

PREDIKSI WAKTU LAYAN BANGUNAN BETON TERHADAP KERUSAKAN AKIBAT KOROSI BAJA TULANGAN

Agus Santosa Sudjono

Dosen Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil - Universitas Katolik Parahyangan
Email: aguss@home.unpar.ac.id

ABSTRAK

Beton dikenal sebagai bahan bangunan yang berpori. Sifat ini menyebabkan senyawa dari luar dapat berinfiltrasi ke dalam beton. Bangunan beton yang dibangun di sekitar daerah pantai/laut cenderung mengalami kerusakan akibat serangan garam klorida. Makalah ini mendiskusikan model untuk memprediksi waktu layan bangunan beton terhadap kerusakan akibat korosi baja tulangan. Waktu layan bangunan beton dibagi menjadi tiga periode. Periode I adalah waktu yang dibutuhkan oleh ion Cl^- untuk melakukan infiltrasi sampai ke permukaan baja tulangan, Periode II adalah waktu yang dibutuhkan oleh senyawa hasil korosi untuk mengisi pori-pori yang ada di *transition zone*, dan Periode III adalah waktu kerusakan pada bangunan beton. Parameter-parameter yang digunakan dalam persamaan yang diusulkan ditentukan dari hasil pengukuran di laboratorium. Persamaan tersebut dievaluasi dalam hal hubungan antara variasi tebal selimut beton, *water-cement ratio* (W/C), dan jarak bangunan dari pantai dengan waktu layan. Hasil prediksi waktu layan bangunan beton terhadap kerusakan akibat korosi baja tulangan dapat disimpulkan cukup memuaskan.

Kata kunci: waktu layan, bangunan beton, kerusakan, korosi, difusi ion Cl^-

ABSTRACT

Concrete is known as a porous building material, this can causes materials outside the concrete mass infiltrate into the concrete. Concrete structures constructed around the beach/seashore tend to have deterioration problems due to salt attack. This paper discusses models to predict the service life of concrete structure based on the deterioration problems. The service life of concrete structure is divided into three periods. Period I is time needed by Cl^- ion to infiltrate into concrete up to the surface of the reinforcement, period II is time needed by corrosion products to fill the transition zone pores, and period III is deterioration time. The value of parameters used in the proposed equations is derived from the result of experiments. Finally, the proposed equations were evaluated by the relationship between variations of depth of concrete cover, water cement ratio (W/C) and distance of structure from shore line with service life. It could be concluded that the results of the prediction is satisfactory.

Keywords: service life, concrete structure, deterioration, corrosion, diffusion of Cl^- ion.

PENDAHULUAN

Bangunan dapat dikatakan seperti manusia walaupun ia hanya benda mati. Bangunan mempunyai 'tanggal kelahiran', 'penyakit' dan 'tanggal kematian'. Ketika bangunan selesai dibangun, saat itulah menjadi 'tanggal kelahiran' bangunan tersebut. Selama waktu layannya bangunan dapat mengalami 'sakit' (kerusakan), baik oleh sebab-sebab dalam diri bangunan itu sendiri maupun akibat perubahan lingkungan di sekitarnya. Dalam hal kerusakan yang dialami sangat berat sehingga

tidak dapat diperbaiki lagi, maka waktu itu adalah waktu bangunan menjadi 'mati'. Bangunan dapat 'mati' sebelum waktu layan rencananya habis. Bangunan yang sudah 'mati' perlu 'dikubur' (dirobohkan dan dihancurkan), setelah itu dibangun bangunan pengganti yang baru jika diperlukan.

Iklim Indonesia yang tropis menyebabkan setiap harinya perubahan temperatur dan kelembaban cukup besar. Kondisi seperti ini menyebabkan berbagai jenis 'penyakit' (kerusakan) pada bahan bangunan sebagai tubuh bangunan. Kerusakan-kerusakan yang mungkin terjadi adalah susut dan korosi baja tulangan. Susut diakibatkan oleh perubahan temperatur di sekitar bangunan beton, sedangkan korosi baja tulangan diakibatkan oleh perubahan kondisi dalam beton dari basa menjadi

Catatan: Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Juni 2005. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Dimensi Teknik Sipil Volume 7, Nomor 2, September 2005.

asam dan kondisi lingkungan di sekitar bangunan beton.

Beton adalah bahan bangunan yang bersifat basa. Sifat beton ini menyebabkan baja tulangan aman terhadap korosi. Akan tetapi, kondisi basa dalam beton itu dapat berubah akibat pengaruh lingkungan di sekitarnya. Gas CO₂ atau ion asam dapat masuk ke dalam beton melalui pori-pori kapiler yang terdapat dalam beton. Gas CO₂ yang masuk ke dalam beton akan bereaksi dengan Ca(OH)₂ dan menghasilkan H₂CO₃ yang menyebabkan pH dari beton turun, selain itu, ion Cl⁻ dari laut yang berinfiltrasi ke beton menyebabkan konsentrasi asam naik. Perubahan kondisi dalam beton menjadi asam menyebabkan lapisan tipis di permukaan baja tulangan hilang, baja mudah mengalami korosi jika kadar gas O₂ dan air di dalam beton cukup.

Korosi pada baja tulangan selain menyebabkan diameter baja tulangan berkurang, juga menimbulkan volume senyawa hasil reaksi korosi yang lebih besar daripada volume baja yang bereaksi. Hal ini menyebabkan tekanan pada beton di sekeliling baja tulangan. Selimut beton yaitu bagian beton yang melindungi baja tulangan dapat mengalami keretakan atau terkelupas akibat tekanan dari pengembangan volume senyawa hasil reaksi korosi. Kerusakan ini menyebabkan kinerja bangunan beton menurun, dan jika kerusakan terus berlanjut maka bangunan beton tidak layak dipakai lagi (mati). Karena itu, korosi baja tulangan beton dapat dijadikan dasar untuk memprediksi waktu layan bangunan beton, terutama untuk bangunan di sekitar laut.

Makalah ini menjelaskan pemodelan dari prediksi waktu layan bangunan beton terhadap kerusakan akibat korosi pada tulangan beton. Pada makalah ini, infiltrasi ion Cl⁻ ke dalam beton dijadikan dasar penyebab terjadinya korosi baja tulangan. Investigasi dan penelitian tentang kerusakan bangunan beton akibat infiltrasi ion Cl⁻ masih jarang dilakukan di Indonesia. Karena keterbatasan data, makalah ini menggunakan data dari hasil investigasi yang dilakukan di Jepang untuk menentukan nilai parameter dari persamaan yang diusulkan [1]. Pemodelan ini dikembangkan untuk menghitung biaya yang diperlukan bangunan selama waktu layannya (*life cycle cost*).

MEKANISME KOROSI PADA TULANGAN BETON

Baja adalah bahan yang mempunyai kuat tarik yang tinggi dan koefisien pemuaian yang hampir sama dengan beton. Sedangkan beton sebagai bahan bangunan mempunyai kelemahan utama

yaitu kuat tariknya kecil. Karena itu, baja dapat digunakan sebagai tulangan pada bagian beton yang menerima gaya tarik.

Pada permukaan baja terdapat lapisan pasif baja yang tipis. Lapisan pasif baja ini berguna untuk melindungi baja dari korosi. Lapisan pasif baja akan bereaksi dengan larutan asam atau akan larut dalam kondisi asam. Karena beton bersifat alkali, yaitu basa dengan pH sekitar 12-13, baja tulangan di dalam beton aman terhadap korosi [2]. Beton secara makro terlihat sebagai material yang kuat dan masif, tetapi jika dilihat secara mikro maka beton adalah material yang berpori dengan diameter yang kecil. Pori-pori di dalam beton pada umumnya menerus. Pori-pori ini dinamakan pori kapiler, dan ukurannya berdiameter 3nm–2µm [3]. Ukuran diameter pori-pori kapiler tersebut masih memungkinkan senyawa-senyawa di sekitar beton untuk berinfiltrasi ke dalam beton dengan cara berdifusi. Proses ini dapat terjadi karena ada perbedaan konsentrasi di dalam beton dan di luar beton. Misalnya bangunan beton di sekitar pantai/laut, karena konsentrasi ion Cl⁻ di luar beton lebih tinggi daripada di dalam beton maka akan terjadi difusi ion Cl⁻ ke dalam beton.

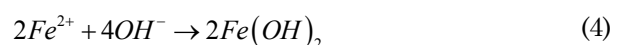
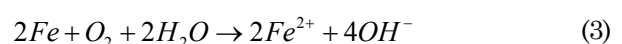
Ion dari senyawa-senyawa yang bersifat asam, seperti ion Cl⁻ pada daerah laut, yang berdifusi ke dalam beton sampai ke permukaan baja tulangan dapat mengakibatkan lapisan pasif baja hilang. Permukaan baja yang lapisan pasifnya hilang menjadi anode dari reaksi korosi baja tulangan. Persamaan reaksi anode ini dapat dituliskan sebagai berikut:



Elektron yang dilepaskan dari reaksi anode menyebabkan gas O₂ dan air yang terdapat di atas permukaan baja yang masih tertutup oleh lapisan pasif, bereaksi. Bagian baja ini menjadi katode dari reaksi korosi baja tulangan, dan reaksinya dapat dituliskan sebagai berikut:

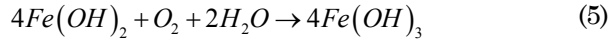


Kedua ion yang terbentuk pada anode dan katode bergabung membentuk senyawa hasil korosi. Persamaan reaksi tersebut dapat dituliskan seperti di bawah ini.



Fe(OH)₂ sebagai bentuk awal senyawa hasil korosi akan berada di permukaan baja yang mengalami korosi. Setelah itu tergantung konsentrasi O₂ dalam air yang terdapat pada pori-pori beton. Jika konsen-

trasi O_2 tinggi maka akan terbentuk $Fe(OH)_3$ dengan persamaan reaksi sebagai berikut:



Jika pada waktu pembentukan senyawa $Fe(OH)_2$ jumlah air tidak cukup sedangkan konsentrasi O_2 cukup maka terbentuk korosi yang berwarna merah ($FeOOH$). Tetapi, jika konsentrasi O_2 juga tidak cukup maka terbentuk korosi berwarna hitam (Fe_2O_3) atau berwarna hijau ($2FeO \cdot Fe_2O_3 \cdot H_2O$). Karena korosi adalah senyawa yang berpori maka proses korosi akan terus berlanjut asalkan konsentrasi Cl^- , O_2 dan H_2O di dalam beton cukup. Proses infiltrasi ion Cl^- dan korosi dari baja tulangan dalam beton diilustrasikan pada Gambar 1.

Perbandingan volume antara senyawa hasil reaksi korosi dengan senyawa yang bereaksi kira-kira 2,5 kali [5]. Karena itu, selimut beton dapat mengalami keretakan akibat tekanan dari pengembangan volume tersebut. Jika telah terjadi keretakan pada selimut beton maka gas O_2 , H_2O dan ion Cl^- lebih mudah berinfiltrasi ke dalam beton dan kerusakan akibat korosi pada bangunan beton akan menjadi lebih parah.

PEMODELAN KERUSAKAN AKIBAT KOROSI BAJA TULANGAN

Reaksi korosi pada baja menghasilkan volume senyawa hasil reaksi lebih besar dari senyawa yang bereaksi. Jika diasumsikan berat jenis baja dan senyawa hasil korosi hampir sama, kecepatan reaksi korosi dapat dinyatakan dengan berat senyawa hasil korosi terhadap waktu. Pemikiran ini menjadi rasional karena pengukuran berat senyawa hasil korosi mudah dilakukan baik di laboratorium maupun di lapangan. Karena itu, pada makalah ini kerusakan bangunan beton

akibat korosi baja tulangan dimodelkan dengan hubungan antara berat senyawa hasil korosi dengan waktu.

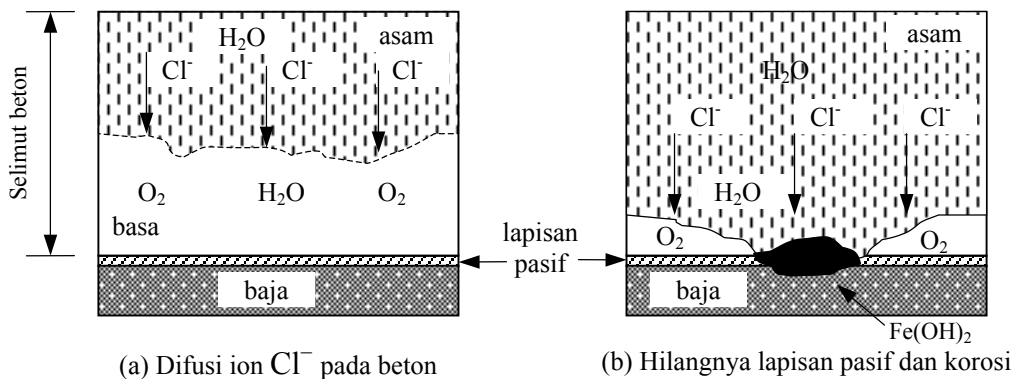
Dengan bertambahnya waktu berat senyawa hasil korosi semakin besar sehingga membuat tekanan pada selimut beton pun semakin besar. Kemudian, untuk menentukan kondisi kerusakan bangunan beton akibat korosi dapat digunakan hubungan antara keretakan pada selimut beton dengan berat senyawa hasil korosi yang diperoleh dari pengukuran di laboratorium maupun lapangan.

Gambar 2 memperlihatkan model dari hubungan antara kerusakan bangunan beton akibat korosi dengan waktu. Pada model ini dibagi dalam tiga periode. Periode I adalah dari waktu bangunan selesai dibangun sampai dengan waktu dimana ion Cl^- mencapai permukaan baja tulangan (T_I). Periode II adalah dari waktu T_I sampai dengan waktu dimana senyawa hasil korosi mengisi semua rongga yang ada di sekitar permukaan baja tulangan dan siap untuk memberikan tekanan pada selimut beton (T_{II}). Periode III adalah dari waktu T_{II} sampai dengan waktu dimana keretakan besar dan parah terjadi di permukaan beton (T_{III}). Sebagai gambaran, kondisi bangunan beton akibat korosi baja tulangan pada waktu T_{III} ditunjukkan di Gambar 3.

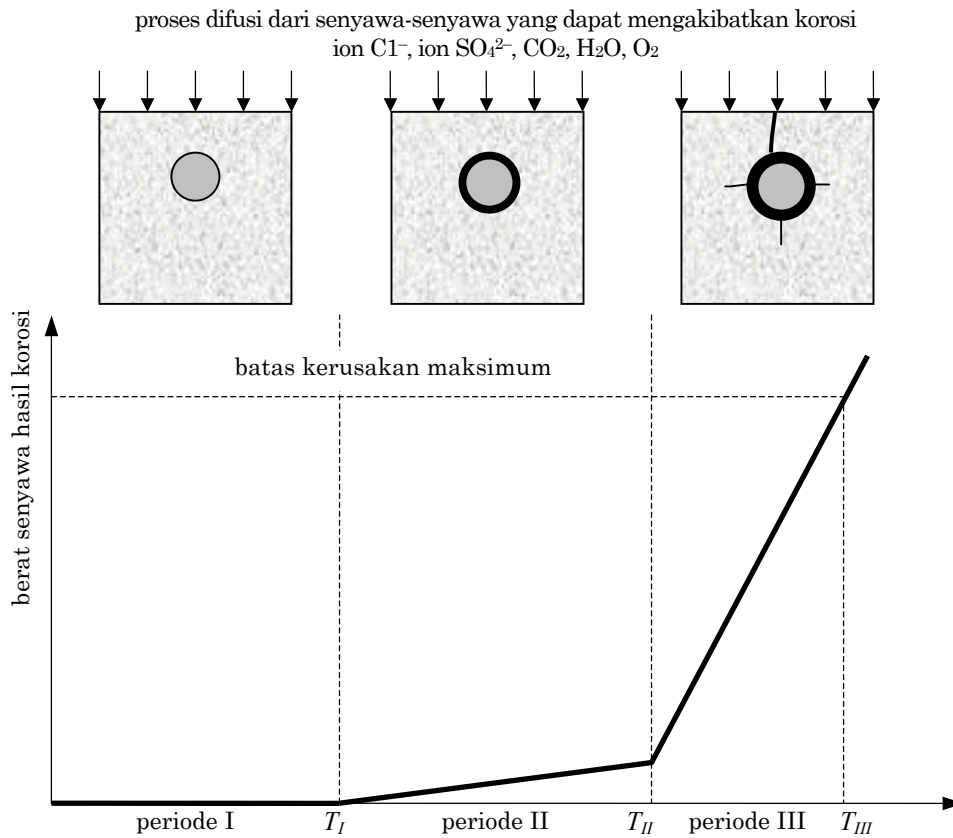
PEMODELAN PREDIKSI WAKTU LAYAN BANGUNAN BETON

Waktu layan bangunan beton yang dihitung berdasarkan kerusakan akibat korosi tulangan beton seperti yang dimodelkan di Gambar 2 dituliskan sebagai berikut:

$$T_{layan} = T_I + T_{II} + T_{III} \quad (6)$$



Gambar 1 Proses kerusakan bangunan beton akibat korosi baja tulangan [4]



Gambar 2. Model Kerusakan Bangunan Beton Akibat Korosi



Gambar 3 Kondisi kerusakan pada waktu T_{III} [6]

Prediksi Waktu T_I

T_I ditentukan oleh lamanya infiltrasi ion Cl^- sampai ke permukaan baja tulangan. Proses infiltrasi ion Cl^- ke dalam beton adalah secara difusi. Pada umumnya, persamaan Fick II digunakan untuk menghitung proses difusi suatu senyawa ke dalam media berpori. Persamaan Fick II dapat dituliskan dalam bentuk umum seperti di bawah ini [7].

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_c \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \right) \quad (7)$$

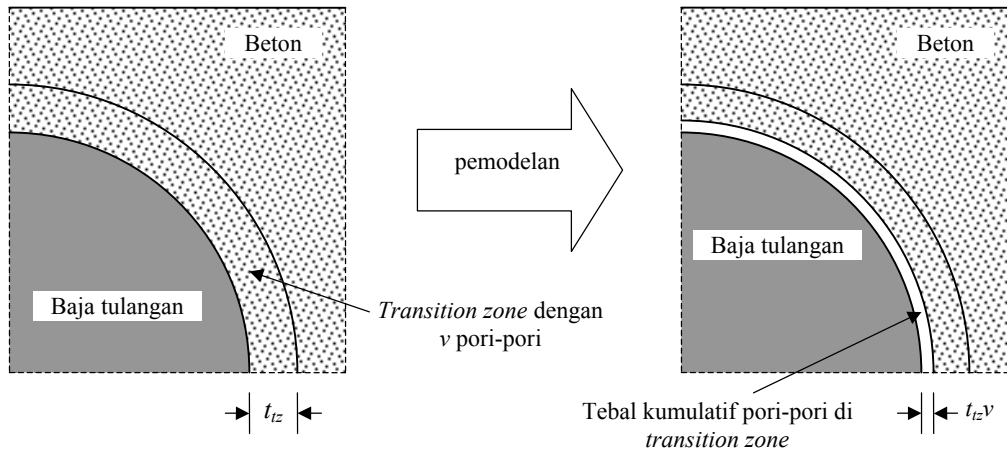
dimana, $C(x,t)$ adalah konsentrasi senyawa yang terdifusi pada jarak x dan waktu t , t adalah waktu lamanya difusi, x adalah kedalaman difusi yang dihitung dari permukaan media difusi, D_c adalah koefisien difusi.

Persamaan Fick II yang ditunjukkan di persamaan (7) dapat diselesaikan dengan menggunakan *error function* seperti yang ditunjukkan pada persamaan berikut ini.

$$\frac{C(x,t)}{C_0} = 1 - \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \quad (8)$$

di mana, C_0 adalah konsentrasi ion Cl^- di permukaan media difusi (dalam hal ini beton), *erf* adalah simbol dari *error function*.

Konsentrasi ion Cl^- yang dapat mengakibatkan hilangnya lapisan pasif baja tulangan sudah tertentu dan konsentrasi ion Cl^- di permukaan beton pun diasumsikan konstan sehingga perbandingan kedua konsentrasi tersebut akan menghasilkan nilai yang konstan juga. Jika t adalah T_I dan jarak x adalah tebal selimut beton c maka waktu T_I dapat dihitung dari penurunan rumus di bawah ini.



Gambar 4. Model dari tebal kumulatif pori-pori di *transition zone*

$$\frac{C(c, T_1)}{C_0} = \text{konstan}$$

$$1 - \text{erf}\left(\frac{c}{2\sqrt{D_c T_1}}\right) = \text{konstan}$$

$$c = k\sqrt{D_c T_1}$$

$$T_1 = \frac{1}{D_c} \left(\frac{c}{k}\right)^2 \quad (9)$$

di mana, k adalah konstanta tanpa satuan. Nilai k sangat tergantung pada perbandingan antara konsentrasi ion Cl^- di permukaan beton dengan konsentrasi ion Cl^- yang dapat mengakibatkan hilangnya lapisan pasif baja tulangan.

Prediksi Waktu T_{II}

Setelah lapisan pasif baja tulangan hilang, reaksi korosi mulai berlangsung. Dari reaksi korosi di atas, dapat diketahui proses reaksi korosi sangat bergantung pada konsentrasi gas O_2 di dalam beton. Gas O_2 di dalam beton adalah hasil difusi dari gas O_2 yang ada di permukaan beton. Karena itu, kecepatan reaksi korosi baja tulangan beton dapat diasumsikan sama dengan kecepatan difusi oksigen ke dalam beton.

Jika koefisien difusi oksigen adalah D_{O_2} dengan satuan mm^2/tahun , tebal selimut beton adalah c dengan satuan mm dan konsentrasi gas O_2 di permukaan beton adalah C_{O_2} dengan satuan mg/mm^3 , kecepatan reaksi korosi tulangan beton r dalam satuan $(\text{mg}/\text{mm}^2)/\text{tahun}$ dapat dituliskan seperti di bawah ini [5].

$$r = \frac{D_{\text{O}_2}}{c} C_{\text{O}_2} \quad (10)$$

T_{II} adalah waktu dibutuhkan senyawa hasil reaksi korosi tepat mengisi rongga-rongga antara permukaan baja tulangan dengan beton. Kondisi per-

mukaan baja tulangan dengan beton dapat diasumsikan seperti layaknya permukaan agregat di dalam beton. Akibat ‘efek dari dinding’ partikel-partikel semen tidak dapat menempel pada permukaan agregat sehingga terbentuk zona yang berongga atau berpori banyak yang biasa disebut *transition zone*. Volume pori-pori di zona tersebut adalah tergantung dari kualitas beton (W/C, pemakaian mineral tambahan seperti silicafume, fly ash, slag atau bahan yang lain).

Seperti telah dijelaskan di atas, karena hasil reaksi korosi 2,5 kali dari volume baja yang bereaksi maka kecepatan senyawa hasil reaksi korosi untuk mengisi pori-pori di *transition zone* sama dengan tambahan volume dari senyawa hasil reaksi korosi, yaitu 1,5 kecepatan reaksi korosi baja tulangan.

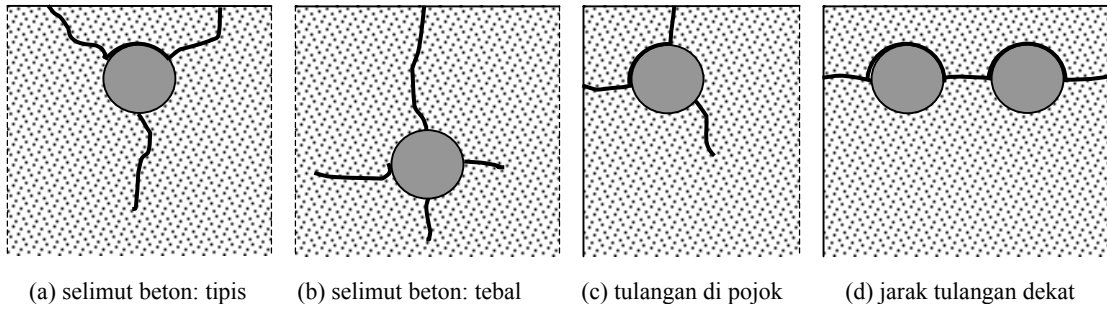
Gambar 4 menunjukkan pemodelan tebal kumulatif dari pori-pori di *transition zone*. T_{II} adalah tebal kumulatif pori-pori di *transition zone* dibagi dengan kecepatan senyawa hasil reaksi mengisi pori-pori tersebut, seperti yang dituliskan pada persamaan di bawah ini.

$$T_{II} = \frac{\rho t_{tz} v}{1,5r} \quad (11)$$

di mana, ρ adalah berat jenis senyawa hasil korosi (mg/mm^3), t_{tz} adalah tebal *transition zone* pada permukaan baja tulangan (mm), v adalah proporsi volume pori-pori di *transition zone* (tanpa satuan), r adalah kecepatan reaksi korosi ($\text{mg}/\text{mm}^2/\text{tahun}$).

Prediksi Waktu T_{III}

Setelah semua pori-pori di *transition zone* terisi oleh hasil reaksi korosi maka hasil reaksi korosi yang berikutnya mulai memberikan gaya tekan pada selimut beton. Jika tekanan dari senyawa hasil reaksi korosi lebih besar dari kekuatan selimut beton, keretakan akan terjadi. Keretakan di permukaan beton dapat terjadi dengan bertambahnya waktu. Pola keretakan tergantung dari tebal



Gambar 5. Pola keretakan akibat korosi pada tulangan beton

selimut beton dan letak baja tulangan. Gambar 5 menunjukkan beberapa pola keretakan yang mungkin terjadi akibat korosi pada baja tulangan beton. Jika selimut beton tipis maka selimut beton di atas baja tulangan yang mengalami korosi dapat terkelupas seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5(a). Jika selimut beton tebal maka selama beton mengalami keretakan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5(b). Jika letak tulangan di pojok dan selimut beton tipis maka selimut beton di sudut dapat terkelupas seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5(c). Dan jika jarak antar tulangan berdekatan dan selimut beton pun tipis maka selimut beton dapat terkelupas seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5(d).

T_{III} adalah waktu di mana bangunan beton sudah mengalami keretakan seperti yang diilustrasikan pada Gambar 5. Keretakan tersebut mengakibatkan kinerja bangunan beton mulai turun. Bangunan beton memerlukan perbaikan untuk meningkatkan kembali kinerjanya. Untuk menghitung T_{III} diasumsikan bahwa periode III adalah kelanjutan proses yang terjadi pada periode II maka periode III pun ditentukan oleh kecepatan reaksi korosi. Karena itu, berat senyawa hasil reaksi korosi (M) dapat diperkirakan dari perkalian antara fluks (J) dengan lamanya waktu reaksi korosi (t).

$$M = J \times t \tag{12}$$

Lebar baja tulangan yang berpengaruh terhadap reaksi korosi diasumsikan setengah permukaan tulangan yang dekat dengan permukaan difusi. Jika fluks dinyatakan per satuan panjang dan t adalah gabungan T_{II} dan T_{III} persamaan (12) dapat dituliskan seperti di bawah ini.

$$M = \frac{D_{O_2}}{c} C_{O_2} \times (T_{II} + T_{III}) \tag{13}$$

di mana, ρ adalah berat jenis senyawa hasil korosi (7.85 mg/mm^3), C_{O_2} adalah konsentrasi gas O_2 di permukaan beton (mg/mm^3), dan M adalah berat senyawa hasil korosi (mg/mm^2). Karena itu, waktu T_{III} dapat diturunkan dari persamaan (13) dengan

syarat berat senyawa hasil reaksi korosi M yang menjadi batas kerusakan maksimum diketahui. Bentuk persamaannya sebagai berikut:

$$T_{III} = \frac{Mc}{D_{O_2} \times C_{O_2}} - T_{II} \tag{14}$$

PENENTUAN NILAI PARAMETER UNTUK DESAIN

Parameter-parameter yang perlu ditentukan adalah koefisien difusi ion Cl^- terhadap W/C, koefisien difusi gas O_2 terhadap W/C, proporsi volume pori-pori di *transition zone* terhadap W/C dan berat senyawa hasil reaksi korosi. Pada makalah ini digunakan data eksperimen yang diperoleh dari studi literatur untuk menentukan parameter-parameter tersebut.

Koefisien difusi ion Cl^-

Gambar 6 menunjukkan hubungan antara koefisien difusi ion Cl^- D_{Cl} dengan W/C. Data yang dipakai pada Gambar 6 adalah hasil pengukuran dengan waktu difusi yang berbeda yaitu 2 tahun dan 3 tahun [1]. Persamaan regresi dari data hasil pengukuran tersebut sebagai berikut:

$$D_{Cl}(w_0) = D_{ch} \times \exp\left(-\frac{k}{w_0}\right) \tag{15}$$

di mana, w_0 adalah W/C campuran beton, $D_{Cl}(w_0)$ adalah koefisien difusi ion Cl^- dari beton dengan W/C= w_0 , D_{ch} adalah koefisien difusi ion Cl^- beton dengan W/C yang besar (tak terhingga), dan k adalah koefisien. Pendekatan yang dilakukan seperti yang ditunjukkan di Gambar 5 menghasilkan nilai $D_{ch} = 1.5768 \text{ mm}^2/\text{tahun}$ dan nilai $k = 1.6$.

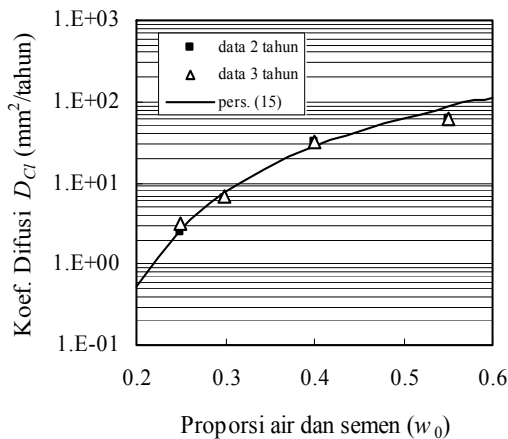
Konsentrasi ion Cl^- awal

Ion Cl^- dapat terkandung dalam uap air atau debu hasil penguapan air laut. Uap air atau debu

tersebut dapat diterbangkan oleh angin. Persamaan dari perubahan konsentrasi ion Cl^- terhadap jarak dari garis pantai dapat dimodelkan seperti di bawah ini [4].

$$C_0(X) = C_0 \times \exp \left[a \left(\frac{X}{X_0} \right)^b \right] \quad (16)$$

di mana, C_0 adalah konsentrasi ion klorida awal di laut (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).



Gambar 6. Hubungan D_{Cl} dengan W/C [1]

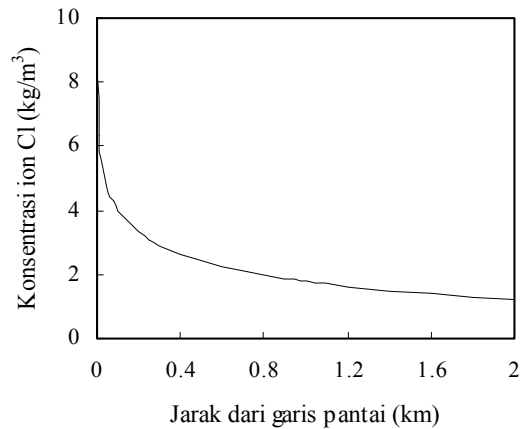
Jika diasumsikan nilai $C_0=9kg/m^3$, nilai parameter $a=-2,0$, nilai parameter $b=0,3$, dan perkiraan jarak terjauh dari jangkauan ion Cl^- adalah $X_0=2km$, maka perubahan konsentrasi ion Cl^- awal terhadap jarak dari garis pantai ditunjukkan pada Gambar 7. Pada gambar ini konsentrasi ion Cl^- awal sejauh 2km dari pantai diperkirakan $1,218kg/m^3$.

Koefisien difusi gas O_2

Nilai koefisien difusi gas selain tergantung pada kualitas beton juga tergantung pada kadar air yang terdapat di dalam pori-pori beton [8]. Gas tidak dapat menembus pori-pori yang tertutup oleh air. Karena itu, walaupun volume pori-pori beton besar tetapi jika semua pori-pori tertutup oleh air atau kadar airnya 100% maka nilai koefisien difusi gas menjadi sangat kecil.

Kadar air di dalam pori-pori beton tergantung dari kelembaban relatif lingkungan di mana bangunan beton itu berada. Semakin tinggi kelembaban relatifnya, semakin tinggi kadar air yang terdapat di dalam pori-pori beton. Jika benda uji beton dirawat dengan kelembaban relatif $RH=55\%$ maka koefisien difusi O_2 adalah sekitar $1-50 \times 10^{-8}m^2/s$ tergantung dari kualitas betonnya [9]. Untuk beton dengan $W/C=0,5$ dan $W/C=0,4$ dengan kelembaban relatif

$RH=55\%$, koefisien difusi oksigen D_{O_2} kedua beton tersebut dapat diperkirakan masing-masing sebesar $2 \times 10^{-8}m^2/s$ dan $1 \times 10^{-8}m^2/s$.



Gambar 7. Konsentrasi ion Cl^- dan jarak dari garis pantai

Kelembaban relatif bangunan beton di atas permukaan laut diperkirakan sekitar 50–70% [10]. Jika kelembaban relatif bangunan beton di atas permukaan laut diasumsikan 55%, perkiraan nilai koefisien difusi O_2 beton normal di atas dapat digunakan. Konsentrasi gas O_2 di permukaan beton diasumsikan $2 \times 10^{-5}mg/mm^3$.

Proporsi volume pori-pori di transition zone

Pori yang terdapat di transition zone ini pada umumnya adalah pori kapiler dengan ukuran 50nm–2µm. Volume pori-pori di transition zone tergantung pada W/C dan umur beton. Perbedaan antara volume pori-pori di transition zone dan di matriks mulai terlihat signifikan setelah umur 28 hari. Untuk beton normal dengan $W/C=0,5$ diperkirakan mempunyai volume pori-pori di transition zone sebesar 20–50% dari volume transition zone [3]. Karena itu, pada makalah ini nilai v diasumsikan 20%.

Jika diasumsikan tebal transition zone dari permukaan baja sama dengan tebal transition zone dari permukaan agregat, tebal transition zone dari permukaan baja diperkirakan sekitar 20–50µm [3]. Pada makalah ini, untuk beton normal dengan $W/C=0,5$ dan 0,4, tebal transition zone pada permukaan baja tulangan diasumsikan 35µm dan 20µm.

Berat senyawa hasil reaksi korosi

Hubungan berat senyawa hasil reaksi korosi per luas permukaan baja dengan lebar celah keretakan yang ditimbulkannya dapat dicari dengan program komputer berdasarkan metode elemen hingga (FEM). Persamaan regresi dari data hasil analisis FEM tersebut ditunjukkan seperti di bawah ini [11].

$$W_{corr} = \frac{\rho}{\pi(\varphi-1)} \frac{c+D_b}{3D_b+5c} (\alpha_0\beta_0\gamma_0 + \alpha\beta W_s) \quad (17)$$

di mana, W_{corr} adalah berat senyawa hasil korosi per satuan luas (mg/mm^2), ρ adalah berat jenis baja ($7,85 \text{ mg}/\text{mm}^3$), c adalah tebal selimut beton (mm), D_b adalah diameter baja tulangan (mm), W_s adalah lebar keretakan (mm), α adalah faktor akibat pengaruh tebal selimut beton dan diameter baja tulangan, β adalah faktor akibat pengaruh kualitas beton, α_0 adalah berat senyawa hasil korosi pada saat keretakan awal terjadi, β_0 adalah faktor reduksi diameter baja, γ_0 adalah faktor reduksi dari kualitas beton. Faktor-faktor tersebut masing-masing dihitung dengan persamaan empirik di bawah ini.

$$\alpha = (0,0007D_b - 0,04)c + (-0,066D_b + 5,92)$$

$$\beta = 0,0016f'_c + 1,0037$$

$$\alpha_0 = 0,0003c^{1,5558}$$

$$\beta_0 = 3,8865D_b^{-0,537}$$

$$\gamma_0 = 0,0049f'_c + 0,8539$$

Beton dengan W/C=0.4 dan 0,5 di mana kuat tekannya adalah $f'_c = 45 \text{ MPa}$ dan 35 MPa , tebal selimut beton $c = 50\text{mm}$ dan diameter baja tulangan $D_b = 19\text{mm}$ digunakan sebagai data untuk menghitung hubungan lebar keretakan dan berat senyawa hasil korosi. Hasil perhitungan dalam berat per panjang (mg/mm) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Pada lebar keretakan yang sama, semakin kecil proporsi air dan semen (W/C), dibutuhkan berat senyawa hasil korosi yang semakin besar. Bangunan beton disarankan dilakukan perbaikan jika lebar keretakan yang terjadi pada beton sekitar 0,3–0,6mm [12]. Berdasarkan hasil penelitian tersebut, jika batas maksimum lebar keretakan diasumsikan 0,5mm maka berat senyawa hasil korosi M adalah $0,701 \text{ mg}/\text{mm}^2$ untuk W/C=0,5 dan $0,713 \text{ mg}/\text{mm}^2$ untuk W/C=0,4.

Tabel 1. Hubungan lebar keretakan dan berat senyawa hasil korosi ($D_b=19\text{mm}$)

Lebar keretakan (mm)	Berat senyawa hasil korosi (mg/mm^2)	
	W/C = 0,5	W/C = 0,4
0,1	0,173	0,177
0,2	0,305	0,311
0,3	0,437	0,445
0,4	0,569	0,579
0,5	0,701	0,713
0,6	0,833	0,847
0,7	0,966	0,982
0,8	1,098	1,116
0,9	1,230	1,250
1,0	1,362	1,384

HASIL SIMULASI DAN DISKUSI

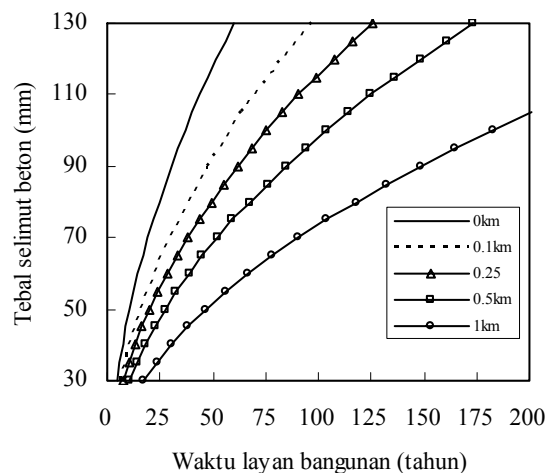
Waktu Layan Bangunan

Waktu layan bangunan beton dengan jarak dari garis pantai yang berbeda dapat dihitung dengan persamaan-persamaan yang diusulkan di atas. Hasil perhitungan waktu layan bangunan beton yang dibuat dengan W/C=0,4 dan 0,5 ditunjukkan pada Tabel 2. Tebal selimut beton yang dipakai dalam perhitungan ini adalah 50mm.

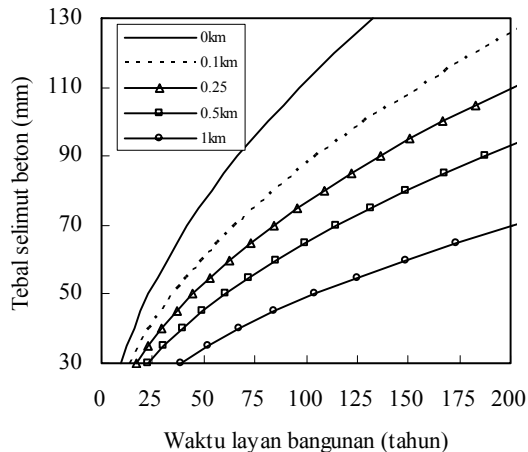
Pada makalah ini membagi waktu layan bangunan dalam tiga periode. Dari ketiga periode tersebut, periode I memberikan kontribusi yang paling besar pada waktu layan bangunan beton. Hal ini disebabkan oleh proses infiltrasi ion Cl^- berlangsung secara difusi pada pori kapiler beton yang berdiameter kecil. Selain itu, reaksi korosi akan berlangsung dengan cepat jika lapisan pasif baja tulangan telah hilang. Setelah lapisan pasif baja tulangan hilang, lamanya periode II hanya berlangsung dalam beberapa bulan, sedangkan periode III untuk W/C=0,5 adalah sekitar 2,6 tahun dan untuk W/C=0,4 adalah sekitar 5,4 tahun.

Tabel 2. Waktu layan bangunan beton dengan tebal selimut 50mm

Jarak dari garis pantai (km)	Waktu layan (tahun)							
	W/C=0,5				W/C=0,4			
	T_I	T_{II}	T_{III}	T_{Layan}	T_I	T_{II}	T_{III}	T_{Layan}
0,00	7,2	0,1	2,6	9,9	19,2	0,2	5,4	24,8
0,10	13,2	0,1	2,6	15,9	29,5	0,2	5,4	35,1
0,25	17,5	0,1	2,6	20,2	38,9	0,2	5,4	44,5
0,50	24,6	0,1	2,6	27,3	54,7	0,2	5,4	60,4
1,00	44,4	0,1	2,6	47,1	98,8	0,2	5,4	104,5
2,00	176,1	0,1	2,6	178,8	391,9	0,2	5,4	397,5



Gambar 8. Hubungan antara waktu layan bangunan dengan tebal selimut beton (W/C=0,5)



Gambar 9. Hubungan antara waktu layan bangunan dengan tebal selimut beton ($W/C=0,4$)

Gambar 8 menunjukkan bahwa jika bangunan beton yang dibuat dengan $W/C=0,5$ dan tebal selimut beton 50mm maka bangunan itu harus dibangun pada jarak lebih dari 1 km dari garis pantai agar mempunyai waktu layan 50 tahun tanpa dilakukan pemeliharaan secara khusus. Sedangkan untuk jarak kurang dari 1 km dari garis pantai, bangunan beton harus dibangun dengan W/C yang lebih kecil dari 0,5 atau tebal selimut beton yang lebih tebal dari 50mm agar bangunan beton itu mempunyai waktu layan 50 tahun.

Gambar 9 menunjukkan bahwa jika bangunan beton dengan $W/C=0,4$ dan tebal selimut beton 50mm jika dibangun di garis pantai, bangunan itu akan mempunyai waktu layan sekitar 24,8 tahun. Hasil prediksi ini hampir sama dengan kenyataan di lapangan [4]. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa metode prediksi waktu layan bangunan beton yang diusulkan di atas cukup akurat.

Hubungan Waktu Layan dengan Tebal Selimut Beton dan Kualitas Beton

Untuk membantu perencanaan waktu layan bangunan beton diperlukan grafik dari hubungan antara variasi tebal selimut beton, W/C dan jarak bangunan dari pantai dengan waktu layan bangunan. Gambar 8 dan 9 menunjukkan hubungan antara waktu layan bangunan dengan tebal selimut beton. Gambar 8 untuk bangunan beton yang dibangun dengan $W/C=0,5$, sedangkan Gambar 9 untuk bangunan beton yang dibangun dengan $W/C=0,4$. Untuk $W/C=0,5$, penambahan tebal selimut beton pada bangunan beton yang dibangun di dekat garis pantai (kurang dari 1 km) hanya memberikan tambahan waktu layan bangunan yang kecil. Penambahan tebal selimut beton memberikan pertambahan waktu layan yang signifikan jika bangunan beton itu dibangun dengan jarak 1 km lebih dari garis pantai.

Jika Gambar 8 dan 9 dibandingkan, dapat diketahui bahwa peningkatan kualitas beton (misalnya dengan memperkecil W/C) memberikan pertambahan waktu layan bangunan yang signifikan. Untuk bangunan beton di garis pantai, waktu layan bangunan 50 tahun dapat dicapai tanpa perawatan secara khusus jika bangunan beton itu dibangun dengan $W/C=0,4$ dan tebal selimut beton 70mm.

Dari kecenderungan hasil prediksi di atas dapat diartikan bahwa peningkatan kualitas beton mengakibatkan biaya pada waktu pembangunan (*construction cost*) menjadi besar tetapi memperkecil biaya perawatan bangunan beton (*maintenance cost*) selama waktu layannya. Karena itu, kajian biaya suatu bangunan beton selama waktu layannya (*life cycle cost*) perlu dipertimbangkan untuk mendapatkan perencanaan bangunan beton yang optimal.

Pemodelan prediksi waktu layan ini dapat dikembangkan untuk memperkirakan periode pengecekan dan perawatan bangunan beton yang optimum terhadap kerusakan akibat korosi baja tulangan. Keakuratan prediksi ini masih perlu didukung dengan data-data kerusakan bangunan beton akibat korosi baja tulangan di negara kita.

KESIMPULAN

Berdasarkan simulasi perhitungan waktu layan bangunan beton terhadap kerusakan akibat korosi baja tulangan, dapat disampaikan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Waktu yang dibutuhkan ion Cl^- untuk berinfiltrasi dari permukaan beton sampai permukaan baja tulangan adalah komponen yang menentukan waktu layan bangunan beton yang dihitung berdasarkan kerusakan akibat korosi baja tulangan.
- 2) Kecepatan reaksi korosi baja tulangan sangat ditentukan oleh difusi gas O_2 dari permukaan beton sampai ke lokasi sekitar permukaan baja tulangan.

Peningkatan kualitas beton adalah metode yang optimal untuk memperpanjang waktu layan bangunan beton dan memperkecil biaya perawatan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Public Works Research Institute (PWRI), *Current Issues and New Technology on Salt Attack in Concrete Bridge*, Un published report, Tokyo, 2003. (in Japanese).
2. Saitoh, S., *Databook for Concrete Material*, Maruzen Publishing Co., Tokyo, 2000. (in Japanese).

3. Hanehara, S., *Structure of Concrete and Its Properties*, Japan Cement Association on Very Simple about Cement Science, Tokyo, 1993, pp. 78-104. (in Japanese)
4. Sudjono, A.S. Simulasi Perhitungan Tebal Selimut Beton Minimum terhadap Perubahan Jarak Bangunan dari Garis Pantai, *Jurnal Teknil Sipil Institut Teknologi Bandung*, Volume 11, No. 1, 2004, pp. 9-17.
5. Japan Concrete Institute (JCI), *Report on Rehabilitation of Concrete Structures*, Report, Japan Concrete Institute (JCI), Tokyo, 1994. (in Japanese)
6. Kajima Technical Research Institute (KATRI), *Estimation System of the Transfer of Ions and Substances Based on Diffusion and Advection*, Pamflet, Tokyo, 2002. (in Japanese).
7. Crank, J., *The Mathematics of Diffusion*, second edition, Oxford University Press, London, 1975.
8. Sudjono, A.S., and Seki, H., Experiment and Analytical Studies on Oxygen Transport in Various Cementitious Materials, *Proc. of 5th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete*, Spain, 2000, pp. 721-738.
9. Neville, A.M., *Properties of Concrete*, Longman, London, 1999.
10. Fushoku-boshoku kyokai, *Introduction of Environmental Materials*, Maruzen Publishing Co, Tokyo, 1993. (in Japanese).
11. Iba, S., *Study on Life Cycle Cost of Concrete Structure*, Master Thesis, Waseda University, Tokyo, 2000. (in Japanese).
12. Sakai, C., Shiroy, N., Yasuda, N., and Matsushima, M., Quantity Assessment on Factors of Salt Damage, *Journal of JSCE*, No.544, V-32, 1998, pp. 33-41. (in Japanese).