



Jurnal Review Pendidikan dan Pengajaran
<http://journal.universitaspahlawan.ac.id/index.php/jrpp>
 Volume 8 Nomor 1, 2025
 P-2655-710X e-ISSN 2655-6022

Submitted : 02/01/2025
 Reviewed : 02/01/2025
 Accepted : 01/01/2025
 Published : 08/01/2025

Frianggi S D Mansari¹
Anita Kurniati A A
Lamdu²
Wenceslaus R
Fernandez³

ANALISIS DIFUSI KLORIDA PADA BETON AGREGAT DAUR ULANG PADA KONDISI PERENDAMAN KLORIDA DENGAN SIKLUS WET & DRY

Abastrak

Penggunaan serta pemanfaatan agregat daur ulang pada campuran beton dapat menjadi salah satu solusi untuk penerapan strategi pembangunan konstruksi berkelanjutan. Perbedaan kualitas, sifat fisik dan sifat kimia pada agregat daur ulang dibandingkan agregat normal akan berpengaruh pada kualitas beton yang dihasilkan, sehingga harus dilakukan penelitian lebih lanjut terhadap karakteristik agregat daur ulang khususnya terkait dengan ketahanan (durabilitas) terhadap ion klorida. Masuknya ion klorida ke dalam pori beton akan menyebabkan kerusakan pada beton dan pada akhirnya mengalami kehancuran. Proses transportasi ion klorida ke dalam beton adalah melalui proses difusi. Klorida masuk ke dalam beton melalui pori-pori pada permukaan beton dan bergerak dari konsentrasi yang tinggi ke konsentrasi yang lebih rendah. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui proses difusi klorida yang terjadi pada beton agregat daur ulang dengan menggunakan metode analitis (metode error function). Sampel beton akan direndam dalam larutan NaCl 4% dalam siklus wet & dry dengan perbandingan 1:1 selama 1, 3, dan 5 bulan. Dan selanjutnya akan dilakukan pengujian kadar klorida pada benda uji beton dengan variasi kedalaman 10 mm, 20 mm, dan 40 mm. Berdasarkan hasil analisis dan kajian eksperimen diketahui bahwa penetrasi ion klorida ke dalam beton beragregat kasar daur ulang lebih besar dibandingkan beton beragregat kasar normal. Nilai koefisien klorida akan berkurang seiring dengan bertambahnya waktu dan akan meningkat dengan bertambahnya kedalaman difusi. Sedangkan, nilai konsentrasi klorida akan meningkat seiring dengan bertambahnya waktu dan akan berkurang.

Kata Kunci: Agregat daur ulang; Difusi klorida; Siklus wet & dry

Abstract

The use and utilization of recycled aggregates in concrete mixtures can be one solution for implementing sustainable construction development strategies. Differences in quality, physical properties and chemical properties of recycled aggregates compared to normal aggregates will affect the quality of the resulting concrete, so further research must be carried out on the characteristics of recycled aggregates, especially related to their durability to chloride ions. Chloride ions ingress into the pores of the concrete will cause damage to the concrete and ultimately destruction. The process of transporting chloride ions into concrete is through the diffusion process. Chloride enters the concrete through the pores on the concrete surface and moves from high concentrations to lower concentrations. This study aims to determine the chloride diffusion process that occurs in recycled aggregate concrete using an analytical method (error function method). The samples will be immersed in 4% NaCl solution in wet & dry cycles with a ratio of 1:1 for 1, 3, and 5 months. Then, chloride content tests will be carried out on concrete samples with depth variations of 10 mm, 20 mm, and 40 mm. Based on the results of the analysis and experimental studies, it is known that the penetration of chloride ions into recycled coarse aggregate concrete is greater than that of normal coarse aggregate concrete. The chloride coefficient value will decrease with time and will increase with increasing diffusion depth. Meanwhile, the chloride concentration value will increase with time and will decrease.

^{1,2} Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Citra Bangsa Kupang;

³Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Widya Mandira Kupang
 email:anggymansari@gmail.com

Keywords: Recycled aggregate; Chloride diffusion; Wet & dry cycles

PENDAHULUAN

Pada abad ke-21, dunia menghadapi tantangan berupa kelangkaan sumber daya alam sebagai akibat dari terus meningkatnya proses pembangunan konstruksi. Hal ini mendorong para peneliti untuk melakukan dan menemukan berbagai inovasi terkait dengan konsep pembangunan konstruksi berkelanjutan (Xiao et al., 2014). Penggunaan serta pemanfaatan agregat daur ulang pada campuran beton telah banyak diterapkan, karena dapat membantu mengurangi dampak buruk dari eksploitasi lingkungan dan penumpukan limbah beton. Dengan demikian, agregat daur ulang beton yang terbuang menjadi salah satu solusi untuk penerapan strategi pembangunan konstruksi berkelanjutan (Mansari et al., 2024).

Agregat beton daur ulang merupakan material yang berasal dari bongkaran bangunan yang dihancurkan untuk digunakan kembali sebagai agregat kasar maupun agregat halus dalam pembuatan campuran beton baru (McNeil & Kang, 2013). Agregat beton daur ulang memiliki sifat dan karakteristik yang berbeda dibandingkan dengan agregat normal, hal ini tentunya akan mempengaruhi kualitas beton yang dihasilkan (Iduwin et al., 2020),

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh C, Shi.,et.al (Shi et al., 2016), diketahui bahwa agregat beton daur ulang mengandung mortar yang mengakibatkan berat jenis lebih rendah, porositas dan daya serap air lebih tinggi, serta kekuatan lebih rendah dibandingkan dengan agregat normal. Hal ini akan berdampak buruk pada perilaku mekanis dan keawetan beton segar dan beton keras yang dibuat dengan menggunakan agregat beton daur ulang. Selain itu penelitian yang dilakukan oleh Huda & Alam (2023) dan Sasanipour & Aslani (2020), menunjukkan bahwa agregat beton daur ulang memiliki daya serap dan porositas yang lebih tinggi, yang menyebabkan berkurangnya keawetan beton agregat daur ulang karena bahan atau elemen kimia agresif lebih mudah masuk dan merusak beton.

Durabilitas beton adalah kemampuan material beton atau stuktur beton untuk menghadapi resiko kerusakan yang diakibatkan oleh lingkungan, reaksi kimia, gangguan fisik atau proses pengrusakan yang berarti selama masa layan sesuai dengan umur rencana tanpa adanya kerusakan yang berarti (Olivia, 2011). Struktur bangunan yang berada pada wilayah perairan terutama laut sangat rentan mengalami kerusakan akibat lingkungan air yang asam serta unsur kimia yang terkandung di dalam air laut (Mulyono, 2005). Kerusakan struktur akan dimulai dengan terjadinya pelepasan butiran-butiran partikel beton sehingga menyebabkan beton menjadi keropos dan hal ini akan mempercepat proses korosi pada tulangan baja (Purba, 2012).

Ion klorida yang terkandung di dalam air laut dapat masuk ke dalam beton melalui suatu proses yang dikenal dengan proses difusi klorida (Jayanti, 2021). Penetrasi klorida terjadi melalui sistem pori kapiler, retak dan cacat yang terjadi pada beton. Siklus basah-kering (wet & dry) akan mempengaruhi kecepatan masuknya ion klorida ke dalam beton. Dimana pada kondisi wet, air laut yang mengandung klorida masuk ke dalam beton melalui proses capillary suction, sedangkan klorida akan tetap mengalir dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi yang lebih rendah melalui proses difusi. Dan pada kondisi dry, air di dalam pori-pori beton akan menguap, sementara kristal garam akan tetap berada di dalam beton (Sutrisno, W., 2016).

Wang & Yang (2022) melakukan penelitian terhadap pengaruh rasio durasi siklus wet & dry terhadap mekanisme transportasi ion klorida ke dalam beton dan diketahui bahwa proses mekanisme masuknya ion klorida ke dalam beton yang mengalami siklus wet & dry sangat tergantung pada durasi dari siklus itu sendiri. Dimana durasi siklus akan berpengaruh terhadap besar kecilnya nilai koefisien difusi yang diperoleh selama masa paparan. Koefisien difusi akan meningkat dengan meningkatnya rasio wet & dry.

Ion klorida yang masuk ke dalam beton akan menyebabkan kerusakan dan mengurangi keawetan beton serta mempengaruhi masa layan dari beton itu sendiri. Oleh karena itu, sangat penting untuk dilakukan prediksi terhadap proses penetrasi ion klorida ke dalam beton, yang pada akhirnya dapat juga digunakan untuk memprediksi durabilitas dan masa layan dari struktur beton.

METODE

Material

Pada penelitian ini untuk menghasilkan suatu campuran beton digunakan material yang terdiri dari semen PCC (Portland Composite Cement), agregat halus, dan agregat kasar (agregat kasar normal dan agregat kasar daur ulang). Agregat kasar daur ulang yang digunakan berasal dari limbah beton hasil pengujian laboratorium dengan mutu K-300.

Benda Uji

Benda uji beton yang digunakan dalam penelitian ini, dibedakan menjadi dua berdasarkan jenis agregat kasar yaitu beton beragregat normal (NCA) dan beton beragregret daur ulang (RCA). Benda uji yang digunakan adalah benda uji kubus dengan ukuran 10 x 10 x 12 cm. Untuk jumlah benda uji dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 3.1 Jumlah Benda Uji

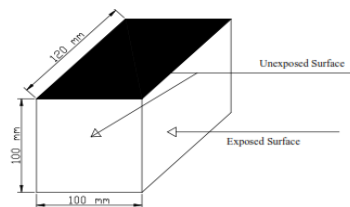
Agregat	Label	Jumlah Benda Uji
NCA (Normal Coarse Aggregate)	Beton NCA (NCA-1; NCA-2; NCA-3)	3
RCA (Recycled Coarse Aggregate)	Beton RCA (RCA-1; RCA-2; RCA-3)	3

Sumber : Data penelitian

3.1. Tahap Perendaman Spesimen Beton Dengan Larutan Klorida (NaCl) Pada Siklus Wet & Dry

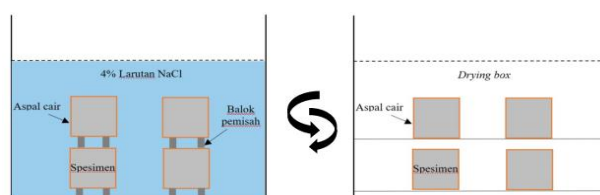
Tahap perendaman specimen beton pada penelitian ini dilakukan untuk melihat difusi klorida yang terjadi pada specimen beton yang menggunakan agregat kasar normal dan agregat kasar daur ulang sebagai campuran dalam beton.

Proses perendaman dengan siklus basah & kering dimulai setelah 28 hari masa perawatan (curing). Spesimen beton akan dicoating atau dilapisi dengan aspal cair terlebih dahulu, hal ini untuk memastikan proses tranpost ion klorida hanya terjadi secara satu arah. Setelah itu dilanjutkan dengan proses perendaman benda uji beton ke dalam air kapur selama 48 jam sebagaimana dijelaskan dalam ASTM C 1556-03 (ASTM C 1556, 2009). Perendaman benda uji beton dilakukan dengan menggunakan larutan NaCl dengan konsentrasi 4% (40 gram garam NaCl per liter). Penggantian larutan NaCl dilakukan secara berkala setiap satu bulan sekali. Hal ini untuk memastikan kadar NaCl terkontrol. Benda uji akan menjalani siklus basah & kering secara bergantian, di mana lamanya satu siklus adalah 48 jam (24 jam untuk siklus basah dan 24 jam untuk siklus kering). Proses ini dilakukan selama 5 bulan di bawah pengawasan.



Gambar 3 Spesimen beton

Sumber: data penelitian



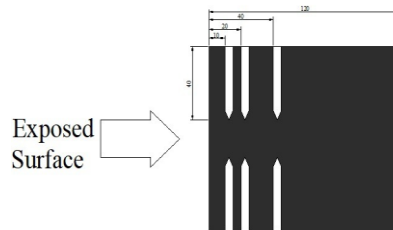
Gambar 4 Diagram skema siklus wet & dry

Sumber: data penelitian

3.2. Tahap Pengujian Kadar Klorida Dalam Beton

Pengujian kadar klorida dalam beton dilakukan berdasarkan SNI 6439:2013. Pengujian Titrasi Argentometri ini dilakukan untuk mengetahui nilai kadar klorida pada beton. Argentometri merupakan salah satu cara untuk menentukan kadar zat dalam suatu larutan yang dilakukan dengan titrasi berdasarkan pada pembentukan endapan dengan ion Ag^+ .

Pengujian ini akan dilakukan dalam empat periode waktu yang berbeda, yaitu 0 bulan, 1 bulan, 3 bulan dan 5 bulan. Untuk mengukur kadar klorida dalam beton, sampel serbuk beton diambil dengan cara sampel beton dibor pada kedalaman 10 mm, 20 mm dan 40 mm dari permukaan yang terekspos.



Gambar 5 Posisi pengambilan sampel pada specimen dengan cara dibor
Sumber: data penelitian

3.3. Tahap Analisa Data

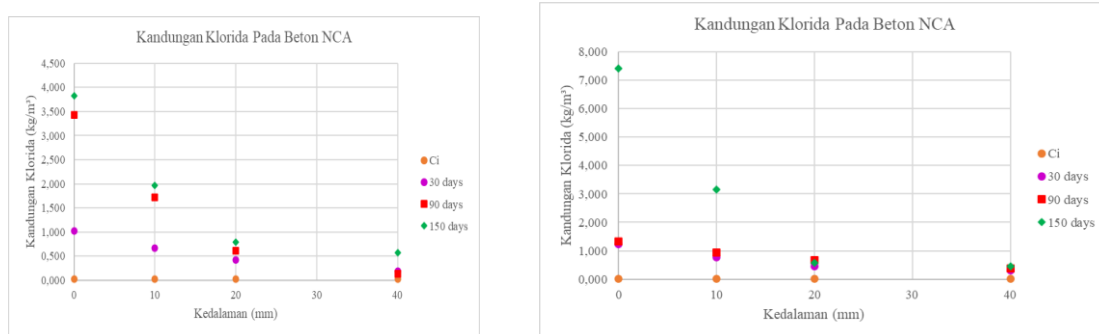
Tahap analisa yang dilakukan berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh meliputi :

1. Analisa data eksperimen dan analitis kadar klorida permukaan pada berbagai kedalaman dengan variasi waktu pengujian
2. Analisis data analisis koefisien difusi klorida pada beton terhadap waktu dan kedalaman difusi

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Difusi Klorida Pada Beton Dengan Metode Error Function

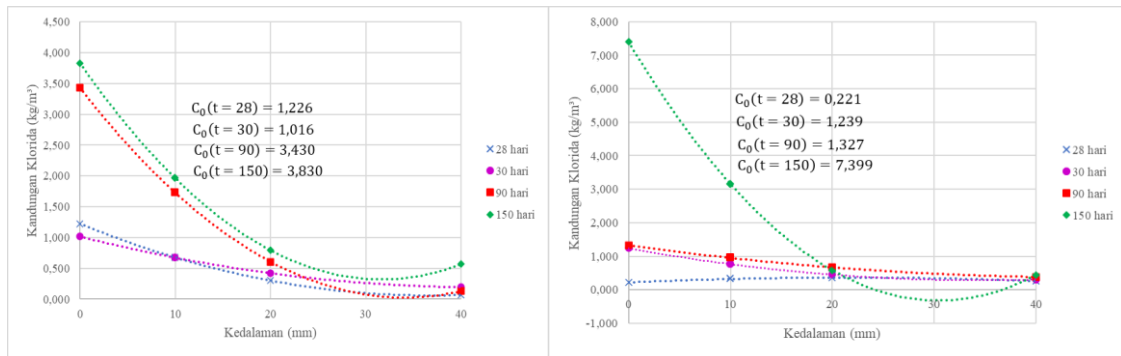
$C(x,t)$ merupakan kandungan klorida yang didapatkan dari hasil pengujian eksperimental di laboratorium dengan menggunakan Metode Titrasi Argentometri. Kandungan klorida yang terdapat dalam specimen beton diteliti nilainya dengan ditentukan berdasarkan pada waktu paparan dan kedalaman difusi tertentu. Nilai $C(x,t)$ hasil eksperimental dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 6 Grafik kandungan klorida pada beton : (a) Beton NCA; (b) Beton RCA
(a) (b)
Sumber: Hasil penelitian

4.1.1 Menentukan Konsentrasi Klorida Permukaan

C_0 merupakan konsentrasi klorida permukaan konstan. Nilai C_0 diperkirakan dengan mengekstrapolasi nilai kandungan klorida permukaan hasil eksperimen dengan analisa volume klorida regresi polinomial.

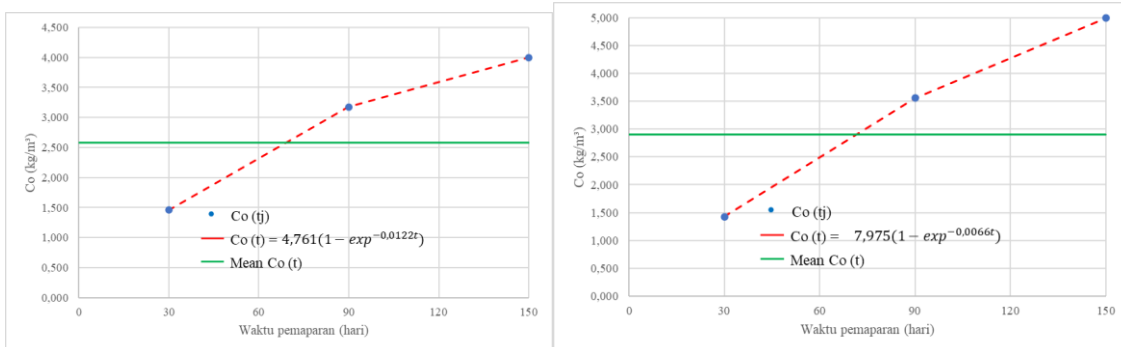


Gambar 7 Grafik konsentrasi klorida permukaan pada beton : (a) Beton NCA; (b) Beton RCA
Sumber: Hasil penelitian

Berdasarkan Gambar 5, diketahui bahwa bahwa kandungan klorida permukaan akan meningkat dengan meningkatnya waktu paparan. Kurva regresi dari kandungan klorida permukaan tergantung waktu $C_0(t)$ digambarkan menggunakan persamaan dibawah ini.

$$C_0(t) = C_{ext} (1 - e^{-bt}) \quad (4-1)$$

dimana C_{ext} dan b adalah parameter untuk kandungan klorida permukaan tergantung waktu yang ditentukan dengan metode kuadrat terkecil. C_{ext} mewakili nilai klorida permukaan yang diekstrapolasi setelah waktu paparan yang lama.



Gambar 8 Grafik kandungan klorida tergantung waktu dan konsentrasi klorida permukaan rata-rata dari $C_0(t_j)$: (a) Beton NCA; (b) Beton RCA
Sumber: Hasil penelitian

Nilai rata-rata kandungan klorida permukaan dihitung dengan rata-rata $C_0(t)$ terhadap waktu paparan dengan persamaan dibawah ini.

$$C_0 = \frac{1}{T} \int_0^T C_0(t) dt \quad (4-2)$$

dimana T adalah lama waktu pemaparan (hari).

Sehingga berdasarkan grafik di atas, di dapatkan nilai rata-rata C_0 untuk beton NCA sebesar 2,580 kg/m³ dengan fungsi $C_0(t)$ dari grafik yaitu 4,761 (1-exp-0,0122t). Sedangkan, nilai rata-rata C_0 untuk beton RCA sebesar 2,900 kg/m³ dengan fungsi $C_0(t)$ dari grafik yaitu 7,975 (1-exp-0,0066t).

4.1.2 Menentukan Koefisien Difusi Klorida

Koefisien difusi ditentukan dengan menggunakan solusi analitis untuk persamaan difusi dalam kondisi batas tetap. Adapun persamaan yang digunakan untuk menghitung koefisien difusi klorida pada beton adalah sebagai berikut :

$$D_{i,j} = \frac{1}{t_j \left\{ \frac{2}{x_i} \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C(x_i, t_j) - C_i}{C_0 - C_i} \right) \right\}^2} \quad (4-3)$$

$$D_j = \frac{D_0}{1-m} \left(\frac{t_0}{t} \right)^m \quad (4-4)$$

Nilai koefisien difusi klorida berdasarkan hasil analitis dapat dilihat pada table dibawah ini.

Tabel 4.1 D konstan dan D(t) dalam satuan m²/s pada beton NCA

Metode	Kondisi Batas	Koefisien Difusi	Hasil Koefisien Difusi (m ² /s)
1	$C(x=0) = C_0$	D_1	3,21E-11
2	$C(x=0) = C_0$	$D_1(t)$	$1E-10t^{-0,3}$
3	$C(x=0) = C_0(t)$	D_2	5,4E-11
4	$C(x=0) = C_0(t)$	$D_2(t)$	$2E-10t^{-0,3}$

Sumber : Hasil penelitian

Tabel 4.2 D konstan dan D(t) dalam satuan m²/s pada beton RCA

Metode	Kondisi Batas	Koefisien Difusi	Hasil Koefisien Difusi (m ² /s)
1	$C(x=0) = C_0$	D_1	3,95E-11
2	$C(x=0) = C_0$	$D_1(t)$	$1E-10t^{-0,3}$
3	$C(x=0) = C_0(t)$	D_2	5,80E-10
4	$C(x=0) = C_0(t)$	$D_2(t)$	$2E-09t^{-0,3}$

Sumber : Hasil penelitian

4.1.3 Perbandingan Nilai Kandungan Klorida Eksperimental Dengan Hasil Analisa Metode Error Function

Terdapat perbandingan antara kadar klorida pada setiap kedalaman dan waktu paparan yang didapatkan berdasarkan hasil eksperimental dengan hasil perhitungan analitis yang menggunakan rumus error function. Rumus yang dapat digunakan untuk analisis $C(x,t)$ adalah sebagai berikut :

$$C(x,t) = C_0(t) - C_i \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}} \right) \right] \quad (4-2)$$

Untuk hasil perhitungan nilai kandungan klorida dari specimen beton NCA pada kedalaman difusi dan waktu paparan $C(x,t)$ dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 4.3 Nilai $C(x,t)$ hasil analisis dengan model metode D_1 dan C_0 konstan dari $C_0(t)$

t (days)	t (s)	x (mm)	x (m)	C0 (kg/m ³)	Ci (kg/m ³)	Da (m ² /s)	$\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}}$	$\operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}}$	C(x,t) (kg/m ³)
28	2419200	0	0	2,580	0,028	3,21E-11	0,000	0,000	2,551
28	2419200	10	0,01	2,580	0,028	3,21E-11	0,567	0,577	1,078
28	2419200	20	0,02	2,580	0,028	3,21E-11	1,134	0,891	0,278
28	2419200	40	0,04	2,580	0,028	3,21E-11	2,268	0,999	0,003
30	2592000	0	0	2,580	0,028	3,21E-11	0,000	0,000	2,551
30	2592000	10	0,01	2,580	0,028	3,21E-11	0,548	0,561	1,119
30	2592000	20	0,02	2,580	0,028	3,21E-11	1,096	0,879	0,309
30	2592000	40	0,04	2,580	0,028	3,21E-11	2,191	0,998	0,005
90	7776000	0	0	2,580	0,028	3,21E-11	0,000	0,000	2,551

90	7776000	10	0,0 1	2,580	0,028	3,21E -11	0,316	0,345	1,670
90	7776000	20	0,0 2	2,580	0,028	3,21E -11	0,633	0,629	0,947
90	7776000	40	0,0 4	2,580	0,028	3,21E -11	1,265	0,926	0,188
150	1296000 0	0	0	2,580	0,028	3,21E -11	0,000	0,000	2,551
150	1296000 0	10	0,0 1	2,580	0,028	3,21E -11	0,245	0,271	1,860
150	1296000 0	20	0,0 2	2,580	0,028	3,21E -11	0,490	0,512	1,246
150	1296000 0	40	0,0 4	2,580	0,028	3,21E -11	0,980	0,834	0,423

Sumber : Hasil penelitian

Tabel 4.4 Nilai $C(x,t)$ hasil analisis dengan model metode $D_1(t)$ dan C_0 konstan dari $C_0(t)$

t (days)	t (s)	x (mm)	x (m)	C0 (kg/m ³)	Ci (kg/m ³)	Da (m ² /s)	$\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}}$	$\text{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}}$	C(x,t) (kg/m ³)
28	2419200	0	0	2,580	0,028	4,47E -11	0,0000	0,0000	2,551
28	2419200	10	0,0 1	2,580	0,028	4,47E -11	0,4809	0,5036	1,266
28	2419200	20	0,0 2	2,580	0,028	4,47E -11	0,9619	0,8263	0,443
28	2419200	40	0,0 4	2,580	0,028	4,47E -11	1,9237	0,9935	0,017
30	2592000	0	0	2,580	0,028	4,38E -11	0,000	0,000	2,551
30	2592000	10	0,0 1	2,580	0,028	4,38E -11	0,469	0,493	1,293
30	2592000	20	0,0 2	2,580	0,028	4,38E -11	0,939	0,816	0,470
30	2592000	40	0,0 4	2,580	0,028	4,38E -11	1,878	0,992	0,020
90	7776000	0	0	2,580	0,028	3,15E -11	0,000	0,000	2,551
90	7776000	10	0,0 1	2,580	0,028	3,15E -11	0,320	0,349	1,662
90	7776000	20	0,0 2	2,580	0,028	3,15E -11	0,639	0,634	10,934
90	7776000	40	0,0 4	2,580	0,028	3,15E -11	1,278	0,929	0,180
150	1296000 0	0	0	2,580	0,028	2,70E -11	0,000	0,000	2,551
150	1296000 0	10	0,0 1	2,580	0,028	2,70E -11	0,267	0,295	1,800
150	1296000 0	20	0,0 2	2,580	0,028	2,70E -11	0,535	0,550	1,147
150	1296000 0	40	0,0 4	2,580	0,028	2,70E -11	1,069	0,869	0,333

Sumber : Hasil penelitian

Tabel 4.5 Nilai $C(x,t)$ hasil analisis dengan model metode D_2 dan $C_0(t)$ konstan dari $C_0(t)$

t (days)	t (s)	x (mm)	x (m)	C0 (kg/m ³)	Ci (kg/m ³)	Da (m ² /s)	$\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}}$	$\text{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}}$	C(x,t) (kg/m ³)
28	2419200	0	0	1,226	0,028	5,40E-11	0,0000	0,0000	1,197
28	2419200	10	0,01	1,226	0,028	5,40E-11	0,4374	0,4638	0,642
28	2419200	20	0,02	1,226	0,028	5,40E-11	0,8748	0,7840	0,259
28	2419200	40	0,04	1,226	0,028	5,40E-11	1,7496	0,9867	0,016
30	2592000	0	0	1,016	0,028	5,40E-11	0,000	0,000	0,987
30	2592000	10	0,01	1,016	0,028	5,40E-11	0,423	0,450	0,543
30	2592000	20	0,02	1,016	0,028	5,40E-11	0,845	0,768	0,229
30	2592000	40	0,04	1,016	0,028	5,40E-11	1,690	0,983	0,017
90	7776000	0	0	3,430	0,028	5,40E-11	0,000	0,000	3,402
90	7776000	10	0,01	3,430	0,028	5,40E-11	0,244	0,270	2,484
90	7776000	20	0,02	3,430	0,028	5,40E-11	0,488	0,510	1,668
90	7776000	40	0,04	3,430	0,028	5,40E-11	0,976	0,832	0,570
150	12960000	0	0	3,830	0,028	5,40E-11	0,000	0,000	3,801
150	12960000	10	0,01	3,830	0,028	5,40E-11	0,189	0,211	3,000
150	12960000	20	0,02	3,830	0,028	5,40E-11	0,378	0,407	2,254
150	12960000	40	0,04	3,830	0,028	5,40E-11	0,756	0,715	1,084

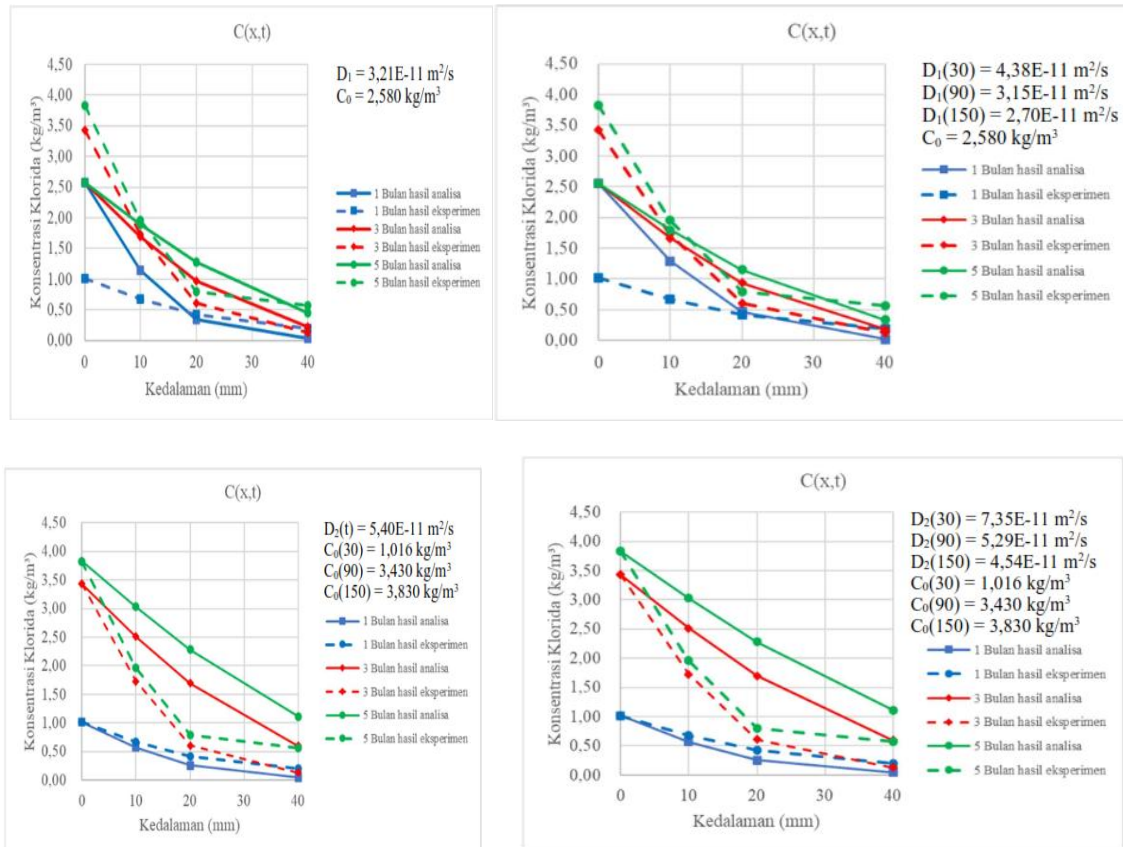
Sumber : Hasil penelitian

Tabel 4.6 Nilai $C(x,t)$ hasil analisis dengan model metode $D_2(t)$ dan $C_0(t)$ konstan dari $C_0(t)$

t (days)	t (s)	x (mm)	x (m)	C0 (kg/m ³)	Ci (kg/m ³)	Da (m ² /s)	$\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}}$	$\text{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}}$	C(x,t) (kg/m ³)
28	2419200	0	0	1,226	0,028	7,51E-11	0,0000	0,0000	1,197
28	2419200	10	0,01	1,226	0,028	7,51E-11	0,3710	0,4002	0,718
28	2419200	20	0,02	1,226	0,028	7,51E-11	0,7420	0,7060	0,352
28	2419200	40	0,04	1,226	0,028	7,51E-11	1,4841	0,9642	0,043
30	2592000	0	0	1,016	0,028	7,35E-11	0,000	0,000	0,987
30	2592000	10	0,01	1,016	0,028	7,35E-11	0,362	0,391	0,601
30	2592000	20	0,02	1,016	0,028	7,35E-11	0,724	0,694	0,302

30	2592000	40	0,0	1,016	0,028	7,35E-11	1,449	0,960	0,040
90	7776000	0	0	3,430	0,028	5,29E-11	0,000	0,000	3,402
90	7776000	10	0,0	3,430	0,028	5,29E-11	0,247	0,273	2,474
90	7776000	20	0,0	3,430	0,028	5,29E-11	0,493	0,514	1,652
90	7776000	40	0,0	3,430	0,028	5,29E-11	0,986	0,837	0,555
150	1296000	0	0	3,830	0,028	4,54E-11	0,000	0,000	3,801
150	1296000	10	0,0	3,830	0,028	4,54E-11	0,206	0,229	2,929
150	1296000	20	0,0	3,830	0,028	4,54E-11	0,412	0,440	2,128
150	1296000	40	0,0	3,830	0,028	4,54E-11	0,825	0,757	0,925

Sumber : Hasil penelitian



Gambar 9 Grafik perbandingan nilai $C(x,t)$ eksperimental dengan $C(x,t)$ hasil analisis pada beton NCA berdasarkan kondisi batas: (a) D_1 dan C_0 konstan dari $C_0(t)$; (b) $D_1(t)$ dan C_0 konstan dari $C_0(t)$; (c) D_2 dan C_0 konstan dari $C_0(t)$; (d) $D_2(t)$ dan C_0 konstan dari $C_0(t)$;

Sumber: Hasil penelitian

Untuk hasil perhitungan nilai kandungan klorida dari specimen beton RCA pada kedalaman difusi dan waktu paparan $C(x,t)$ dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 4.7 Nilai $C(x,t)$ hasil analisis dengan model metode D_1 dan C_0 konstan dari $C_0(t)$

t (days)	t (s)	x (mm)	x (m)	C0 (kg/m^3)	Ci (kg/m^3)	Da (m^2/s)	$\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}}$	$\text{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}}$	C(x,t) (kg/m^3)
-------------	----------	-----------	----------	---------------------------	---------------------------	---------------------------------	---------------------------------	--	-------------------------------

)	)	)	)	)	)	)	)	)	)
28	2419200	0	0	2,900	0,027	3,95E-11	0,0000	0,0000	2,873
28	2419200	10	0,01	2,900	0,027	3,95E-11	0,5116	0,5306	1,348
28	2419200	20	0,02	2,900	0,027	3,95E-11	1,0231	0,8521	0,425
28	2419200	40	0,04	2,900	0,027	3,95E-11	2,0462	0,9962	0,011
30	2592000	0	0	2,900	0,027	3,95E-11	0,000	0,000	2,873
30	2592000	10	0,01	2,900	0,027	3,95E-11	0,494	0,515	1,392
30	2592000	20	0,02	2,900	0,027	3,95E-11	0,988	0,838	0,466
30	2592000	40	0,04	2,900	0,027	3,95E-11	1,977	0,995	0,015
90	7776000	0	0	2,900	0,027	3,95E-11	0,000	0,000	2,873
90	7776000	10	0,01	2,900	0,027	3,95E-11	0,285	0,313	1,972
90	7776000	20	0,02	2,900	0,027	3,95E-11	0,571	0,580	1,205
90	7776000	40	0,04	2,900	0,027	3,95E-11	1,141	0,893	0,306
150	12960000	0	0	2,900	0,027	3,95E-11	0,000	0,000	2,873
150	12960000	10	0,01	2,900	0,027	3,95E-11	0,221	0,245	2,168
150	12960000	20	0,02	2,900	0,027	3,95E-11	0,442	0,468	1,528
150	12960000	40	0,04	2,900	0,027	3,95E-11	0,884	0,789	0,607

Sumber : Hasil penelitian

Tabel 4.8 Nilai $C(x,t)$ hasil analisis dengan model metode $D_1(t)$ dan C_0 konstan dari $C_0(t)$

t (days)	t (s)	x (mm)	x (m)	C0 (kg/m ³)	Ci (kg/m ³)	Da (m ² /s)	$\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}}$	$\text{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}}$	C(x,t) (kg/m ³)
28	2419200	0	0	2,900	0,027	5,49E-11	0,0000	0,0000	2,873
28	2419200	10	0,01	2,900	0,027	5,49E-11	0,4339	0,4605	1,550
28	2419200	20	0,02	2,900	0,027	5,49E-11	0,8678	0,7803	0,631
28	2419200	40	0,04	2,900	0,027	5,49E-11	1,7356	0,9859	0,041
30	2592000	0	0	2,900	0,027	5,38E-11	0,000	0,000	2,873
30	2592000	10	0,01	2,900	0,027	5,38E-11	0,424	0,451	1,578
30	2592000	20	0,02	2,900	0,027	5,38E-11	0,847	0,769	0,663
30	2592000	40	0,04	2,900	0,027	5,38E-11	1,694	0,983	0,048

90	7776000	0	0	2,900	0,027	3,87E-11	0,000	0,000	2,873
90	7776000	10	0,01	2,900	0,027	3,87E-11	0,288	0,317	1,963
90	7776000	20	0,02	2,900	0,027	3,87E-11	0,577	0,585	1,191
90	7776000	40	0,04	2,900	0,027	3,87E-11	1,153	0,897	0,295
150	12960000	0	0	2,900	0,027	3,32E-11	0,000	0,000	2,873
150	12960000	10	0,01	2,900	0,027	3,32E-11	0,241	0,267	2,106
150	12960000	20	0,02	2,900	0,027	3,32E-11	0,482	0,505	1,423
150	12960000	40	0,04	2,900	0,027	3,32E-11	0,965	0,827	0,496

Sumber : Hasil penelitian

Tabel 4.9 Nilai $C(x,t)$ hasil analisis dengan model metode D_2 dan $C_0(t)$ konstan dari $C_0(t)$

t (days)	t (s)	x (mm)	x (m)	C0 (kg/m ³)	Ci (kg/m ³)	Da (m ² /s)	$\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}}$	$\text{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}}$	C(x,t) (kg/m ³)
28	2419200	0	0	0,221	0,027	5,80E-10	0,0000	0,0000	0,194
28	2419200	10	0,01	0,221	0,027	5,80E-10	0,1334	0,1497	0,165
28	2419200	20	0,02	0,221	0,027	5,80E-10	0,2669	0,2941	0,137
28	2419200	40	0,04	0,221	0,027	5,80E-10	0,5337	0,5496	0,087
30	2592000	0	0	1,239	0,027	5,80E-10	0,000	0,000	1,211
30	2592000	10	0,01	1,239	0,027	5,80E-10	0,129	0,145	1,036
30	2592000	20	0,02	1,239	0,027	5,80E-10	0,258	0,285	0,867
30	2592000	40	0,04	1,239	0,027	5,80E-10	0,516	0,534	0,564
90	7776000	0	0	1,327	0,027	5,80E-10	0,000	0,000	1,299
90	7776000	10	0,01	1,327	0,027	5,80E-10	0,074	0,084	1,190
90	7776000	20	0,02	1,327	0,027	5,80E-10	0,149	0,167	1,083
90	7776000	40	0,04	1,327	0,027	5,80E-10	0,298	0,326	0,875
150	12960000	0	0	7,399	0,027	5,80E-10	0,000	0,000	7,372
150	12960000	10	0,01	7,399	0,027	5,80E-10	0,058	0,065	6,893
150	12960000	20	0,02	7,399	0,027	5,80E-10	0,115	0,130	6,417
150	12960000	40	0,04	7,399	0,027	5,80E-10	0,231	0,256	5,487

Sumber : Hasil penelitian

Berdasarkan hasil perhitungan analisis menggunakan rumus error function dengan keempat model metode yang memperhitungkan ulang nilai $C(x,t)$, model dengan batasan C_0 dan D_1 adalah yang nilainya paling mendekati $C(x,t)$ data eksperimen untuk beton RCA dan beton RCA.

Perbedaan nilai yang terjadi pada kandungan klorida hasil analisa menggunakan metode error function dengan ekperimental memiliki selisih yang cenderung tinggi, hal ini dikarenakan metode error function tidak dapat memprediksi nilai kandungan klorida dengan baik. Metode ini hanya dapat digunakan untuk memprediksi kandungan klorida dengan menggunakan nilai koefisien difusi (D) konstan.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan kajian eksperimen terkait difusi klorida pada beton agregat alam dan beton agregat daur ulang pada kondisi perendaman klorida dengan siklus wet & dry, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai koefisien klorida akan berkurang seiring dengan bertambahnya waktu dan akan meningkat dengan bertambahnya kedalaman difusi. Hasil koefisien difusi klorida pada beton RCA menunjukkan hasil yang lebih besar baik pada nilai D_1 maupun nilai D_2 selisihnya sebesar 19% dan untuk nilai D_2 sebesar 91%.
2. Nilai konsentrasi klorida akan meningkat seiring dengan bertambahnya waktu dan akan berkurang dengan bertambahnya kedalaman difusi baik pada beton beragregat kasar daur ulang (RCA) maupun pada beton beragregat kasar normal (NCA).
3. Penetrasi ion klorida ke dalam beton beragregat kasar daur ulang lebih besar dibandingkan beton beragregat kasar normal. Kepadatan yang kecil dan penyerapan yang besar pada agregat kasar daur ulang memberikan pengaruh terhadap ketahanan beton RCA terhadap penetrasi ion klorida.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM C 1556. (2009). Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion 1.
- Badan Standarnisasi Nasional. (2013). Metode uji ion klorida dalam air (ASTM D512-04).
- Bentur, A., Berke, N., & Diamond, S. (1997). Steel Corrosion in Concrete Fundamentals and civil engineering practice (1st Editio).
- Huda, S. B., & Alam, M. S. (2023). Mechanical behavior of three generations of 100 % repeated recycled coarse aggregate concrete Mechanical behavior of three generations of 100 % repeated recycled coarse aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 65(August 2014), 574–582. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.010>
- Iduwin, T., Purnama, D. D., Putri, P. S., & Martono, H. S. (2020). Pengaruh Penggunaan Material Daur Ulang Terhadap Sifat Mekanik Beton Non Pasir. *Forum Mekanika*, 9(1), 11–19. <https://doi.org/10.33322/forummekanika.v9i1.1080>
- Jayanti, D. Y. A. (2021). Prediksi Difusi Klorida Pada Beton Bertulang Yang Diekspos Di Lingkungan Laut Pasang Surut Dengan Metode Error Function. Universitas Brawijaya.
- Kusumadewayanti, E. (2014). EXPERIMENTAL STUDY OF ADDITION SUPERPLASTICIZER IN REINFORCED CONCRETE RELATED WITH CORROSION ATTACK OF REINFORCED STEEL IN NATURAL AND FORCED METHOD. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Mansari, F. S. D., Nuralinah, D., & Setyowulan, D. (2024). Influence of Chloride Immersion in Wet and Dry Cycles on. 050003.
- McNeil, K., & Kang, T. H. K. (2013). Recycled Concrete Aggregates: A Review. In *International Journal of Concrete Structures and Materials* (Vol. 7, Issue 1, pp. 61–69). Korea Concrete Institute. <https://doi.org/10.1007/s40069-013-0032-5>
- Mulyono, T. (2005). Teknologi Bahan (II). ANDI OFFSET.
- Nuralinah, D., Kamiura, K., & Shimomura, T. (2011). ANALYSIS OF CHLORIDE INGRESS INTO CONCRETE SUBJECTED TO AIRBORNE SALT MEASURED BY WIND TUNNEL TEST. 33(1).
- Olivia, M. (2011). PhD - Durability Related Properties of Low Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete. Curtin University, May, 229.

- Poulsen, E., & Meljbro, L. (2010). Diffusion of Chloride in Concrete.
- Purba, P. (2012). Pengaruh Kandungan Sulfat Terhadap Kuat Tekan Beton. *Metana*, 4(1), 37–42. <https://doi.org/10.14710/metana.v4i1.1723>
- Sasanipour, H., & Aslani, F. (2020). Durability assessment of concrete containing surface pretreated coarse recycled concrete aggregates. 264.
- Shi, C., Li, Y., Zhang, J., Li, W., Chong, L., & Xie, Z. (2016). Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review. *Journal of Cleaner Production*, 112, 466–472. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.057>
- Suharwanto. (2004). Perilaku mekanik Beton Agregat Daur Ulang: Aspek Material-Struktural. Institut Teknologi Bandung.
- Sutrisno, W., dkk. (2016). Experimental Test of Chloride Penetration in Reinforced Concrete Subjected to Wetting and Drying Cycle. *Applied Mechanics and Materials*, 851, 846–851. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.851.846>
- Wang, K., & Yang, L. (2022). Effect of dry – wet ratio on sulfate transport-reaction mechanism in concrete. October 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124418>
- Xiao, J. Z., Ying, J. W., Tam, V. W. Y., & Gilbert, I. R. (2014). Test and prediction of chloride diffusion in recycled aggregate concrete. *Science China Technological Sciences*, 57(12), 2357–2370. <https://doi.org/10.1007/s11431-014-5700-4>