



DISERTASI - RC143505

**MODEL PREDIKSI RETAK PADA BETON
BERTULANG AKIBAT KOROSI TIDAK SERAGAM
KARENA INFILTRASI KLOORIDA DENGAN
MEMPERTIMBANGKAN SIKLUS BASAH DAN
KERING**

WAHYUNIARSIH SUTRISNO
3113301015

PROMOTOR:

Prof. Ir. Priyo Suprobo, M.S., Ph.D.

Endah Wahyuni, ST., M.Sc., Ph.D.

Data Iranata, ST., M.T., Ph.D.

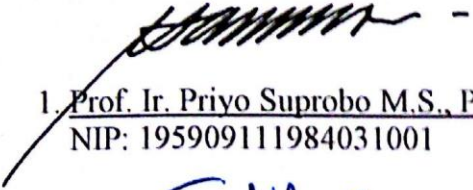
PROGRAM DOKTOR
BIDANG KEAHLIAN STRUKTUR
JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017

LEMBAR PENGESAHAN


Disertasi disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Doktor
Teknik Sipil (Dr)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Oleh
Wahyuniarsih Sutrisno
NIP.3113 301 015

Tanggal Ujian : 27 Juli 2017
Periode Wisuda : September 2017


Disetujui Oleh:


1. Prof. Ir. Priyo Suprobo M.S., Ph.D
NIP: 195909111984031001


(Promotor)


2. Endah Wahyuni ST., M.Sc., Ph.D
NIP: 197002011995122001

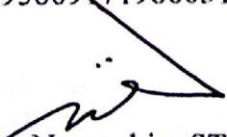
(Co-Promotor)


3. Data Iranata ST., M.T., Ph.D
NIP: 198004302005011002

(Co-Promotor)


4. Prof. Dr. Ir. Johnny Wahyuadi M.S, DEA
NIP: 195609171986031003

(Penguji)


5. Lukman Noerochim ST., M.Sc.Eng., Ph.D
NIP: 197713032003121001

(Penguji)


6. Prof. Dr. Ir. I Gusti Putu Raka, DEA
NIP: 195004031976031003

(Penguji)




Dekan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Ir. Purwanita Setijanti M.Sc., Ph.D.
NIP: 195904271985032001

Halaman ini sengaja dikosongkan

MODEL PREDIKSI RETAK PADA BETON BERTULANG AKIBAT KOROSI TIDAK SERAGAM KARENA INFILTRASI KLOORIDA DENGAN MEMPERTIMBANGKAN SIKLUS BASAH DAN KERING

Nama mahasiswa : Wahyuniarsih Sutrisno
NRP : 3113301015
Promotor : Prof. Ir. Priyo Suprobo MS., Ph.D
Co-Promotor : 1. Endah Wahyuni ST., M.Sc., Ph.D
2. Data Iranata ST., MT., Ph.D

ABSTRAK

Korosi merupakan salah satu permasalahan durabilitas yang dapat menyebabkan kerusakan pada struktur beton bertulang. Proses perbaikan dan perawatan struktur beton bertulang akibat korosi merupakan proses yang cukup sulit dan mahal untuk dilakukan. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode yang dapat digunakan untuk memprediksi keretakan pada beton bertulang akibat korosi. Terdapat dua masalah utama dalam pengembangan pemodelan retak pada beton akibat korosi yaitu tidak dipertimbangkannya durasi basah dan kering serta masih digunakannya asumsi korosi seragam.

Korosi pada daerah percikan memiliki mekanisme infiltrasi klorida yang berbeda bila dibandingkan pada daerah *fully submerged*. Pada daerah percikan, beton mengalami siklus basah dan kering sehingga mekanisme infiltrasi klorida sangat tergantung pada durasi basah dan kering. Penelitian yang ada selama ini terkait pemodelan korosi maupun keretakan akibat korosi belum mengakomodasi perbedaan konfigurasi durasi basah dan kering sebagai suatu variabel yang dapat mempengaruhi kecepatan masuknya klorida pada beton. Selain permasalahan terkait dengan siklus basah dan kering, permasalahan lain yang sering timbul pada pemodelan retak akibat korosi adalah persebaran karat. Pada penelitian sebelumnya, para peneliti mengasumsikan korosi terjadi secara merata disepanjang perimeter tulangan sehingga karat tersebar secara seragam atau *uniform* di sepanjang perimeter tulangan. Namun, pada kondisi sebenarnya karat tersebar secara tidak merata dengan kecenderungan bagian yang paling dekat dengan *exposed surface* memiliki ketebalan karat yang lebih besar bila dibandingkan dengan bagian lain.

Dengan melihat dua permasalahan utama yang ada, penelitian ini berfokus untuk mengembangkan suatu model prediksi keretakan akibat korosi dengan mempertimbangkan ketidakseragaman persebaran karat dan adanya perbedaan konfigurasi durasi basah dan kering. Penelitian disertasi ini meliputi kegiatan eksperimental, pemodelan secara matematis dan numerik. Kegiatan eksperimental dilakukan dengan menggunakan dua metode yaitu metode galvanostatik dan metode *wetting and drying*. Pemodelan matematis dikembangkan untuk mendapatkan suatu model prediksi keretakan pada beton bertulang dengan pendekatan korosi tidak seragam dan mempertimbangkan efek dari siklus basah dan kering.

Berdasarkan penelitian dan pengembangan model yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa model yang dikembangkan secara keseluruhan dapat menggambarkan hasil eksperimental. Model infiltrasi klorida akibat siklus basah dan kering menghasilkan profil klorida yang sama dengan eksperimental dimana bagian yang lebih dekat dengan *exposed surface* menghasilkan konsentrasi yang lebih besar bila dibandingkan dengan bagian yang jauh dari *exposed surface*. Akan tetapi model yang dikembangkan masih menghasilkan konsentrasi yang sedikit lebih besar pada *exposed surface*. Rata-rata perbedaan konsentrasi yang dihasilkan mencapai 6.24% bila dibandingkan dengan hasil eksperimental.

Selain model infiltrasi klorida akibat siklus basah dan kering, model keretakan akibat korosi juga dikembangkan dalam penelitian ini. Model keretakan beton akibat korosi dibagi menjadi tiga tahapan utama yaitu tahap inisiasi, tahap retak pertama dan tahapan propagasi retak hingga mencapai *exposed surface*. Model yang dikembangkan menggabungkan beberapa teori dasar yang kemudian dikembangkan menjadi suatu model prediksi. Pada tahapan inisiasi, hukum Faraday untuk kinematika korosi dan *Gaussian Normal Function* digunakan sebagai dasar pengembangan model. Pada tahapan retak pertama dan perambatan retak, teori *thick walled cylinders* digunakan untuk mensimulasikan proses keretakan akibat adanya korosi. Hasil

pemodelan menunjukkan bahwa retak pertama terjadi 17.48 jam setelah pengujian dengan metode Galvanostatik dimulai. Selanjutnya retak tersebut berpropagasi dan mencapai *exposed surface* pada 80 jam setelah retak pertama mulai terjadi. Hasil ini lebih cepat bila dibandingkan dengan pengamatan eksperimental. Hal ini dikarenakan oleh ketebalan karat hasil perhitungan yang juga lebih besar dibandingkan pengukuran hasil eksperimental. Model ketebalan karat ini merupakan dasar dari model retak yang dikembangkan. Apabila terdapat perbedaan ketebalan karat yang dihasilkan, maka waktu retak yang dihasilkan dari model dan eksperimental juga akan berbeda. Berdasarkan hasil pemodelan distribusi karat yang telah dilakukan, didapatkan bahwa ketebalan karat hasil dari model lebih besar bila dibandingkan dengan hasil eksperimental. Perbedaan yang terjadi mencapai 11.07% dan hal ini dimungkinkan karena adanya produk korosi yang masuk ke dalam celah retak sehingga tidak terukur pada saat eksperimental.

Kata Kunci: Beton Bertulang, Infiltrasi Klorida, Korosi Tidak Merata, Siklus Basah dan Kering, Galvanostatik, Retak

PREDICTIVE MODEL OF CRACK IN REINFORCED CONCRETE INDUCED BY NON-UNIFORM REINFORCEMENT CORROSION DUE TO CHLORIDE INFILTRATION CONSIDERING WETTING AND DRYING CYCLE

Student's Name : Wahyuniarsih Sutrisno
NRP : 3113301015
Suervisor : Prof. Ir. Priyo Suprobo MS., Ph.D
Co-Supervisor : 1. Endah Wahyuni ST., M.Sc., Ph.D
2. Data Iranata ST., MT., Ph.D

ABSTRACT

Corrosion is one of the durability problems which can lead to the collapse of the reinforced concrete structure. Repair and maintenance of the reinforced concrete structure due to corrosion are a process which quite difficult and expensive to do. For that reason, it needs a method to predict the cracking of the concrete due to corrosion accurately in accordance with actual conditions. There are two main problems in the cracking model development due to corrosion which are wetting and drying condition and uniform corrosion assumption.

Corrosion in the splash zone has different chloride infiltration mechanism compared with the fully submerged area. Concrete in the splash zone exposed to wetting and drying environment. Hence, the transport mechanism should consider the variable related to wet and dry duration. Previous research related to chloride infiltration model did not consider the wetting and drying duration as one of variables which can affect the chloride profile in the concrete. Aside from the wetting and drying cycle problem, another problem which is critical to the corrosion induced cracking is the distribution of corrosion products. The previous studies assume that corrosion occurs uniformly along the perimeter of the steel bar. However, in fact, the rust is distributed non-uniformly along the perimeter of the steel bar. The part which has closets distance to the exposed surface tend to have thicker rust than the other parts.

By looking the two main problems, this research is focused on the predictive model development of corrosion induced cracking by considering the effect of non-uniformed rust distribution and different configuration of wetting and drying cycle. This research includes experimental, mathematical and numerical modeling. The experimental activities were carried out by using two main methods which are galvanostatic and cyclic wetting and drying method. The two approaches were used to accommodate two problems which have been mentioned previously.

Based on the research result, it can be concluded that the predictive models which have been developed were proven to have a good agreement with the experimental result. Model of chloride penetration due to cyclic wetting and drying produced a similar pattern of chloride profile. However, the exact value from the predictive model is still 6.24% higher than the experimental result.

Model of corrosion induced cracking also developed in this research. The model divided into three main stage which are the initiation, first crack and cracks propagation stage. The corrosion induced cracking model combined several related theory. For the initiation stage, the Faraday's Law for corrosion kinematics and Gaussian Normal Function were used. Furthermore, the thick walled cylinders theory was used in the first crack and crack propagation stage to simulate the cracking process due to corrosion. The predictive model showed that the first crack occurred 17.48 hours after the corrosion test with Galvanostatic method was started. The crack was propagated and reached the exposed surface 80 hours after the first crack. This result is faster when compared with experimental observations. This is because the calculated rust thickness is also greater than experimental results. The rust thickness is the basis of the crack model, so if there is a difference in the thickness of the rust, then the cracking time generated from the model and the experimental will also be different. The calculated rust thickness is thicker

compared with the experimental results. The average difference reaches 11.07%. This condition is possible because there was corrosion product which infiltrates into the crack tip and did not measure during the experimental observation.

Keywords: Reinforced Concrete, Non-Uniform Corrosion, Chloride Infiltration, Wetting and Drying Cycle, Galvanostatic, Crack

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji dan syukur Penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala rahmat, taufik dan hidayah hingga penulis dapat merampungkan penyusunan disertasi yang berjudul “**Model Prediksi Retak Pada Beton Bertulang Akibat Korosi Tidak Seragam Karena Infiltrasi Klorida Dengan Mempertimbangkan Siklus Basah dan Kering**”. Penyusunan disertasi ini merupakan salah satu persyaratan akademis yang harus ditempuh untuk mendapatkan gelar Doktor (Dr) di Bidang Keahlian Struktur, Program Doktor Teknik Sipil FTSP ITS.

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Pemerintah Republik Indonesia khususnya Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi (Kemenristekdikti) melalui Direktorat Jenderal Sumber Daya Ilmu Pengetahuan, Teknologi dan Pendidikan Tinggi yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk menempuh studi S3 melalui Program Beasiswa Pendidikan Magister Menuju Doktor untuk Sarjana Unggul (PMDSU).

Penghargaan dan ucapan terima kasih yang tidak berhingga penulis sampaikan kepada Bapak Prof. Priyo Suprobo sebagai pembimbing utama atas segala bimbingan, ilmu serta dukungan moral yang telah diberikan mulai dari awal studi hingga saat ini.

Penulis juga menyampaikan rasa terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada Ibu Endah Wahyuni, Ph.D dan Bapak Data Iranata Ph.D sebagai Co-Promotor atas bimbingan dan masukan yang diberikan dalam penyusunan disertasi ini.

Rasa terima kasih dan penghargaan juga penulis sampaikan kepada Prof. Mitsuhiro Shigeishi yang telah bersedia membimbing dan membagikan ilmunya selama penulis menempuh studi di Kumamoto University Jepang.

Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Bapak Prof. Johnny Wahyuadi, Bapak Prof. I Gusti Putu Raka dan Bapak Lukman Noerochim, Ph.D atas kesediaannya menjadi penguji serta atas saran dan bimbingannya dalam penyelesaian dan penyempurnaan disertasi ini.

Penulis juga menyampaikan rasa terima kasih kepada Bapak Ir. Faimun ,Ph.D dan Bapak Dr. techn. Pujo Aji sebagai tim komisi S3 atas saran dan bimbingannya dalam pelaksanaan penelitian dan penulisan disertasi ini.

Penulis juga mengucapkan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada keluarga besar terutama kedua orang tua dan adik tercinta atas dukungan moral yang tidak terhingga yang selalu diberikan mulai dari awal pengerjaan disertasi ini hingga selesai.

Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada teman-teman korbid (Asdam, Indra, Hartana, Dilla, Resti, Rini, Laras, Winda, Taufiq, Mas Lutfi dan Mas Jaka), teman-teman S51 dan teman-teman S3 yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu atas segala bantuan, dukungan dan semangat yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan disertasi ini.

Tidak lupa penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu atas bantuan yang diberikan sehingga disertasi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Akhir kata penulis menyadari bahwa penyusunan disertasi ini tidak luput dari kesalahan dan penulis menyampaikan permohonan maaf bila terdapat kesalahan pada disertasi ini baik yang disengaja maupun tidak disengaja. Akhir kata semoga semua yang disampaikan dalam buku disertasi ini dapat memberikan manfaat bagi pembacanya serta bermanfaat pula dalam perkembangan ilmu teknik sipil khususnya dalam bidang struktur.

Surabaya , 8 Agustus 2017

Wahyuniarsih Sutrisno

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
<i>ABSTRACT</i>	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.2.1 Detail Permasalahan	5
1.3 Tujuan Penelitian	6
1.3.1 Detail Tujuan	6
1.4 Manfaat Penelitian	6
1.5 Ruang Lingkup dan Batasan Penelitian	7
1.6 Kontribusi dan Originalitas Penelitian	8
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	13
2.1 Durabilitas dan Korosi Beton Bertulang	13
2.2 Proses Infiltrasi Klorida pada Beton	15
2.3 Pengaruh Mekanisme Basah dan Kering terhadap Infiltrasi Klorida pada Beton Bertulang	16
2.4 Proses Korosi pada Beton Bertulang akibat Infiltrasi Klorida	18
2.4.1 Proses Inisisasi Korosi	18
2.4.2 Proses Propagasi Korosi	21
2.5 Retak Pada Beton Bertulang Akibat Korosi	23
2.6 Perkembangan Model untuk Menganalisa Keretakan Pada Beton Bertulang Akibat Korosi	29
BAB 3 METODE PENELITIAN	35
3.1 Umum	35
3.2 Lingkup Penelitian	35
3.3 Studi Literatur	37

3.4	Uji Eksperimental	38
3.4.1	Persiapan Material	38
3.4.2	Pengujian Material.....	40
3.4.3	Mix Desain	41
3.4.4	Penentuan Kebutuhan Benda Uji.....	42
3.4.5	Pembuatan Benda Uji	43
3.4.6	Perawatan Benda Uji	45
3.4.7	Pengujian Properties Benda Uji.....	46
3.4.8	Pengujian Korosi dengan Metode Galvanostatik	49
3.4.9	Pengujian Korosi Metode <i>Wetting and Drying</i>	50
3.4.10	Uji Konsentrasi Klorida dengan Titration (ASTM C 1218 dan ASTM C 114).....	52
3.4.11	Pengujian Mikrostruktur.....	53
3.5	Pengembangan Model.....	56
3.6	Validasi Hasil.....	57
3.7	Penarikan Kesimpulan	57
BAB 4 PENGUJIAN SIFAT MATERIAL DAN <i>DURABILITY PROPERTIES</i> PADA BETON.....		59
4.1	Umum	59
4.2	Analisa Material.....	59
4.2.1	Analisa Semen	59
4.2.2	Analisa Agregat Halus (Pasir)	60
4.2.3	Analisa Agregat Kasar (Kerikil).....	61
4.3	Pengujian Slump	62
4.4	Material Properties Beton	62
4.4.1	Kuat Tekan	62
4.4.2	Kuat Tarik belah	64
4.4.3	Porositas	66
4.4.4	Koefisien Difusi.....	70
BAB 5 PENGUJIAN KOROSI DENGAN METODE GALVANOSTATIK DAN <i>WETTING AND DRYING</i>		71
5.1	Umum	71

5.2	Pengujian Korosi Metode Galvanostatik	71
5.2.1	Persiapan Benda Uji	71
5.2.2	Hasil Eksperimental.....	73
5.3	Pengujian Korosi dengan Metode <i>Wetting and Drying</i>	88
5.3.1	Persiapan Benda Uji	88
5.3.2	Hasil Eksperimental.....	89
BAB 6 MODEL PREDIKSI PENETRASI KLOORIDA AKIBAT SIKUS <i>WETTING AND DRYING</i>		107
6.1	Umum	107
6.2	Model Penetrasi Klorida Pada Beton dengan Kondisi <i>Fully Submerged</i>	107
6.3	Model Penetrasi Klorida pada Beton dengan Kondisi <i>Wetting and Drying</i> ..	115
6.4	Validasi Model.....	116
BAB 7 MODEL PREDIKSI DISTRIBUSI KARAT DAN WAKTU INISIASI RETAK DENGAN PENDEKATAN KOROSI TIDAK SERAGAM		123
7.1	Umum	123
7.2	Model Prediksi Distribusi Karat Tidak Seragam Pada Beton.....	123
7.3	Model Waktu Inisiasi Retak	132
7.4	Pemodelan Waktu Propagasi Retak Hingga Mencapai Permukaan Beton....	139
7.5	Perhitungan Waktu Retak Sebenarnya.....	140
BAB 8 KESIMPULAN		143
BAB 9 <i>FUTURE WORK</i>		147
DAFTAR PUSTAKA.....		149

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Proses Rusaknya Lapisan Pasif Tulangan dan Terbentuknya Karat (Zhao et al., 2011; Zhao et al., 2012; Zhao et al., 2011)	1
Gambar 2.1. Korosi Pada Beton Bertulang (Dokumentasi pribadi, 2014)	14
Gambar 2.2. Proses Infiltrasi Klorida dengan Mekanisme Basah dan Kering (Ilustrasi Pribadi, 2017)	17
Gambar 2.3 Ilustrasi konsep periode inisiasi dan propagasi korosi berdasarkan perbedaan definisi (Schiessl dan Lay, 2005)	18
Gambar 2.4 Proses Terbentuknya Karat (Monteiro, 2013)	20
Gambar 2.5. Ilustrasi proses elektrokimia pada baja tulangan (Beeby, 1978)	21
Gambar 2.6. Perubahan Volume Tulangan Berdasarkan Tipe Produk Korosi yang Terbentuk (Monteiro, 2013)	21
Gambar 2.7. Proses Korosi dengan adanya pengaruh ion Cl ⁻ (Shi X et al., 2010)	22
Gambar 2.8 Tahapan Terjadinya Retak Akibat Korosi (Zhao et al., 2013)	24
Gambar 2.9 <i>Compressive Stress Strain Curve for Concrete Divided into Four Region Different Stage of Cracking</i> Ulfkjaer (1992) dalam (Johannsson & Reitzel, 2011)	26
Gambar 2.10 <i>Stress distribution and softening curves: (a,b) cohesive crack model for ductile-brittle metals; (c,d) cohesive crack model for quasibrittle materials (concrete); (e,f) crack band model for quasibrittle materials</i> (Bazant, 2002)	27
Gambar 2.11 Skema Keretakan Beton Bertulang Akibat Korosi (C. . Li et al., 2005) ..	29
Gambar 2.12 Distribusi Karat sepanjang Perimeter Tulangan (Zhao et al., 2011)	32
Gambar 3.1 Diagram Alir Penyusunan Disertasi	37
Gambar 3.2 Bagan Alir Detail Kegiatan Eksperimental	39
Gambar 3.3 Benda Uji Kubus untuk Pengujian Korosi dengan Metode (a) <i>Galvanostatik</i> dan (b) <i>Wetting and Drying</i>	43
Gambar 3.4 Proses Persiapan Agregat	44
Gambar 3.5 Proses Persiapan Cetakan dan Pengecoran Beton bertulang	45
Gambar 3.6 Skema Pengujian Penetrasi (ASTM C 1202)	47
Gambar 3.7 Skema Pengujian <i>Accelerated Corrosion Test</i> dengan Metode Galvanostatik	49

Gambar 3.8 Skema Pemotongan benda uji dan Alat pengamatan keretakan.	50
Gambar 3.9 Pengujian Korosi dengan menggunakan Siklus basah dan kering <i>Method</i> . 52	
Gambar 3.10 Sampel yang digunakan untuk XRF	53
Gambar 3.11 Proses Preparasi Sample untuk Pengujian XRF	53
Gambar 3.12 Sampel Beton Sebelum dan Setelah Dilakukan Proses <i>Coating</i>	54
Gambar 3.13 Alat Uji SEM	55
Gambar 4.1. Perbandingan Nilai Porositas Terbuka untuk Tiga Tipe Sampel.....	68
Gambar 4.2. Perbandingan Nilai Porositas Tertutup untuk Tiga Tipe Sampel	69
Gambar 5.1 Skema Pengujian Korosi dengan Metode Galvanostatik.....	73
Gambar 5.2 Skema Pemotongan Sampel untuk Pengamatan Proses Korosi dan Keretakan	74
Gambar 5.3 Pengamatan Kondisi Visual Pengujian Korosi Metode Galvanstatik Hari Pertama.....	74
Gambar 5.4 Pengamatan Kondisi Visual Pengujian Korosi Metode Galvanostatik Hari Kedua	75
Gambar 5.5 Pengamatan Kondisi Visual Pengujian Korosi Metode Galvanstatik Hari Keempat	75
Gambar 5.6. Keretakan yang terjadi pada Hari Ke-6 (Hasil eksperimental).....	76
Gambar 5.7 Retak Longitudinal pada hari ke 10.....	76
Gambar 5.8 Retak pada penampang hari ke 15	77
Gambar 5.9 Retak pada penampang hari ke 20	77
Gambar 5.10 Retak pada Hari ke 24.....	78
Gambar 5.11. Pola Keretakan Beton Pada Hari ke-15	78
Gambar 5.12. Hasil XRD Produk Korosi	79
Gambar 5.13 Polar Koordinat untuk Plotting Distribusi Karat	81
Gambar 5.14 Teknik Pengukuran Ketebalan Karat.....	81
Gambar 5.15 Normalisasi Distribusi Tebal Produk Korosi.....	83
Gambar 5.16 Hubungan antara lebar <i>crack</i> maksimum (mm) dan waktu perendaman (hari).....	84
Gambar 5.17 Produk Korosi di Sepanjang Retak yang Terjadi Pada Usia 20 Hari	85
Gambar 5.18 Hubungan antara Kandungan Klorida (%) dan Ketebalan Penetrasi (cm) 85	
Gambar 5.19 Hubungan antara Prosentase Korosi dan Lebar Retak	87

Gambar 5.20 Skema Pengujian Korosi dengan Metode <i>Wetting and Drying</i>	89
Gambar 5.21 Lapisan Tipis Kristal Garam yang Terbentuk di Permukaan Beton.....	90
Gambar 5.22 Kondisi Permukaan Beton dengan Siklus Basah dan Kering (a) dan <i>Fully Submerged</i> (b) Pada bulan ke Lima	90
Gambar 5.23. Hasil XRD Sampel 3 Jam Basah dan 5 Jam Kering.....	93
Gambar 5.24. Hasil XRD Sampel 1 Jam Basah dan 7 Jam Kering.....	93
Gambar 5.25. Hasil XRD Sampel dengan Kondisi <i>Fully Submerged</i>	94
Gambar 5.26 Hasil SEM untuk Sampel 1 Jam Basah dan 7 Jam Kering.....	95
Gambar 5.27 Hasil SEM untuk Sampel 3 Jam Basah dan 5 Jam Kering.....	96
Gambar 5.28 Hasil SEM untuk Sampel <i>Fully Submerged</i>	97
Gambar 5.29 Permukaan Sampel setelah <i>Coating</i>	98
Gambar 5.28 Hasil <i>Low Magnification</i> SEM sample 3 Jam Basah dan 5 Jam Kering dengan <i>Gold Coating</i>	99
Gambar 5.29 Hasil <i>High Magnification</i> SEM sample 3 Jam Basah dan 5 Jam Kering dengan <i>Gold Coating</i> (Perbesaran 10.000X)	100
Gambar 5.32 Grafik XRF dan Hasil EDS Persebaran Klorida untuk Tiga Tipe Sampel	101
Gambar 5.33 Grafik XRF dan Hasil EDS Persebaran Silika untuk Tiga Tipe Sampel	101
Gambar 5.34 <i>Chloride Profile</i> Pada Bulan Pertama.....	102
Gambar 5.35 Penampang Beton pada Kondisi <i>Fully Submerged</i> Bulan Pertama.....	103
Gambar 5.36 <i>Chloride Profile</i> Pada Bulan Ke Tiga.....	104
Gambar 5.37 <i>Chloride Profile</i> Pada Bulan Ke Lima.....	105
Gambar 5.38 <i>Chloride Profile</i> Pada Bulan Ke Sepuluh.....	106
Gambar 6.1 Hasil Perhitungan Konsentrasi Klorida dengan Hukum Fick II dan Hasil Eksperimental (Kondisi <i>Fully Submerged</i>) Pada Bulan ke-1	109
Gambar 6.2 Hasil Perhitungan Konsentrasi Chlorida dengan Hukum Fick's II dan Hasil Eksperimental (<i>Fully Submerged Condition</i>) Pada Bulan ke-10.....	109
Gambar 6.3 Hasil Perhitungan Konsentrasi Klorida dengan Hukum Fick II (dengan D_{eff}) dan Hasil Eksperimental (Kondisi <i>Fully Submerged</i>) Pada Bulan ke-1 ..	111
Gambar 6.4 Hasil Perhitungan Konsentrasi Klorida dengan Hukum Fick II (dengan D_{eff}) dan Hasil Eksperimental (Kondisi <i>Fully Submerged</i>) Pada Bulan ke-10 .	111

Gambar 6.5 Hasil Perhitungan Koefisien Difusi dengan Hukum Fick II Berdasarkan Hasil Eksperimental.....	112
Gambar 6.6 Hasil Perhitungan Konsentrasi Klorida dengan Hukum Fick II (dengan D_{app}) dan Hasil Eksperimental (Kondisi <i>Fully Submerged</i>) Pada Bulan ke-1 ...	113
Gambar 6.7 Hasil Perhitungan Konsentrasi Chlorida dengan Hukum Fick II (dengan D_{app}) dan Hasil Eksperimental (Kondisi <i>Fully Submerged</i>) Pada Bulan ke-10 .	114
Gambar 6.8 Hasil Perhitungan Konsentrasi Klorida dan Hasil Eksperimental untuk kondisi 1 Jam Basah dan 7Jam Kering	117
Gambar 6.9 Hasil Perhitungan Konsentrasi Klorida dan Hasil Eksperimental untuk kondisi 3 Jam Basah dan 5 Jam Kering	118
Gambar 6.10 Hasil Pemodelan dan Pengujian Experimental Lu et al.....	119
Gambar 6.11 Hasil Pemodelan dan Pengujian Experimental (Iqbal, 2008).....	120
Gambar 7.1 Koordinat Polar untuk Plotting Distribusi Karat	125
Gambar 7.2 <i>Non-Uniform Distribution</i> Karat pada hari ke 6.....	128
Gambar 7.3 <i>Non-Uniform Distribution</i> Karat pada hari ke 10.....	128
Gambar 7.4 <i>Non-Uniform Distribution</i> Karat pada hari ke 15.....	129
Gambar 7.5 <i>Non-Uniform Distribution</i> Karat pada hari ke 20.....	130
Gambar 7.6 Produk Korosi di Sepanjang Retak yang Terjadi	131
Gambar 7.7. Ilustrasi Distribusi Karat Hasil Experimental dan Model.....	132
Gambar 7.8 Hasil Perhitungan Waktu Inisiasi Retak	135

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. <i>Based Value of Fracture Energy</i>	29
Tabel 3.1 Matriks Kebutuhan Benda Uji.....	42
Tabel 4.1 Hasil Analisa Kimia Semen Portland.....	59
Tabel 4.2 Sifat Fisik Agregat Halus	60
Tabel 4.3 Hasil Analisa Ayakan Pasir	60
Tabel 4.4 Sifat Fisik Agregat Halus	61
Tabel 4.5 Hasil Analisa Ayakan Pasir	61
Tabel 4.6 Hasil Pengujian Slump Test	62
Tabel 4.7 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton	63
Tabel 4.8 Kuat Tekan Beton setelah Terekspose NaCl 5%	63
Tabel 4.9 Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton	65
Tabel 4.10 Kuat Tarik Beton setelah Terekspose NaCl 5%	65
Tabel 4.11 Hasil Pengujian Porositas Beton yang mengalami Siklus 1 Jam Basah dan 7 Jam Kering.....	66
Tabel 4.12 Hasil Pengujian Porositas Beton yang mengalami Siklus 3 Jam Basah dan 5 Jam Kering.....	67
Tabel 4.13 Hasil Pengujian Porositas Beton yang mengalami Siklus <i>Fully Submerged</i>	67
Tabel 4.14. Hasil Perhitungan Uji Kecepatan Penetrasi ion Klorida	70
Tabel 5.1 <i>Properties</i> Produk Korosi (Karat)	80
Tabel 5.2 <i>Weight Loss Analysis for Reinforcement</i>	87
Tabel 5.3 Kandungan Unsur Hasil Pengujian XRF untuk Benda uji Pada Bulan ke Lima	92
Tabel 7.1 Hasil Perhitungan Luasan Karat Eksperimental dan Model.....	131
Tabel 7.2 Perbandingan Hasil Pemodelan Pola Retak dengan Menggunakan Abaqus dan Hasil Pengamatan Eksperimental	136
Tabel 7.3. Hasil Pengamatan Retak Eksperimental.....	140
Tabel 7.4. Perhitungan Waktu Retak Sebenarnya Hasil Experimental dan Model.....	141

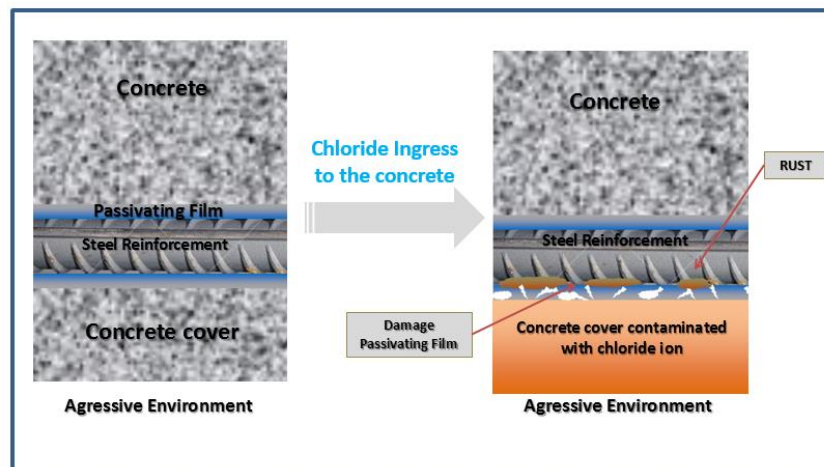
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Korosi tulangan pada beton bertulang merupakan penyebab utama dari masalah ketahanan struktur yang menyebabkan menurunnya kekuatan struktur (Kumar et al., 2013; Wong et al., 2010; Zhao et al., 2011). Proses korosi disebabkan oleh adanya reaksi antara baja tulangan dan ion OH yang berasal dari reaksi oksigen dan air. Hal ini dapat terjadi karena rusaknya lapisan pasif dari tulangan, dikenal juga dengan *depassivation*, yang disebabkan oleh adanya infiltrasi ion klorida (Cl⁻) ke dalam beton (Sudjono, 2007; Zhao et al., 2013). Setelah *depassivation* terjadi pada tulangan maka produk korosi (karat) akan terbentuk pada *interface* antara baja dan beton yang lebih dikenal dengan nama *corrosion-filled paste* (CP) (Zhao, Xu, & Jin, 2013). Proses rusaknya lapisan pasif ini diilustrasikan pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1. Proses Rusaknya Lapisan Pasif Tulangan dan Terbentuknya Karat (Zhao et al., 2011; Zhao et al., 2012; Zhao et al., 2011)

Seiring dengan berjalannya waktu volume produk korosi (CP) yang dihasilkan setelah proses *depassivation* lebih besar dari logam asli (tulangan). Hal tersebut menyebabkan produk korosi akan menekan permukaan beton sekitarnya serta menghasilkan tegangan yang cukup besar pada *cover* beton (Du, Jin, & Zhang, 2014; Zhao, Ren, Dai, & Jin, 2011; Zhao et al., 2013; Zhao, Karimi, et al., 2011). Peningkatan produk korosi mengakibatkan retak mulai terjadi pada *interface* antara baja dan beton.

Seiring dengan berjalannya waktu, retak yang terjadi akan berpropagasi dan akhirnya sampai ke bagian permukaan beton. Hal ini sangat membahayakan bagi pengguna suatu struktur tersebut karena dapat menyebabkan penurunan kekuatan dan hancurnya suatu struktur beton bertulang.

Studi mengenai keretakan beton bertulang akibat adanya korosi telah menjadi bahan pembicaraan dan penelitian selama bertahun-tahun. Hal ini dikarenakan korosi telah menyebabkan banyak kerusakan terutama untuk bangunan yang berada di daerah laut. Bangunan yang berada di daerah laut memiliki peluang besar terkena korosi karena komposisi air laut yang terdiri atas zat agresif seperti klorida (Iqbal, 2008). Kerusakan yang terjadi akibat adanya korosi ditandai dengan adanya retak, *spalling* dan perubahan warna pada beton yang mengakibatkan penurunan kekuatan dan umur layan bangunan.

Beberapa metode telah dilakukan untuk mencegah maupun mengatasi permasalahan kerusakan beton akibat adanya korosi dalam berbagai kondisi layan struktur. Pada kondisi awal, beton dapat didesain untuk memperlambat kecepatan penetrasi klorida salah satunya adalah dengan mendesain beton dengan kerapatan yang baik, meningkatkan tebal selimut maupun melapisi tulangan dengan menggunakan epoxy. Pada kondisi selanjutnya, ketika klorida telah mencapai batas dan mencapai bagian tulangan, maka klorida yang ada di dalam beton harus dihilangkan. Cara yang dapat digunakan untuk menghilangkan klorida yang ada didalam beton adalah dengan mengganti beton yang ada dengan beton baru. Selain itu cara lain juga dapat dilakukan yaitu dengan menggunakan *electrochemical procedure* yang dikenal dengan *Electrochemical Extraction (ECE)*. Metode ini dilakukan dengan mengeluarkan klorida dengan mengaplikasikan *high voltage* pada struktur tersebut. Pada kasus tertentu metode proteksi katoda dapat dilakukan untuk mengurangi proses korosi yang terjadi.

Permasalahan yang ada saat ini terkait dengan waktu pelaksanaan *maintenance* yang tepat untuk suatu struktur yang terkena korosi. Perbaikan dan perawatan yang selama ini dilakukan cukup sulit dan relatif mahal. Oleh karena itu, untuk mengatasi permasalahan tersebut para peneliti mulai mengembangkan model untuk dapat memprediksi waktu terjadinya keretakan akibat korosi.

Penelitian mengenai korosi telah dilakukan oleh Liu dan Weyers dimana penelitian ini menghasilkan perumusan lebar retak dan waktu terjadinya inisiasi retak akibat adanya produk korosi (Liu & Weyers, 1998). Setelah itu penelitian dilanjutkan oleh Li et al

dengan mengembangkan perumusan dari Liu & Weyers dan merumuskan model untuk memprediksi lebar retak dan menghubungkannya dengan waktu terjadinya korosi (C. . Li, Lawanwisut, Zheng, & Kijawatworawet, 2005). Penelitian-penelitian tersebut mengasumsikan bahwa retak yang terjadi diakibatkan oleh korosi yang merata disepanjang perimeter tulangan sehingga menghasilkan pola keretakan yang merata pula. Namun, pada perkembangannya penelitian yang dikembangkan oleh Zhao menyebutkan bahwa produk korosi yang terbentuk pada dasarnya tidak merata disepanjang perimeter tulangan (Zhao, Hu, Yu, & Jin, 2011). Persebaran karat secara tidak merata (*non-uniform*) ini menghasilkan pola keretakan yang juga tidak merata dimana retak lebih banyak ditemui pada bagian yang menghadap permukaan beton yang terpapar klorida karena adanya penumpukan karat pada bagian tersebut. Meskipun telah ditemukan dari hasil eksperimen bahwa produk korosi yang terbentuk tidak tersebar secara merata disepanjang perimeter beton, namun penelitian yang dilakukan Zhao untuk memprediksi kerusakan (*damage*) yang terjadi akibat korosi masih menggunakan asumsi bahwa produk korosi tersebar secara merata disepanjang perimeter beton (Zhao et al., 2011).

Seiring dengan berkembangnya penelitian yang ada baru pada beberapa tahun terakhir ini mulai dianalisa kerusakan akibat adanya persebaran karat yang tidak merata. Penelitian yang dilakukan oleh Muthulingam dan Rao menganalisa waktu terjadinya inisiasi retak akibat adanya korosi dengan memodelkan beton bertulang ke dalam program berbasis *finite elemen* (Muthulingam & Rao, 2014). Selain itu Cao dan Cheung juga melakukan penelitian mengenai *pitting corrosion* yang dan hubungannya dengan korosi yang tidak merata akibat infiltrasi klorida pada beton (Cao & Cheung, 2014). Melihat penelitian yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti maka dapat disimpulkan bahwa penelitian terkait waktu awal retak dan perambatannya hingga mencapai selimut beton akibat korosi yang tidak merata masih belum dilakukan secara mendalam. Padahal pada kenyataannya analisa ini sangat menentukan tingkat *service ability* dan waktu perawatan dari struktur tersebut. Hal ini dikarenakan apabila retak telah terjadi maka propagasi retak akan mulai terjadi di sepanjang selimut beton dan kemudian akan berlanjut ke arah longitudinal. Fenomena ini semakin lama akan mengakibatkan penurunan kinerja struktur dan kerusakan struktur tersebut.

Beberapa metode eksperimen telah dikemukakan oleh beberapa peneliti untuk mengamati proses terjadinya korosi. Selama ini eksperimen yang dilakukan sebagian

besar menggunakan metode galvanostatik (Cao & Cheung, 2014; Liu & Weyers, 1998; Vu et al, 2006; Wilson, 2013). Metode ini dilakukan dengan merendam beton pada larutan NaCl dengan konsentrasi tertentu dan mengalirkan arus tertentu hingga terjadi korosi dan retak. Meskipun metode tersebut mampu mensimulasikan proses korosi akan tetapi hanya terbatas pada proses korosi yang terjadi pada beton dengan kondisi basah. Metode ini tidak dapat mensimulasikan proses korosi pada beton yang berada di daerah percikan (percikan).

Korosi pada beton pada dasarnya sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan disekitar beton tersebut. Beton yang berada pada kondisi terendam air laut dan berada di pesisir pantai memiliki perilaku yang berbeda. Struktur beton yang diletakkan pada pesisir pantai maupun daerah percikan mengalami siklus basah dan kering sehingga memiliki potensi korosi lebih besar dibandingkan dengan beton yang terendam. Beberapa studi telah dilakukan terkait dengan pengaruh dari siklus basah dan kering terhadap kedalaman penetrasi klorida dan waktu awal terjadinya korosi. Siklus basah dan kering menyebabkan penetrasi ion agresif yang lebih dalam dibandingkan dengan kondisi basah atau kering secara terpisah. Selain itu, siklus ini dapat menyebabkan peningkatan *corrosion rate* dibandingkan dengan kondisi biasa.

Selain metode galvanostatik yang telah banyak dipakai untuk mensimulasikan proses korosi, beberapa peneliti lain membuat suatu terobosan dengan menempatkan beton pada suatu *artificial environment chamber* untuk melihat perilaku korosi yang sebenarnya (Zhao et al., 2013; Zhao et al., 2011; Zhao et al., 2012; Zhao et al., 2011). Metode ini pada dasarnya telah mampu merepresentasikan kondisi lingkungan yang meliputi kondisi basah dan kering. Akan tetapi efek dari perbedaan durasi basah dan kering belum dijadikan sebagai pertimbangan. Oleh karena itu investigasi lanjutan diperlukan untuk dapat mengetahui efek dari perbedaan durasi basah dan kering terhadap kecepatan penetrasi klorida pada beton.

Dengan melihat perkembangan penelitian yang telah dilakukan terkait korosi yang terjadi maka penelitian disertasi ini bertujuan untuk mengembangkan model keretakan yang disebabkan oleh korosi dengan mempertimbangkan persebaran produk korosi yang tidak merata. Selain itu efek dari perbedaan kombinasi durasi siklus basah dan kering juga digunakan sebagai variable dari model yang dikembangkan pada penelitian ini. Oleh karena itu penelitian ini mengambil judul “**Model Prediksi Retak Pada Beton**

Bertulang Akibat Korosi Tidak Seragam Karena Infiltrasi Klorida Dengan Mempertimbangkan Siklus Basah dan Kering”.

Penelitian ini meliputi kegiatan eksperimental, pemodelan secara matematis dan numerik. Kegiatan eksperimental dilakukan dengan menggunakan dua metode yaitu metode galvanostatik dan metode *wetting and drying*. Dua metode ini dipilih untuk mendapatkan data keretakan dan *chloride profile* pada beton. Pemodelan matematis yang merupakan tujuan utama dari penelitian ini dikembangkan untuk mendapatkan suatu model prediksi keretakan pada beton bertulang dengan pendekatan korosi tidak seragam dan mempertimbangkan efek dari siklus basah dan kering.

1.2 Rumusan Masalah

Proses perbaikan dan perawatan struktur beton akibat korosi merupakan proses yang relatif sulit dan mahal untuk dilakukan. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode yang dapat digunakan untuk memprediksi keretakan pada beton bertulang akibat korosi secara tepat sesuai dengan kondisi sebenarnya. Penelitian sebelumnya mengasumsikan korosi terjadi secara seragam disepanjang perimeter tulangan serta tidak dipertimbangkannya efek dari siklus basah dan kering menyebabkan model prediksi yang ada selama ini tidak dapat memprediksikan proses serta waktu keretakan secara akurat. Dengan melihat fakta tersebut, permasalahan utama yang dibahas pada penelitian disertasi ini adalah bagaimana mengembangkan suatu model prediksi keretakan untuk beton bertulang akibat adanya korosi yang tidak seragam yang disebabkan oleh infiltrasi klorida dengan mempertimbangkan siklus basah dan kering.

1.2.1 Detail Permasalahan

Berdasarkan uraian permasalahan umum yang telah disampaikan sebelumnya maka detail permasalahan pada disertasi ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana hubungan antara perbedaan kombinasi durasi siklus basah dan kering terhadap penetrasi klorida pada beton?
2. Model apakah yang dapat digunakan untuk memprediksi proses infiltrasi klorida akibat siklus basah dan kering?
3. Bagaimana hubungan antara asumsi korosi yang tidak seragam terhadap keretakan pada beton bertulang?

4. Model apakah yang dapat digunakan untuk memprediksi waktu retak akibat korosi yang tidak seragam?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan permasalahan yang telah dikemukakan pada bagian sebelumnya maka tujuan dari penelitian disertasi ini adalah untuk menganalisa efek dari siklus basah dan kering dan pengaruh penggunaan pendekatan korosi tidak seragam (*non-uniform corrosion*) untuk mendapatkan model prediksi keretakan yang tepat pada beton bertulang.

1.3.1 Detail Tujuan

Berdasarkan uraian tujuan umum yang telah disampaikan diatas maka detail permasalahan pada disertasi ini adalah sebagai berikut.

1. Mendapatkan hubungan antara perbedaan kombinasi siklus basah dan kering terhadap penetrasi klorida pada beton bertulang.
2. Mendapatkan model yang dapat digunakan untuk memprediksi proses infiltrasi klorida akibat siklus basah dan kering.
3. Mendapatkan hubungan anatara keretakan yang terjadi akibat korosi yang tidak seragam.
4. Mendapatkan model yang dapat digunakan untuk memprediksi waktu inisiasi retak dan propagasinya akibat korosi yang tidak seragam.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari adanya penelitian disertasi ini adalah sebagai berikut:

1. Bagi bidang konstruksi dapat menjadi salah satu bahan referensi dalam memprediksikan waktu retak akibat korosi sehingga dapat digunakan sebagai pertimbangan waktu *maintenance* dan *repair* pada bangunan yang berada pada lingkungan yang terkontaminasi klorida.
2. Bagi praktisi dapat menjadi acuan dan pertimbangan dalam desain terutama untuk struktur yang terletak pada lingkungan laut.

1.5 Ruang Lingkup dan Batasan Penelitian

Ruang lingkup dari pelaksanaan penelitian disertasi ini meliputi eksperimental, pemodelan numerik dan matematis. Terdapat beberapa batasan dalam penelitian ini yang juga menjadi batasan dari model yang dikembangkan yaitu sebagai berikut:

1. Beton yang digunakan adalah beton normal dengan kuat tekan rencana adalah 30 MPa dan faktor air semen (FAS) sebesar 0.5.
2. Kadar garam yang digunakan dalam penelitian ini adalah 5%.
3. Pada kegiatan eksperimental dan pemodelan, benda uji dianggap tidak menerima beban luar. Beban yang bekerja hanya beban *pressure* akibat penambahan volume karat.
4. Kondisi basah dan kering didekati dengan meletakkan beton pada *chamber* dengan suhu 30°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) dan kelembapan maksimum 80%.
5. Variasi kondisi lingkungan (temperatur, kelembapan dan kadar garam) serta mutu benda uji (beton dan tulangan) tidak dibahas dalam penelitian ini.
6. Terdapat 3 konfigurasi dalam pengujian dengan metode *wetting and drying* yaitu:
 - a. Satu jam kering dan tujuh jam basah
 - b. Tiga jam kering dan lima jam basah
 - c. Terendam sempurna (*fully submerged*)
7. Tulangan yang digunakan tulangan ulir diameter 19 mm produksi PT Hanil dengan mutu U40 ($f_y = 400 \text{ MPa}$).
8. Perhitungan luasan tulangan ulir diasumsikan sama dengan perhitungan luasan tulangan polos.
9. Tulangan yang digunakan tidak melalui proses *coating* terlebih dahulu sehingga proses korosi yang terjadi murni terhadap tulangan yang tidak diproteksi sebelumnya.
10. Semen yang digunakan adalah *Portland Pozzoland Cement* (PPC) produksi PT Semen Gresik.
11. Campuran beton yang digunakan tidak menggunakan inhibitor.
12. Pemodelan numerik dilakukan secara dua dimensi (2D) dengan menggunakan program Abaqus CAE.
13. Proses infiltrasi klorida dimodelkan dalam satu dimensi (1D).

14. Model penetrasi klorida yang dikembangkan hanya divalidasi dengan hasil eksperimental jangka pendek (10 bulan). Sehingga untuk jangka panjang perlu dilakukan validasi lebih lanjut.
15. Model keretakan akibat korosi yang tidak merata tidak mempertimbangkan efek beban luar, *precracking stage*, pengaruh penggunaan tulangan sengkang, penggunaan *multiple reinforcement*, dan *stress reduction* akibat pabrikan tulangan.

1.6 Kontribusi dan Originalitas Penelitian

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya pada bagian pendahuluan bahwa korosi yang terjadi pada beton bertulang dapat menyebabkan keretakan yang mengarah pada kegagalan struktur tersebut. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisa efek dari perbedaan kombinasi siklus basah dan kering dan pengaruh penggunaan pendekatan korosi tidak seragam (*non-uniform corrosion*) untuk mendapatkan model prediksi keretakan yang tepat pada beton bertulang. Hasil akhir dari penelitian ini adalah berupa suatu model yang dapat digunakan untuk memprediksi waktu inisiasi retak pada beton bertulang untuk beton yang berada pada daerah percikan dengan pendekatan korosi tidak seragam. Dengan penelitian ini maka prediksi terhadap keretakan dapat dilakukan dengan lebih akurat sesuai dengan kondisi yang sebenarnya sehingga perkiraan waktu perawatan dan perbaikan akibat korosi dapat dilakukan dengan lebih akurat. Berikut ini merupakan distribusi penelitian yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti dan posisi penelitian yang dilakukan dalam peta riset yang telah ada.

Tabel 1.1. Distribusi Penelitian

NO	Judul	Thn	Peneliti	Tipe Korosi	Analisa Retak	Waktu Inisiasi Retak	Waktu Propagasi Retak	Jenis Tulangan	Siklus basah dan kering
1	<i>Modeling the Time-to-Corrosion Cracking of the Cover Concrete in Klorida Contaminated Reinforced Concrete Structures</i>	1998	Youping Liu	Seragam	Merumuskan Lebar retak terhadap waktu	Ya	Tidak	Ulir	Tidak
2	<i>Crack Width Due to Corroded Bar in Reinforced Concrete Structures</i>	2005	C.Q. Li et al	Seragam	Ditinjau hubungan lebar retak dengan waktu dan hubungan antara tebal cover dan waktu terjadinya <i>surface cracking</i>	Ya (Mengambil data penelitian Liu et al)	Ya (merumuskan lebar retak dan dihubungkan dengan waktu)	Ulir	Tidak
3	<i>Non-Uniform Distribution of Rust Layer Around Steel Bar</i>	2011	Yuxi Zhao, Bingyan Hu, Jiang Yu Weiliang Jin	Tidak Seragam	NO	Tidak	Tidak	Ulir	Ya (<i>Wet</i> 3.53% sodium klorida, 4 hours ; <i>Dry</i> 40° C, 68 jam) selama 2 tahun

NO	Judul	Thn	Peneliti	Tipe Korosi	Analisa Retak	Waktu Inisiasi Retak	Waktu Propagasi Retak	Jenis Tulangan	Siklus basah dan kering
4	<i>Damage analysis and cracking model of reinforcement concrete structure with rebar corrosion</i>	2011	Yuxi Zhao, Jiang Yu, Weiliang Jin	Seragam	Menentukan process retak dengan perumusan matematis dan membagi proses tersebut kedalam beberapa sub proses	Tidak	Tidak	Polos	Tidak
5	<i>Critical thickness of rust layer at inner and out surface cracking of concrete cover in reinforced concrete structures</i>	2012	Yuxi Zhao, Jiang Yu, Yingyao Wu, Weiliang Jin	Seragam	Melihat Pola keretakan dari hasil eksperimental	Tidak	Tidak	Polos	Tidak
6	<i>Crack shape and rust distribution in corrosion-induced cracking concrete</i>	2012	Yuxi Zhao, Jiang Yu, Bingyan Hu, Weiliang Jin	Seragam	Merumuskan Lebar retak Permukaan dan panjang retak	Tidak	Tidak	Ulir	Ya (<i>Wet</i> 3.53% sodium klorida, 4 hours ; <i>Dry</i> 40 ⁰ C, 68 jam) selama 2 tahun
7	<i>Analytical Solutions for Corrosion-Induced Cohesive Concrete Cracking</i>	2012	Hua-Peng Chen and Nan Xiao	Seragam	Merumuskan Lebar Retak dan propagasi retak	Ya (exp. Liu's)	Tidak	Ulir (exp. Liu's)	Tidak

NO	Judul	Thn	Peneliti	Tipe Korosi	Analisa Retak	Waktu Inisiasi Retak	Waktu Propagasi Retak	Jenis Tulangan	Siklus basah dan kering
8	<i>Modelling of interaction between corrosion-induced concrete cover crack and steel corrosion rate</i>	2013	Cao, Chong Cheung, Moe M S Chan, Ben Y B	Seragam	Hubungan antara lebar retak dan corrosion rate dengan menggunakan couple numerical analysis antara microcell corrosion dan macrocell corrosion	Tidak	Tidak	Polos	Tidak
9	<i>Modeling Corrosion Induced Concrete Damage</i>	2013	Emilie et all	Tidak Seragam	Numerical Simulation menggunakan Finite Element program untuk memprediksi lebar crack	Tidak	N/A	Polos	Tidak
10	<i>Cover Cracking of The Reinforced Concrete Due to Rebar Corrosion Induced by Klorida Penetration</i>	2013	Galvez, JC et all	Seragam	Modeling crack pattern menggunakan Finite element dan waktu crack mencapai cover	Tidak	Ya	Polos	Tidak

NO	Judul	Thn	Peneliti	Tipe Korosi	Analisa Retak	Waktu Inisiasi Retak	Waktu Propagasi Retak	Jenis Tulangan	Siklus basah dan kering
11	<i>Non-uniform time-to-corrosion initiation in steel reinforced concrete under klorida environment</i>	2014	Muthulingam, S. Rao, B.N.	Tidak Seragam	N/A	Menggunakan Finite Element Model tapi tidak dijelaskan lebih lanjut mengenai perumusan yang digunakan	Tidak	Polos	Tidak
12	<i>Non-uniform rust expansion for klorida-induced pitting corrosion in RC structures</i>	2014	Cao, Chong Cheung, Moe M.S.	Tidak Seragam	Menganalisa proses terjadinya pitting corrosion akibat adanya non uniform corrosion	Tidak	Tidak	Polos	Ya (tidak ada informasi lebih lanjut)
13	Model Prediksi Retak Pada Beton Bertulang Akibat Korosi Tidak Seragam Karena Infiltrasi Klorida Dengan Mempertimbangkan Siklus Basah dan Kering	2017	Wahyuniarsih S.	Tidak Seragam	Mengembangkan Model Infiltrasi Klorida Akibat siklus basah dan kering Mengembangkan model prediksi retak dengan pendekatan korosi tidak seragam	Ya	Ya	Ulir	Ya (Wet 5% Natrium Chloride. Dry 30 ⁰ C Repeated for 10 months)

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Durabilitas dan Korosi Beton Bertulang

Durabilitas merupakan kemampuan suatu material untuk menahan perubahan cuaca, serangan iklim, abrasi atau segala proses perusakan yang berasal dari lingkungan sehingga beton dapat mempertahankan bentuk asal, kemampuan, kualitas dan umur layannya. Pada struktur beton bertulang durabilitas lebih menekankan pada kemampuan struktur untuk menahan terjadinya pelapukan, serangan bahan-bahan kimia, abrasi maupun proses-proses lain yang dapat merusak struktur tersebut dengan mempertahankan sifat-sifat dan kemampuannya (Monteiro, 2013).

Ketahanan struktur beton bertulang pada dasarnya mengacu kemampuan dari suatu struktur dapat bertahan tanpa adanya kerusakan maupun gangguan pada *performance* yang berarti (Kwan & Wong, 2011). Permasalahan durabilitas pada struktur beton bertulang sangat erat kaitannya dengan penurunan kekuatan pada struktur tersebut. Selain adanya aksi mekanik seperti kelebihan beban dan adanya penurunan, sebagian besar penyebab penurunan kekuatan pada struktur beton bertulang disebabkan karena permasalahan *durability*. Setiap struktur memiliki persyaratan ketahanan durabilitas yang berbeda. Hal ini tergantung pada lingkungan tempat beton tersebut berada dan *properties* yang diinginkan

Korosi pada beton bertulang merupakan penyebab utama dari masalah ketahanan struktur yang menyebabkan menurunnya kekuatan struktur (Chen & Mahadevan, 2008; Zhao, Yu, Hu, & Jin, 2012; Zhao, Karimi, et al., 2011). Kasus kerusakan struktur akibat korosi telah terjadi di beberapa Negara. Kasus runtuhnya beberapa kanopi dari beton di Hong Kong terjadi karena adanya korosi pada tulangnya Yeung dalam (Webster, 2000). Sedangkan di Inggris, korosi merupakan masalah terbesar yang dihadapi oleh para *engineer* yang menyebabkan diperlukan dana sekitar £550M tiap tahunnya untuk masalah korosi pada beton bertulang (Webster, 2000). Sedangkan di Indonesia, kerusakan akibat korosi berdasarkan para ahli dapat mencapai 1.5% dari *Gross National Product* (GNP) (Darmawan, 2006 dalam Roberth, 2013). Korosi pada dasarnya merupakan hasil interaksi antara material dengan lingkungannya. Hasil dari interaksi tersebut berupa degradasi terhadap material yang berlangsung dari waktu ke waktu hingga mencapai kondisi stabil.

Proses ini berlangsung sangat lambat sehingga material masih dapat digunakan seperti biasa selama proses tersebut berlangsung (Schweitzer, 1996).

Korosi pada beton sangat mempengaruhi kekuatan beton tersebut. Korosi menyebabkan memburuknya lekatan pada beton dikarenakan memburuknya lekatan antara beton dan tulangan sehingga kemampuan tulangan untuk memberikan kekuatan dan daktilitas akan berkurang dengan adanya kerusakan pada tulangan yang disebabkan oleh korosi (Fang et al., 2004). Gambar 2.1 menunjukkan kerusakan akibat adanya korosi.



Gambar 2.1. Korosi Pada Beton Bertulang (Dokumentasi pribadi, 2014)

Beton secara makro terlihat sebagai material yang kuat dan masif, tetapi jika dilihat secara mikro maka beton adalah material yang berpori dengan diameter yang kecil. Pori-pori di dalam beton pada umumnya bersifat heterogen dan memiliki ukuran diameter berkisar antara 1 nm hingga lebih dari 10 μm (Silva, 2013). Ukuran diameter pori-pori kapiler tersebut masih memungkinkan senyawa-senyawa di sekitar beton, seperti klorida di air laut, untuk berinfiltrasi ke dalam beton dengan beberapa mekanisme transport seperti difusi, adsorpsi dan mekanisme lainnya.

Seiring dengan waktu, senyawa yang masuk ke dalam beton akan mencapai permukaan baja tulangan. Pada permukaan baja sebenarnya terdapat lapisan pasif baja yang tipis yang berguna untuk melindungi baja dari korosi. Akan tetapi senyawa seperti klorida yang masuk ke dalam beton menyebabkan rusaknya lapisan pasif dari baja tulangan. Sedangkan, pada kasus korosi akibat karbonasi, lapisan pasif tidak terbentuk secara sempurna akibat turunnya pH beton karena bereaksi dengan CO_2 . Rusaknya lapisan pasif antara beton dan tulangan ini dikenal dengan istilah depasivasi. Setelah depasivasi terjadi pada tulangan maka produk korosi, atau dikenal juga dengan sebutan

karat, akan terbentuk pada *interface* antara baja dan beton yang lebih dikenal dengan nama *corrosion-filled paste (CP)* (Zhao et al., 2013).



Gambar 2.2 Korosi yang Terjadi pada *Interface* Baja dan Beton (Zhao et al., 2012)

2.2 Proses Infiltrasi Klorida pada Beton

Seperti yang telah dijelaskan pada sub bab sebelumnya, beton merupakan material yang porous. Tingkat porositas beton dipengaruhi oleh beberapa hal seperti rasio air semen dan proses perawatan (Silva, 2013). Lebih lanjut dijelaskan pori yang terdapat pada beton dapat dibagi menjadi tiga yaitu *gel pores* (berukuran 1 hingga 10 nm), *capillary pores* (berukuran 10 nm hingga 10 μm) dan *macro pores* atau sering disebut *air voids* (berukuran lebih dari 10 μm). Gel pores tidak berperan secara signifikan dalam proses transport klorida ke dalam beton karena memiliki ukuran pori yang sangat kecil. Sedangkan 2 jenis pori lainnya berperan dalam proses transport dengan melibatkan pengaruh gravitasi (Silva, 2013).

Pada sub bab sebelumnya juga telah dijelaskan bahwa beton yang berada pada daerah terendam dan beton yang berada pada daerah percikan memiliki mekanisme infiltrasi yang berbeda. Pada beton yang berada pada daerah percikan mengalami siklus basah dan kering dimana mekanisme masuknya klorida tidak hanya terjadi dengan proses difusi akan tetapi juga bersamaan dengan proses konveksi, absorpsi dan proses lainnya.

Proses difusi dapat dijabarkan dengan menggunakan hukum Fick II seperti diperlihatkan pada persamaan 2.1 (Shi et al., 2012; Sobhani dan Ramezaniapour, 2007; Sudjono, 2007).

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} \quad (2.1)$$

Dimana:

C (x,t) = konsentrasi senyawa yang terdifusi dalam fungsi jarak dan waktu

t = waktu

x = jarak

Dc = Koefisien Difusi

Persamaan Fick diatas dapat diselesaikan dengan menggunakan *error function* (Shi et al., 2012; Silva, 2013; Sobhani dan Ramezaniapour, 2007; Sudjono, 2007). Sehingga persamaan 2.1 diatas dapat diselesaikan dengan persamaan 2.2 di bawah ini.

$$\frac{C(x,t)}{C_s} = \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right] \quad (2.2)$$

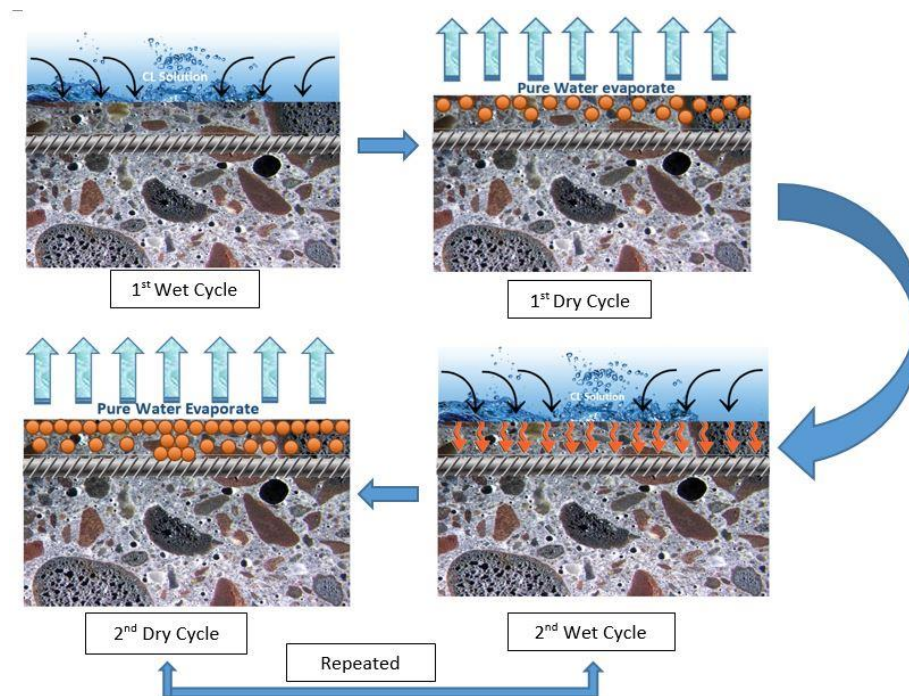
Dimana Cs adalah konsentrasi senyawa pada permukaan. Nilai *error function* (erf) didapatkan dari Gaussian *error function* yang nilainya dapat dilihat pada tabel umum *error function*.

2.3 Pengaruh Mekanisme Basah dan Kering terhadap Infiltrasi Klorida pada Beton Bertulang

Struktur beton bertulang yang terletak pada kondisi laut memiliki terbagi atas dua kategori *exposure* utama yaitu langsung (*direct*) dan tidak langsung (*indirect*). Beton yang berada pada kondisi *direct exposure* meliputi struktur-struktur yang tenggelam penuh maupun sebagian di laut. Sedangkan kategori *indirect exposure* lebih mengacu pada beton-beton yang terletak di pesisir pantai maupun daerah-daerah percikan (Iqbal, 2008).

Proses infiltrasi klorida pada kedua daerah tersebut memiliki mekanisme yang berbeda. Pada daerah percikan terdapat mekanisme siklus basah dan kering yang berdampak pada kecepatan masuknya ion klorida pada beton. Lebih lanjut dijelaskan bahwa penetrasi klorida pada daerah yang mengalami siklus basah dan kering tidak hanya terjadi dengan mekanisme difusi akan tetapi juga kombinasi dengan mekanisme lainnya

seperti konveksi dan absorpsi. Gambar 2.2 menunjukkan proses infiltrasi klorida pada beton yang mengalami siklus basah dan kering. Pada kondisi basah, air laut yang mengandung klorida masuk ke dalam beton melalui mekanisme *capillary suction*. Sedangkan klorida tetap berpindah dari konsentrasi tinggi ke rendah melalui mekanisme difusi. Ketika kondisi lingkungan luar masuk ke kondisi kering, air yang berada didalam pori akan menguap sedangkan kristal garam akan tetap berada pada beton. Bila kondisi ini berlangsung terus menerus maka klorida akan lebih cepat masuk ke dalam beton. Pada waktu paparan tertentu, jumlah klorida yang ada pada beton akan mencapai batasan untuk merusak lapisan pasif pada tulangan dan menginisiasi proses korosi.



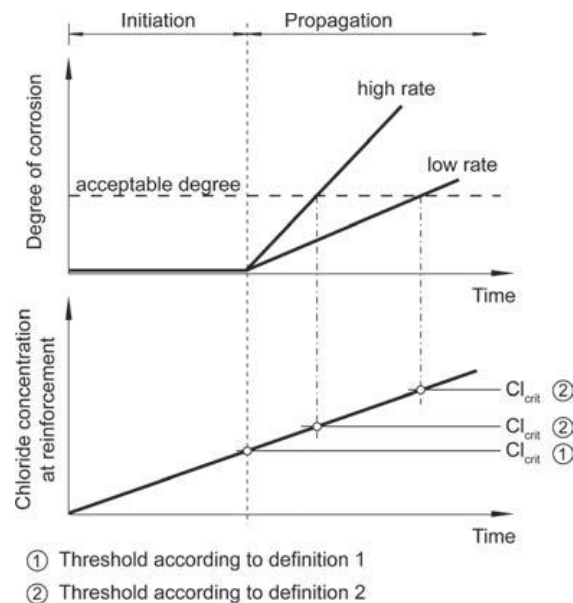
Gambar 2.2. Proses Infiltrasi Klorida dengan Mekanisme Basah dan Kering (Ilustrasi Pribadi, 2017)

Pada mekanisme ini, durasi basah dan kering juga sangat mempengaruhi proses infiltrasi klorida ke dalam beton. Penelitian yang dilakukan oleh Iqbal, 2008 menyatakan bahwa durasi basah dan kering mempengaruhi kecepatan proses infiltrasi klorida ke dalam beton. Model prediksi infiltrasi klorida yang umum digunakan adalah dengan menggunakan pendekatan Hukum Fick II sebagaimana telah dijelaskan pada sub bab 2.2. Model ini terbukti telah terbukti dapat mendekati proses infiltrasi klorida pada beton yang berada pada kondisi terendam sempurna. Akan tetapi untuk beton yang berada pada

daerah percikam dengan kondisi terendam sebagian, hukum Fick's perlu mendapatkan beberapa penyesuaian agar dapat digunakan dan menghasilkan hasil prediksi yang sesuai dengan kondisi sebenarnya.

2.4 Proses Korosi pada Beton Bertulang akibat Infiltrasi Klorida

Proses korosi pada beton bertulang terbagi atas proses inisiasi dan proses propagasi. Proses inisiasi adalah proses yang dibutuhkan ion klorida untuk mencapai *critical chloride level* untuk awal timbulnya korosi dikenal dengan Sedangkan, waktu yang dibutuhkan oleh korosi untuk mengakibatkan kerusakan yang cukup untuk dilakukan tindakan perbaikan disebut dengan periode propagasi (Webster, 2000). Ilustrasi konsep inisiasi dan propagasi korosi dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Ilustrasi konsep periode inisiasi dan propagasi korosi berdasarkan perbedaan definisi (Schiessl dan Lay, 2005)

2.4.1 Proses Inisiasi Korosi

Proses inisiasi korosi pada beton bertulang akibat infiltrasi klorida dimulai ketika klorida masuk ke dalam beton dan merusak lapisan pasif tulangan. Kerusakan pada lapisan pasif terjadi akibat klorida yang ada pada *interface* antara beton dan tulangan telah melebihi besarnya *critical chloride content*. *Critical chloride content* adalah batas konsentrasi yang dibutuhkan untuk merusak lapisan pasif pada baja tulangan. Penelitian mengenai *critical chloride content* telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Angst dan Vennesland (2009) melakukan studi literatur mengenai hal-hal yang mempengaruhi *critical*

chloride content pada beton bertulang. Berdasarkan studi yang telah dilakukan maka *critical chloride content* yang dapat menginisiasi terjadinya korosi bervariasi mulai dari 0.02% hingga 3.08% total klorida per berat binder.

Lapisan pasif pada tulangan dapat terpecah bila kadar klorida telah mencapai konsentrasi tertentu. Setelah layer pasif pada tulangan terpecah, dengan bantuan kelembaban dan oksigen maka akan korosi akan mulai terjadi.

Pada reaksi anoda, terbentuk *discrete ions* yang dapat bereaksi menjadi produk korosi yang tidak dapat larut. Reaksi korosi dari sebuah metal M umumnya ditulis dengan reaksi sederhana seperti ditunjukkan pada persamaan reaksi (2.3) (Liu, 1996)



Permukaan baja yang lapisan pasifnya hilang akan menjadi anode dari reaksi korosi baja tulangan. Persamaan reaksi anode ini dapat dituliskan seperti pada persamaan (2.4) sebagai berikut:



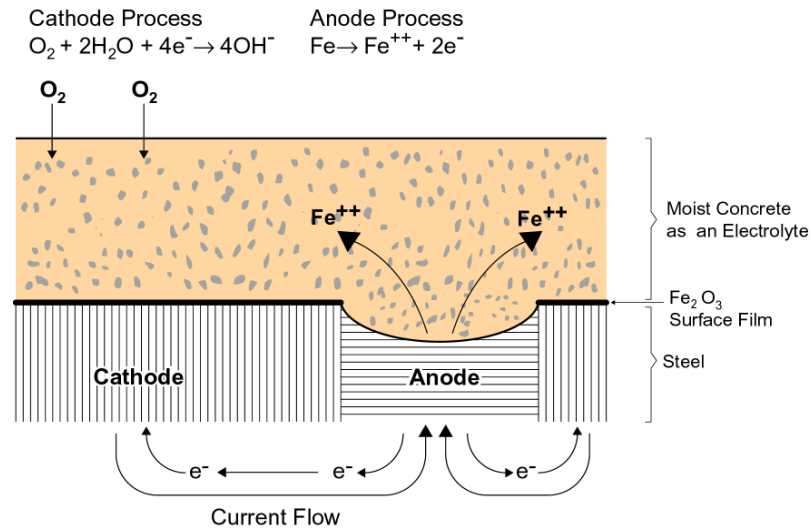
Sudjono (2005) menjelaskan bahwa elektron yang dilepaskan dari reaksi anode menyebabkan gas O₂ dan air yang terdapat di atas permukaan baja yang masih tertutup oleh lapisan pasif bereaksi. Bagian baja ini menjadi katode dari reaksi korosi baja tulangan, dan reaksinya dapat dituliskan seperti pada persamaan 2.5 berikut ini.



Kedua ion yang terbentuk pada anode dan katode bergabung membentuk senyawa hasil korosi yang dikenal dengan sebutan karat. Persamaan reaksi tersebut dapat dilihat pada persamaan 2.6 dan 2.7 sebagai berikut.

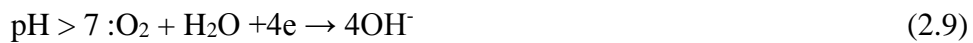


Fe(OH)₂ sebagai bentuk awal senyawa hasil korosi akan berada di permukaan baja yang mengalami korosi. Gambar 2.4 berikut ini adalah ilustrasi yang menggambarkan proses terbentuknya karat:

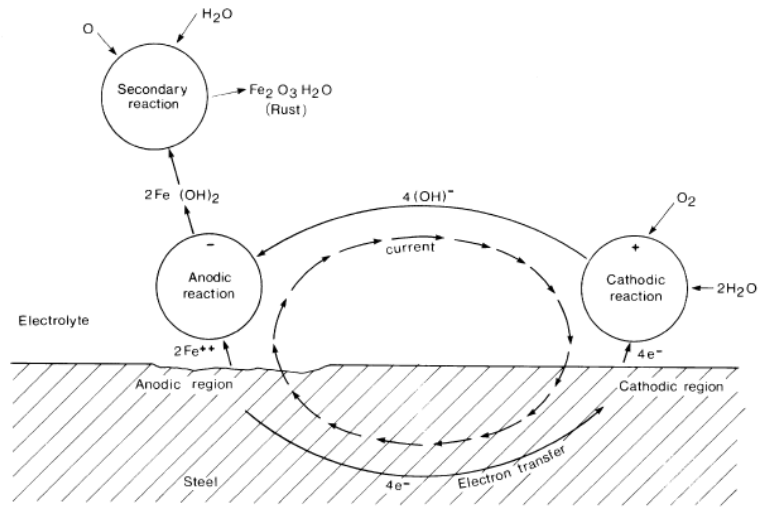


Gambar 2.4 Proses Terbentuknya Karat (Monteiro, 2013)

Reaksi pada katoda sangat sulit untuk diprediksi namun dapat dikategorikan menjadi kedalam lima tipe reaksi reduksi, yakni: *Hydrogen evolution*, *Oxygen reduced in acids*, *Oxygen reduction*, *Neutral solutions*, *Metal ion reduction*, dan *Metal deposition* (Schweitzer, 1996). Berdasarkan kandungan pH, reaksi yang mungkin terjadi pada katoda dapat dibagi menjadi dua yakni reaksi pada $pH > 7$ dan $pH < 7$, dengan reaksi sebagai berikut (Liu, 1996).



Pada Gambar 2.5 dapat dilihat bahwa reaksi katoda termasuk pada kategori *Oxygen reduction – Neutral solutions* (reaksi utama). Pada proses reaksi kedua (*secondary reaction*) terdapatnya oksigen dan kelembaban yang tepat mengakibatkan *ferrous hydroxide* ($2Fe(OH)_2$) berubah menjadi *ferric oxide* ($Fe_2O_3 \cdot H_2O$) (Webster, 2000).



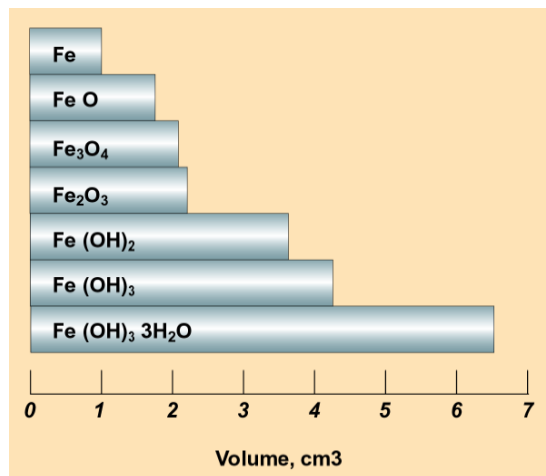
Gambar 2.5. Ilustrasi proses elektrokimia pada baja tulangan (Beeby, 1978)

2.4.2 Proses Propagasi Korosi

Proses korosi selanjutnya tergantung pada pada konsentrasi O_2 dalam air yang terdapat pada pori-pori beton. Jika konsen trasi O_2 tinggi maka akan terbentuk $\text{Fe}(\text{OH})_3$ dengan persamaan reaksi sebagai berikut:



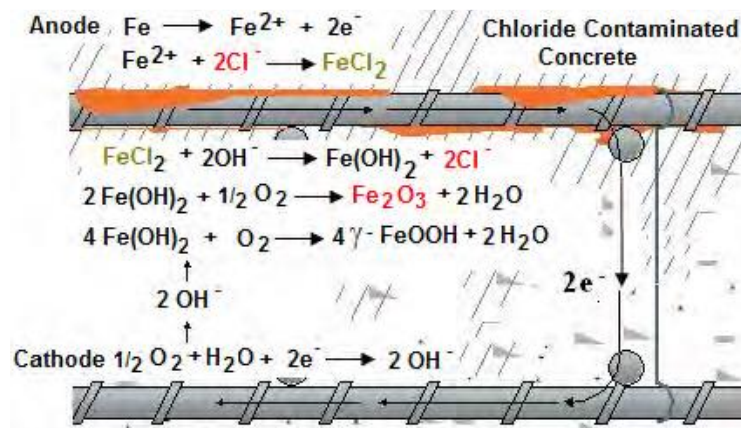
Namun apabila pada waktu pembentukan senyawa $\text{Fe}(\text{OH})_2$ jumlah air tidak mencukupi sedangkan konsentrasi O_2 cukup maka terbentuk korosi yang berwarna merah (FeOOH). Tetapi, jika konsentrasi O_2 juga tidak cukup maka terbentuk korosi berwarna hitam (Fe_2O_3) atau berwarna hijau ($2\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$).



Gambar 2.6. Perubahan Volume Tulangan Berdasarkan Tipe Produk Korosi yang Terbentuk (Monteiro, 2013)

Bila tidak terhidrasi, *ferric oxide* (Fe_2O_3) akan mengeras dan menghasilkan volume dua kali dari volume baja awal. Sedangkan apabila *ferric oxide* terhidrasi maka akan mengembang dan menjadi berpori. *Ferric oxide* yang mengembang akan menyebabkan penambahan volume 2-4 kali lipat pada permukaan beton dan tulangan. Ini menyebabkan timbulnya serpihan karat berwarna merah/coklat pada tulangan yang menyebabkan retak. Hilangnya area metal dan terbentuknya karat terjadi pada anoda (Webster, 2000).

Produk korosi yang terbentuk sebagai hasil reaksi dari tulangan, oksigen dan air dapat mengurangi luasan tulangan. Luasan karat yang terbentuk dapat melebihi luasan asli tulangan dan menyebabkan *expansive stresses* yang dapat menimbulkan retak pada over beton. Perbedaan tipe produk korosi yang terbentuk sangat mempengaruhi besarnya penambahan volume yang terjadi. Hal ini tentunya juga akan mempengaruhi besarnya *expansive pressure* yang terjadi. Gambar 2.6 memperlihatkan ubungan antara tipe produk korosi dan besarnya perumahan volume yang terjadi.



Gambar 2.7. Proses Korosi dengan adanya pengaruh ion Cl^- (Shi X et al., 2010)

Korosi adalah suatu proses yang akan terus berlangsung apabila terdapat konsentrasi O_2 dan H_2O yang cukup di dalam beton. Namun proses korosi ini dapat berlangsung lebih cepat bila terdapat katalis yang dapat mempercepat proses pembentukan anda seperti adanya ion klorida (Cl^-). Ion Cl^- ini berasal dari lingkungan yang agresif seperti lingkungan yang dekat dengan air laut. Klorida pada dasarnya tidak berperan dalam pembentukan karat namun ion ini berperan dalam penghancuran lapisan pasif pada tulangan dan pembentukan anoda yang akan mempercepat terjadinya korosi. Proses

korosi akibat adanya infiltrasi klorida diilustrasikan pada Gambar 2.7. Pada gambar tersebut dapat terlihat bahwa Fe^{2+} bereaksi dengan klorida untuk menghasilkan FeCl_2 dengan adanya air dan oksigen maka mulai terbentuk produk korosi berupa *ferrous hydroxide* [$\text{Fe}(\text{OH})_2$]. $\text{Fe}(\text{OH})_2$ merupakan bentuk awal senyawa hasil korosi akan berada di permukaan baja yang mengalami korosi. Semakin lama senyawa ini akan bereaksi dengan oksigen dan air dan menghasilkan senyawa $\text{Fe}(\text{OH})_3$ yang berwarna cokelat kemerahan.

2.5 Retak Pada Beton Bertulang Akibat Korosi

Retak pada suatu elemen struktur merupakan suatu kejadian yang tidak diinginkan karena dapat merusak ketahanan struktur, meningkatkan permeabilitas, dan mengurangi kekuatan struktur tersebut. Setiap penggunaan material beton pada suatu struktur bangunan pasti akan menimbulkan retak baik retak yang membahayakan maupun retak yang tidak membahayakan (Setiawan, 2008). *Crack* atau retak pada beton bertulang dapat disebabkan oleh pengaruh dari sifat beton, pengaruh dari lingkungan luar maupun akibat reaksi yang terjadi antara beton dan tulangan yang menimbulkan korosi sehingga menyebabkan *crack* (Aria, 2012).

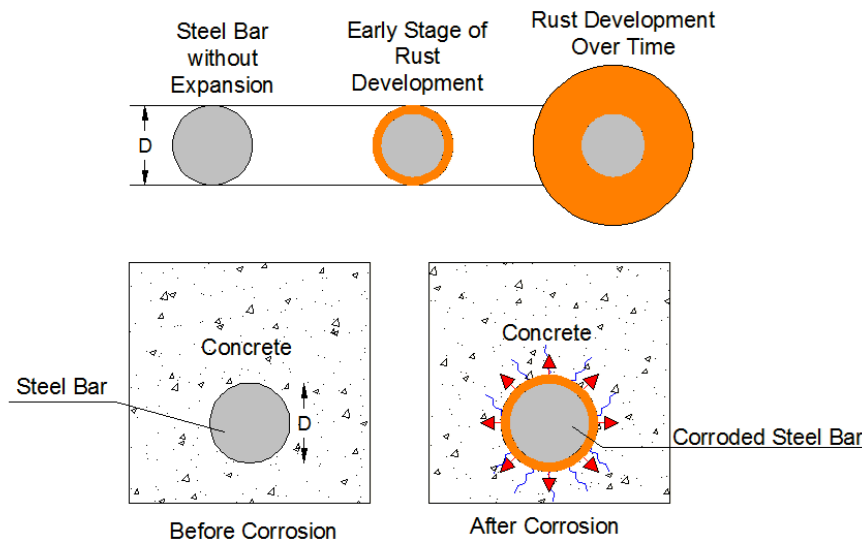
Retak pada beton bertulang merupakan salah satu tanda awal kegagalan pada beton bertulang. Beton merupakan suatu material yang lemah terhadap tarik. Meskipun pada struktur beton bertulang telah terdapat baja tulangan yang berfungsi untuk menahan gaya tarik serta mencegah terjadinya *crack*, namun pada beberapa struktur terjadinya *crack* tidak dapat dihindari. Terjadinya retak pada struktur beton dapat tetap terjadi karena adanya beban yang berlebihan sehingga tegangan tarik yang terjadi melampaui kapasitas beton tersebut. Wittmann (1983) dalam Johannsson dan Reitzel (2011) menyatakan beton dapat mengalami retak dalam tiga level berbeda yaitu sebagai berikut:

- a. Retak Mikro
- b. Retak Meso
- c. Retak Macro

Pada tahapan retak mikro, retak pada beton hanya dapat dilihat dengan menggunakan electron microscope. Pada level ini retak terjadi saat semen terhidrasi dan retak terbentuk pada pasta semen. Pada tahapan retak meso, retak terbentuk pada ruang diantara agregat

dan pasta semen. Sedangkan pada level retak makro, retak terjadi pada mortar antar agregat.

Seperti diperlihatkan pada Gambar 2.8, secara umum terjadinya retak pada beton akibat korosi pada permukaan antara beton dan baja meliputi tiga tahapan yaitu tahapan terbentuknya karat, tahapan terjadinya tegangan dan selanjutnya adalah tahapan mulai terjadinya retak pada selimut beton (Liu & Weyers, 1998)



Gambar 2.8 Tahapan Terjadinya Retak Akibat Korosi (Zhao et al., 2013)

Pada permukaan baja terdapat lapisan pasif baja yang tipis. Lapisan pasif baja ini berguna untuk melindungi baja dari korosi. Proses korosi pada tulangan ini diawali dengan adanya reaksi antara permukaan pasif baja dengan larutan asam yang berasal dari beton (Zhao et al., 2013). Hal tersebut menyebabkan rusaknya lapisan pasif pada tulangan, atau lebih dikenal dengan *depassivation*, dan memburuknya lekatan antara tulangan dengan beton akibat terlalu banyak klorida pada *interface* antara beton dan baja. Setelah terjadinya *depassivation*, karat diasumsikan akan menutup pori-pori yang berada disekitar *interface* antara baja dan beton (Zhao, Yu, Wu, & Jin, 2012). Pada tahapan ini karat belum menyebabkan peningkatan tegangan akan tetapi volumenya yang semakin bertambah mengakibatkan semakin banyak pori-pori beton yang terisi oleh karat (Fang, Lundgren, Chen, & Zhu, 2004; Zhao, Yu, Wu, et al., 2012). Seiring dengan bertambahnya volume karat yang terbentuk dan mengisi pori antara *interface* baja dan beton maka peningkatan tegangan dan regangan mulai terjadi pada *interface* antara baja dan beton (Fang et al., 2004). Ketika terjadi peningkatan tegangan tarik maka retak mulai terjadi pada selimut beton.

Saat terjadinya korosi perbandingan volume antara senyawa hasil reaksi korosi dengan senyawa yang bereaksi kira-kira 2,5 kali (Japan Concrete Institute, 1994) oleh karena itu, selimut beton dapat mengalami keretakan akibat tekanan dari pengembangan volume tersebut. Jika telah terjadi keretakan pada selimut beton maka gas O₂, H₂O dan ion Cl⁻ lebih mudah berinfiltrasi ke dalam beton dan kerusakan akibat korosi pada bangunan beton akan menjadi lebih parah. Retak yang terjadi mengalami perambatan seiring dengan semakin meningkatnya tegangan sehingga karat dapat mengisi pori-pori kosong yang disebabkan oleh retak sehingga akan mulai terbentuk lagi karat baru dengan proses yang sama seperti yang telah dijelaskan sebelumnya (Zhao et al., 2013).

Keberhasilan teori *fracture mechanics* untuk penyelesaian permasalahan retak pada metal dan keramik menyebabkan teori ini dapat diterapkan untuk menganalisa keretakan pada beton bertulang. Nuroji menyatakan bahwa pada konsep mekanika fraktur terdapat tiga parameter yang diperlukan untuk menentukan hubungan tegangan regangan tarik pada beton yaitu (Nuroji, 2004):

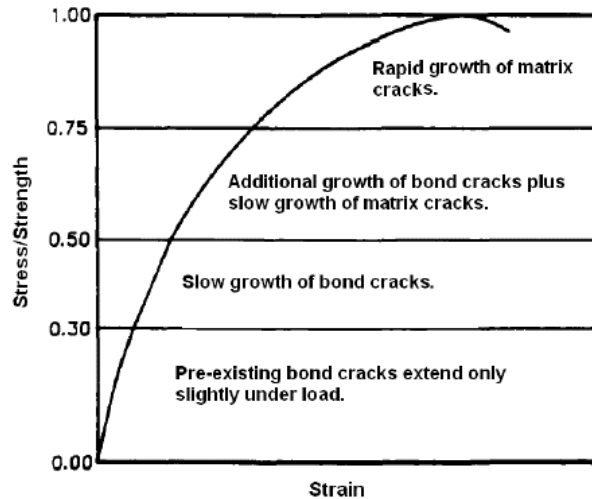
- Kuat tarik saat *fracture* mulai terjadi
- Luasan Hubungan Tegangan regangan
- Bentuk *descending branch*

Kurva tegangan dan regangan tekan pada beton dapat dibagi kedalam beberapa zona (Gambar 2.9) yang dapat menjelaskan proses terjadinya *fracture* pada beton. Ulfkjaer, 1992 dalam (Johannsson & Reitzel, 2011) menjelaskan proees tersebut sebagai berikut:

- a. Proses inisisasi retak dimulai pada tahapan mikro. Tahapan ini disebabkan oleh *shrinkage*, *swelling* dan *bleeding* pada beton akibat adanya beban. Untuk beban berkisar antara 0 hingga 30 % dari beban ultimit, hubungan tegangan regangan masih berada pada kondisi linear dan pertumbuhan retak tidak terjadi pada level ini.
- b. Pada tahapan selanjutnya, ketika beban mencapai 30-50 % dari beban ultimit, terjadi pertumbuhan retak hingga mencapai ruangantara pasta semen dan agregat. Perbedaan modulus elastisitas antara pasta semen dan agregat menyebabkan meningkatnya non linearitas dari beton tersebut.
- c. Tahapan selanjutnya adalah ketika beton mulai menerima 50% dari beban ultimit, retak makro mulai terbentuk pada mortar dan berjalan diantara agregat dengan arah paralel dengan arah beban yang bekerja.

- d. Ketika beban telah mencapai 75% dari ultimate load, keretakan yang lebih kompleks terjadi dimana retak dengan lebar yang lebih besar mulai terjadi dan pada akhirnya menyebabkan *failure*.

Gambar 2.9 berikut ini menunjukkan kurva tegangan regangan yang telah dibagi ke dalam empat zona retak.



Gambar 2.9 *Compressive Stress Strain Curve for Concrete Divided into Four Region Different Stage of Cracking* Ulfkjaer (1992) dalam (Johannsson & Reitzel, 2011)

Sedangkan pada kondisi tarik, terjadinya *fracture* sangat tergantung pada kekuatan pada setiap elemen beton misalnya pada retak makro, *fracture* tergantung pada kekuatan mortar. Proses *fracture* dimulai dengan adanya pertumbuhan retak hingga pada saat 80% dari *ultimate tensile load* mulai terbentuk retak-retak baru akibat adanya redistribusi tegangan. Retak terbentuk tidak merata pada spesimen. Ketika batas *ultimate tensile load* tercapai maka *local fracture zone* akan terbentuk disertai dengan terbentuknya *macro crack*. *Fracture zone* akan terus terbentuk pada bagian terlemah dari spesimen.

Untuk mensimulasikan *fracture* pada beton bertulang, teori *fracture mechanics* sangat berhubungan erat dengan nilai *fracture energy*. *Fracture energy* (G_f) adalah jumlah energi yang diperlukan untuk satu satuan retak dari luas suatu *continuous crack* dan ditinjau sebagai input material properti Nuroji, 2004). *Fracture energy* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.11 berikut ini:

$$G_f = \int \sigma_{nn} \cdot dw \quad (2.11)$$

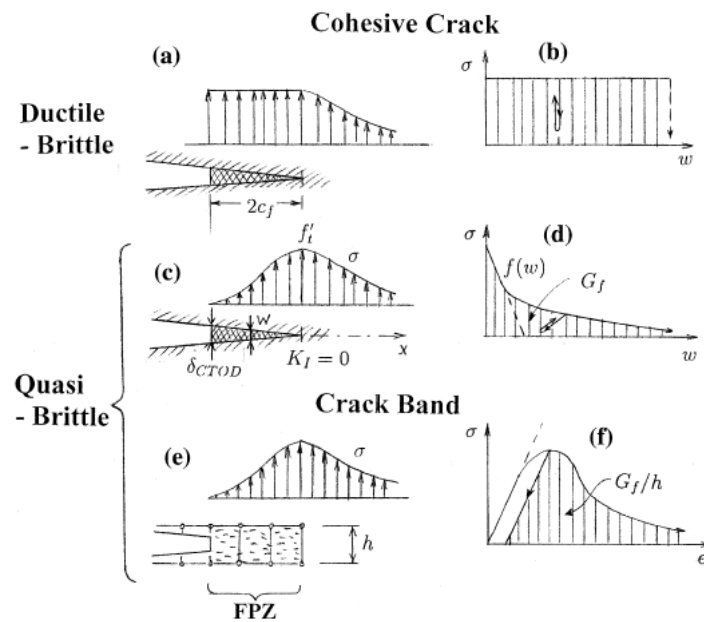
Dimana w adalah jumlah dari *opening displacement* dari semua *microcracks* dalam *fracture zone*. Pada kasus pemodelan retak dengan pendekatan *smeard crack*, nilai w digambarkan oleh regangan retak yang bekerja pada lebar tertentu yang dimana dalam *finite element* disebut dengan *crack band*. Karena w merupakan akumulasi regangan retak maka w dapat ditulis seperti gambar 2.12 berikut.

$$w = \int \varepsilon_{nn}^{cr} \cdot dn \quad (2.12)$$

Dimana n adalah variable dari jalur retak dengan menganggap retak mikro terdistribusi merata disepanjang jalur retak maka w dapat ditulis sebagai berikut:

$$w = w_{nn}^{cr} \cdot b \quad (2.13)$$

Gambar 2.10 memperlihatkan model *strain softening* yang banyak digunakan adalah model yang dikeluarkan oleh Bazant dan Hillerborg (2002) serta Bazant dan Oh (1983) dalam (Nuroji, 2004).



Gambar 2.10 Stress distribution and softening curves: (a,b) cohesive crack model for ductile-brittle metals; (c,d) cohesive crack model for quasibrittle materials (concrete); (e,f) crack band model for quasibrittle materials (Bazant, 2002)

Anggapan dasar kedua model ini adalah lebar *fracture zone* (w_c) dianggap sebesar 3 kali ukuran agregat kasar maksimum dan retak beton seragam selebar *crack band*. Pada kasus ini persamaan akhir untuk menghitung regangan *fracture* tarik ε_0 adalah sebagai berikut:

$$\epsilon_0 = \frac{2G_f}{f_t \cdot b} \quad (2.14)$$

Dimana:

b = lebar elemen (tergantung pada ukuran elemen, jenis elemen, bentuk elemen)

f_t = Kuat tarik beton

G_f = *Fracture Energy*

Setelah melakukan studi eksperimental Hillerborg et al (1976) mengusulkan *bilinear descending branch* untuk perilaku *strain softening* sehingga persamaan diatas dapat diturunkan menjadi:

$$\epsilon_0 = \frac{18G_f}{5f_t \cdot b} \quad (2.15)$$

Kedua model tersebut telah terbukti cocok digunakan pada pemodelan struktur beton bila menggunakan ukuran mesh yang relatif kecil. *Comite Euro International du Beton* (1990) telah mengemukakan bahwa *fracture energy* dapat ditentukan dengan melakukan pengujian lentur pada *notched beam* dimana nilai *fracture energy* sebanding dengan luasan dibawah kurva load-displacement dibagi dengan luasan bersih dari specimen yang berada diatas *notch*. Akan tetapi bila pengujian tidak dilakukan maka nilai *fracture energy* dapat didekati dengan menggunakan persamaan 2.16. Selain itu besarnya *fracture energy* juga dapat didekati dengan mengkorelasikan nilai *fracture energy* dengan ukuran agregat seperti diperlihatkan pada Tabel 2.2.

$$G_f = G_{f0} \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0.7} \quad (2.16)$$

Dimana:

f_{cm} = Kuat tekan karakteristik beton (MPa)

G_{f0} = *Base value of fracture energy based on maximum aggregate size*

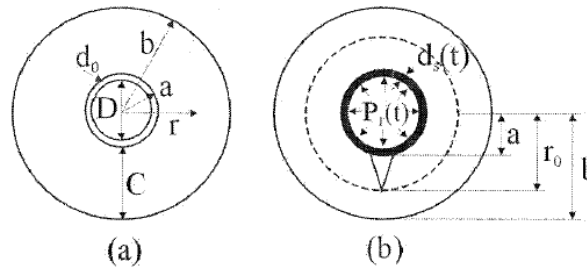
Nilai *fracture energy* berdasarkan ukuran agregat disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. *Based Value of Fracture Energy*

Ukuran Agregat Maksimum [D_{max} (mm)]	Nilai <i>Fracture Energy</i> [G_{f0} (Nmm/mm ²)]
8	0.025
16	0.030
32	0.058

2.6 Perkembangan Model untuk Menganalisa Keretakan Pada Beton Bertulang Akibat Korosi

Terdapat beberapa model yang dikembangkan untuk memodelkan retak serta *crack properties* pada beton bertulang. yang disebabkan oleh penetrasi korosi pada *interface* antara tulangan dan beton. Liu dan Weyers (1998) mengembangkan model waktu retak dengan mempertimbangkan jumlah kritis dari karat yang dibutuhkan untuk mengisi ruang diantara beton dan tulangan yang dapat menyebabkan retak pada selimut beton. Karat diasumsikan sebagai dinding tebal dengan ketebalan yang merata. Persebaran karat secara merata diperlihatkan pada Gambar 2.11



Gambar 2.11 Skema Keretakan Beton Bertulang Akibat Korosi (C. . Li et al., 2005)

Ketebalan korosi yang merata didapatkan dari perumusan berikut ini (Liu & Weyers, 1998)

$$d_s(t) = \frac{W_r(t)}{\pi(D+2d_0)} \left(\frac{1}{\rho_r} - \frac{\alpha_r}{\rho_{st}} \right) \quad (2.17)$$

Dimana:

α_r = Koefisien terkait tipe produk korosi

ρ_r = *Density* dari produk korosi

ρ_{st} = *Density* dari baja tulangan

$W_r(t)$ = Massa dari produk korosi dimana nilainya dapat dihitung sebagai berikut:

$$W_r(t) = \left[2 \int_0^1 0.105 \left(\frac{1}{\alpha_r} \right) \pi D i_{corr}(t) dt \right]^{1/2} \quad (2.18)$$

$i_{corr}(t)$: Corrosion Current Density ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

Seiring dengan bertambahnya volume karat yang terbentuk maka beton mulai mengalami keretakan. Keretakan pada beton yang diakibatkan penambahan volume karat dibagi menjadi 3 tahapan yaitu tahapan sebelum retak, retak partial dan retak keseluruhan (C. . Li et al., 2005).

Pada saat kondisi sebelum retak beton diasumsikan bersifat *elastic isotropic* sehingga Li et al. (2005) menggunakan teori elastisitas untuk menghitung *expansive pressure* yang terjadi

$$P_1 = -\sigma_r(a) = \frac{E_{ef} d_s(t)}{a \left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} + \nu_c \right)} \quad (2.19)$$

Dimana;

a = Jarak dari *center* tulangan ke *interface* antara baja dan tulangan yang dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$a = \frac{D + 2d_o}{2} \quad (2.20)$$

b = Jarak dari *center* tulangan ke *exposed surface* dan tulangan yang dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$b = \frac{D + 2d_o}{2} + C \quad (2.21)$$

σ_r = *radial stress*

E_{ef} = modulus elastisitas efektif beton

ν_c = *poisson's ratio* beton

d_o = jarak *interface* anatar beton dan tulangan

C = tebal selimut beton

Pada saat retak mulai terjadi baik itu retak partial maupun retak keseluruhan maka terjadi penurunan *stiffness reduction factor*. Nilai *stiffness reduction factor* (α) didapatkan dari perumusan yang dirumuskan oleh Bazant dan Planas (1998) dan Sheng et al (1991) dalam (C. . Li et al., 2005)

$$\alpha = \frac{f_t \exp[-\gamma(\bar{\epsilon}_\theta - \bar{\epsilon}_\theta^c)]}{E_{ef} \bar{\epsilon}_\theta} \quad (2.22)$$

Dimana:

$\overline{\varepsilon_\theta}$ = average tangential strain over the cracked surface

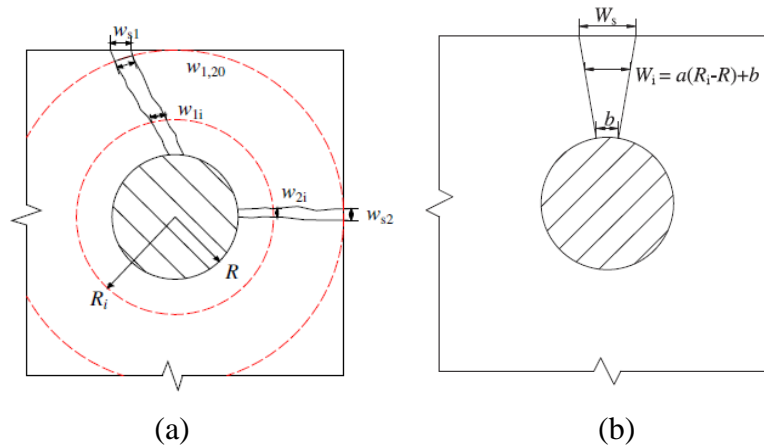
$\overline{\varepsilon_\theta^c}$ = average tangential cracking strain

γ = konstanta

Berdasarkan persamaan 2.22 diatas maka lebar retak yang diakibatkan oleh korosi dapat dihitung dengan menggunakan perumusan berikut (C. . Li et al., 2005).

$$w_c = \frac{4\pi d_s(t)}{(1-\nu_c)\left(\frac{a}{b}\right)^{\sqrt{a}} + (1+\nu_c)\left(\frac{b}{a}\right)^{\sqrt{a}}} - \frac{2\pi b f_t}{E_{ef}} \quad (2.23)$$

Zhao et al. (2012) menyederhanakan perhitungan lebar retak dengan menggunakan regresi hasil uji eksperimental. Pengukuran retak dilakukan dengan menggunakan digital microscopy dan dilakukan setiap interval satu mm disepanjang perimeter tulangan mulai dari permukaan tulangan hingga permukaan beton terluar (selimut) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12 berikut ini.



Gambar 2.12. Skema Pengukuran Retak akibat Korosi (a) dan *Simplified Crack Model* (b) (Zhao, Yu, Hu, et al., 2012)

Sehingga berdasarkan pengukuran tersebut didapatkan perumusan lebar retak total yang terjadi adalah

$$W_i = a(R_i - R) + b \quad (2.24)$$

Dimana:

a : Koefisien variasi lebar retak yang dapat dihitung dengan menggunakan perumusan

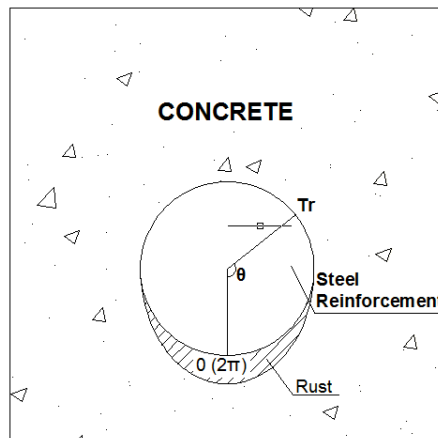
$$a = 0.67857\rho - 0.00234 \quad (2.25)$$

b : Koefisien lebar retak pada permukaan tulangan yang dapat dihitung dengan menggunakan perumusan

$$b = 20.93\rho \quad (2.26)$$

ρ : Prosentase korosi beton (%)

Selama ini analisa yang dilakukan untuk mengetahui perambatan retak akibat korosi mengasumsikan bahwa korosi terjadi pada seluruh bagian dari tulangan sehingga *corrosion layer* memiliki ketebalan yang sama. Namun penelitian yang dilakukan oleh beberapa peneliti menyatakan bahwa produk korosi tidak terjadi pada seluruh area dari tulangan sehingga distribusi yang dihasilkan tidak merata antara satu bagian dengan bagian lainnya (Cao dan Cheung, 2014; Muthulingam dan Rao, 2014; Zhao et al., 2011). Tidak meratanya distribusi ini menyebabkan pola retak yang terjadi akan berbeda dan tidak dapat diprediksi dengan rumusan yang telah ada.



Gambar 2.12 Distribusi Karat sepanjang Perimeter Tulangan (Zhao et al., 2011)

Selain itu sebagian besar model yang diajukan tidak memperhitungkan perilaku produk korosi yang dihasilkan. Padahal pada kenyataannya produk korosi tersebut memiliki perilaku fisik maupun mekanis yang dapat mempengaruhi perilaku perambatan retak maupun lebar retak yang terjadi (Zhao et al., 2013). Akibat tidak dipertimbangkannya sifat-sifat dari produk korosi tersebut maka model-model empiris yang diajukan pada penelitian sebelumnya hanya mampu menggambarkan pola perambatan retak apabila validasi dilakukan dengan hasil eksperimental yang khusus

dijadikan referensi untuk penelitian tersebut. Namun apabila dibandingkan dengan hasil ekperimental lainnya maka kecocokan model tersebut untuk menggambarkan laju retak sangatlah rendah (Zhao et al., 2013; Zhao et al., 2012).

Penelitian mengenai persebaran korosi yang tidak merata (*non-uniform corrosion*) telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Zhao et al telah melakukan penelitian mengenai persebaran karat yang tidak merata disepanjang perimeter tulangan seperti diperlihatkan pada Gambar 2.12 (Zhao et al., 2011). Penelitian yang dilakukan oleh Zhao et al menghasilkan suatu model persebaran karat secara tidak merata berdasarkan *Gaussian function* (Zhao et al., 2011).

$$T_r = \frac{a_1}{a_2\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{\theta-\pi}{\sqrt{2}a_2}\right)^2} + a_3 \quad (2.27)$$

Dimana

$a_1 = \text{non uniform coefficient of rust layer}$

$$a_1 = 49 \rho \quad (2.28)$$

$a_2 = \text{spread coefficient of rust layer}$

$a_3 = \text{Uniform coefficient of rust layer}$

$a_3 = 0$ Bila korosi hanya terdapat pada sebagian dari perimeter tulangan

$a_3 = 1.46 T_{r-min}$ Bila korosi terdapat di sepanjang perimeter tulangan

Nilai dari koefisien yang digunakan dalam perhitungan karat tersebut didapatkan berdasarkan analisa regresi dari hasil eksperimental yang telah dilakukan sebelumnya. Oleh karena itu perumusan ini tidak dapat digunakan bila hasil persebaran karat dari pengamatan langsung, baik hasil eksperimental maupun pengamatan di lapangan tidak tersedia.

Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Umum

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai lingkup penelitian, metodologi dan rancangan teknik pelaksanaan penelitian. Lingkup penelitian berisi penjelasan singkat terkait aspek-aspek yang dikerjakan dalam penelitian. Sedangkan metodologi disusun agar tahapan penyelesaian permasalahan lebih terarah sehingga hasil yang didapatkan merupakan hasil optimum dan sesuai dengan yang diharapkan. Seluruh tahapan metodologi tersebut dijelaskan lebih rinci dalam sub bab selanjutnya.

3.2 Lingkup Penelitian

Pada sub bab ini akan dibahas mengenai aspek yang dikaji dan dikerjakan pada penelitian disertasi ini. Tujuan utama dalam penelitian ini adalah untuk menganalisa efek dari perbedaan konfigurasi siklus basah dan kering dan pengaruh penggunaan pendekatan korosi tidak seragam (*non-uniform corrosion*) untuk mendapatkan model prediksi keretakan yang tepat pada beton bertulang. Penelitian ini meliputi beberapa sub penelitian utama seperti yang terlihat pada Gambar 3.1.

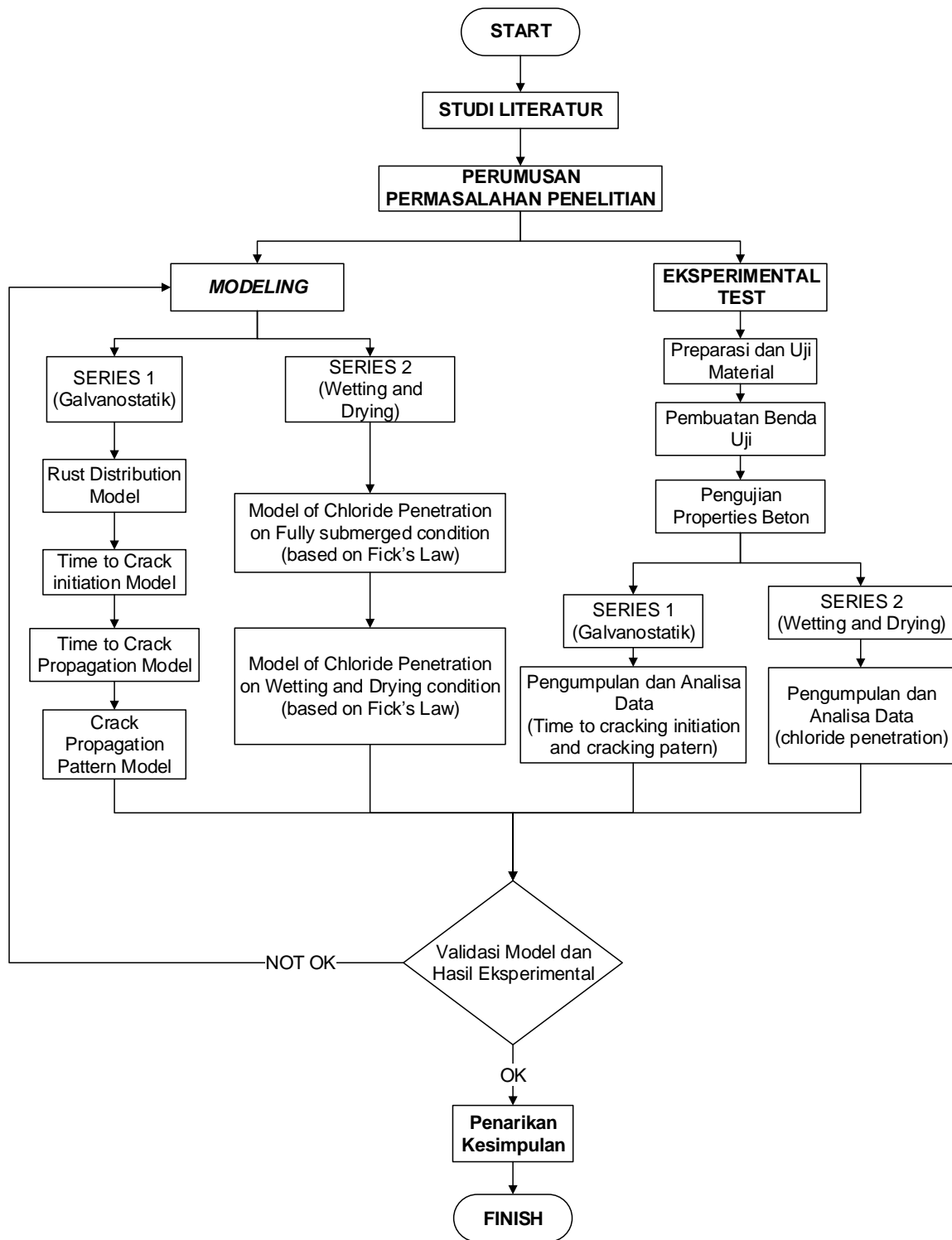
Terdapat tiga tahapan kegiatan utama yang dilakukan dalam penelitian ini. Tahapan pertama adalah pengujian eksperimental. Pada tahapan ini dilakukan pengujian korosi dengan menggunakan dua buah metode. Metode yang pertama adalah metode galvanostatik dan metode kedua adalah metode *wetting and drying*. Pengujian eksperimental dengan metode galvanostatik dilakukan untuk menginvestigasi proses terjadinya retak akibat korosi. Persebaran produk korosi, atau yang disebut juga dengan karat, juga dilakukan dalam metode ini. Sedangkan kegiatan eksperimental dengan metode *wetting and drying* digunakan untuk menginvestigasi proses infiltrasi klorida ke dalam beton akibat perbedaan durasi basah dan kering. Hasil dari kegiatan eksperimental ini digunakan untuk memvalidasi model yang dikembangkan dalam penelitian disertasi ini.

Pada pengujian ini sampel yang digunakan adalah kubus beton bertulang berukuran 150x150x150 mm dengan tulangan tunggal yang ditanamkan 40 mm dari *exposed surface*. Ukuran ini dipilih untuk menyesuaikan dengan ketersediaan ruang untuk

pengujian dan kebutuhan benda uji. Penggunaan tulangan tunggal pada penelitian ini bertujuan untuk memastikan retak yang terjadi disebabkan oleh korosi satu buah tulangan dan mencegah adanya pengaruh beban tambahan dari terbentuknya karat pada tulangan lainnya. Selain itu, ketebalan selimut beton sebesar 40 mm hanya diaplikasikan pada sisi bawah dari benda uji untuk mencerminkan kondisi struktur balok yang sebenarnya dimana untuk tulangan utama lentur hanya satu sisi dari tulangan yang memiliki jarak paling dekat dengan *exposed surface*. Sedangkan sisi lainnya memiliki jarak lebih besar dibandingkan dengan ketebalan selimut beton. Untuk memastikan proses transport klorida hanya terjadi secara satu arah, maka permukaan beton selain dari *exposed surface* dilapisi dengan epoxy untuk mencegah proses masuknya klorida dari permukaan lain selain *exposed surface*. Untuk pengujian dengan metode *wetting and drying*, digunakan tiga kombinasi durasi basah dan kering yang berbeda-beda. Secara natural, durasi basah dan kering pada daerah percikan berbeda satu dengan yang lainnya karena perbedaan kondisi gelombang serta pasang surut. Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakan tiga buah *chamber* dengan kondisi temperatur dan kelembapan yang sama namun memiliki durasi basah dan kering yang berbeda-beda. Tiga kondisi basah dan kering yaitu sebagai berikut:

- 1 jam basah and 7 jam kering ($w/d \leq 0.5$; 3 *cycles* per hari)
- 3 jam basah dan 5 jam kering ($w/d > 0.5$; 3 *cycles* per hari)
- 24 jam basah ($w/d \geq 1$; *fully submerged*)

Setelah tahapan eksperimental selesai dilakukan, pada tahapan selanjutnya dikembangkan model untuk memprediksi proses infiltrasi klorida akibat siklus basah dan kering serta waktu keretakan dengan menggunakan asumsi *non-uniform corrosion*. Model prediksi infiltrasi klorida dikembangkan untuk mengetahui *chloride profile* akibat perbedaan durasi basah dan kering. Sedangkan model prediksi keretakan pada beton bertulang dikembangkan untuk mendapatkan model prediksi waktu keretakan akibat pendekatan korosi tidak seragam. Tahapan ketiga adalah pemodelan numerik untuk mensimulasikan pola perambatan retak. Hasil dari model ini divalidasi menggunakan hasil eksperimental yang telah dilakukan sebelumnya.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penyusunan Disertasi

3.3 Studi Literatur

Pada tahap awal dilakukan studi literatur mengenai topik yang dibahas dalam disertasi ini. Referensi yang digunakan pada penelitian ini meliputi buku, jurnal maupun peraturan yang terkait dengan korosi pada beton bertulang, retak akibat korosi serta dasar

pemodelan matematis terkait dengan korosi. Hasil dari studi literatur ini menjadi dasar dalam perumusan permasalahan dan juga penentuan metode yang dilakukan dalam penelitian ini. Beberapa referensi juga digunakan sebagai bahan validasi dari model yang telah dibuat.

Berdasarkan hasil kajian literatur dilakukan perumusan permasalahan penelitian untuk memperjelas tujuan dan arah dari penelitian disertasi ini. Beberapa batasan masalah juga ditetapkan untuk mencegah meluasnya cakupan penelitian.

3.4 Uji Eksperimental

Pengujian eksperimental dilakukan sesuai dengan ruang lingkup dan batasan penelitian yang ditetapkan. Uji eksperimental ini dilakukan untuk mengetahui proses infiltrasi klorida ke dalam beton akibat siklus basah dan kering serta proses keretakan akibat korosi yang terjadi pada tulangan. Untuk mendapatkan data-data yang diperlukan, eksperimental dilakukan dengan metode galvanostatik dan metode *wetting and drying*. Metode galvanostatik digunakan untuk mengamati proses keretakan akibat adanya korosi pada beton bertulang. Sedangkan metode siklus basah dan kering digunakan untuk mengamati proses masuknya ion klorida pada beton. Bagan alir kegiatan eksperimental disajikan pada Gambar 3.2.

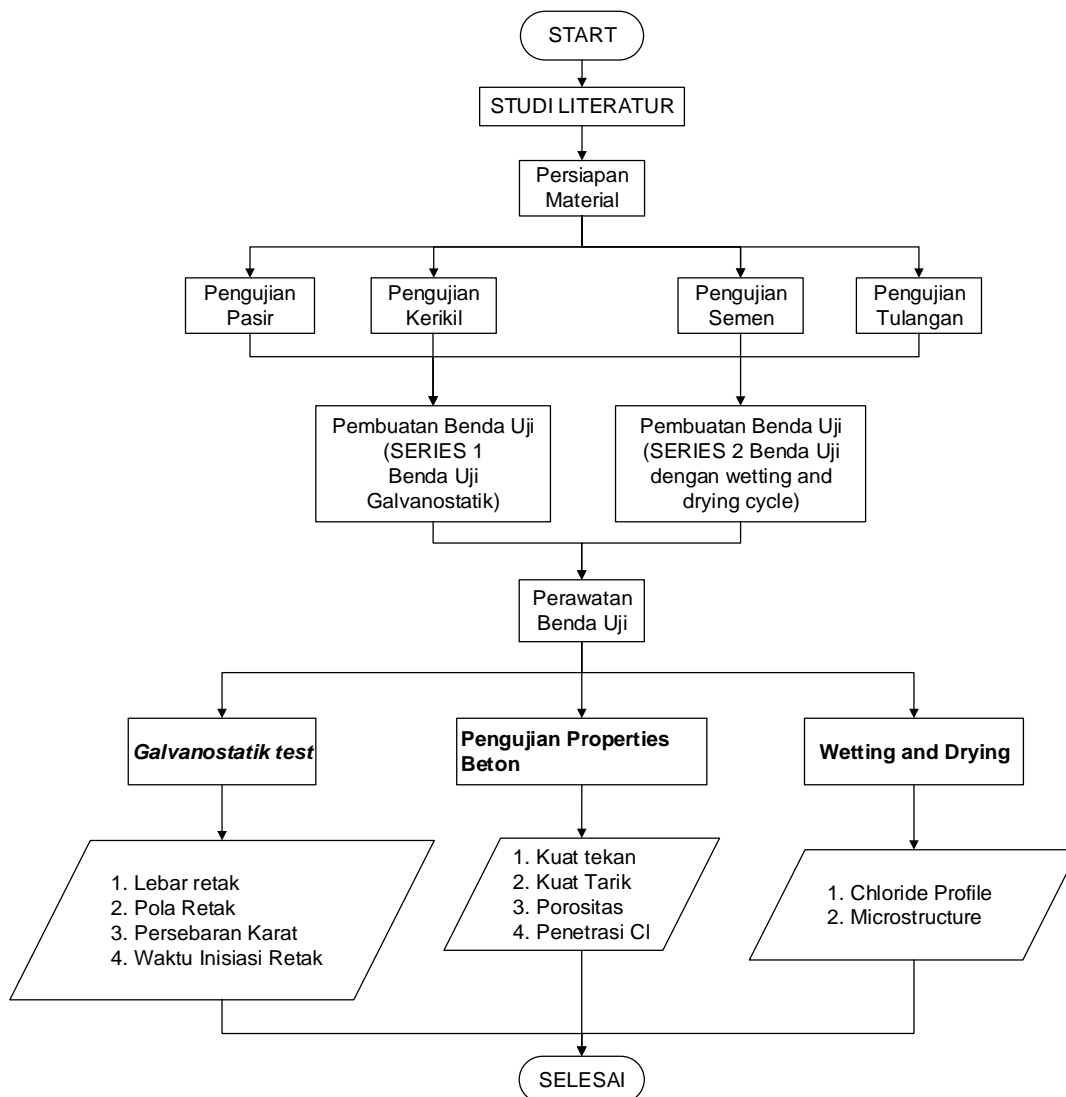
3.4.1 Persiapan Material

Pada tahap persiapan material ini dilakukan persiapan dan pengumpulan material yang akan digunakan dalam pembuatan benda uji beton bertulang. Material yang digunakan adalah sebagai berikut:

a. Semen

Digunakan Portland cement PPC produksi PT Semen Gresik. PPC merupakan jenis semen yang memiliki bentuk partikel yang lebih *spherical* (bulat) bila dibandingkan dengan jenis semen yang lain hal ini membuat workability semen ini lebih baik dibandingkan dengan OPC. Pada beton yang menggunakan semen PPC, senyawa Ca(OH)_2 yang dilepaskan pada saat proses hidrasi awal bereaksi dengan silika dan menghasilkan senyawa yang tidak larut sehingga mengurangi leaching pada permukaan beton. Selain itu PPC juga membantu mengurangi pori dan menutup pori kapiler sehingga permeabilitas beton berkurang. Jenis semen ini banyak

digunakan untuk daerah yang membutuhkan ketahanan terhadap durabilitas dalam tingkat sedang. Selain itu PPC juga saat ini telah dipasarkan secara bebas sehingga merupakan jenis semen yang banyak digunakan di masyarakat. Berdasarkan fakta yang telah dipaparkan diatas maka PPC dipilih untuk digunakan dalam penelitian ini agar hasil yang didapatkan lebih representatif dengan kondisi di lapangan.



Gambar 3.2 Bagan Alir Detail Kegiatan Eksperimental

b. Agregat Halus (Pasir)

Tidak ada kriteria khusus dalam pemilihan agregat halus selain kesesuaiannya dengan persyaratan ASTM. Agregat halus yang digunakan adalah agregat alami yang berasal dari daerah Lumajang.

c. Agregat Kasar (Kerikil)

Sama dengan agregat halus, agregat kasar yang digunakan harus memenuhi standar ASTM. Agregat kasar yang digunakan merupakan batu pecah berasal dari Pasuruan.

d. Tulangan

Tulangan yang digunakan dalam penelitian ini adalah tulangan ulir. Pemilihan tulangan ulir dilakukan karena jenis tulangan ini merupakan tulangan utama yang digunakan pada setiap struktur beton bertulang. SNI 2847 terkait perencanaan beton bertulang telah mewajibkan hampir semua struktur beton bertulang terutama yang berada di wilayah rawan gempa untuk menggunakan tulangan ulir. Selain itu penggunaan tulangan ulir diyakini dapat memberikan respon yang berbeda dalam persebaran karat terutama untuk analisa korosi dengan menggunakan pendekatan korosi tidak seragam. Oleh karena itu pada penelitian ini digunakan tulangan ulir dengan diameter 19 mm produksi PT Hanil.

e. NaCl

Natrium klorida (NaCl) juga merupakan material utama dalam penelitian ini karena merupakan larutan yang digunakan untuk mensimulasikan kondisi lingkungan di sekitar beton. Pada penelitian ini digunakan Natrium klorida analisis dengan kemurnian 97%

f. Aquades

Aquades merupakan cairan yang digunakan untuk melarutkan NaCl menjadi suatu larutan dengan konsentrasi tertentu. Aquades dipilih dibandingkan air PDAM yang biasa digunakan karena aquades merupakan H₂O murni dan hamper tidak mengandung mineral sehingga mampu menciptakan larutan NaCl murni

3.4.2 Pengujian Material

Pengujian material dilakukan untuk mengetahui sifat fisik dan kelayakan material sebelum digunakan sebagai campuran beton.

a. Pengujian Pasir

Agregat halus yang digunakan adalah pasir Lumajang. Selanjutnya dilakukan analisa agregat halus yang dilakukan di laboratorium untuk mengetahui

karakteristik dari agregat halus tersebut. Pengujian yang dilakukan antara lain adalah:

- Pengujian berat jenis pasir (ASTM C 128-01)
- Pengujian air resapan pasir (ASTM C 128-01)
- Pengujian kebersihan pasir terhadap lumpur (ASTM 117-03)

b. Pengujian Kerikil

Kerikil yang digunakan adalah kerikil yang berasal dari batu pecah yang diperoleh dari Pasuruan. Pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut.

- Pengujian berat jenis kerikil (ASTM C 127-01)
- Pengujian air resapan kerikil (ASTM C 127-01)
- Pengujian kadar lumpur kerikil (ASTM C117-03)

c. Pengujian Semen

Semen yang digunakan adalah Portland Pozzoland Cement (PPC) produk PT Semen Gresik dengan standar mutu mengacu pada ASTM C 150 dan SNI 0302-2004. Semen PPC produksi Semen Gresik adalah semen yang digunakan untuk bangunan umum seperti rumah, jembatan, jalan raya, landasan bandar udara dan industri produk bangunan lainnya. Semen PPC ini juga baik untuk bangunan yang memerlukan panas hidrasi sedang serta ketahanan sulfat sedang seperti pada lingkungan bergaram dan berair seperti dermaga, bangunan irigasi, bendungan dan bangunan tepi laut. Pengujian kandungan senyawa dalam semen dilakukan dengan melakukan analisa XRD.

3.4.3 Mix Desain

Perencanaan campuran dilakukan dengan menggunakan metode DOE sesuai dengan SNI 03-3449-2002. Metode ini merupakan metode umum yang digunakan dalam pencampuran benda uji di Indonesia. Dalam perhitungan komposisi campuran beton dengan metode ini, material yang digunakan terdiri atas semen, aggregate halus, aggregate kasar dan air. SNI dan ACI menetapkan kisaran nilai maksimum untuk faktor air semen (FAS) untuk struktur beton yang berada pada lingkungan agresif yakni sebesar 0.4 hingga 0.5. Dengan mengikuti prinsip perencanaan campuran beton dengan metode

DOE, dimana kekuatan beton ditentukan oleh pemakaian FAS, maka untuk mendapatkan campuran dengan kekuatan terendah maka pada penelitian ini nilai FAS yang digunakan adalah 0.5.

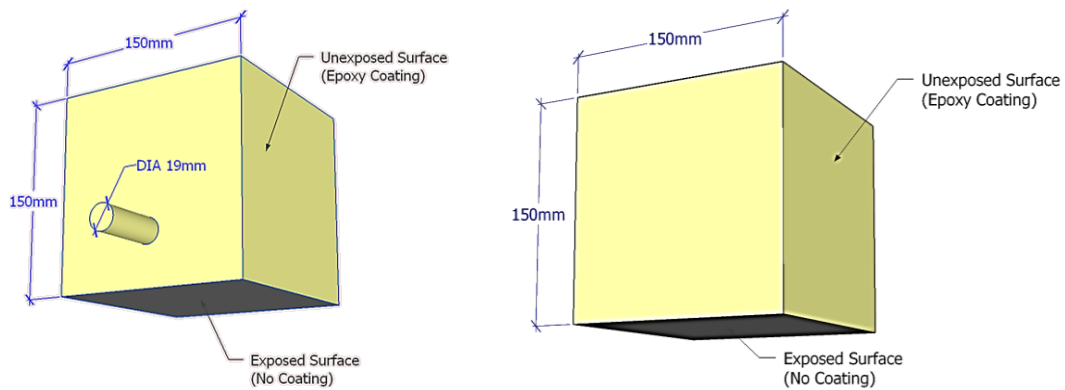
3.4.4 Penentuan Kebutuhan Benda Uji

Beberapa tes dilakukan pada benda uji dalam penelitian ini. Oleh karena itu, perlu dilakukan penghitungan jumlah benda uji yang dibutuhkan dalam penelitian ini. Perhitungan terhadap kebutuhan benda uji dilakukan untuk setiap pengujian. Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini terbagi atas dua jenis benda uji yakni yakni benda uji silinder berukuran ϕ 10 x 20 cm dan benda uji kubus berukuran 15 x 15 x 15 cm. Tabel 3.1 menunjukkan matriks kebutuhan benda Uji.

Tabel 3.1 Matriks Kebutuhan Benda Uji

Jenis Pengujian	Tipe Benda Uji	Jumlah benda Uji
Galvanostatik Test	Kubus 15 cm x 15 cm x 15cm	10
Wetting and Drying Test	Kubus 15 cm x 15 cm x 15cm	12
Uji Kuat Tekan dan Tarik	Silinder ϕ 10. 20	42
Uji Porositas	Silinder ϕ 10. 20	15
Uji Penetrasi	Silinder ϕ 10. 20	3

Benda uji adalah kubus beton bertulang dengan ukuran 15 x 15 x 15 cm digunakan untuk pengujian metode galvanostatik dan *wetting and drying*. Benda uji kubus terbagi atas dua konfigurasi dimana benda uji yang digunakan untuk pengujian korosi dengan metode galvanostatik menggunakan benda uji dengan tulangan menonjol ke bagian luar seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.3 (a). Sedangkan benda uji kubus untuk pengujian metode siklus basah dan kering menggunakan benda uji dengan konfigurasi tulangan tertanam seperti ditunjukkan oleh Gambar 3.3 (b). Benda uji silinder ϕ 10. 20 digunakan untuk pengujian kuat tekan, kuat tarik, uji penetrasi dan porositas. Benda uji yang digunakan memiliki rasio air semen 0.5 menggunakan tulangan ulir dengan diameter 19 mm dan tebal selimut beton sebesar 40 mm. Permukaan beton dan tulangan yang tidak terekspose dengan NaCl dicoating dengan menggunakan epoxy untuk memastikan proses transport klorida sesuai dengan asumsi yang digunakan yaitu hanya dari satu arah.



Gambar 3.3 Benda Uji Kubus untuk Pengujian Korosi dengan Metode (a) *Galvanostatik* dan (b) *Wetting and Drying*

3.4.5 Pembuatan Benda Uji

Pada sub bab ini akan dijelaskan proses pembuatan benda uji yang akan digunakan untuk pengujian selanjutnya. Benda uji terbagi menjadi dua jenis yakni benda uji silinder berukuran $\phi 10 \times 20$ cm dan benda uji kubus berukuran $15 \times 15 \times 15$ cm. Benda uji silinder digunakan dalam pengujian kuat tekan, kuat tarik, porositas dan penetrasi beton bertulang. Sedangkan benda uji kubus digunakan pada pengujian korosi untuk mendapatkan data mengenai infiltrasi klorida dan proses retak akibat korosi yang terjadi.

Proses *mix design* dilakukan sesuai dengan SNI 03-3449-2002. Beberapa hari sebelum proses pengecoran, dilakukan pencucian terhadap agregat halus dan agregat kasar untuk menghilangkan debu halus yang menempel pada agregat yang dapat berakibat pada meningkatnya kebutuhan air dan penurunan kekuatan material serta *bond strength*. Agregat yang berada pada kondisi basah diletakkan pada ember agar agregat dapat mengabsorpsi air, menstabilkan kondisi kelembapan dan membuang kelebihan air ke bagian bawah ember yang telah dilubangi sebelumnya. Agregat yang berada pada bagian terbawah, sekitar 5 hingga 10 cm dari dasar tempat penyimpanan, tidak digunakan karena berada pada kondisi basah akibat dari kelebihan air yang terkumpul pada saat proses penyimpanan. Agregat pada bagian atas dipindahkan ke tempat penyimpanan lain yang dan disimpan hingga berada pada kondisi SSD (*Saturated Surface Dry*). Agregat inilah yang digunakan dalam proses pencampuran beton. Proses persiapan agregat ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Proses Persiapan Agregat

Sehari sebelum pengecoran, semua material disiapkan dan ditimbang sesuai dengan kebutuhan. Persiapan cetakan juga dilakukan untuk mempermudah proses *casting* setelah pengecoran. Agregat dan semen dibagi menjadi dua *batch* karena keterbatasan volume mixer. Pencampuran dilakukan dengan memasukkan bahan-bahan secara bertahap. Pada tahapan awal pencampuran agregat kasar dimasukkan terlebih dahulu hal ini disebabkan karena ukuran partikelnya yang cukup besar dan juga untuk mencegah slip pada dinding mixer. Semen dimasukkan di atas aggregate kasar kemudian dilanjutkan dengan aggregate halus untuk mencegah debu halus dari material semen keluar dari mixer. Material kering dicampur terlebih dahulu hingga tercampur secara homogen sekitar 30 hingga 60 detik. Setelah bahan-bahan kering tercampur tahapan selanjutnya adalah penambahan air. Pencampuran semua bahan dilakukan hingga merata selama 3 hingga 5 menit. Setelah itu, beton segar yang telah dicampur dituangkan dalam wadah besar dan mulai dicor kedalam cetakan yang telah disiapkan. Proses pengecoran ditunjukkan pada Gambar 3.5.

Untuk memenuhi kebutuhan benda uji, cetakan yang disiapkan berupa cetakan silinder dan kubus. Cetakan kubus dibagi kedalam dua konfigurasi penempatan tulangan yang berbeda. Perbedaan ini dikarenakan perbedaan metode pengujian korosi. Dalam metode galvanostatik, tulangan dibuat menonjol keluar karena harus dihubungkan dengan

DC *power supply* untuk mempercepat proses korosi yang terjadi. Sedangkan pada metode *wetting and drying* tulangan seluruhnya berada di dalam beton karena proses percepatan korosi dilakukan dengan mempercepat siklus basah dan kering yang terjadi. Selain dalam bentuk kubus, beton juga dicetak kedalam bentuk silinder untuk keperluan pengujian karakteristik beton seperti pengujian kuat tekan, kuat tarik, dan pengujian lainnya.



Gambar 3.5 Proses Persiapan Cetakan dan Pengecoran Beton bertulang

Proses *curing* pada beton bertulang pada beton selama 28 hari sebelum dilakukan pengujian korosi. Beton yang telah dicor didiamkan dalam kondisi ruangan selama 24 jam hingga mengeras. Setelah 24 jam beton dikeluarkan dari cetakan dan mulai dilakukan *curing*. Proses *curing* awal dilakukan dengan menutupi seluruh bagian beton dengan kain yang telah dibasahi sebelumnya. Bagian tulangan dilapisi dengan epoxy untuk mencegah reaksi tulangan dengan kain basah sehingga korosi tidak terjadi lebih dahulu sebelum pengujian korosi dilakukan.

3.4.6 Perawatan Benda Uji

Perawatan (*curing*) benda uji dilakukan dengan dua metode. Untuk benda uji silinder dan kubus yang digunakan untuk pengujian *wetting and drying*, *curing* dilakukan

dengan merendam benda uji selama 28 hari dalam air PDAM. Sedangkan untuk benda uji yang diuji dengan metode galvanostatik, curing dilakukan dengan melapisi beton dengan lap kain basah untuk mencegah kontak tulangan yang menonjol dengan air. Lapisan tulangan dilapisi dengan epoxy bening untuk mencegah kontak dengan udara selama masa curing.

3.4.7 Pengujian Properties Benda Uji

a. Pengujian Slump (ASTM C 143)

Pengujian slump dilakukan untuk mengetahui konsistensi dari dari beton segar sehingga dapat diketahui tingkat workabilitinya. Untuk melakukan tes ini diperlukan tabung Abraham atau dikenal juga dengan tabung kerucut serta alat perojok, mistar dan pelat baja. Pada test ini beton dimasukkan secara bertahap menjadi tiga bagian dengan masing-masing bagian diberikan rojokan sebanyak 25 kali rojokan. Setelah tabung Abraham diangkat, maka dilakukan pengukuran selisih tinggi beton dan ketinggian tabung Abraham.

b. Pengujian Kuat Tekan (ASTM C39 M-01) dan Kuat Tarik (ASTM C496)

Pengujian kuat tekan dilakukan sesuai dengan ASTM C39. Pengujian ini dilakukan setelah benda uji silinder direndam dalam kolam perawatan selama 28 hari. Sebelum pengujian kuat tekan benda uji didiamkan pada suhu ruangan untuk membuang kelebihan air. Benda uji ditekan dengan pembebanan $1.5-3.5 \text{ kg/cm}^2/\text{detik}$ sesuai dengan ketentuan ASTM. Kuat tekan beton didapatkan dengan membagi antara beban yang diterima dengan luas area beton tersebut.

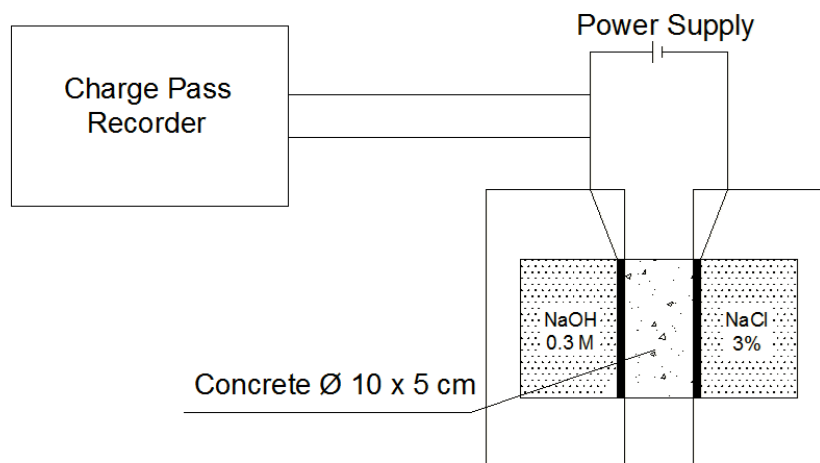
Preparasi material untuk pengujian kuat tarik dilakukan dengan metode yang sama dengan penguian kuat tekan. Pengujian kuat tarik ini dilakukan sesuai dengan standar ASTM C 496. Pemberian pembebanan dilakukan secara konstan dengan kecepatan antara 50 hingga 100 kN per menit. Besarnya kuat tarik belah dapat dihitung dengan membagi dua kali beban maksimum dengan panjang benda uji dikalikan dengan diameter.

c. Pengujian Kecepatan Penetrasi Klorida (ASTM C1202)

Pengujian penetrasi klorida dilakukan sesuai dengan ASTM 1202. Pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan koefisien difusi awal dari sampel. Benda uji dipotong

dengan menggunakan alat pemotong untuk mendapatkan sampel beton dengan tinggi 5 cm. Selimut dari benda uji dilapisi dengan menggunakan *epoxy*. Pada tahapan selanjutnya benda uji divakum selama tiga jam dan direndam selama 18 jam untuk membuat benda uji berada pada kondisi jenuh.

Setelah berada pada kondisi jenuh benda uji ditempatkan pada alat pengujian dengan sel sebelah kiri adalah terhubung dengan cairan NaOH 0,3 M dan bagian sebelah kanan terhubung dengan NaCl 3%. Larutan NaCl diperoleh dengan melarutkan 3 gram NaCl kedalam aquades hingga mencapai volume 100 ml dan larutan NaOH 0.3 N dibuat dengan melarutkan tiap 0.3 berat molekul (BM) NaOH ke dalam aquades hingga volume 1 liter. Untuk keperluan pengukuran besarnya charge passed, sel yang berisi larutan NaCl dihubungkan dengan terminal negatif dan sel yang berisi larutan NaOH dihubungkan dengan terminal positif.



Gambar 3.6 Skema Pengujian Penetrasi (ASTM C 1202)

Koefisien difusi diperoleh dengan mengukur konsentrasi ion klorida pada benda uji setelah dilakukan uji penetrasi dengan menggunakan perumusan sebagai berikut

$$D = \frac{RTL}{zFU} \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (3.1)$$

Dimana z adalah valensi ion dimana untuk klorida diambil sama dengan satu. Konstanta F dan R secara berturut adalah konstanta faradai dan konstanta gas. Sedangkan T adalah temperatur absolut pada penelitian ini dimana diambil sebesar 30°C , U adalah beda potensial listrik dan L adalah tebal benda uji. Koefisien x_d dan t adalah jarak

pengukuran konsentrasi klorida dari permukaan beton dan t adalah waktu pengukuran. Koefisien α dapat dicari dengan menggunakan perumusan berikut ini.

$$\alpha = 2 \times \sqrt{\frac{RTL}{zFU}} \operatorname{erfc} \left(1 - \frac{2c_d}{c_o} \right) \quad (3.2)$$

Koefisien c_o dan c_d adalah konsentrasi pada permukaan beton dan konsentrasi pada titik x_d .

d. Pengujian Porositas (AFNOR NF B 49104)

Pengujian porositas dilakukan untuk mengetahui besarnya pori di dalam beton. Porositas pada beton dibedakan atas porositas terbuka dan tertutup. Porositas terbuka merupakan pori yang bersifat permeable yang berarti pori tersebut mampu ditembus oleh air dan udara. Semakin besar porositas terbuka, maka beton cenderung memiliki kuat tekan yang lebih rendah dan keropos. Sedangkan pori tertutup lebih bersifat impermeable dan dapat mencegah beton dari keretakan. Pengujian porositas dilakukan untuk sampel beton dengan tiga kondisi yang berbeda.

Benda uji diambil dari masing-masing *chamber* kemudian dipotong setinggi 2 cm. Potongan benda uji tersebut direbus selama 5 jam agar semua pori yang berada di dalamnya terisi air. Dalam keadaan basah, potongan benda uji ditimbang dalam air (= μ). Kemudian, potongan benda uji ditimbang dalam keadaan SSD (= M_h). Setelah itu, potongan benda uji dimasukkan ke dalam oven $\pm 100^\circ\text{C}$ selama beberapa hari agar semua air yang ada dalam benda uji menguap. Dalam keadaan kering tersebut benda uji ditimbang (= M_o). Potongan benda uji dihancurkan dan kemudian dipisahkan dari agregat kasarnya. Setelah dipisahkan, kemudian dihaluskan sampai lolos ayakan no. 200. Sample yang telah dihaluskan ditimbang (= m_o) dan dengan alat piknometer diukur volumenya sesuai dengan hukum archimedes yang menyatakan bahwa volume air yang keluar = volume benda yang tercelup di dalamnya (= V_o). Perhitungan porositas dilakukan dengan mengikuti langkah-langkah pada persamaan 3.3 hingga 3.7 berikut ini.

➤ Kepadatan absolut (r) adalah perbandingan berat dan volume dalam keadaan halus.

$$r = m_o / V_o \quad (3.3)$$

➤ Kepadatan visual (α) adalah perbandingan contoh dalam keadaan kering (M_o) terhadap volume yang tampak ($M_h - \mu$)

$$\alpha = Mo / (Mh - \mu) \quad (3.4)$$

- Porositas total (pt) dalam persen adalah perbandingan volume pori terhadap volume yang tampak

$$pt (\%) = 100 \times (1 - \alpha/r) \quad (3.5)$$

- Porositas terbuka (po) dalam persen adalah perbandingan volume porositas terbuka terhadap yang tampak.

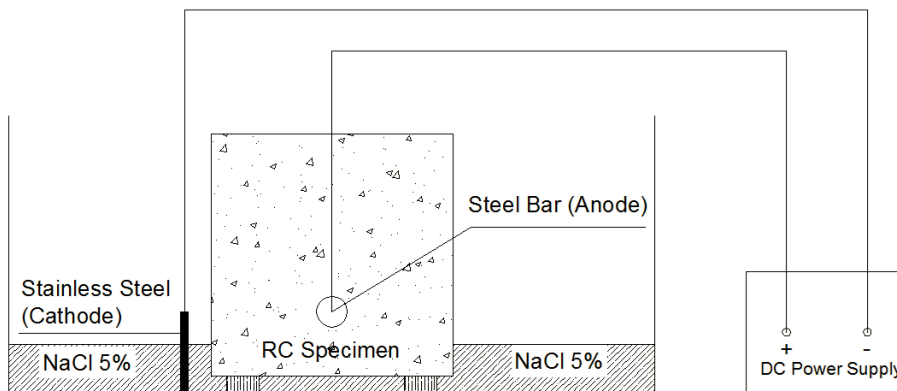
$$po (\%) = 100 \times (Mh - Mo) / (Mh - \mu) \quad (3.6)$$

- Porositas tertutup adalah perbandingan porositas tertutup terhadap volume yang tampak.

$$pf (\%) = pt - po \quad (3.7)$$

3.4.8 Pengujian Korosi dengan Metode Galvanostatik

Pengujian korosi dengan metode Galvanostatik adalah salah satu metode uji korosi dipercepat untuk melihat perilaku beton bertulang yang dilakukan dengan merendam benda uji pada larutan NaCl dan mengalirkannya dengan arus tertentu untuk menginisiasi dan mempercepat proses korosi tersebut. Skema pengujian korosi ditunjukkan oleh Gambar 3.7.

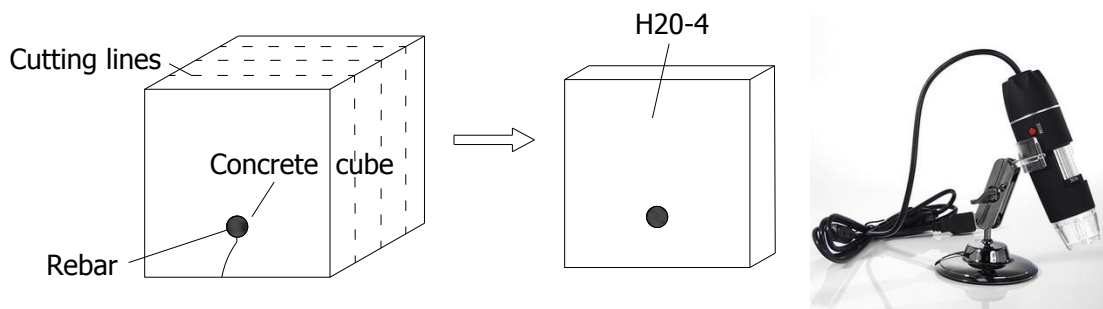


Gambar 3.7 Skema Pengujian *Accelerated Corrosion Test* dengan Metode Galvanostatik

Langkah pertama adalah menyiapkan larutan NaCl yang digunakan sebagai *artificial marine water*. Konsentrasi larutan yang digunakan adalah sebesar 5%. Sampel beton disusun berdampingan satu dengan yang lain untuk mempermudah proses

pengujian. Terminal positif dari DC power supply dihubungkan dengan tulangan yang berfungsi sebagai anoda dan terminal negatif dihubungkan dengan *counter electrode*, dimana pada penelitian ini digunakan pelat baja, yang berfungsi sebagai katoda. Pengujian dilakukan secara seri dengan mengalirkan arus konstan sebesar $190 \pm 2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. *Accelerated corrosion test* dengan metode galvanostatik dihentikan setelah pengujian mencapai usia 24 hari dengan indikasi retak telah mencapai selimut beton dan retak longitudinal yang terjadi telah merata disepanjang permukaan beton. Selain itu pada usia ini sampel beton sudah tidak dapat dipotong dengan baik karena bonding antara tulanga dan beton rusak sehingga *splitting* terjadi saat pemotongan.

Pengamatan hasil eksperimen dilakukan setiap hari untuk mengamati proses keretakan yang terjadi mulai dari inisiasi hingga perambatan retak. Pengamatan keretakan dilakukan dengan cara memotong beton kedalam empat bagian yang sama ke arah penampang. Setelah itu retak diamati dengan menggunakan *hand microscope* untuk mendapatkan lebar retak pada beton tersebut. Selain itu pengamatan terhadap ketebalan karat yang terbentuk juga dilakukan dengan menggunakan teknik *digital measurement*. Teknik ini dilakukan dengan mengambil gambar dari sampel dan memprosesnya dengan menggunakan *image processing software* untuk mendapatkan data ketebalan karat yang terbentuk.



Gambar 3.8 Skema Pemotongan benda uji dan Alat pengamatan keretakan.

3.4.9 Pengujian Korosi Metode *Wetting and Drying*

Metode ini dilakukan dengan menempatkan benda uji berupa kubus beton bertulang dalam suatu *artificial chamber*. Pada *artificial chamber* ini benda uji mengalami perlakuan khusus untuk mensimulasikan proses basah dan kering. Temperatur dalam *chamber* ini dijaga agar selalu konstan sebesar $30^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ dan kelembapan maksimum adalah sebesar 80%.

Durasi basah dan kering pada suatu lingkungan laut berbeda satu dengan yang lainnya. Untuk beton yang berada pada kondisi percikan, waktu kering relatif lebih besar dibandingkan dengan waktu basah. Sedangkan pada beton yang waktu keringnya sama atau kurang dari waktu basah dapat dikategorikan masuk kedalam kondisi terendam sempurna (*fully submerged*) karena kondisi struktur secara keseluruhan tidak berbeda dengan kondisi *fully submerged*. Oleh karena itu, pada penelitian ini terdapat tiga buah *chamber* dengan kondisi temperatur dan kelembapan yang sama namun memiliki durasi basah dan kering yang berbeda-beda. Perbandingan yang digunakan untuk durasi basah (w) dan kering (d) adalah untuk $w/d \leq 0.5$, $w/d > 0.5$ dan $w/d \geq 1$.

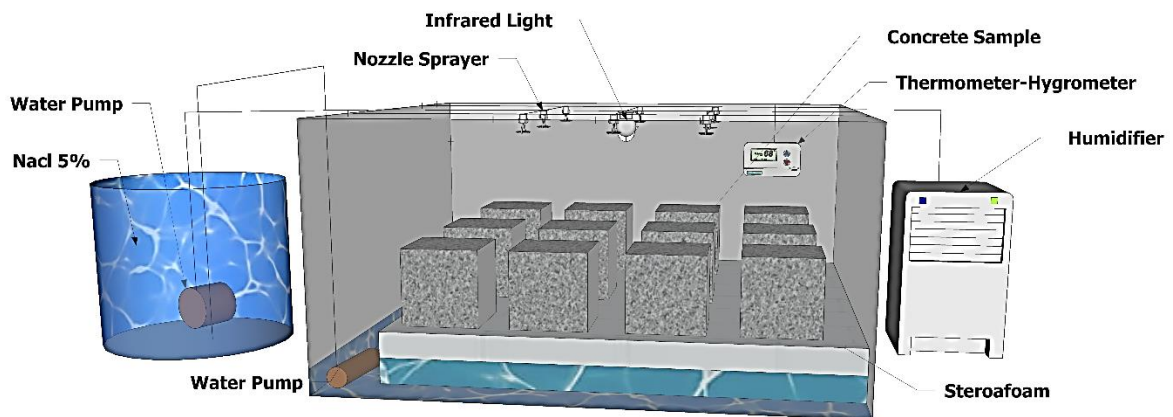
Tiga kondisi basah dan kering yaitu sebagai berikut:

- 1 jam basah and 7 jam kering ($w/d \leq 0.5$; 3 *cycles* per hari)
- 3 jam basah dan 5 jam kering ($w/d > 0.5$; 3 *cycles* per hari)
- 24 jam basah ($w/d \geq 1$; *fully submerged*)

Untuk mensimulasikan proses basah, larutan 5% NaCl disemprotkan melalui pipa yang telah diberi *head nozzle* dibagian bawahnya. Sedangkan kondisi kering disimulasikan dengan lampu infra merah. Durasi basah dan kering diatur dengan menggunakan saklar yang dilengkapi dengan *digital timer* yang telah diatur sesuai dengan durasi basah dan kering di setiap *chamber*.

Larutan NaCl 5% per seratus mililiter yang digunakan dibuat dengan cara menimbang 5 gram NaCl ditambah aquades sampai volume 100 ml. Untuk volume yang lebih besar, cara yang sama digunakan akan tetapi jumlah NaCl dan aquades yang digunakan dikalikan secara proporsional. Air yang digunakan diganti setiap satu minggu sekali untuk menjaga pH air dikisaran 7 dan menjaga konsentrasinya agar tetap pada konsentrasi semula yakni 5%.

Setelah dilakukan proses simulasi korosi dengan menggunakan metode *wetting and drying*, beberapa pengujian dilakukan untuk mendapatkan data seperti *chloride profile* dan kondisi mikrostruktur dari beton tersebut. *Chloride profile* dianalisa dengan menggunakan metode titrasi. Selain itu dilakukan pengamatan mikrostruktur dari ketiga jenis sample untuk mengetahui pengaruh dari durasi basah dan kering terhadap perubahan kondisi mikrostruktur dari beton tersebut. Penjelasan lebih detail terkait pengujian mikrostruktur akan dijelaskan pada sub bab 3.4.11.



Gambar 3.9 Pengujian Korosi dengan menggunakan Siklus basah dan kering *Method*

3.4.10 Uji Konsentrasi Klorida dengan Titrasi (ASTM C 1218 dan ASTM C 114)

Pengujian titrasi potentiometric atau dikenal juga dengan titrasi argentometri dilakukan untuk mengetahui kadar klorida pada beton. Hal ini dilakukan untuk melihat hubungan antara pertambahan jumlah klorida dan waktu pengujian. Konsentrasi dari klorida diketahui melalui proses titrasi dengan menggunakan perak nitrat (AgNO_3).

Argentometri merupakan salah satu cara untuk menentukan kadar zat dalam suatu larutan yang dilakukan dengan titrasi berdasarkan pada pembentukan endapan dengan ion Ag^+ . Biasanya, ion-ion yang ditentukan dalam titrasi ini adalah ion halide (Cl^- , Br^- , I^-). Pada titrasi argentometri, zat pemeriksaan yang telah dibubuhi indikator dicampur dengan larutan standar garam perak nitrat (AgNO_3). Dengan mengukur volume larutan standar yang digunakan sehingga seluruh ion Ag^+ dapat tepat diendapkan, kadar garam dalam larutan pemeriksaan dapat ditentukan. Percobaan ini berdasarkan pada reaksi pengendapan zat yang cepat mencapai kesetimbangan pada setiap penambahan titran.

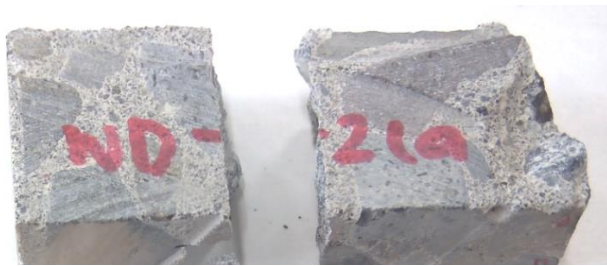
Untuk mendapatkan *chloride profile* dengan metode titrasi, beton harus dipotong menjadi beberapa layer. Oleh karena itu, beton dipotong tiap ketebalan satu centimeter. Layer tersebut kemudian dihancurkan dan disaring dengan saringan No. 200. Sampel tersebut kemudian dilarutkan dengan *nitric acid* dan hidrogen peroksida. Pada bagian akhir dilakukan titrasi dengan menggunakan perak nitrat untuk mendapatkan konsentrasi klorida.

3.4.11 Pengujian Mikrostruktur

Pengujian mikrostruktur dilakukan terhadap sampel beton yang telah mengalami pengujian korosi untuk mengetahui kondisi partikel di dalam beton tersebut. Data yang didapatkan digunakan sebagai data pendukung dan justifikasi kondisi beton pasca mengalami pengujian korosi. Pengujian mikrostruktur meliputi pengujian SEM/EDX dan XRF.

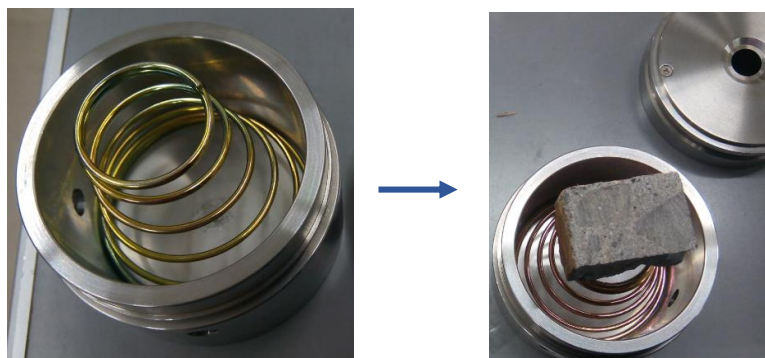
a. Pengujian *X-ray fluorescence* (XRF)

Pengujian XRF dilakukan untuk mendapatkan prosentase unsur yang terkandung pada beton tersebut. Proses pengamatan dengan teknik XRF diawali dengan pengambilan sampel. Untuk pengamatan dengan menggunakan XRF, permukaan sampel harus rata karena topografi sampel sangat mempengaruhi keakuratan pembacaan gelombang untuk menentukan prosentase unsur dalam suatu sampel. Oleh karena itu, untuk mendapatkan permukaan yang cukup rata, pemotongan dilakukan dengan menggunakan gerinda. Gambar 5.25 berikut menunjukkan sample yang digunakan untuk XRF.



Gambar 3.10 Sampel yang digunakan untuk XRF

Pengujian XRF dilakukan dengan memasukkan benda uji ke dalam suatu wadah pegas seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3.11 Proses Preparasi Sample untuk Pengujian XRF. Pembacaan unsur-unsur yang terdapat dalam sample dilakukan secara otomatis dan membutuhkan waktu berkisar antara 15 hingga 20 menit per sampel.



Gambar 3.11 Proses Preparasi Sample untuk Pengujian XRF

Data yang didapatkan dari hasil pengujian dengan menggunakan XRF ini adalah prosentase unsur untuk tiga buah sampel yakni sample durasi 1 jam basah dan 7 jam kering, sampel dengan durasi 3 jam basah dan 5 jam kering serta sampel dengan kondisi *fully submerged*.

b. Pengujian SEM/EDX (ASTM C 1723 2010)

Pengujian SEM/EDX dilakukan sesuai dengan ASTM C 1723 2010. Pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan gambaran kondisi mikrostruksur sampel dan pola persebaran tiap unsur pada sampel. Sampel yang digunakan dalam pengujian SEM ini adalah sampel beton bertulang yang telah melalui pengujian dengan metode *wetting and drying*.

Sampel yang telah mengalami siklus basah dan kering ditempatkan dalam suhu ruang selama 24 jam. Sampel kemudian dipotong menjadi empat bagian seperti yang telah di jelaskan pada sub bab 3.4.8 dan dipotong per layer dengan ketebalam satu cm. Untuk mendapatkan sampel pada bagian dalam maka sampel yang telah dipotong diberi beban bending hingga patah pada bagian tengahnya. Kemudian sample pada bagian tengah dipotong hingga menghasilkan ukuran 0.5 x 0.5 cm.

Sebelum sampel dimasukkan ke dalam mesin uji SEM, benda uji divakum terlebih dahulu. Proses vakum ini bertujuan untuk menghilangkan efek pergerakan elektron yang tidak beraturan karena adanya molekul gas yang dapat menghasilkan penurunan intensitas dan stabilitas. Selain itu adanya molekul gas juga dapat bereaksi dengan sampel yang berakibat pada penurunan nilai kontras sehingga mengakibatkan detail gambar menjadi lebih gelap.



Gambar 3.12 Sampel Beton Sebelum dan Setelah Dilakukan Proses *Coating*

Pengujian SEM dilakukan dengan 2 teknik yaitu dengan dan tanpa menggunakan *coating*. Pengujian tanpa menggunakan *coating* dilakukan untuk mendapatkan hasil mapping unsur yang sebenarnya dari sample yang ada. Sedangkan pengujian dengan menggunakan *coating* dilakukan untuk mendapatkan permukaan yang lebih konduktif dan gambaran yang lebih jelas terkait dengan kondisi mikrostruktur pada beton. Gambar 3.12 berikut menunjukkan kondisi sampel beton sebelum dan setelah dilakukan *coating*.



Gambar 3.13 Alat Uji SEM

SEM dilakukan dengan menggunakan mesin JEOL JSM 7600F seperti ditunjukkan oleh Gambar 3.13. Teknik pembacaan elektron yang nantinya ditampilkan dalam bentuk gambar pada SEM dapat terbagi menjadi dua yakni dari pantulan elastis dan inelastis. Dari pantulan elastis didapatkan sinyal berupa *backscattered electron* yang menghasilkan gambar berdasarkan perbedaan berat molekul. Atom yang memiliki berat molekul lebih rendah menghasilkan gambar yang lebih rendah bila dibandingkan dengan atom yang memiliki berat molekul lebih rendah. Sedangkan dari pantulan sinyal elastis didapatkan sinyal berupa secondary electron yang menghasilkan gambar berdasarkan topografi dari benda. Permukaan yang lebih tinggi menghasilkan gambar yang lebih cerah bila dibandingkan dengan topografi yang lebih rendah. *Secondary elektron* menghasilkan gambar yang cenderung lebih jernih dan tajam bila dibandingkan dengan *backscattered electron*. Selain itu dari pantulan inelastis juga didapatkan data yang berkaitan dengan karakteristik X-Rays yang dibutuhkan untuk melihat persebaran unsur pada sampel

tersebut. Oleh karena itu, teknik pembacaran elektron inelastis dipilih untuk digunakan dalam penelitian ini.

3.5 Pengembangan Model

Pengembangan model dilakukan untuk mendapatkan sebuah formulasi yang dapat mensimulasi dan memprediksi retak yang terjadi akibat adanya korosi. Pemodelan terbagi atas dua tahapan yakni pemodelan penetrasi klorida ke dalam beton akibat siklus basah dan kering serta pemodelan retak akibat korosi yang tidak merata.

Pengembangan model penetrasi klorida ke dalam beton akibat siklus basah dan kering dilakukan dengan memodifikasi Hukum Fick. Hukum Fick sudah digunakan secara umum untuk memodelkan proses transport suatu zat melalui sebuah fasa akibat adanya gradien dari spesies tersebut. Model ini telah digunakan selama bertahun-tahun untuk mensimulasikan proses masuknya klorida ke dalam beton. Akan tetapi hukum Fick ini cenderung sesuai untuk digunakan pada kondisi terendam sempurna. Oleh karena itu pada penelitian disertasi ini dilakukan beberapa modifikasi terhadap Hukum Fick dengan memasukkan beberapa koefisien yang mengakomodasi beberapa variabel seperti jarak dari permukaan yang terkena paparan, durasi basah dan kering serta total waktu paparan. Penentuan koefisien didapatkan dari analisa studi literatur yang dikombinasikan dengan temuan-temuan saat eksperimental.

Selain pengembangan model penetrasi klorida, model keretakan juga dikembangkan dalam penelitian ini. Pengembangan model dimulai dari pengembangan model distribusi karat yang tidak merata di sepanjang perimeter tulangan. Model ini diturunkan dari Hukum Faraday yang dikombinasikan dengan *Gaussian Function for Normal Variable*. Setelah model persebaran karat ditemukan tahapan selanjutnya adalah memodelkan waktu prediksi inisiasi retak. Untuk mendapatkan model ini, teori *thick wall cylinder* digunakan sebagai dasar. Dengan menganggap beban *pressure* yang terjadi disepanjang perimeter silinder adalah tidak merata akibat distribusi karat yang tidak merata, maka akan didapatkan waktu keretakan pertama yang berbeda-beda di sepanjang perimeter tulangan. Untuk memodelkan pola propagasi retak, pemodelan dibantu dengan menggunakan program bantu komersial Abaqus CAE. Pendekatan XFEM digunakan sebagai media untuk memodelkan propagasi retak secara diskrit.

Metode *XFEM crack* dapat menunjukkan keberadaan diskontinuitas pada elemen model dengan menambah derajat kebebasan (*enriching*) pada area local tertentu. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan *traction-sparation* tipe Maxps. Dalam penggunaan Maxps, selain harus mendefinisikan nilai f_r , parameter lain yang harus ditentukan adalah nilai *failure* sebagai *break point* dimana retak akan terjadi. Pada pemodelan ini nilai tersebut didefinisikan berdasarkan *fracture energy*. Nilai *fracture energy* didapatkan berdasarkan Perhitungan dari peraturan *Comite Euro-International Du Beton* (CEB-FIP).

Terdapat beberapa hal yang harus diperhatikan dalam mendefinisikan parameter pada pemodelan *XFEM Crack*, yaitu analisa hanya dapat dilakukan untuk prosedur analisa statik dengan *mesh refinement* berdasarkan element CPE4, CPS4, C3D4, C3D8. Perambatan retak akibat *fatigue* tidak dapat dimodelkan dan pertumbuhan retak tidak tumbuh pada sudut lebih besar dari 90° pada elemen tertentu. Dari permodelan dengan menggunakan *XFEM Crack Model* maka didapatkan panjang retak dan propagasi arah retak akibat korosi pada tulangan. Keseluruhan tahap pengerjaan tersebut dilakukan berulang hingga didapatkan hasil permodelan yang relevan dengan kondisi asli hasil pengujian.

3.6 Validasi Hasil

Pada tahapan ini dilakukan validasi terhadap model prediksi yang telah dilakukan terhadap hasil eksperimental. Model infiltrasi klorida dibandingkan dengan hasil ekpserimental dengan metode *wetting and drying*. Sedangkan model keretakan dibandingkan dengan hasil eksperimental yang dilakukan dengan metode galvanostatik.

3.7 Penarikan Kesimpulan

Setelah analisa dan validasi selesai dilakukan maka tahap akhir dari penelitian ini adalah penarikan kesimpulan dari seluruh hasil penelitian yang telah dilakukan.

Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB 4

PENGUJIAN SIFAT MATERIAL DAN *DURABILITY PROPERTIES* PADA BETON

4.1 Umum

Bab ini membahas mengenai hasil dari kegiatan eksperimental yang telah dilakukan. Kegiatan eksperimental yang dipaparkan pada bab ini bertujuan untuk mendapatkan *durability properties* dari beton yang nantinya akan diuji dengan menggunakan pengujian korosi. Pengujian *properties* beton ini meliputi pengujian terhadap material yang digunakan sebagai campuran beton seperti semen, pasir, kerikil dan air. Pengujian selanjutnya adalah pengujian *properties* beton yang meliputi pengujian kekuatan tekan, kuat tarik, porositas beton dan kecepatan penetrasi klorida tersebut.

4.2 Analisa Material

Sub bab ini membahas mengenai hasil analisa pengujian material. Kualitas material yang digunakan akan mempengaruhi kualitas beton yang dihasilkan. Material yang dianalisa meliputi semen, pasir, kerikil, air serta tulangan. Pada penelitian ini digunakan satu tipe beton dengan w/c adalah 0.5.

4.2.1 Analisa Semen

Semen yang digunakan dalam studi ini adalah semen PPC (*Portland Pozzoland Cement*) produksi PT semen gresik. Analisa dilakukan terhadap kandungan kimia dari semen yang digunakan. Hasil analisa ditunjukkan pada Tabel 4.1 berikut ini.

Tabel 4.1 Hasil Analisa Kimia Semen Portland

Jenis Pengujian	Hasil Uji (%)
Silicon Dioksida (SiO ₂)	23.13
Aluminium Trioksida (Al ₂ O ₃)	8.76
Ferri Oksida (Fe ₂ O ₃)	4.62
Calcium Oksida (CaO)	58.66
Magnesium Oksida (MgO)	0.9
Sulfur Trioksida (SO ₃)	2.18

4.2.2 Analisa Agregat Halus (Pasir)

Agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini adalah agregat lokal. Pengujian yang dilakukan meliputi sifat fisik dan analisa gradasi dari pasir yang digunakan pada penelitian ini. Tabel 4.2 berikut menunjukkan analisa sifat fisik pasir

Tabel 4.2 Sifat Fisik Agregat Halus

Jenis Analisa	Satuan	Hasil Analisa	Syarat ASTM
Berat Jenis	Kg/m ³	2570	2400-2700 ASTM C 128
Kadar Resapan	%	1.42	max 4 % ASTM C 128
Kadar Lumpur Rata-rata	%	1.72	max 3% ASTM C 33

Berdasarkan hasil pengujian sifat fisik agregat tersebut maka dapat disimpulkan bahwa agregat halus menunjukkan bahwa agregat tersebut telah memenuhi persyaratan ASTM sehingga dapat digunakan pada campuran beton. Untuk mengetahui keseragaman butiran pasir maka dilakukan analisa ayakan. Tabel 4.3 berikut ini adalah hasil analisa ayakan pasir

Tabel 4.3 Hasil Analisa Ayakan Pasir

Lubang Ayakan Inch/mm	Pasir		
	Tertinggal		
	Gram	%	E%
4.76	8.9	0.89	0.89
2.38	45.6	4.56	5.45
1.19	49.9	4.99	10.44
0.59	438.9	43.89	54.33
0.297	363.6	36.36	90.96
0.149	71.4	7.14	97.83
PAN	21.7	2.17	100
Jumlah	1000	100	359.63
FM Pasir = 3.59			

Berdasarkan analisa gradasi pasir dapat disimpulkan bahwa pasir yang digunakan memiliki modulus kehalusan sebesar 3.59 dan masuk ke dalam gradasi 2.

4.2.3 Analisa Agregat Kasar (Kerikil)

Agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini adalah batu pecah. Pengujian yang dilakukan meliputi sifat fisik dan analisa gradasi dari kerikil yang akan digunakan. Tabel 4.4 berikut menunjukkan analisa sifat fisik pasir.

Tabel 4.4 Sifat Fisik Agregat Halus

Jenis Analisa	Satuan	Hasil Analisa	Syarat ASTM
Berat Jenis	Kg/m ³	2680	1600-3200 ASTM C 127
Kadar Resapan	%	2.67	max 2 % ASTM C 127
Kadar Lumpur Rata-rata	%	1.25	max 1% ASTM C 33

Berdasarkan hasil pengujian sifat fisik agregat tersebut maka dapat disimpulkan bahwa agregat halus menunjukkan bahwa agregat tersebut telah memenuhi persyaratan ASTM sehingga dapat digunakan pada campuran beton. Untuk mengetahui keseragaman butiran pasir maka dilakukan analisa ayakan. Tabel 4.5 menunjukkan hasil analisa ayakan pasir.

Tabel 4.5 Hasil Analisa Ayakan Pasir

Lubang Ayakan Inc/mm	Batu Pecah		
	Tertinggal		
	Gram	%	E%
76.2	0	0.00	0.00
38.1	0	0.00	0.00
19.05	40	0.80	0.80
9.53	3990	80.12	80.92
4.76	950	19.08	100.00
2.38	0	0.00	100.00
1.19	0	0.00	100.00
0.59	0	0.00	100.00
0.297	0	0.00	100.00
0.149	0	0.00	100.00
PAN	-	-	-
Jumlah	4980	100.00	681.73
FM Kerikil = 6.817			

Berdasarkan analisa gradasi pasir dapat disimpulkan bahwa pasir yang digunakan memiliki modulus kehalusan sebesar 6.817.

4.3 Pengujian Slump

Pengukuran slump dilakukan untuk mengetahui *workability* dari campuran beton yang telah dibuat. Pengujian slump adalah alat kontrol kualitas yang baik. Perubahan slump dalam pekerjaan beton menandakan perubahan dalam jumlah agregat dan air. Ini memandang sesuatu terjadi pada campuran yang membutuhkan perhatian. Pada umumnya beton pada slump yang sama dapat digunakan dalam tujuan yang sama. Pengujian slump dilakukan sebanyak tiga kali untuk melihat apakah hasil nilai slump yang dihasilkan sesuai dengan yang direncanakan. Tabel 4.6 berikut ini menunjukkan hasil pengujian slump test dari campuran beton yang telah dibuat.

Tabel 4.6 Hasil Pengujian Slump Test

	Benda Uji			Rata-Rata Nilai Slump (mm)
	I	II	III	
Nilai Slump	95	93	92.5	93.5

Berdasarkan hasil pengujian slump maka didapatkan rata-rata nilai slump adalah sebesar 93.5 mm. Hal ini menunjukkan bahwa nilai slump memenuhi persyaratan yang ada.

4.4 Material Properties Beton

Setelah proses *curing* selesai dilakukan maka dilakukan pengujian terhadap karakteristik beton. Pengujian tersebut meliputi pengujian kuat tekan, kuat tarik, porositas dan kecepatan penetrasi klorida dari beton tersebut.

4.4.1 Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan beton dilakukan terhadap benda uji silinder berukuran $\varnothing 10 \times 20$ cm. Pengujian kuat tekan dilakukan dengan mengacu pada ASTM C39. Pengujian awal kuat tekan dilakukan sebanyak empat kali saat umur beton 3, 7, 14 dan 28 hari. Masing-masing pengujian menggunakan benda uji sebanyak tiga buah. Tabel 4.7 berikut menunjukkan hasil pengujian kuat tekan beton tersebut.

Tabel 4.7 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Umur (Hari)	Berat (Kg)	Beban (Kg)	Kuat Tekan (Kg/Cm ²)	Kuat Tekan Rata-Rata (Mpa)
3	3.789	10500	133.76	12.87
	3.800	9800	124.84	
	3.825	10000	127.39	
7	3.785	13500	171.97	17.83
	3.775	14000	178.34	
	3.815	14500	184.71	
14	3.812	16500	210.19	21.02
	3.796	16200	206.37	
	3.880	16800	214.01	
28	3.820	24500	312.10	31.42
	3.781	24700	314.65	
	3.804	24800	315.92	

Selain pengujian kuat tekan beton pada kondisi awal, pengujian juga dilakukan saat beton telah mengalami pengujian korosi. Beton ditempatkan pada tiga kondisi paparan yaitu:

- a. 1 Jam Basah dan 7 Jam Kering
- b. 3 jam basah dan 5 jam kering
- c. Terendam Sempurna (*Fully Submerged*)

Larutan yang digunakan dalam pengujian ini adalah larutan NaCl 5%. Pengujian dilakukan saat umur beton dua, enam, delapan dan sebelas bulan. Tabel 4.8 berikut ini menunjukkan hasil pengujian kuat tekan beton yang telah terekspose oleh NaCl.

Tabel 4.8 Kuat Tekan Beton setelah Terekspose NaCl 5%

Umur Beton (Bulan)	Kuat Tekan beto (MPa)		
	1 Jam Basah 7 Jam Kering	<i>Fully Submerged</i>	3 Jam Basah 5 Jam kering
2	35.35	35.41	35.38
4	35.29	35.80	35.03
6	33.63	32.87	31.59
11	33.38	31.21	29.55

Berdasarkan Tabel 4.8 diatas dapat dilihat bahwa secara keseluruhan kuat tekan beton cenderung menurun seiring dengan bertambahnya waktu perendaman. Akan tetapi

bila dilihat secara detail, kuat tekan beton pada umur dua bulan masih menunjukkan kenaikan dibandingkan dengan kuat tekan beton pada umur 28 hari. Sebagai catatan pada kondisi ini beton telah mengalami paparan selama kurang lebih satu bulan. Hal ini disebabkan karena reaksi semen dengan larutan NaCl menghasilkan *chloroaluminates* yang menutupi pori-pori beton. Dalam jumlah tertentu, keberadaan *chloroaluminates* ini dapat meningkatkan kuat tekan beton.

Akan tetapi, semakin lama waktu perendaman, kuat tekan beton semakin menurun. Hal ini pada dasarnya juga terkait dengan terbentuknya *chloroaluminates* di dalam beton. Pada durasi awal paparan, *chloroaluminates* yang terbentuk belum terlalu banyak sehingga tidak mengakibatkan adanya tekanan pada pori beton. Dengan bertambahnya waktu paparan, *chloroaluminates* yang terbentuk semakin banyak dan mulai menekan permukaan pori beton sehingga retak mikro sudah mulai terbentuk. Hal ini menyebabkan kekuatan beton semakin menurun seiring dengan meningkatnya waktu paparan.

Durasi paparan juga mempengaruhi kuat tekan beton dalam kondisi terendam sempurna masih mempertahankan kenaikan kuat tekan hingga usia enam bulan. Sedangkan beton yang mengalami kondisi basah dan kering hanya mampu mempertahankan kenaikan kekuatan hingga usia dua bulan. Penurunan kekuatan paling signifikan terlihat pada beton yang mengalami kondisi tiga jam basah dan lima jam kering. Sedangkan penurunan paling kecil terlihat dari beton yang mengalami perlakuan satu jam basah dan tujuh jam kering.

4.4.2 Kuat Tarik belah

Pengujian kuat tarik dilakukan pada benda uji berbentuk silinder. Pengujian kuat tarik belah dilakukan untuk mengetahui kekuatan tarik dari beton yang akan diuji korosi. Pengujian dilakukan sebanyak empat kali saat umur beton 3 hari, 7 hari dan 28 hari. Masing-masing pengujian menggunakan benda uji sebanyak tiga buah. Tabel 4.9 menunjukkan hasil pengujian kuat tarik beton tersebut.

Selain pengujian kuat tekan beton pada kondisi awal, pengujian juga dilakukan saat beton telah mengalami pengujian korosi. Pengujian korosi yang dilakukan sama dengan yang dilakukan untuk sampel uji kuat tekan. Larutan yang digunakan dalam pengujian ini adalah larutan NaCl 5%. Pengujian dilakukan saat umur beton enam dan sebelas bulan.

Tabel 4.10 menunjukkan hasil pengujian kuat tekan beton yang telah terekspose oleh NaCl.

Tabel 4.9 Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton

Umur (Hari)	Beban (kg)	Kuat Tarik Belah (Kg/cm ²)	Kuat Tarik Belah Rata-Rata (Mpa)
3	8300	11.748	1.170
	8200	11.607	
	8300	11.748	
7	13100	18.542	1.859
	13000	18.401	
	13300	18.825	
14	16500	23.355	2.350
	16700	23.638	
	16600	23.496	
28	20000	28.309	2.807
	19700	27.884	
	19800	28.025	

Seperti yang dapat dilihat pada hasil pengujian kuat tarik beton pada Tabel 4.9, kuat tarik beton mengalami kenaikan mulai dari usia tiga hari sampai dengan 28 hari. Hasil ini sesuai dengan kuat tekan beton yang juga mengalami kenaikan pada hari ke tiga hingga hari ke 28. Kuat tarik beton setelah mengalami pengujian korosi ditunjukkan pada Tabel 4.10. Sedangkan pada bulan ke -6, dimana sampel telah mengalami proses uji korosi selama lima bulan, bisa dilihat bahwa kuat tarik beton tersebut mengalami kenaikan akibat adanya *chloroaluminates* yang mulai terbentuk dan menyebabkan retak mikro pada beton. Hal ini mengakibatkan penurunan kuat tarik pada beton tersebut.

Tabel 4.10 Kuat Tarik Beton setelah Terekspose NaCl 5%

Umur Beton (Bulan)	Kuat Tarik Beton (MPa)		
	1 Jam Basah 7 Jam Kering	<i>Fully Submerged</i>	3 Jam Basah 5 Jam kering
6	2.751	2.707	2.650
11	2.650	2.500	2.447

4.4.3 Porositas

Porositas adalah prosentase ruang-ruang kosong, atau yang dikenal juga dengan pori, yang terdapat pada beton dan merupakan salah satu faktor penting yang mempengaruhi durabilitas dan kekuatan beton tersebut. Pengujian porositas pada beton terbagi menjadi dua jenis pengujian yaitu pori terbuka dan pori tertutup. Pengujian porositas pori terbuka dilakukan untuk mengetahui prosentase pori yang bersifat permeable atau dengan kata lain pori tersebut dapat ditembus udara maupun air. Pori terbuka sangat mempengaruhi kondisi durabilitas beton karena semakin besar prosentase pori terbuka maka beton dapat dikatakan beton dalam kondisi yang lebih keropos sehingga dapat membuat zat-zat agresif dan air lebih cepat masuk ke dalam beton.

Sedangkan pengujian porositas untuk pori tertutup dilakukan untuk mengetahui prosentase pori yang bersifat impermeable atau pori yang tidak dapat ditembus udara maupun air. Pori tertutup pada dasarnya dapat meningkatkan kuat tekan beton karena adanya tekanan hidrostatis yang dapat mencegah beton dari terjadinya retak. Pengujian porositas dilakukan pada sampel dengan *exposed condition* yang berbeda-beda. Pengujian porositas dilakukan pada beton yang berumur 28 hari (1 bulan), dua, empat, enam dan sebelas bulan. Tabel 4.11 hingga Tabel 4.13 menunjukkan hasil pengujian porositas untuk sampel dengan *exposed condition* yang berbeda-beda.

Tabel 4.11 Hasil Pengujian Porositas Beton yang mengalami Siklus 1 Jam Basah dan 7 Jam Kering

Parameter	Umur Sampel (Bulan)				
	1	2	4	6	11
μ (gr)	13.450	14.700	14.700	14.900	14.870
Mh (gr)	22.800	25.100	25.300	25.400	25.350
Mo(gr)	21.500	23.500	23.500	23.500	23.400
mo(gr)	21.400	23.500	22.500	22.400	22.500
Vo(gr)	7.900	8.500	8.150	7.950	8.050
r	2.709	2.765	2.761	2.818	2.795
α	2.299	2.260	2.217	2.238	2.233
Porositas Total [Pt (%)]	15.113	18.269	19.696	20.568	20.115
Porositas Terbuka [Po (%)]	13.904	15.385	16.981	18.095	18.607
Porositas Tertutup [Pf (%)]	1.209	2.885	2.715	2.472	1.508

Tabel 4.11 menunjukkan nilai porositas terbuka dan tertutup untuk sampel yang mengalami kondisi satu jam basah dan tujuh jam kering. Dapat dilihat bahwa nilai

porositas terbuka dan tertutup mengalami kenaikan dari bulan pertama ke bulan kedua. Seperti yang telah dipaparkan di awal sub bab bahwa kenaikan nilai porositas tertutup mengindikasikan adanya kenaikan kuat tekan pada sampel. Sedangkan setelah bulan kedua hingga bulan ke 11 nilai porositas tertutup mengalami penurunan seiring dengan menurunnya kuat tekan. Sedangkan porositas terbuka cenderung mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya waktu paparan. Semakin lama waktu paparan maka akan semakin banyak larutan NaCl yang masuk ke dalam beton. Seiring dengan kondisi tersebut maka porositas terbuka dari beton semakin besar. Hal yang sama juga dapat terlihat pada Tabel 4.12 yang menunjukkan nilai porositas untuk beton yang mengalami siklus tiga jam basah dan lima jam kering.

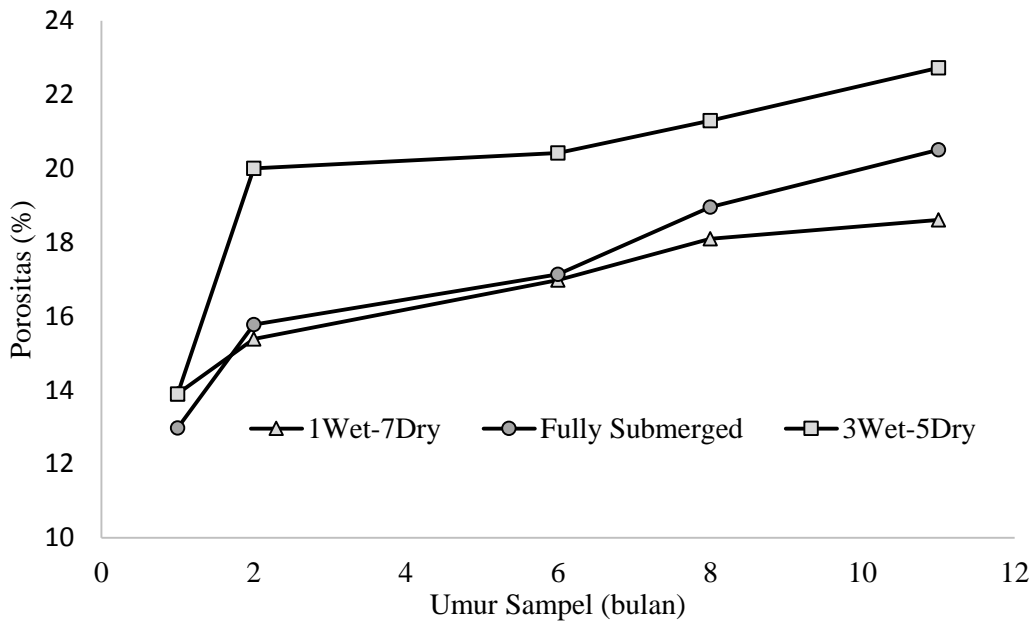
Tabel 4.12 Hasil Pengujian Porositas Beton yang mengalami Siklus 3 Jam Basah dan 5 Jam Kering

Parameter	Umur Sampel (Bulan)				
	1	2	4	6	11
μ (gr)	13.440	14.700	14.680	14.900	14.900
Mh (gr)	22.800	25.700	25.700	25.700	25.900
Mo(gr)	21.500	23.500	23.450	23.400	23.400
mo(gr)	21.400	23.500	22.500	22.400	22.500
Vo(gr)	7.900	8.500	8.150	7.950	8.050
r	2.709	2.765	2.761	2.818	2.795
α	2.297	2.136	2.128	2.167	2.127
Porositas Total [Pt (%)]	15.204	22.727	22.921	23.103	23.891
Porositas Terbuka [Po (%)]	13.889	20.000	20.417	21.296	22.727
Porositas Tertutup [Pf (%)]	1.315	2.727	2.504	1.806	1.164

Tabel 4.13 Hasil Pengujian Porositas Beton yang mengalami Siklus *Fully Submerged*

Parameter	Umur Sampel (Bulan)				
	1	2	6	8	11
μ (gr)	13.450	14.690	14.600	14.850	14.870
Mh (gr)	22.700	25.150	25.280	25.400	25.600
Mo(gr)	21.500	23.500	23.450	23.400	23.400
mo(gr)	21.400	23.500	22.500	22.400	22.500
Vo(gr)	7.900	8.500	8.150	7.950	8.050
r	2.709	2.765	2.761	2.818	2.795
a	2.324	2.247	2.196	2.218	2.181
Porositas Total [Pt(%)]	14.196	18.738	20.467	21.280	21.976
Porositas Terbuka [P0(%)]	12.973	15.774	17.135	18.957	20.503
Porositas Tertutup [Pf(%)]	1.223	2.964	3.332	2.323	1.473

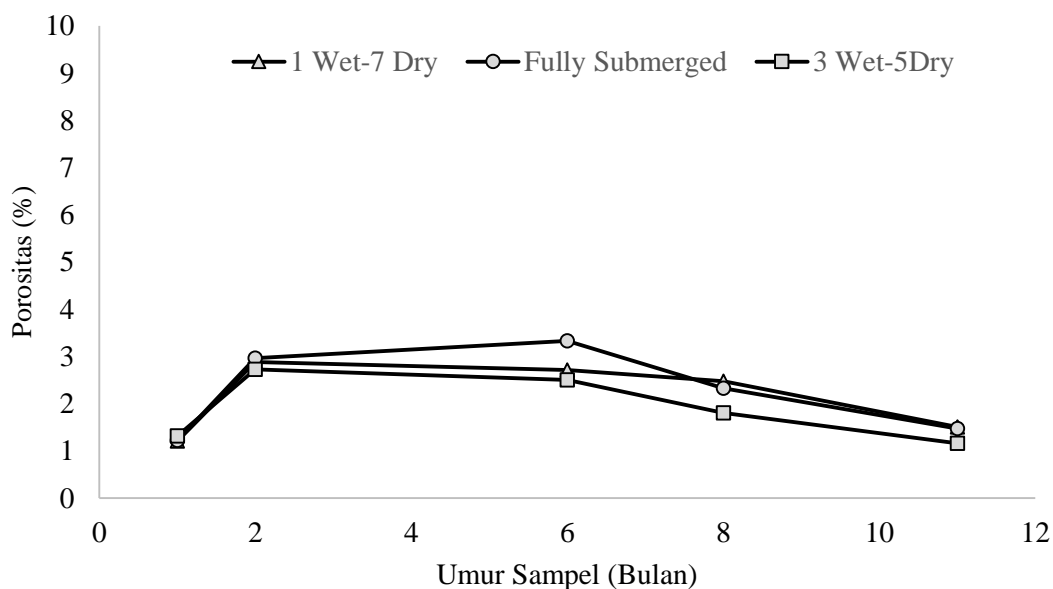
Untuk beton yang berada pada kondisi *fully submerged*, terdapat sedikit perbedaan pada nilai porositas tertutup. Nilai porositas tertutup masih mengalami kenaikan dari bulan pertama hingga bulan ke-enam seperti ditunjukkan pada Tabel 4.13. Hal ini sesuai dengan kenaikan nilai kuat tekan yang ditunjukkan oleh Tabel 4.7 Nilai porositas terbuka pada beton dengan kondisi *fully submerged* juga menunjukkan kenaikan sama seperti beton yang mengalami siklus basah dan kering.



Gambar 4.1. Perbandingan Nilai Porositas Terbuka untuk Tiga Tipe Sampel

Gambar 4.1 menunjukkan perbandingan nilai porositas terbuka dari ketiga jenis sampel. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa perhitungan nilai porositas terbuka dilakukan untuk mengetahui prosentase pori yang bersifat *permeable* atau dengan kata lain pori tersebut dapat ditembus udara maupun air. Berdasarkan gambar tersebut terlihat pada bulan pertama atau sebelum beton terekspos dengan larutan NaCl, semua benda uji memiliki nilai porositas terbuka yang hampir sama yakni berkisar antara 12% hingga 13%. Akan tetapi seiring dengan bertambahnya waktu nilai porositas terbuka semakin meningkat. Hal ini dikarenakan semakin banyaknya air dan senyawa lain yang masuk kedalam beton sehingga menyebabkan terbukanya pori dari beton sehingga nilai porositas terbukanya juga semakin besar. Sampel yang mengalami perlakuan tiga jam basah dan lima jam kering memiliki nilai porositas yang paling besar mulai dari awal pengujian hingga akhir. Sedangkan sampel dengan perlakuan *fully submerged* memiliki

nilai yang paling rendah di awal pengujian. Akan tetapi satu bulan setelah terpapar larutan NaCl, dimana usia beton saat itu adalah dua bulan, nilai porositasnya terus meningkat hingga mendekati nilai porositas sampel dengan perlakuan 3 jam kering dan 5 jam basah. Selain itu, sampel dengan perlakuan 3 jam basah dan 5 jam kering memiliki nilai porositas terbuka yang paling rendah selama rentang waktu pengujian yakni mulai bulan ke dua hingga bulan ke sebelas. Hal ini dikarenakan karena kurangnya waktu basah yang diterima sehingga peningkatan nilai porositas terbuka dari beton masih lebih kecil bila dibandingkan dengan sampel lainnya.



Gambar 4.2. Perbandingan Nilai Porositas Tertutup untuk Tiga Tipe Sampel

Selain porositas terbuka terdapat pula porositas tertutup yang mempengaruhi properties dari beton. Pengujian porositas tertutup bertujuan untuk mengetahui prosentase pori yang bersifat *impermeable* atau pori yang tidak dapat ditembus udara maupun air. Keberadaan pori ini sangat mempengaruhi kekuatan beton. Semakin besar nilai porositas tertutup maka semakin besar pula kuat tekan beton tersebut. Pada Gambar 4.2 diatas dapat dilihat bahwa hingga bulan ke dua semua sampel masih mengalami kenaikan nilai porositas terbuka. Kenaikan nilai porositas terbuka ini juga diikuti dengan kenaikan kuat tekan seperti ditunjukkan pada Tabel 4.8. Kenaikan nilai porositas tertutup yang diikuti dengan bertambahnya kuat tekan beton disebabkan oleh terbentuknya *chloroaluminates* dalam jumlah tertentu yang menyebabkan pori yang kosong terisi oleh kristal

chloroalumintates sehingga peningkatan kuat tekan pun terjadi. Namun, seiring dengan bertambahnya waktu, nilai porositas mulai mengalami penurunan yang juga diikuti dengan penurunan kuat tekan beton. Hal ini disebabkan oleh penambahan jumlah *chloroaluminates* yang terbentuk sehingga pori-pori yang sebelumnya masih bisa menahan tekanan *chloroaluminates* mulai terdesak dan menyebabkan retak pada beton. retak mikro yang terbentuk pada beton tentunya akan menyebabkan menurunnya kekuatan beton yang ditunjukkan oleh penurunan nilai kuat tekan.

4.4.4 Koefisien Difusi

Koefisien difusi menunjukkan kecepatan penetrasi ion klorida ke dalam beton. Perhitungan koefisien difusi dilakukan setelah pengukuran *charge passed* dilakukan selama enam jam. Perhitungan dilakukan dengan cara mengukur konsentrasi klorida yang terdapat pada permukaan beton dan pada jarak ± 1 cm dari permukaan beton. Tabel 4.14 berikut menunjukkan hasil dari perhitungan uji kecepatan penetrasi klorida.

Tabel 4.14. Hasil Perhitungan Uji Kecepatan Penetrasi ion Klorida

No Sampel	Co	Cd	T	RTL/ZFU	xd	t	a	D
	(%)	(%)	(K)		(m)	(dt)		(m ² /dt)
1	0.1083	0.0083	303	2.17E-05	0.01	21600	0.0494	5.08E-12
2	0.1194	0.0114	303	2.17E-05	0.01	21600	0.0474	5.28E-12
3	0.1083	0.0083	303	2.17E-05	0.01	21600	0.0487	5.15E-12
Rata-rata								5.17E-12

Pengujian koefisien difusi dilakukan terhadap tiga buah sampel. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan didapatkan rata-rata koefisien difusi sebesar 5.17×10^{-12} m²/dt. Nilai koefisien difusi ini digunakan sebagai data awal untuk dimasukkan ke dalam model prediksi yang dikembangkan.

BAB 5

PENGUJIAN KOROSI DENGAN METODE GALVANOSTATIK DAN *WETTING AND DRYING*

5.1 Umum

Pada bab ini akan dilakukan pembahasan terkait dengan pengujian korosi dengan menggunakan dua buah metode yakni metode galvanostatik dan metode *wetting and drying*. Metode galvanostatik digunakan untuk mengamati keretakan yang terjadi pada beton bertulang sedangkan metode *wetting and drying* digunakan untuk mengamati proses transport klorida akibat adanya mekanisme siklus basah dan kering pada beton.

5.2 Pengujian Korosi Metode Galvanostatik

Pengujian korosi dengan metode galvanostatik dilakukan untuk mengamati proses keretakan beton karena korosi. Karat merupakan produk hasil dari proses korosi. Karat yang terbentuk disepanjang perimeter tulangan dan menimbulkan beban *pressure* pada beton. Ketika beban tersebut telah menghasilkan tegangan yang melebihi dari tegangan tarik dari beton tersebut maka keretakan akan terjadi.

Pengujian dengan metode galvanostatik ini dipilih karena metode ini dapat mempercepat proses korosi. Metode ini merupakan suatu teknik mempercepat proses korosi dengan memberikan *electrochemical potential* pada baja tulangan. Korosi pada dasarnya merupakan suatu permasalahan durabilitas dimana proses ini membutuhkan waktu lama untuk terjadi hingga menimbulkan keretakan pada beton bertulang. Dengan metode ini pengamatan terhadap retak yang terjadi dapat dilakukan dengan lebih cepat sebagai efek dari proses korosi yang dipercepat.

5.2.1 Persiapan Benda Uji

Benda uji yang digunakan dalam pengujian ini adalah benda uji kubus berukuran 150 x 150 x 150 mm. Beton yang digunakan dalam pengujian memiliki kuat tekan 31.42 MPa. Tulangan berdiameter 19 mm ditanam pada bagian tengah dengan kedua sisi tulangan tersebut menonjol keluar. Nilai dari *corrosion current density* sebenarnya dari baja tulangan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut

$$i_{corr} = \frac{27(1-\frac{w}{c})^{-1.64}}{dc} \quad (5.1)$$

Berdasarkan persamaan tersebut nilai *corrosion current density* tergantung pada kualitas beton yang dalam perumusan tersebut dicerminkan dengan penggunaan variable $\frac{w}{c}$ yaitu faktor air semen beton dan d_c yaitu ketebalan selimut beton. Untuk penelitian ini didapatkan nilai i_{corr} sebesar $2.01 \mu A/cm^2$. Berdasarkan nilai *corrosion current density* yang telah didapatkan maka nilai *corrosion rate* dari tulangan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berdasarkan hukum Faraday berikut ini.

$$CR = K \frac{ai_{corr}}{nD} \quad (5.2)$$

Dimana:

CR	= Corrosion Rate (mm/year)
K	= Faktor konstant (K=0.00327 mm/year)
a	= Berat atom dari baja tulangan
i_{corr}	= Corrosion current density ($\mu A/cm^2$)
n	= Elektron valensi dari baja tulangan (n=2)
D	= Density tulangan (g/cm^2)

Dengan menggunakan persamaan 5.2 diatas maka didapatkan nilai *corrosion rate* sebenarnya dari baja tulangan adalah sebesar 0.02335 mm/year.

Untuk mempercepat proses korosi yang terjadi, serangkaian eksperimental dengan metode galvanostatik dilakukan. Proses pengujian korosi dipercepat dilakukan dengan merendam beton pada larutan NaCl 5% selama hampir satu bulan untuk melihat *response* beton tersebut mulai awal hingga terjadi retak. Untuk mempercepat proses korosi beton dialiri arus dengan menggunakan arus DC sebesar 0.03 A. Dengan menggunakan perumusan yang ada pada ASTM G102-89 maka nilai *corrosion current density* yang digunakan dapat dihitung sebagai berikut:

$$i_{corr} = \frac{I_{corr}}{A} \quad (5.3)$$

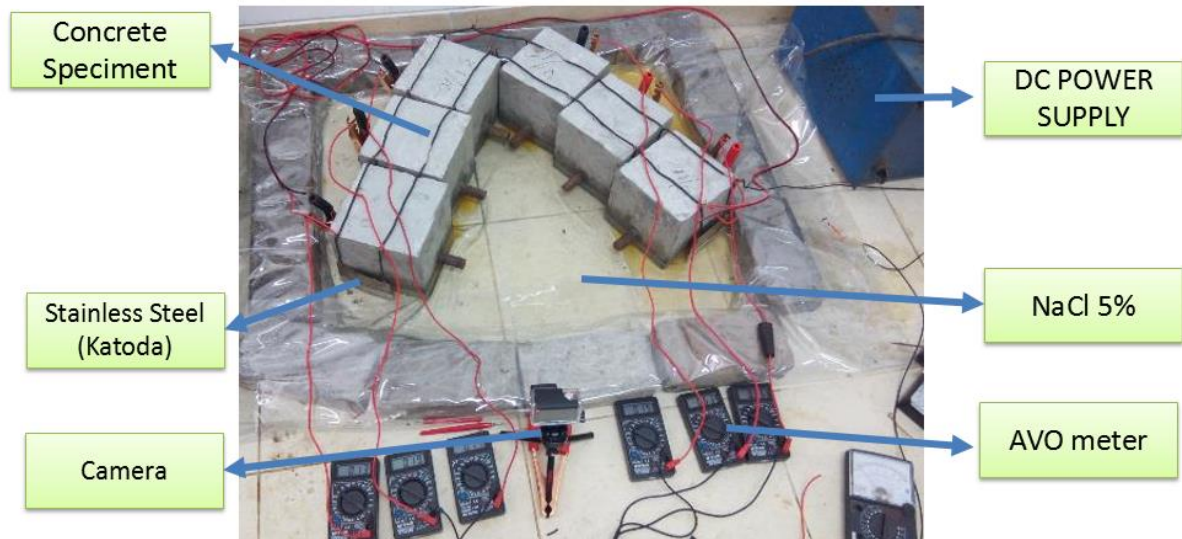
Dimana:

i_{corr}	: Kerapatan arus ($\mu A/cm^2$)
I_{corr}	: Total <i>current</i> (μA)
A	: Luas penampang tulangan (cm^2)

Berdasarkan eksperimen didapatkan

I_{corr}	= 0.03 A = 30 mA
A	= $2\pi d + 2\pi r t = 161.082 cm^2$
i_{corr}	= $0.19 mA/cm^2 = 190 \mu A/cm^2$

Dengan menggunakan metode dipercepat maka nilai *corrosion rate* beton saat percepatan dapat dihitung dengan menggunakan perumusan 5.3. Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan nilai *corrosion rate* dari tulangan meningkat menjadi 2.207 mm/year. Gambar 5.1 berikut ini menunjukkan skema pengujian korosi untuk metode galvanostatik. Pengujian korosi dilakukan selama kurang lebih satu bulan untuk mendapatkan data proses korosi yang terjadi serta keretakan akibat korosi.



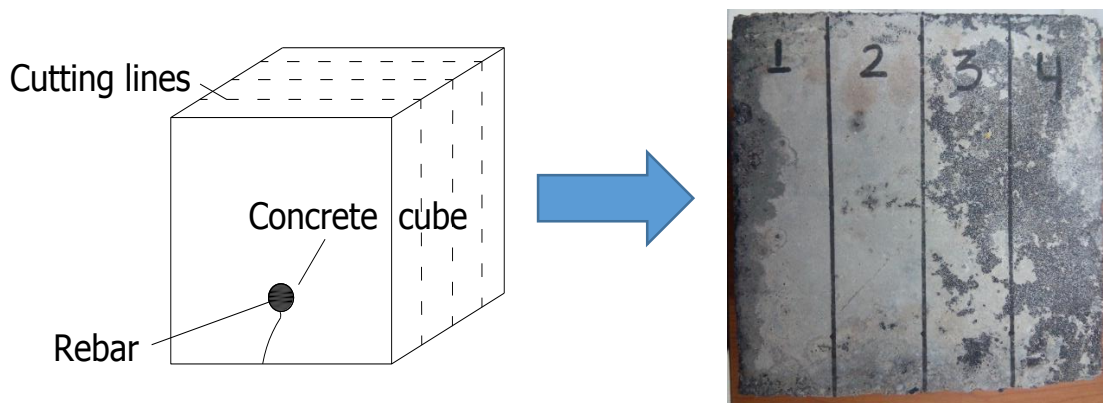
Gambar 5.1 Skema Pengujian Korosi dengan Metode Galvanostatik

5.2.2 Hasil Eksperimental

Pengujian korosi dengan metode Galvanostatik telah dilakukan untuk mempercepat proses korosi pada beton bertulang. Eksperimental ini dilakukan untuk melihat proses keretakan yang terjadi akibat adanya korosi. Berdasarkan hasil pengamatan dapat dilihat bahwa korosi yang terjadi tidak seragam disepanjang perimeter tulangan. Pada sub bab berikutnya akan diperlihatkan hasil pengamatan visual serta hasil analisa dari kegiatan eksperimental yang telah dilakukan.

5.2.2.1 Pengamatan Visual

Pengamatan terhadap keretakan dilakukan secara visual dan dengan bantuan *hand microscope* untuk menentukan lebar dan pola keretakan yang terjadi. Benda uji yang telah diuji korosi dipotong menjadi 4 bagian yang identik, seperti ditunjukkan oleh Gambar 5.2 untuk diamati keretakan yang terjadi.



Gambar 5.2 Skema Pemotongan Sampel untuk Pengamatan Proses Korosi dan Keretakan

Dilakukan pengamatan secara visual terhadap benda uji yang telah direndam. Pengamatan visual terhadap benda uji pada hari pertama diunjukkan oleh Gambar 5.3.



Gambar 5.3 Pengamatan Kondisi Visual Pengujian Korosi Metode Galvanstatik Hari Pertama

Berdasarkan hasil pengamatan visual dapat dilihat bahwa dalam beberapa jam korosi mulai terinisiasi namun dalam rate yang cukup kecil sehingga belum terlihat adanya perubahan warna yang signifikan pada tulangan. Perubahan warna terjadi pada titik-titik tertentu yaitu pada bagian tulanga yang terhubung langsung dengan penjepit.

Pengamatan visual dilanjutkan pada hari kedua dengan mulai melakukan pemotongan pada sampel beton. Sampel dipotong menjadi empat bagian yang sama ke arah penampang. Gambar 5.4 menunjukkan hasil pengamatan visual dari benda uji yang telah diuji korosi selama dua hari.



Gambar 5.4 Pengamatan Kondisi Visual Pengujian Korosi Metode Galvanostatik Hari Kedua

Berdasarkan pengamatan pada hari kedua dapat dilihat bahwa proses korosi telah mulai terinisiasi. Retak juga mulai terlihat pada *interface* antara beton dan tulangan dan mulai merambat pada *interface* antara agregat kasar. Pada hari ke-4, terjadi penumpukan korosi pada bagian tulangan yang mengalami kontak langsung dengan penjepit yang mengalirkan arus. Retak pada hari keempat ini ditunjukkan pada Gambar 5.5. Fenomena ini dikarenakan korosi relatif lebih cepat terjadi pada bagian tulangan yang kontak langsung dengan penjepit yang berfungsi sebagai konektor arus. Pengamatan visual pada bagian dalam tulangan juga dilakukan. Pada pengamatan ini ditemukan bahwa retak sudah mulai berpropagasi ke arah permukaan beton yang terpapar klorida. Selain itu retak-retak mikro juga mulai terlihat pada *interface* baja dan beton di sekitar retak utama.



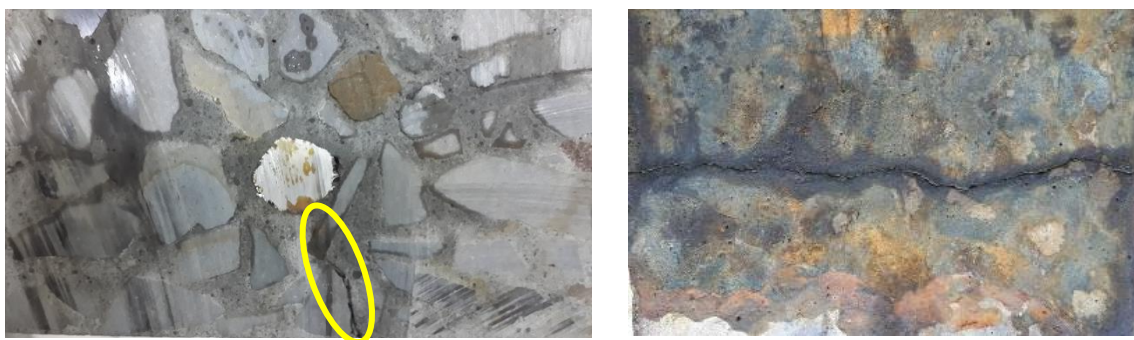
Gambar 5.5 Pengamatan Kondisi Visual Pengujian Korosi Metode Galvanstatik Hari Keempat

Pada hari ke enam retak terlihat mengalami penambahan panjang dan lebar. Retak yang terjadi sudah berpropagasi di sepanjang selimut beton hingga mencapai permukaan beton. Selain itu, retak disekitar retak utama juga mulai terinisiasi. Berdasarkan pengukuran yang dilakukan, lebar retak minimum yang terjadi adalah sebesar 0.05 mm dan lebar retak maksimum yang terjadi adalah 0.4 mm. Gambar 5.6 menunjukkan keretakan yang terjadi pada hari keenam.



Gambar 5.6. Keretakan yang terjadi pada Hari Ke-6 (Hasil eksperimental)

Pada hari ke 10 korosi yang terjadi semakin parah. Hal ini terlihat dengan adanya penumpukan korosi pada kolam perendaman. Retak arah longitudinal juga sudah semakin terlihat. Lebar retak minimum adalah sebesar 0.1 mm yang terjadi pada permukaan beton dan retak maksimum yang terjadi pada *interface* beton dan tulangan adalah sebesar 1 mm. Berikut ini adalah hasil pengamatan visual dari keretakan pada hari ke 10



Gambar 5.7 Retak Longitudinal pada hari ke 10

Pada hari ke 15 retak sudah mulai membesar. Karat yang terbentuk sudah mulai mengisi bagian beton yang mengalami retak. Lebar retak minimum yang terjadi pada hari

ke 15 adalah 0.3 mm yang terjadi pada permukaan beton dan retak maksimum adalah 1.3 mm. Gambar 5.7 menunjukkan visualisasi hasil keretakan yang terjadi.

Gambar 5.9 menunjukkan retak pada hari ke-20. Pada hari ke 20 *crack* menunjukkan pertambahan lebar. Selain itu terdapat retak sekunder juga mulai terjadi pada bagian lain pada beton. Lebar retak minimum yang terjadi adalah sebesar 0.5 mm yang terjadi pada permukaan dan *crack* maksimum adalah 1.6 mm yang terjadi pada interface antara beton dan tulangan.



Gambar 5.8 Retak pada penampang hari ke 15



Gambar 5.9 Retak pada penampang hari ke 20

Pada hari ke 24 retak yang terjadi semakin parah seperti diperlihatkan oleh Gambar 5.10. Pada hari ke 24 retak minimum yang terjadi adalah 0.6 mm dan retak maksimum yang terjadi adalah 2.5 mm. Pada periode ini, lekatan pada beton dan tulangan jauh berkurang bila dibandingkan dengan hari-hari sebelumnya. Hal ini menyebabkan ketika beton akan dipotong, beton telah lepas dari bagian tulangnya terlebih dahulu sehingga tidak dapat dipotong dan dilakukan analisa.



Gambar 5.10 Retak pada Hari ke 24

Pengamatan juga dilakukan terhadap pola keretakan ke arah memanjang pada tulangan. Hal ini dilakukan untuk mengetahui keseragaman persebaran retak ke arah memanjang dari tulangan. Pengamatan dilakukan terhadap empat bagian dari benda uji dengan memotongnya ke dalam empat bagian yang sama. Gambar 5.11 menunjukkan hasil pengamatan pola keretakan pada hari ke 15.



Bagian 1



Bagian 2



Bagian 3



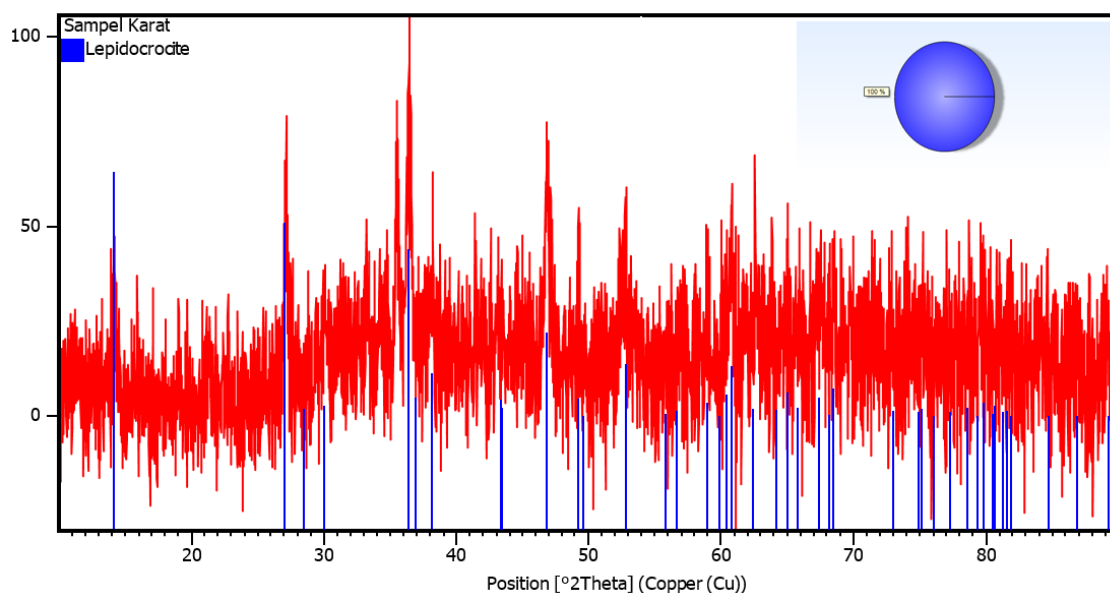
Bagian 4

Gambar 5.11. Pola Keretakan Beton Pada Hari ke-15

Berdasarkan pengamatan pola keretakan pada hari ke-15 dapat dilihat bahwa retak berpropagasi ke arah yang sama pada keempat bagian dari benda uji. Pola keretakan tidak persis sama pada keempat bagian dikarenakan posisi agregat yang berbeda-beda pada setiap bagian. Retak selalu terjadi pada bagian telemah dari beton dimana bagian tersebut adalah *interface* antara agregat dan mortar. Pada suatu campuran beton, persebaran agregat selalu terjadi secara random. Oleh karena itu, pola keretakan pada suatu sampel beton bertulang tidak akan bisa sama satu dengan yang lainnya. Akan tetapi bila ditinjau secara umum, retak berpropagasi pada arah yang sama yaitu ke arah kanan dari benda uji.

5.2.2.2 Analisa Produk Korosi

Pada proses korosi, karat merupakan produk korosi yang selalu terbentuk sebagai dari hasil dari proses *electrochemical reaction*. Produk korosi yang terbentuk dari proses *electrochemical analysis* pada dasarnya berbeda-beda. Perbedaan karakteristik karat ini akan mempengaruhi besarnya *expansive pressure* yang dihasilkan. Oleh karena itu analisa terhadap produk korosi yang terbentuk penting untuk dilakukan karena berkaitan dengan proses yang terjadi selanjutnya. Analisa XRD dipilih untuk mengetahui jenis produk korosi yang terbentuk dengan mengetahui jenis produk korosi yang terbentuk. Produk korosi dipisahkan dari baja tulangan dan disiapkan untuk pengetesan XRD. Hasil XRD diperlihatkan pada Gambar 5.12.



Gambar 5.12. Hasil XRD Produk Korosi

Berdasarkan hasil analisa dapat diketahui bahwa jenis karat yang terbentuk pada adalah *Lepidocrocite* yang merupakan bentuk *anhydrous* dari *iron (III) oxide-hydroxide* [Fe(OH)₃]. Senyawa ini terbentuk karena adanya reaksi antara ion Fe²⁺ dan oksigen dan air.



Ferrous Hydroxide atau Fe(OH)₂ merupakan bentuk awal senyawa hasil korosi akan berada di permukaan baja yang mengalami korosi. Semakin lama senyawa ini akan bereaksi dengan oksigen dan air dan menghasilkan senyawa Fe(OH)₃ yang berwarna cokelat kemerahan.

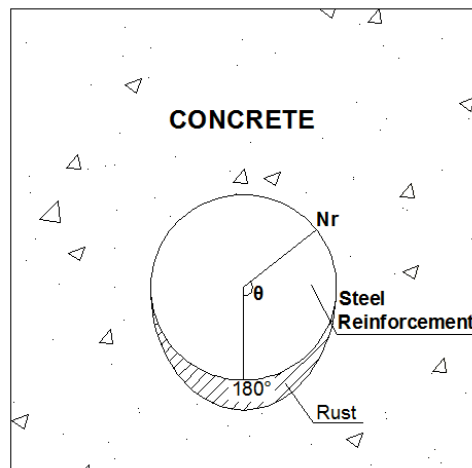


Dengan diketahuinya jenis produk korosi yang terbentuk maka berdasarkan Gambar 2.6 dan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya maka didapatkan properties dari karat tersebut seperti yang diperlihatkan pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1 *Properties* Produk Korosi (Karat)

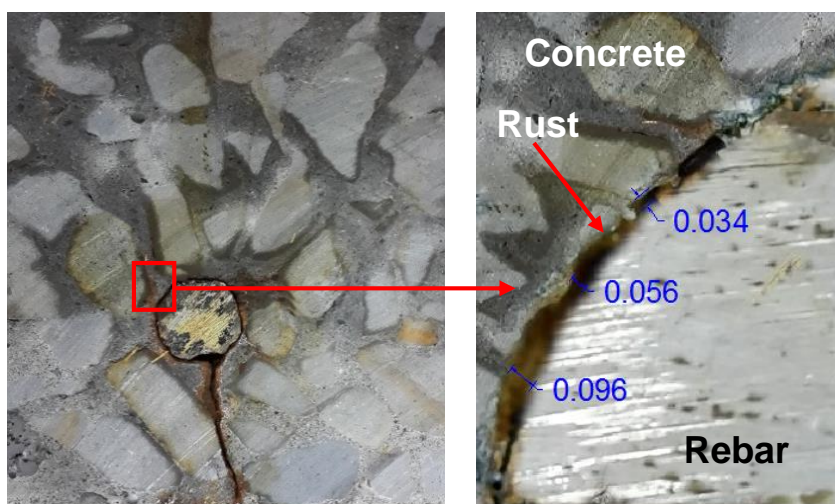
Properties	Value	Satuan
<i>Rust Type</i>	Fe(OH) ₃	
<i>Expand ratios of the original metals</i>	4.3	
<i>Density</i>	4.25	g/cm ³

Perimeter tulangan dibagi menjadi beberapa bagian sesuai dengan polar koordinatnya. Ilustrasi polar koordinat yang digunakan diperlihatkan pada Gambar 5.13. *Nr* adalah ketebalan karat secara tidak merata di sepanjang perimeter tulangan dengan θ adalah sudut polar koordinat. Bagian yang paling paling dekat dengan paparan, yakni di permukaan bagian bawah dari beton, memiliki nilai θ sebesar 180°.



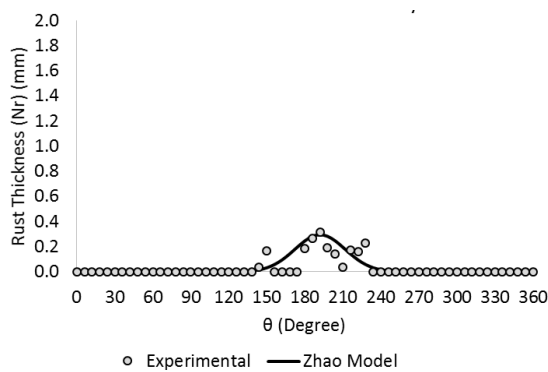
Gambar 5.13 Polar Koordinat untuk Plotting Distribusi Karat

Distribusi karat di sepanjang perimeter tulangan juga diamati dalam penelitian ini. Pengamatan dilakukan dengan menggunakan *digital photographic measurement* untuk mendapatkan data ketebalan karat di sepanjang perimeter tulangan. Pengambilan gambar dilakukan dengan menggunakan *hand microscope* untuk mendapatkan perbesaran yang diinginkan. Pengambilan Teknik pengambilan gambar diperlihatkan pada Gambar 5.14. Setelah itu gambar diproses dengan menggunakan *drawing software* untuk mendapatkan dimensi dari karat yang terbentuk. Hasil dari pengukuran ini di plot ke dalam grafik yang ditunjukkan pada Gambar 5.15.

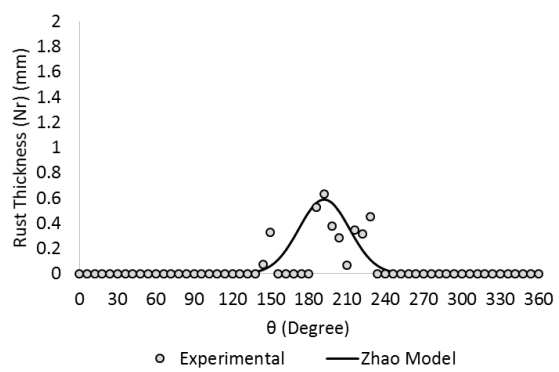


Gambar 5.14 Teknik Pengukuran Ketebalan Karat

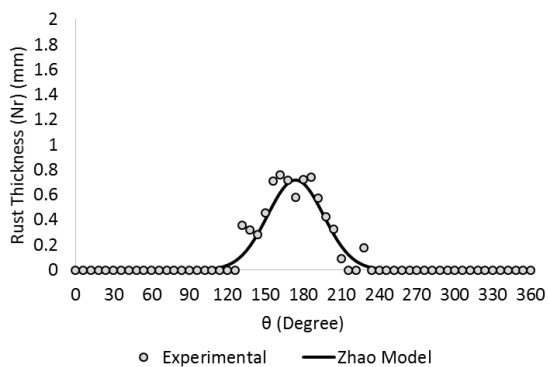
Selain pengambilan data dari hasil eksperimental, analisa dengan menggunakan pendekatan model Gaussian yang dilakukan oleh Zhao et al, 2011 juga dilakukan. Perumusan yang dikemukakan oleh Zhao et al merupakan suatu perumusan yang digunakan untuk mengidealisasi kurva persebaran karat yang tidak merata di sepanjang perimeter tulangan. Nilai yang digunakan dalam perumusan yang dikeluarkan oleh Zhao et al didapatkan dari hasil pengukuran eksperimental. Dengan menggunakan perumusan ini, maka didapatkan distribusi karat disepanjang perimeter tulangan sesuai dengan data persebaran karat yang ada. Perimeter tulangan dibagi menjadi beberapa zona seperti yang telah dijelaskan pada paragraf sebelumnya untuk melihat distribusi ketebalan karat pada setiap zona dan menunjukkan ketidakseragaman distribusi karat disepanjang perimeter tulangan. Berdasarkan pembagian perimeter tulangan tersebut maka distribusi tebal produk korosi yang telah dianalisa dengan menggunakan Gaussian Method ditunjukkan pada Gambar 5.15.



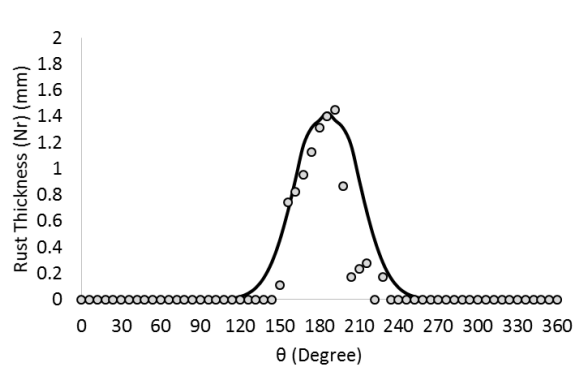
Hari Ke-4



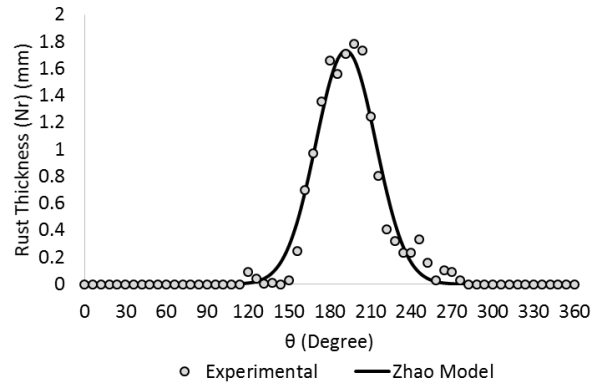
Hari Ke-6



Hari Ke-10



Hari Ke-15



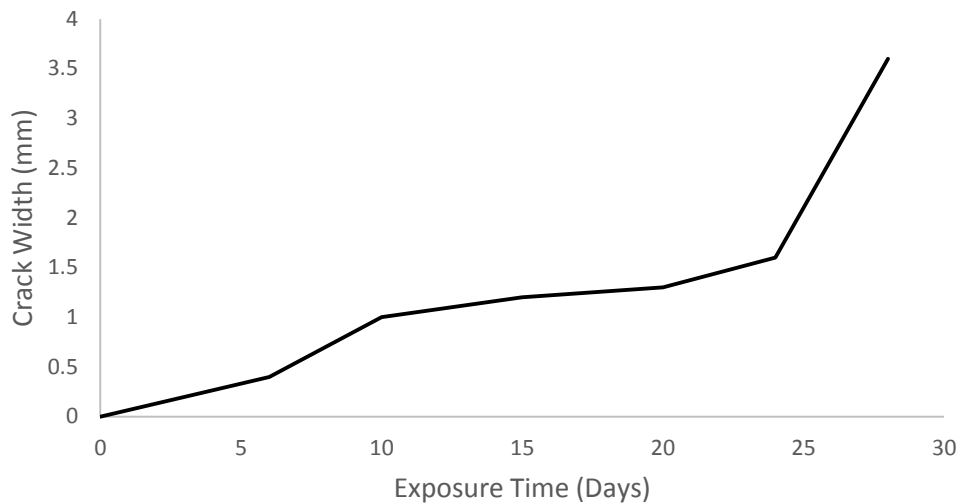
Hari Ke-20

Gambar 5.15 Normalisasi Distribusi Tebal Produk Korosi

Dapat dilihat bahwa ketebalan produk korosi terus bertambah seiring dengan bertambahnya waktu perendaman. Lapisan karat yang terbentuk tidak merata disepanjang perimeter tulangan. Bagian yang paling dekat dengan *exposed surface* memiliki ketebalan karat yang paling besar bila dibandingkan dengan bagian lainnya. Dapat dilihat pula dari plotting grafik hasil eksperimental, puncak dari kurva tidak berada tepat pada sudut 180° . Hal ini disebabkan karena karat lebih cepat terjadi pada bagian ulir dan setiap benda uji memiliki letak ulir yang tidak sama satu dengan yang lainnya sehingga nilai maksimum dari ketebalan karat tidak tepat terjadi pada sudut 180° .

5.2.2.3 Crack Analysis

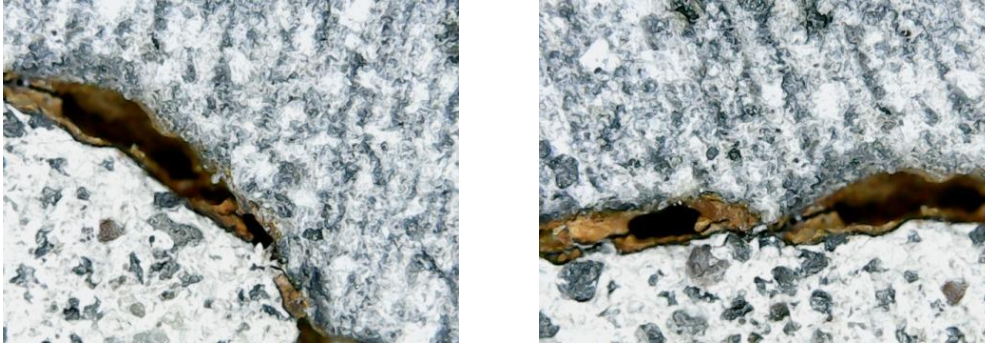
Pengamatan terhadap retak dilakukan secara visual dengan menggunakan bantuan *hand microscope*. Pengamatan dilakukan terhadap retak kearah memanjang dan melintang dari beton. Beberapa hal yang ditinjau terkait keretakan akibat korosi pada beton bertulang adalah lebar retak dan infiltrasi produk korosi kedalam retak yang terbentuk. Berdasarkan pengamatan visual retak mulai terjadi pada hari ke 2 dengan lebar retak minimum dan maksimum yang terjadi adalah sebesar 0.01 mm dan 0.05 mm. Seiring dengan bertambahnya waktu, retak yang terjadi semakin membesar dan melebar. Gambar 5.16 dibawah ini menunjukkan hubungan anatara lebar retak maksimum dengan lamanya waktu perendaman.



Gambar 5.16 Hubungan antara lebar *crack* maksimum (mm) dan waktu perendaman (hari)

Gambar 5.16 menunjukkan pada fase awal paparan, retak tumbuh dengan cepat dan mulai melambat pada hari ke-10 hingga pada hari ke 24. Hal ini disebabkan karena beton pada bagian selimut sudah mulai berada pada fase jenuh sehingga oksigen dan klorida yang terlarut pada air sangat sulit untuk masuk dan menyebabkan propagasi retak berjalan dengan relatif lebih lambat. Sedangkan pada hari ke-24 hingga ke-28 retak yang terjadi sudah semakin lebar sehingga air dapat masuk dengan lebih mudah. Hal ini menyebabkan *excessive crack* mulai terjadi sehingga pertumbuhan retak terjadi dengan sangat cepat. Selain itu karena retak yang sudah semakin parah, *spalling* mulai terjadi pada elimut sehingga beton sulit untuk dipotong dan diamati.

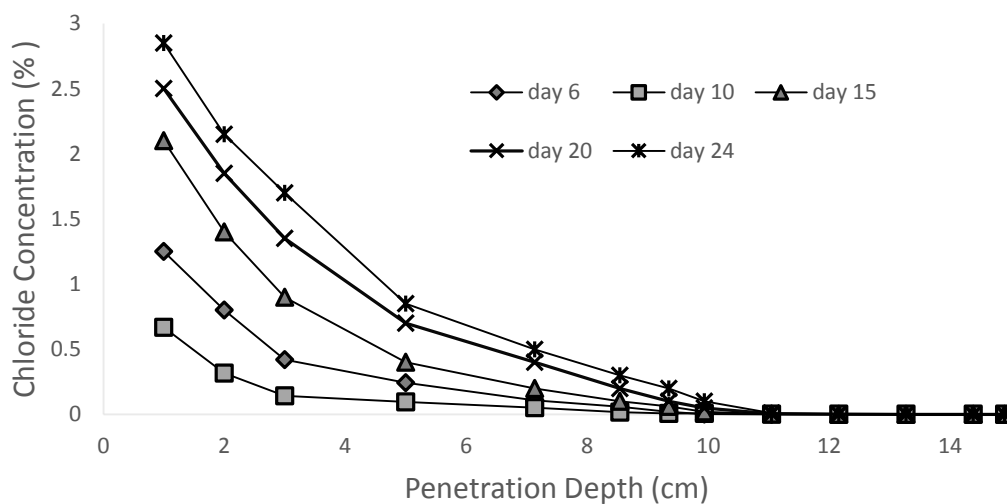
Selain pengamatan terhadap propagasi retak, pengamatan juga dilakukan terhadap infiltrasi produk korosi (karat) ke dalam celah retak yang telah terbentuk. Seiring dengan terjadinya proses keretakan, produk korosi mulai mengisi celah disepanjang retak. Gambar 5.17 berikut ini meunjukkan produk korosi yang mengisi celah-celah disepanjang retak yang terjadi. Masuknya produk korosi ke dalam celah retak semakin lama akan merembes ke luar sehingga karat akan bercampur dengan air perendaman. Hal ini menyebabkan perubahan warna pada larutan NaCl dari yang semula berwarna bening menjadi berwarna kecoklatan.



Gambar 5.17 Produk Korosi di Sepanjang Retak yang Terjadi Pada Usia 20 Hari

5.2.2.4 Chloride Profile Analysis

Analisa terhadap *chloride profile* dilakukan untuk mengetahui konsentrasi klorida pada beton. Konsentrasi klorida maksimum terletak pada bagian yang paling dekat dengan *exposed surface*. Kenaikan konsentrasi klorida terjadi mulai dari hari pertama perendaman hingga hari terakhir. Pada hari ke 24 hingga 28 jumlah *chloride* meningkat secara drastis. Hal ini terjadi karena retak yang terjadi sudah semakin besar sehingga proses masuknya *chloride* ke dalam beton semakin cepat.



Gambar 5.18 Hubungan antara Kandungan Klorida (%) dan Ketebalan Penetrasi (cm)

Gambar 5.18 diatas menunjukkan konsentrasi klorida di sepanjang *cross section* dari beton tersebut. Kedalaman diukur dari dasar beton hingga mencapai permukaan atas pada beton. Seperti yang telah diprediksikan sebelumnya bahwa beton yang berada di

bagian paling bawah, yaitu bagian yang paling dekat dengan *exposed surface*, memiliki konsentrasi klorida paling besar. Hal ini terjadi karena bagian bawah dari beton mengalami kontak langsung dengan larutan garam sehingga proses kenaikan konsentrasi terjadi dengan lebih cepat.

5.2.2.5 Reinforcement Weight Loss Analysis

Analisa terhadap berkurangnya berat tulangan dilakukan untuk mengetahui prosentase korosi yang telah terjadi. Analisa ini dilakukan dengan menimbang tulangan yang sebelum dan setelah dilakukan uji korosi. Proses pengukuran berat tulangan dilakukan sesuai dengan ASTM G1. Mechanical procedure dipilih sebagai metode yang digunakan untuk membersihkan tulangan dari karat sebelum dilakukan pengukuran berat.

Perhitungan teoritis dilakukan dengan menggunakan Hukum Faraday. Berdasarkan pada Hukum Faraday, massa dari produk korosi yang terbentuk akibat dari arus yang diberikan dapat dihitung dengan menggunakan perumusan berikut:

$$M_{th} = \frac{AIt}{ZF} \quad (5.7)$$

Dimana:

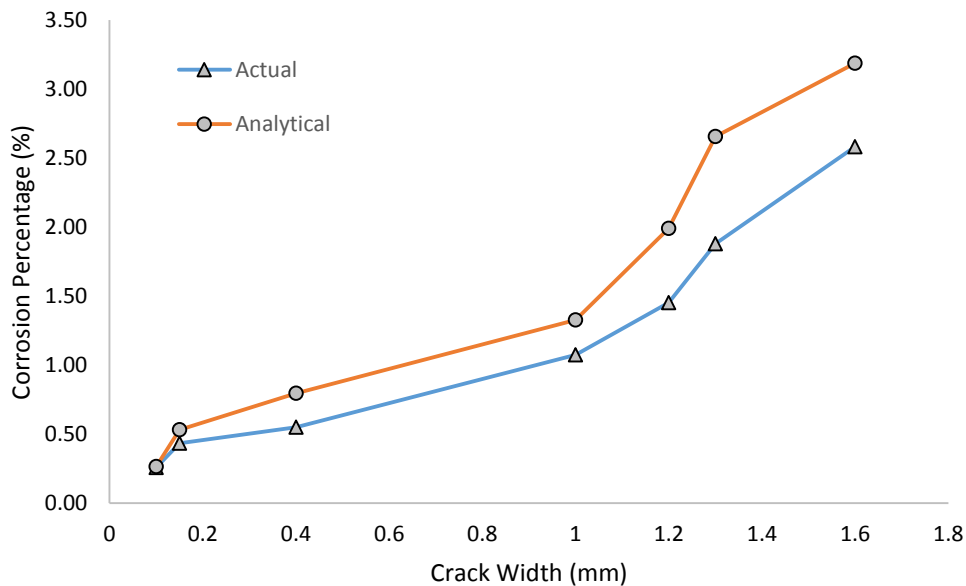
- M_{th} = Massa produk korosi teoritis (gr)
- A = Berat Atom dari Baja Tulangan (56 gr)
- Z = Elektron Valensi Baja Tulangan ($Z=2$)
- I_{app} = *Applied Current* (Amp)
- T = *Exposed Duration* (Second)
- F = Konstanta Faraday (96487 Amp-sec)

Rangkuman dari hasil pengukuran dan perhitungan secara teoritis diperlihatkan pada Tabel 5.2. Tabel 5.2 memperlihatkan bahwa terdapat sedikit perbedaan antara prosentase korosi aktual dan hasil perhitungan secara teoritis. Hal ini terjadi karena penerapan Hukum Faraday pada dasarnya adalah untuk logam yang tidak dilapisi oleh material lain. Sedangkan pada kasus ini, tulangan berada di dalam beton. Hal ini menyebabkan terdapat kemungkinan berkurangnya besaran arus yang teraplikasikan pada tulangan yang terdapat bagian dalam beton yang berakibat pada melambatnya laju korosi pada tulangan.

Tabel 5.2 *Weight Loss Analysis for Reinforcement*

<i>Exposure Time</i>	<i>Innitial Weight (Wi)</i>	<i>Weight After Corrosion (Wf)</i>	<i>Weight Loss Actual</i>	<i>Weight Loss Theoretical</i>	<i>Corrosion Percentage (Actual)</i>	<i>Corrosion Percentage (Theoretical)</i>
(Days)	(Gram)	(Gram)	(Gram)	(Gram)	(%)	(%)
2	566.594	565.125	1.469	1.504	0.26	0.27
4	566.588	564.125	2.463	3.008	0.43	0.53
6	566.595	563.474	3.121	4.512	0.55	0.80
10	566.593	560.512	6.081	7.521	1.07	1.33
15	566.589	558.359	8.230	11.281	1.45	1.99
20	566.594	555.944	10.650	15.042	1.88	2.65
24	566.593	551.963	14.630	18.050	2.58	3.19

Gambar 5.19 berikut ini menunjukkan hubungan antara prosentase korosi yang terjadi dan lebar retak. Grafik tersebut menunjukkan bahwa berdasarkan hasil pengamatan maupun perhitungan secara teoritis dapat disimpulkan bahwa lebar retak semakin bertambah sering dengan meningkatnya prosentase korosi yang terjadi. Hal ini sangat jelas karena semakin besar prosentase korosi yang dihasilkan, maka volume karat yang terbentuk akan semakin besar. Dengan meningkatnya volume karat, maka *pressure* yang terjadi pada beton juga akan semakin besar sehingga retak yang terjadi akan semakin besar.



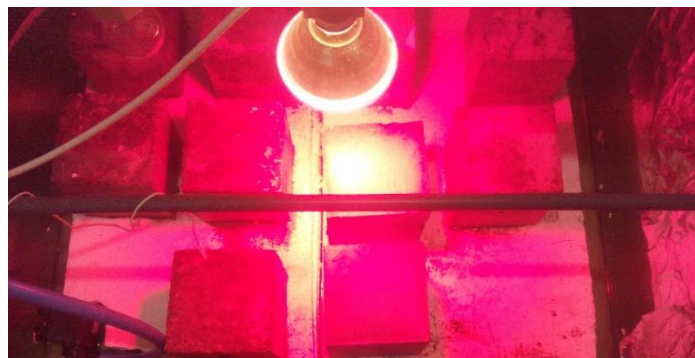
Gambar 5.19 Hubungan antara Prosentase Korosi dan Lebar Retak

5.3 Pengujian Korosi dengan Metode *Wetting and Drying*

Pengujian dengan metode siklus basah dan kering dilakukan untuk mengetahui proses masuknya ion klorida ke dalam beton akibat siklus basah dan kering. Pada kondisi lingkungan yang sebenarnya, struktur beton bertulang lebih sering berada pada kondisi non-saturated dibandingkan dengan kondisi saturated terutama ketika beton tersebut berada dalam kondisi *cyclic wetting-drying*. Berdasarkan hasil investigasi lapangan yang dilakukan oleh beberapa peneliti, struktur beton yang berada pada kondisi basah dan kering merupakan struktur yang paling rentan terhadap korosi sehingga desain yang dilakukan tidak dapat mengabaikan faktor durabilitas. Berdasarkan hal tersebut maka pada penelitian kali ini dilakukan pengujian korosi dengan metode *artificial environment*. Metode ini dilakukan dengan meletakkan sample beton bertulang pada suatu *chamber* tertutup dengan kondisi lingkungan yang dibuat sedemikian rupa untuk mendekati kondisi lingkungan yang sebenarnya.

5.3.1 Persiapan Benda Uji

Benda uji yang digunakan dalam pengujian ini adalah benda uji kubus berukuran 150 x 150 x 150 mm. Beton yang digunakan dalam pengujian memiliki kuat tekan 31,42 MPa. Tulangan berdiameter 19 mm ditanam pada bagian tengah tanpa ada bagian yang menonjol ke luar. Gambar 5.20 berikut ini adalah skema pengujian korosi dengan metode *wetting and drying*.



(a)



(b)

Gambar 5.20 Skema Pengujian Korosi dengan Metode *Wetting and Drying*

Pengujian dilakukan dengan menggunakan tiga konfigurasi siklus basah dan kering yang berbeda-beda. Konfigurasi pertama adalah dengan melakukan tiga siklus dimana satu siklus terdiri atas satu jam basah dan tujuh jam kering. Konfigurasi kedua juga terdiri atas tiga siklus dimana satu siklus terdiri atas tiga jam basah dan lima jam kering. Konfigurasi terakhir adalah untuk kondisi submerged dimana beton mengalami siklus basah selama 24 jam.

5.3.2 Hasil Eksperimental

Pengujian korosi dengan menggunakan metode siklus basah dan kering telah dilakukan untuk mensimulasikan proses masuknya ion klorida pada beton. Pada sub bab ini akan dibahas mengenai hasil dari eksperimental yang telah dilakukan.

5.3.2.1 Pengamatan Visual

Pengamatan visual dilakukan terhadap beton yang telah terpapar siklus basah dan kering. Berdasarkan hasil pengamatan visual yang telah dilakukan ditemukan bahwa pada satu bulan setelah eksperimental dimulai, terdapat lapisan garam tipis di permukaan beton seperti ditunjukkan pada Gambar 5.21.

Lapisan ini terbentuk karena pada saat proses *drying*. Pada proses ini garam yang terkandung pada larutan NaCl mengkristal akibat adanya penguapan air. Hal ini menyebabkan terbentuknya lapisan tipis pada *exposed surface*. Semakin lama beton terpapar oleh air laut dalam skema basah dan kering maka proses *spalling* mulai terjadi pada beton (Gambar 5.22) yang menyebabkan beton mengalami keropos meskipun korosi belum sampai menyebabkan keretakan pada beton di bagian dalam. Kondisi ini berbeda

dengan beton yang berada pada kondisi terendam sempurna. Beton yang berada pada kondisi ini tidak mengalami keropos pada permukaannya. Bagian permukaan beton pada kondisi basah masih dalam keadaan baik tanpa adanya lapisan kristal garam yang menempel pada permukaannya.



Gambar 5.21 Lapisan Tipis Kristal Garam yang Terbentuk di Permukaan Beton

Klorida dan karbon dioksida yang larut dalam air bereaksi dengan pasta semen dalam beton sehingga menyebabkan *calcium hydroxide* ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) yang ada pada beton larut. Kondisi ini menyebabkan terjadinya proses *leaching* yang diikuti dengan terjadinya erosi pada permukaan beton. Kontak beton dengan air laut menyebabkan proses erosi yang relative parah karena tingkat solubilitas atau kelarutan dari *calcium hydroxide* dan gipsum lebih besar di air laut dibandingkan dengan air tawar.



(a)



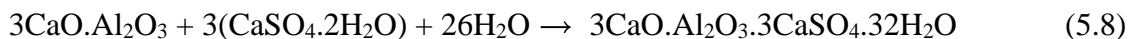
(b)

Gambar 5.22 Kondisi Permukaan Beton dengan Siklus Basah dan Kering (a) dan *Fully Submerged* (b) Pada bulan ke Lima

5.3.2.2 Pengamatan Mikrostruktur

Reaksi *chloride* dengan pasta semen yang ada di dalam beton memiliki tiga efek utama. Efek yang pertama adalah menurunkan pH beton yang berakibat pada larutnya *calcium hydroxide* dan gipsum pada beton. Seperti yang telah diketahui secara umum bahwa masuknya klorida pada beton memiliki kecenderungan untuk menurunkan pH dari beton tersebut. Peristiwa *leaching* dari *calcium hydroxide* sangat kecil ketika pH dari beton masih pada kisaran 13. Akan tetapi tingkat kelarutan dari *calcium hydroxide* akan bertambah secara drastis ketika pH dari beton mengalami penurunan. Hal ini lah yang menyebabkan proses *leaching* terjadi dengan cepat dan juga mengakibatkan erosi pada beton. Pada kegiatan eksperimental yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa proses *leaching* telah terjadi. Hal ini ditandai dengan hasil pengujian larutan yang telah digunakan. Senyawa *calcium hydroxide* ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ditemukan dalam pengujian larutan NaCl yang telah digunakan dalam eksperimen.

Selanjutnya reaksi klorida dengan *calcium sulfoaluminate* akan mengakibatkan pembentukan *chloroaluminate* yang dikenal juga dengan *Friedel's salt*. *Calcium sulfoaluminate* ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) sangat umum ditemukan pada semen portland dan berfungsi untuk mengatur hidrasi pada tahap awal, mencegah setting terlalu cepat serta meningkatkan kekuatan beton. *Calcium sulfoaluminate* merupakan senyawa hasil dari reaksi *tricalcium aluminate*, gipsum dan air seperti diperlihatkan pada reaksi berikut ini.



Reaksi diatas terjadi sangat cepat ketika semen bereaksi dengan air. Untuk beton yang terkontaminasi dengan natrium klorida (NaCl), pada tahap awal NaCl bereaksi dengan kalsium hidroksida yang berada di dalam beton dan menghasilkan kalsium klorida. Seiring dengan bertambahnya waktu paparan, kalsium klorida akan bereaksi dengan *calcium sulfoaluminate* menjadi senyawa yang memiliki bentuk menyerupai *enttrigite* yang disebut dengan *chloroaluminate* ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$). Berikut adalah reaksi pembentukan *chloroaluminates* akibat adanya kontaminasi NaCl pada Beton.



Terbentuknya *chloroaluminates* dalam jumlah yang besar dapat menyebabkan *internal pressure* pada pori beton dan megakibatkan crak mikro yang dalam jangka panjang dapat mempengaruhi *properties* dari beton seperti kuat tekan, kuat tarik dan *properties* lainnya. Pengamatan mikrostruktur dari beton dilakukan dengan menggunakan dua teknik pengamatan yakni XRF dan SEM. Pengambilan data dengan menggunakan XRF dilakukan untuk mengetahui prosentase unsur yang terkandung pada beton tersebut sedangkan SEM dilakukan untuk mengetahui kondisi mikrostruktur di dalam beton dan keberadaan senyawa *tri-chloroaluminate*. Data yang didapatkan dari hasil pengujian dengan menggunakan XRF ini adalah prosentase unsur untuk tiga buah sampel yakni sample durasi 1 jam basah dan 7 jam kering, sampel dengan durasi 3 jam basah dan 5 jam kering serta sampel dengan kondisi *fully submerged*. Berdasarkan hasil pengujian XRF, seperti diperlihatkan pada

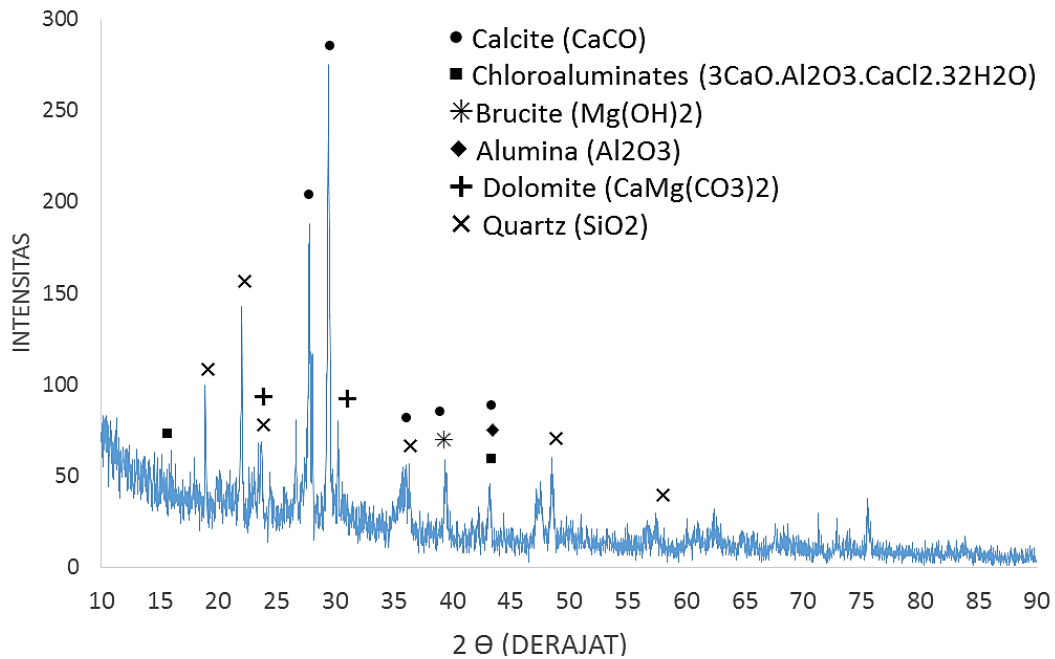
Tabel 5.3, dapat dilihat bahwa sampel dengan durasi 3 jam basah dan 5 jam kering menunjukkan prosentase klorida yang paling besar bila dibandingkan dengan dua sampel lainnya. Sedangkan sampel dengan durasi 1 jam basah dan 7 jam kering menunjukkan prosentase klorida yang paling kecil. Hal ini disebabkan oleh kurangnya waktu basah sehingga proses difusi tidak dapat terjadi dengan sempurna.

Tabel 5.3 Kandungan Unsur Hasil Pengujian XRF untuk Benda uji Pada Bulan ke Lima

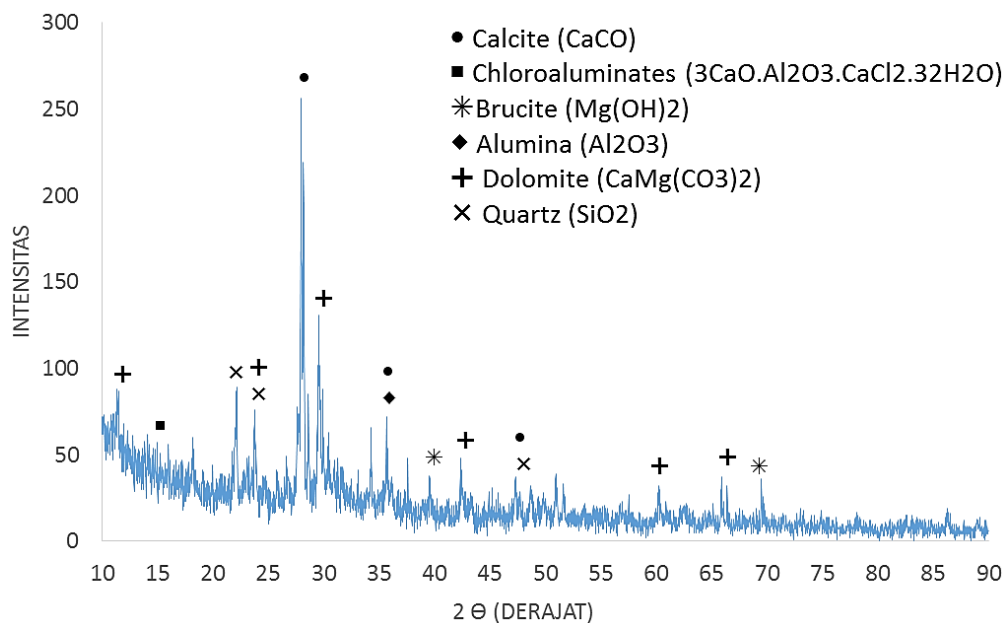
Element	3 Wet and 5 Dry	Fully Submerged	1 Wet and 7 Dry
	% Mass	% Mass	% Mass
C	5.317	5.430	4.299
O	51.263	51.190	51.393
Na	2.724	2.048	1.659
Mg	0.737	0.652	0.958
Al	5.208	4.931	6.014
Si	11.909	12.275	15.106
S	0.222	0.135	0.092
Cl	0.967	0.548	0.465
K	0.492	0.476	0.897
Ca	17.964	16.850	14.165
Fe	3.608	5.465	4.952

Tabel 5.3 juga menunjukkan kandungan unsur carbon yang cukup tinggi hal ini dikarenakan karena karbon dioksida yang terkandung ikut masuk ke dalam beton

bersamaan dengan zat lainnya. Karbon ini akan bereaksi dengan kalsium yang terdapat pada beton dan menyebabkan terbentuknya senyawa *calcite*. Keberadaan unsur karbon yang cukup besar pada beton dapat menyebabkan menurunnya pH beton. Adanya kandungan karbon pada analisa XRF ini ditunjang juga dengan keberadaan senyawa *calcite* pada hasil XRD.

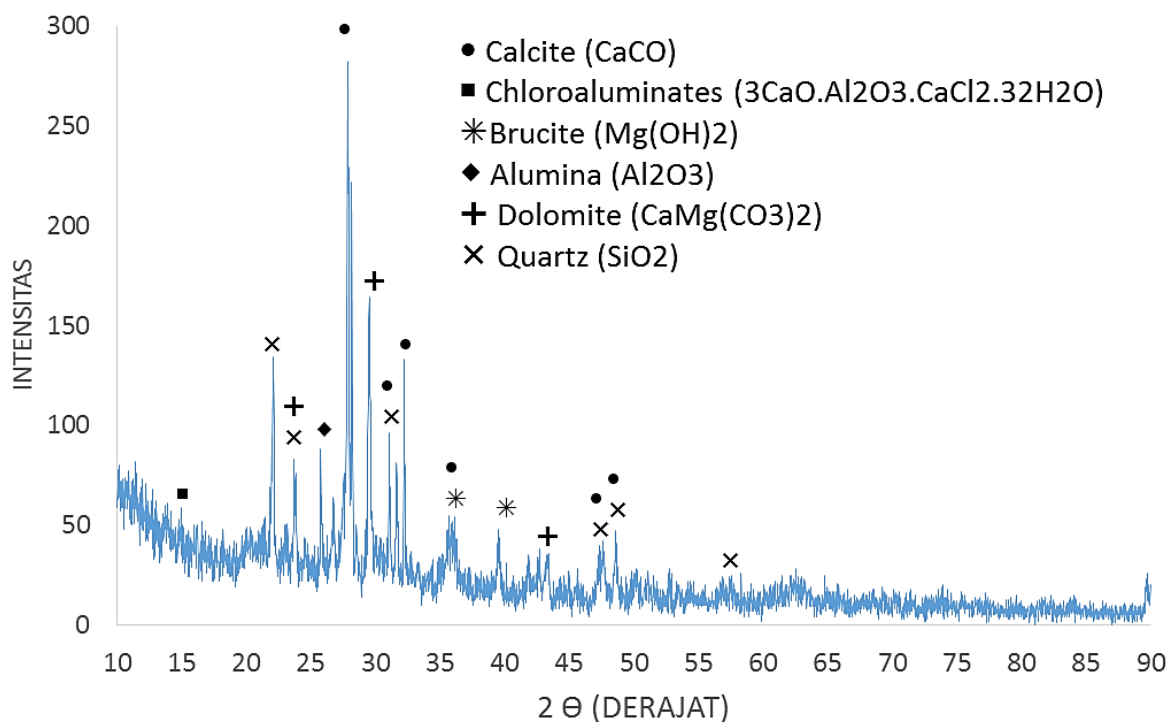


Gambar 5.23. Hasil XRD Sampel 3 Jam Basah dan 5 Jam Kering.



Gambar 5.24. Hasil XRD Sampel 1 Jam Basah dan 7 Jam Kering.

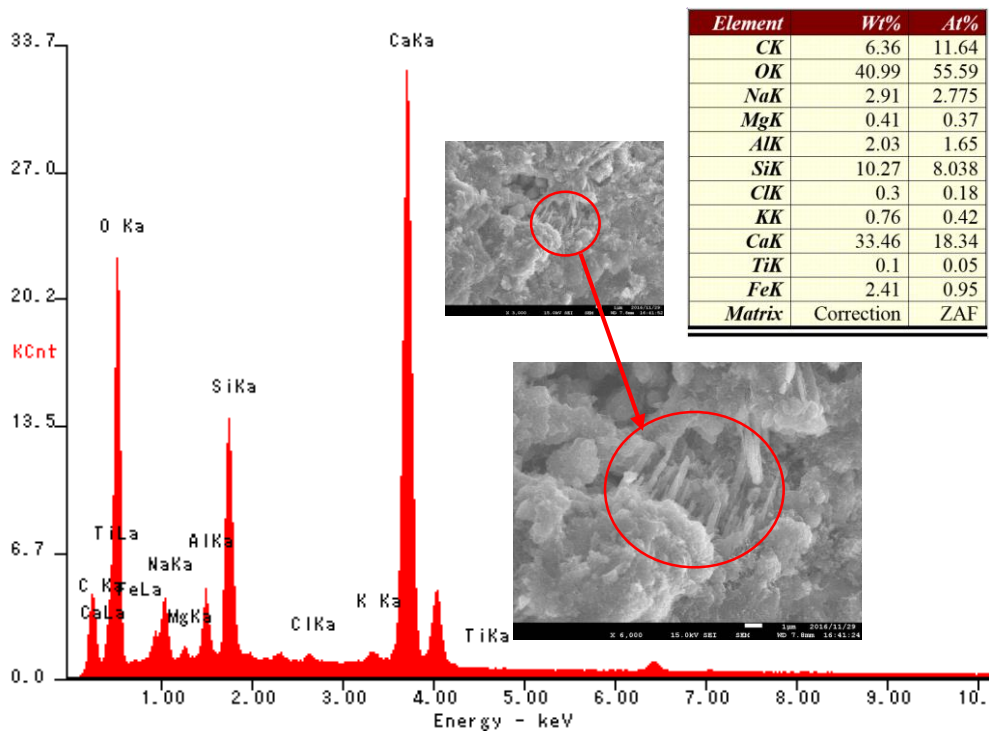
Berdasarkan hasil XRD diketahui terdapat pembentukan beberapa senyawa seperti *calcite*, *quartz*, *brucite*, *alumina*, *dolomite*, dan *chloroaluminates*. Senyawa *calcite* merupakan senyawa yang terbentuk pada bagian permukaan dari beton. Senyawa ini merupakan hasil reaksi dari senyawa hidrasi dari semen yaitu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dan gas CO_2 . Sedangkan adanya senyawa *quartz* merupakan penyusun utama dari semen yang sangat mempengaruhi *properties* dari beton seperti kuat tekan dan kuat tarik. Selain itu keberadaan *dolomite* dan *brucite* juga ditemukan pada sampel. Adanya senyawa *brucite* adalah hasil dari senyawa penyusun semen yaitu MgO dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Sedangkan senyawa *brucite* berasal dari reaksi senyawa MgO dengan CO_2 . Terbentuknya senyawa *chloroaluminates* juga terlihat dari hasil pengujian dengan menggunakan XRD. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa kalsium klorida yang terbentuk pada beton akibat adanya reaksi NaCl dan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ akan bereaksi dengan *calcium sulfoaluminate* menjadi senyawa yang memiliki bentuk menyerupai *enttrigite* yang disebut dengan *chloroaluminate* ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$).



Gambar 5.25. Hasil XRD Sampel dengan Kondisi *Fully Submerged*

Selain itu kandungan silika yang terkandung di dalam sampel yang mengalami perlakuan 3 jam basah dan 5 jam kering merupakan yang terkecil diantara dua sampel lain. Hal ini dikarenakan silika merupakan salah satu unsur yang berfungsi untuk

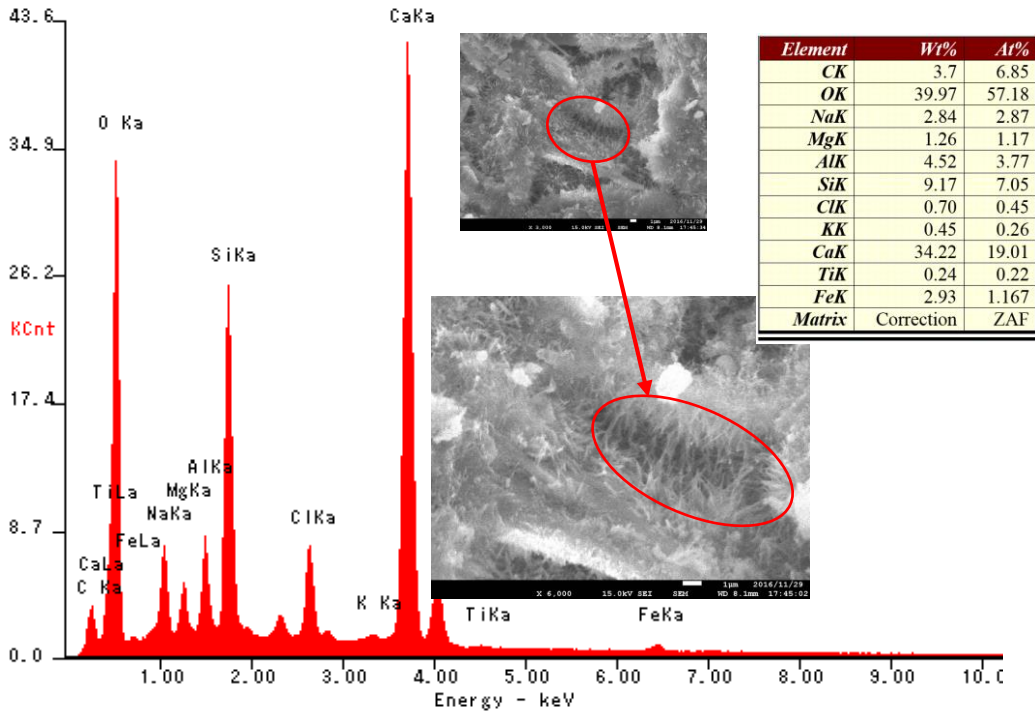
meningkatkan *properties* dan performa beton secara keseluruhan seperti meningkatkan kuat tekan, ketahanan terhadap senyawa agresif seperti klorida, serta mengurangi permeabilitas beton. Prosentase klorida yang tinggi menandakan bahwa ketahanan durabilitas dan kuat tekan dari sampel tersebut telah menurun. Hal ini sesuai dengan kondisi kuat tekan dari beton tersebut seperti ditunjukkan pada Tabel 4.8.



Gambar 5.26 Hasil SEM untuk Sampel 1 Jam Basah dan 7 Jam Kering.

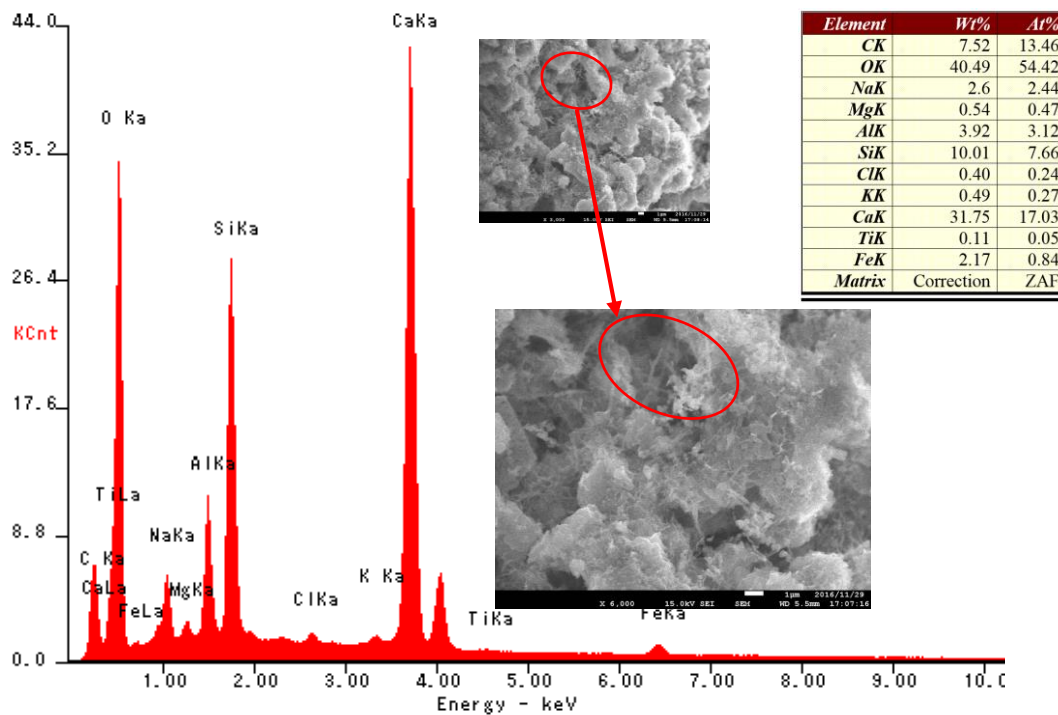
Untuk mengetahui morfologi mikrostruktur secara lebih jelas maka bagian kecil dari sampel XRF diambil untuk diuji dengan menggunakan teknik SEM. Pengujian SEM dilakukan dengan 2 teknik yaitu dengan dan tanpa menggunakan *coating*. Pengujian tanpa menggunakan *coating* dilakukan untuk mendapatkan hasil mapping unsur yang sebenarnya dari sampel yang ada. Sedangkan pengujian dengan menggunakan *coating* dilakukan untuk mendapatkan permukaan yang lebih konduktif dan gambaran yang lebih jelas terkait dengan kondisi mikrostruktur pada beton. Sebagai catatan bahwa hasil pembacaan SEM/EDS ini hanya merupakan gambaran kasar kondisi mikrostruktur dari sampel beton bertulang. Hal ini dikarenakan pembacaan dengan SEM/EDS hanya

menggunakan sebagian kecil dari sampel dan perbedaan lokasi sampel yang digunakan akan mempengaruhi hasil akhir dari analisa SEM/EDS ini.



Gambar 5.27 Hasil SEM untuk Sampel 3 Jam Basah dan 5 Jam Kering

Gambar 5.26 hingga Gambar 5.28 menunjukkan hasil pengujian dengan menggunakan SEM/EDX tanpa menggunakan *coating* untuk sampel dengan durasi 1 jam basah dan 7 jam kering, sample dengan durasi 3 jam basah dan 5 jam kering serta sampel dengan kondisi *fully submerged* secara berurutan. Gambar-gambar tersebut meliputi hasil prosentase unsur dan gambaran microstruktur beton tersebut. Terkait prosentase unsur, hasil SEM/EDX menunjukkan tren yang sama dengan hasil pengujian dengan XRF. Meskipun bila ditinjau secara nilai tidak persis sama namun tren yang dihasilkan diantara keduanya sama. Hal ini disebabkan permukaan yang ditinjau untuk pengujian SEM/EDX dan XRF tidak persis sama. Selain itu, analisa prosentase unsur pada SEM sangat tergantung pada bagian yang diperbesar sehingga sampel yang sama dapat menghasilkan prosentase unsur yang berbeda tergantung lokasi yang ditinjau.



Gambar 5.28 Hasil SEM untuk Sampel *Fully Submerged*

Prosentase klorida pada sampel yang mengalami perlakuan 3 jam basah dan 5 jam kering memiliki kandungan klorida yang paling besar dibandingkan dengan sampel lainnya. Bagian yang ditandai dengan lingkaran berwarna merah pada Gambar 5.26 hingga Gambar 5.28 menunjukkan struktur *chloroaluminates* pada pori-pori beton. Dapat dilihat bahwa sample yang mengalami perlakuan basah dan kering dengan durasi 3 jam basah dan 5 jam kering memiliki jumlah *chloroaluminate* yang lebih banyak bila dibandingkan dengan dua sample yang lain. *Chloroaluminate* berbentuk seperti jarum tajam yang tersebar secara tidak merata pada pori-pori beton. Pada dasarnya bila *chloroaluminates* terbentuk dalam jumlah yang tidak terlalu besar dan bereaksi dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ akan menyebabkan beton semakin *compact* (padat). Hal ini menyebabkan beberapa peneliti menggunakan air laut sebagai bahan campuran beton. Akan tetapi dalam jumlah yang besar, senyawa ini memiliki kecenderungan untuk berexpansi yang berakibat terbentuknya *local stress* pada pori-pori beton sehingga menyebabkan terjadinya *crack* mikro pada beton tersebut. Efek yang ketiga adalah memperbesar pori dan meningkatkan permeabilitas dari beton tersebut. Akibat dari terbentuknya *chloroaluminates*, pori beton menerima *local stress* sehingga menyebabkan pori beton tersebut membesar dan mengakibatkan peningkatan permeabilitas dari beton tersebut.

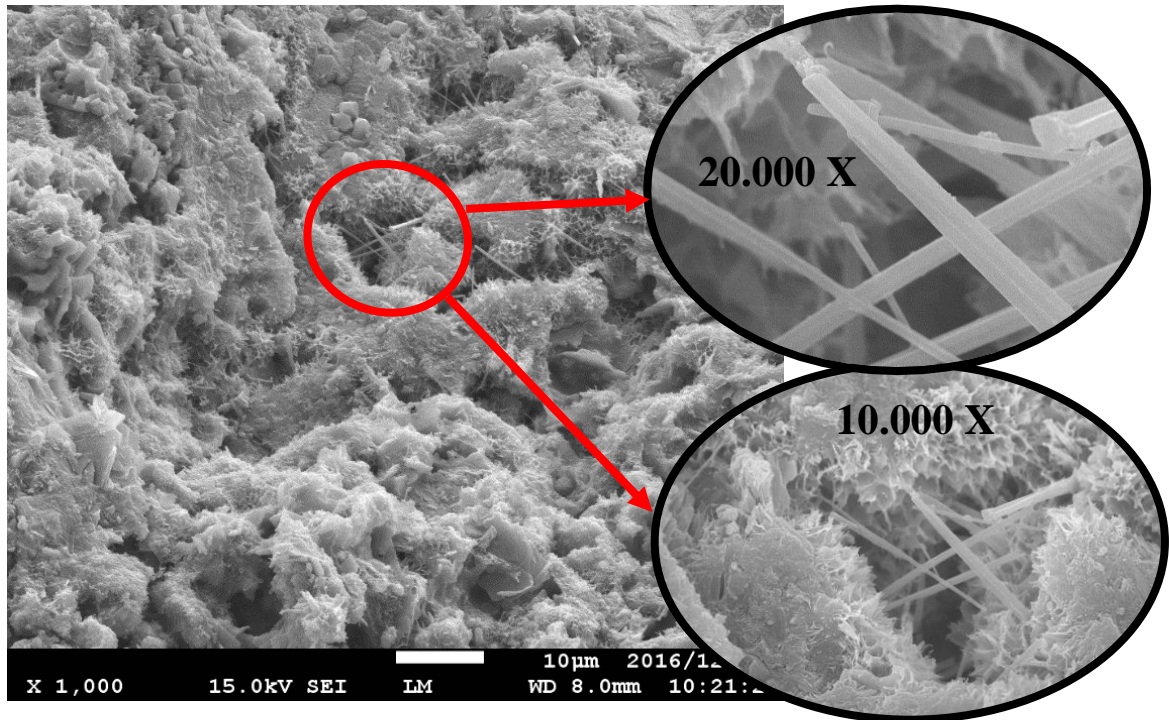


Gambar 5.29 Permukaan Sampel setelah *Coating*

Untuk memperjelas keberadaan *trichloroaluminates* pada beton maka dilakukan coating dengan menggunakan emas pada sample. Gambar 5.29 berikut ini menunjukkan permukaan sample setelah dicoating dengan menggunakan gold.

Dengan menggunakan coating maka pembesaran dapat dilakukan dengan lebih teliti sehingga dihasilkan gambar yang lebih baik. Gambar 5.30 menunjukkan hasil SEM untuk sample dengan perlakuan 3 jam basah dan 5 jam kering yang telah melalui proses coating. Sample ini dipilih karena memiliki kandungan klorida yang paling tinggi sehingga keberadaan *chloroaluminate* dapat terlihat dengan jelas.

Untuk melihat bentuk dan struktur *chloroaluminates* secara lebih jelas dilakukan perbesaran sebesar 10.000X dan 20.000X seperti ditunjukkan oleh Gambar 5.30. Berdasarkan gambar tersebut sudah dapat terlihat bahwa pori-pori dari beton tertutup oleh jarum-jarum yang posisinya tidak beraturan. Setelah beton terekspos oleh larutan NaCl maka sebagian klorida tertahan pada dinding pori atau produk semen dan bereaksi yang juga dikenal dengan istilah *chloride* binding seperti ditunjukkan oleh Gambar 5.31. Peristiwa *chloride* binding ini secara umum diklasifikasikan sebagai bentuk *physical binding* dan *chemical binding*. *Physical binding* terjadi karena adanya peristiwa elektrostatik atau dikenal juga dengan gaya Van der Waals atau gaya antara molekul antara *chloride* dan C-S-H gel. Sedangkan *chemical binding* pada proses infiltrasi klorida dapat didefinisikan sebagai interaksi antara C-S-H gel dan ion klorida melalui proses *chemisorption* dimana ion klorida teradsorpsi secara kimiawi oleh C-S-H gel. Klorida yang bereaksi dengan C-S-H gel mengakibatkan perubahan pada kondisi mikrostruktur beton tersebut.

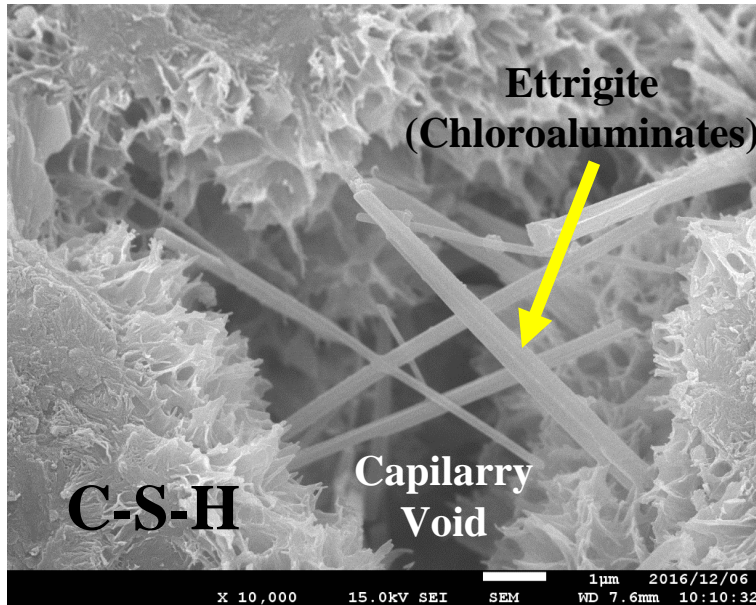


Gambar 5.30 Hasil *Low Magnification SEM* sample 3 Jam Basah dan 5 Jam Kering dengan *Gold Coating*

Chloride yang bereaksi dengan *cementitious* material bereaksi dengan senyawa utama yang terdapat pada semen yaitu *tricalcium aluminate* (C_3A). Reaksi ini menghasilkan *chloroaluminate* atau yang dikenal juga dengan sebutan *Fridel's salts* ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$). *Friendel's salt* merupakan kristal yang dapat menurunkan performa beton. Oleh karena itu limit kandungan klorida pada campuran beton telah diatur pada peraturan beto bertulang. Untuk ACI dan SNI kadar klorida untuk beton bertulang biasa (non-prategang) diambil berkisar antara 0.15% hingga 1% tergantung dari kondisi lingkungan di sekitar struktur tersebut dan tipe semen yang digunakan.

Chloroaluminate memiliki mikrostruktur yang menyerupai *ettringite* pada beton yang menggunakan semen portland. Penambahan gypsum pada semen portland sebagai sumber *calcium sulfate* menyebabkan terbentuknya *ettringite* akibat adanya reaksi dengan *calcium aluminate*. Keberadaan *chloroaluminates* pada beton yang terpapar klorida merupakan manifestasi terbentuknya *secondary ettringite*. Meskipun bentuknya yang hampir sama akan tetapi *ettringite* yang merupakan produk hidrasi semen pada dasarnya adalah *submicroscopic* sehingga ketika melakukan SEM yang terdeteksi adalah

secondary ettringite yang dalam kasus ini dikenal juga dengan sebutan *chloroaluminates*.

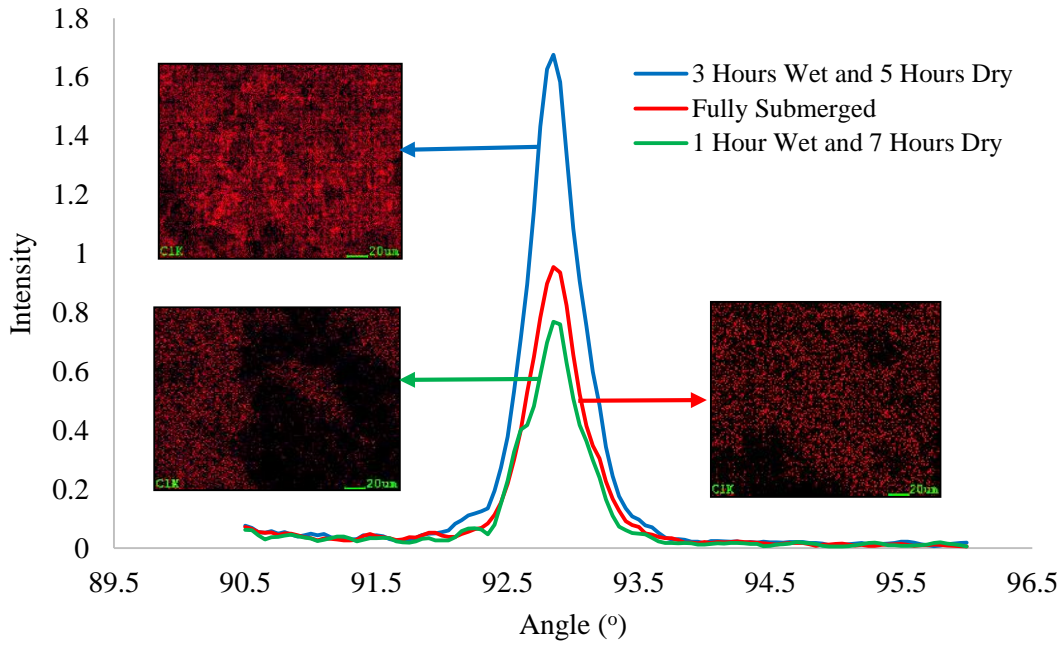


Gambar 5.31 Hasil *High Magnification SEM* sample 3 Jam Basah dan 5 Jam Kering dengan *Gold Coating* (Perbesaran 10.000X)

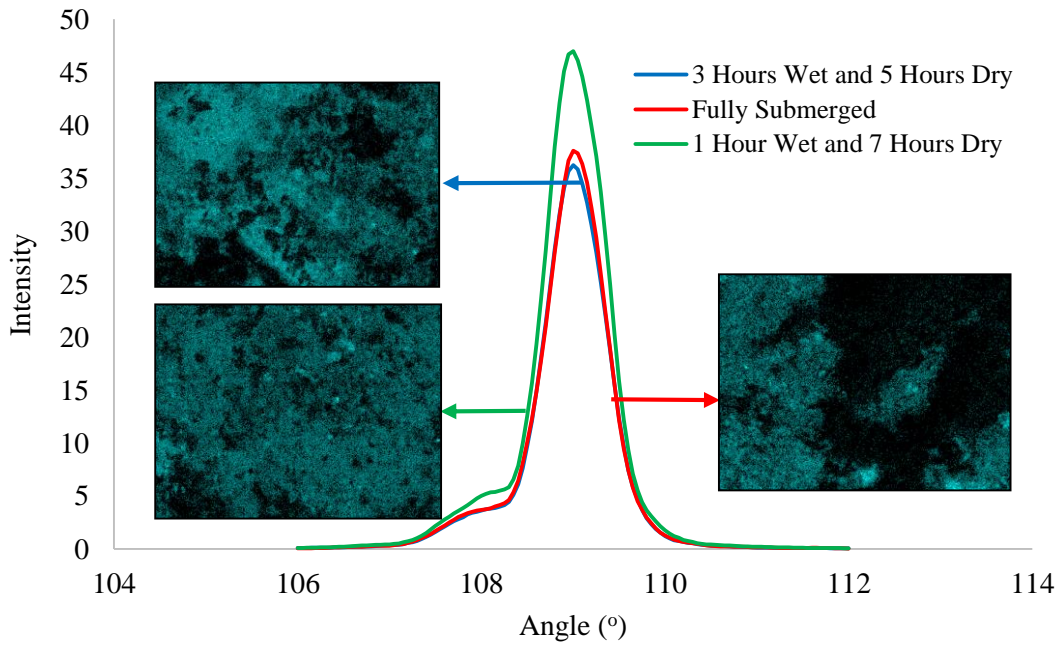
Selain hasil diatas, hasil dari SEM juga dapat menunjukkan persebaran berbagai unsur pada permukaan sample yang diuji. Gambar 5.32 menunjukkan bahwa benda uji dengan perlakuan 3 jam basah dan 5 jam kering memiliki persebara klorida yang merata dibandingkan dengan dua sampel lainnya. Hasil tersebut disajikan bersamaan dengan grafik hasil pengujian XRF. Intensitas warna yang lebih cerah juga menunjukkan bahwa prosentase unsur pada sampel tersebut cukup besar. Hal ini menandakan bahwa kristal *chloroaluminates* yang terbentuk pada sampel ini lebih banyak bila dibandingkan yang dua sampel yang lainnya.

Berbeda dengan persebaran klorida, persebaran silika pada sampel dengan kombinasi 3 jam basah dan 5 jam kering merupakan yang paling rendah bila dibandingkan dengan dua sampel lainnya seperti ditunjukkan pada Gambar 5.33. Hal ini dikarenakan silika merupakan salah satu unsur yang berfungsi untuk meningkatkan properties dan performa beton secara keseluruhan seperti meningkatkan kuat tekan, ketahanan terhadap senyawa agresif seperti klorida dan sulfat, serta mengurangi permeabilitas beton. Prosentase sulfat yang rendah menandakan bahwa ketahanan durabilitas dan kuat tekan

dari sampel tersebut telah menurun. Hal ini sesuai dengan kondisi kuat tekan dari beton tersebut seperti ditunjukkan pada Tabel 4.8.



Gambar 5.32 Grafik XRF dan Hasil EDS Persebaran Klorida untuk Tiga Tipe Sampel

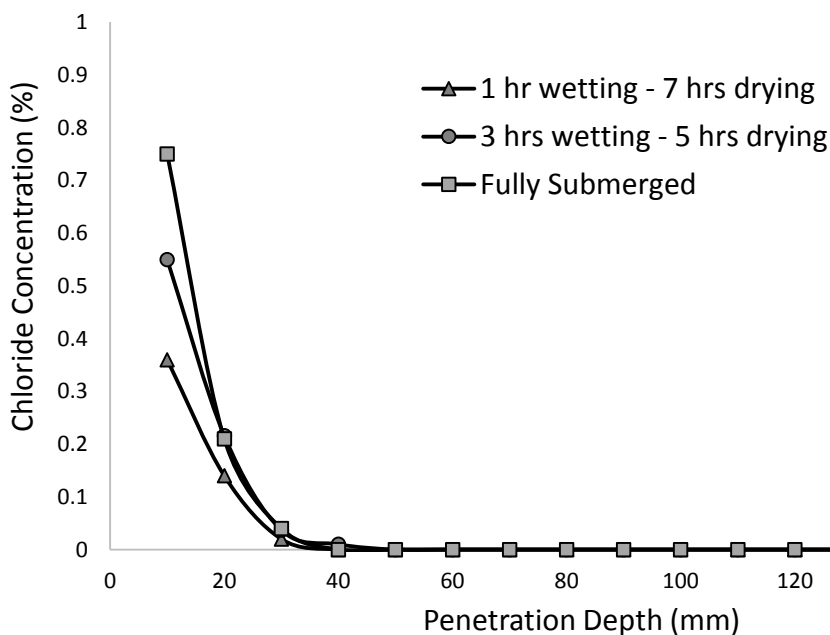


Gambar 5.33 Grafik XRF dan Hasil EDS Persebaran Silika untuk Tiga Tipe Sampel

5.3.2.3 Hasil Pengamatan Penetrasi Klorida

Pengujian kandungan klorida dilakukan dengan menggunakan metode titrasi argentometri. Argentometri merupakan salah satu cara untuk menentukan kadar zat dalam suatu larutan yang dilakukan dengan titrasi berdasarkan pada pembentukan endapan dengan ion Ag^+ . Salah satu cara untuk menentukan kadar asam-basa dalam suatu larutan adalah dengan volumetric. Pada titrasi argentometri, zat pemeriksaan yang telah dibubuhi indikator dicampur dengan larutan standar garam perak nitrat (AgNO_3). Dengan mengukur volume larutan standar yang digunakan sehingga seluruh ion Ag^+ dapat tepat diendapkan, kadar garam dalam larutan pemeriksaan dapat ditentukan.

Pengetesan kandungan klorida dilakukan setiap 1 cm mulai dari permukaan yang terkspose hingga bagian terjauh dari permukaan yang terkspose. Gambar 5.34 hingga Gambar 5.38 berikut ini menunjukkan *chloride profile* beton pada bulan ke-1, ke-3, ke-5 dan ke-10.



Gambar 5.34 Chloride Profile Pada Bulan Pertama

Berdasarkan hasil pengetesan kandungan klorida pada bulan pertama, seperti diperlihatkan pada Gambar 5.34, konsentrasi klorida paling besar berada pada bagian yang paling dekat dengan *exposed surface*. Konsentrasi klorida menurun seiring dengan bertambahnya jarak lokasi yang ditinjau dari *exposed surface*. Setelah jarak 30 mm,

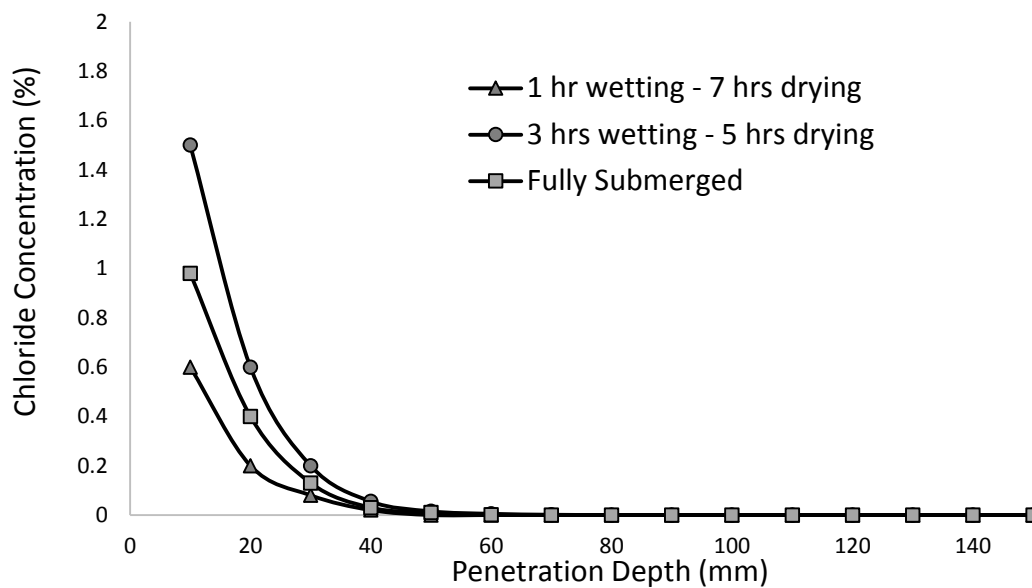
konsentrasi klorida mulai mendekati nol yang menandakan bahwa pada bulan ini klorida yang terdapat pada *interface* antara baja dan beton masih sangat sedikit sehingga korosi belum terinisiasi. Hal ini terbukti dari gambar penampang beton yang diperlihatkan oleh Gambar 5.35. Dari gambar tersebut masih terlihat bahwa korosi belum terjadi dan tulangan masih pada kondisi utuh.

Bila dilihat secara keseluruhan dari Gambar 5.34, kandungan klorida pada ketiga sample dengan konfigurasi yang berbeda menunjukkan adanya kesamaan kandungan klorida. Beton dengan perlakuan *fully submerged* memiliki kandungan klorida yang paling tinggi. Sedangkan kandungan klorida paling rendah ditunjukkan oleh beton dengan konfigurasi 1 jam kering dan 7 jam basah. Hal ini terjadi karena pada bulan awal difusi masih menjadi mekanisme utama masuknya klorida ke dalam beton. Proses difusi yang terjadi belum terpengaruh oleh durasi basah kering sehingga benda uji dengan perlakuan *fully submerged* masih menjadi sampel yang memiliki kandungan klorida tertinggi dibandingkan dua sampel yang lain.



Gambar 5.35 Penampang Beton pada Kondisi *Fully Submerged* Bulan Pertama

Pada bulan ke-3 hingga bulan ke-10, seperti ditunjukkan oleh Gambar 5.36 hingga Gambar 5.38, dapat dilihat bahwa beton dengan konfigurasi 3 jam kering dan 5 jam basah menunjukkan peningkatan kandungan klorida yang signifikan. Hal ini menyebabkan beton dengan konfigurasi ini memiliki kandungan klorida tertinggi diantara sampel yang lain. Sedangkan kandungan klorida paling rendah ditunjukkan oleh beton dengan konfigurasi 1 jam kering dan 7 jam basah. Hal ini dikarenakan waktu basah pada konfigurasi ini relatif kecil sehingga proses difusi tidak terjadi dengan sempurna (Sutrisno dkk, 2016)

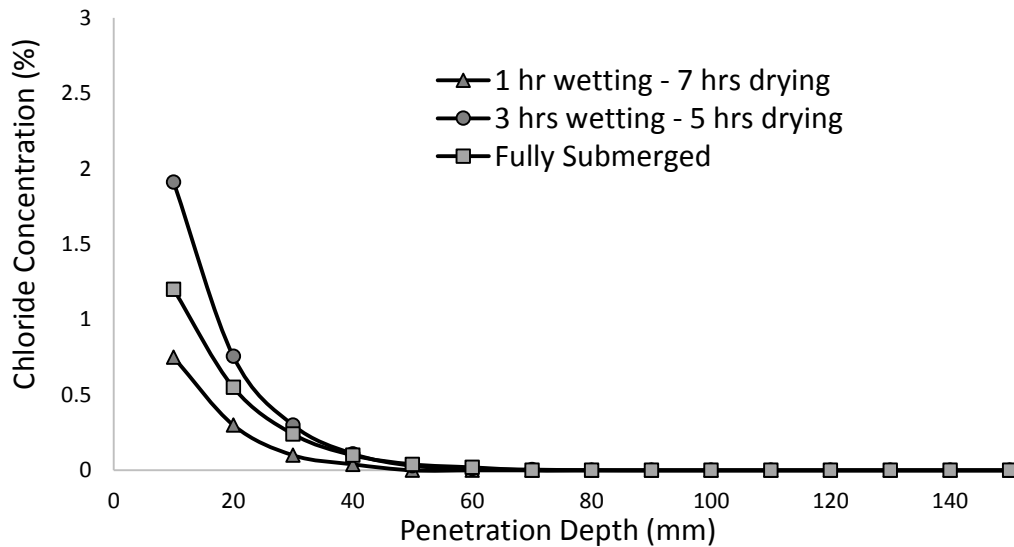


Gambar 5.36 Chloride Profile Pada Bulan Ke Tiga

Hasil penelitian hingga bulan ke-10 ini menunjukkan bahwa beton dengan konfigurasi 3 jam basah dan 5 jam kering memiliki kandungan klorida tertinggi karena adanya kombinasi antara siklus basah dan kering. Dapat dilihat pada bulan pertama difusi memang merupakan mekanisme utama masuknya klorida ke dalam beton. Hal ini ditunjukkan oleh beton dengan konfigurasi *fully submerged* yang memiliki konsentrasi klorida tertinggi pada bulan pertama. Akan tetapi, semakin lama durasi *exposure*, konveksi mulai terjadi sehingga menyebabkan beton dengan kombinasi basah kering tertentu memiliki konsentrasi klorida yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton dengan konfigurasi *fully submerged*.

Konfigurasi 3 jam basah dan 5 jam kering memiliki kandungan klorida yang paling tinggi karena pada kondisi basah, larutan NaCl yang mengandung klorida masuk ke dalam beton. Klorida pada tahapan ini berpindah di dalam beton dari konsentrasi tinggi ke rendah melalui mekanisme difusi. Ketika kondisi lingkungan luar berganti ke kondisi kering, air yang berada didalam pori akan menguap sedangkan kristal garam akan tetap berada pada beton sehingga klorida tetap dapat berpindah dengan bebas di dalam beton. Konsentrasi klorida pada kondisi kering ini akan meningkat karena tidak bercampur dengan air pori sehingga perbedaan konsentrasi klorida di dalam beton yang berada pada kondisi kering lebih tinggi bila dibandingkan dengan beton pada kondisi basah. Bila kondisi ini berlangsung terus menerus maka klorida akan lebih cepat masuk ke dalam

beton. Pada waktu paparan tertentu, jumlah klorida yang ada pada beton akan mencapai batasan untuk merusak lapisan pasif pada tulangan dan menginisiasi proses korosi. Selain itu kondisi kering juga akan meningkatkan nilai koefisien difusi dari oksigen dibandingkan pada kondisi basah sehingga proses korosi juga dapat terjadi dengan lebih cepat.

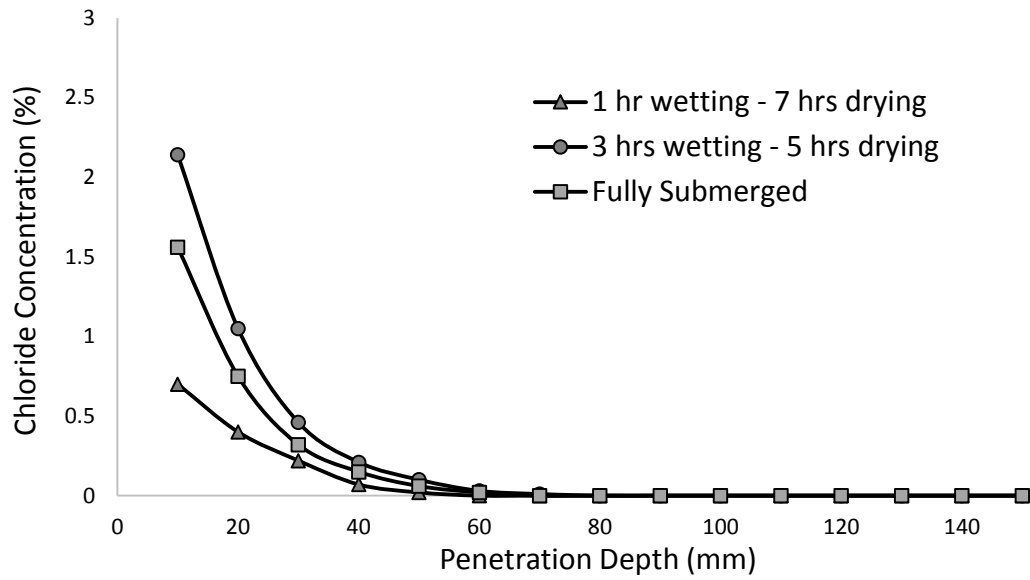


Gambar 5.37 Chloride Profile Pada Bulan Ke Lima

Maskipun konfigurasi basah dan kering dapat mempercepat masuknya klorida ke dalam beton, akan tetapi kurangnya waktu basah dapat menyebabkan proses difusi tidak terjadi secara sempurna. Fenomena ini ditunjukkan oleh beton dengan konfigurasi 1 jam basah dan 7 jam kering. Konfigurasi ini selalu memiliki kandungan klorida yang paling kecil dibandingkan dengan konfigurasi yang lain mulai dari awal *exposure* hingga bulan ke-10. Dengan melihat hasil ini dapat disimpulkan bahwa penetrasi klorida sangat dipengaruhi oleh konfigurasi durasi basah dan kering.

Dengan mengadopsi definisi dari proses difusi yaitu perpindahan suatu ion atau senyawa dari area yang memiliki konsentrasi tinggi ke area dengan konsentrasi yang lebih rendah, maka proses masuknya klorida ke dalam beton akan terus berlangsung selama terdapat perbedaan konsentrasi klorida pada beton. Penggunaan kualitas beton yang lebih baik seperti penggunaan beton dengan faktor air semen yang lebih rendah dan penggunaan teknik proteksi pada beton bertulang seperti *coating* dan *cathodic protection* dapat

memperlambat proses transport zat agresif seperti klorida ke dalam beton sehingga proses korosi juga dapat berlangsung dengan lebih lambat.



Gambar 5.38 Chloride Profile Pada Bulan Ke Sepuluh

BAB 6

MODEL PREDIKSI PENETRASI KLORIDA AKIBAT SIKUS *WETTING AND DRYING*

6.1 Umum

Bab ini menguraikan mengenai pengembangan model prediksi penetrasi klorida pada beton yang terkena siklus basah dan kering (siklus basah dan kering). Perumusan difusi digunakan sebagai dasar utama dari pengembangan model prediksi ini.

6.2 Model Penetrasi Klorida Pada Beton dengan Kondisi *Fully Submerged*

Proses masuknya klorida pada beton bertulang pada umumnya terjadi secara difusi. Hukum Fick sudah sangat umum digunakan untuk memodelkan proses difusi pada berbagai media yang memiliki perbedaan konsentrasi termasuk beton. Pada kondisi *steady state*, dimana konsentrasi dianggap konstan, hukum Fick's pertama dapat digunakan untuk memodelkan proses difusi. Persamaan hukum Fick's pertama diperlihatkan pada persamaan 6.1 dibawah ini.

$$J = -D \frac{\partial c(x)}{\partial x} \quad (6.1)$$

Akan tetapi pada banyak kasus difusi, konsentrasi selalu berubah terhadap waktu sehingga hukum Fick's pertama berkembang menjadi Hukum Fick kedua seperti ditunjukkan pada persamaan (6.2). Pada Hukum Fick pertama, bila nilai dari $\frac{\partial c(x,t)}{\partial t}$ adalah konstan (J) maka hal ini berarti bahwa tidak ada perubahan konsentrasi yang terjadi terhadap waktu sehingga dapat disimpulkan bahwa Hukum Fick pertama sebenarnya adalah simplifikasi dari Hukum Fick kedua yang mengasumsikan difusi terjadi pada kondisi *steady state*.

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (6.2)$$

Pemodelan infiltrasi klorida ke dalam beton dengan menggunakan Hukum Fick ke dua telah mulai dikenalkan oleh Colle Pardi et al, 1970. Pada kasus infiltrasi klorida pada beton bertulang, difusi merupakan mekanisme yang utama. Mekanisme transport dengan proses difusi ini umum digunakan untuk beton yang berada pada kondisi terendam sempurna (*fully submerged*). Penyelesaian Hukum Fick diatas telah banyak diteliti dalam

beberapa dekade dan salah satu penyelesaian yang umum digunakan adalah dengan menggunakan *error function* sebagai berikut:

$$\frac{c(x,t)}{c_s} = \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right] \quad (6.3)$$

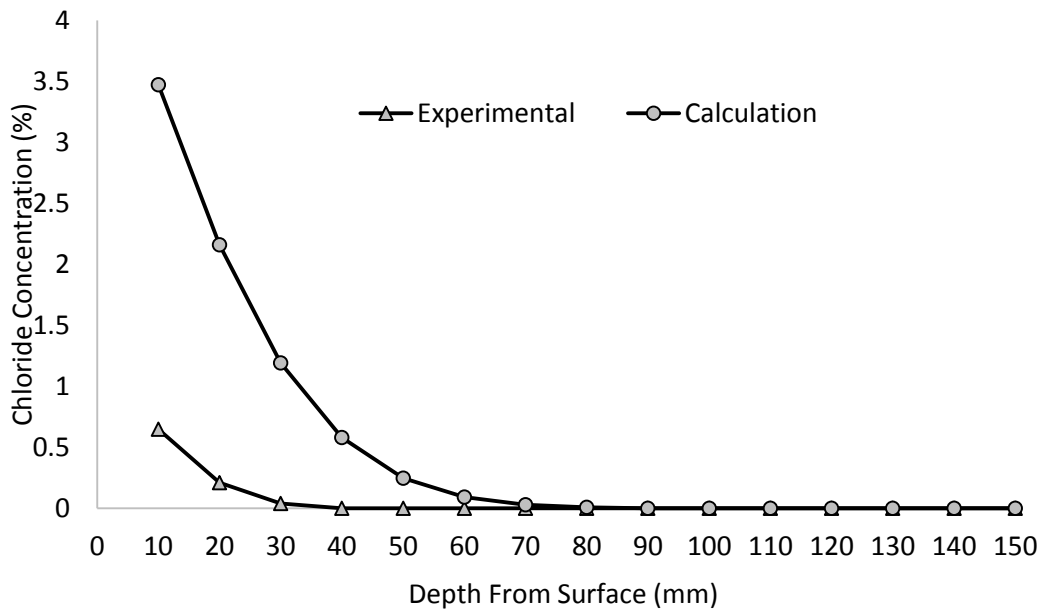
Dimana C_s adalah konsentrasi senyawa pada permukaan. Nilai *error function* (erf) didapatkan dari *Gaussian error function* yang bergantung dari hasil perhitungan $\frac{x}{2\sqrt{D_c t}}$.

Waktu awal terjadinya korosi sangat ditentukan oleh *chloride threshold* (C_t) yang dapat menyebabkan terjadinya depasivasi pada beton. Angst dan Vennesland telah meneliti besarnya *chloride threshold* yang dapat mengakibatkan terjadinya depasivasi pada beton (Angst & Vennesland, 2009). Berdasarkan penelitian tersebut didapatkan bahwa *chloride threshold* bervariasi dari 0.02% hingga 3.08 % tergantung pada kualitas dari *interface* antara tulangan dan beton, pH dari *pore solution* dan *electrochemical potential* dari tulangan. Beberapa peraturan juga menetapkan batasan *critical chloride content* pada beton untuk mencegah terjadinya depasivasi. ACI Committee 201 menetapkan batasan sebesar 0.1 untuk beton normal yang berada pada kondisi lembab dan terekspose langsung oleh klorida.

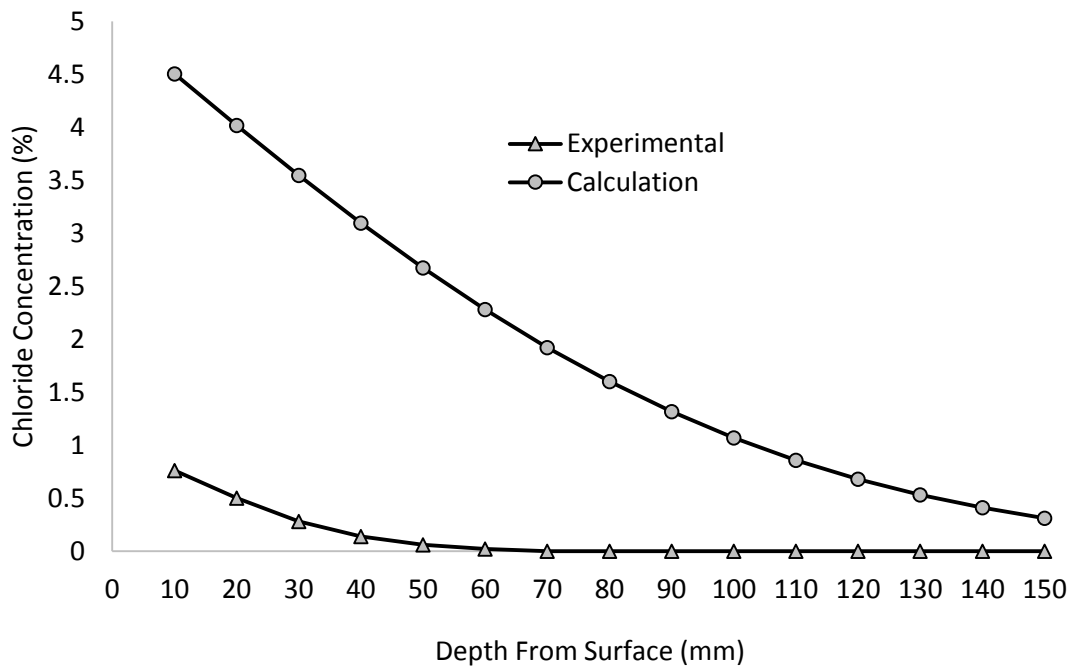
Untuk menentukan waktu awal terjadinya korosi maka dapat diasumsikan nilai dari C_s adalah konstan dengan mengasumsikan besarnya adalah sama dengan kandungan klorida yang ada pada air laut. Waktu awal terjadinya korosi juga tergantung pada ketebalan selimut dari beton karena klorida yang masuk harus melewati selimut beton sebelum mencapai tulangan. Kondisi tersebut dapat dituliskan secara matematis seperti perumusan yang dikemukakan oleh Zhang dan Lounis berikut ini (Zhang & Lounis, 2006):

$$T_i(C_s, D, C_t d_c) = \frac{d_c^2}{4D_c \left[\operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_t}{C_s} \right) \right]} \quad (6.4)$$

Dimana d_c adalah ketebalan selimut beton, C_t adalah *chloride threshold*, D_c adalah koefisien difusi dan C_s adalah konsentrasi klorida pada permukaan beton. Gambar 6.1 dan Gambar 6.2 menunjukkan hasil perhitungan konsentrasi klorida dengan menggunakan pendekatan Hukum Fick II dan hasil eksperimental pada bulan ke-1 dan ke-10.



Gambar 6.1 Hasil Perhitungan Konsentrasi Klorida dengan Hukum Fick II dan Hasil Eksperimental (Kondisi *Fully Submerged*) Pada Bulan ke-1



Gambar 6.2 Hasil Perhitungan Konsentrasi Chlorida dengan Hukum Fick's II dan Hasil Eksperimental (*Fully Submerged Condition*) Pada Bulan ke-10

Berdasarkan Gambar 6.1 dan Gambar 6.2 dapat terlihat perbedaan konsentrasi yang cukup signifikan antara hasil eksperimental dan perhitungan dengan menggunakan Hukum Fick II. Hal ini disebabkan oleh penggunaan koefisien difusi yang konstan pada saat perhitungan konsentrasi klorida tersebut. Koefisien difusi umumnya ditentukan melalui pengujian awal dari beton pada usia awal setelah *curing* (28 hari). Hal ini bertujuan untuk mengetahui koefisien difusi dari beton sebelum terkontaminasi oleh karbon dioksida maupun klorida. Akan tetapi seiring dengan bertambahnya waktu, koefisien difusi pada beton yang terpapar klorida akan berubah akibat adanya proses transport. Observasi yang dilakukan oleh Takewaka et al, 1988 mengemukakan bahwa koefisien difusi yang digunakan tidak boleh lagi dianggap konstan akan tetapi harus mengalami perubahan seiring dengan waktu paparan. Hasil yang dikemukakan oleh Taekawa juga sejalan dengan penelitian yang dikemukakan oleh Michael et al, 1999 dan Wang et al, 2014. Penyebab dari fenomena ini adalah seiring dengan bertambahnya waktu paparan, kondisi mikrostruktur beton tidak sama seperti kondisi awal. Besarnya porositas tertutup juga menurun seiring dengan bertambahnya waktu paparan. Berdasarkan penelitian yang dikemukakan oleh Taekawa et al, 1998 dan Michael, et al, 1999 maka dapat disimpulkan hubungan antara koefisien difusi dan waktu paparan. Difusi dalam kurun waktu tertentu disebut juga dengan difusi efektif (D_{eff}) yang dapat dirumuskan sebagai berikut.

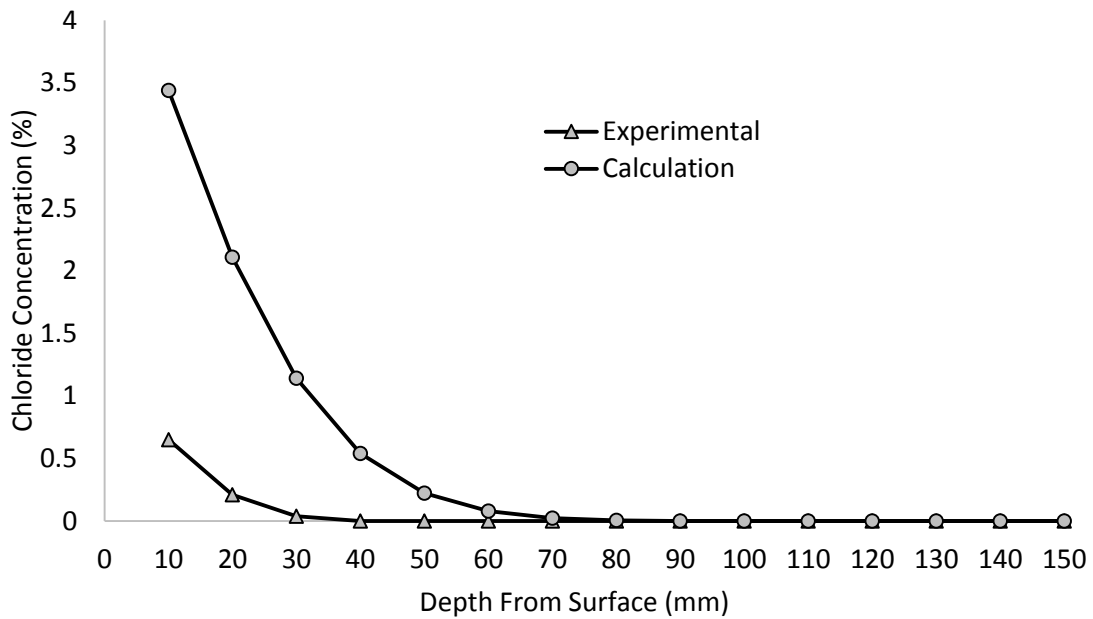
$$D_{eff} = D_c \times \left(\frac{t_0}{t}\right)^m \quad (6.5)$$

Dimana nilai t_0 adalah referensi waktu yang besarnya adalah 28 hari. Sedangkan m adalah konstanta yang mewakili kualitas beton yang digunakan. Besarnya nilai koefisien dapat diambil berdasarkan penelitian Mangat dan Moley, 1994 yaitu sebesar

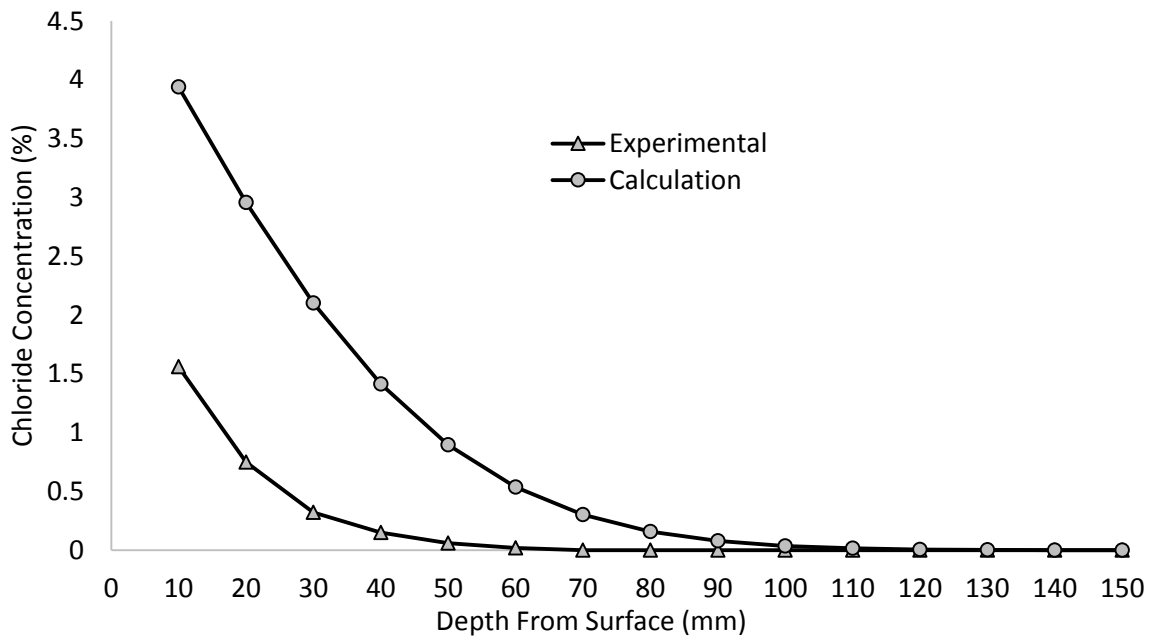
$$m = 2.5 W/C - 0.6 \quad (6.6)$$

Dengan menggunakan asumsi ini dilakukan perhitungan kembali untuk memodelkan penetrasi klorida pada kondisi *fully submerged*. Gambar 6.3 dan Gambar 6.4 berikut menunjukkan hasil perhitungan konsentrasi klorida dengan menggunakan

pendekatan Hukum Fick II (dengan D_{eff}) dan hasil eksperimental pada bulan ke-1 dan ke-10.

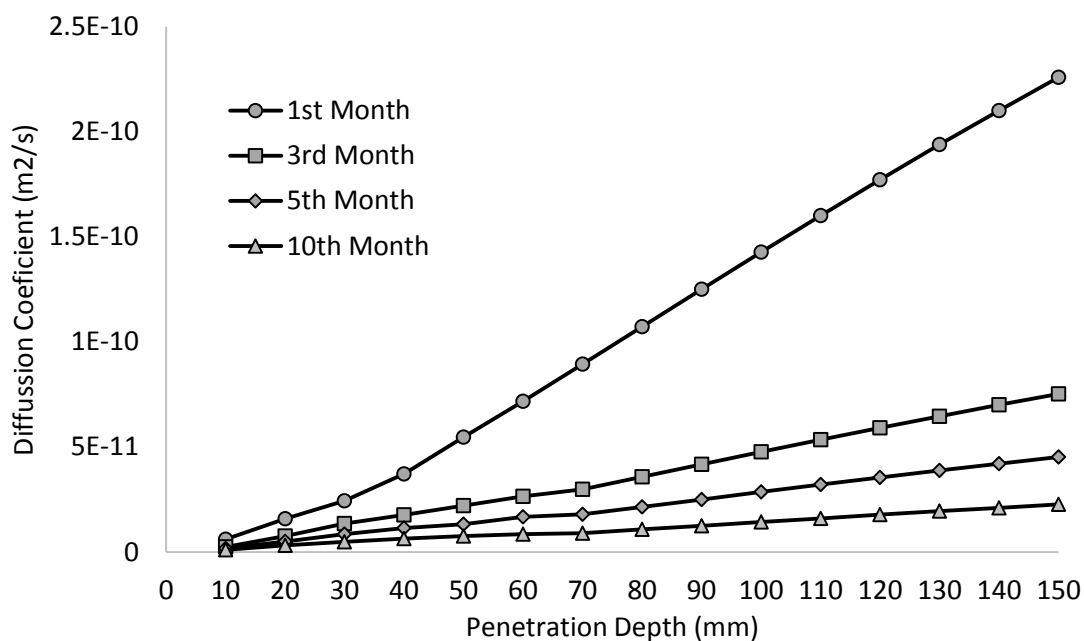


Gambar 6.3 Hasil Perhitungan Konsentrasi Klorida dengan Hukum Fick II (dengan D_{eff}) dan Hasil Eksperimental (Kondisi *Fully Submerged*) Pada Bulan ke-1



Gambar 6.4 Hasil Perhitungan Konsentrasi Klorida dengan Hukum Fick II (dengan D_{eff}) dan Hasil Eksperimental (Kondisi *Fully Submerged*) Pada Bulan ke-10

Dapat terlihat dari Gambar 6.3 dan Gambar 6.4 bahwa terdapat penurunan konsentrasi klorida hasil perhitungan bila dibandingkan dengan hasil pada Gambar 6.1 dan Gambar 6.2. Akan tetapi hasil ini masih cukup jauh dari hasil eksperimental yang dihasilkan. Hal ini kemungkinan besar disebabkan oleh perbedaan konsentrasi klorida yang terdapat disepanjang cross section dari beton. Seiring dengan bertambahnya waktu, klorida akan masuk ke dalam beton dan menyebabkan terbentuknya *Friedel's salt* di dalam beton. Hal ini menyebabkan terjadinya *pore refinement* pada beton karena *Friedel's salt* yang terbentuk mengisi pori-pori pada beton. Hal ini menyebabkan koefisien difusi pada beton semakin kecil pada permukaan yang terpapar langsung dengan klorida. Berdasarkan pada penjelasan diatas, maka terlebih dahulu dicari hubungan antara jarak dari permukaan terhadap koefisien difusi beton.



Gambar 6.5 Hasil Perhitungan Koefisien Difusi dengan Hukum Fick II Berdasarkan Hasil Eksperimental

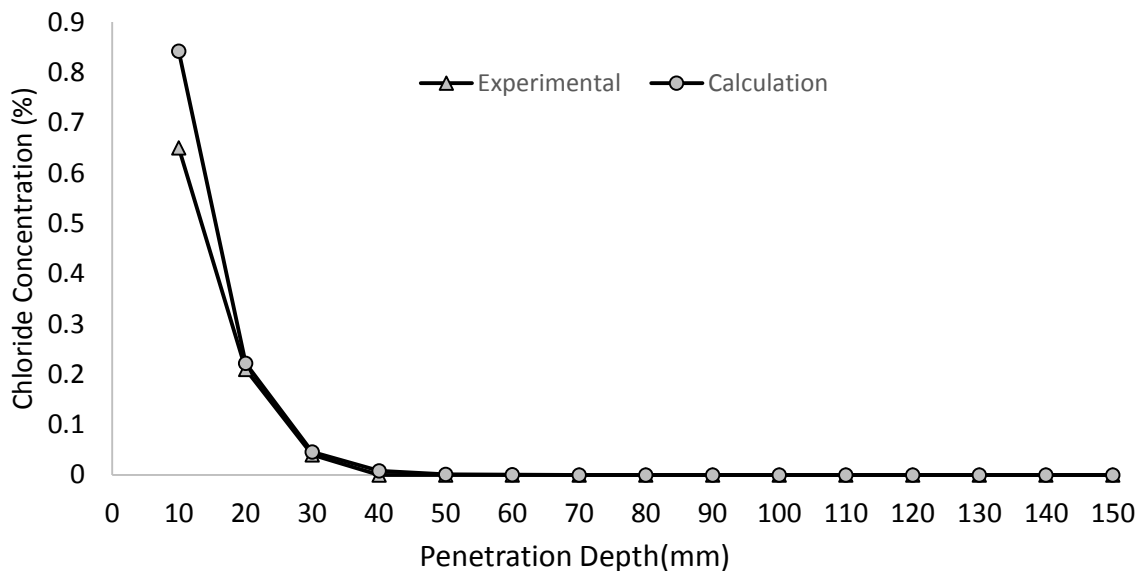
Hasil perhitungan koefisien difusi yang dilakukan dengan menggunakan *concentration profile technique* ditunjukkan oleh Gambar 6.5. Teknik ini bertujuan untuk mendapatkan koefisien difusi berdasarkan hasil konsentrasi klorida yang didapatkan dari pengujian titrasi. Berdasarkan perhitungan koefisien difusi hasil analisa eksperimental dapat dilihat bahwa koefisien difusi cenderung mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya jarak dari permukaan. Semakin jauh jarak titik yang ditinjau dari

permukaan beton maka koefisien difusi yang dihasilkan semakin besar. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Nerst, dimana besarnya difusi bertambah seiring dengan adanya pencairan larutan. Hal ini juga ditunjang dengan penelitian yang dilakukan oleh Chaterji, 1994 yang menyatakan bahwa besarnya koefisien difusi meningkat seiring dengan menurunnya konsentrasi NaCl%. Karena semakin jauh jarak dari permukaan konsentrasi larutan semakin kecil, maka koefisien difusi dari beton tersebut juga semakin besar.

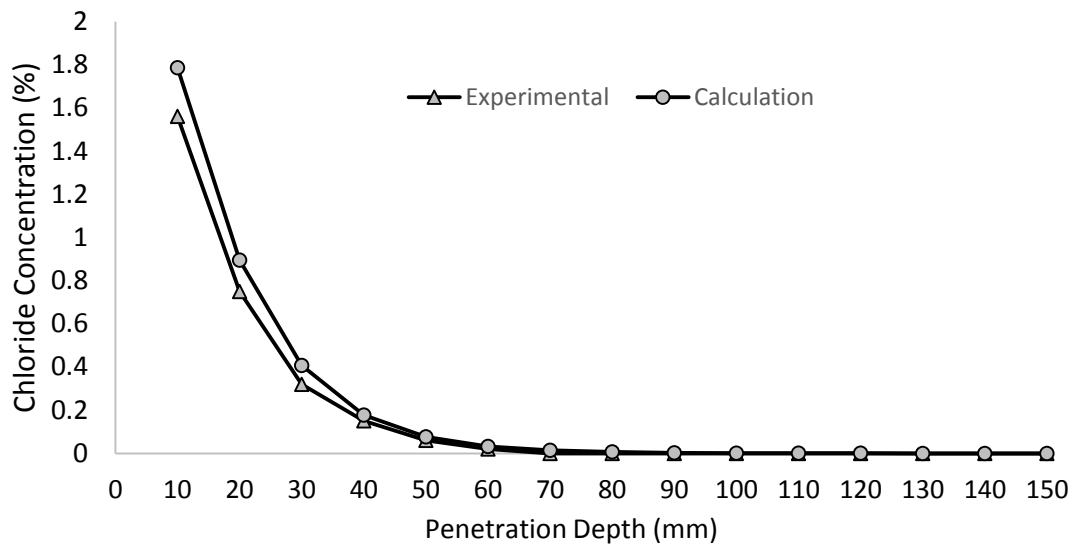
Berdasarkan hasil tersebut maka dilakukan analisa regresi dari data eksperimental dan ditemukan bahwa koefisien difusi juga tergantung dari perbandingan antara jarak yang ditinjau dari permukaan (ΔX) dan ketinggian *cross section* beton yang ditinjau (X). Berdasarkan hasil tersebut maka perumusan koefisien difusi efektif (D_{eff}) pada persamaan 6.5 dapat dikembangkan dengan menambahkan faktor jarak sebagai berikut:

$$D_{app} = D_{eff} \times Exp \left[\frac{\Delta X}{X} \right] \times 5 \log(\Delta X) \quad (6.7)$$

Dengan menggunakan persamaan koefisien difusi diatas maka dilakukan perhitungan kembali untuk menentukan profil klorida pada beton yang ditinjau.



Gambar 6.6 Hasil Perhitungan Konsentrasi Klorida dengan Hukum Fick II (dengan D_{app}) dan Hasil Eksperimental (Kondisi *Fully Submerged*) Pada Bulan ke-1



Gambar 6.7 Hasil Perhitungan Konsentrasi Chlorida dengan Hukum Fick II (dengan D_{app}) dan Hasil Eksperimental (Kondisi *Fully Submerged*) Pada Bulan ke-10

Bedasarkan hasil pada perhitungan pada Gambar 6.6 dan Gambar 6.7 dapat dilihat bahwa konsentrasi klorida hasil perhitungan sudah mendekati hasil eksperimental yang ada. Dapat dilihat pula hasil konsentrasi klorida pada bagian yang paling dekat dengan permukaan, yaitu 10 mm dari permukaan, menunjukkan perbedaan konsentrasi klorida yang cukup besar.

Hal ini disebabkan oleh penentuan konsentrasi klorida pada permukaan beton yang nilainya cenderung lebih besar dibandingkan dengan nilai yang sebenarnya. Penelitian yang dilakukan oleh Glass, 2000 juga menyatakan bahwa aksi *chloride* yang masuk ke dalam beton dipengaruhi oleh banyak faktor salah satunya adalah penentuan *boundary condition*. *Boundary condition* seperti konsentrasi klorida pada permukaan beton (C_s) nilainya sebenarnya tidak sama dengan dengan konsentrasi klorida pada air laut. Akan tetapi karena perhitungannya yang cukup rumit maka konsentrasi klorida di dalam air laut dapat digunakan sebagai pendekatan untuk menentukan nilai konsentrasi klorida pada permukaan beton. Hal ini menyebabkan konsentrasinya hasil perhitungan cenderung lebih tinggi bila dibandingkan dengan hasil eksperimental.

6.3 Model Penetrasi Klorida pada Beton dengan Kondisi *Wetting and Drying*

Pada kondisi *fully submerged* difusi merupakan mekanisme transport yang utama. Akan tetapi beton yang berada pada daerah percikan mengalami kombinasi basah dan kering sehingga difusi bukan lagi menjadi satu-satunya mekanisme masuknya klorida ke dalam beton. Beberapa peneliti mendekati kondisi ini dengan menggabungkan antara difusi dan konveksi.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -D\nabla c + cu \quad (6.8)$$

Akan tetapi penelitian yang dilakukan oleh Lu et al menyatakan bahwa konveksi pada lokasi yang semakin jauh dari permukaan dapat diabaikan dan difusi tetap menjadi mekanisme utama. Akan tetapi jarak dari permukaan yang terkena paparan langsung, dimana dalam penelitian Lu et al disebut sebagai zona konveksi, harus tetap dipertimbangkan saat melakukan perhitungan infiltrasi klorida dengan menggunakan difusi. Hal ini telah dibahas pada sub bab sebelumnya dimana jarak dari permukaan beton yang terkena paparan (ΔX) telah dimasukkan ke dalam penentuan koefisien difusi.

Berdasarkan hasil pengamatan konsentrasi klorida yang telah dibahas sebelumnya pada sub bab 5.3.2.2 didapatkan bahwa durasi basah dan kering dalam suatu siklus siklus basah dan kering mempengaruhi proses masuknya klorida ke dalam beton. Pada periode pengujian yang panjang didapatkan siklus basah dan kering dengan periode tertentu dapat mengakibatkan klorida berpenetrasi lebih cepat ke dalam beton. Sedangkan disisi lain kurangnya durasi basah dalam suatu siklus *wetting and drying* juga dapat mempengaruhi kecepatan penetrasi klorida tersebut. Berdasarkan fitting dari hasil eksperimental didapatkan bahwa terdapat hubungan antara total siklus basah dan kering harian terhadap konsentrasi klorida.

Berdasarkan hasil eksperimental tersebut, maka perumusan difusi yang digunakan untuk memodelkan proses infiltrasi klorida pada kondisi *fully saturated* dapat juga digunakan untuk memodelkan proses infiltrasi klorida pada kondisi basah dan kering dengan menambahkan variable durasi basah dan kering. Perumusan tersebut dapat dituliskan secara matematis sebagai berikut.

$$\frac{c(x,t)}{c_s} = \alpha \times \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{app}t}} \right) \right] \quad (6.9)$$

Dimana:

α = Koefisien yang tergantung pada durasi basah dan kering pada suatu siklus

D_{app} = *Modified Diffusion Coefficient* (lihat persamaan 6.7)

$C(x,t)$ = Konsentrasi pada titik x dan waktu t

C_s = Konsentrasi awal

x = Lokasi yang ditinjau

Berdasarkan hasil eksperimental yang telah dibahas sebelumnya pada Bab 5, durasi basah yang kurang menyebabkan proses difusi tidak berjalan secara maksimal sehingga konsentrasi klorida pada titik yang sama menjadi lebih kecil. Oleh karena itu besarnya nilai α tergantung dari rasio antara total waktu basah (w) dan kering (d) sebagai berikut:

- Untuk $w/d \leq 0.5$

$$\alpha = 0.5 \times \text{Exp} \left[\frac{w}{d} \right] \quad (6.10)$$

- Untuk $w/d > 0.5$

$$\alpha = 0.75 \times \text{Exp} \left[\frac{w}{d} \right] \quad (6.11)$$

- Untuk $w/d \geq 1$

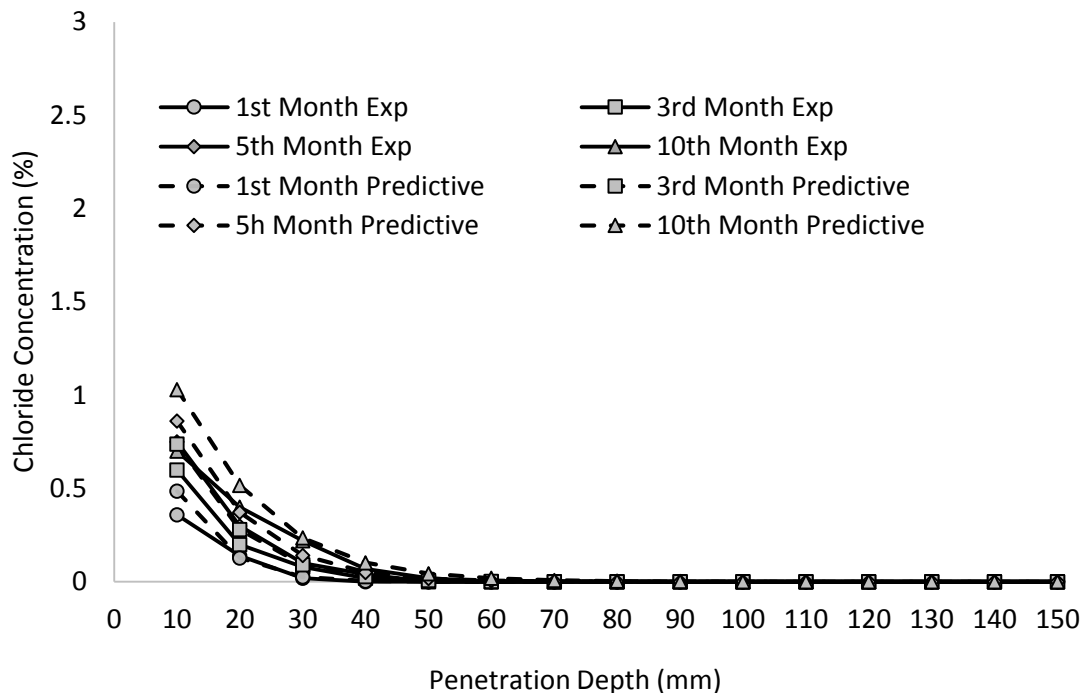
$$\alpha = 1$$

Koefisien w adalah total waktu basah dalam satuan jam. Sedangkan d adalah total waktu kering dalam satu siklus basah dan kering dalam satuan jam. Pada sub bab selanjutnya akan ditunjukkan hasil pemodelan proses infiltrasi klorida dibandingkan dengan hasil eksperimental untuk siklus dengan 1 jam basah dan 7 jam kering serta 3 jam basah dan 5 jam kering secara berurutan.

6.4 Validasi Model

Pada sub bab ini akan dibahas hasil validasi model dengan hasil eksperimental. Berdasarkan Gambar 6.8 dan Gambar 6.9 dapat dilihat bahwa model yang digunakan untuk mensimulasikan proses masuknya klorida pada beton mendekati hasil eksperimental. Rata-rata perbedaan yang terjadi mencapai angka 6.24 % untuk semua sampel. Perbedaan paling besar terjadi pada permukaan beton. Hal ini disebabkan oleh

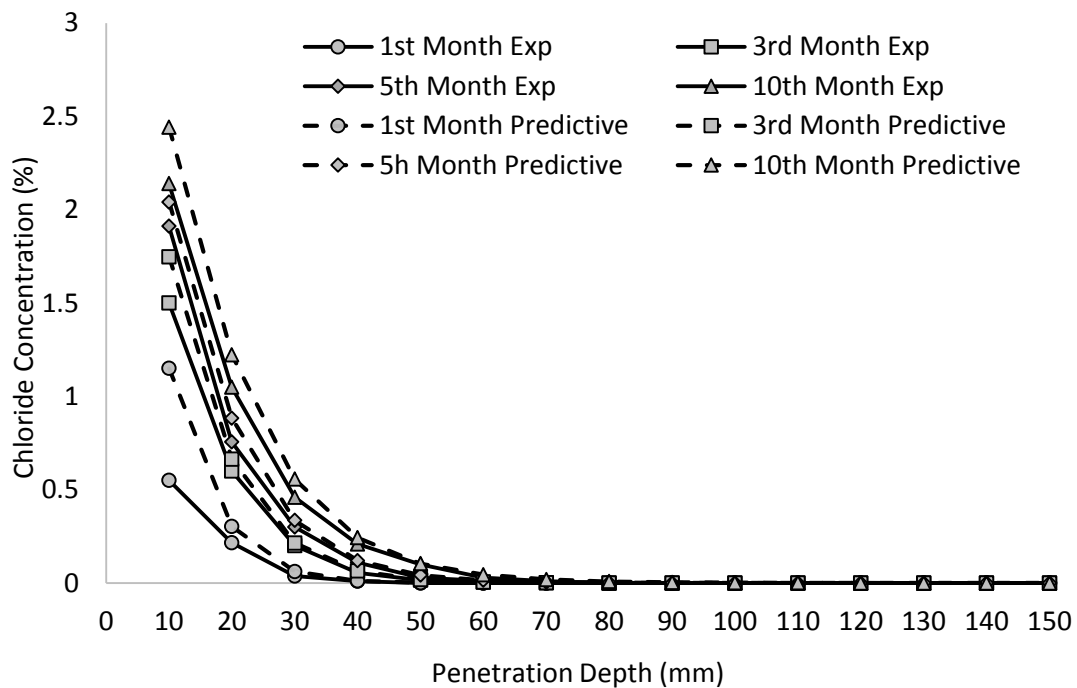
penentuan konsentrasi klorida pada permukaan beton yang nilainya cenderung lebih besar dibandingkan dengan nilai yang sebenarnya. Proses masuknya klorida ke dalam beton dipengaruhi oleh banyak faktor salah satunya adalah penentuan *boundary condition*. *Boundary condition* yang utama adalah konsentrasi klorida pada permukaan beton (C_s). Pada model yang dikembangkan nilai konsentrasi klorida diambil sama kandungan klorida pada air laut dimana sebenarnya nilainya tidak sama dengan dengan konsentrasi klorida pada air laut. Akan tetapi untuk penyederhanaan, maka konsentrasi klorida di dalam air laut ini digunakan sebagai pendekatan untuk menentukan nilai konsentrasi klorida pada permukaan beton. Hal ini menyebabkan konsentrasinya hasil perhitungan cenderung lebih tinggi bila dibandingkan dengan hasil eksperimental.



Gambar 6.8 Hasil Perhitungan Konsentrasi Klorida dan Hasil Eksperimental untuk kondisi 1 Jam Basah dan 7Jam Kering

Secara keseluruhan, hasil pemodelan selalu menghasilkan kandungan klorida yang lebih besar bila dibandingkan dengan hasil eksperimental. Pada aplikasi penggunaan perumusan difusi untuk material porous dengan kondisi basah dan kering pada dasarnya kandungan klorida yang dihitung seharusnya adalah yang berada pada *pore solution*.

Akan tetapi teknik pengukuran dengan cara ini sangat rumit sehingga lebih banyak peneliti yang mendekati dengan metode titrasi yakni dengan menghaluskan beton menjadi bentuk powder dan mengukur total klorida yang ada pada beton. Dengan teknik ini jumlah klorida yang termasuk dalam perhitungan adalah klorida yang *pore solution* dan juga klorida yang terabsorpsi secara fisik. Hal ini mengakibatkan jumlah klorida yang terukur menjadi lebih besar.

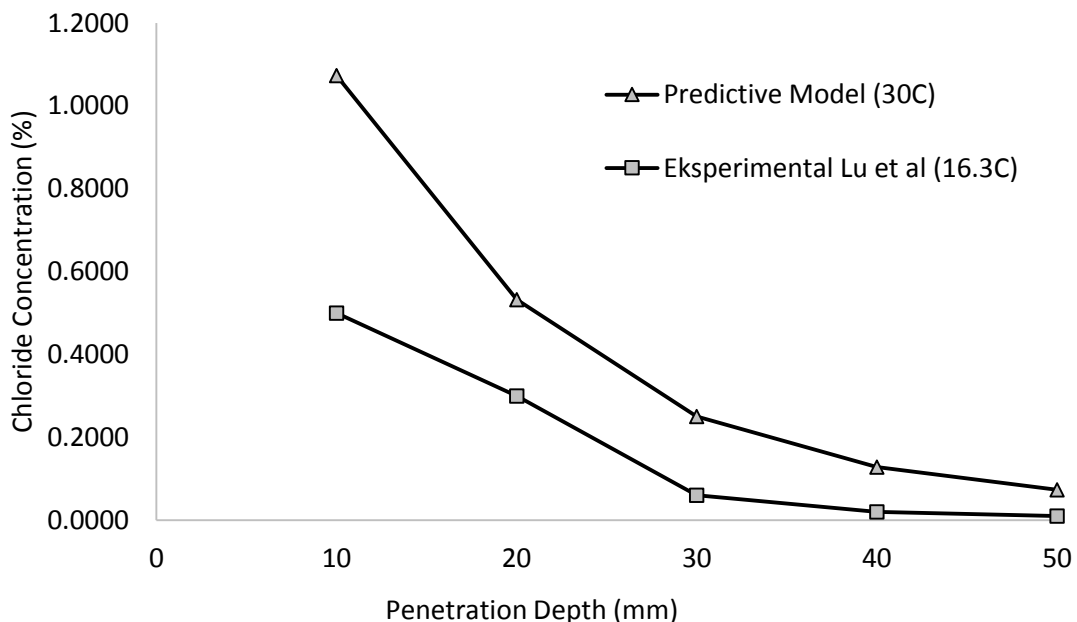


Gambar 6.9 Hasil Perhitungan Konsentrasi Klorida dan Hasil Eksperimental untuk kondisi 3 Jam Basah dan 5 Jam Kering

Untuk menguji keakuratan model, dilakukan validasi dengan menggunakan penelitian lain. Terdapat dua penelitian yang hasil eksperimentalnya digunakan sebagai bahan validasi model. Validasi pertama dilakukan dengan membandingkan hasil eksperimental yang dilakukan oleh Lu et al (Lu, Gao, Cui, & Liu, 2015) dengan model prediksi yang telah dikembangkan. Penelitian yang dilakukan oleh Lu et al ini menggunakan sampel berupa balok beton bertulang dengan dimensi 150 x150 x 400 mm dengan w/c sebesar 0.43. Sampel menggunakan pengujian dengan metode *wetting and drying* menggunakan larutan NaCl 5%. Durasi basah dan kering menggunakan rasio 1:1

yaitu dengan detail 7 jam basah dan 7 jam kering. Pengujian dilakukan secara terus menerus selama 30 minggu dalam suhu rata-rata sebesar 16.3°C dan kelembapan 76%.

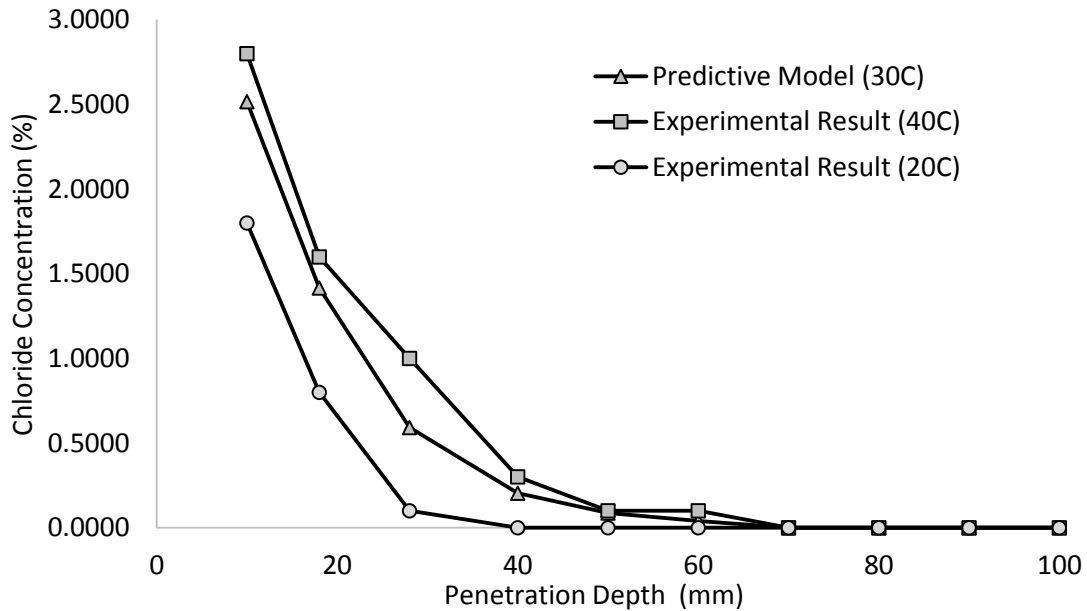
Gambar 6.10 menunjukkan hasil permodelan dibandingkan dengan hasil pengujian eksperimental yang dilakukan oleh Lu et al. Berdasarkan gambar tersebut, dapat terlihat bahwa hasil eksperimental dan pemodelan memiliki tren profil klorida yang sama. Akan tetapi bila ditinjau dengan lebih detail, hasil pemodelan cenderung menghasilkan konsentrasi klorida yang lebih besar. Hal ini disebabkan karena perbedaan suhu yang digunakan pada saat eksperimental dan referensi suhu yang digunakan pada model. Seperti yang telah dijelaskan pada awal bab ini, suhu yang digunakan pada eksperimental yang dilakukan oleh Lu et al adalah sebesar 16.3°C . Sedangkan suhu yang digunakan sebagai referensi pada model yang digunakan adalah sebesar $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$. Suhu ini dipilih untuk mengakomodasi suhu pada daerah tropis. Suhu daerah tropis khususnya Indonesia berkisar antara 25°C hingga 36°C dengan suhu rata-rata siang hari adalah 31.5°C dan malam hari 29.5°C . Untuk mengakomodasi hal tersebut maka dalam penelitian ini diambil kisaran suhu sebesar $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$.



Gambar 6.10 Hasil Pemodelan dan Pengujian Experimental Lu et al.

Penelitian yang dilakukan oleh Iqbal ini menggunakan benda uji silinder dengan dimensi 50 x 100 mm. Benda uji ditempatkan dalam dua kondisi temperatur yang berbeda

yaitu 20°C dan 40°C. Peneliti menggunakan NaCl dengan konsentrasi 6%. Beton yang digunakan memiliki w/c sebesar 0.5. Penelitian dilakukan selama 1 bulan dengan durasi basah sebesar 33 jam dan durasi kering sebesar 39 jam.



Gambar 6.11 Hasil Pemodelan dan Pengujian Experimental (Iqbal, 2008)

Berdasarkan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 6.11, tren profil klorida yang dihasilkan oleh hasil pemodelan sama dengan hasil eksperimental. Sehingga dapat disimpulkan bahwa model yang dikembangkan telah mampu mensimulasikan proses masuknya klorida ke dalam beton yang terpapar klorida dengan mekanisme basah dan kering. Dapat dilihat pula bahwa hasil pemodelan menghasilkan konsentrasi klorida yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan hasil eksperimental dengan kondisi temperatur 20°C dan lebih rendah bila dibandingkan dengan hasil eksperimental dengan kondisi temperature 40°C. Hal ini membuktikan bahwa temperatur mempengaruhi besarnya konsentrasi yang terjadi pada suatu lokasi yang sama. Perbedaan suhu seperti yang telah dibahas pada banyak penelitian sebelumnya sangat mempengaruhi kecepatan penetrasi klorida. Penelitian yang telah dilakukan oleh Yuan et al dan Iqbal telah membuktikan secara eksperimental bahwa suhu merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi proses masuknya klorida ke dalam beton (Iqbal, 2008; Yuan, Shi, Schutter, & Audenaert, 2009). Pada suhu yang lebih rendah, kecepatan penetrasi klorida cenderung lebih kecil bila dibandingkan dengan beton yang diletakkan pada suhu yang lebih tinggi. Untuk

membuktikan hal ini dilakukan validasi model dengan menggunakan hasil eksperimental yang dilakukan oleh Iqbal (Iqbal, 2008). Dengan melihat kenyataan tersebut maka kedepannya perlu dilakukan studi lebih lanjut terkait dengan pengaruh suhu terhadap kecepatan penetrasi klorida terutama untuk tropical area. Hal ini dikarenakan area tropis memiliki karakteristik suhu dan kelembapan yang cenderung berbeda bila dibandingkan dengan daerah empat musim.

Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB 7

MODEL PREDIKSI DISTRIBUSI KARAT DAN WAKTU INISIASI RETAK DENGAN PENDEKATAN KOROSI TIDAK SERAGAM

7.1 Umum

Bab ini menguraikan mengenai pengembangan model prediksi persebaran karat yang tidak merata di sepanjang perimeter tulangan. Untuk mempermudah analisa, beberapa peneliti mengasumsikan bahwa karat terbentuk secara merata di sepanjang perimeter tulangan. Akan tetapi pada praktek nya karat terbentuk secara tidak merata dan mengenerate *non-uniform internal pressure* pada beton. Hal ini mengakibatkan terbentuknya retak yang persebarannya juga tidak merata disepanjang perimeter tulangan. Oleh karena itu selain mengembangkan model untuk persebaran karat yang tidak merata, sebuah model untuk memprediksi waktu inisiasi retak akibat korosi yang tidak merata juga akan dibahas dalam report ini.

7.2 Model Prediksi Distribusi Karat Tidak Seragam Pada Beton

Setelah proses inisiasi korosi terjadi maka karat akan terbentuk. Sebagian besar peneliti mengasumsikan bahwa karat terbentuk secara seragam (*uniform*) disekeliling tulangan. Padahal pada prakteknya, korosi lebih dulu terjadi pada tulangan yang berada pada permukaan yang mengalami kontak langsung dengan air laut. Sedangkan pada permukaan lainnya korosi akan terjadi kemudian. Oleh karena itu pemodelan proses propagasi karat hingga inisiasi retak dilakukan dengan menggunakan asumsi *non-uniform corrosion*.

Karena proses inisiasi korosi yang terjadi tidak seragam, maka perkembangan produk korosi juga tidak merata. Berdasarkan hasil ekspermental yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa produk korosi terbentuk tidak seragam dimana penumpukan produk korosi lebih banyak terjadi pada permukaan tulangan yang berhadapan langsung dengan air laut. Dengan melihat distribusi korosi yang terjadi maka digunakan perumusan umum *Gaussian Function with Normal Random Variable* yang ditampilkan sebagai berikut:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], -\infty < x < \infty \quad (7.1)$$

Dimana:

μ = titik tengah dari nilai puncak atau maksimum

σ = nilai standar deviasi atau Gaussian RMS width

$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}}$ = ketinggian atau nilai puncak dari kurva

Perumusan tersebut menghasilkan grafik kurva normal dimana bentuk kurva tersebut akan digunakan sebagai simplifikasi dari distribusi karat yang tidak merata (*non-uniform rust distribution*). Beberapa penyesuaian dilakukan terhadap perumusan diatas agar dapat mensimulasikan proses korosi yang sebenarnya. Zhao telah mengembangkan perumusan untuk menormalisasi hasil eksperimental dengan dasar yang sama yaitu *Gaussian function* (Zhao, Hu, et al., 2011).

$$T_r = \frac{a_1}{a_2\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{\theta-\pi}{\sqrt{2}a_2}\right)^2} + a_3 \quad (7.2)$$

Dimana

a_1 = *Non uniform coefficient of rust layer* ; $a_1 = 49 \rho$

a_2 = *Spread coefficient of rust layer* ;

a_3 = *Uniform coefficient of rust layer* ;

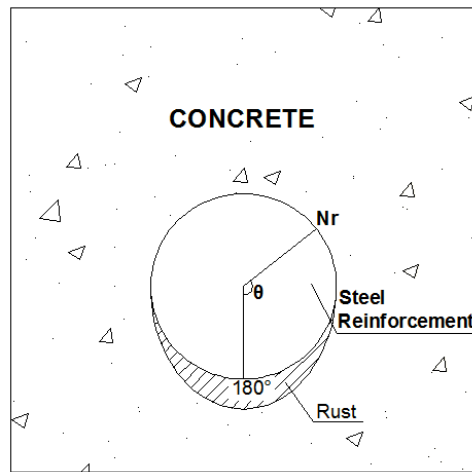
$a_3=0$ Bila korosi hanya terdapat pada sebagian dari perimeter tulangan

$a_3=1.46 T_{r-\min}$ Bila korosi terdapat di sepanjang perimeter tulangan

Perumusan tersebut terbukti telah dapat mensimulasikan ketebalan karat yang terbentuk secara *non-uniform*. Akan tetapi, perumusan tersebut berbasis pada analisa regresi yang berdasar pada data persebaran karat hasil eksperimental. Hal ini mengakibatkan perumusan ini tidak dapat digunakan sebagai prediksi karena untuk mendapatkan variable yang digunakan dalam perumusan tersebut, analisa terhadap karat yang terbentuk pada struktur yang ditinjau harus dilakukan terlebih dahulu.

Pada disertasi ini, faktor *corrosion rate* dan waktu akan digunakan sebagai variable untuk mendapatkan persamaan yang dapat digunakan untk mensimulasikan proses propagasi karat secara *non-uniform*. Ketidakseragaman ketebalan karat yang terbentuk

dideskripsikan kedalam fungsi polar koordinat seperti ditunjukkan pada Gambar 7.1. Posisi ketebalan maksimum diumpamakan terjadi pada saat $\theta = 180^\circ$.



Gambar 7.1 Koordinat Polar untuk Plotting Distribusi Karat

Berdasarkan pada Hukum Faraday maka massa dari produk korosi yang terbentuk per unit luas permukaan akibat dari arus yang diberikan dapat dihitung dengan menggunakan perumusan berikut:

$$M_{th} = \frac{W I_{app} T}{F} \quad (7.3)$$

Dimana:

M_{th} = Massa produk korosi per unit surface (gram)

W = Berat equivalen dari baja tulangan (27.925 gr)

I_{app} = Applied Current Density (Amp/cm²)

T = Exposed Duration

F = Konstanta Faraday (96487 Amp – sec)

Sedangkan massa produk korosi sebenarnya berdasarkan dari eksperimental sesuai dengan ASTM GI dapat diketahui dengan menggunakan perumusan berikut:

$$M_{ac} = \frac{W_i - W_f}{\pi DL} \quad (7.4)$$

Dimana:

M_{ac} = Massa Aktual produk korosi per unit surface (gr)

W_i = Berat inisial dari tulangan sebelum terkorosi (gr)

W_f = Berat akhir dari tulangan setelah terkorosi (gr)

D = Diameter dari tulangan (cm)

L = Panjang Tulangan (cm)

Prosentase korosi juga dapat dihitung dengan membandingkan antara selisih berat tulangan sebelum dan setelah terkorosi dengan berat inisial dari tulangan seperti ditunjukkan pada perumusan berikut ini

$$\rho = \frac{(W_i - W_f)}{W_i} \times 100 \quad (7.5)$$

Dengan mengasumsikan bahwa massa produk korosi yang terbentuk bila dihitung secara teoritis dan aktual adalah sama, maka *equivalent corrosion current density* (I_{corr}) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$I_{corr} = \frac{(W_i - W_f) F}{\pi D L W T} \quad (7.6)$$

Dari persamaan diatas dapat juga ditulis bahwa:

$$(W_i - W_f) = \frac{I_{corr} \pi D L W T}{F} \quad (7.7)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan diatas kedalam persamaan prosentase korosi maka didapatkan persamaan berikut:

$$\rho = \frac{I_{corr} \pi D L W T}{F W_i} \times 100 \quad (7.8)$$

Luasan produk korosi yang terbentuk disepanjang perimeter tulangan (A_r) dipengaruhi oleh luas penampang tulangan awal (A_s), prosentase korosi (ρ), serta *volume expansion ratio* dari produk korosi yang terbentuk (n). Dengan mengasumsikan bahwa produk korosi yang terbentuk adalah merata disepanjang perimeter tulalangan maka didapatkan persamaan berikut:

$$A_r = \rho A_s n \quad (7.9)$$

Bila keliling tulangan adalah $\pi.D$, maka ketebalan karat yang terbentuk secara merata disepanjang perimeter tulangan (U_n) dapat dituliskan dalam persamaan berikut:

$$U_n = \frac{A_r}{\pi D} \quad (7.10)$$

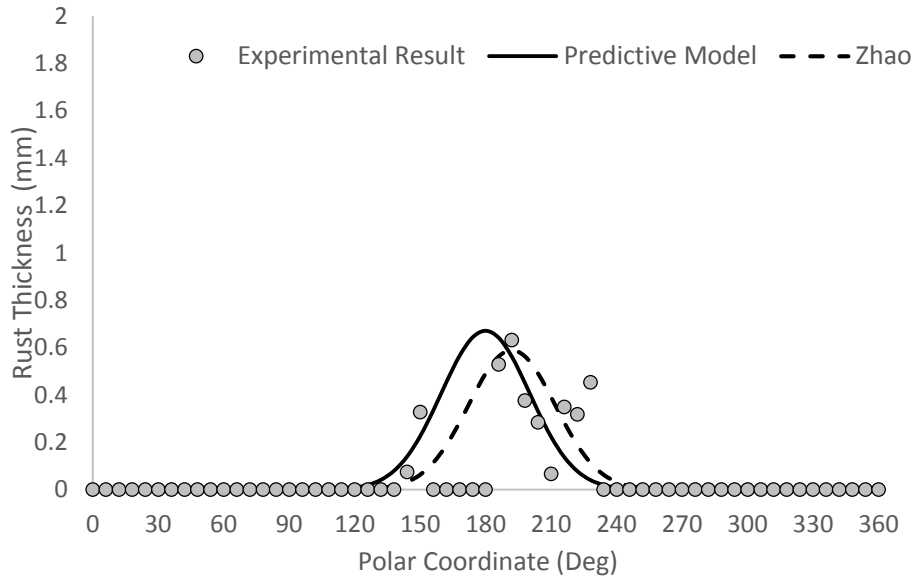
Dalam persamaan Zhao ketebalan produk korosi yang terbentuk dianggap sebagai penjumlahan antara koefisien a_1 dan a_3 yang dimana pada perumusan yang dikembangkan kali ini penjumlahan nilai tersebut dideskripsikan sebagai U_n . Persebaran produk korosi dideskripsikan ke dalam persamaan $\frac{e^{-n(\theta-\pi)^2}}{2\sqrt{2\pi T}}$. Persebaran produk korosi ini dipengaruhi oleh *expansion ratio* dari produk korosi dan waktu. Semakin besar *expansion ratio* dari produk korosi, maka kurva yang dihasilkan akan semakin ramping begitu pula sebaliknya. Selain *expansion ratio*, waktu juga mempengaruhi persebaran produk korosi. Hal yang sama juga ditukkan oleh persamaan regresi yang dikemukakan oleh Zhao dimana waktu akan mempengaruhi besarnya *spread coefficient*. Semakin bertambahnya waktu maka ekspansi yang terjadi akan semakin lambat karena pori-pori pada tulangan dan beton telah terisi oleh produk korosi. Berdasarkan persamaan diatas dan dengan mengadopsi persamaan Gauss dan maka ketebalan produk korosi secara tidak seragam disepanjang perimeter tulangan (N_r) dapat dituliskan dengan persamaan berikut.

$$N_r = U_n \frac{e^{-n(\theta-\pi)^2}}{2\sqrt{2\pi T}} \quad (7.11)$$

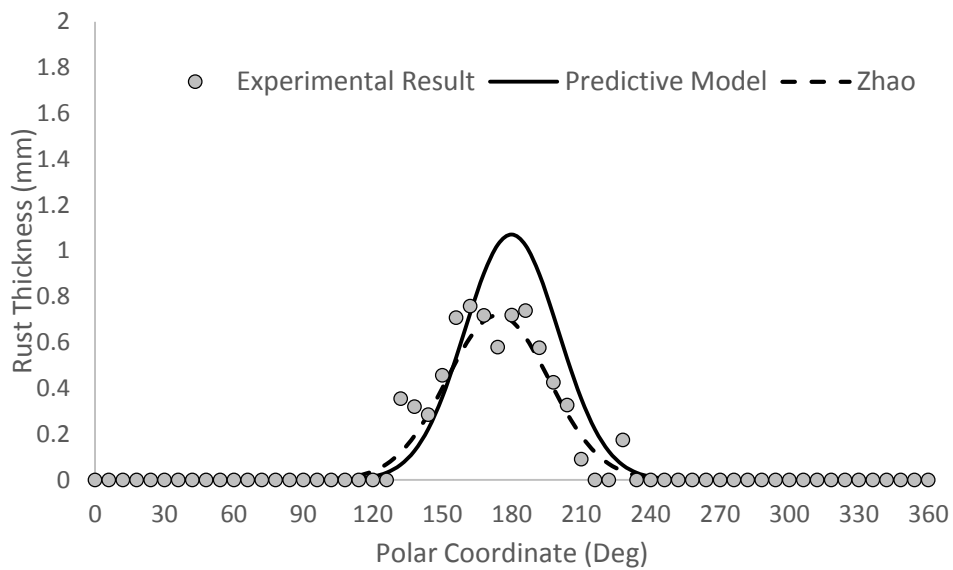
Untuk memvalidasi model prediksi yang telah dihasilkan, maka hasil prediksi tersebut akan dibandingkan dengan hasil eksperimental yang telah dilakukan sebelumnya. Perhitungan dengan menggunakan perumusan yang dikemukakan oleh Zhao juga digunakan sebagai salah satu pembandingan dari model prediksi yang telah dihasilkan. Data yang digunakan pada perhitungan ini adalah berdasarkan data *exposure condition* yang didapatkan dari hasil eksperimental.

Gambar 7.2 dan Gambar 7.3 menunjukkan grafik persebaran karat antara hasil analisa eksperimental, model prediksi dan perumusan yang dikemukakan oleh Zhao pada hari ke 6 dan 10. Pada awal waktu *exposure*, terlihat pada hari ke-6 dan ke-10 eksperimental, tebal produk korosi maksimum yang terjadi telah mencapai 0.4 mm dan 0.8 mm. Hasil distribusi karat dari model prediksi maupun hasil dari uji eksperimental memiliki tren yang sama. Akan tetapi, hasil perhitungan dari model prediksi menunjukkan ketebalan produk korosi yang lebih tinggi dibandingkan hasil eksperimental dan persamaan Zhao. Selain itu dapat dilihat pada grafik tersebut, kurva hasil model prediksi menunjukkan luasan area yang lebih besar bila dibandingkan dengan hasil eksperimental

maupun kurva hasil perhitungan dengan menggunakan perumusan pendekatan yang dikemukakan oleh Zhao.



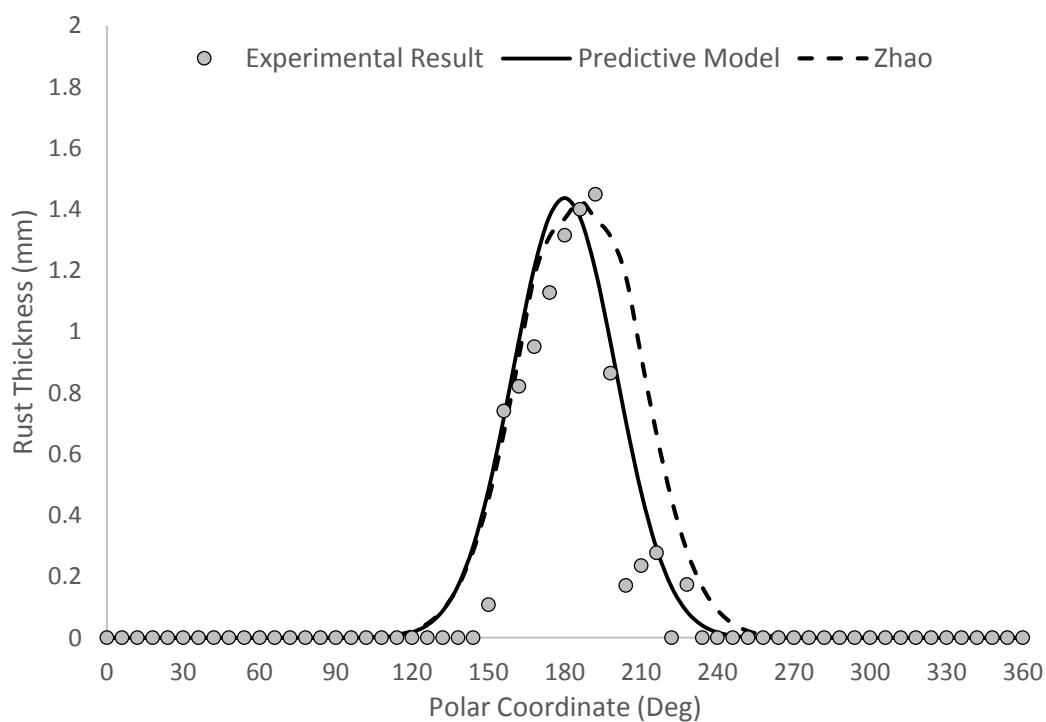
Gambar 7.2 *Non-Uniform Distribution* Karat pada hari ke 6



Gambar 7.3 *Non-Uniform Distribution* Karat pada hari ke 10

Sedikit berbeda dengan pengamatan pada hari ke-6 dan ke-10, Gambar 7.4 dan 7.5 menunjukkan bahwa pada hari ke-15 dan hari ke-20 hasil obeservasi menunjukkan puncak ketebalan karat hasil dari model yang sedikit lebih rendah dari pada eksperimental dan perhitungan dengan menggunakan perumusan Zhao. Akan tetapi, dapat dilihat pula

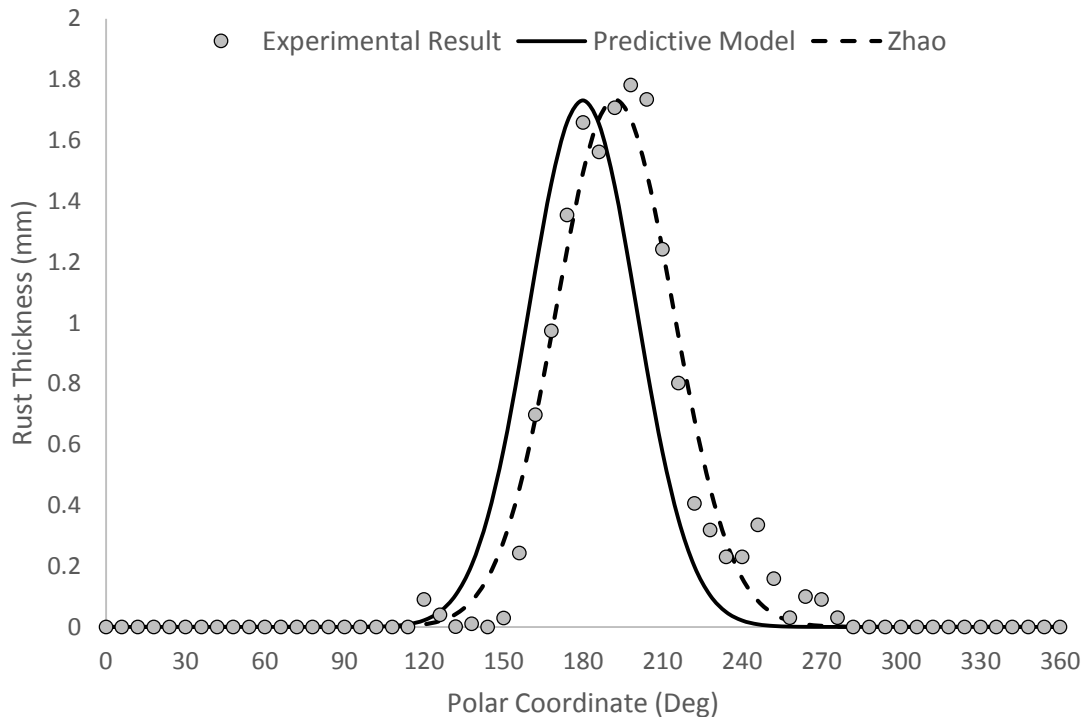
dari kurva bahwa jumlah produk korosi yang terbentuk hasil dari *predictive* model menghasilkan jumlah produk korosi yang lebih besar bila dibandingkan dengan hasil eksperimental maupun model Zhao. Hasil ini menunjukkan kecenderungan yang sama dengan hasil sebelumnya. Hasil dari *predictive* model ini menunjukkan jumlah keseluruhan dari produk korosi yang dihasilkan termasuk produk korosi yang masuk ke dalam celah retak. Sedangkan untuk perhitungan dengan menggunakan model Zhao maupun hasil eksperimental tidak memperhitungkan jumlah produk korosi yang masuk ke dalam celah retak.



Gambar 7.4 *Non-Uniform Distribution* Karat pada hari ke 15

Hasil yang ditunjukkan pada Gambar 7.2 hingga Gambar 7.5 menunjukkan adanya *shifting* pada puncak kurva hasil perhitungan dengan menggunakan model yang dikembangkan bila dibandingkan dengan hasil eksperimental maupun perhitungan dengan perumusan yang dikemukakan oleh Zhao. Adanya *shifting* ini menunjukkan puncak kurva yang merupakan representasi dari tebal karat terbesar antara hasil model dan eksperimental tidak sama. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, model yang dikembangkan menggunakan $\theta = 180^\circ$ sebagai puncak dari kurva dimana titik ini merupakan titik yang paling dekat dengan *exposed surface*. Akan tetapi pada kenyataan yang sebenarnya, karat lebih banyak menumpuk pada bagian ulir yang letaknya tidak

dapat ditentukan secara pasti. Setiap benda uji akan memiliki posisi ulir yang berbeda satu dengan yang lain sehingga untuk penyederhanaan model yang dikembangkan mengasumsikan letak ulir berada pada titik $\theta = 180^\circ$.

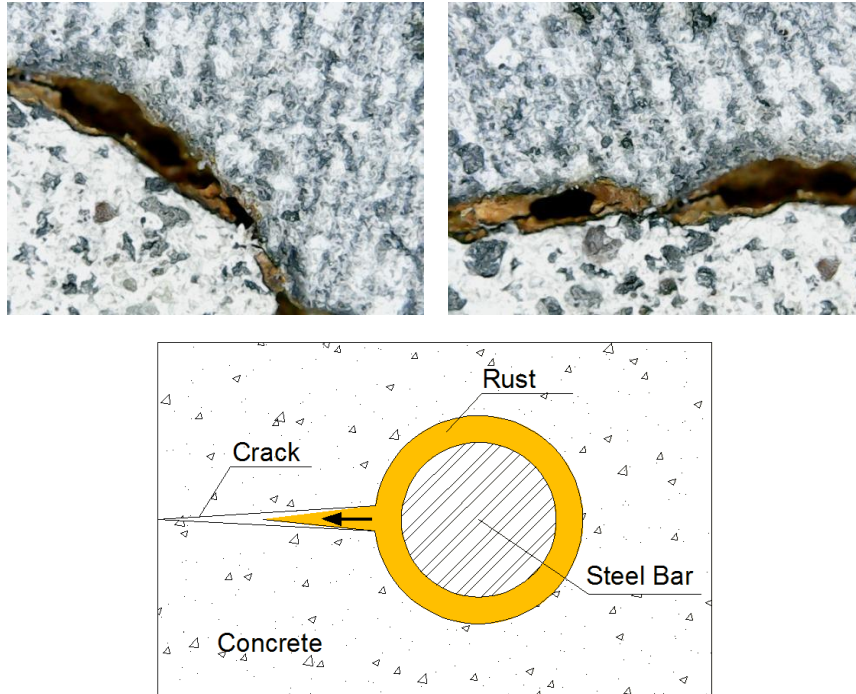


Gambar 7.5 *Non-Uniform Distribution* Karat pada hari ke 20

Seperti yang telah dikemukakan sebelumnya bahwa terdapat perbedaan luasan karat yang terbentuk hasil dari pengamatan eksperimental dan perhitungan dengan menggunakan model. Hal tersebut kemungkinan besar disebabkan oleh adanya karat yang masuk ke dalam celah retak seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.6.

Gambar 7.6 diatas menunjukkan produk korosi yang masuk ke dalam celah-celah retak. Hal ini menyebabkan pada saat observasi dan pengukuran dilakukan terhadap jumlah produk korosi yang terbentuk di sepanjang perimeter tulangan, sebagian produk korosi yang masuk kedalam celah retak tidak termasuk dalam jumlah karat yang terobservasi. Selain itu, Zhao juga mengemukakan bahwa perumusan yang telah dikemukakan sebelumnya tidak mempertimbangkan jumlah produk korosi yang masuk ke dalam celah karat. Oleh karena itu, dapat dilihat bahwa kurva hasil model yang dikemukakan oleh Zhao lebih mendekati hasil eksperimental yang ada dibandingkan dengan kurva hasil model prediksi. Namun, perlu diingat bahwa untuk dapat mengenerate

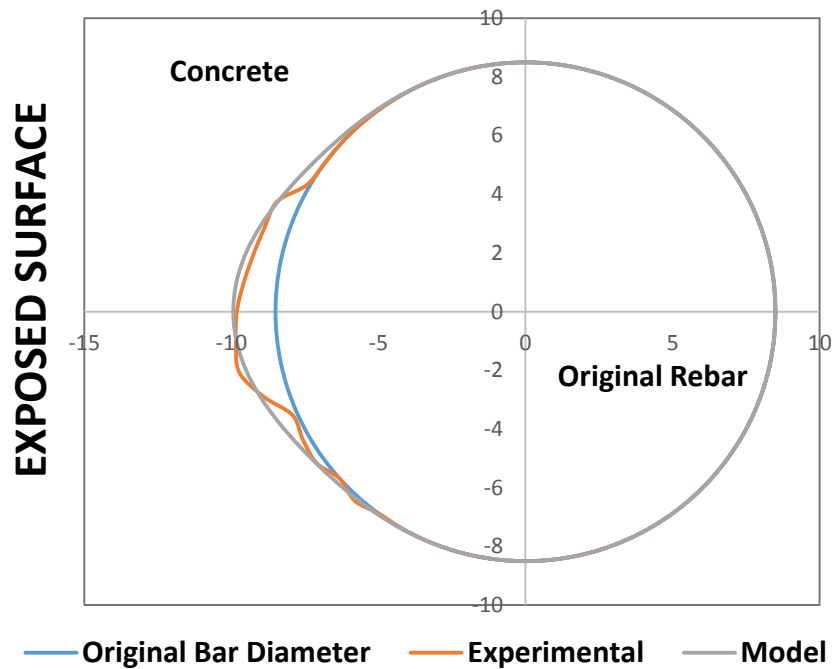
kurva dengan persamaan Zhao beberapa parameter seperti a_1 , a_2 dan a_3 harus dicari terlebih dahulu berdasarkan hasil pengamatan eksperimental.



Gambar 7.6 Produk Korosi di Sepanjang Retak yang Terjadi

Tabel 7.1 Hasil Perhitungan Luasan Karat Eksperimental dan Model

<i>Exposure Time</i>	<i>Rust Area Model</i>	<i>Rust Area Experimental</i>	Δ Area	Differences	<i>Rust Area in Crack Opening</i>
(Days)	(mm ²)	(mm ²)	(mm ²)	%	(mm ²)
2	4.492	4.021	0.471	10.49	0.398
6	5.566	4.844	0.722	12.97	0.682
10	9.205	8.280	0.925	10.05	0.774
15	13.190	11.669	1.521	11.53	1.391
20	15.839	14.205	1.635	10.32	1.497



Gambar 7.7. Ilustrasi Distribusi Karat Hasil Experimental dan Model

7.3 Model Waktu Inisiasi Retak

Waktu inisiasi terjadinya retak pada beton akibat korosi terjadi apabila besarnya *critical tensile stress* akibat bertambahnya produk korosi telah melampaui besarnya kapasitas tegangan tarik dari beton. Beberapa peneliti telah mengembangkan persamaan berdasarkan teori *thick walled cylinder* yang telah umum digunakan untuk mensimulasikan beban *pressure* pada suatu pipa. Dengan mengasumsikan bahwa beton adalah material yang bersifat *elastic homogenous* dengan besarnya *inner radius* sebesar $(D+2d_o)/2$ dan *outer radius* sebesar $C + (D+2d_o)/2$ dimana C adalah ketebalan selimut beton dan D adalah diameter tulangan, maka besarnya beban *pressure* yang terjadi akibat ketebalan produk korosi dapat dituliskan dengan persamaan 7.12 berikut ini (C. Li, Melchers, & Zheng, 2007):

$$P = -\sigma_r(a) = \frac{E_{ef}d_s(t)}{a\left(\frac{b^2+a^2}{b^2-a^2} + \nu_c\right)} \quad (7.12)$$

Dimana:

$$a = \frac{D+2d_o}{2} \quad (7.13)$$

$$b = \frac{D+2d_0}{2} + C \quad (7.14)$$

C = Tebal selimut beton

σ_r = Radial stress

E_{ef} = Modulus Elastisitas Efektif Beton

ν_c = Poisson's ratio beton

d_s = Ketebalan karat (*uniform*)

Retak akan terjadi pada beton ketika stress yang terjadi akibat karat telah mencapai nilai tertentu. Karat akan menyebabkan *internal pressure load* yang akan menyebabkan *tensile stress* pada beton. Berdasarkan teori *pressure vessel* yang dibebani oleh *internal pressure*, besarnya beban pressure dapat dilitung dengan menggunakan perumusan berikut:

$$P = \frac{2Cf_t}{(D+2d_0)} \quad (7.15)$$

Teori tersebut dijelaskan pula pada penelitian yang dilakukan oleh Liu and Weyers (Liu & Weyers, 1998). Dimana, C adalah ketebalan selimut dan f_t adalah kekuatan tarik dari beton. Dengan menggunakan persamaan 7.12 dan 7.15 dan mengasumsikan bahwa *pressure* yang terjadi telah mengakibatkan *failure* maka didapatkan bahwa ketebalan produk korosi yang mengakibatkan terjadinya retak dapat dituliskan dalam 7.16 sebagai berikut:

$$d_s(t) = \frac{Cf_t}{E_f} \left(\frac{b^2+a^2}{b^2-a^2} + \nu_c \right) \quad (7.16)$$

Karena ketebalan produk korosi merupakan *variable time dependent*, maka waktu yang dibutuhkan untuk menghasilkan keretakan dapat diketahui. Bila d_s (pers. 7.16) dianggap sebagai ketebalan produk korosi secara *non-uniform* (pers. 7.11) maka waktu inisiasi korosi *non-uniform* ($T_{cr,in}$) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$T_{cr,in} = \sqrt[1.5]{\left[\left(\frac{C f_t F W_i 2\sqrt{2\pi}}{E_f I_{corr} L W A_s n e^{-4(\theta-\pi)^2}} \right) \left(\frac{b^2+a^2}{b^2-a^2} + \vartheta_c \right) \right]} \quad (7.17)$$

Dimana:

W_i = Berat inisial dari tulangan sebelum terkorosi

D = Diameter dari tulangan

C = Selimut Beton

L = Panjang Tulangan

A_s = Luas Penampang Tulangan

I_{corr} = *equivalent corrosion current density*

$$a = \frac{D+2d_o}{2} \quad (7.18)$$

$$b = \frac{D+2d_o}{2} + C \quad (7.19)$$

σ_r = *Radial stress*

E_{ef} = Modulus Elastisitas Efektif Beton

ϑ_c = *Poisson's ratio* beton

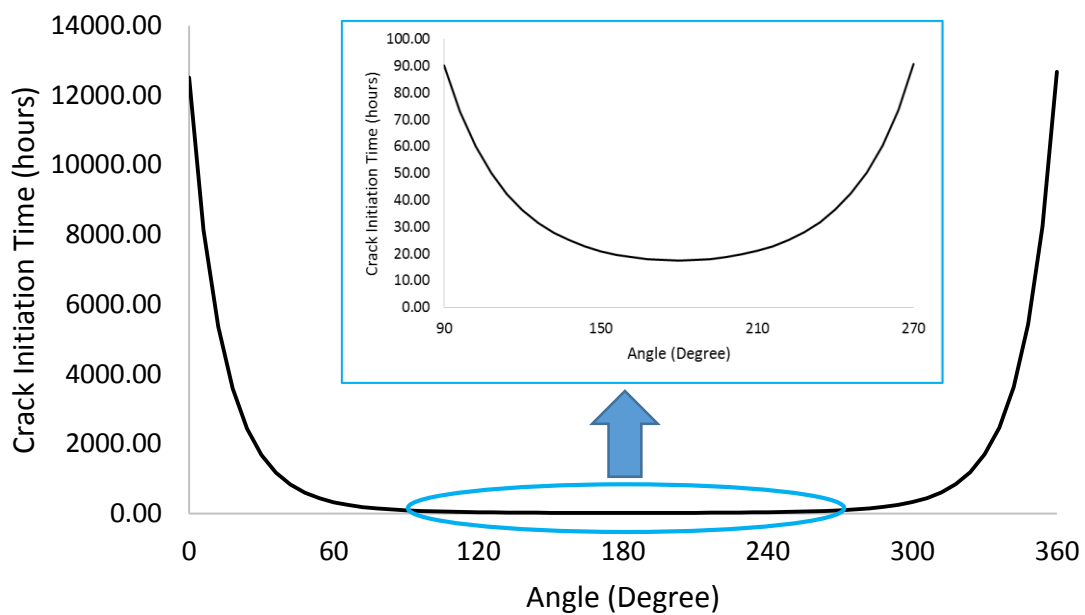
d_s = Ketebalan karat (*uniform*)

Waktu korosi ini dihitung setelah proses korosi terjadi dan tidak termasuk waktu masuknya klorida pada saat fase inisiasi korosi. Selanjutnya akan dijelaskan validasi model keretakan yang dihasilkan dan hasil eksperimental. Berdasarkan hasil pengamatan eksperimental, retak sudah terlihat pada hari ke dua setelah experimental dilaksanakan. Gambar 7.8 menunjukkan hasil perhitungan waktu retak dari sampel.

Berdasarkan hasil perhitungan, didapatkan waktu iniasi retak terjadi 17.48 jam setelah pengujian dengan percepatan. Hal ini sesuai dengan hasil eksperimental yang menunjukkan keretakan telah terjadi pada hari ke dua. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa waktu retak dihitung setelah proses korosi terjadi dan waktu inisiasi korosi tidak diperhitungkan ke pada perumusan ini.

Seiring dengan bertambahnya waktu pengujian, retak mulai muncul pada bagian lain. Hal ini terlihat juga dari hasil pemodelan yang menunjukkan retak mulai terbentuk pada bagian lain di sepanjang perimeter. Gambar 7.8 memperlihatkan bahwa hingga waktu akhir pengujian eksperimental, yakni pada hari ke 20, retak sudah terbentuk mulai

dari sudut 48° hingga 312° . Hasil ini juga sesuai dengan hasil eksperimental seperti ditunjukkan pada Gambar 5.9 dimana pada hari ke 20 retak sudah mulai terjadi di bagian tersebut. Berdasarkan perhitungan dengan perumusan 7.12 didapatkan bahwa tebal produk korosi yang dibutuhkan untuk menginisiasi retak adalah sebesar 0.0073 mm. Bila dibandingkan dengan hasil pengamatan ketebalan retak pada hari ke 2, ketebalan retak maksimum adalah sebesar 0.1 mm. Hal ini sekali lagi membuktikan bahwa retak terjadi pada pada hari ke 2 dari hasil eksperimental.



Gambar 7.8 Hasil Perhitungan Waktu Inisiasi Retak

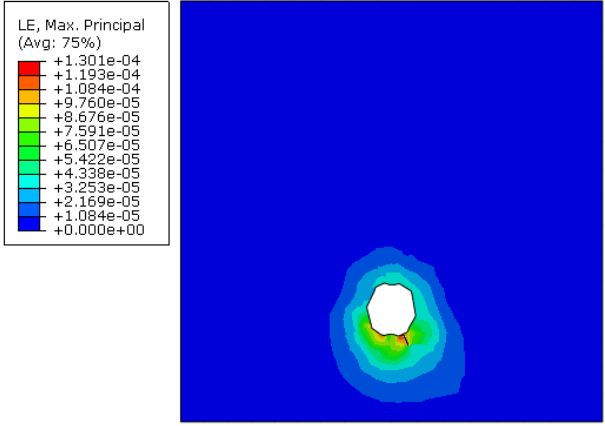

Untuk memperoleh hasil simulasi yang lebih riil, maka dilakukan pemodelan dengan bantuan program berbasis *finite element* yaitu Abaqus CAE. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan *Extended Finite Element Method* untuk mensimulasikan proses perambatan retak yang terjadi. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan pendekatan *Extended Finite Element (XFEM)* yang dikombinasikan dengan penggunaan *concrete damage plasticity* pada *material properties* dari beton tersebut. Pemodelan dengan teknik ini memungkinkan propagasi retak dapat terlihat secara diskrit. Model yang digunakan adalah 2D plannar dengan tipe deformable yang memiliki tipe *plannar shell*.

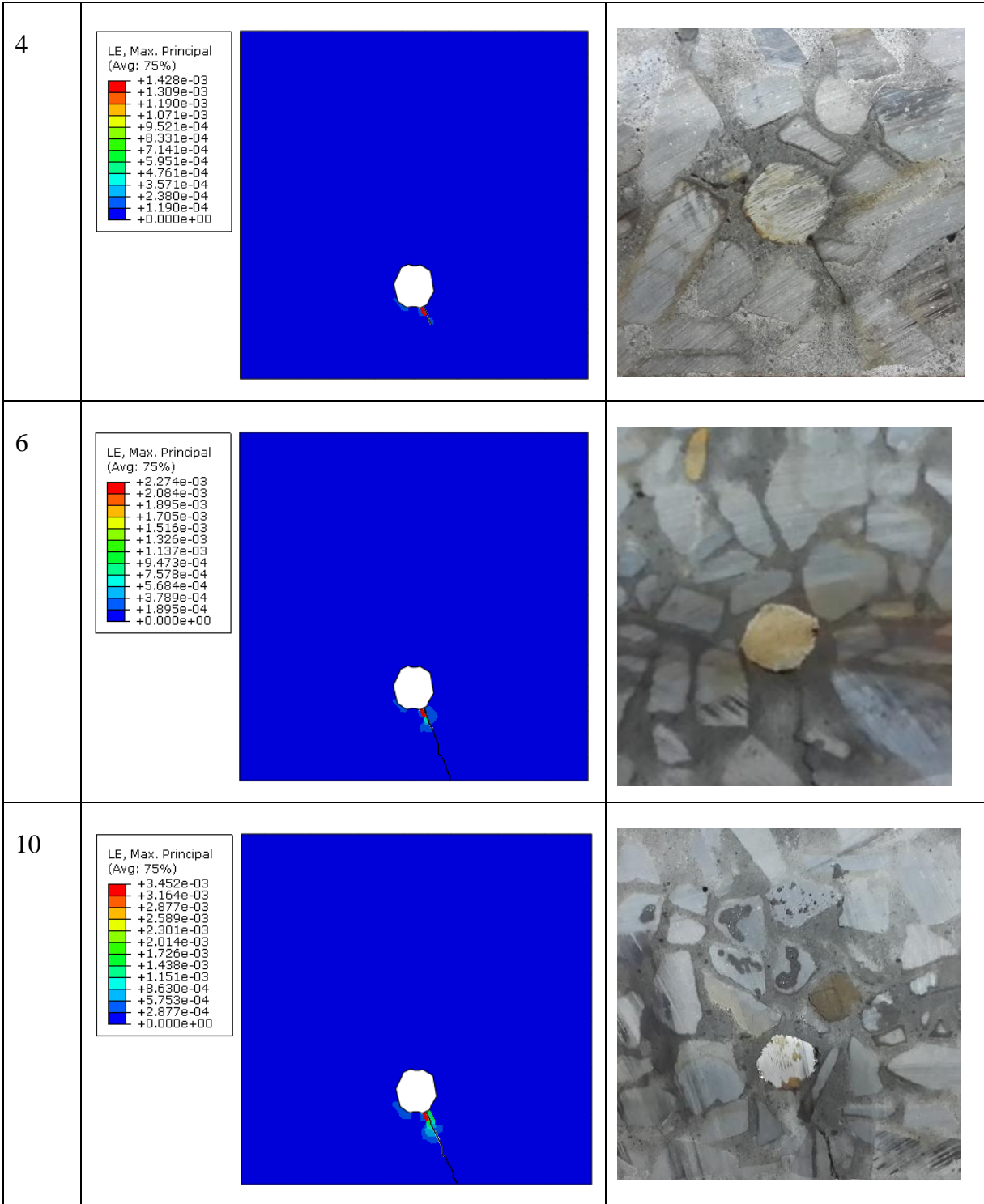
Properties yang digunakan di pemodelan ini mengacu pada hasil analisa material *input XFEM crack model*. Dalam analisa tersebut dinyatakan bahwa pemodelan ini menggunakan dua parameter yakni *elastic material behaviour* dan *traction separation*

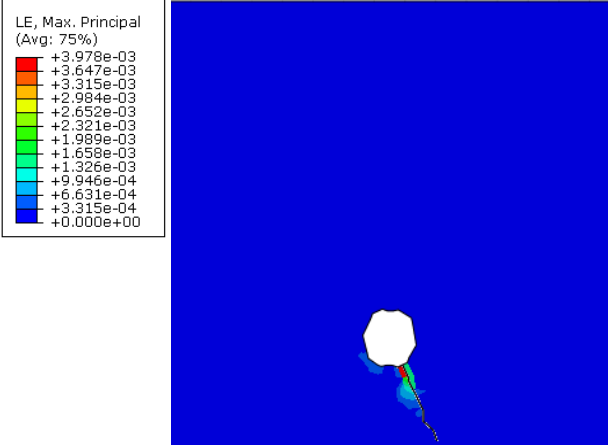

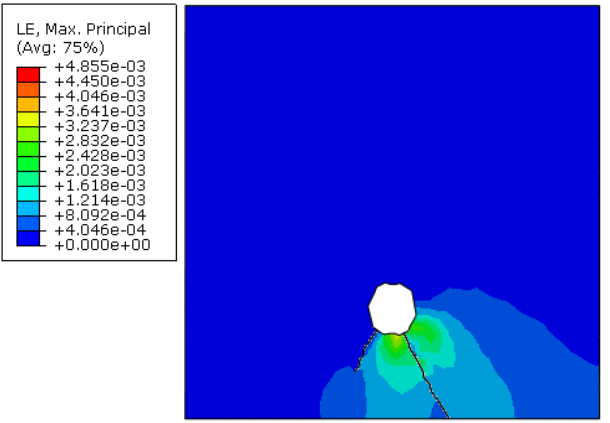

Maxps. Penggunaan *traction separation Maxps* berdasarkan pemilihan data yang digunakan yakni peninjauan terhadap *damage initiation* yang didefinisikan terhadap *maksimum principal stress*. Nilai parameter *traction separation Maxps* didapatkan berdasarkan hasil pengujian kuat tarik belah beton. Berdasarkan output analisa tersebut didapatkan parameter input *maximal principal stress* f_r sebesar 2.807 MPa. Pada *Maxps Damage parameter* didefinisikan nilai *damage evolution* yang bertujuan untuk pendefinisian sifat material berdasarkan pertumbuhan *damage* sehingga pada akhirnya menyebabkan kegagalan. *Damage evolution* pada pemodelan mengacu kepada nilai parameter *fracture energy*. Berdasarkan analisa yang telah dilakukan berdasarkan Gambar 4.7 didapatkan nilai *fracture energy* sebesar $G_f = 0.08 \text{ N/mm}$.

Beban dihitung dengan menggunakan persamaan 7.12 dengan mengganti variable ds dengan menggunakan variable N_r pada persamaan (7.11). Dengan menggunakan teknik ini beban dapat tesebar secara non-uniform disepanjang perimeter tulangan sesuai dengan ketebalan karat yang terbentuk.

Tabel 7.2 Perbandingan Hasil Pemodelan Pola Retak dengan Menggunakan Abaqus dan Hasil Pengamatan Eksperimental

Hari Ke-	Abaqus	Experimental
2		



15		
20		

Tabel 7.2 menunjukkan hasil pemodelan dengan menggunakan program Abaqus CAE. Extended Finite Element (XFEM) digunakan untuk memodelkan retak secara diskrit sehingga pola retak terlihat dengan jelas dan bukan hanya sebatas kontur dan konsentrasi tegangan. Berdasarkan tabel tersebut dapat terlihat bahwa retak yang dihasilkan dari pemodelan memiliki pola yang sama dengan hasil eksperimental. Pada hari ke dua, nilai regangan maksimum yang terjadi adalah sebesar 0.00013. Hasil regangan hari kedua ini sudah melebihi dari nilai *tensile strain* dari beton yaitu sebesar 0.00012 sehingga retak telah terjadi pada hari ini. Retak pertama terjadi pada titik diantara dua ulir. Hal ini menunjukkan bahwa retak perma memiliki kecenderungan terjadi pada bagian ulir dari tulangan karena pada bagian ini korosi lebih cepat terjadi sehingga penumpukan karat terjadi pada bagian ini. Hasil ini sesuai dengan hasil pengamatan eksperimental dimana pada hari ke dua retak juga telah terjadi di lokasi yang sama.

Setelah mengalami keretakan pertama, retak terus berpropagasi hingga hingga mencapai *exposed surface* dari beton. Nilai regangan maksimum yang terjadi juga

semakin bertambah. Pada hari ke dua puluh, terdapat retak sekunder yang juga muncul pada bagian kiri bawah. Hal ini sesuai dengan

7.4 Pemodelan Waktu Propagasi Retak Hingga Mencapai Permukaan Beton

Waktu propagasi retak dimulai dari waktu retak pertama (*crack initiation*) hingga retak mencapai permukaan beton. Seperti yang telah dijelaskan pada sub bab sebelumnya bahwa retak telah terinisiasi pada hampir semua lokasi di sepanjang perimeter tulangan. Akan tetapi hasil ekpserimental memperlihatkan bahwa hanya terdapat beberapa retak yang berpropagasi hingga mencapai selimut beton. Kenyataan ini didukung juga oleh pernyataan beberapa peneliti yang menyatakan bahwa seiring dengan bertambahnya *pressure*, hanya *single crack* yang dapat berpropagasi hingga mencapai selimut beton (Nguyen et al. 2006; Ohtsu and Yoshimura, 1997). Bila dilihat secara sederhana, propagasi retak sangat tergantung pada kualitas beton dan ketebalan selimut beton. Semakin besar cover beton maka propagasi akan semakin lama sedangkan semakin baik kualitas beton maka propagasi akan berjalan semakin lambat. Berdasarkan hal ini maka waktu mulai retak pertama hingga mencapai cover beton adalah sebagai berikut:

$$T_{sr,in} = \frac{C}{Wc} \quad (7.20)$$

Dimana C adalah selimut beton dan Wc adalah rasio air semen yang digunakan pada beton tersebut. Dengan menggunakan perhitungan ini didapatkan waktu terjadinya retak pertama permukaan beton dihitung dari waktu retak pertama terjadi hingga mencapai cover beton adalah 80 jam. Tabel 7.3 dibawah ini menunjukkan data pengukuran lebar retak hasil dari pengujian eksperimental.

Berdasarkan data tersebut dapat terlihat bahwa retak pada permukaan telah terjadi diantara hari ke 4 hingga ke 6. Hal ini ditunjukkan dengan sudah mulai terlihatnya retak pada hari ke 6 dengan ketebalan retak pada permukaan adalah sebesar 0.05 mm. Hal ini sesuai dengan hasil yang didapat dari hasil pemodelan yang menunjukkan bahwa retak terjadi pada kisaran 80 jam setelah retak pertama terjadi. Sehingga dapat disimpulkan bahwa perumusan yang dikembangkan dapat memprediksi waktu terjadinya retak pada beton dengan kondisi dan batasan-batasan yang telah ditetapkan sebelumnya.

Tabel 7.3. Hasil Pengamatan Retak Eksperimental

Hari ke	Waktu Pengambilan Data (WIB)	Δ Time (hours)	Total Time (hours)	Max Crack Width at Cross Section (mm)	Max Crack Width at Surface (mm)	Keterangan
1	10.00	0	0	0	0	Corrosion Initiation
2	10.30	24.5	24.5	0.1	0	Crack Initition
3	13.30	27	51.5	0.15	0	Crack Propagation to Surface
4	13.30	24	75.5	0.25	0	Crack Propagation to Surface
6	14.00	24.5	100	0.4	0.05	Surface Crack Propagation
10	14.00	24.5	124.5	1	0.1	Surface Crack Propagation
15	14.00	24.5	149	1.2	0.3	Surface Crack Propagation
20	14.00	24.5	173.5	1.3	0.5	Surface Crack Propagation

7.5 Perhitungan Waktu Retak Sebenarnya

Perhitungan waktu retak sebenarnya dapat dilakukan dengan mengacu pada penelitian yang pernah dilakukan oleh Vu dkk pada tahun 2006. Penelitian tersebut menyatakan bahwa waktu retak sebenarnya dapat dicari apabila waktu retak secara eksperimental, *real corrosion current density* dan *experimental corrosion current density* diketahui nilainya. Dengan menggunakan persamaan yang dikeluarkan oleh Vu dkk maka waktu retak sebenarnya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Vu, Stewart, & Mullard, 2006)

$$t_{cr(real)} = k_R \times \frac{i_{corr(exp)}}{i_{corr(real)}} t_{cr(exp)} \quad (7.21)$$

Dimana i_{corr} adalah *corrosion current density* dan $t_{cr(exp)}$ adalah waktu retak yang didapatkan dari hasil eksperimental. Nilai k_R dapat dicari dengan menggunakan perumusan 7.22. berikut ini (Vu et al., 2006).

$$k_R \approx 0.95 \left[\exp \left(-\frac{0.3 i_{corr(exp)}}{i_{corr(real)}} \right) - \frac{i_{corr(exp)}}{2500 i_{corr(real)}} + 0.3 \right] \quad (7.22)$$

Nilai dari *corrosion current density* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut

$$i_{corr} = \frac{27(1-\frac{w}{c})^{-1.64}}{dc} \quad (7.23)$$

Dimana $\frac{w}{c}$ adalah faktor air semen beton dan dc adalah ketebalan selimut beton. Untuk penelitian ini didapatkan nilai i_{corr} sebesar $2.01 \mu A/cm^2$. Tabel 7.4 menunjukkan hasil perhitungan retak sebenarnya hasil dari eksperimental dan model. Hasil perhitungan terhadap hasil eksperimental menunjukkan retak pertama terjadi pada 0.276 tahun atau sekitar 3.2 bulan setelah korosi mulai terjadi. Sedangkan hasil perhitungan terhadap model yang dikembangkan menghasilkan waktu retak yang lebih cepat yakni sekitar 0.189 tahun atau 2.3 bulan setelah korosi terjadi.

Tabel 7.4. Perhitungan Waktu Retak Sebenarnya Hasil Experimental dan Model

Status	Max Crack Width at Surface (mm)	Cracking Time Exp	Cracking Time Model	Real Cracking Time (Experimental)		Real Cracking Time (Model)	
				Hours	Year	Hours	Year
Inner Crack Initition	0	24.5	17.48	2327	0.276	1660	0.189
Surface Crack Initiation	0.05	100	80	9500	1.084	7600	0.868
Crack Surface Propagation	0.1	124.5	N/A	11827.5	1.350	N/A	N/A
Crack Surface Propagation	0.3	149		14155	1.616		
Crack Surface Propagation	0.5	173.5		16482.5	1.882		

Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB 8

KESIMPULAN

Bagian ini membahas mengenai kesimpulan dari disertasi yang telah disusun. Berdasarkan penelitian dan analisa yang telah dilakukan dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Siklus basah dan kering sangat mempengaruhi *properties* dari beton seperti porositas, kuat tekan dan kuat tarik. Pada awal paparan, kekuatan tekan dan tarik beton mengalami peningkatan yang juga ditunjukkan dengan bertambahnya nilai porositas tertutup. Seiring dengan bertambahnya waktu paparan, kekuatan beton semakin menurun akibat *chloroaluminates* yang terbentuk sebagai akibat dari masuknya klorida ke dalam beton. Hal ini ditandai oleh menurunnya nilai porositas tertutup dan meningkatnya nilai porositas terbuka.
2. Hasil pengamatan pengujian korosi dipercepat dengan metode galvanostatik menunjukkan bahwa produk korosi tersebar secara tidak merata di sepanjang perimeter tulangan. Hal ini disebabkan bagian yang paling dekat dengan *exposed surface* mengalami korosi terlebih dahulu dibandingkan dengan bagian lainnya.
3. Hasil eksperimental menunjukkan retak juga tidak terjadi di sepanjang perimeter tulangan tapi hanya pada beberapa bagian. Retak mulai terlihat pada *interface* antara beton dan tulangan bagian bawah (yang paling dekat dengan *exposed surface*) pada hari ke-2. Retak terus berpropagasi hingga mencapai *exposed surface* pada hari ke-4.
4. Hasil pengamatan pengujian dengan metode *wetting and drying* menunjukkan perbedaan permukaan beton dengan siklus basah dan kering dan beton yang berada pada kondisi *fully submerged*. Beton dengan siklus basah dan kering memiliki permukaan yang lebih kasar dan terdapat beberapa bagian yang mengalami *spalling*.
5. Hasil eksperimental juga menunjukkan bahwa perbedaan durasi basah dan kering juga mempengaruhi kecepatan penetrasi klorida ke dalam beton dan juga kondisi mikrostruktur beton.

6. Pengembangan model telah dilakukan untuk memprediksi masuknya klorida ke dalam beton dengan mempertimbangkan siklus basah dan kering. Model ini memodifikasi Hukum Fick II dengan menambahkan koefisien terkait dengan durasi basah dan kering. Berdasarkan validasi yang telah dilakukan model yang dihasilkan dapat memprediksi masuknya klorida ke dalam beton baik untuk kondisi *fully submerged* maupun basah dan kering. Secara umum perbedaan yang dihasilkan antara model dan eksperimental mencapai 6.24% dimana model menghasilkan konsentrasi yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan hasil eksperimental.
7. Model distribusi karat secara tidak merata juga telah dilakukan. Model ini mengadopsi Hukum Faraday dan *Gaussian function with normal random variable* untuk dapat memprediksi jumlah dan distribusi karat yang terbentuk. Berdasarkan hasil validasi dapat disimpulkan bahwa model yang dikembangkan menghasilkan jumlah karat yang lebih besar dibandingkan dengan hasil eksperimental. Rata-rata perbedaan jumlah karat yang dihasilkan mencapai 11.07%. Meskipun jumlah karat yang dihasilkan lebih besar, akan tetapi distribusi karat yang dihasilkan oleh model sudah mampu mendeskripsikan distribusi karat yang sebenarnya dari hasil eksperimental.
8. Model waktu retak juga dikembangkan dalam penelitian ini berdasarkan pada teori *thick walled cylinder*. Karat yang terbentuk diasumsikan akan menghasilkan expansive pressure pada beton yang akan menyebabkan beton tersebut mengalami keretakan. Berdasarkan hasil perhitungan, didapatkan waktu iniasi retak terjadi 17.48 jam setelah pengujian dengan percepatan. Hasil ini sedikit lebih cepat bila dibandingkan dengan hasil eksperimental yang menunjukkan keretakan telah terjadi pada hari ke dua (24 jam setelah pengujian dimulai). Hasil pengamatan eksperimental menunjukkan retak berpropagasi hingga mencapai *exposed surface* beton pada hari ke 6 atau 100 jam setelah pengujian dimulai. Sedangkan hasil dari model menghasilkan waktu yang lebih cepat yakni 80 jam.
9. Hasil pemodelan dengan menggunakan pendekatan XFEM juga menunjukkan bahwa model yang dikembangkan menunjukkan pola retak yang mendekati hasil eksperimental. Dapat dilihat bahwa retak mulai terjadi pada hari ke 2

dimana regangan yang terjadi telah melebihi regangan tarik beton hasil dari eksperimental.

Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB 9

FUTURE WORK

Seiring meningkatnya pembangunan infrastruktur di daerah maritim, penelitian terkait korosi pada infrastruktur terutama yang berasal dari material beton merupakan penelitian yang sangat penting untuk dilakukan. Meskipun penelitian yang telah dilakukan pada disertasi ini telah terbukti dapat memprediksi proses inisiasi korosi hingga retak pada beton, akan tetapi masih terdapat beberapa keterbatasan dan hal-hal yang belum dimasukkan ke sebagai variable dalam pengujian maupun pengembangan model. Oleh karena itu terdapat beberapa penelitian ke depan yang dapat dilakukan antara lain.

1. Perbedaan kondisi lingkungan merupakan faktor yang sangat mempengaruhi proses transportasi klorida ke dalam beton. Sebagai contoh, berdasarkan validasi yang dilakukan pada sub bab 6.4 perbedaan temperatur sangat jelas mempengaruhi kecepatan penetrasi klorida. Oleh karena itu penelitian lebih lanjut terkait efek perbedaan kondisi lingkungan terhadap kecepatan transportasi klorida ke dalam beton dan wata inisiasi dan propagasi retak perlu dilakukan.
2. Pada penelitian ini beban luar masih belum digunakan dalam kegiatan eksperimental dan pemodelan keretakan. Model yang dikembangkan hanya terbatas akibat peningkatan volume dari karat. Padahal dalam kondisi sebenarnya adanya tambahan beban luar sangat mempengaruhi properties dari beton yang dapat mempercepat proses keretakan pada beton. Oleh karena itu penelitian lebih lanjut perlu dilakukan untuk mengamati efek dari adanya beban luar terhadap waktu retak yang terjadi.
3. Pada penelitian ini masih digunakan tulangan tunggal pada beton. Pada kenyataannya fakta di lapangan selalu menggunakan lebih dari satu tulangan utama dan tulangan geser. Penggunaan lebih dari satu tulangan akan menmah beban pressure pada beton yang akan mempercepat keretakan yang terjadi. Oleh karena itu penelitian lebih lanjut diperlukan terkait hal ini.
4. Efek siklus basah dan kering dalam jangka panjang juga perlu diteliti lebih lanjut karena terdapat kemungkinan untuk terjadinya perubahan perilaku transport pada beton. Selain itu pengaruh keretakan terhadap mekanisme transport pada beton juga perlu diamati lebih lanjut.

5. Pengembangan suatu sistem monitoring pada struktur terhadap korosi yang terintegrasi sangat perlu untuk mulai dikaji. Sistem monitoring ini akan sangat berguna untuk menetapkan atau memprediksi umur layan struktur serta waktu *maintenance* dari struktur yang berada dalam kondisi lingkungan dan jenis material yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM Standard C33. (2003). *Specification for Concrete Aggregates*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- ASTM Standard C12. (2001). *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregat*. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM Standard C128. (2001). *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- ASTM C143 / C143M. (2000). *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- ASTM Standard C39/C39M. (2001). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM Standard C496/C496-96. (1996). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM Standard C1202. (1997). *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM Standard C1723. (2010). *Standard Guide for Examination of Hardened Concrete Using Scanning Electron Microscopy*. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM Standard C1218/C1218M. (1999). *Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in mortar and Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM Standard C 114. (2003). *Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement*. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- Angst, U., & Vennesland, Ø. (2009). Critical chloride content in reinforced concrete—State of the art. *Proceeding of Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II*, Eds:Alexander et al, Taylor & Francis Group, London (pp. 311–318).
- Bazant, Z. P. (2002). Concrete Fracture Models : Testing and Practice. *Engineering Fracture Mechachanics*, 69, 165–205.
- Cao, C., & Cheung, M. M. S. (2014). Non-uniform rust expansion for chloride-induced pitting corrosion in RC structures. *Construction and Building Materials*, 51, 75–81. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.042>

- Chen, D., & Mahadevan, S. (2008). Chloride-induced reinforcement corrosion and concrete cracking simulation. *Cement and Concrete Composites*, 30(3), 227–238. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.10.007>
- Fang, C., Lundgren, K., Chen, L., & Zhu, C. (2004). Corrosion Influence on Bond in Reinforced Concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(11), 2159–2167. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.006>
- Iqbal, P. O. (2008). *Chloride Transport Coupled with Moisture Migration in Non Saturated Concrete Exposed to Marine Environmet and Application to Cracked Concrete*. Disertasi Ph.D., University of Tokyo, Tokyo Jepang.
- Johannsson, B., & Reitzel, P. (2011). *Numerical Analysis of a Reinforced Concrete Beam in Abaqus 6.10*. Master Thesis, Aalborg University, Aalborg Denmark.
- Kumar, V., Singh, R., & Quraishi, M. A. (2013). A Study on Corrosion of Reinforcement in Concrete and Effect of Inhibitor on Service Life of RCC, *Journal of Material Enviromental Science* 4(5), 726–731.
- Kwan, A. K. H., & Wong, H. H. C. (2011). Durability of Reinforced Concrete Structures, Theory vs Practice, *Proceedings of Hong Kong Government Standing Committee on Concrete Technology Annual Concrete Seminar*, (pp. 1–20), Hong Kong.
- Li, C. ., Lawanwisut, W., Zheng, J. J., & Kijawatworawet, W. (2005). Crack Width Due to Corroded Bar in Reinforced Concrete Structures. *International Journal of Materials and Structural Reliability*, 3 No 2(September), 87–94.
- Liu, Y. (1996). Modeling the Time-to-Corrosion Cracking of the Cover Concrete in Chloride Contaminated Reinforced Concrete Structures. Disertasi Ph.D., Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Liu, Y., & Weyers, R. (1998). Modeling Time to Corrosion Cracking in Chloride Contaminated Reinforced Concrete Structures. *ACI Materials Journals*, 95, 675–681.
- Monteiro, P. (2013). Durability of concrete: ability to resist weathering action, chemical attack, abrasion, or any process of deterioration. Presentation, University of California.
- Muthulingam, S., & Rao, B. N. (2014). Non-Uniform Time-to-Corrosion Initiation in Steel Reinforced Concrete under Chloride Environment. *Corrosion Science*, 82, 304–315. <http://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.01.023>
- Nuroji. (2004). Penggabungan Model Smeared dan Discrete Crack pada Analisis Struktur Beton Bertulang Dengan Memperhitungkan Pengaruh Bond-Slip. Disertasi Ph.D., Institut Teknologi Bandung.
- Schweitzer. (1996). *Corrosion Engineering Handbook*. Newyork: Marell Decker, Inc., New York.

- Shi, X., Xie, N., Fortune, K., & Gong, J. (2012). Durability of Steel Reinforced Concrete in Chloride Environments: an Overview. *Construction and Building Materials*, 30, 125–138. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.038>
- Silva, N. (2013). *Chloride Induced Corrosion of Reinforcement Steel in Concrete: Threshold Values and Ion Distributions at the Concrete-Steel Interface*. Disertasi PhD., Chalmers University of Technolog, Gothenburg Swedia.
- Sobhani, J., & Ramezaniapur, A. A. (2007). Chloride-Induced Corrosion of RC Structures, *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, 8(5), 531–547.
- Sudjono, A. S. (2007). Prediksi Waktu Layan Bangunan Beton Terhadap. *Civil Engineering Dimension*, 7(1), 6–15.
- Vu, K., Stewart, M. G., & Mullard, J. (2006). Corrosion-Induced Cracking : Experimental Data and Predictive Models, *ACI Structural Journals*, (102), 719–726.
- 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
- Webster, M. P. (2000). The Assessment of Corrosion-Damaged Concrete Structures, Disertasi Ph.D, University of Birmingham UK.
- Wilson, J. (2013). *Accelerated Artificial Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Slabs Using the Half- Cell Potential Method*. University of Massachussets Lowell, Massachusets Amerika
- Wong, H. S., Zhao, Y. X., Karimi, a. R., Buenfeld, N. R., & Jin, W. L. (2010). On The Penetration of Corrosion Products From Reinforcing Steel into Concrete due to Chloride-Induced Corrosion. *Corrosion Science*, 52(7), 2469–2480. <http://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.03.025>
- Zhao, Y., Hu, B., Yu, J., & Jin, W. (2011). Non-uniform distribution of rust layer around steel bar in concrete. *Corrosion Science*, 53(12), 4300–4308. <http://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.08.045>
- Zhao, Y., Karimi, A. ., Wong, H. S., Hu, B., Buenfeld, N. R., & Jin, W. (2011). Comparison of uniform and non-uniform corrosion induced damage in reinforced concrete based on a Gaussian description of the corrosion layer. *Corrosion Science*, 53(9), 2803–2814. <http://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.05.017>
- Zhao, Y., Xu, H., & Jin, W. (2013). Concrete cracking process induced by steel corrosion-A review. *Proceeding of EASEC Conference* (pp. 1–10).
- Zhao, Y., Yu, J., Hu, B., & Jin, W. (2012). Crack shape and rust distribution in corrosion-induced cracking concrete. *Corrosion Science*, 55, 385–393. <http://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.11.002>

Zhao, Y., Yu, J., & Jin, W. (2011). Damage analysis and cracking model of reinforced concrete structures with rebar corrosion. *Corrosion Science*, 53(10), 3388–3397. <http://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.06.018>

Zhao, Y., Yu, J., Wu, Y., & Jin, W. (2012). Critical thickness of rust layer at inner and out surface cracking of concrete cover in reinforced concrete structures. *Corrosion Science*, 59, 316–323. <http://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.03.018>