

STUDY OF CHLOR ION DIFFUSION FROM SEAWATER INTO CONCRETE

TINJAUAN DIFUSI ION KLOOR DARI AIR LAUT PADA BETON

Henry Hartono¹⁾, Bambang Suhendro²⁾, Henricus Priyo Sulisty³⁾, Rochmadi⁴⁾, dan Agus Hartoko⁵⁾

¹⁾Mahasiswa S3 Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta, e-mail : hartono_henry@yahoo.com

^{2),3)}Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

⁴⁾Dosen Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

⁵⁾Dosen Program Manajemen Sumber Daya Perairan, Jurusan Perikanan, Fakultas Perikanan dan Kelautan, Universitas Diponegoro

ABSTRACT

Reinforced concrete as the foundation of harbor and bridge is often damaged by the carbonation and corrosion. The presence of Cl^- in seawater may diffuse into the reinforced concrete and can cause corrosion in concrete. This research investigated Cl^- diffusion in concrete by analyzing Cl^- concentration in concrete as function of depth and soaking time in seawater. The Cl^- diffusion in concrete was based on Fick's Law. The results showed that Cl^- concentration in concrete decreased with the increase depth. Moreover, Cl^- concentration in concrete increased with the increase of soaking time in seawater. The simulation results using mathematical model showed that the value of Cl^- diffusivity in concrete (D_{AB}) decreased when soaking time rised. The range value of D_{AB} is between 9.996×10^{-7} - 2.225×10^{-7} cm^2/s . The equilibrium constant of Cl^- concentration in seawater with Cl^- concentration in concrete tended to increase with the increase of soaking time, in the range of values from 0.0651 - 0.5002.

Key words: diffusivity, concrete, Cl^- , equilibrium constant, Fick's Law

ABSTRAK

Beton bertulang sebagai pondasi pada dermaga pelabuhan dan jembatan sering kali mengalami kerusakan akibat dari proses *carbonation* dan korosi. Keberadaan ion Cl^- di dalam air laut dapat mendifusi ke dalam beton bertulang dan menyebabkan korosi pada beton. Penelitian ini mempelajari proses difusi ion Cl^- di dalam beton dengan mempelajari kadar ion Cl^- di dalam beton sebagai fungsi kedalaman dan waktu perendaman. Difusivitas ion Cl^- di dalam beton didekati dengan menggunakan model matematis berdasarkan Hukum Fick. Hasil percobaan menunjukkan bahwa kadar ion Cl^- di dalam beton semakin turun dengan bertambahnya kedalaman. Selain itu kadar ion Cl^- di dalam beton semakin meningkat dengan bertambahnya waktu perendaman di dalam air laut. Hasil evaluasi data pengamatan menunjukkan nilai difusivitas ion Cl^- di dalam beton (D_{AB}) menurun dengan bertambahnya waktu perendaman. Hasil evaluasi data pengamatan menunjukkan kisaran nilai D_{AB} antara $9,996 \times 10^{-7}$ hingga $2,225 \times 10^{-7}$ cm^2/s . Nilai konstanta kesetimbangan kadar Cl^- di dalam air laut dengan kadar Cl^- di dalam beton menunjukkan kecenderungan semakin meningkat dengan bertambahnya waktu dengan kisaran nilai dari 0,0651 hingga 0,5002.

Kata-kata kunci : Difusivitas, beton, Cl^- , konstanta kesetimbangan, Hukum Fick

PENDAHULUAN

Negara Indonesia merupakan negara kepulauan dengan lebih dari 17000 pulau yang tersebar di seluruh wilayah Negara Indonesia. Untuk memperlancar kegiatan perekonomian antar pulau maka diperlukan sarana infrastruktur yang mendukung seperti jembatan antar pulau serta dermaga pelabuhan untuk melayani kegiatan para nelayan dan kegiatan kelautan lainnya.

Jembatan dan dermaga pelabuhan yang ada tersebut dibangun dengan pondasi beton bertulang yang dapat rusak akibat dari adanya proses *carbonation* dan proses-proses lainnya seperti korosi. Selain itu sebagian besar umur sarana tersebut sangat tua karena dibangun pada jaman Belanda sehingga sangat rentan terhadap kerusakan. Proses kerusakan sarana ini semakin dipercepat dengan kurangnya perawatan terhadap sarana tersebut.

Secara khusus penelitian ini ingin meninjau proses difusi ion Cl^- dari air laut di dalam beton. Difusi ion Cl^- di dalam beton dapat menyebabkan terjadinya korosi pada beton bertulang sesuai dengan reaksi pada persamaan $\text{Fe} + 2 \text{Cl}^- \rightarrow \text{FeCl}_2 \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2 \text{Cl}^- + 2 \text{e}^-$ (Parrott, 1994). Korosi akibat dari difusi ion Cl^- di dalam beton dapat menyebabkan beton berpori dan menjadi kerosop sehingga dipandang perlu adanya penelitian tentang proses difusi ion Cl^- ke dalam beton dari air laut.



Gambar 1. Kerusakan yang terjadi pada permukaan beton.

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari proses difusi ion Cl^- ke dalam beton serta untuk mengetahui sejauh mana kedalaman mendifusinya ion Cl^- dalam beton dan bagaimana pengaruh dari waktu terhadap kadar ion Cl^- di dalam beton. Selain itu dalam penelitian ini juga ditentukan nilai difusivitas dari ion Cl^- di dalam beton.

Harapannya dengan penelitian ini dapat memberikan suatu masukan pada pihak yang berwenang dan terkait tentang pelaksanaan perawatan bangunan teknik sipil yang berada di wilayah laut dan menambah wawasan para akademisi tentang

terjadinya proses difusi air laut ke dalam beton yang merupakan bahan utama dari bangunan teknik sipil di wilayah laut.

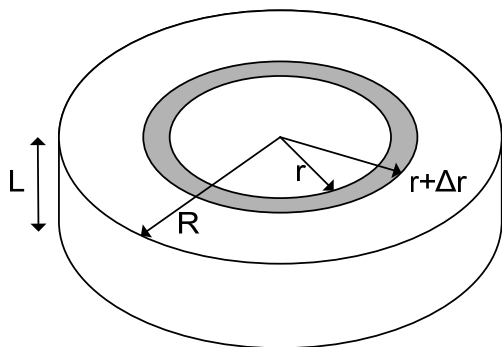
Difusivitas Ion

Difusivitas ion Cl⁻ dalam beton telah dipelajari oleh Chatterji (1995). Data yang digunakan berasal dari berbagai data penelitian yang menggunakan konsentrasi Cl⁻ terkontrol dan bukan menggunakan air laut. Zhang dan Gjrv (1996) telah mempelajari tentang migrasi ionik dari ion Cl⁻ di dalam beton dengan menggunakan pendekatan migrasi muatan ion. Pengaruh dari lingkungan (suhu, kelembaban relatif, *chloride binding*, dan umur beton) dan material beton terhadap kemampuan ion Cl⁻ masuk ke dalam struktur beton telah dipelajari oleh Oh dan Jang (2007) dengan menggunakan konsentrasi Cl⁻ yang terkontrol. Analisis secara multiskala terhadap difusi ion Cl⁻ di dalam beton juga telah dilakukan oleh Sun dkk (2011) akan tetapi dengan konsentrasi ion Cl⁻ yang dikontrol sehingga proses difusi ion Cl⁻ di dalam beton pada kondisi kenyataannya yaitu di air laut masih terbuka untuk diteliti.

Difusi molekular suatu ion A melalui suatu bahan B dapat didekati dengan Hukum Fick yang secara matematis dapat dinyatakan sebagai berikut (Treybal, 1981) :

$$J_A = -D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial z} = -D_{AB} C \frac{\partial x_A}{\partial z} \tag{1}$$

Nilai D_{AB} dipengaruhi oleh suhu dan tekanan (khusus untuk gas). Pada beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai difusivitas molekuler dipengaruhi oleh konsentrasi dan posisi/ke-dalaman (Chatterji, 1995; Ruiz-Lopez dan Garcia-Alvarado, 2007). Dalam penelitian ini nilai D_{AB} diasumsikan konstan sehingga Hukum Fick pada persamaan (1) dapat secara langsung digunakan.



Gambar 2. Elemen volum pada benda uji beton.

Apabila benda uji beton dibagi dalam elemen volume seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 dan dengan mengambil asumsi bahwa 226sotherm konsentrasi arah aksial diabaikan, kondisi 226sothermal, maka dengan menerapkan Hukum Fick pada neraca massa di elemen volum silinder dan kondisi *unsteady* akan diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_e \frac{\partial x_A}{\partial r} \right) = \frac{\partial x_A}{\partial t} \tag{2}$$

Kondisi awal dan kondisi batas untuk persamaan (2) adalah sebagai berikut:

Kondisi awal (*initial condition*)

$$x_A(t=0, 0 \leq r \leq R) = x_{A,0} \tag{3}$$

Kondisi batas (*boundary condition*)

$$x_A(t, r=0) = \text{finite (tertentu)} \text{ atau } \frac{\partial x_A}{\partial r}(t, 0) = 0 \tag{4}$$

$$x_A(t, r=R) = H_{x_{A,S}} \tag{5}$$

Apabila nilai D_{AB} dan H diketahui maka persamaan (2) dapat diselesaikan secara numeris dengan metode garis menggunakan pemrograman Matlab® (Constantinide dan Mostoufi, 1999). Nilai D_{AB} dan H dapat ditentukan dengan melakukan minimasi terhadap jumlah kuadrat dari beda antara data kadar Cl⁻ dengan kadar Cl⁻ dari hitungan model pada persamaan (3). Proses ini dikenal dengan prosedur minimasi *sum of square of errors* (SSE) yang didefinisikan sebagai berikut (Montgomery, 2009):

$$SSE = \sum \left(x_{Cl^- \text{ data}} - x_{Cl^- \text{ model}} \right)^2 \tag{6}$$

METODE PENELITIAN

Bahan dan Alat Penelitian

Benda uji beton berbentuk silinder diameter 15 cm, h = 30 cm, diiris-iris menjadi 12 lempeng dengan ukuran diameter 15 cm, tebal 1 cm. Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah ember karet, saringan pasir, cetok, cangkul, beton molen, gergaji beton, bor beton, benang/ tali plastik, penggaris, gelas ukur, tabung reaksi, Erlenmeyer dan oven.



Gambar 3. Benda uji irisan lempeng beton



Gambar 4. Benda uji lempeng beton



Gambar 5. Molen/Mixer beton

Cara Penelitian

Benda uji lempeng beton diameter 15 cm, tebal 1 cm sejumlah 12 lempeng direndam pada daerah *splash zone* di laut wilayah laboratorium Kelautan Universitas Diponegoro Semarang di Jepa-ra. Masing-masing lempeng yang telah direndam air laut kemudian diambil pada waktu tertentu dari 3 bulan hingga 12 bulan. Tiap lempeng kemudian diiris-iris menjadi 6 bagian dengan lebar masing-masing 1,25 cm, tebal 1 cm, panjang 3 – 15 cm dan dilakukan uji kandungan Cl^- di Laboratorium Penelitian dan Pengujian Ter-padu Universitas Gadjah Mada (LPPT UGM) Yogyakarta.

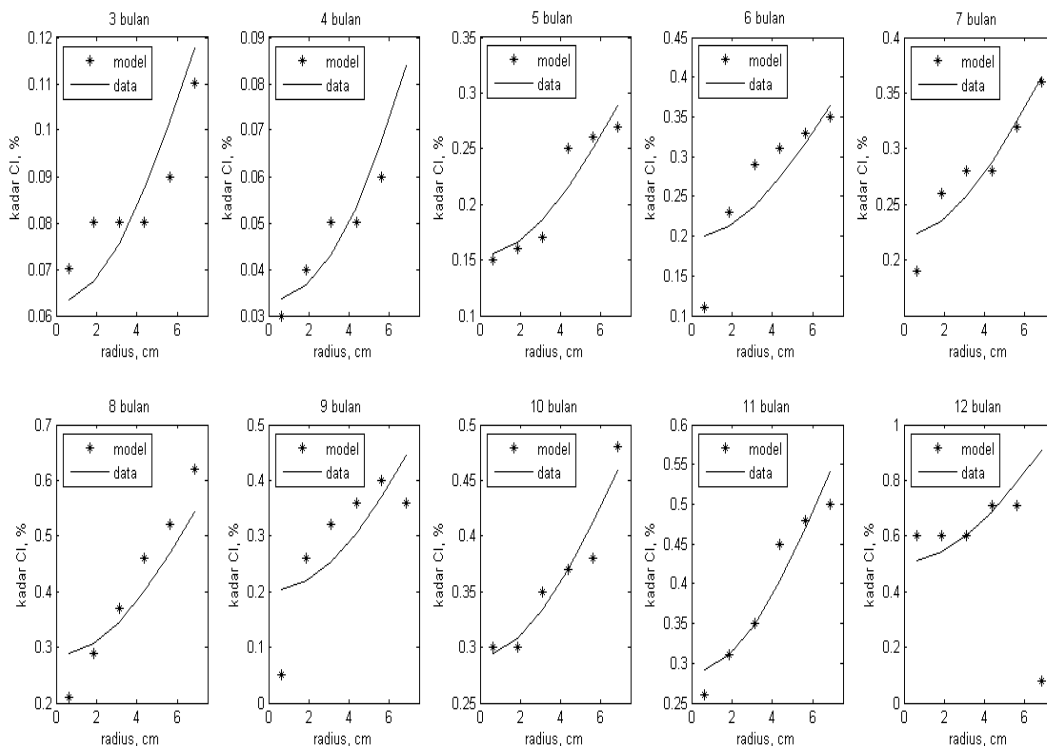


Gambar 6. Penempatan benda uji di daerah *splash zone* laut, wilayah laboratorium kelautan Undip di Jepara

Hasil dan Pembahasan

Profil kadar Cl^- di dalam beton pada berbagai posisi radius ditampilkan pada Gambar 2. Gambar 2 menunjukkan, meskipun hasil analisis kadar Cl^- terlihat kurang teliti, tetapi kecenderungan profil kadar Cl^- sebagai fungsi radius sesuai dengan teori. Dapat dilihat bahwa kadar ion Cl^- di dalam beton semakin menurun dengan semakin jauh dari permukaan, atau semakin rendahnya radius ($r=0$ adalah pusat silinder). Kondisi ini menunjukkan adanya pro-ses difusi ion Cl^- dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah. Proses difusi terjadi karena pada permukaan luar ($r=R$), beton se-cara langsung kontak dengan air laut yang mengandung ion Cl^- dengan konsentrasi tinggi sedangkan bagian dalam dari beton mula-mula tidak mengandung ion Cl^- sehingga menyebabkan terjadinya gradien konsentrasi antara permukaan dan bagian dalam beton. Gradien konsentrasi ini akan menjadi *driving force* yang menyebabkan terjadinya migrasi atau difusi ion Cl^- dari permukaan ke dalam beton. Kecenderungan profil konsentrasi ion Cl^- terhadap kedalaman yang sama diperoleh oleh Zhang dan Gjörv (1994); Oh dan Jang (2007); Li dkk (2012).

Selain itu, dari Gambar 2 dapat dilihat bahwa ion Cl^- dapat mencapai pusat sampel yang memiliki radius sebesar 7,5 cm. Kondisi ini menunjukkan bahwa kemampuan difusi ion Cl^- cukup cepat di dalam beton. Hal ini ditunjukkan dalam waktu 3 bulan kadar ion Cl^- di pusat sampel beton mencapai 0,07% sehingga apabila di-lihat dari persamaan reaksi (2) maka bagian dalam beton dapat mengalami korosi. Kondisi ini dapat dihindari dengan menambah tebal dari beton atau menambahkan senyawa ataupun komponen yang dapat memperlambat difusi ion Cl^- di dalam beton.



Gambar 7. Profil kadar Cl^- di dalam beton pada berbagai posisi radius tiap waktu

Pada waktu 12 bulan, profil kadar ion Cl^- menunjukkan kecenderungan yang hampir mendatar. Kondisi ini menunjukkan bahwa beton sudah mulai jenuh dengan ion Cl^- . Hasil penelitian dari Tumidajski dan Chan (1996) tentang pengaruh ion sulfat

dan karbon dioksida terhadap difusivitas ion Cl^- di dalam dua jenis beton yang berbeda menunjukkan profil konsentrasi ion Cl^- yang sama dengan hasil penelitian ini. Selain itu hasil penelitian Tumidajski dan Chan menunjukkan salah satu jenis beton jenuh

terhadap ion Cl^- dengan bertambahnya waktu sama halnya dengan kecenderungan data pada penelitian ini. Kecenderungan profil konsentrasi ion Cl^- terhadap waktu yang serupa juga diamati oleh Hossain dan Lachemi (2004); dan Kayali dan Zhu (2005).

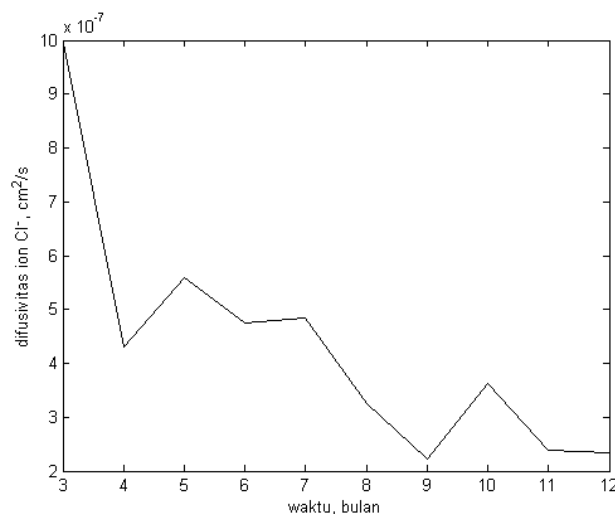
Parameter model hasil *fitting* data berupa nilai difusivitas ion Cl^- di dalam beton (D_{AB}) dan konstanta kesetimbangan (H) dapat dilihat pada Tabel 1 dengan ralat relatif rerata antara data kadar Cl^- dengan kadar Cl^- hasil hitungan berkisar antara 3,71% sampai 178,99%.

Nilai difusivitas ion Cl^- di dalam beton (D_{AB}) yang ditampilkan pada Tabel 1 berada pada kisaran order $10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$. Nilai ini telah sesuai dengan order dari difusivitas senyawa di dalam padatan yang berkisar antara 10^{-6} hingga $10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$ (Tosun, 2007). Hasil penelitian Tumidajski dan Chan (1996) menunjukkan bahwa difusivitas ion Cl^- di dalam beton dengan

menggunakan larutan NaCl murni (tanpa kehadiran senyawa lain) sekitar $5,00 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ sedangkan adanya ion lain seperti sulfat (SO_4^{2-}) dan karbon dioksida (CO_2) akan memperlambat difusi ion Cl^- menjadi sekitar $2,85 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$. Nilai difusivitas yang dihasilkan Tumidajski dan Chan berada pada kisaran order yang sama dengan hasil penelitian ini sehingga kemungkinan adanya pengaruh dari ion lain di air laut yang mempengaruhi proses difusi ion Cl^- di dalam beton perlu diteliti lebih lanjut. Untuk bahan beton dan metode penelitian yang berbeda maka nilai difusivitas ion Cl^- yang dihasilkan bisa mencapai kisaran order 10^{-8} hingga $10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ (Zhang dan Gjörv, 1994; Lu, 1997; Chatterji, 1999; Tong dan Gjörv, 2001; Oh dan Jang, 2007; Guimarães dkk, 2011).

Tabel 1. Parameter model hasil *fitting* data

Waktu, bulan	D_{AB} , cm^2/s	H	Ralat relatif rerata, %
3	$9,996 \times 10^{-7}$	0,0651	10,04
4	$4,312 \times 10^{-7}$	0,0479	10,09
5	$5,585 \times 10^{-7}$	0,1599	6,98
6	$4,745 \times 10^{-7}$	0,2007	21,18
7	$4,847 \times 10^{-7}$	0,1997	6,92
8	$3,259 \times 10^{-7}$	0,3009	14,14
9	$2,225 \times 10^{-7}$	0,2501	64,72
10	$3,622 \times 10^{-7}$	0,2497	3,71
11	$2,386 \times 10^{-7}$	0,2998	5,64
12	$2,345 \times 10^{-7}$	0,5002	178,99



Gambar 8. Difusivitas ion Cl^- sebagai fungsi waktu perendaman

Nilai D_{AB} yang ditampilkan pada Tabel 1 dan Gambar 8 memiliki kecenderungan yang semakin menurun dengan bertambahnya waktu perendaman di dalam air laut. Pada 3 bulan pertama ion Cl^- mendifusi di dalam beton dengan cepat kemudian melambat dengan bertambahnya waktu. Kondisi ini menunjukkan bahwa ion Cl^- semakin sulit mendifusi di dalam beton akibat dari semakin jenuhnya beton dengan ion Cl^- ataupun kemungkinan adanya ion-ion atau senyawa lain di dalam air laut yang akan memperlambat difusi ion Cl^- seperti sulfat ataupun karbon dioksida (Tumidajski dan Chan, 1996). Selain itu melambatnya kemampuan difusi ion Cl^- di dalam beton dapat juga terjadi akibat dari pengaruh struktur di dalam beton. Kecenderungan nilai difu-

sivitas yang menurun terhadap waktu perendaman juga diperoleh oleh Hossain dan Lachemi (2004) yang memanfaatkan abu vulkanik dengan konsentrasi yang divariasikan sebagai bahan pencampur beton. Hal ini menunjukkan bahwa nilai difusivitas ion Cl^- di dalam beton sangat dipengaruhi oleh material yang menyusun beton itu sendiri sehingga untuk mencegah proses korosi akibat dari difusi ion Cl^- maka dapat diteliti komposisi bahan yang dapat mengurangi kemampuan ion Cl^- mendifusi ke dalam beton.

Nilai tetapan kesetimbangan antara kadar ion Cl^- dalam air laut dengan kadar ion Cl^- di permukaan beton (H) pada Tabel 1 memiliki kecenderungan untuk semakin meningkat dengan bertambahnya waktu perendaman. Semakin tinggi nilai H menun-

jujukan bahwa kadar ion Cl^- di permukaan semakin tinggi. Naiknya nilai H ini diduga disebabkan oleh naiknya kadar Cl^- di dalam beton, dimana semakin lama perendaman, kadar Cl^- di dalam beton semakin tinggi.

KESIMPULAN

Difusi ion Cl^- di dalam beton (D_{AB}) pada penelitian ini dapat didekati cukup baik dengan model Hukum Fick. Model matematis yang diajukan pada penelitian ini dapat dengan baik mendekati data percobaan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai D_{AB} semakin menurun dengan bertambahnya waktu perendaman beton. Nilai D_{AB} berkisar antara $9,996 \times 10^{-7}$ hingga $2,225 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ sedangkan nilai tetapan kesetimbangan antara kadar Cl^- di dalam air laut dengan kadar Cl^- di dalam beton pada penelitian ini memiliki kisaran nilai dari 0,0651 hingga 0,5002.

SARAN

Penelitian lebih lanjut perlu dilakukan untuk mengkaji pengaruh dari berbagai komposisi bahan pembuatan beton terhadap difusi ion Cl^- . Selain itu perlu juga dikaji migrasi ataupun proses difusi ion Cl^- dengan menggunakan pendekatan model migrasi elektron.

Daftar Simbol

J_A	=	fluks molar, $(\text{kg}/\text{m}^3)/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$
z	=	arah perpindahan massa senyawa A
C_A	=	konsentrasi Cl^- di dalam silinder beton, kg/m^3
C	=	konsentrasi total, kg/m^3
D_{AB}	=	difusivitas A (semua senyawa ion Cl^-) dalam B (beton), cm^2/s
H	=	konstanta kesetimbangan Cl^- di fase air – fase beton, kg air laut/ kg beton
L	=	panjang silinder beton, cm
r	=	arah radius/jari-jari, cm
R	=	jari-jari silinder beton, cm
t	=	waktu, bulan
x_A	=	kadar Cl^- di dalam silinder beton, kg $\text{Cl}^-/100$ kg beton
$x_{A,0}$	=	kadar Cl^- di dalam silinder beton mula-mula ($t=0$), kg $\text{Cl}^-/100$ kg beton
$x_{A,S}$	=	kadar Cl^- di dalam air laut, $1,9$ kg $\text{Cl}^-/100$ kg air laut

DAFTAR PUSTAKA

Chatterji, S. (1995). "On the Applicability of Fick's Second Law to Chloride Ion Migration through Portland Cement Concrete." *Cement and Concrete Research*, 25(2): 299-303.

Chatterji, S. (1999). "Evidence of variable diffusivity of ions in saturated cementitious materials." *Cement and Concrete Research*, 29: 595-598.

Constantinide, A. dan N. Mostoufi. (1999). *Numerical Methods for Chemical Engineers with MATLAB Applications*, Prentice-Hall Inc., New Jersey.

Guimarães, A. T. C., M. A. Climent, G. d. Vera, F. J. Vicente, F. T. Rodrigues dan C. Andrade (2011). "Determination of chloride diffusivity through partially saturated Portland cement concrete by a simplified procedure." *Construction and Building Materials*, 25: 785–790.

Hossain, K. M. A. dan M. Lachemi (2004). "Corrosion resistance and chloride diffusivity of volcanic ash blended cement mortar." *Cement and Concrete Research*, 34: 695–702.

Kayali, O. dan B. Zhu (2005). "Corrosion performance of medium-strength and silica fume high-strength reinforced concrete in a chloride solution." *Cement and Concrete Composites*, 27: 117-124.

Li, L. Y., J. Xia dan S. S. Lin (2012). "A multi-phase model for predicting the effective diffusion coefficient of chlorides in concrete." *Construction and Building Materials*, 26: 295–301.

Lu, X. (1997). *Application of the Nernst-Einstein Equation to Concrete*, *Cement and Concrete Research*, 27(2): 293-302.

Montgomery, D. C., 2009, *Experimental Design*, 7th, John Wiley & Sons, New York.

Oh, B. H. dan S. Y. Jang (2007). "Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures." *Cement and Concrete Research*, 37: 47-53.

Parrott, P. J. (1994). *Design for Avoiding Damage Due to Carbonation-Induced Corrosion*, Special Publication, 145.

Ruiz-Lopez, I. I. dan M. A. Garcia-Alvarado (2007). "Analytical solution for food-drying kinetics considering shrinkage and variable diffusivity." *Journal of Food Engineering*, 79: 208–216.

Sun, G., Y. Zhang, W. Sun, Z. Liu dan C. Wang (2011). "Multi-scale prediction of the effective chloride diffusion coefficient of concrete." *Construction and Building Materials*, 25: 3820-3831.

Tong, L. dan O. E. Gjörv (2001). "Chloride diffusivity based on migration testing." *Cement and Concrete Research* 31: 973–982.

Tosun, I. (2007). *Modeling in Transport Phenomena : A Conceptual Approach*, 2nd, Elsevier Science & Technology Books.

Treybal, R. E. (1981). *Mass Transfer Operation*, 3rd, McGraw-Hill, Inc., Tokyo.

Tumidajski, P. J. dan G. W. Chan (1996). "Effect of Sulfate and Carbon Dioxide on Chloride Diffusivity." *Cement and Concrete Research*, 26(4): 551-556.

Zhang, T. dan O. E. Gjörv (1994). "An Electrochemical Method for Accelerated Testing of Chloride Diffusivity in Concrete." *Cement and Concrete Research*, 24(8): 1534-1548.

Zhang, T. dan O. E. Gjörv (1996). "Diffusion Behavior of Chloride Ions in Concrete." *Cement and Concrete Research*, 26(6): 907-917.