 3** memberikan ilustrasi 2 jembatan di daerah pantai atau kondisi lingkungan yang mengandung klorida. Jembatan A dan B mempunyai jarak dari garis pantai yang berbeda. Jembatan A sangat dekat dengan pantai, sedangkan jembatan B agak jauh dengan pantai. Pertanyaannya adalah bagaimanakah cara untuk merencanakan ketahanan (*durability*) kedua jembatan yang optimal?

Laut adalah sumber ion klorida. Tetapi klorida juga dapat berada di permukaan beton dalam bentuk butiran halus dari uap air laut yang dibawa oleh angin atau dalam bentuk debu yang kemudian berubah menjadi basah karena embun (Neville, 1999). Klorida dalam bentuk seperti itu dapat diterbangkan oleh angin sejauh 2km lebih dari garis pantai tergantung kuat angin dan topografi daerah tersebut. Hal ini dapat menyebabkan bangunan beton yang cukup jauh dari pantai sekalipun dapat terjadi korosi.

Studi ini bertujuan untuk membuat simulasi perhitungan tebal selimut beton dan W/C yang optimal terhadap perubahan jarak bangunan dari garis pantai sebagai jawaban pertanyaan di atas. Simulasi perhitungan di makalah ini didasarkan pemodelan fungsi konsentrasi ion klorida di permukaan bangunan beton terhadap jarak bangunan dari garis pantai, pemodelan proses difusi ion klorida pada beton dan pemodelan perhitungan tebal selimut beton minimum.

## 3. Pemodelan Fungsi Konsentrasi Klorida

### 3.1 Awal terhadap jarak bangunan dari garis pantai

Sumber dari ion klorida adalah air laut. Karena itu, konsentrasi ion klorida dari air laut menjadi konsentrasi ion klorida awal di permukaan bangunan beton yang berada di laut, dan pantai menjadi garis batas

untuk menghitung jarak bangunan ke laut. Untuk seterusnya konsentrasi ion klorida awal di permukaan bangunan beton dinamakan konsentrasi ion klorida awal.

Konsentrasi ion klorida di laut tergantung dari lokasi laut tersebut. Karena itu, konsentrasi ion klorida di laut dapat diasumsikan sebagai parameter dasar dari fungsi konsentrasi ion klorida awal terhadap jarak bangunan. Jika konsentrasi ion klorida di laut tinggi maka konsentrasi ion klorida awal terhadap jaraknya pun tinggi. Dengan kata lain, fungsi konsentrasi ion klorida awal terhadap jaraknya berbanding lurus dengan konsentrasi ion klorida di laut.

Konsentrasi ion klorida awal terhadap jarak bangunan yang diukur dari garis pantai akan menurun. Besar-kecilnya penurunan konsentrasi ion klorida awal tergantung dari kuat angin dan topografi daerah tersebut. Karena itu, kuat angin dan topografi dapat dikatakan sebagai dua parameter yang membentuk pola penurunan konsentrasi ion klorida awal terhadap jaraknya.

Pada makalah ini, fungsi konsentrasi ion klorida terhadap jarak  $C_0(X)$  didekati dengan fungsi dari ketiga parameter di atas. Fungsi ini harus mempunyai karakteristik menurun dengan bertambah besar jarak bangunan dari garis pantai. Persamaan fungsi tersebut dimodelkan seperti di bawah ini.

$$C_0(X) = C_0 \times \exp \left[ a \left( \frac{X}{X_0} \right)^b \right] \quad (1)$$

dimana,  $C_0$  adalah konsentrasi ion klorida awal di laut ( $\text{kg/m}^3$ ),  $a$  adalah parameter akibat pengaruh kuat angin,  $b$  adalah parameter akibat pengaruh topografi daerah,  $X$  adalah jarak bangunan dari garis pantai (km) dan  $X_0$  adalah perkiraan jarak terjauh dari jangkauan ion klorida (km).

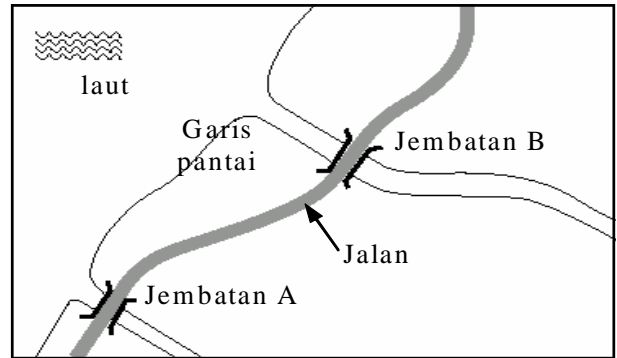
Nilai parameter  $b$  harus dikondisikan konstan untuk mengetahui pengaruh dari parameter  $a$ . Sebaliknya, nilai  $a$  harus dikondisikan konstan untuk mengetahui pengaruh dari parameter  $b$ .

Jika diasumsikan konsentrasi ion klorida awal di laut  $C_0 = 9 \text{ kg/m}^3$ , nilai parameter  $a = -1.2, -1.7$  dan  $-2.2$ , dan nilai parameter  $b = 0.3$ , maka pengaruh dari parameter  $a$  atau kuat angin terhadap distribusi konsentrasi ion klorida awal dapat dilihat pada **Gambar 4**.

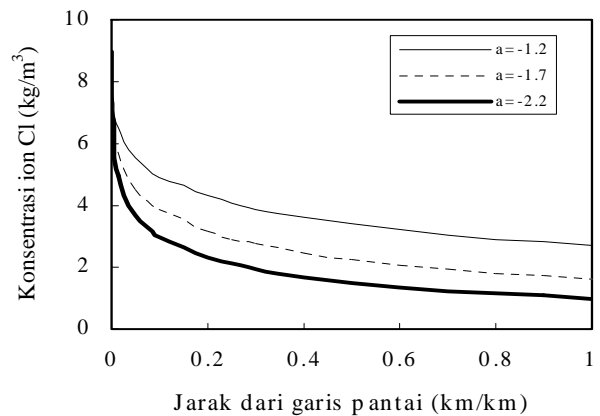
Kuat angin yang menjadi pengaruh nilai parameter  $a$  diasumsikan hanya kuat angin di pantai. Jika kuat angin di suatu lokasi pantai sangat kuat maka akan mampu menerbangkan ion klorida yang dalam bentuk uap air atau debu sampai jarak yang jauh. Nilai pa-

rameter  $a$  berbanding lurus dengan kuat angin, semakin besar nilai parameter  $a$  maka semakin besar nilai konsentrasi ion klorida awal terhadap jarak, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4**.

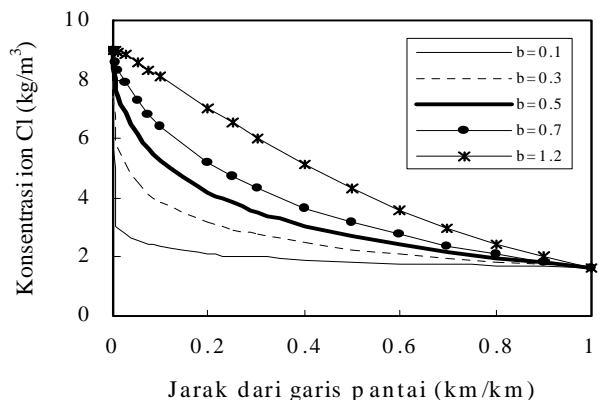
Jika diasumsikan nilai  $C_0 = 9 \text{ kg/m}^3$ , nilai parameter  $a = -1.7$ , dan nilai parameter  $b = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7$  dan  $1.2$ , maka pengaruh dari parameter  $b$  atau topografi daerah yang dekat pantai terhadap distribusi konsentrasi ion klorida awal dapat dilihat pada **Gambar 5**.



**Gambar 3. Lokasi bangunan dari garis pantai**



**Gambar 4. Pengaruh nilai parameter a**



**Gambar 5. Pengaruh nilai parameter b**

Bentuk topografi mempengaruhi nilai parameter  $b$ . Gunung, bukit, hutan, dan bangunan yang tinggi adalah bentuk-bentuk topografi yang menjadi penghalang terbangnya uap air laut. **Gambar 5** menunjukkan kurva distribusi konsentrasi ion klorida awal dimana menurun dengan cepat pada jarak yang tertentu dari pantai dan setelah itu menurun dengan perlahan. Pada makalah ini, jarak tersebut dinamakan jarak transisi. Semakin besar nilai  $b$  maka semakin jauh jarak transisi tersebut. Hal ini berarti bahwa nilai  $b$  sebanding dengan letak penghalang terbangnya uap air laut. Melihat kecenderungan yang diperlihatkan pada **Gambar 5**, nilai parameter  $b$  yang umum diperkirakan berkisar antara 0.3-0.7.

Dari hasil simulasi di atas maka dapat disimpulkan bahwa nilai parameter  $a$  dan  $b$  di setiap daerah tergantung kondisi alam (kuat angin) dan topografinya. Karena itu, untuk menentukan kedua parameter tersebut harus dilakukan investigasi di lapangan yaitu dengan mengukur kandungan ion klorida dalam bangunan beton di sekitar pantai. Pendekatan hasil pengukuran tersebut dengan persamaan (1) menghasilkan nilai parameter  $a$  dan  $b$ .

#### 4. Pemodelan Proses Difusi Ion Klorida pada Beton

Beton adalah material yang masif jika dilihat secara makro tetapi materi yang mempunyai pori-pori yang berdiameter kecil jika dilihat secara mikro. Pori-pori yang terdapat di dalam beton adalah pori-pori yang menerus. Jenis pori-pori ini dinamakan pori kapiler.

Keberadaan pori kapiler di dalam beton dapat menyebabkan senyawa dari luar masuk ke dalam beton, misalnya ion klorida. Proses ini dinamakan difusi. Untuk kondisi alamiah, difusi pada umumnya berlangsung karena perbedaan konsentrasi. Konsentrasi ion klorida awal yang berada di permukaan beton dapat berdifusi ke beton karena perbedaan konsentrasi.

Keberadaan klorida di dalam beton dapat berbentuk dua jenis. Bentuk yang pertama adalah berbentuk terikat karena sudah bereaksi dengan senyawa beton. Misalnya kandungan klorida awal dari campuran beton akan bereaksi dengan senyawa  $C_3A$  atau  $C_4AF$  membentuk garam Friedel. Jenis klorida yang sudah terikat kecil kemungkinannya menyebabkan hilangnya lapisan pasif baja. Karena itu, jenis semen yang mempunyai kandungan  $C_3A$  yang tinggi menyebabkan beton lebih tahan terhadap korosi.

Jenis yang kedua adalah dalam bentuk ion bebas atau dapat terlarut dalam air, yaitu ion-ion klorida yang berada di pori-pori beton. Ion klorida ini berasal dari luar maupun yang berasal dari bahan-bahan beton

yang dipakai tetapi belum bereaksi dengan senyawa beton. Keberadaan ion-ion klorida ini dalam konsentrasi tertentu dapat menyebabkan hilangnya lapisan pasif baja.

**Gambar 6** menunjukkan satu contoh infiltrasi ion klorida pada bangunan beton di daerah pantai yang berlangsung selama 15 tahun. Dari hasil ini dapat diketahui bahwa konsentrasi ion klorida menurun dengan semakin jauh dari permukaan difusi.

Perhitungan difusi biasanya menggunakan persamaan Ficks yang kedua. Persamaan Ficks yang kedua untuk satu dimensi dari proses difusi ion klorida bebas dari luar beton dapat dituliskan seperti di bawah ini (Crank, 1975).

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_c \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \right) \quad (2)$$

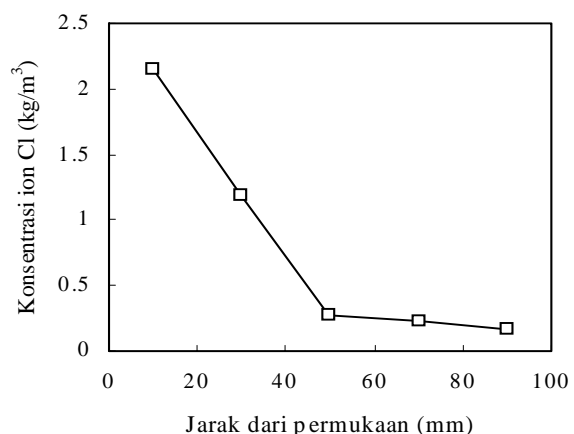
dimana,  $C(x,t)$  adalah konsentrasi ion klorida pada saat  $t$  di kedalaman  $x$  dari permukaan beton dan  $D_c$  adalah koefisien difusi dari ion klorida.

Persamaan Ficks yang kedua yang ditunjukkan di persamaan (2) dapat diselesaikan dengan menggunakan fungsi kesalahan atau *error function*. Persamaan solusinya seperti di bawah ini (Middleman, 1997).

$$\frac{C(x,t)}{C_0} = 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \quad (3)$$

dimana  $C_0$  adalah konsentrasi ion klorida awal di permukaan beton dan *erf* adalah notasi dari fungsi kesalahan.

Dari persamaan (3) dapat diketahui bahwa dengan bertambahnya waktu konsentrasi ion klorida di dalam



**Gambar 6. Contoh infiltrasi ion klorida pada bangunan beton selama 15 tahun (PWRI, 2003)**

beton semakin bertambah dan kedalaman difusi ion klorida pun semakin dalam seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 7**. Notasi  $C_{init}$  yang terdapat pada **Gambar 7** berarti konsentrasi awal klorida dalam beton biasanya dalam bentuk garam Friedel, sedangkan notasi  $C_{corr}$  berarti konsentrasi klorida yang menyebabkan hilangnya lapisan pasif baja. Konsentrasi yang dinyatakan di **Gambar 7** adalah konsentrasi total dari klorida terikat dan klorida bebas.

Jika menghitung konsentrasi klorida yang dapat menyebabkan hilangnya lapisan pasif baja maka persamaan (3) berubah menjadi seperti di bawah ini.

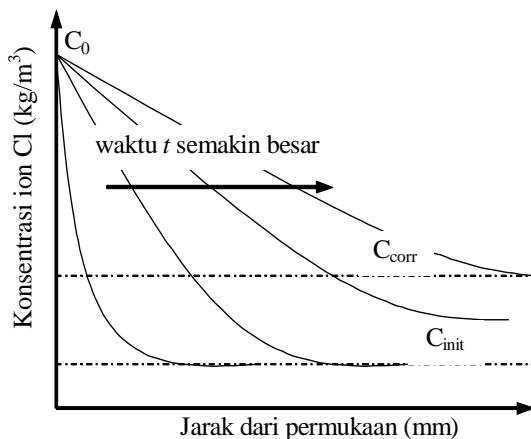
$$\frac{C_{corr} - C_{init}}{C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}}\right) \quad (4)$$

dimana,  $x$  adalah tebal selimut beton.

Konsentrasi ion klorida dinyatakan dalam  $\text{kg/m}^3$  artinya massa klorida yang terdapat dalam  $1\text{m}^3$  beton. Dengan dipakainya satuan ini lebih memudahkan pengukuran. Tetapi perlu diingat bahwa hasil pengukuran tersebut adalah konsentrasi total klorida yang terdapat di dalam beton.

### 5. Pemodelan Perhitungan Tebal Selimut Beton Minimum

Di dalam studi ini tebal selimut beton minimum ditentukan oleh konsentrasi ion klorida bebas yang berada di sekitar permukaan baja tulangan. Kondisi seperti ini hanya menyebabkan hilangnya lapisan pasif baja saja, belum menyebabkan kerusakan bangunan beton akibat korosi. Penentuan tebal selimut minimum dengan kondisi seperti itu umum dibuat karena proses korosi berlangsung cepat setelah hilangnya lapisan pasif baja.



**Gambar 7.** Perubahan konsentrasi klorida terhadap jarak dari permukaan difusi

Selain itu, penentuan seperti itu dapat diperhitungkan sebagai tambahan faktor keamanan dalam perencanaan.

Fungsi kesalahan adalah integral dari fungsi dari bilangan eksponen (Middleman, 1997). Karena itu, fungsi kesalahan dapat didekati dengan persamaan hampiran yang berbentuk polinom seperti yang dinyatakan di bawah ini.

$$1 - \operatorname{erf}(s) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s e^{-s^2} ds$$

$$1 - \operatorname{erf}(s) = \frac{1}{\left(1 + 0.278393s + 0.230389s^2 + 0.000972s^3 + 0.078108s^4\right)^4} \quad (5)$$

dimana,

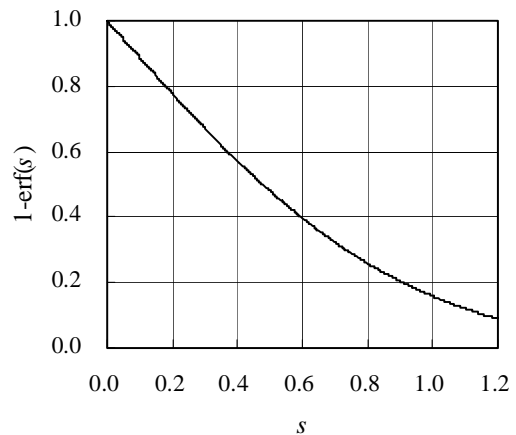
$$s = \frac{x}{2\sqrt{D_c t}}$$

**Gambar 8** menunjukkan perilaku hubungan  $s$  dengan  $1 - \operatorname{erf}(s)$  yang dihitung dengan persamaan (5). Perilaku ini mempunyai kecenderungan yang dengan konsentrasi ion klorida terhadap jarak dari permukaan difusi yang ditunjukkan pada **Gambar 6**. Sehingga dapat disimpulkan fungsi kesalahan dapat digunakan untuk mendekati solusi persamaan difusi orde satu.

Jika persamaan (5) disubstitusikan ke persamaan (4) maka diperoleh persamaan berikut ini.

$$\frac{C_{corr} - C_{init}}{C_0} = \frac{1}{\left(1 + 0.278393s + 0.230389s^2 + 0.000972s^3 + 0.078108s^4\right)^4} \quad (6)$$

D a n j i k a persamaan (1) disubstitusikan ke persamaan (6) maka didapatkan hubungan antara jarak bangunan dengan



**Gambar 8.** Perilaku dari fungsi  $1 - \operatorname{erf}(s)$

tebal selimut beton. Dalam hal ini  $x$  adalah tebal selimut beton. Persamaan yang diperoleh adalah seperti di bawah ini.

$$C_0 \times \exp \left[ a \left( \frac{x}{x_0} \right)^b \right] = \frac{C_{corr} - C_{init}}{1 + 0.278393s + 0.230389s^2 + 0.000972s^3 + 0.078108s^4} \quad (7)$$

Jadi, jika koefisien difusi, waktu difusi dan konsentrasi ion klorida bebas di permukaan baja tulangan yang dapat menyebabkan hilangnya lapisan pasif baja diketahui maka perubahan tebal selimut beton minimum terhadap jarak bangunan dapat dihitung.

### 6. Penentuan Nilai Parameter yang Digunakan

#### 6.1 Konsentrasi klorida awal dalam beton $C_{init}$

Konsentrasi klorida awal di dalam beton berasal dari kandungan klorida yang terdapat dalam air, semen dan agregat. Kandungan klorida dalam air adalah sekitar 0.02%, dan semen jenis OPC disyaratkan tidak boleh melebihi 0.02% terhadap beratnya. Untuk kandungan klorida dalam agregat disyaratkan tidak boleh melebihi 0.05% dari beratnya (Neville, 1999).

Selain itu, tambahan bahan kimia yang ditambahkan ke dalam beton pun dapat menyebabkan konsentrasi klorida di dalam beton meningkat. Jika pemakaian tambahan bahan kimia berlebihan menyebabkan konsentrasi klorida awal beton tinggi, bahkan dapat menyebabkan hilangnya lapisan pasif baja pada saat pengecoran beton.

Untuk beton yang normal, jika kandungan klorida dari bahan-bahan beton yang dipakai dijumlahkan maka jumlahnya berkisar 0.3 kg/m<sup>3</sup> (PWRI, 2003). Klorida ini umumnya sudah bereaksi dengan C<sub>3</sub>A atau C<sub>4</sub>AF membentuk garam Friedel.

#### 6.2 Konsentrasi klorida yang menyebabkan hilangnya lapisan pasif baja $C_{corr}$

Peraturan beton Inggris BS8110 Part I 1985 mensyaratkan jumlah total dari klorida dalam beton tidak boleh melebihi dari 0.4% dari berat semen (Neville, 1999). Sedangkan Peraturan beton Amerika ACI 318-99 mensyaratkan jumlah klorida bebas dalam beton tidak boleh melebihi dari 0.15% dari berat semen (Neville, 1999). Kedua peraturan tersebut pada dasarnya tidak ada perbedaan hanya berbeda dalam pengukuran.

Jika dipakai peraturan beton Inggris dan diasumsikan berat semen rata-rata dalam beton adalah 300kg/m<sup>3</sup> maka jumlah total klorida yang dapat menyebabkan hilangnya lapisan pasif baja  $C_{corr}$  adalah 1.2kg/m<sup>3</sup>.

#### 6.3 Nilai parameter persamaan (1)

Seperti telah dijelaskan di atas, konsentrasi klorida awal di laut  $C_0$  adalah berkisar 9-12 kg/m<sup>3</sup> (PWRI, 2003). Dalam studi ini dipilih konsentrasi minimum. Pemilihan ini dengan alasan untuk lebih meningkatkan faktor keamanan dari perencanaan.

Nilai parameter  $a$  dan  $b$  dipilih berdasarkan kecenderungan yang didapat di atas. Untuk studi ini dipilih  $a=-1.7$  dan  $b=0.3$ .

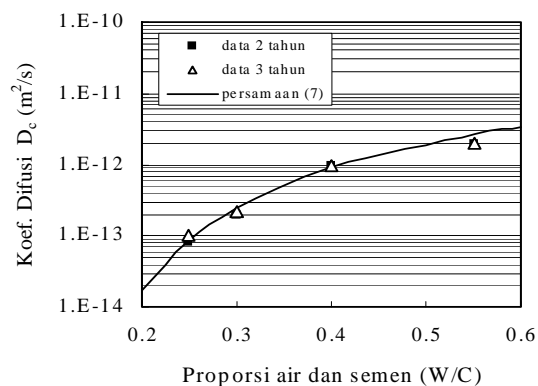
#### 6.4 Koefisien difusi klorida $D_c$

Koefisien difusi klorida  $D_c$  tergantung dari kualitas dari beton. Kualitas beton dapat dikatakan sebanding dengan perbandingan air terhadap semen (W/C). Beton dengan W/C yang kecil mempunyai volume pori-pori yang sedikit. Volume pori-pori yang sedikit menyebabkan jumlah klorida yang masuk ke beton pun sedikit sehingga koefisien difusinya menjadi kecil.

Gambar 9 menunjukkan hubungan antara koefisien difusi  $D_c$  dengan W/C. Data yang dipakai adalah hasil pengukuran dengan waktu difusi yang berbeda yaitu 2 tahun dan 3 tahun (PWRI, 2003). Data-data hasil pengukuran tersebut dapat didekati dengan persamaan seperti di bawah ini.

$$D_c(w_0) = D_{ch} \times \exp \left( - \frac{k}{w_0} \right) \quad (8)$$

dimana,  $w_0$  adalah W/C beton,  $D_c(w_0)$  adalah koefisien difusi klorida dari beton dengan W/C =  $w_0$ ,  $D_{ch}$  adalah koefisien difusi klorida dari beton dengan W/C besar (tak hingga), dan  $k$  adalah koefisien.



Gambar 9. Hubungan  $D_c$  dengan W/C (PWRI, 2003)

Hasil pendekatan yang dilakukan seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 9**, nilai  $D_{ch}$  adalah  $5.0 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  dan nilai  $k=1.6$ .

### 7. Hasil Perhitungan

Simulasi dilakukan untuk menghitung tebal selimut beton minimum terhadap jarak bangunan dari garis pantai. Simulasi dilakukan dengan W/C beton 0.3, 0.4 dan 0.6, dan masa layan bangunan beton 25, 50 dan 100 tahun. W/C=0.6 dipilih sebagai parameter studi kasus dengan tujuan untuk perbandingan dan untuk memberi alasan mengapa peraturan tidak mengizinkan pemakaian W/C=0.45 pada lingkungan yang mengandung ion klorida.

Sebagai perbandingan dipakai tebal selimut beton dan W/C minimum yang disyaratkan dalam tata cara perencanaan struktur beton untuk bangunan gedung SKSNI T-15-1991-03. Untuk bangunan terbuka di lokasi yang mengandung klorida disyaratkan mempunyai tebal selimut beton minimum 50mm dan W/C maksimum 0.45. Bangunan beton terbuka yang dimaksud di sini adalah seperti jembatan yang diilustrasikan pada **Gambar 3**.

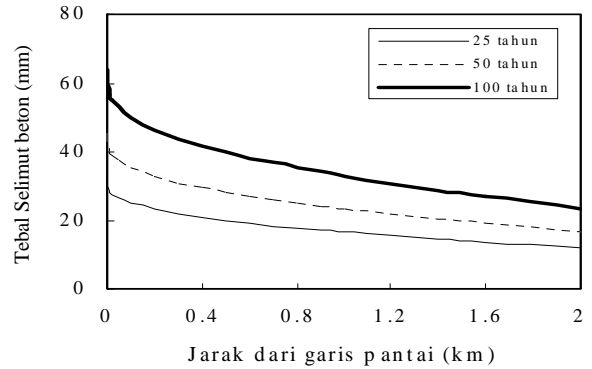
Hasil perhitungan untuk bangunan beton dengan W/C sama dengan 0.3, 0.4 dan 0.6 masing-masing ditunjukkan di **Gambar 10**, **Gambar 11** dan **Gambar 12**. Garis putus-putus horisontal di dalam **Gambar 10**, **11** dan **12** menunjukkan batas minimum tebal selimut beton yang diizinkan. Seperti yang telah dijelaskan di atas, tebal selimut beton minimum diasumsikan 50mm.

Dari ketiga gambar tersebut menunjukkan bahwa tebal selimut beton minimum menjadi kecil dengan semakin jauhnya bangunan dari garis pantai. Bertambah besarnya W/C menyebabkan tebal selimut beton pun semakin besar.

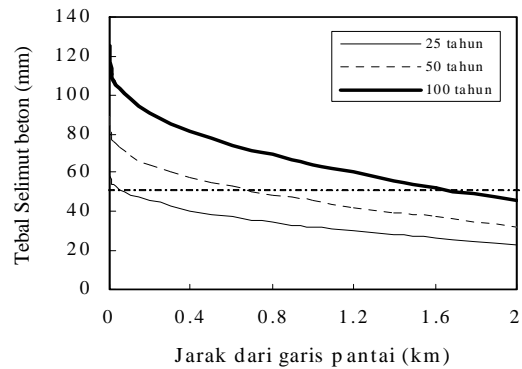
Dari **Gambar 10** dapat diketahui bahwa bangunan beton dengan W/C=0.3 dan tebal selimut beton 50mm mampu mempunyai masa layan 100 tahun walaupun dibangun di sekitar pantai. Selain itu, karena penentuan masa layan adalah sampai lapisan pasif baja hilang maka bangunan beton dapat mencapai masa layannya tanpa pemeliharaan khusus terhadap serangan klorida. Jika selimut beton diperkecil menjadi 40mm masa layannya turun menjadi sekitar 50 tahun. Demikian juga jika selimut beton diperkecil lagi menjadi 30mm maka masa layannya turun menjadi 25 tahun.

Dari **Gambar 11** menunjukkan bahwa jika W/C dinaikkan dari 0.3 menjadi 0.4, walaupun dengan tebal

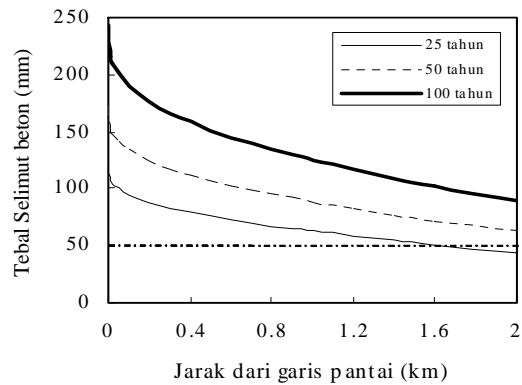
selimut beton 50mm masa layan bangunan beton hanya menjadi 25 tahun jika bangunan dibangun sekitar pantai dan tanpa pemeliharaan secara khusus. Untuk kondisi perencanaan seperti ini, bangunan beton mempunyai masa layan 100 tahun jika bangunan dibangun sejauh sekitar 1.5km dari pantai. Dan jika bangunan yang dibangun sejauh sekitar 1.5km dari pantai itu direncanakan dengan tebal selimut beton 40mm, masa layannya turun menjadi 50 tahun, dan jika tebal selimut beton 30mm maka masa layan bangunan turun menjadi 25 tahun.



**Gambar 10.** Hasil perhitungan tebal selimut beton (W/C=0.3)



**Gambar 11.** Hasil perhitungan tebal selimut beton (W/C=0.4)



**Gambar 12.** Hasil perhitungan tebal selimut beton (W/C=0.6)

Dari **Gambar 12** jelas menunjukkan bahwa jika W/C lebih besar dari 0.45 maka bangunan beton hanya mempunyai masa layan 25 tahun dan itupun bangunan harus dibangun sejauh 1.6 km dari garis pantai. Karena itu, peraturan tidak mengizinkan bangunan pada lingkungan yang mengandung ion klorida dibangun dengan menggunakan proporsi air-semen beton (W/C) lebih dari 0.45. Dari hasil simulasi ini juga dapat diketahui bahwa W/C  $\leq$  0.45 dapat digunakan untuk bangunan yang dibangun sejauh lebih dari 2 km dari garis pantai.

Dari kecederungan hasil simulasi di atas maka dapat disimpulkan bahwa grafik hubungan antara tebal selimut beton minimum dengan jarak bangunan dari garis pantai dalam berbagai W/C dan masa layan seperti yang ditunjukkan di **Gambar 10, 11, dan 12** sangat memudahkan perencanaan ketahanan bangunan yang optimal.

## 8. Diskusi

### 8.1 Pengaruh tebal selimut beton

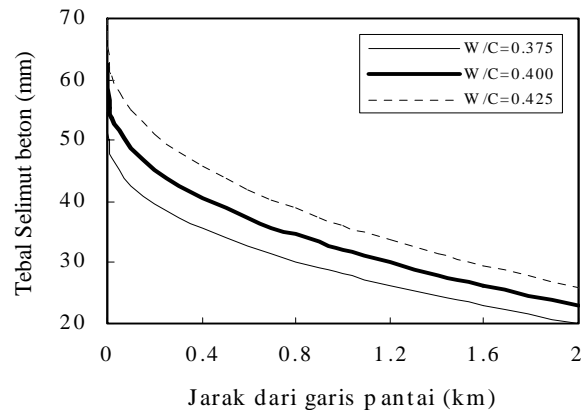
Hasil simulasi ini menunjukkan bahwa jika tebal selimut beton dikurangi 10mm maka masa layan bangunan beton menurun menjadi setengah masa layan bangunan dengan tebal selimut beton sebelum dikurangi. Misalnya, bangunan dengan W/C=0.3 dan tebal selimut 50mm mempunyai masa layan 100 tahun. Tetapi jika tebal selimut beton dikurangi 10mm menjadi 40mm maka masa layan bangunan menjadi 50 tahun. Dan jika tebal selimut dikurang 20mm menjadi 30mm maka masa layan bangunan menjadi 25 tahun yaitu setengah dari setengah masa layan 100. Jadi, ketebalan selimut beton mempunyai pengaruh yang besar terhadap ketahanan bangunan.

### 8.2 Pengaruh W/C

Faktor W/C sangat berpengaruh terhadap ketahanan bangunan dan lama masa layannya. Jika W/C dinaikkan 0.1 maka masa layan bangunan turun seperempat dari masa layan bangunan beton dengan W/C sebelum dinaikkan 0.1. Misalnya, bangunan yang dibangun di sekitar pantai dengan W/C=0.3 dan tebal selimut beton 50mm akan mempunyai masa layan 100 tahun. Tetapi, jika W/C dinaikkan 0.1 menjadi W/C=0.4 maka masa layan bangunan menjadi 25 tahun.

Perubahan W/C menyebabkan perubahan kualitas bangunan secara keseluruhan. Tidak hanya ketahanannya terhadap kondisi lingkungannya tetapi kapasitasnya terhadap gaya-gaya yang bekerja padanya.

**Gambar 13** adalah hasil perhitungan untuk bangunan dengan masa layan rencana adalah 25 tahun dengan



**Gambar 13. Pengaruh perubahan W/C (masa layan 25 tahun)**

W/C=0.460.025. Dari hasil ini menunjukkan bahwa perubahan W/C 0.025 saja dapat mengakibatkan perubahan masa layan bangunan. Karena itu, menaikkan W/C dari W/C rencana sebaiknya dihindari.

### 8.3 Perbandingan dengan pengamatan di lapangan

**Foto 1** menunjukkan keretakan balok jembatan akibat korosi baja tulangan. Jembatan ini terletak daerah pantai di Jepang. Balok jembatan ini dibuat dengan W/C sekitar 0.4 dan tebal selimut beton sekitar 50mm. Waktu yang diperlukan sampai terjadi keretakan seperti yang diperlihatkan di **Foto 1** adalah sekitar 25 tahun (KATRI, 2002).

Hasil pengamatan di lapangan seperti yang ditunjukkan di **Foto 1** mendukung hasil simulasi seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 11**. Dari **Gambar 11** dapat diketahui bahwa suatu bangunan yang direncanakan dengan W/C=0.4 dan tebal selimut beton 50mm diperkirakan mempunyai masa layan sekitar 25 tahun walaupun bangunan itu dibangun di pantai sekalipun. **Foto 1** memberikan bukti bahwa bangunan sudah mengalami keretakan yang besar selama sekitar 25 tahun. Hal ini berarti proses difusi lebih cepat dari hasil simulasi. Hal ini mungkin disebabkan oleh konsentrasi klorida awal di laut lebih tinggi dari nilai



**Foto 1. Keretakan balok akibat korosi (KATRI, 2002)**



simulasi yang digunakan yaitu  $9 \text{ kg/m}^3$ .

Data-data kerusakan bangunan beton akibat korosi tulangan beton yang disebabkan oleh infiltrasi ion klorida sangat diperlukan. Terutama data-data investigasi di negara kita. Semakin banyaknya data yang diperoleh akan menambah ketelitian dari hasil simulasi tebal selimut beton minimum.

## **9. Kesimpulan**

Berdasarkan simulasi perhitungan tebal selimut beton minimum terhadap jarak bangunan dari garis pantai maka dapat disampaikan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Grafik hubungan antara tebal selimut beton dengan jarak bangunan dari garis pantai dalam berbagai W/C dan masa layan sangat memudahkan dalam perencanaan ketahanan bangunan yang optimal.
- 2) Pengurangan 10mm dari tebal selimut beton rencana akan mengakibatkan masa layan bangunan turun menjadi setengah masa layan rencana bangunan.
- 3) Penambahan 0.1 pada W/C rencana akan mengakibatkan masa layan bangunan turun menjadi seperempat masa layan rencana bangunan.

## **Daftar Pustaka**

- Crank, J, 1975, *“The Mathematics of Diffusion”*, London: Oxford University Press, Second edition.
- Kajima Technical Research Institute (KATRI), 2002, *“Estimation System of the Transfer of Ions and Substances Based on Diffusion and Advection”*, Pamflet, Tokyo: KATRI (in Japanese)
- Middleman, S., 1997, *“An Introduction to Mass and Heat Transfer: Principles of Analysis and Design”*, USA: John Wiley & Son, Inc.
- Neville, A.M., 1999, *“Properties of Concrete”*, London: Longman.
- Public Works Research Institute (PWRI), 2003, *“Current Issues and New technology on Salt Attack in Concrete Bridge, Not published report”*, Tokyo: PWRI (in Japanese)
- Railway Technical Research Institute (RTRI), 2002,

*“Investigation on Reinforcement Corrosion”*, Not published report, Tokyo: RTRI. (in Japanese)

Saitoh, S., 2000, *“Databook for Concrete Material”*, Tokyo: Maruzen Publishing Co. (in Japanese)

SKSNI T-15-1991-03, 1991, *“Tata Cara Perencanaan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung”*, Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.

