

ANALISIS PENETRASI KLORIDA KE DALAM BETON

DENGAN METODE *ERROR FUNCTION*

SKRIPSI

TEKNIK SIPIL



YANSSEN TANAWA

NIM. 175060100111025

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2021



LEMBAR PENGESAHAN
ANALISIS PENETRASI KLORIDA KE DALAM BETON DENGAN METODE
ERROR FUNCTION

SKRIPSI
TEKNIK SIPIL

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Yanssen Tanawa
NIM. 175060100111025

Skrripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh
dosen pembimbing pada tanggal 13 Juli 2021

Dosen Pembimbing I

Dr. Eng. Devi Nuralinah, ST., MT.
NIP. 19761208 2006004 2001

Dosen Pembimbing II

Dr. Eng. Ir. Eva Jirifi, ST., MT.
NIP. 201002 771 203 2001

Mengetahui,
Ketua Program Studi S1



Dr. Eng. Indradi Wijatmiko, ST., M.Eng (Prac.)
NIP. 19810220 200604 1 002

KATA PENGANTAR

Terimakasih saya sembahkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan karunianya juga kepada alam semesta sehingga skripsi ini akhirnya dapat diselesaikan. saya juga ingin berterimakasih sebesar-besarnya kepada para dosen yang sudah mengajarkan ilmu ketekniksipilan dengan baik dan saudara-saudara seperjuangan saya baik angkatan muda maupun angkatan tua yang sudah membantu saya selama kehidupan baik di perkuliahan maupun pada kehidupan sehari-hari. tidak lupa saya sangat berterima kasih kepada orangtua dan sanak-saudara keluarga saya yang sangat mendukung untuk menyelesaikan studi.

Ucapan terimakasih terutama saya ucapkan kepada nama-nama berikut ini:

1. Dr. Eng. Devi Nuralinah, ST., MT., sebagai dosen pembimbing 1.
2. Dr. Eng. Ir. Eva Arifi, ST., MT., sebagai dosen pembimbing 2.
3. Dr. Eng. Lilya Susanti, ST., MT., sebagai dosen penguji.

Yang telah dengan sabar membimbing dan memberikan asistensi beserta saran dan masukan sehingga akhirnya skripsi ini dapat selesai. juga terima kasih yang sebesar-besarnya atas segala ilmu pengetahuan dan kebaikan hati dari para ibu dosen dengan segala toleransi dan pengertiannya.

Malang, 12 juli 2021

Penulis
YANSSEN TANAWA

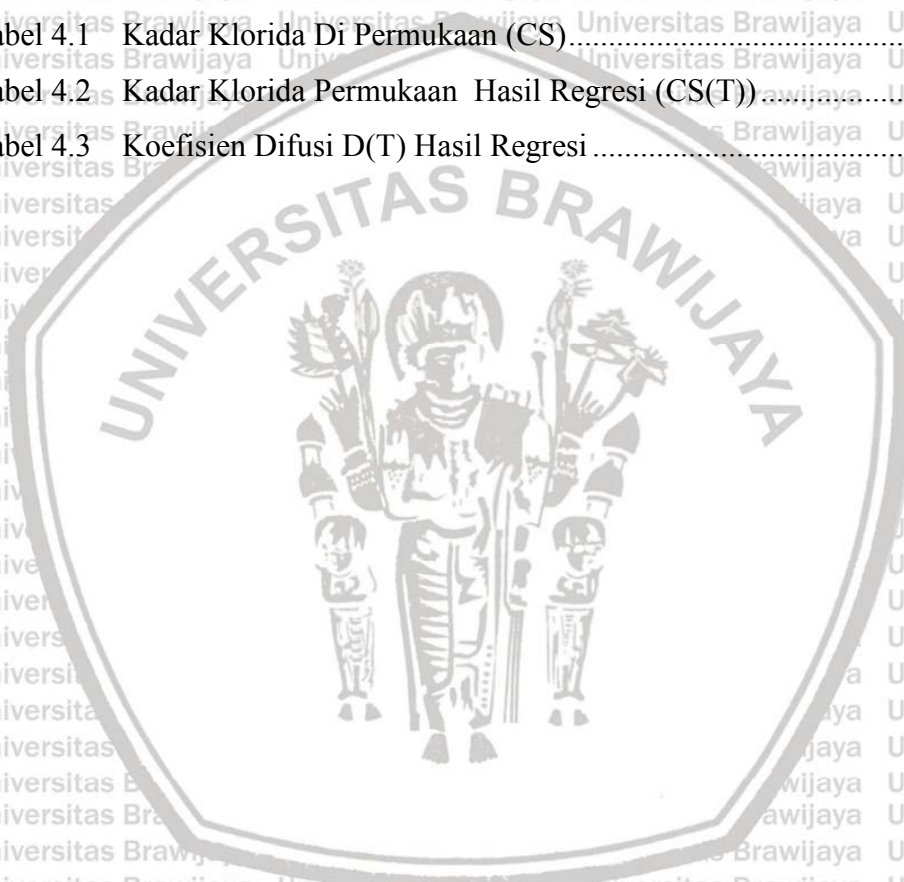
DAFTAR ISI

Judul	Halaman
KATA PENGANTAR	1
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vii
RINGKASAN	x
SUMMARY	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi Masalah	1
1.3 Hipotesis	2
1.4 Rumusan Masalah	2
1.5 Batasan Masalah	2
1.6 Tujuan	2
1.7 Manfaat	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Penyebab Korosi	3
2.1.1 Karbonasi	3
2.1.2 Klorida	3
2.2 Proses Terjadinya Korosi	4
2.3 Difusi	4
2.4 <i>Error Function</i>	5
2.5 Hasil Uji Eksperimental	6
2.6 Hasil Perbandingan	9
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	13
3.1 Jenis Penelitian	13
3.2 Data penelitian	13
3.2.1 Data <i>Mix Design</i> sampel	13
3.2.2 Konsentrasi Klorida di Permukaan	13
3.2.3 Koefisien Difusi	14
3.3 Tahapan Metode Penelitian	15

3.3.1 Studi Pustaka dan Literatur	15
3.3.2 Analisis dengan Metode <i>Error Function</i>	15
3.3.3 Perbandingan Kesesuaian	16
3.3.4 Hasil dan Kesimpulan	16
3.3.5 Analisis Perbedaan	16
3.4 Diagram Alir Penelitian	16
3.5 Waktu Pemaparan	17
3.6 Kondisi Uji Eksperimental	18
3.7 Orientasi Sampel	19
3.8 Pengaruh Iklim dan Musim	19
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	21
4.1 Konversi Kadar Klorida Permukaan ke dalam Massa Semen	21
4.2 Analisis Kadar Klorida Permukaan dari 9 sampel	21
4.2.1 Sampel Lokasi Pagar Kode Area A	22
4.2.2 Sampel Lokasi Pagar Kode Area B	24
4.2.3 Sampel Lokasi Pagar Kode Area E	25
4.3 Analisis Koefisien Difusi Klorida dari 9 sampel	27
4.3.1 Sampel Lokasi Pagar Kode Area A	27
4.3.2 Sampel Lokasi Pagar Kode Area B	29
4.3.3 Sampel Lokasi Pagar Kode Area E	31
4.4 Hubungan Kadar Klorida terhadap Kedalaman	32
4.4.1 Kadar Klorida terhadap Kedalaman Area A	33
4.4.2 Kadar Klorida terhadap Kedalaman Area B	35
4.4.3 Kadar Klorida terhadap Kedalaman Area E	37
4.5 Hasil Analisis Regresi	39
Bab V PENUTUP	47
5.1 Kesimpulan	47
5.2 Saran	48
DAFTAR PUSTAKA	49

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Mix Design Beton.....	6
Tabel 2.2	Kondisi Spesimen.....	9
Tabel 3.1	<i>Mix Design</i> Beton.....	13
Tabel 3.2	Konsentrasi Klorida di Permukaan (CS) Dalam KG/M ³	14
Tabel 3.3	Koefisien Difusi (D) Dalam 10 ⁻¹² M ² /S.....	15
Tabel 3.4	Waktu Pemaparan Dan Tanggal Pemboran.....	17
Tabel 4.1	Kadar Klorida Di Permukaan (CS).....	21
Tabel 4.2	Kadar Klorida Permukaan Hasil Regresi (CS(T)).....	40
Tabel 4.3	Koefisien Difusi D(T) Hasil Regresi.....	40





Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Reaksi Kimia Pada Korosi	4
Gambar 2.2	Data Kadar Klorida DC1A, DC1B, DC1E dan DC2A	7
Gambar 2.3	Data Kadar Klorida DC2A, DC2E, DC3A, dan DC3B	8
Gambar 2.4	Data Kadar Klorida DC3E, DC4A, DC4B, dan DC4E	8
Gambar 2.5	Profil Klorida Terhadap Waktu H-40 Dengan 3 Metode	10
Gambar 2.6	Data Kadar Klorida Terhadap Waktu Dan Kedalaman	10
Gambar 2.7	Koefisien Difusi terhadap Klorida	11
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	17
Gambar 3.2	Lokasi Sampel di <i>Seatech, Dania Beach Florida</i>	18
Gambar 3.3	Orientasi Sampel Lokasi A (Kiri), B (Tengah) dan E (Kanan)	19
Gambar 3.4	Pengaruh Iklim dan Musim Terhadap Deposit Klorida	19
Gambar 4.1	Kadar Klorida Permukaan DC1A	22
Gambar 4.2	Kadar Klorida Permukaan DC2A	22
Gambar 4.3	Kadar Klorida Permukaan DC3A	23
Gambar 4.4	Kadar Klorida Permukaan DC1B	24
Gambar 4.5	Kadar Klorida Permukaan DC2B	24
Gambar 4.6	Kadar Klorida Permukaan DC3B	25
Gambar 4.7	Kadar Klorida Permukaan DC1E	25
Gambar 4.8	Kadar Klorida Permukaan DC2E	26
Gambar 4.9	Kadar Klorida Permukaan DC3E	26
Gambar 4.10	Koefisien Difusi Klorida DC1A	27
Gambar 4.11	Koefisien Difusi Klorida DC2A	28
Gambar 4.12	Koefisien Difusi Klorida DC3A	28
Gambar 4.13	Koefisien Difusi Klorida DC1B	29
Gambar 4.14	Koefisien Difusi Klorida DC2B	29
Gambar 4.15	Koefisien Difusi Klorida DC3B	30
Gambar 4.16	Koefisien Difusi Klorida DC1E	31
Gambar 4.17	Koefisien Difusi Klorida DC2E	31
Gambar 4.18	Koefisien Difusi Klorida DC3E	32
Gambar 4.19	Hubungan Kadar Klorida Terhadap Kedalaman dan Waktu DC1A	33
Gambar 4.20	Hubungan Kadar Klorida Terhadap Kedalaman dan Waktu DC2A	34

Gambar 4.21	Hubungan Kadar Klorida Terhadap Kedalaman dan Waktu DC3A	34
Gambar 4.22	Hubungan Kadar Klorida Terhadap Kedalaman dan Waktu DC1B.....	35
Gambar 4.23	Hubungan Kadar Klorida Terhadap Kedalaman dan Waktu DC2B.....	36
Gambar 4.24	Hubungan Kadar Klorida Terhadap Kedalaman dan Waktu DC3B.....	36
Gambar 4.25	Hubungan Kadar Klorida Terhadap Kedalaman dan Waktu DC1E.....	37
Gambar 4.26	Hubungan Kadar Klorida Terhadap Kedalaman dan Waktu DC2E.....	38
Gambar 4.27	Hubungan Kadar Klorida Terhadap Kedalaman dan Waktu DC3E.....	38
Gambar 4.28	Perbandingan Antara Kadar Klorida Hasil Analisis Berdasarkan Regresi CS dan D(T) dan Hasil Eksperimen Pada Data DC1A	41
Gambar 4.29	Perbandingan Antara Kadar Klorida Hasil Analisis Berdasarkan Regresi CS dan D(T) dan Hasil Eksperimen Pada Data DC2A	41
Gambar 4.30	Perbandingan Antara Kadar Klorida Hasil Analisis Berdasarkan Regresi CS dan D(T) dan Hasil Eksperimen Pada Data DC3A	42
Gambar 4.31	Perbandingan Antara Kadar Klorida Hasil Analisis Berdasarkan Regresi CS dan D(T) dan Hasil Eksperimen Pada Data DC1E.....	43
Gambar 4.32	Perbandingan Antara Kadar Klorida Hasil Analisis Berdasarkan Regresi CS dan D(T) dan Hasil Eksperimen Pada Data DC2E.....	43
Gambar 4.33	Perbandingan Antara Kadar Klorida Hasil Analisis Berdasarkan Regresi Cs dan D(T) dan Hasil Eksperimen Pada Data DC3E.....	44
Gambar 4.34	Perbandingan Antara Kadar Klorida Hasil Analisis Berdasarkan Regresi CS dan D(T) dan Hasil Eksperimen Pada Data DC1B.....	44
Gambar 4.35	Perbandingan Antara Kadar Klorida Hasil Analisis Berdasarkan Regresi CS dan D(T) dan Hasil Eksperimen Pada Data DC2B.....	45
Gambar 4.36	Perbandingan Antara Kadar Klorida Hasil Analisis Berdasarkan Regresi CS dan D(T) dan Hasil Eksperimen Pada Data DC3B.....	45

RINGKASAN

Yanssen Tanawa, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2021, *Analisis Penetrasi Klorida ke dalam Beton dengan Metode Error Function*, Dosen Pembimbing: Devi Nuralinah dan Eva Arifi.

Korosi merupakan permasalahan dari beton bertulang karena itu diperlukan uji analisis penetrasi klorida untuk mengetahui laju difusinya, salah satu pemodelannya adalah menggunakan metode Error Function. Klorida merupakan salah satu faktor yang menyebabkan korosi dan tidak hanya membahayakan pada struktur yang kontak langsung dengan air laut namun dapat juga menyebar melalui udara.

Data yang diperlukan adalah koefisien difusi dan kadar klorida permukaan yang kemudian dengan menyesuaikan waktu dan kedalaman sesuai eksperimen dapat diperoleh konsentrasi klorida di setiap interval kedalaman tertentu. Data diperoleh dari uji eksperimental yang terdapat pada tesis maupun jurnal terdahulu kemudian dianalisis ulang untuk melihat kesesuaiannya.

Hasil analisis menunjukkan bahwa keakuratan dari metode error function untuk memodelkan penetrasi klorida dalam beton sangat ditentukan oleh nilai dari kadar klorida permukaan dan koefisien difusi yang digunakan sehingga harus teliti dalam perhitungan lebih lanjut hasil menunjukkan banyak variasi dan sangat bergantung kepada kondisi dan situasi dari eksperimen sehingga untuk mendapatkan hasil yang bagus maka perlu adanya penelitian lebih lanjut di berbagai lokasi tetapi secara umum, kadar klorida akan berkurang seiring dengan bertambahnya kedalaman dari permukaan.

Kata kunci: Korosi, Penetrasi, Klorida, Error Function, Beton, Difusi, kadar klorida permukaan, koefisien Difusi, kedalaman, waktu



Halaman ini sengaja dikosongkan

SUMMARY

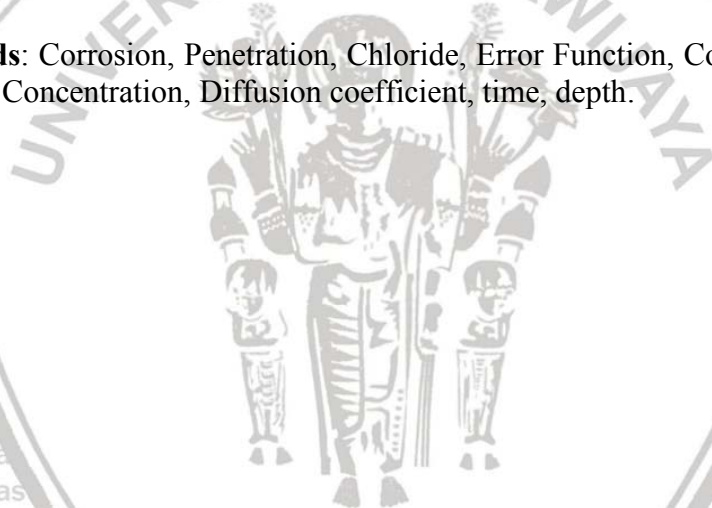
Yanssen Tanawa, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, July 2021, Analysis of Chloride Penetration into Concrete with Error Function Method, Advisor Lecturer's: Devi Nuralinah and Eya Arifi.

Corrosion is a problem in steel reinforced concrete because of that its demanded a analysis test of chloride penetration to know the diffusion rate , one of the model is by Error Function method .Chloride is one of factor contributing to corrosion and not only endangered the structure that have direct contact with sea water but can also spread by the air.

The data needed is diffusion coefficient and surface chloride concentration then by adjusting the suitable depth and time based on experiment will produce the chloride concentration in every certain depth interval . data is gathered from eksperimental test from the previous thesis or journal and then analyzed to see the fitness

The Results from analysis show that the accuracy of Error Function method in modelling the chloride penetration is really determined by the value of diffusion coefficient and surface chloride concentration used . so it must be careful in calculation. Moreover the results show many variation and really depends on the condition and situation of experiment so to get a good results will need a further investigation in many locations but in general, the chloride concentration will decrease with the the add of the depth from surface.

Keywords: Corrosion, Penetration, Chloride, Error Function, Concrete, Diffusion, Surface Chloride Concentration, Diffusion coefficient, time, depth.





Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I PENDAHULUAN

3.1 Latar Belakang

Korosi merupakan salah satu dari permasalahan utama pada struktur yang menggunakan baja atau besi seperti pada beton bertulang dimana akibat dari reaksi oksidasi yang mengakibatkan karat tersebut dapat mengakibatkan penurunan kekuatan sehingga mengakibatkan struktur menjadi rentan terhadap kerusakan

Permasalahan ini umumnya ditemui pada daerah pesisir pantai seperti pada pelabuhan dimana struktur beton bertulang terkena air laut yang mengandung natrium dan klorida secara terus menerus dan dalam jangka waktu yang lama dapat mengakibatkan kerusakan pada struktur tersebut juga pada bangunan yang tidak langsung terkena air laut juga dapat memiliki risiko akibat dari kandungan klorida yang terbawa oleh angin dari hasil penguapan air laut

Beton yang terendam air laut secara terus menerus dimana air merupakan benda yang cair dan dapat mengalir bebas lama kelamaan akan mempenetrasi kedalam lapisan beton sampai kepada tulangan baja dimana akan mengakibatkan korosi dan mengurangi kemampuan struktur jika tidak diberi perlakuan khusus selain itu air laut yang menguap dan mengandung klorida juga dapat terbawa oleh angin dan mengakibatkan korosi pada struktur yang tidak langsung terekspos dengan air laut

Klorida merupakan salah satu ion yang terkandung dalam air laut dan bersifat korosif sehingga perlu dipelajari bagaimanakah laju penetrasinya ke dalam beton untuk mengetahui tindakan yang tepat untuk menanganinya

Banyak penelitian telah dilakukan untuk mengetahui bagaimanakah laju penetrasi dari klorida tersebut ke dalam beton namun hasil ini tidak menutup kemungkinan terhadap kesalahan maka dari itu perlu untuk dianalisis ulang menggunakan metode lainnya

Salah satu Metode analisis yang dapat dipakai untuk bisa memodelkan difusi antar zat dalam proses penetrasi ini adalah *error function* selain itu metode ini juga bisa meminimalkan kesalahan perhitungan yang mungkin terdapat karena berbagai macam faktor

3.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya maka permasalahan utama yang dapat diidentifikasi adalah bagaimanakah analisis ulang penetrasi klorida ke

dalam beton menggunakan metode *error function* beserta parameter apa sajakah yang terkait dengannya

3.3 Hipotesis

Berdasarkan dari permasalahan tersebut maka dibuatkanlah hipotesis yaitu metode *error function* dapat menggambarkan profil kadar klorida pada interval kedalaman tertentu sesuai data eksperimental jika koefisien difusi dan kadar klorida permukaannya akurat.

3.4 Rumusan Masalah

1. Bagaimanakah hasil analisis penetrasi klorida ke dalam beton bertulang menggunakan metode *error function*?
2. Parameter apa sajakah yang terkait dengan penetrasi klorida ke dalam beton?
3. Bagaimana kesesuaian antara hasil analisis dengan metode *error function* ini dibandingkan dengan uji eksperimental?

3.5 Batasan Masalah

Permasalahan akan dibatasi pada kadar klorida pada setiap interval kedalaman beton tertentu dengan data berasal dari jurnal dan thesis penelitian yang sudah ada dan dianalisis menggunakan metode *error function* untuk melihat kesesuaiannya.

3.6 Tujuan

1. Memahami penetrasi klorida ke dalam beton bertulang menggunakan metode *Error Function*.
2. Mengetahui Parameter yang terkait dengan penetrasi klorida ke dalam beton.
3. Membandingkan kesesuaian antara hasil analisis dengan metode *error function* ini dibandingkan dengan uji eksperimental.

3.7 Manfaat

Penelitian ini diharapkan akan bermanfaat sebagai referensi bagi para praktisi maupun ilmuwan sebagai pengetahuan tambahan mengenai bagaimanakah laju penetrasi dari klorida ke dalam beton serta parameter terkait sehingga dapat diambil tindakan pencegahan maupun penanganan untuk menjaga stabilitas dari struktur beton bertulang.

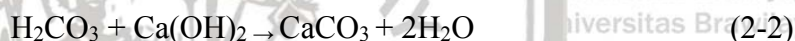
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penyebab Korosi

Penyebab korosi yang utama adalah klorida dan karbon namun mereka tidak mempengaruhi korosi secara langsung karena ada factor lainnya seperti zat kimia tertentu dalam beton dan rongga. baja tulangan akan berkarat jika dibiarkan di udara bebas namun tidak dalam beton karena beton bersifat alkaline yang melindungi baja namun penetrasi dari klorida yang bersifat asam dapat menghancurkan lapisan perlindungan dan memulai proses korosi (El-Reedy, 2018).

2.1.1 Karbonasi

Karbonasi merupakan hasil dari reaksi antara karbon dioksida di udara dan kalsium hidroksida pada beton yang menghasilkan kalsium karbonat seperti pada persamaan 2-1 dan 2-2.



Keberadaan kalsium hidroksida meningkat derajat keasaman menjadi pH 12-13 yang bergantung dari kedalaman dari permukaan. Terlihat dari persamaan 2-1 bahwa reaksi dari karbon dioksida dan hidrogen akan menghasilkan H_2CO_3 yang akan bereaksi lagi dengan kalsium hidroksida seperti pada persamaan 2-2 menghasilkan kalsium karbonat. karbonat inilah yang akan memicu reaksi karbonasi dan merusak beton (El-Reedy, 2018).

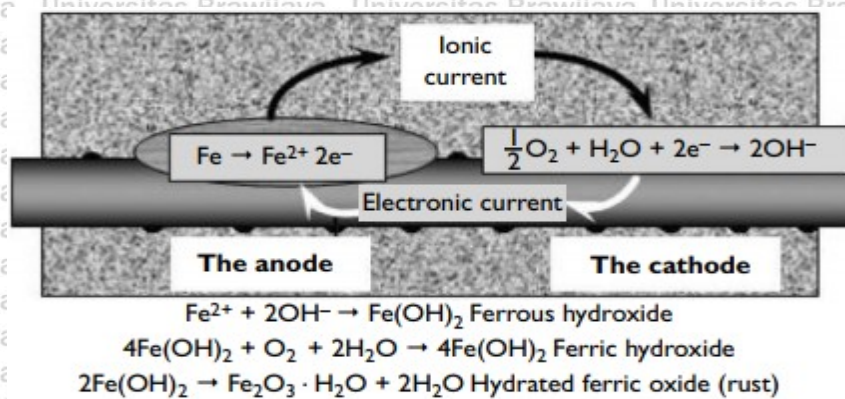
2.1.2 Klorida

Klorida merupakan salah satu asam dengan derajat keasaman kurang dari 7 dan bersifat asam sehingga ketika bereaksi dengan logam akan menghasilkan karat. Klorida bisa menyerang beton dari dalam dan luar. dari dalam ketika proses pengecoran atau casting. dari luar yaitu dari udara maupun air laut. (El-Reedy, 2018)

Laju klorida cenderung menjadi konstan seiring berjalannya waktu dan meningkat pada temperatur tinggi yaitu 400 sampai 800 derajat celcius yang berarti bahwa korosi juga dapat terjadi pada suhu yang panas (Sequiera, 2019).

2.2 Proses Terjadinya Korosi

Ketika klorida berhasil menembus lapisan beton dan bertemu dengan lapisan besi maka akan mulai proses pembentukan karat melalui reaksi kimia seperti pada gambar 2.1 dimana batang besi terbagi menjadi anoda dan katoda yang selanjutnya menyebabkan perubahan volume besi menjadi lebih besar sehingga muncul keretakan pada beton (Broomfield,2007)



Gambar 2.1 Reaksi kimia pada korosi
Sumber: Broomfield, 2007

Gambar 2.1 menjelaskan proses terjadinya korosi dimana ketika lapisan pelindung beton sudah rusak maka akan timbul karat yang dimulai dari besi melepaskan 2 elektron ($2e^{-}$) yang kemudian elektron tersebut bereaksi dengan air dan oksigen membentuk ion basa hidroksil (OH^{-}) kemudian ion hidroksil ini kembali bereaksi dengan besi juga dilanjutkan dengan reaksi oksigen dan air sampai akhirnya membentuk karat (*Rust*) (Broomfield,2007)

2.3 Difusi

Difusi adalah proses pertukaran partikel karena pergerakannya secara spontan akibat dari perubahan temperature yang merupakan hal yang umum terjadi di alam dan pernah diteliti oleh banyak orang termasuk Einstein dan Fick (Sequiera, 2019)

Fick juga menghasilkan beberapa hukum mengenai difusi ini yang pertama mengatur tentang flux dengan konsentrasi dari zat yang dirumuskan sebagai :

$$J = -D \text{ grad } C \quad (2-3)$$

Dengan:

J = jumlah flux dalam satuan berat tertentu

D = Koefisien difusi

C = konsentrasi zat dalam satuan berat

Persamaan 2-3 merupakan hukum pertama dari Fick yang menjelaskan bahwa jumlah flux zat yang berdifusi bergantung kepada koefisien difusi dan konsentrasi zatnya.

Selanjutnya dengan mengingat persamaan kontinuitas untuk laju atom dalam volume tertentu maka kita dapatkan rumus: (Sequiera, 2019)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\text{div } J \quad (2-4)$$

Dimana:

t = waktu yang ditinjau

Dengan mensubstitusikan nilai J dari persamaan 2-3 ke dalam persamaan 2-4 maka akan kita dapatkan hukum Ficks kedua : (Sequiera, 2019)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \text{div}(D \text{ grad } C) \quad (2-5)$$

Dalam bukunya Sequiera juga menjelaskan bahwa untuk kasus difusi satu dimensi maka persamaan menjadi :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (2-6)$$

Dengan :

x = jarak dari permukaan

Jika koefisien difusi (D) tidak bergantung kepada jarak (x) maka bisa diubah lagi rumusan 2-6 menjadi persamaan diferensial parsial berbentuk : (Sequiera, 2019)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2-7)$$

Persamaan 2-7 inilah yang umum dipakai dalam jurnal penelitian untuk memodelkan difusi dari klorida ke dalam beton termasuk pada penelitian ini juga memakai persamaan tersebut dengan menganggap bahwa koefisien difusi tidak bergantung kepada jarak yang nantinya untuk mendapatkan solusi digunakanlah rumusan *Error Function*

2.2 Error Function

Dalam menyelesaikan persamaan 2-4 yaitu hukum ficks kedua untuk kasus difusi satu dimensi maka bisa memakai fungsi kesalahan atau error function yang didefinisikan sebagai integral dari bilangan eksponensial dikalikan dengan angka 2 lalu dibagi dengan akar dari phi seperti pada persamaan 2-8 dan 2-9 berikut ini: (Sequiera, 2019)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) = 1 - \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (2-8)$$

$$\text{erf}(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y e^{-y^2} dy \quad (2-9)$$

Dimana:

$$y = \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$$

e = eksponen bilangan natural

$\text{Erf}(y)$ = *error function* suatu *variable*

D = koefisien difusi

t = waktu

Persamaan 2-9 menunjukkan bahwa *error function* merupakan integral terhadap y dimana nilai dari variabel y bergantung kepada kedalaman, koefisien difusi dan waktu.

Selanjutnya dari nilai *error function* dari persamaan 2-8 dikalikan dengan kadar klorida awal bisa didapatkan kadar klorida dengan persamaan 2-9 :

$$C = C_s \left(1 - \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)\right) \quad (2-10)$$

Dimana:

C_s = kadar klorida permukaan

C = kadar klorida yang ditinjau

Persamaan 2-10 akan dipakai untuk mendapatkan nilai dari kadar klorida pada setiap interval kedalaman tertentu.

2.5 Hasil Uji Eksperimental

Uji eksperimental menggunakan specimen dengan data *mix design* tercantum dalam tabel 2.1 dengan total ada 13 jenis variasi *mix design* sampel (Shill,2014). tetapi yang akan dipakai sebagai sampel dalam penelitian ini hanyalah nomor 1 sampai 3 yaitu pada sampel DCL1, DCL2 dan DCL3.

Tabel 2.1
Mix Design Beton

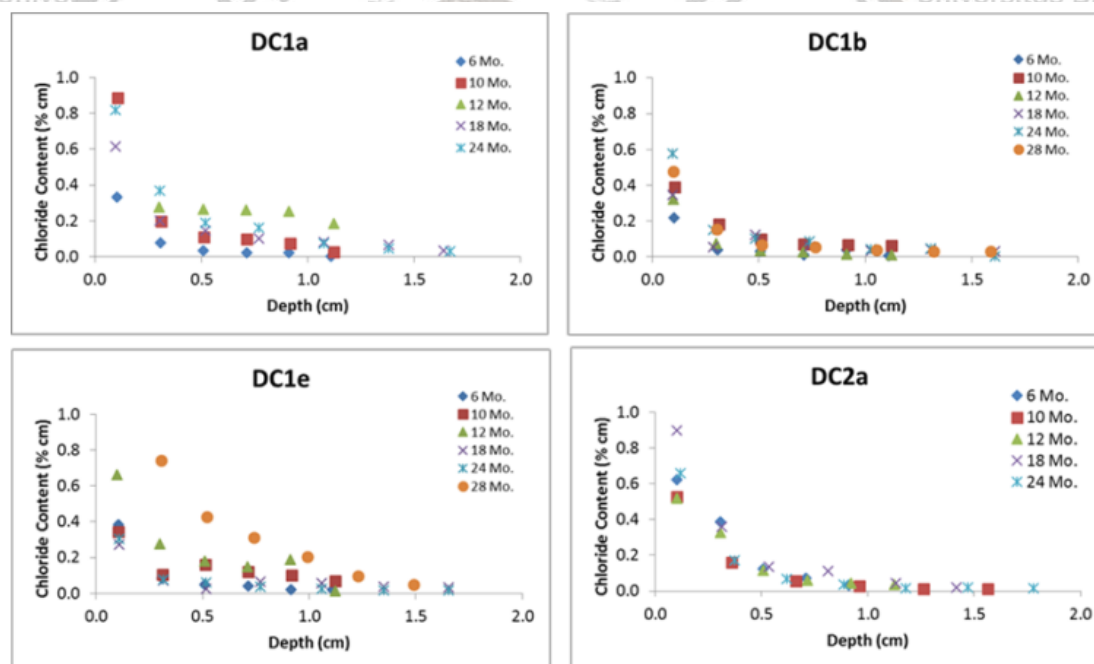
Table 2 – Concrete mix designs.

Sample	Density kg/m ³	Cement Content kg/m ³	Cementitious Content kg/m ³	Water/ Cement Ratio	Fine agg. kg/m ³	Coarse agg. kg/m ³
DCL1	2242.29	312.30	390.38	0.35	1062	653
DCL2	2220.54	312.30	390.38	0.41	949	721
DCL3	2186.97	312.03	390.04	0.47	918	697
DCL4	2232.56	281.07	390.38	0.35	1062	653
DCL5	2210.05	281.07	390.38	0.41	949	721
DCL6	2178.45	281.07	390.38	0.47	918	697
DCL7	2246.90	196.17	392.35	0.35	1062	653
DCL8	2224.00	195.19	390.38	0.41	949	721
DCL9	2191.10	195.19	390.38	0.47	918	697
DCL10	2246.21	267.69	334.61	0.41	765	1007
DCL10a	2246.24	267.69	334.61	0.41	765	1007
DCL10b	2244.46	267.69	334.61	0.41	765	1007
DCL11	2248.84	245.38	306.72	0.41	765	1009

Sumber: Shill, 2014

Terlihat dalam tabel 2.1 yaitu *mix design* beton memiliki komponen didalamnya berupa rapat massa (*density*) yaitu berat dibagi volumenya, dan yang paling penting adalah kadar semen (*Cementitious Content*) karena nantinya akan dipakai sebagai pembagi untuk konversi ke persen massa semen dengan notasi (% cm) selanjutnya ada faktor air semen (*Water cement ratio*) yaitu perbandingan antara kadar air dengan semen dalam beton yang menunjukkan banyaknya kadar air yang digunakan, terakhir adalah agregat yang dapat dibagi 2 yaitu agregat halus (*fine aggregate*) seperti pasir dan agregat kasar (*Coarse Aggregate*) seperti kerikil yang keduanya dinyatakan dalam satuan kg/m^3

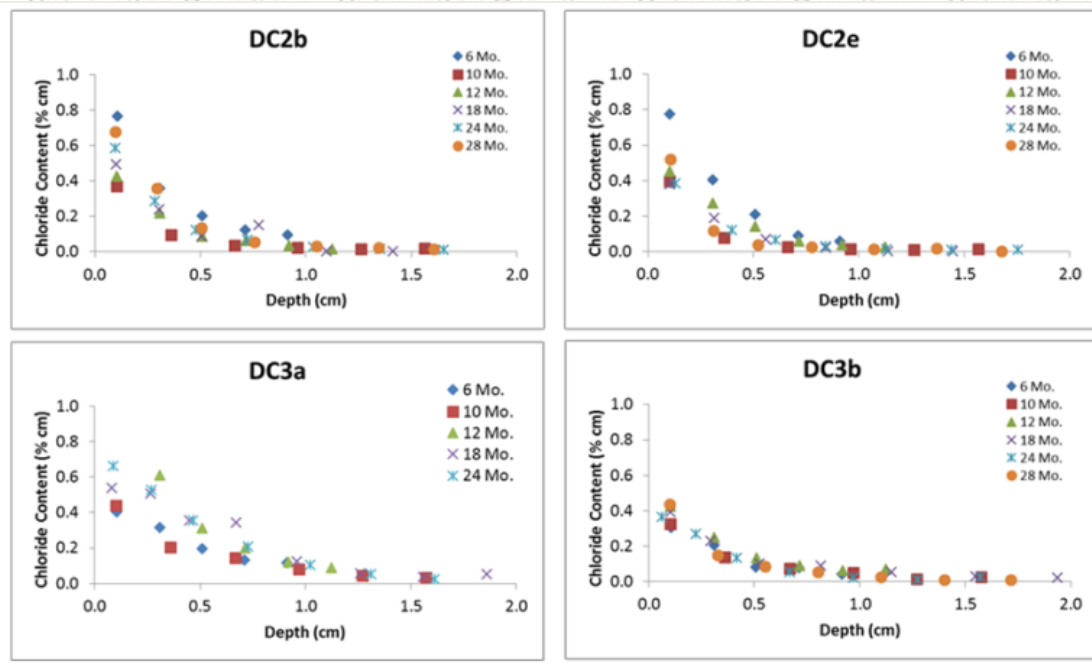
Data eksperimental yang disajikan pada gambar 2.2 sampai 2.4 menunjukkan kadar klorida dalam persen massa pada setiap kedalaman dalam centimeter dari berbagai sampel yang nantinya akan dipakai sebagai data uji eksperimental. Kode indeks dibelakang kata DC- menunjukkan area dari eksperimen itu dilakukan, kode a menunjukkan area pagar, kode b mewakili area barat dan kode e adalah kode timur yang akan dijelaskan lebih detail kondisi lingkungannya pada gambar 3.2 (Shill, 2014)



Gambar 2.2 Data kadar klorida DC1A,DC1B,DC1E dan DC2A

Sumber: Shill, 2014

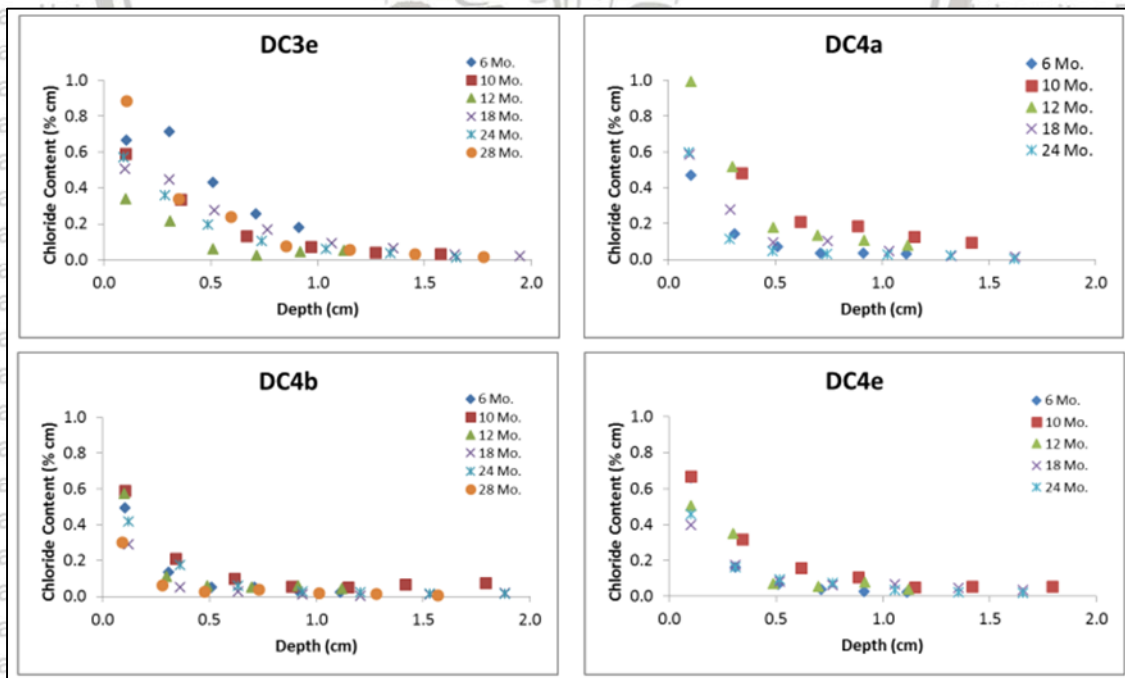
Gambar 2.2 menunjukkan data kadar klorida dari 4 sampel yaitu DC1A, DC1B, DC1E, dan DC2A dimana terlihat dari grafik bahwa kadar klorida tertinggi dimiliki oleh sampel DC1A dan jika dibandingkan dengan sampel DC2A maka terlihat bahwa kadar klorida pada sampel tipe DC1A lebih tinggi.



Gambar 2.3 Data kadar klorida DC2A, DC2E, DC3A, dan DC3B

Sumber: Shill, 2014

Gambar 2.3 menunjukkan data kadar klorida dari sampel DC2A, DC2E, DC3A, dan DC3B dengan kadar klorida tertinggi dimiliki oleh sampel DC2B dan grafik menunjukkan kecenderungan bahwa kadar klorida akan berkurang semakin bertambahnya kedalaman dari permukaan.



Gambar 2.4 Data kadar klorida DC3E,DC4A,DC4B, DAN DC4E

Sumber: Shill, 2014

Gambar 2.4 menunjukkan Data Kadar Klorida DC3E, DC4A, DC4B, dan DC4E dimana terlihat bahwa kadar klorida tertinggi dimiliki oleh sampel DC3E dan DC4A namun jika melihat pada kedekatan data maka sampel DC3E memiliki jarak antar data yang lebih dekat juga disini terlihat bahwa kecenderungan tetap sama yaitu menurun.

Dari gambar 2.2 sampai 2.4 terlihat Waktu total eksperimen secara umum adalah 28 bulan namun pada sampel dengan kode a maka waktunya hanya 24 bulan saja. (Shill, 2014)

2.6 Hasil Pemanding

Total sampel ada 6 dengan variasi faktor air semen yang digunakan dalam 2 kondisi yaitu 40 dan 60 persen beserta spesimen sudah di *curing* selama 28 hari. Kandungan garam di udara dinyatakan dalam milligram per desimeter per hari. (Nuralinah, 2013)

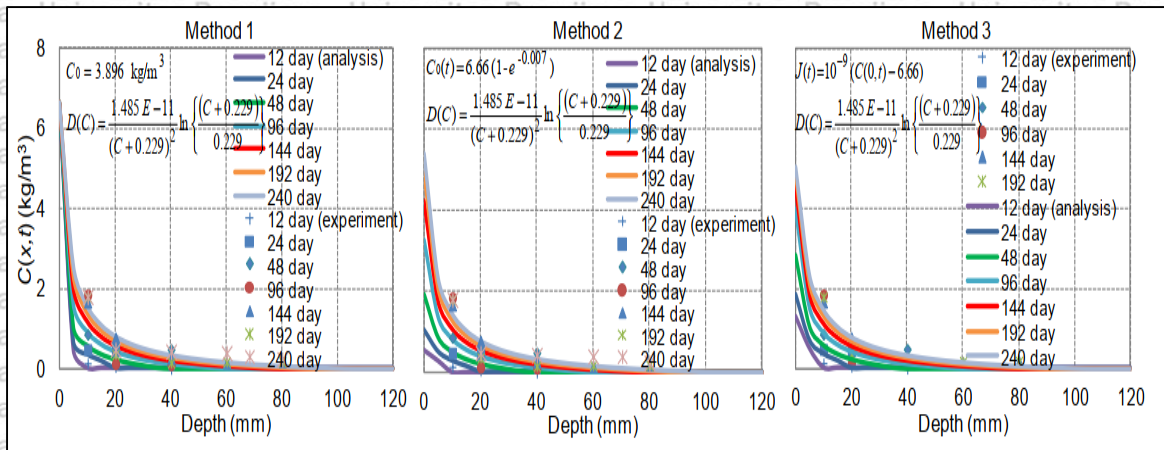
Tabel 2.2
Kondisi Spesimen

Specimen	W/C (%)	Airborne salt (mdd)
H-40	40	60.6
M-40	40	14.7
L-40	40	4.9
H-60	60	68.2
M-60	60	15.2
L-60	60	5

Sumber: Nuralinah, 2013

Dari tabel 2.2 terlihat kandungan garam di udara tertinggi dari 6 spesimen dimiliki oleh spesimen H-60 sebesar 68.2 dan terendah pada L-60 sebesar 5 mdd yaitu *miligram /desimeter / day*. Juga indeks nomor dibelakang huruf menunjukkan faktor air semen yang digunakan. ada 3 spesimen berlambangkan huruf H, M dan L dimana terlihat bahwa sampel dengan *water content* (W/C) 60 % memiliki kandungan garam yang lebih banyak dibandingkan dengan sampel dengan faktor air semen 40 %.

Gambar 2.2 menunjukkan Penelitian terdahulu untuk menggambarkan kadar klorida dalam kg/m^3 pada setiap millimeter kedalaman yang dihitung dengan 3 metode dengan metode pertama dianggap kadar klorida permukaannya konstan, sedangkan pada metode kedua kadar klorida permukaannya berubah terhadap waktu dan metode ketiga terakhir memakai kadar klorida menjadi persamaan (Nuralinah, 2012).

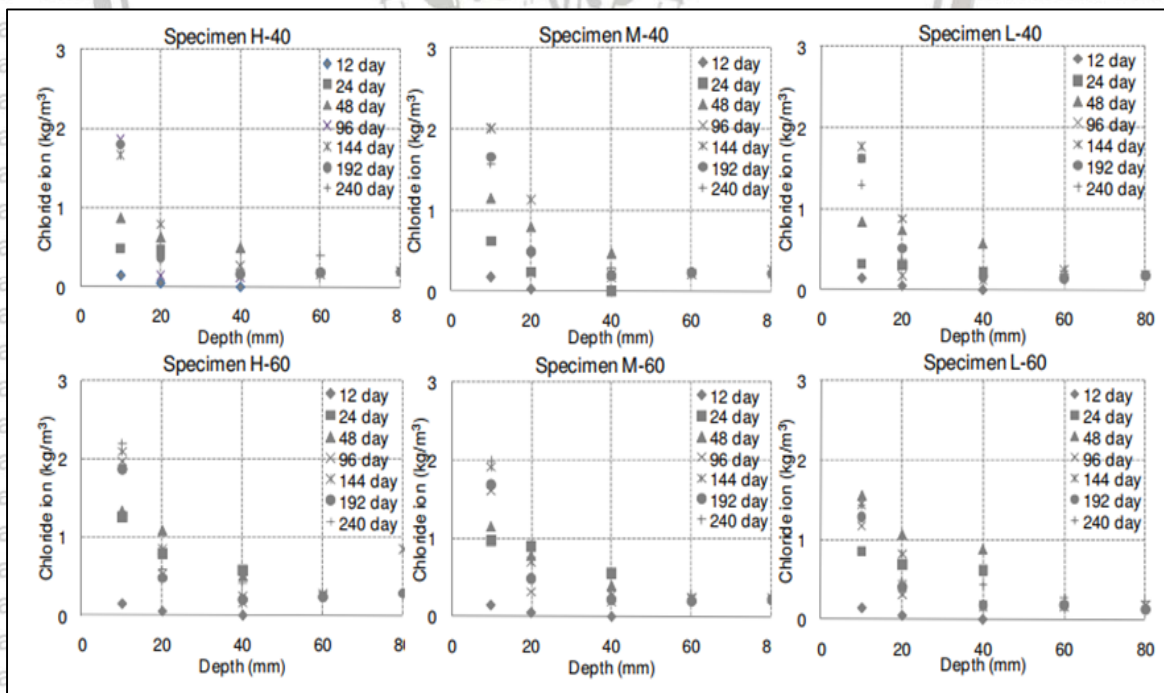


Gambar 2.5 Profil klorida terhadap waktu H-40 dengan 3 metode

Sumber: Nuralinah, 2012

Dari berbagai metode yang disajikan pada gambar 2.5 terlihat bahwa tidak ada perbedaan signifikan atau mencolok sehingga hanya disajikan hasil dari sampel H-40 sebagai perwakilan. Simbol bentuk seperti persegi, lingkaran dan sebagainya melambangkan data dari hasil eksperimen selama 240 hari sedangkan garis melambangkan hasil dari analisis dengan berbagai kondisi batas. (Nuralinah, 2012)

Waktu total penelitian adalah 240 hari atau sekitar 8 bulan dengan data eksperimen disajikan pada gambar 2.6 berupa Data kadar klorida terhadap waktu dan kedalaman. satuan kadar klorida dalam kg/m^3 sedangkan kedalaman dalam millimeter (Nuralinah, 2013).

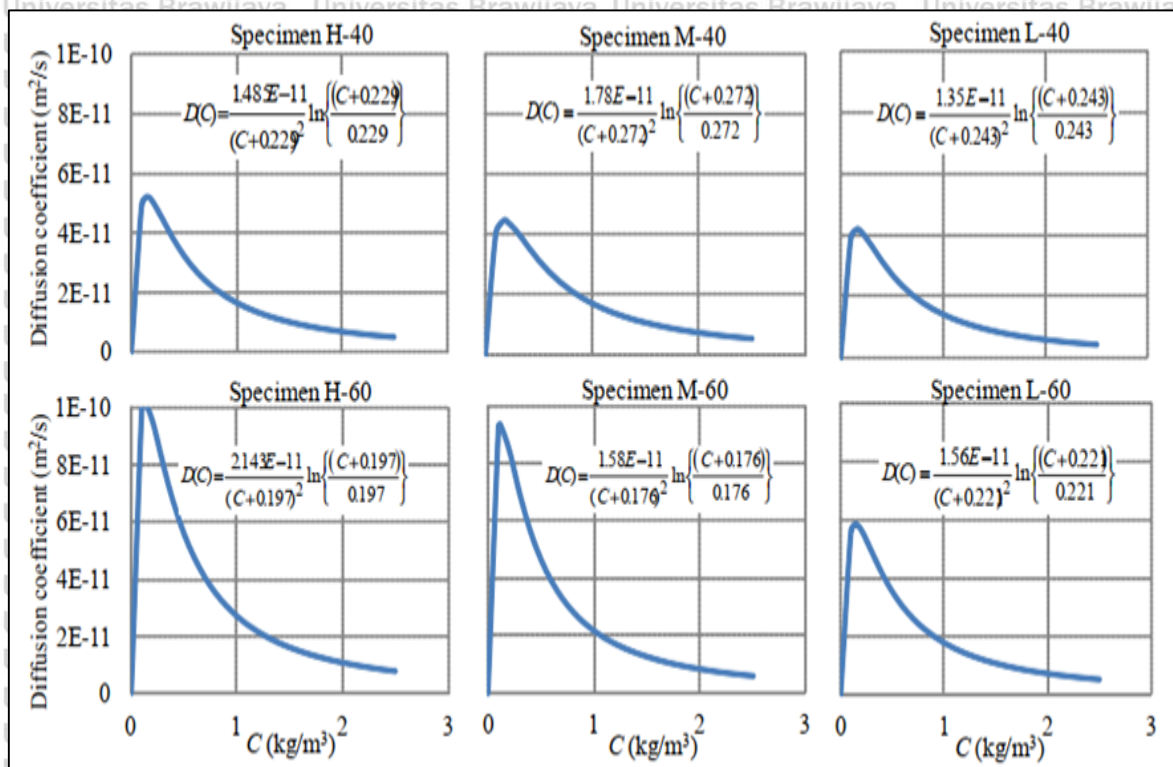


Gambar 2.6 Data kadar klorida terhadap waktu dan kedalaman

Sumber: Nuralinah, 2013

Gambar 2.6 menunjukkan bahwa data ditinjau 7 kali pada waktu 12, 24, 48, 96, 144, 192, dan 240 hari yang secara umum pola waktunya adalah kelipatan 2 dari waktu sebelumnya dan terlihat bahwa kadar klorida sampel memiliki hasil yang mirip dan polanya cenderung untuk turun seiring bertambahnya kedalaman

Koefisien difusi gambar 2.7 didapatkan melalui metode Stefan-Boltzman Matano dalam m^2/s yang nilainya bergantung pada kadar klorida dari gambar 2.6 (Nuralinah, 2012).



Gambar 2.7 Koefisien difusi terhadap klorida
Sumber : Nuralinah, 2012

Gambar 2.7 menunjukkan bahwa koefisin difusi memiliki kecenderungan untuk turun setelah mencapai puncaknya kadar klorida sekitar $0,1 \text{ kg/m}^3$. Semakin besar kadar kloridanya maka koefisien difusi akan menurun. Koefisien difusi paling besar dimiliki oleh spesimen H-60 terlihat dari grafik (Nuralinah, 2012).

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan analisis dari studi literatur dengan data yang berasal dari jurnal dan uji eksperimental terdahulu yang kemudian dianalisis ulang dengan metode *error function* untuk melihat kesesuaiannya hasilnya.

3.2 Data penelitian

Total sampel pada uji eksperimental adalah 42 dengan 14 jenis variasi *mix design* seperti pada tabel 2.1 pada 3 lokasi namun pada analisis ini hanya diambil 3 sampel karena keterbatasan waktu yaitu nomor 1 sampai 3 pada setiap lokasi menghasilkan total 9 sampel. (Shill, 2014)

3.2.1 Data *Mix Design* sampel

Data dari kadar komposisi beton sampel yang perlu diperhatikan terutama pada cementitious content atau persen massa semennya karena akan mempengaruhi perhitungan selanjutnya dari kadar klorida permukaan.

Tabel 3.1
Mix Design Beton

Sampel	rapat massa	cement content	cementitious content	faktor air semen	Agregat halus	Agregat Kasar
	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	rasio	kg/m ³	kg/m ³
DC1	2242.29	312.3	390.38	0.35	1062	653
DC2	2220.54	312.3	390.38	0.41	949	721
DC3	2186.97	312.3	390.04	0.47	918	697

Sumber: Shill, 2014

Dari tabel 3.1 bisa dilihat bahwa sampel dengan faktor air semen terbesar adalah pada sampel DC3 sebesar 0.47 dan mempunyai jumlah agregat halus dan kasar relatif lebih kecil dari sampel lainnya. secara umum kadar semen (*Cementitious Content*) dari ketiga jenis sampel adalah mirip yaitu berada pada kisaran 390 kg/m³. faktor air semen terkecil sebesar 0.35 dimiliki oleh sampel DC1 dan mempunyai agregat halus yang paling banyak.

3.2.2 Konsentrasi Klorida di Permukaan

Konsentrasi klorida permukaan dinyatakan dalam kg/m³ dengan total waktu dari hasil eksperimental adalah 28 bulan namun khusus untuk sampel kode A pada lokasi pagar hanya

sampai 24 bulan. Kode A, B dan E menunjukkan lokasi dari eksperimen yaitu berturut turut adalah pagar, barat dan timur. Waktu peninjauan eksperimen secara umum ada 7 yaitu saat 6, 10, 12, 18, 24 dan 28 bulan. Konsentrasi klorida permukaan menunjukkan banyaknya klorida yang terakumulasi di permukaan dan nantinya akan mempenetrasi ke dalam beton secara perlahan.

Tabel 3.2
Konsentrasi Klorida di Permukaan (Cs) dalam kg/m^3

Konsentrasi Klorida di Permukaan (Cs) dalam (kg/m^3)						
Waktu (Bulan)	6	10	12	18	24	28
Sample	Cs (kg/m^3)					
DC1A	2.12	5.47	11.76	3.11	3.85	
DC2A	3.14	2.84	2.58	4.63	3.85	
DC3A	1.79	1.89	6.52	2.44	2.93	
DC1E	2.46	1.15	2.86	1.74	1.83	4.17
DC2E	3.77	2.42	2.19	1.92	2.14	3.35
DC3E	3.28	2.74	1.81	2.32	2.6	2.43
DC1B	1.62	1.87	2.05	2.13	3.3	2.71
DC2B	3.67	2.1	2.13	2.39	2.92	3.43
DC3B	1.45	1.53	2.02	1.82	1.65	2.23

Sumber: Shill, 2014

Konsentrasi klorida permukaan terbesar dari tabel 3.2 tersebut dimiliki oleh sampel DC1A pada waktu 12 bulan sebesar $11,76 \text{ kg/m}^3$ namun pada bulan berikutnya menurun drastis menjadi $3,11 \text{ kg/m}^3$ jika meninjau per tipe sampel maka Konsentrasi klorida permukaan terbesar dari sampel DC2 dimiliki oleh sampel DC2A pada 18 bulan memiliki nilai $4,63 \text{ kg/m}^3$ sedangkan Konsentrasi klorida permukaan terbesar dari sampel DC3 yaitu pada saat 12 bulan pada sampel DC3A sebesar $6,52 \text{ kg/m}^3$ secara umum dapat disimpulkan bahwa area A yaitu lokasi pagar memberikan Konsentrasi klorida permukaan terbesar.

3.2.3 Koefisien Difusi

Koefisien difusi dinyatakan dalam $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ dengan lama waktu eksperimental 28 bulan namun khusus untuk sampel kode A pada lokasi pagar hanya 24 bulan. waktu peninjauan eksperimen secara umum ada 7 yaitu saat 6, 10, 12, 18, 24, dan 28 bulan. Koefisien difusi adalah laju dari banyaknya klorida yang dapat masuk ke dalam luasan beton setiap satuan waktu.

Tabel 3.3
Koefisien Difusi (D) dalam 10^{-12} m²/s

Waktu (Bulan)	Koefisien Difusi (D) dalam 10^{-12} m ² /s					
	6	10	12	18	24	28
Sample	Koefisien Difusi (D) 10^{-12} m ² /s					
DC1A	0.12	0.64	0.05	0.09	0.11	
DC2A	0.47	0.16	0.24	0.1	0.06	
DC3A	1.42	0.48	0.24	0.62	0.34	
DC1E	0.12	0.89	0.32	0.04	0.04	0.31
DC2E	0.49	0.09	0.28	0.12	0.08	0.02
DC3E	1.82	0.58	0.21	0.47	0.02	0.22
DC1B	0.08	0.28	0.06	0.04	0.04	0.04
DC2B	0.49	0.12	0.2	0.14	0.09	0.07
DC3B	0.64	0.32	0.36	0.17	0.13	0.06

Sumber: Shill, 2014

Berdasarkan tabel 3.4 terlihat bahwa koefisien difusi terbesar dimiliki oleh sampel DC1E pada waktu 10 bulan sebesar $0,89 \times 10^{-12}$ m²/s. jika ditinjau berdasarkan tipe sampelnya maka untuk sampel bertipe DC2 koefisien difusi terbesar ketika 6 bulan sebesar $0,49 \times 10^{-12}$ m²/s yang dimiliki sampel DC2E dan DC2B. sedangkan untuk sampel bertipe DC3 koefisien difusi terbesar saat 6 bulan sebesar $1,82 \times 10^{-12}$ m²/s. maka dapat disimpulkan bahwa area E yaitu lokasi timur memberikan koefisien difusi terbesar.

3.3 Tahapan Metode penelitian

Tahapan metode yang dilakukan dalam penelitian ini adalah pertama mengumpulkan data kemudian analisis lalu membandingkan hasilnya untuk mendapatkan kesimpulan yang lebih lanjut diurai dalam sub-bab 3.4.1 sampai 3.4.4.

3.3.1 Studi Pustaka dan Literatur

Merupakan tahapan pertama untuk awal memulai penelitian dengan mengumpulkan data data dari jurnal maupun uji eksperimental lainnya yang berkaitan dengan penetrasi klorida ke dalam beton untuk mendapatkan informasi serta data yang cukup untuk dianalisis juga didampingi dengan membaca buku sebagai landasan teori.

3.3.2 Analisis dengan Metode *Error Function*

Berbagai Data yang telah dikumpulkan meliputi konsentrasi klorida permukaan (Cs), koefisien difusi (D), dan sebagainya kemudian dianalisis dengan fungsi kesalahan (*Error Function*) melalui perangkat lunak *Microsoft Excel Worksheet* untuk mendapatkan penetrasinya kadar klorida pada setiap interval kedalaman tertentu.

3.3.3 Perbandingan Kesesuaian

Hasil perhitungan kemudian digambarkan dalam grafik maupun ditulis dalam tabel untuk dibandingkan dengan uji eksperimental dari laboratorium maupun lapangan untuk melihat bagaimana kesesuaiannya serta parameter apakah yang mempengaruhi penetrasi kadar klorida ke dalam beton. Jika hasil analisis dan uji ekperimental berbeda jauh maka akandibandingkan dengan eksperimen lainnya kemudian dianalisis perbedaannya.

3.3.4 Hasil dan Kesimpulan

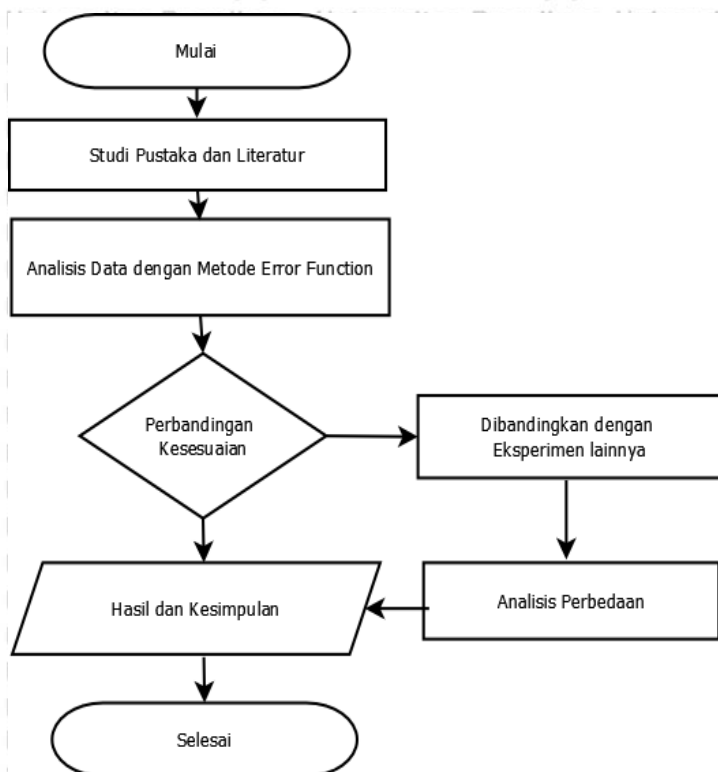
Jika sesuai maka Hasil Analisis langsung disajikan dalam tabel dan grafik untuk memudahkan penyampaian dan setelah perbandingan dapat disimpulkan tentang bagaimanakah karakteristik penetrasi klorida ke dalam beton yaitu meliputi parameter apakah yang mempengaruhi dan bagaimanakah kesesuaian hasil analisis dengan uji eksperimental.

3.3.5 Analisis Perbedaan

Jika hasil tidak sesuai atau perbedaannya signifikan maka hasil analisis dibandingkan dengan eksperimen lainnya kemudian menganalisis perbedaannya untuk mengetahui apa yang menyebabkan perbedaan antara hasil analisis dengan uji eksperimental baru kemudian dibuat kesimpulannya.

3.4 Diagram Alir Penelitian

Berdasarkan tahapan penelitian yang telah diuraikan sebelumnya maka dibuatkan diagram alir seperti pada gambar 3.1 untuk memudahkan pemahaman.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

Gambar 3.1 menggambarkan diagram alir dari tahapan yang sudah dijelaskan pada subbab 3.4.1 sampai 3.4.4 dan pada intinya adalah mengumpulkan data, kemudian menganalisis dan membandingkan hasilnya yang jika sesuai maka langsung kepada kesimpulan sedangkan jikalau tidak maka dibandingkan dengan eksperimen lainnya kemudian dianalisis perbedaannya sebelum menghasilkan kesimpulan.

3.5 Waktu Pemaparan

Waktu pemaparan dihitung dari tanggal pemboran spesimen untuk mendapatkan kadar klorida dan sebagainya dicantumkan dalam tabel 3.4 dengan *exposure date* adalah tanggal awal eksperimen sedangkan *coring date* adalah tanggal pemboran (Shill, 2014).

Tabel 3.4
Waktu Pemaparan dan tanggal Pemboran

Mix	Exposure Date	1st Coring Date	2nd Coring Date	3rd Coring Date	4th Coring Date	5th Coring Date	6th Coring Date
DCL1	1/9/2012	7/7/2012	10/5/2012	1/3/2013	7/10/2013	1/2/2014	4/10/2014
DCL2	11/1/2011	4/29/2012	8/27/2012	10/26/2012	5/2/2013	10/10/2013	2/28/2014
DCL3	11/18/2011	5/16/2012	9/13/2012	11/12/2012	7/31/2013	10/29/2013	3/6/2014

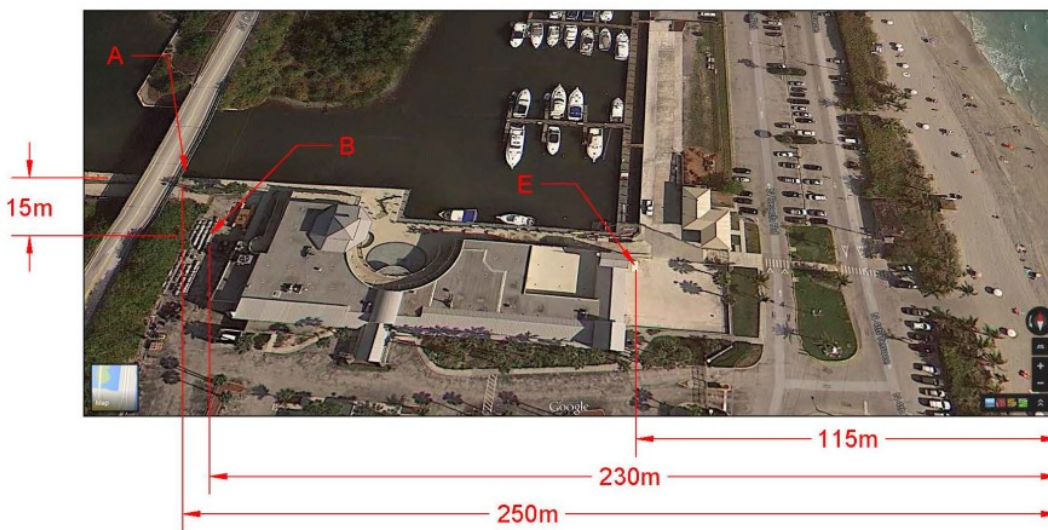
Sumber: Shill, 2014

Perlu diingat bahwa format tanggal yang digunakan mengikuti format internasional dimana bulan disebutkan terlebih dahulu sebelum tanggal yang merupakan kebalikan dari yang biasanya digunakan di Indonesia . jadi contoh pembacaan yang benar dari 1/9/2012 pada tabel adalah tanggal 9 bulan 1 tahun 2012 kemudian untuk 11/1/2011 adalah tanggal 1 bulan 11 tahun 2011 bukan sebaliknya.

Musim dimana pemboran dilakukan antar sampel berbeda disebabkan oleh perbedaan tanggal namun waktu pemaparannya relatif sama. perbedaan tanggal dikarenakan banyaknya sampel di 3 lokasi yang berbeda sehingga tidak mungkin diambil dalam waktu bersamaan maka dibuatkanlah jadwal seperti pada tabel 3.4 (Shill,2014).

3.6 Kondisi Uji Eksperimental

Berbagai jenis sampel pada tabel 3.1 diletakkan pada 3 lokasi yang berbeda dengan kode A melambangkan area pagar (*fence*) di dekat sungai *Intracoastal Waterway* (ICW). kode B mewakili area barat sedangkan kode E mewakili area timur dengan sketsa lokasi diperoleh dari satelit pada gambar 3.2. (Shill, 2014)



Gambar 3.2 Lokasi sampel di SeaTech, Dania Beach florida
Sumber: Shill, 2014

Terlihat pada gambar selain kondisi lingkungan sekitar juga ada data berupa jarak dari pantai maupun sungai seperti pada lokasi A jaraknya paling jauh dari pantai sebesar 250 m, lokasi B berjarak 230 m dari pantai namun didekatnya sejauh 15 m ada sungai *Intracoastal Waterway* (ICW). dan terakhir lokasi E terletak paling dekat 115 m dari pantai. juga bangunan *SeaTech* terletak di antara lokasi B dan E yang kemungkinan menghalangi angin bergantung dari arah orientasinya. (Shill, 2014)

3.7 Orientasi Sampel



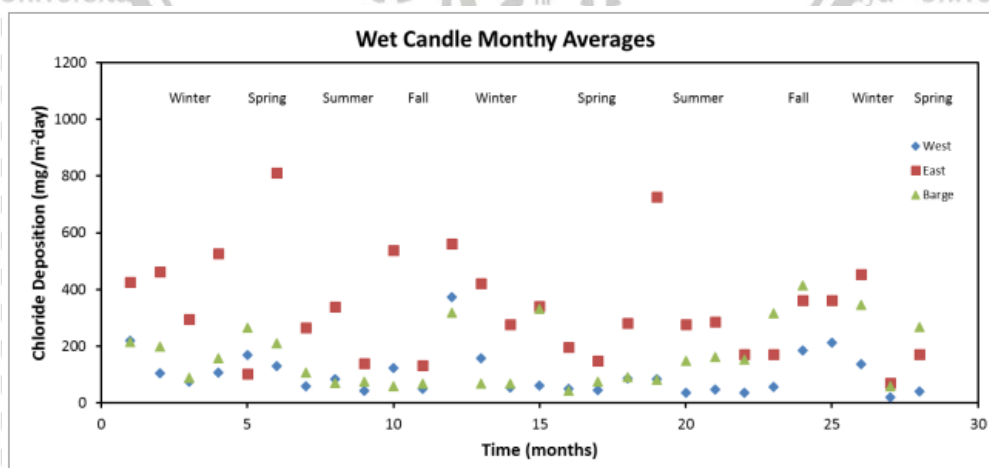
Gambar 3.3 Orientasi Sampel lokasi A (kiri), B (tengah) dan E (kanan)

Sumber: Shill, 2014

Selain lokasi yang berbeda juga dapat dilihat pada gambar 3.3 bahwa posisi orientasi juga bervariasi terlihat dari gambar paling kiri lokasi A terlihat pagar dari *Intracoastal Waterway* (ICW) beserta sampel diletakkan secara horizontal dan vertikal dan diletakkan di tanah sedangkan pada gambar 3.3 tengah sampel lokasi B diletakkan di rak setinggi 1 m dengan orientasi sampel horizontal dengan permukaan menghadap langit, terakhir pada gambar paling kanan merupakan lokasi E dengan orientasi sampel vertikal dengan permukaan menghadap ke laut. (Shill, 2014)

3.8 Pengaruh Iklim dan Musim

Iklim dan musim juga mempengaruhi uji eksperimental dengan hubungan antara musim dengan deposit klorida yang dinyatakan dalam $\text{mg}/\text{m}^2/\text{hari}$ terdapat pada *wet candle* yaitu alat yang digunakan untuk mengukur klorida dengan hasil terhadap waktu ada dalam gambar 3.4 (Shill, 2014).



Gambar 3.4 Pengaruh iklim dan musim terhadap deposit klorida

Sumber: Shill, 2014

Terlihat pada gambar 3.4 bahwa siklus musim dimulai dari musim dingin (*winter*) kemudian musim semi (*spring*) lalu ke musim panas (*summer*) diakhiri musim gugur (*fall*) dan kembali lagi ke musim dingin. dengan keterangan notasi *West* merupakan lokasi barat kode B pada eksperimen, *East* adalah kode E di timur dan *Barge* adalah kode A didekat pagar. (Shill, 2014)

Gambar 3.4 menunjukkan bahwa lokasi timur dengan kode E memiliki deposit klorida tertinggi dibandingkan lokasi lainnya sedangkan yang terendah adalah lokasi barat dengan kode B pada eksperimen. lebih lanjut terlihat bahwa kecenderungan deposit klorida bergantung kepada waktu dan musim yang berlangsung. deposit klorida mencapai maksimum pada musim semi dari bulan Maret sampai Mei, juga ada kenaikan deposit klorida pada musim gugur pada bulan September sampai November. (Shill, 2014)



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Konversi Kadar Klorida Permukaan ke Dalam Persen Massa Semen

Data kadar klorida permukaan yang berupa kg/m^3 yang didapat dari tabel 3.2 harus dikonversikan menjadi persen massa semen atau % cm dengan cara mengubahnya menjadi persentase yang disajikan dalam tabel 4.1 berikut ini.

Tabel 4.1
Kadar Klorida di Permukaan (Cs)

Waktu (Bulan)		Kadar Klorida di Permukaan (Cs)											
		6		10		12		18		24		28	
Sample	cementitious content	kg/m ³	% cm	kg/m ³	% cm	kg/m ³	% cm	kg/m ³	% cm	kg/m ³	% cm	kg/m ³	% cm
DC1A	390.38	2.12	0.543061	5.47	1.401199	11.76	3.012449	3.11	0.79666	3.85	0.986219		
DC2A	390.38	3.14	0.804344	2.84	0.727496	2.58	0.660895	4.63	1.186024	3.85	0.986219		
DC3A	390.04	1.79	0.458927	1.89	0.484566	6.52	1.671623	2.44	0.625577	2.93	0.751205		
DC1E	390.38	2.46	0.630155	1.15	0.294585	2.86	0.732619	1.74	0.44572	1.83	0.468774	4.17	1.06819
DC2E	390.38	3.77	0.965726	2.42	0.619909	2.19	0.560992	1.92	0.491828	2.14	0.548184	3.35	0.858138
DC3E	390.04	3.28	0.840939	2.74	0.702492	1.81	0.464055	2.32	0.594811	2.6	0.666598	2.43	0.623013
DC1B	390.38	1.62	0.41498	1.87	0.47902	2.05	0.525129	2.13	0.545622	3.3	0.84533	2.71	0.694195
DC2B	390.38	3.67	0.94011	2.1	0.537937	2.13	0.545622	2.39	0.612224	2.92	0.747989	3.43	0.878631
DC3B	390.04	1.45	0.371757	1.53	0.392267	2.02	0.517896	1.82	0.466619	1.65	0.423034	2.23	0.571736

Tabel 4.1 memperlihatkan hasil konversi ke persen massa semen atau % cm dengan cara membuatnya jadi persentase dengan rumusan kadar klorida dibagi dengan kadar semen (*Cementitious Content*) kemudian dikalikan 100 persen yang pada intinya menunjukkan persentase klorida terhadap semen.

4.2 Analisis Kadar Klorida Permukaan dari 9 sampel

Dengan menganalisis data kadar klorida permukaan terkonversi dari tabel 4.1 maka didapatkan hubungan antara waktu dalam bulan dengan persen massa klorida dari berbagai sampel sebagai berikut dalam gambar 4.1 sampai 4.9.

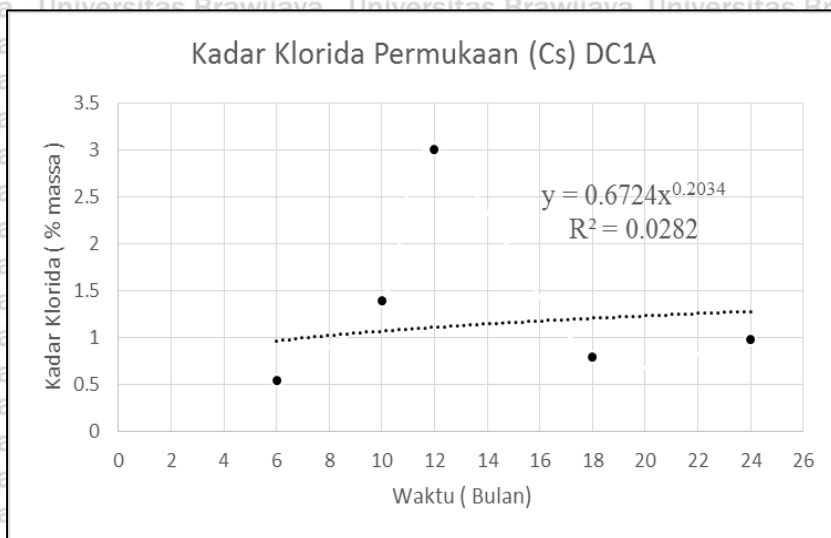
Simbol titik menunjukkan data dari tabel 4.1 sedangkan garis kurva adalah gambaran dari persamaan regresi yang didekati dengan *trendline* berjenis power dimana persamaan regresi berbentuk koefisien dikalikan waktu dipangkatkan koefisien lainnya. jenis ini dipakai untuk menjaga agar hasil tetap positif karena jika negatif tidak dapat dipakai dalam perhitungan selanjutnya.

Analisis utama akan menggunakan data kadar klorida permukaan dari simbol titik yang berasal dari uji eksperimental sedangkan untuk analisis sekundernya menggunakan

persamaan regresi dari kurva pada gambar 4.1 sampai 4.9 dikumpulkan pada tabel 4.2 yang kemudian akan diuji kesesuaiannya dengan data awal serta dibandingkan akurasinya.

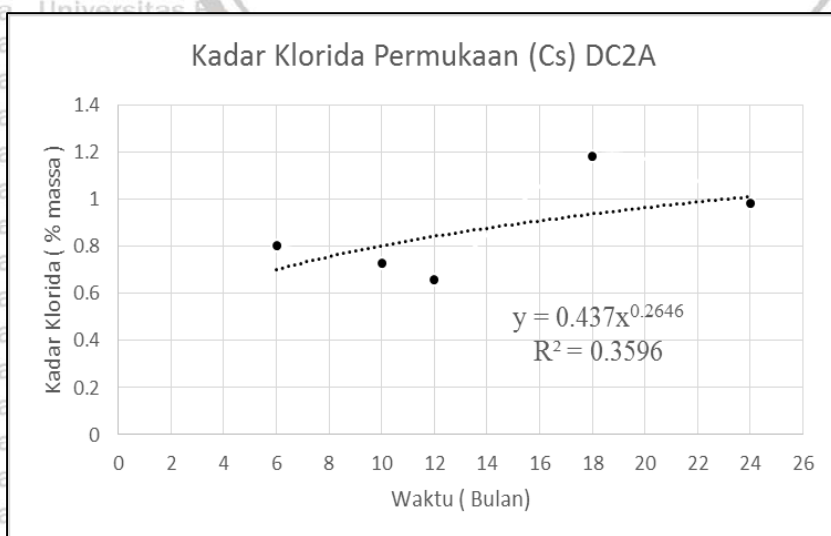
Kode area A melambangkan area pagar (*fence*) di dekat sungai *Intracoastal Waterway* (ICW) kode B mewakili area barat sedangkan kode E mewakili area timur.

4.2.1 Sampel Lokasi Pagar Kode Area A



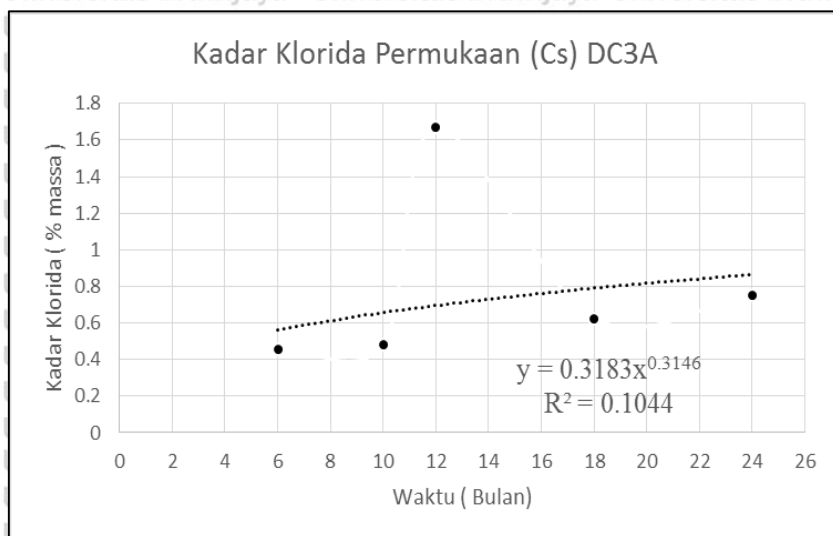
Gambar 4.1 Kadar klorida permukaan DC1A

Kadar klorida permukaan tertinggi dari sampel DC1A berdasarkan gambar 4.1 adalah pada waktu 12 bulan sebesar 3,0125 % massa dan terendah pada waktu 6 bulan sebesar 0,54306 % massa. juga terlihat kadar klorida permukaan turun drastis dari 3,01245 % massa menjadi 0,79666 % massa. hal ini disebabkan oleh adanya hujan yang berlebih sehingga klorida kemungkinan terbawa oleh air hujan. selanjutnya kadar klorida naik kembali menjadi 0,9862 % massa pada 6 bulan berikutnya yaitu pada waktu 24 bulan.



Gambar 4.2 Kadar klorida permukaan DC2A

Kadar klorida permukaan tertinggi dari sampel DC2A berdasarkan gambar 4.2 adalah pada waktu 18 bulan sebesar 1,18602 % massa dan terendah pada waktu 12 bulan sebesar 0,6689 % massa. kenaikan tertinggi terjadi antar bulan 12 ke 18 dari 0,66089 % massa menjadi 1,18602 % massa. secara umum kecenderungannya adalah naik dan sesuai dengan logika bahwa kadar klorida akan terakumulasi seiring berjalannya waktu.

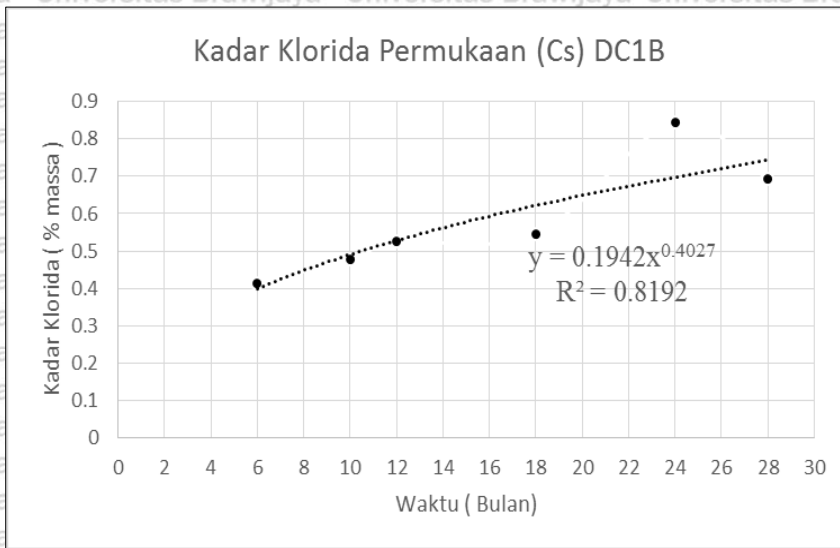


Gambar 4.3 Kadar klorida permukaan DC3A

Kadar klorida permukaan tertinggi dari sampel DC3A berdasarkan gambar 4.3 adalah pada waktu 12 bulan sebesar 1,67162 % massa dan terendah pada waktu 6 bulan sebesar 0,45983 % massa. sama seperti gambar 4.1 ada penurunan yang signifikan dari bulan 12 ke 18 dari 1,67162 % massa menjadi 0,62558 % massa dimana kemungkinan terjadi hujan berlebihan yang menyebabkan kadar klorida berkurang.

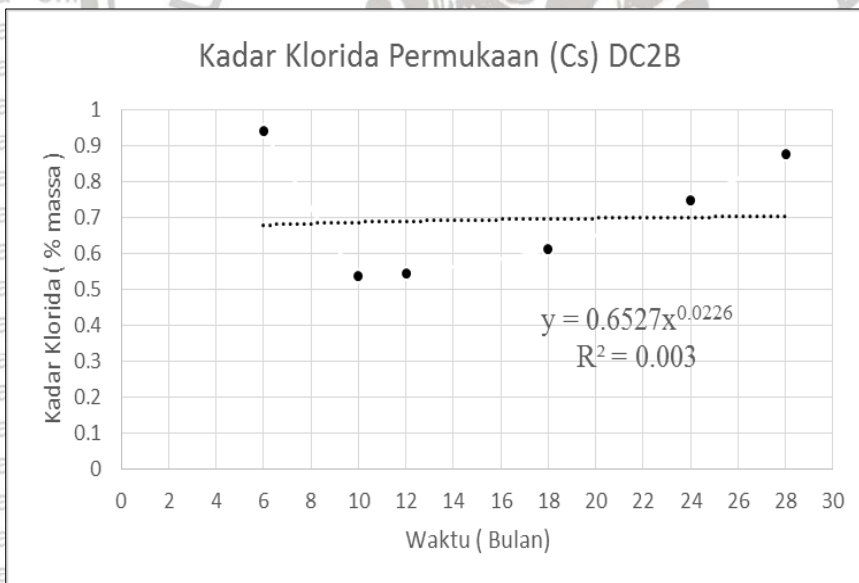
Dari 3 sampel pada lokasi pagar kode A maka kadar klorida permukaan tertinggi dimiliki sampel DC1A gambar 4.1 saat waktu 12 bulan sebesar 3,0125% massa sedangkan terendah dimiliki sampel DC3A dari gambar 4.3 ketika waktu 6 bulan sebesar 0,45983% massa.

4.2.2 Sampel Lokasi Barat Kode Area B



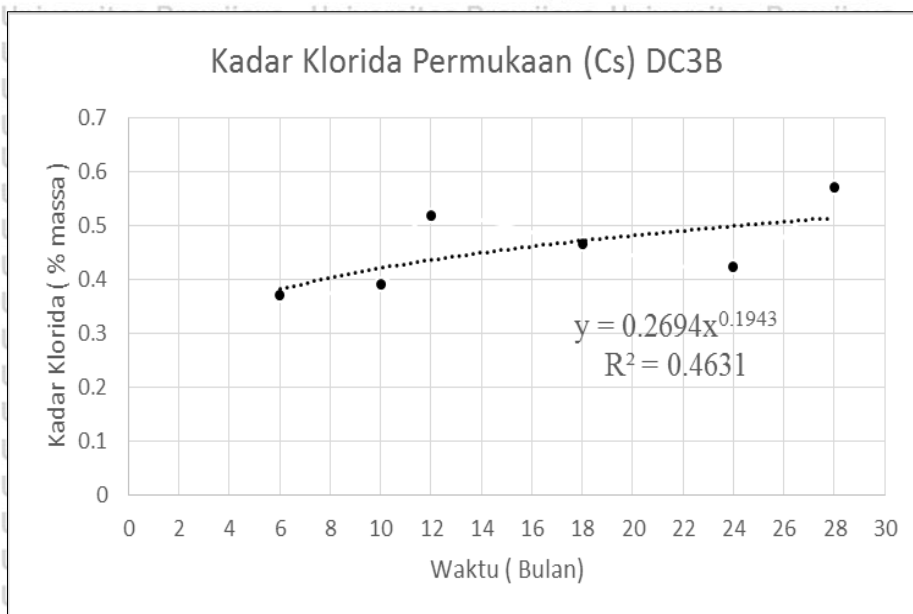
Gambar 4.4 Kadar klorida permukaan DC1B

Kadar klorida permukaan tertinggi dari sampel DC1B berdasarkan gambar 4.4 saat waktu 24 bulan sebesar 0,84533 % massa dan terendah pada waktu 6 bulan sebesar 0,41498 % massa. kenaikan tertinggi pada bulan 24 sebesar 30 % dari grafik juga cenderung untuk naik.



Gambar 4.5 Kadar klorida permukaan DC2B

Kadar klorida permukaan tertinggi dari sampel DC2B berdasarkan gambar 4.5 saat waktu 6 bulan sebesar 0,94011 % massa dan terendah pada waktu 10 bulan sebesar 0,53794 % massa. hasil sempat mengalami penurunan pada bulan 6 ke 10 namun selanjutnya cenderung naik.

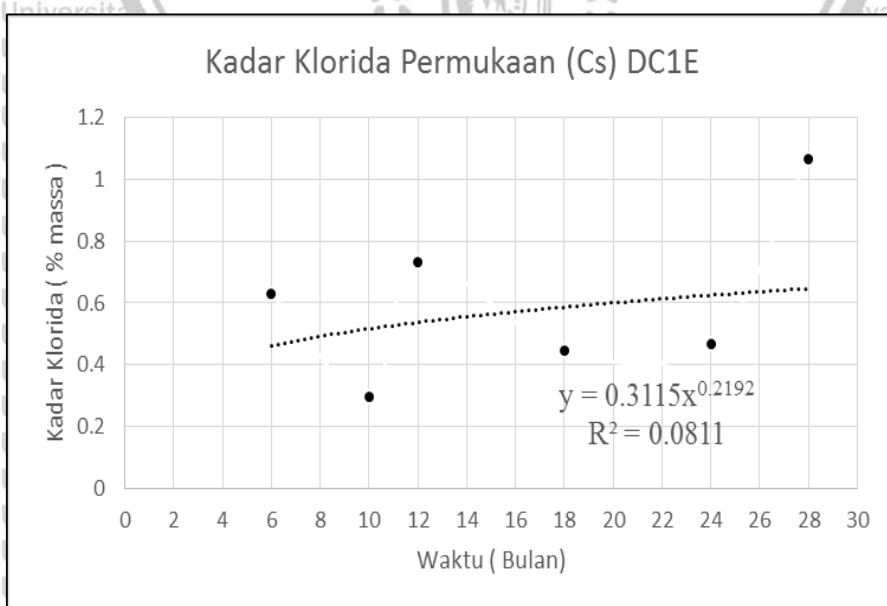


Gambar 4.6 Kadar klorida permukaan DC3B

Kadar klorida permukaan tertinggi dari sampel DC3B berdasarkan gambar 4.6 saat waktu 28 bulan sebesar 0,57174 % massa dan terendah pada waktu 6 bulan sebesar 0,37176 % massa dengan kecenderungan kadar klorida bertambah dibandingkan awal.

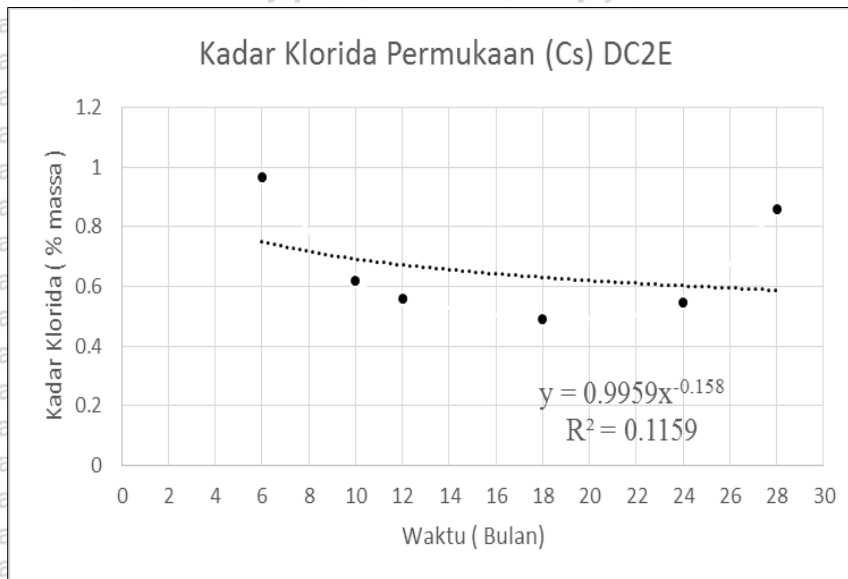
Berdasarkan 3 sampel pada lokasi barat kode area B didapat kadar klorida permukaan tertinggi dimiliki sampel DC2B gambar 4.5 saat waktu 6 bulan sebesar 0,94011 % massa sedangkan terendah dimiliki sampel DC3B dari gambar 4.6 ketika waktu 6 bulan sebesar 0,37176 % massa.

4.2.3 Sampel Lokasi Timur Kode Area E



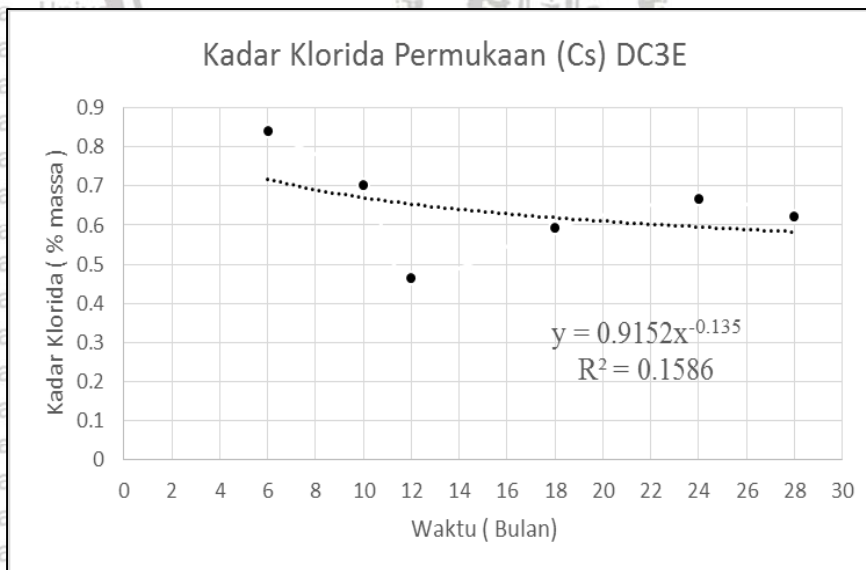
Gambar 4.7 Kadar klorida permukaan DC1E

Kadar klorida permukaan tertinggi dari sampel DC1E berdasarkan gambar 4.7 saat waktu 28 bulan sebesar 1,06189 % massa dan terendah pada waktu 10 bulan sebesar 0,29458 % massa. Grafik cenderung naik namun ada penurunan 2 kali pada bulan 10 dan 18



Gambar 4.8 Kadar klorida permukaan DC2E

Kadar klorida permukaan tertinggi dari sampel DC2E berdasarkan gambar 4.8 saat waktu 6 bulan sebesar 0,96573 % massa dan terendah pada waktu 18 bulan sebesar 0,49183 % massa. kecenderungan kadar klorida menurun namun ada kenaikan di bulan terakhir pada 28 bulan.



Gambar 4.9 Kadar klorida permukaan DC3E

Kadar klorida permukaan tertinggi dari sampel DC3E berdasarkan gambar 4.9 saat waktu 6 bulan sebesar 0,84094 % massa dan terendah pada waktu 12 bulan sebesar

0,46405 % massa. grafik menunjukkan kecenderungan untuk turun pada rentang waktu 6 sampai 12 bulan dan naik kembali pada bulan 28.

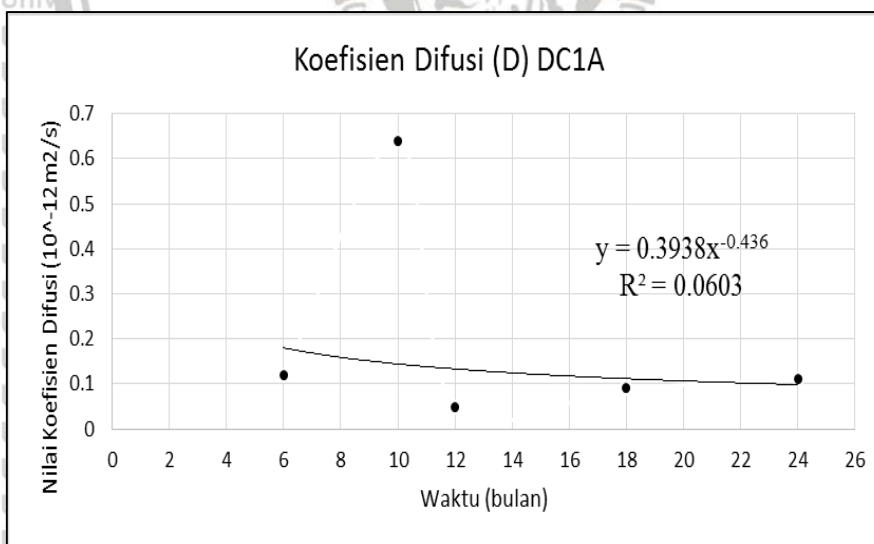
Berdasarkan 3 sampel pada lokasi timur kode area E diperoleh kadar klorida permukaan tertinggi dimiliki sampel DC1E gambar 4.7 saat waktu 28 bulan sebesar 1,06189 % massa sedangkan terendah juga dimiliki sampel DC1E ketika waktu 10 bulan sebesar 0,29458 % massa.

4.3 Analisis Koefisien Difusi Klorida dari 9 Sampel

Koefisien difusi klorida diambil dari tabel 3.4 dalam satuan $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ yang kemudian dianalisis disajikan dalam grafik pada gambar 4.10 sampai 4.18 untuk mempermudah pemahaman.

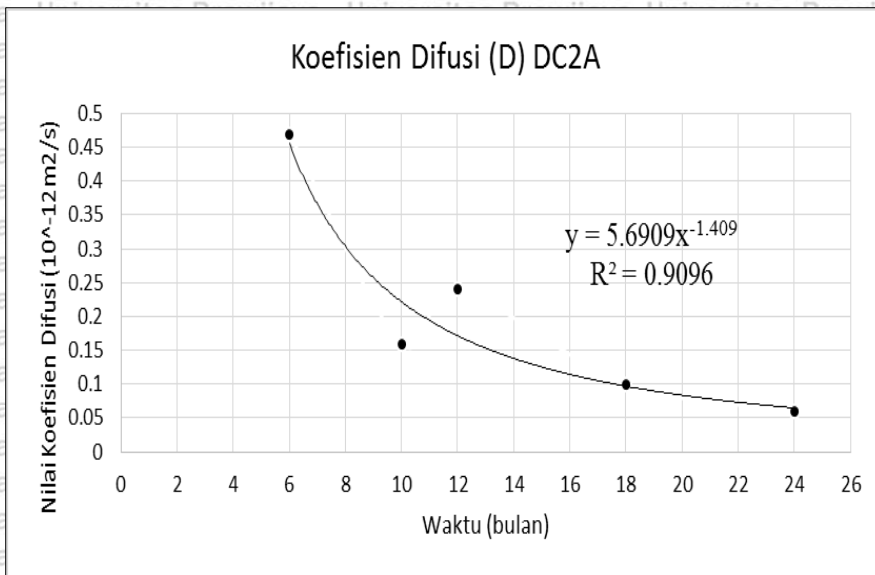
Sama seperti sebelumnya ada 2 jenis simbol yang dipakai pada gambar 4.10 sampai 4.18 yaitu pertama simbol titik yang menggambarkan data eksperimen dari tabel 3.3 sedangkan garis berbentuk kurva akan membentuk persamaan regresi yang akan digunakan dan nantinya ditabelkan dalam tabel 4.3 untuk memudahkan analisis. Jenis *trendline* yang digunakan tetap *power* supaya hasil tetap positif.

4.3.1 Sampel Lokasi Pagar Kode Area A



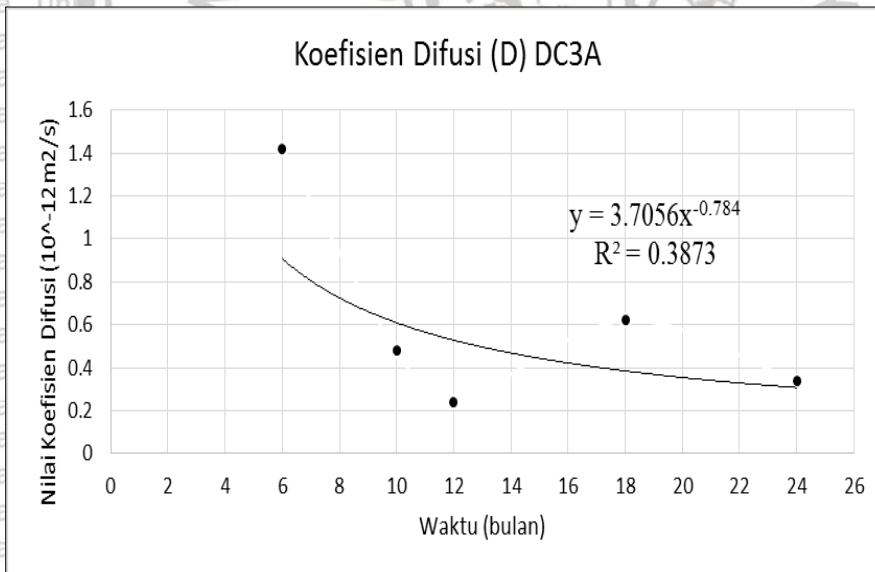
Gambar 4.10 Koefisien difusi klorida DC1A

Koefisien difusi klorida terbesar dari sampel DC1A berdasarkan gambar 4.10 ketika waktu 10 bulan sebesar $0,64 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ dan terkecil saat waktu 12 bulan bernilai sebesar $0,05 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ secara umum cenderung turun namun ada kenaikan drastis pada bulan 10 diikuti juga penurunan drastis pada bulan 12.



Gambar 4.11 Koefisien difusi klorida DC2A

Koefisien difusi klorida terbesar dari sampel DC2A berdasarkan gambar 4.11 ketika waktu 6 bulan sebesar $0,47 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ dan terkecil saat waktu 24 bulan bernilai sebesar $0,06 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. secara umum cenderung untuk turun namun ada kenaikan pada bulan 12 sebelum turun kembali pada bulan berikutnya.



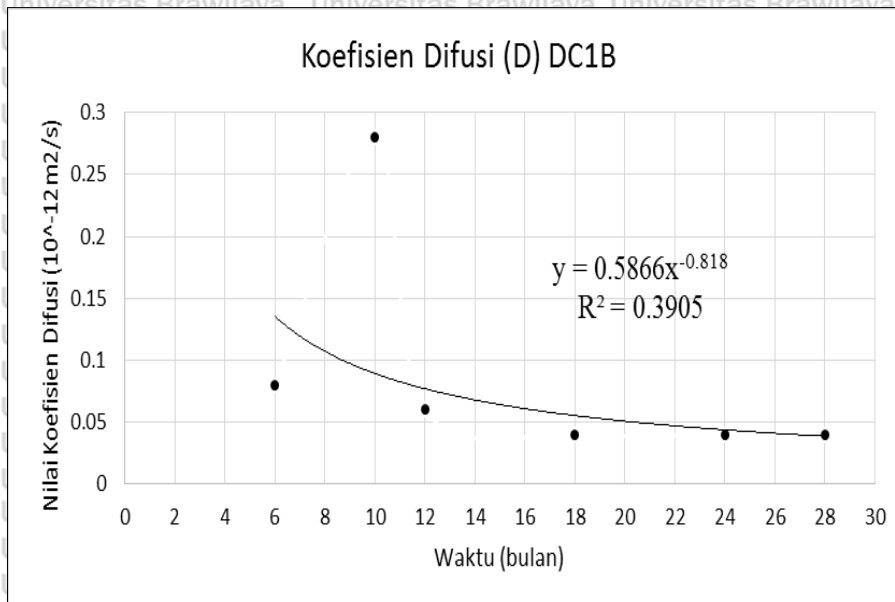
Gambar 4.12 Koefisien difusi klorida DC3A

Koefisien difusi klorida terbesar dari sampel DC3A berdasarkan gambar 4.12 ketika waktu 6 bulan sebesar $1,42 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ dan terkecil saat waktu 12 bulan bernilai sebesar $0,24 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ secara umum cenderung untuk turun namun ada kenaikan pada bulan 18 dan turun pada bulan berikutnya.

Berdasarkan lokasi pagar kode area A dapat dipahami bahwa Koefisien difusi klorida terbesar dimiliki sampel DC3A berdasarkan gambar 4.12 pada waktu 6 bulan sebesar $1,42 \times$

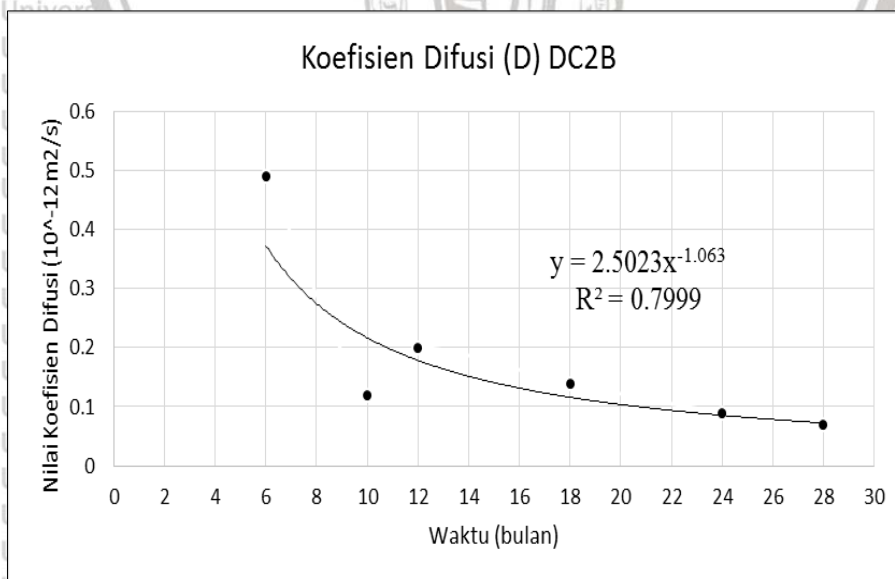
$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ sedangkan terkecil oleh sampel DC1A dari gambar 4.10 ketika waktu 12 bulan bernilai sebesar $0,05 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

4.3.2 Sampel Lokasi Barat Kode Area B



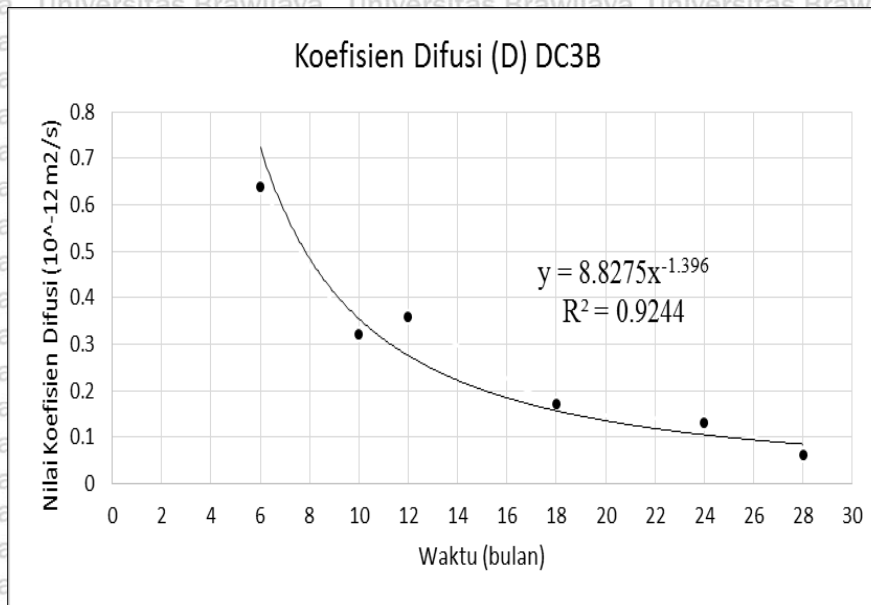
Gambar 4.13 Koefisien difusi klorida DC1B

Koefisien difusi klorida terbesar dari sampel DC1B berdasarkan gambar 4.13 ketika waktu 10 bulan sebesar $0,28 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ dan terkecil saat waktu 28 bulan bernilai sebesar $0,04 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Lebih lanjut dapat dicermati bahwa nilai koefisien difusi pada kasus ini bernilai tetap dari 18 sampai 28 bulan sebesar $0,04 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.



Gambar 4.14 Koefisien difusi klorida DC2B

Koefisien difusi klorida terbesar dari sampel DC2B berdasarkan gambar 4.14 ketika waktu 6 bulan sebesar $0,49 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ dan terkecil saat waktu 28 bulan bernilai sebesar $0,07 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ juga ditemukan kenaikan pada bulan 12 sebelum cenderung untuk turun kembali pada bulan-bulan berikutnya

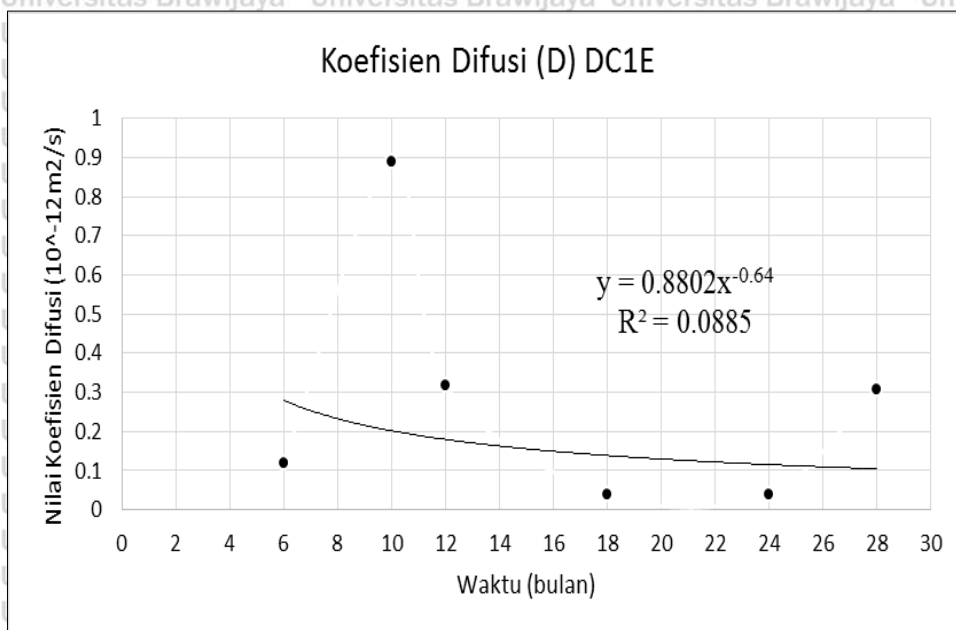


Gambar 4.15 Koefisien difusi klorida DC3B

Koefisien difusi klorida terbesar dari sampel DC3B berdasarkan gambar 4.15 ketika waktu 6 bulan sebesar $0,64 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ dan terkecil saat waktu 28 bulan bernilai sebesar $0,06 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ juga sama memiliki kenaikan pada bulan 12 sebelum turun kembali.

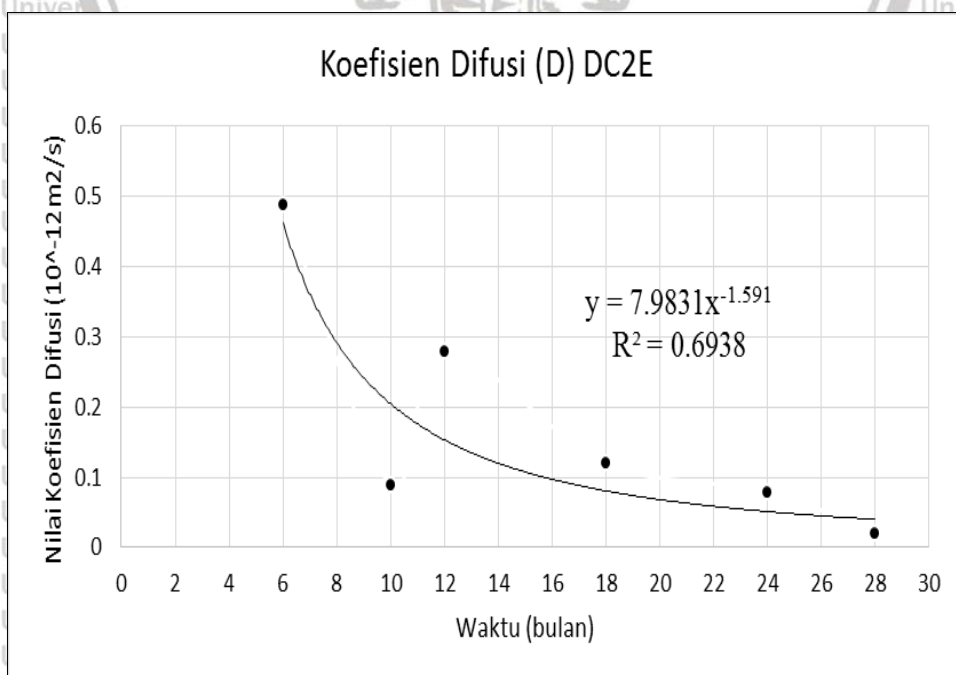
Berdasarkan lokasi barat kode area B dapat dipahami bahwa Koefisien difusi klorida terbesar dimiliki sampel DC3B berdasarkan gambar 4.15 pada waktu 6 bulan sebesar $0,64 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ sedangkan terkecil oleh sampel DC1B dari gambar 4.13 ketika waktu 28 bulan bernilai sebesar $0,04 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. anomali kenaikan pada bulan 12 diduga akibat adanya pergantian musim.

4.3.3 Sampel Lokasi Timur Kode Area E



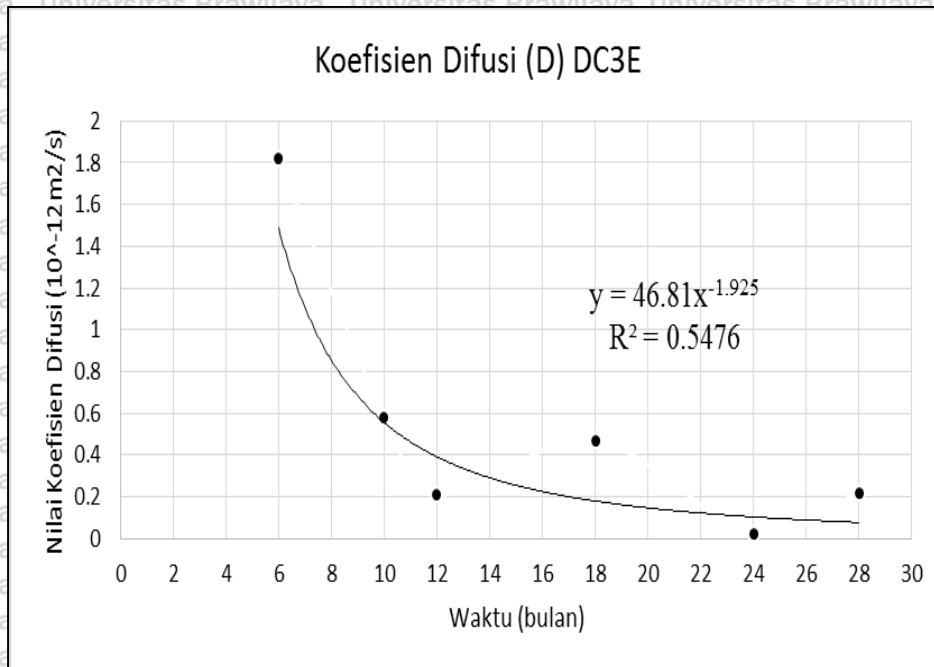
Gambar 4.16 Koefisien difusi klorida DC1E

Koefisien difusi klorida terbesar dari sampel DC1E berdasarkan gambar 4.16 ketika waktu 10 bulan sebesar $0,89 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ dan terkecil saat waktu 24 bulan bernilai sebesar $0,04 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Selanjutnya juga ditemukan kemiripan angka pada bulan 18 dan 24 sebesar $0,04 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ sama seperti sampel DC1 pada lokasi lainnya ada kenaikan signifikan diikuti dengan penurunan pada nilai koefisien difusinya kemudian naik kembali pada bulan terakhir.



Gambar 4.17 Koefisien difusi klorida DC2E

Koefisien difusi klorida terbesar dari sampel DC2E berdasarkan gambar 4.17 ketika waktu 6 bulan sebesar $0,49 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ dan terkecil saat waktu 28 bulan bernilai sebesar $0,02 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. memiliki kenaikan pada bulan 12 sebelum turun kembali diduga akibat perubahan musim



Gambar 4.18 Koefisien difusi klorida DC3E

Koefisien difusi klorida terbesar dari sampel DC3E berdasarkan gambar 4.18 ketika waktu 6 bulan sebesar $1,82 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ dan terkecil saat waktu 24 bulan bernilai sebesar $0,02 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. kenaikan ada pada bulan 18 sebelum turun dan naik kembali pada bulan 28.

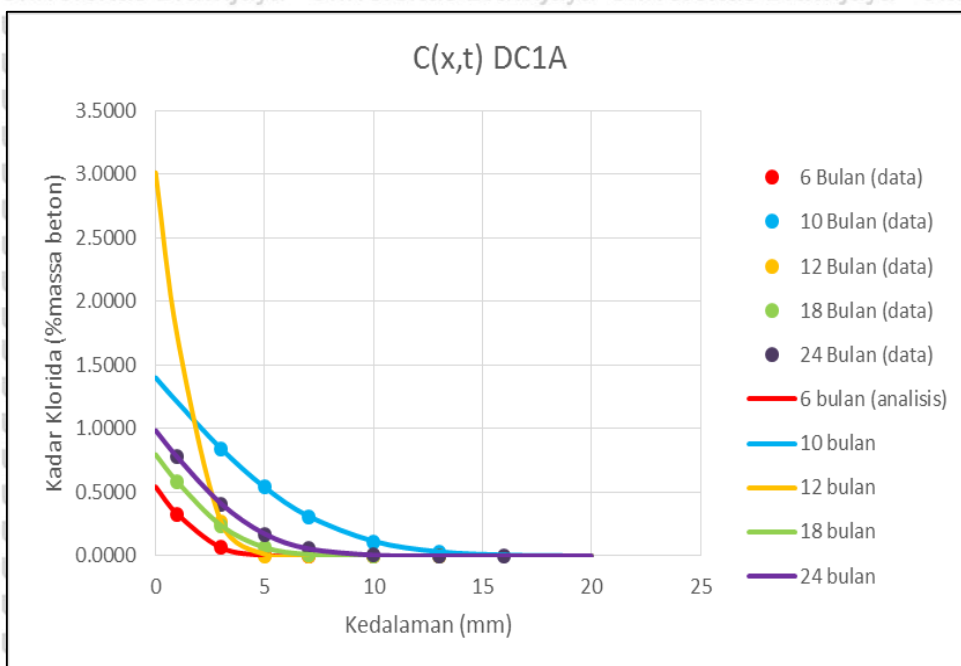
Berdasarkan lokasi timur kode area E dapat dipahami bahwa Koefisien difusi klorida terbesar dimiliki sampel DC3E berdasarkan gambar 4.18 pada waktu 6 bulan sebesar $1,82 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ sedangkan terkecil oleh sampel DC2E dan DC3E dari gambar 4.16 dan 4.17 ketika waktu 24 dan 28 bulan bernilai sama sebesar $0,04 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

4.4 Hubungan Kadar Klorida terhadap Kedalaman

Dengan menggunakan rumusan *error function* yang telah dibahas di metodologi terutama rumus 2-8 lalu dengan memakai data dari gambar 4.9 sampai 4.18 berupa kadar klorida dan koefisien difusi maka didapatkanlah hubungan dari kadar klorida terhadap kedalaman dan waktu sebagai gambar 4.19 sampai 4.25 yang kemudian dibandingkan dengan data eksperimen Schill pada gambar 2.2 sampai 2.4.

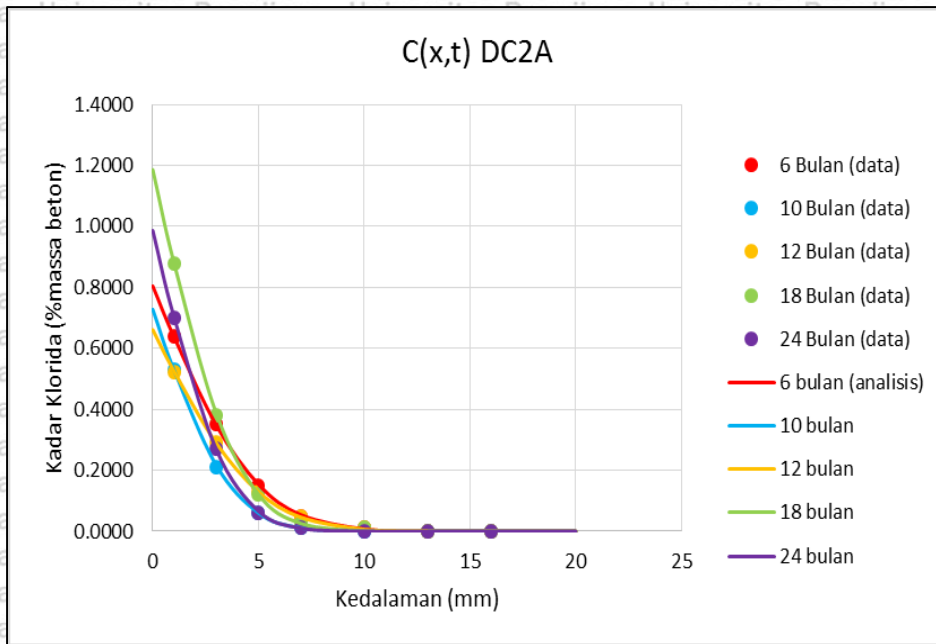
Warna yang digunakan adalah merah untuk 6 bulan, biru untuk 10 bulan, oranye untuk 12 bulan, hijau untuk 18 bulan, ungu untuk 24 bulan pada kasus area A dan tambahan warna kuning untuk 28 bulan pada kasus area lainnya yaitu B dan E. Simbol titik melambangkan data uji eksperimental dari gambar 2.2 sampai 2.4 sedangkan garis lurus melambangkan hasil analisis.

4.4.1 Kadar Klorida terhadap Kedalaman Area A



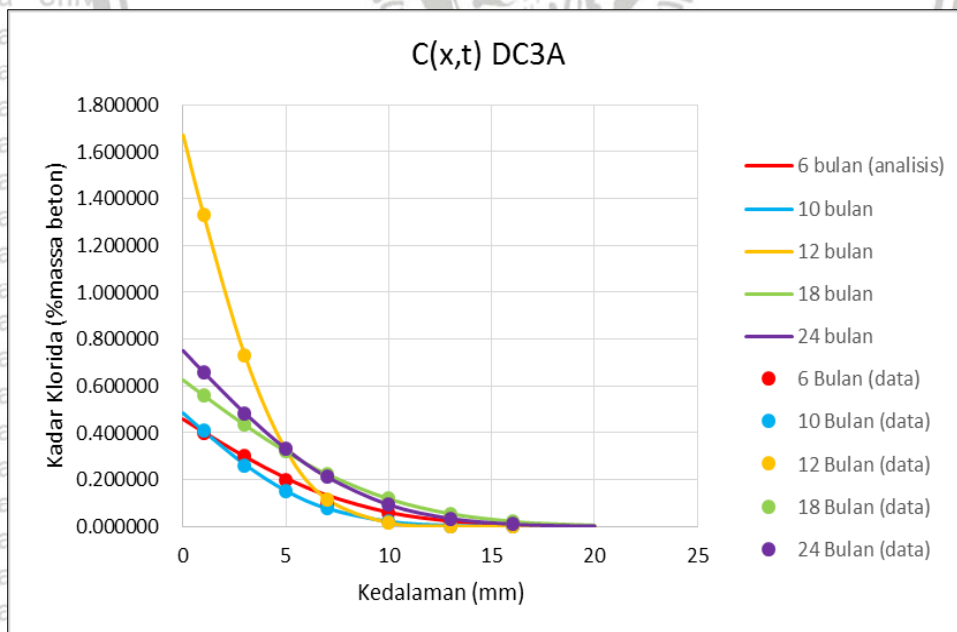
Gambar 4.19 Hubungan kadar klorida terhadap kedalaman dan waktu DC1A

Kadar klorida tertinggi dari sampel DC1A berdasarkan gambar 4.19 terletak pada kedalaman 1 mm dengan waktu 10 bulan sebesar 0,84 % massa. terlihat dari kurva yang berwarna oranye yang mewakili data saat 12 bulan memiliki kadar klorida permukaan paling tinggi namun pada kedalaman berikutnya turun secara drastis. Secara umum persentase kecocokan antara data dengan analisis sebesar 99,5 % data 12 bulan memiliki kecenderungan kadar klorida tinggi pada permukaan namun berkurang drastis pada kedalaman berikutnya.



Gambar 4.20 Hubungan kadar klorida terhadap kedalaman dan waktu DC2A

Kadar klorida tertinggi dari sampel DC2A berdasarkan gambar 4.20 terletak pada kedalaman 1 mm dengan waktu 18 bulan sebesar 0,88 % massa. juga terlihat bahwa ada kemiripan dari lengkungan kurva dan data yang ada nilainya berdekatan dengan persentase kecocokan data adalah 99,6 %. grafik memiliki kedekatan antar data eksperimental sehingga berimpit dan memiliki kelengkungan yang sama.



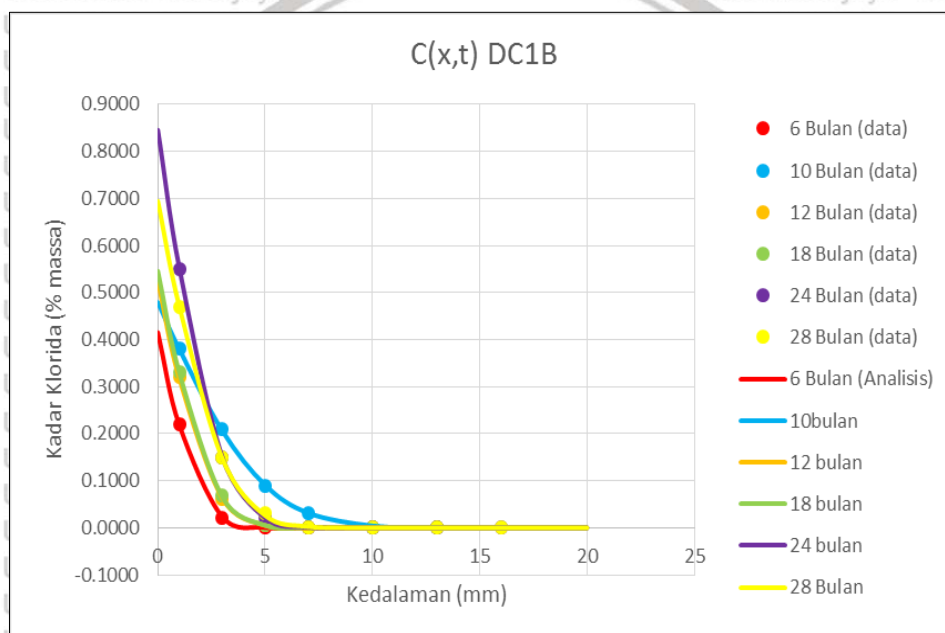
Gambar 4.21 Hubungan kadar klorida terhadap kedalaman dan waktu DC3A

Kadar klorida tertinggi dari sampel DC3A berdasarkan gambar 4.21 terletak pada kedalaman 1 mm dengan waktu 12 bulan sebesar 0,73 % massa juga terlihat bahwa kurva oranye waktu 12 bulan memiliki kadar klorida permukaan yang tinggi melebihi 1 % sehingga

kadar klorida di lapisan yang dekat dengan permukaan cenderung lebih besar daripada kurva lainnya juga pada hasil kurva lainnya memiliki kemiripan kurva dan hasil yang dekat. Persentase kecocokan data sebesar 99,8 % kembali pada data 12 bulan menunjukkan pembacaan yang tinggi dan bertahan sampai kedalaman 3 mm namun memasuki rentang 5 mm mulai menurun dan mendekati kurva serta data pada rentang waktu lainnya.

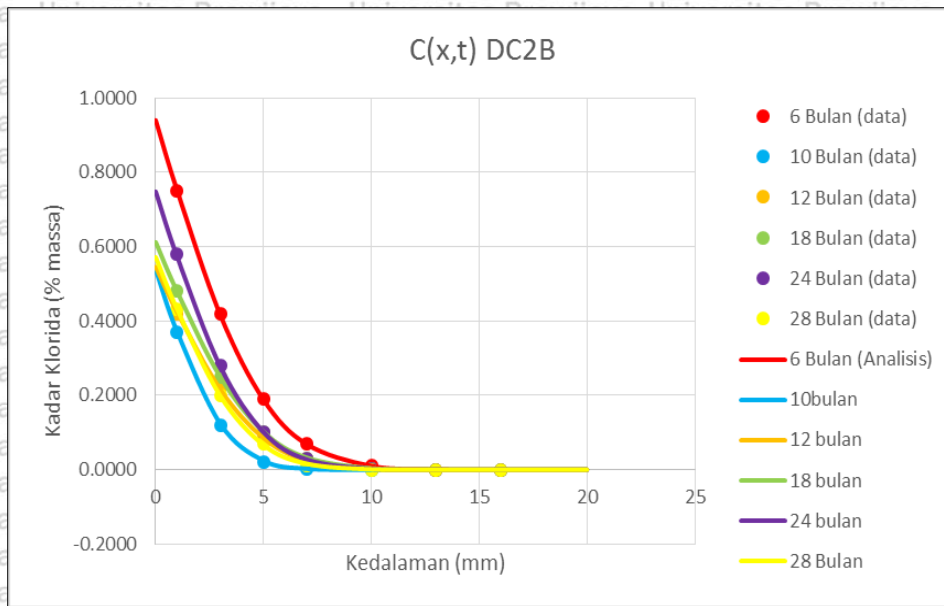
Berdasarkan ketiga sampel pada area pagar dengan kode A maka diperoleh bahwa kadar klorida terbesar dimiliki sampel DC2A berdasarkan gambar 4.20 di kedalaman 1 mm ketika waktu 18 bulan bernilai 0,88 % massa. Juga terlihat berapapun kadar klorida permukaannya tetap cenderung berkurang terhadap kedalaman.

4.4.2 Kadar Klorida terhadap Kedalaman Area B



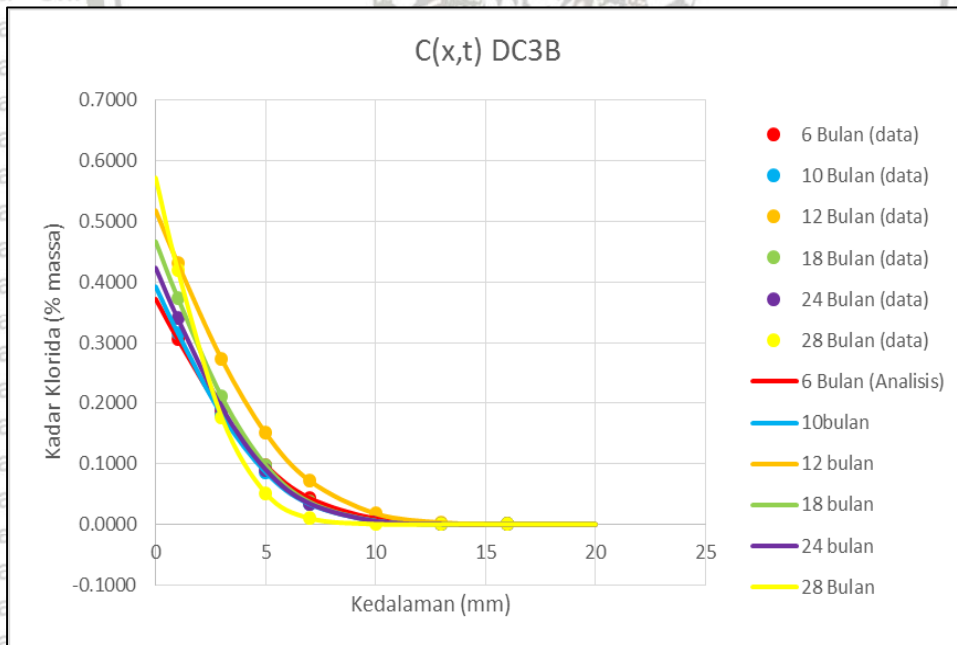
Gambar 4.22 Hubungan kadar klorida terhadap kedalaman dan waktu DC1B

Kadar klorida tertinggi dari sampel DC1B berdasarkan gambar 4.22 terletak pada kedalaman 1 mm dengan waktu 24 bulan sebesar 0,55 % massa. Banyak perpotongan antara data dengan kurva analisis sehingga persentase kecocokan adalah 99,3 %. Kurva dan data memiliki kedekatan angka sehingga memiliki kedekatan dan kecenderungan hampir sama.



Gambar 4.23 Hubungan kadar klorida terhadap kedalaman dan waktu DC2B

Kadar klorida tertinggi dari sampel DC2B berdasarkan gambar 4.23 terletak pada kedalaman 1 mm dengan waktu 6 bulan sebesar 0,75 % massa secara umum persentase kecocokan antara data dengan analisis sebesar 99,2 %. Kurva dan data pada 6 bulan memiliki pembacaan yang tertinggi dan bertahan sampai akhirnya pada kedalaman 10 mm berimpitan dengan yang lainnya.



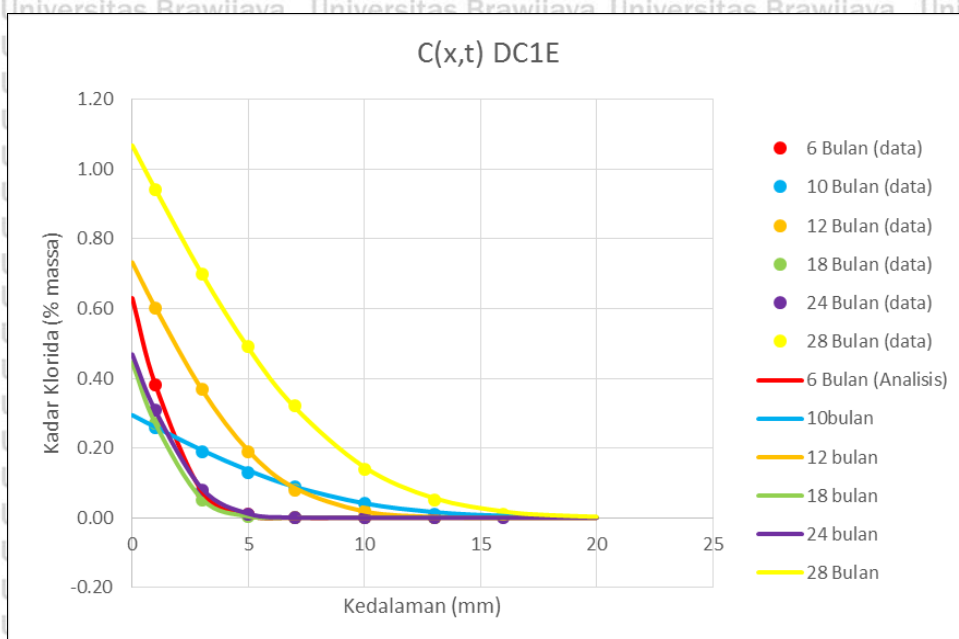
Gambar 4.24 Hubungan kadar klorida terhadap kedalaman dan waktu DC3B

Kadar klorida tertinggi dari sampel DC3B berdasarkan gambar 4.24 terletak pada kedalaman 1 mm dengan waktu 12 bulan sebesar 0,43 % massa secara umum persentase kecocokan antara data dengan analisis sebesar 99,4 %. Secara umum pembacaan data dan

kurva analisis antar kurun waktu memiliki kedekatan angka sehingga banyak grafik yang bersinggungan.

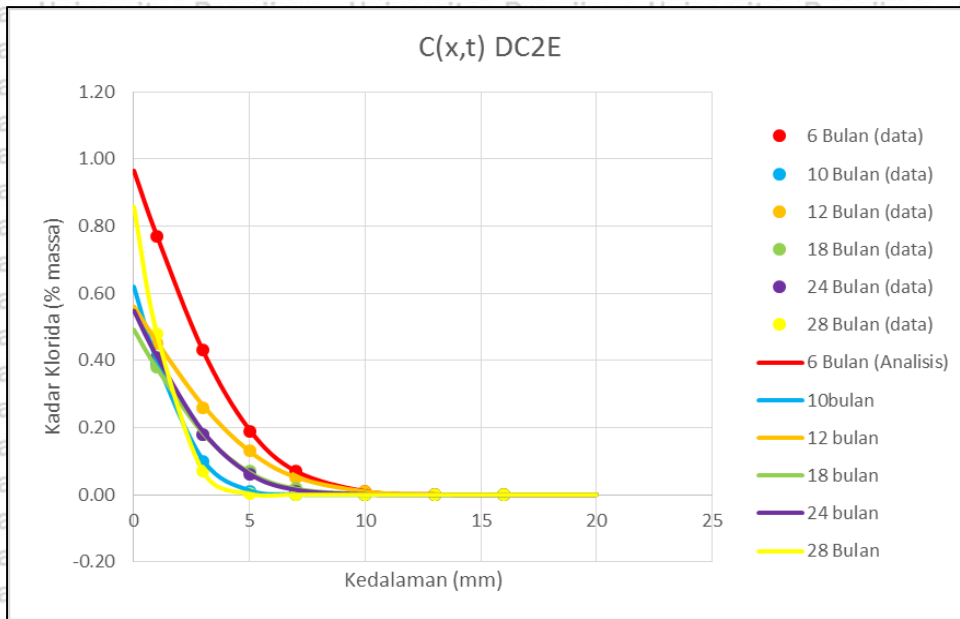
Berdasarkan ketiga sampel pada area barat dengan kode B maka diperoleh bahwa kadar klorida terbesar dimiliki sampel DC2B berdasarkan gambar 4.23 di kedalaman 1 mm ketika waktu 6 bulan bernilai 0,75 % massa. Lebih dicermati dari kecenderungannya masih terlihat bahwa kadar klorida permukaannya tetap cenderung berkurang terhadap kedalaman.

4.4.3 Kadar Klorida terhadap Kedalaman Area E



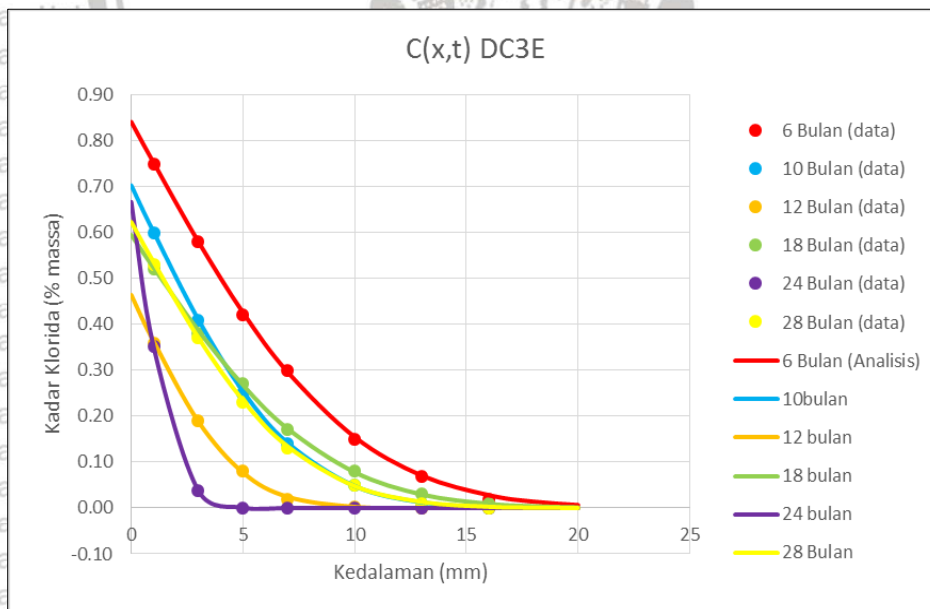
Gambar 4.25 Hubungan kadar klorida terhadap kedalaman dan waktu DC1E

Kadar klorida tertinggi dari sampel DC1E berdasarkan gambar 4.25 terletak pada kedalaman 1 mm dengan waktu 28 bulan sebesar 0,70 % massa secara umum persentase kecocokan antara data dengan analisis sebesar 99,8 %. yang menarik terlihat bahwa ada perbedaan kecenderungan lengkungan dari kurva dimana warna ungu merah dan hijau bentuknya hampir sama sedangkan untuk warna biru, oranye dan kuning berbeda. Secara umum persentase kecocokan antara data dengan analisis sebesar 99,9 %.



Gambar 4.26 Hubungan kadar klorida terhadap kedalaman dan waktu DC2E

Kadar klorida tertinggi dari sampel DC2E berdasarkan gambar 4.26 terletak pada kedalaman 1 mm dengan waktu 6 bulan sebesar 0,77 % massa secara umum persentase kecocokan antara data dengan analisis sebesar 99,2 %. Data dan kurva analisis pada 6 bulan mempunyai pembacaan tertinggi dari permukaan sampai pada kedalaman 5 mm dan kemudian mulai mendekati normal.



Gambar 4.27 Hubungan kadar klorida terhadap kedalaman dan waktu DC3E

Kadar klorida tertinggi dari sampel DC3E berdasarkan gambar 4.27 terletak pada kedalaman 1 mm dengan waktu 6 bulan sebesar 0,75 % massa secara umum persentase kecocokan antara data dengan analisis sebesar 99,4 %. yang menarik disini bahwa terlihat

perbedaan yang jelas pada kurva selain rentang 10, 18 dan 28 bulan. Pembacaan tertinggi dimiliki oleh waktu 6 bulan dan terendah pada waktu 24 bulan.

Berdasarkan ketiga sampel pada area timur dengan kode E maka diperoleh bahwa kadar klorida terbesar dimiliki sampel DC2E berdasarkan gambar 4.26 di kedalaman 1 mm ketika waktu 6 bulan bernilai 0.77 % massa. Sekali lagi, apapun datanya dan waktunya tetap kadar klorida akan berkurang semakin bertambahnya kedalaman.

Dari gambar 4.19 sampai 4.27 dapat dilihat bahwa dengan kadar klorida permukaan Cs dan Koefisien Difusi D yang akurat maka metode error function dapat digunakan untuk menganalisis kadar klorida pada kedalaman tertentu yang diinginkan dan datanya sesuai dengan eksperimen yang dilakukan.

Perbandingan hasil analisis keseluruhan dari gambar 4.19 sampai 4.27 dibandingkan dengan uji eksperimental dari penelitian Shill (2014), dalam gambar 2.2 sampai 2.4 dapat dilihat bahwa grafik memiliki kecenderungan bahwa kadar klorida akan berkurang seiring dengan bertambahnya kedalaman dengan kadar klorida paling besar adalah di permukaan yang kemudian berkurang pada kedalaman tertentu.

Maka daripada itu terbukti hipotesis pada 1.3 bahwa metode *Error Function* dapat menggambarkan profil kadar klorida pada interval kedalaman tertentu sesuai data eksperimental jika koefisien difusi dan kadar klorida permukaannya akurat terlihat dari gambar 4.19 sampai 4.27 yang menunjukkan kesesuaian dan berpotongannya antara titik data dengan kurva analisis.

Dapat dipahami bahwa laju penetrasi klorida dipengaruhi oleh kondisi batasnya yaitu kadar klorida permukaan dan koefisien difusi juga oleh waktu dan kedalaman dengan pembahasan bahwa semakin besar kadar klorida yang ada di permukaan menyebabkan penetrasi klorida ke dalam beton semakin bertambah konsentrasinya karena jika kadar klorida permukaannya besar maka konsentrasi klorida pada setiap kedalaman juga semakin bertambah.

Lebih lanjut perlu diperhatikan bahwa koefisien difusi cenderung akan berkurang seiring dengan berjalannya waktu dan kadar klorida permukaan tidak selalu terakumulasi dengan bertambahnya waktu.

4.4 Hasil Analisis Regresi

Untuk membandingkan apakah rumus regresi bisa digunakan untuk menggambarkan hasil eksperimen dan bagaimana pengaruh dari regresi terhadap penggambaran ini maka dicoba untuk nilai dari D dan Cs diambil dari rumus regresi $D(t)$ dan $Cs(t)$.

Kadar klorida permukaan yang diregresikan diambil daripada persamaan regresi yang terdapat pada gambar 4.1 sampai 4.9 dan ditabelkan pada tabel 4.2.

Tabel 4.2
Kadar Klorida Permukaan Hasil Regresi ($C_s(t)$)

Kadar Klorida Permukaan Hasil Regresi ($C_s(t)$) dalam % massa							persamaan
Waktu (bulan)	6	10	12	18	24	28	$C_s(t)$
DC1A	1.02262	1.15246	1.2027	1.3224	1.41448		$0.6724t^{0.3054}$
DC2A	0.70207	0.80368	0.8434	0.93892	1.01318		$0.437t^{0.2646}$
DC3A	0.5593	0.65681	0.69558	0.79022	0.86507		$0.3183t^{0.3146}$
DC1E	0.46135	0.51601	0.53705	0.58697	0.62517	0.64666	$0.3115t^{0.2192}$
DC2E	0.75036	0.69217	0.67252	0.63079	0.60276	0.58825	$0.9959t^{-0.158}$
DC3E	0.71856	0.67068	0.65437	0.61952	0.59592	0.58365	$0.9152t^{-0.135}$
DC1B	0.39959	0.49085	0.52825	0.62194	0.69833	0.74305	$0.1942t^{0.4027}$
DC2B	0.67967	0.68756	0.6904	0.69676	0.7013	0.70375	$0.6527t^{0.0226}$
DC3B	0.38159	0.4214	0.4366	0.47239	0.49954	0.51473	$0.2694t^{0.1943}$

Tabel 4.2 menunjukkan pendekatan dari persamaan regresi yang telah dihitung sebelumnya dan dengan memasukkan nilai t sesuai dengan waktu didapatkanlah angka tersebut dari 6 sampai 24 atau 28 bulan.

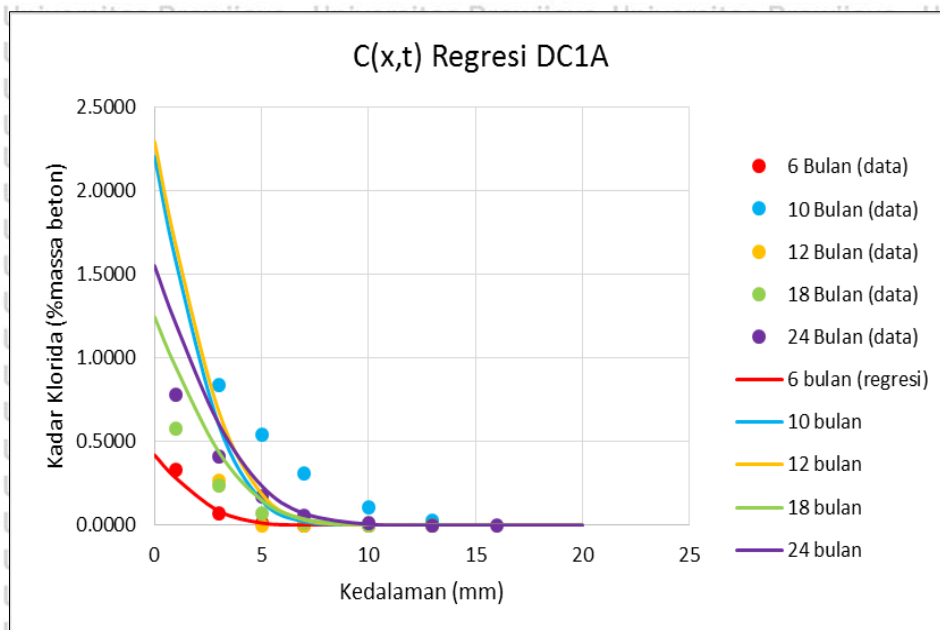
Persamaan regresi untuk koefisien difusi diambil daripada persamaan regresi yang terdapat pada gambar 4.10 sampai 4.18 dan ditabelkan sebagai berikut pada tabel 4.3.

Tabel 4.3
Koefisien Difusi $D(t)$ hasil regresi

Koefisien Difusi Hasil Regresi ($D(t)$) dalam $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$							persamaan
Waktu (bulan)	6	10	12	18	24	28	$D(t)$
DC1A	0.180302508	0.144303	0.133276	0.11168	0.098515		$0.3938t^{-0.436}$
DC2A	0.455791102	0.221912	0.171638	0.09694	0.064634		$5.6909t^{-1.409}$
DC3A	0.909469119	0.609338	0.528178	0.384348	0.306742		$3.7056t^{-0.784}$
DC1E	0.279617639	0.201642	0.179434	0.138423	0.115145	0.104328	$0.8802t^{-0.64}$
DC2E	0.459802351	0.203782	0.152416	0.079895	0.050523	0.039522	$7.983t^{-1.593}$
DC3E	1.485698187	0.55557	0.391081	0.179137	0.102945	0.076505	$46.81t^{-1.9256}$
DC1B	0.135461018	0.089195	0.076837	0.055148	0.043584	0.038421	$0.5866t^{-0.818}$
DC2B	0.372532869	0.216441	0.178308	0.115874	0.085344	0.072445	$2.5023t^{-1.063}$
DC3B	0.723666687	0.354681	0.27498	0.156127	0.104487	0.084257	$8.8275t^{-1.396}$

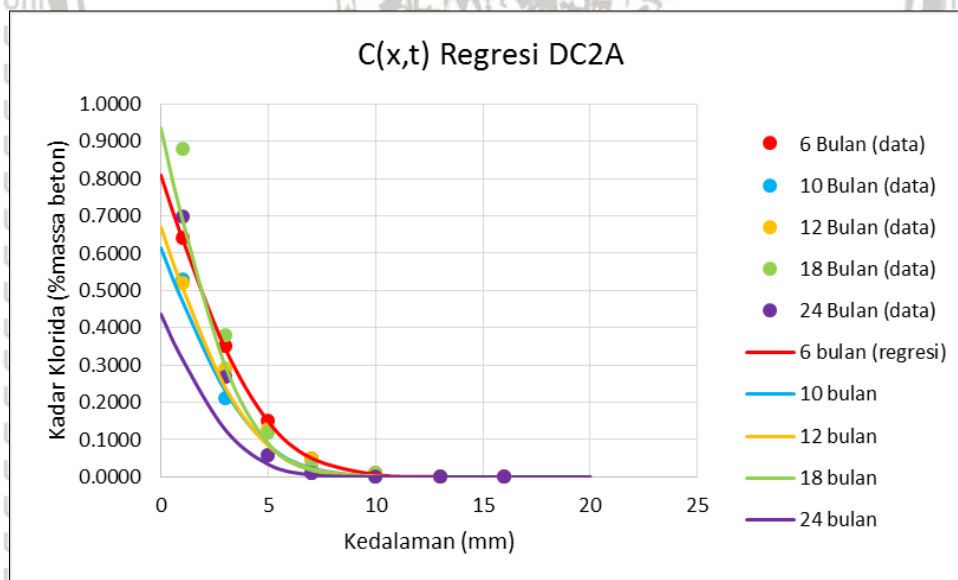
Tabel 4.3 menampilkan hasil substitusi variabel t disesuaikan dengan waktu eksperimen dari 6 sampai 24 maupun 28 bulan ke dalam persamaan regresinya yang dinyatakan dalam $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

Warna yang digunakan tetap sama yaitu merah untuk 6 bulan, biru untuk 10 bulan, oranye untuk 12 bulan, hijau untuk 18 bulan, ungu untuk 24 bulan dan kuning untuk 28 bulan.



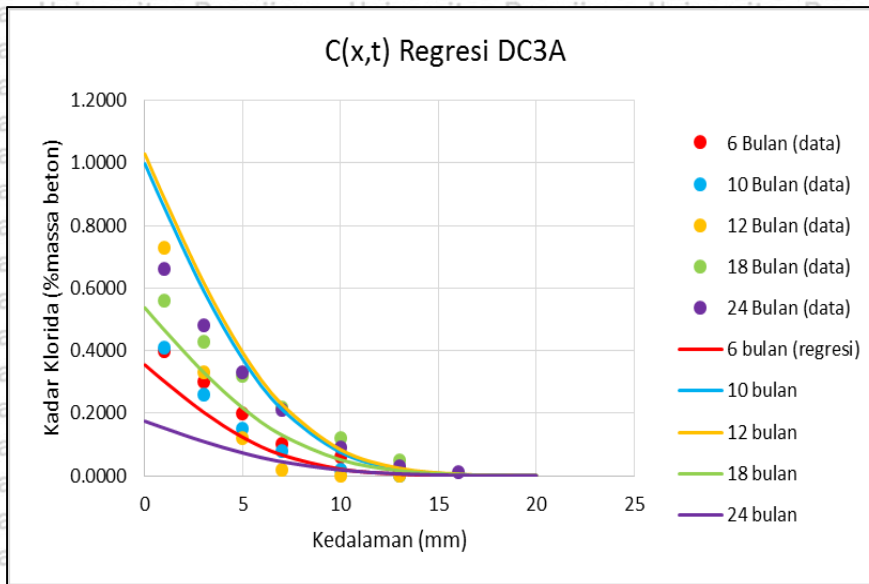
Gambar 4.28 Perbandingan antara kadar klorida hasil analisis berdasarkan regresi C_s dan $D(t)$ dan hasil eksperimen pada data DC1A

Dari gambar 4.28 untuk sampel DC1A terlihat bahwa antara data dengan analisis memiliki perbedaan yang disebabkan oleh persamaan regresi dalam kadar klorida permukaan dan koefisien difusi yang dipakai secara umum persentase kecocokan antara data dengan analisis sebesar 68 % yang berarti tingkat kesalahan adalah 32 %.



Gambar 4.29 Perbandingan antara kadar klorida hasil analisis berdasarkan regresi C_s dan $D(t)$ dan hasil eksperimen pada data DC2A

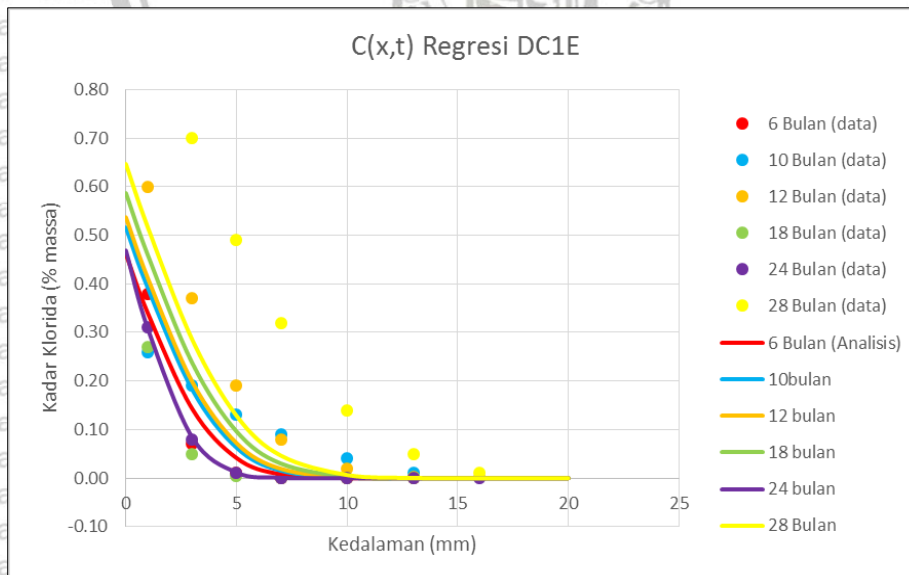
Dari gambar 4.29 untuk sampel DC2A terlihat bahwa antara data dengan analisis memiliki hubungan yang lebih dekat dibanding sebelumnya dimana terdapat titik yang mendekati kurva secara umum persentase kecocokan antara data dengan analisis sebesar 88 % yang berarti tingkat kesalahan adalah 12 %.



Gambar 4.30 Perbandingan antara kadar klorida hasil analisis berdasarkan regresi C_s dan $D(t)$ dan hasil eksperimen pada data DC3A

Dari gambar 4.30 untuk sampel DC3A terlihat ada variasi antara titik dengan kurva secara umum persentase kecocokan antara data dengan analisis sebesar 73 % yang berarti tingkat kesalahan adalah 27 %.

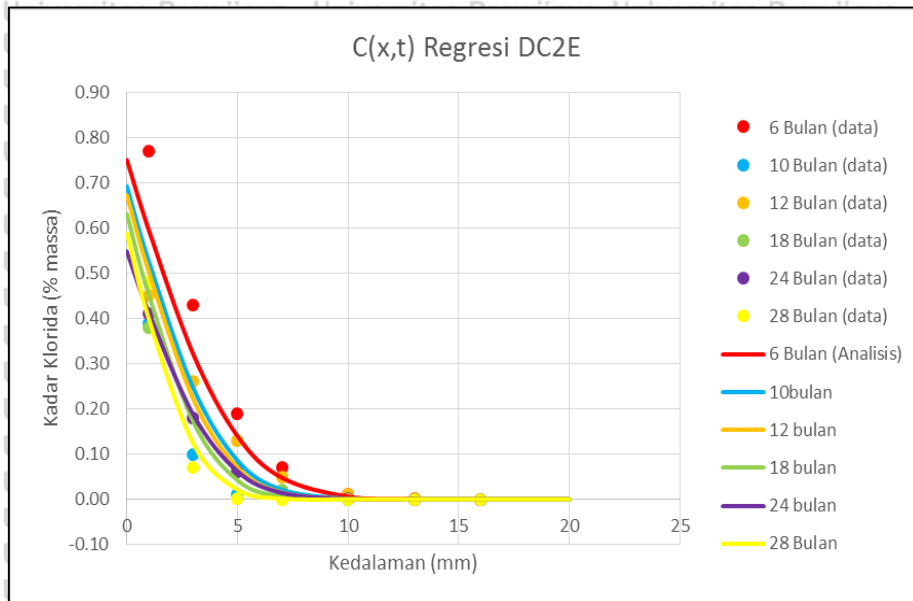
Dari gambar 4.28 sampai 4.30 pada lokasi timur kode A dapat dilihat yang paling memberikan kemiripan adalah pada gambar 4.29 yaitu sampel DC2A dimana dapat dilihat bahwa antara kurva hasil regresi banyak berpotongan dengan hasil eksperimen yang dilambangkan dengan titik.



Gambar 4.31 Perbandingan antara kadar klorida hasil analisis berdasarkan regresi C_s dan $D(t)$ dan hasil eksperimen pada data DC1e

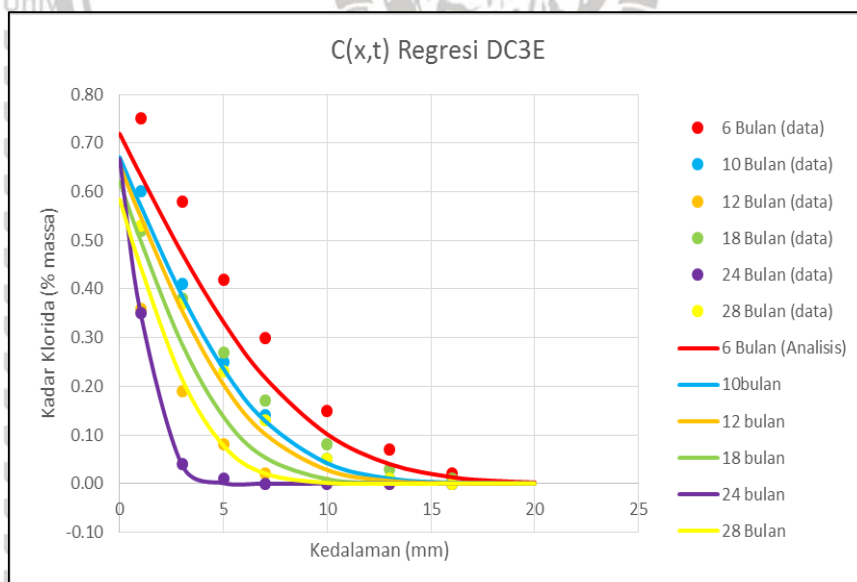
Dari gambar 4.31 untuk sampel DC1e terlihat bahwa antara data dengan analisis memiliki hubungan yang cukup dekat kecuali pada data 28 bulan dengan warna kuning

secara umum persentase kecocokan antara data dengan analisis sebesar 76 % yang berarti tingkat kesalahan adalah 24 %.



Gambar 4.32 Perbandingan antara kadar klorida hasil analisis berdasarkan regresi C_s dan $D(t)$ dan hasil eksperimen pada data DC2e

Dari gambar 4.32 untuk sampel DC2e terlihat kedekatan antara data dengan regresi umum persentase kecocokan antara data dengan analisis sebesar 89 % yang berarti tingkat kesalahan adalah 11%.

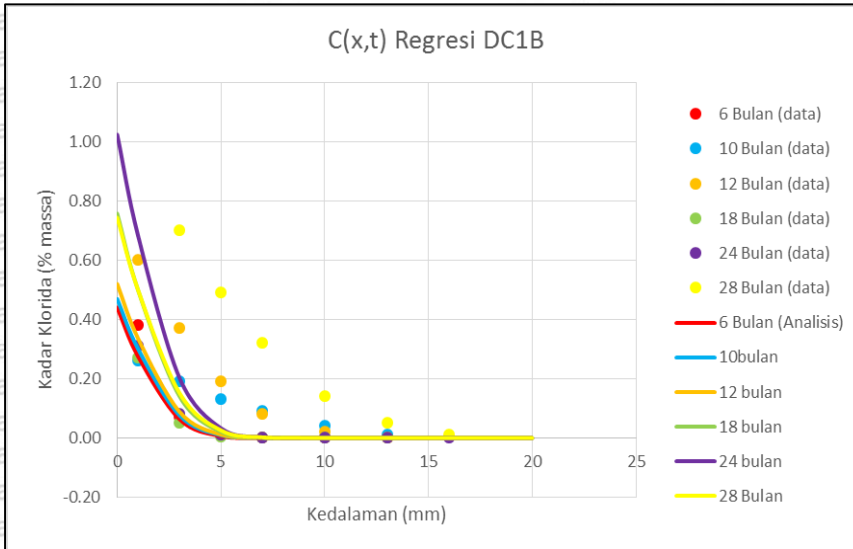


Gambar 4.33 Perbandingan antara kadar klorida hasil analisis berdasarkan regresi C_s dan $D(t)$ dan hasil eksperimen pada data DC3e

Dari gambar 4.33 untuk sampel DC3e terdapat kesesuaian data pada periode 24 bulan warna ungu sedangkan pada periode lainnya ada perbedaan secara umum persentase

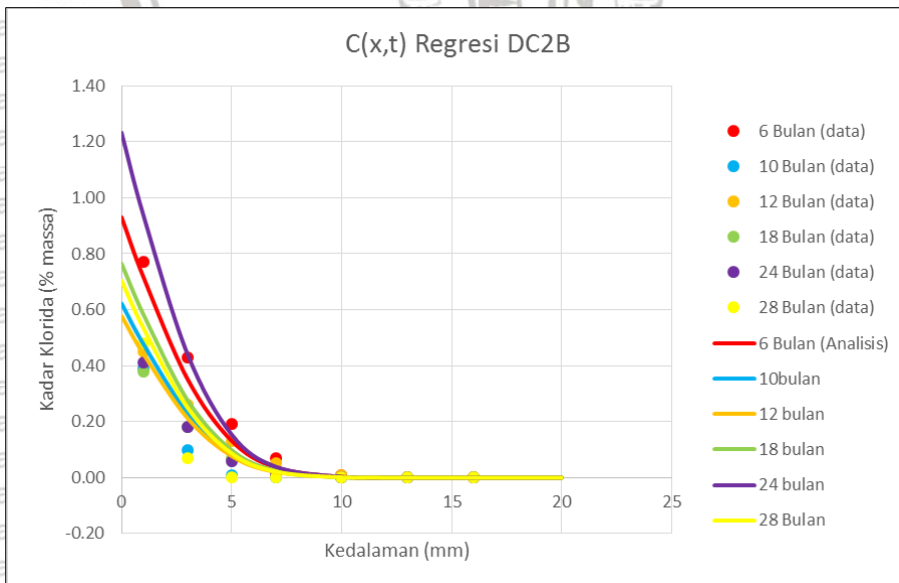
kecocokan antara data dengan analisis sebesar 81 % yang berarti tingkat kesalahan adalah 19 %.

Dari gambar 4.30 sampai 4.32 pada lokasi pagar kode E dapat dilihat yang paling memberikan kemiripan adalah pada gambar 4.31 yaitu sampel DC2e dimana posisi antara titik dengan kurva paling dekat.



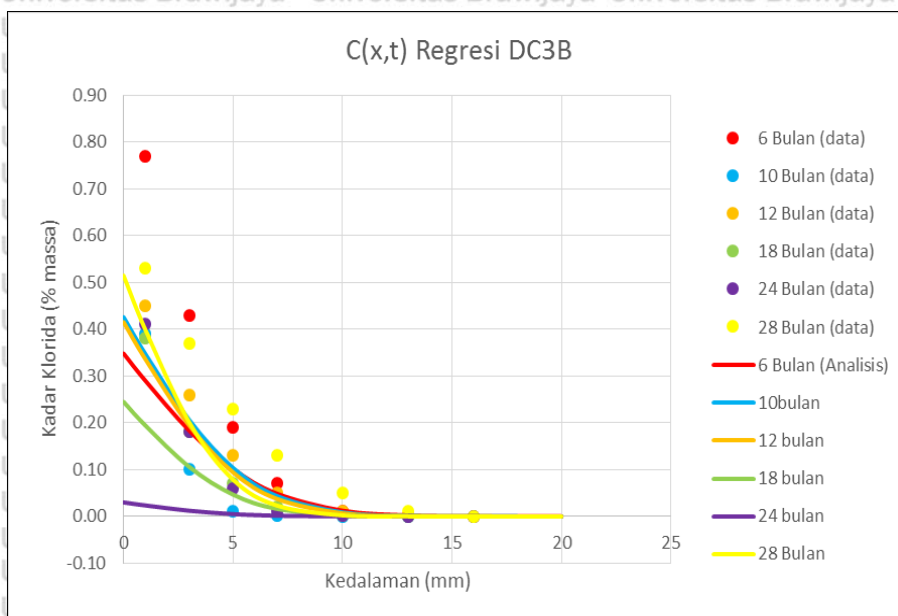
Gambar 4.34 Perbandingan antara kadar klorida hasil analisis berdasarkan regresi C_s dan $D(t)$ dan hasil eksperimen pada data DC1B

Dari gambar 4.34 untuk sampel DC1B terlihat ada beberapa perpotongan data namun agak jauh secara umum persentase kecocokan antara data dengan analisis sebesar 71 % yang berarti tingkat kesalahan adalah 29 %.



Gambar 4.35 Perbandingan antara kadar klorida hasil analisis berdasarkan regresi C_s dan $D(t)$ dan hasil eksperimen pada data DC2B

Dari gambar 4.35 untuk sampel DC2B terlihat ada kedekatan antara kurva dengan data berwarna merah periode 6 bulan. secara umum persentase kecocokan antara data dengan analisis sebesar 66 % yang berarti tingkat kesalahan adalah 34 %.



Gambar 4.36 Perbandingan antara kadar klorida hasil analisis berdasarkan regresi C_s dan $D(t)$ dan hasil eksperimen pada data DC3B

Dari gambar 4.36 untuk sampel DC3B ada perpotongan data namun warnanya berbeda secara umum persentase kecocokan antara data dengan analisis sebesar 55 % yang berarti tingkat kesalahan adalah 45 %.

Dari gambar 4.34 sampai 4.36 pada lokasi barat kode B terlihat antara hasil eksperimen dengan kurva regresi tidak terlalu sesuai jika dibandingkan dengan gambar lainnya.

Melihat gambar 4.28 sampai 4.36 dimana parameter koefisien difusi D dan kadar klorida permukaan C_s didekati dengan rumus regresi yang telah dihitung dari gambar 4.1 sampai 4.18 dapat dimengerti bahwa untuk mendapatkan hasil yang akurat dan mendekati uji eksperimen maka harus diperhatikan parameter D dan C_s .

Lebih lanjut dengan membandingkan hasil analisis dengan data eksperimen dengan data regresi maka jauh lebih baik untuk menggunakan data penelitian lapangan dibanding membuat persamaan untuk mendekati hasil tersebut.



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan rumusan masalah dari 1.4.1 sampai 1.4.3 dibuatkanlah kesimpulan sebagai berikut untuk menjawab permasalahan tersebut:

1. Hasil analisis penetrasi klorida kedalam beton menunjukkan bahwa hubungan antara kadar klorida terhadap kedalaman sangat bervariasi bergantung kepada kondisi batasnya yaitu kadar klorida permukaan dan koefisien difusi. Hasil perhitungan juga menunjukkan secara umum bahwa semakin dalam kedalamannya maka konsentrasi klorida akan semakin berkurang mendekati nilai nol. Juga koefisien difusi akan cenderung berkurang seiring berjalannya waktu. Lebih lanjut mengenai kadar klorida permukaan dan koefisien difusi sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan eksperimen seperti cuaca, angin dan orientasi dari sampel. Untuk kadar klorida permukaan maka cenderung untuk terakumulasi seiring berjalannya waktu kecuali ada hujan berlebih yang mengakibatkan kadar klorida terbawa oleh air hujan karena sifat dari difusi adalah mengalir dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah.
2. Berdasarkan hasil analisis terlihat bahwa ada 2 parameter penting yang mempengaruhi besarnya penetrasi klorida adalah kondisi batasnya yaitu, pertama adalah konsentrasi klorida permukaan dan kedua adalah koefisien difusi. Kadar klorida permukaan menunjukkan jumlah maksimum dari analisis maka semakin besar kadar klorida permukaannya maka akan semakin besar pula nilai klorida yang terkandung pada setiap kedalaman terutama pada lapisan pertama yang dekat dengan permukaan. Koefisien Difusi adalah luasan yang dapat dilalui dalam satuan waktu maka semakin besar nilai dari koefisien difusi akan menyebabkan penetrasi klorida ke dalam beton semakin besar dibuktikan dengan kedalaman yang diperlukan supaya nilai kadar klorida mendekati nol semakin dalam. Lebih lanjut yang mempengaruhi variasi nilai penetrasi adalah pada kedalaman dan waktu namun berdasarkan hasil eksperimen semakin lamanya waktu tidak selalu menyebabkan kadar klorida terakumulasi.
3. Kesesuaian antara hasil analisis dengan metode *error function* dengan Hasil uji eksperimental adalah sesuai yang dibuktikan dengan berpotongannya titik pembacaan data hasil eksperimental dengan kurva analisis *error function* pada referensi kedalaman yang sama dengan syarat bahwa kadar klorida permukaan dan koefisien difusi yang

dipakai perhitungannya akurat maka kita dapat memodelkan penetrasi klorida ke dalam beton dengan metode *error function*.

5.2 Saran

Untuk meningkatkan akurasi dalam pemodelan profil kadar klorida terhadap kedalaman maka harus berhati-hati dalam menghitung nilai dari koefisien difusi dan kadar klorida permukaan karena akan sangat menentukan kurva dan kesesuaian dengan data eksperimen.

Lebih lanjut dalam setiap tempat yang berbeda seharusnya dilakukan uji eksperimental karena faktor lingkungan juga mempengaruhi maka dari itu perlu dilakukan studi berbagai macam sampel untuk mendapatkan hasil yang bagus.



DAFTAR PUSTAKA

- Shill,S.T. 2014. Chloride Penetration Into Concrete Structures Exposed to the Marine Atmosphere.PhD Thesis. Unpublished. America .Florida Atlantic University.
- Nuralinah, D. 2013. Investigation on Experimental Surface Chloride .Jurnal rekayasa sipil Vol 7.No 2.
- Nuralinah,D.et.al. 2012. Comparison of Computational Models for Chloride Penetration Into Concrete Subjected to Airborne Salt . Proceedings of the Japan Concrete Institute.
- Broomfield, P.J. 2007. *Corrosion of Steel in Concrete* .USA : John Wiley & Sons.
- Sequera, C.A.C . 2019. *High Temperature Corrosion* .USA : John Wiley & Sons.
- El-Reedy, M. A. 2018. *Steel-Reinforced Concrete Structures Assessment and Repair of Corrosion* Second Edition. CRC Press.





Halaman ini sengaja dikosongkan