



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PERILAKU KOROSI PADA BAJA TULANGAN DALAM  
BETON GEOPOLIMER ABU TERBANG DALAM MEDIA  
AQUADES DAN AIR LAUT ASTM**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**DINA NOERMALASARI**

**0606074760**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL**

**DEPOK**

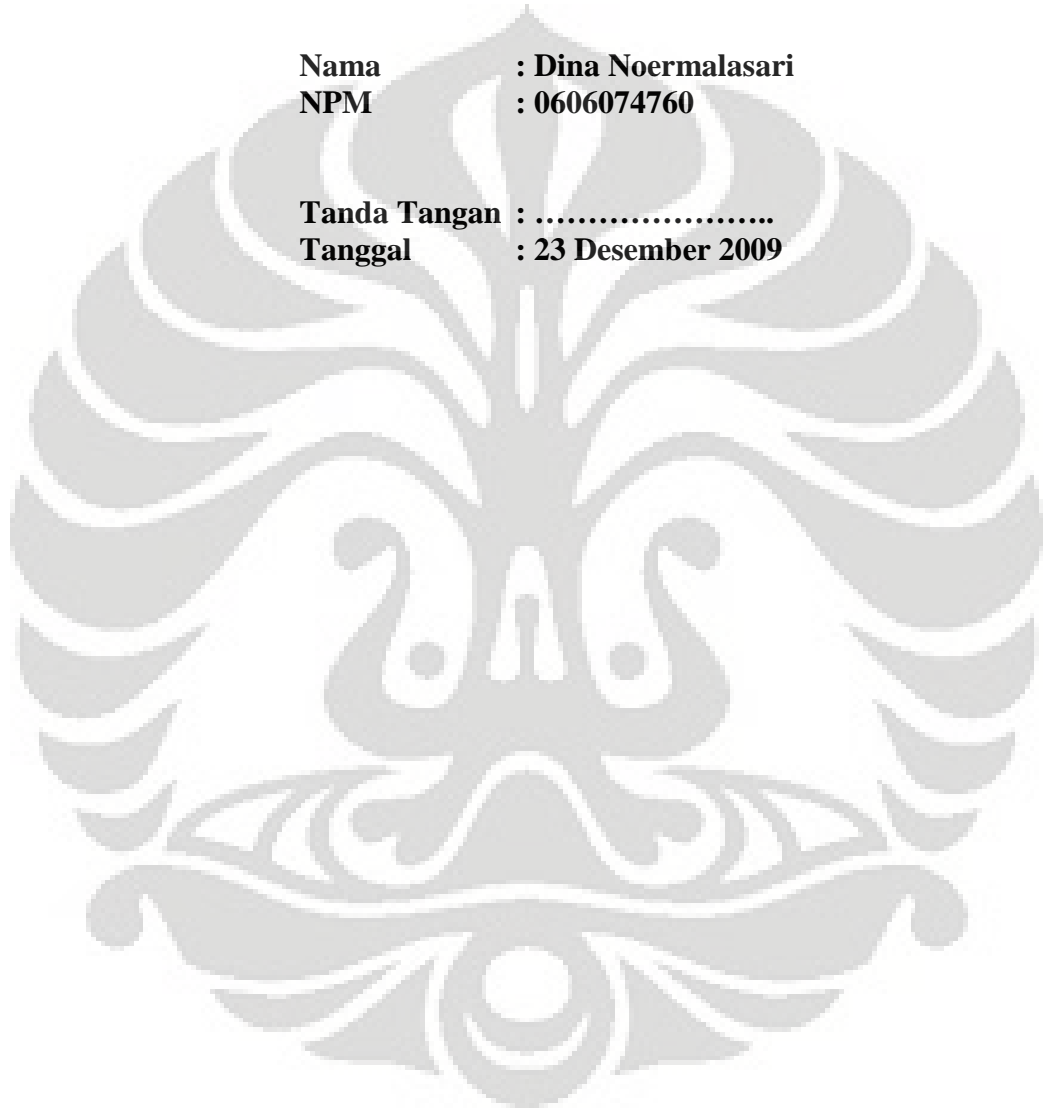
**DESEMBER 2009**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : Dina Noermalasari**  
**NPM : 0606074760**

**Tanda Tangan : .....**  
**Tanggal : 23 Desember 2009**



## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Dina Noermalasari  
NPM : 0606074760  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Perilaku Korosi Pada Baja Tulangan Dalam Beton Geopolimer Abu Terbang Dalam Media Aquades dan Air Laut ASTM

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Sotya Astutiningsih, M.Eng. ( )

Penguji 1 : Prof. Dr. Ir. Johnny Wahyuadi, DEA ( )

Penguji 2 : Ir. Dwi Marta Nurjaya, M.T ( )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 29 Desember 2009

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Metalurgi dan Material di Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai masa penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

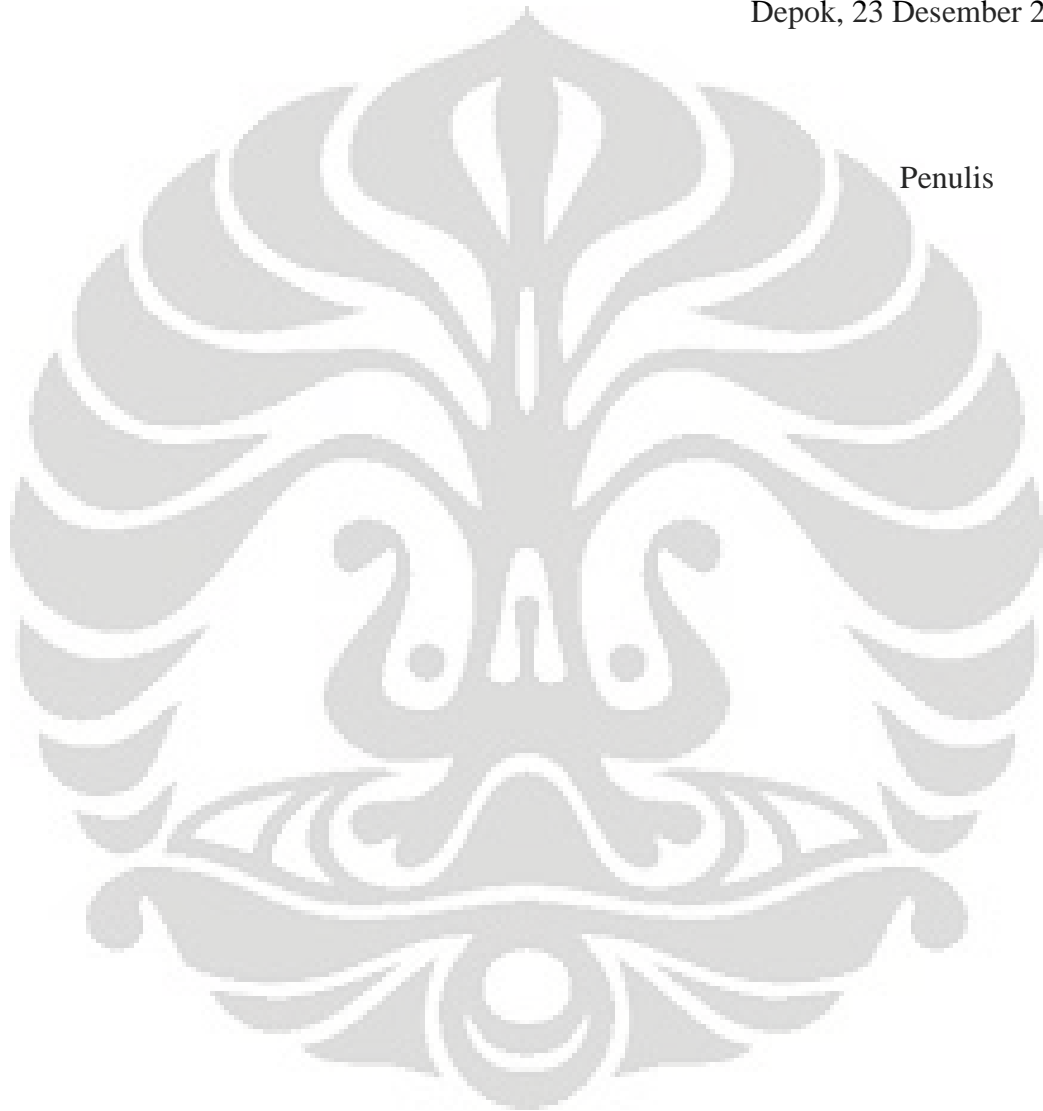
- (1) Dr. Ir. Sotya Astutiningsih, M.Eng selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu untuk memberi pengarahan, diskusi, dan bimbingan serta persetujuan sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.
- (2) Prof. Dr. Ir. Johnny Wahyuadi, DEA selaku pembimbing akademik dan ayah bagi kita semua. Terima kasih untuk perhatian dan dukungan dari masa perkuliahan sampai masa penyusunan skripsi ini.
- (3) Ir. And Rustandi, M.T sebagai kepala laboratorium korosi dan pembimbing konsultasi dalam penelitian ini.
- (4) Laboratorium Korosi Departemen Teknik Metalurgi dan Material yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data yang saya perlukan. Terima kasih asisten-asisten yang baik.
- (5) Laboratorium Struktur Departemen Teknik Sipil dan Laboratorium Kimia Departemen Teknik Kimia atas bantuan untuk memperoleh data pengujian.
- (6) Ayah dan Ibu yang telah memberi cinta, dukungan moral, semangat, dan doa sehingga skripsi ini dapat selesai dengan baik. Terima kasih telah menjadi ayah dan ibu no.1 di dunia. *This is for you.*
- (7) Mbak Witha, Mas Oky, Ade ndut Nuril dan Ade Debbie sebagai sahabat dan saudara terbaik yang telah memberi dukungan dan perhatian.
- (8) Bude Cileng, Pakde Don, Tante Is, dan Om Budi yang telah memberi banyak dukungan dan doa.
- (9) Mbak Niken dan Mas Kamil sebagai partner dan sahabat yang telah memberi banyak bantuan dalam menyelesaikan skripsi ini.

(10) Teman-teman metalurgi 2006 yang telah membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

\Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa banyak manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 23 Desember 2009

Penulis



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS  
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Dina Noermalasari  
NPM : 0606074760  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Departemen : Metalurgi dan Material  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**Perilaku Korosi Pada Baja Tulangan Dalam Beton Geopolimer Abu  
Terbang Dalam Media Aquades dan Air Laut ASTM**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis atau pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada Tanggal : 23 Desember 2009  
Yang menyatakan

( Dina Noermalasari )

## ABSTRAK

Nama : Dina Noermalasari  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul : Perilaku Korosi Pada Baja Tulangan Dalam Beton Geopolimer Abu Terbang Dalam Media Aquades dan Air Laut ASTM

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perilaku korosi pada baja tulangan dalam beton geopolimer berbahan dasar abu terbang serta daya tahan beton pada kondisi normal dan agresif (air laut) dengan membandingkannya terhadap beton konvensional dengan desain campur beton sama. Proses korosi dipercepat dengan pemberian potensial tinggi pada baja tulangan sehingga diperoleh hasil pengujian yang layak dalam waktu yang relatif singkat. Pada hari pertama pengujian, baja dalam beton geopolimer berada pada daerah korosi dengan potensial  $-0,293V$ ; pH 7,2 di aquades dan  $-0,427V$ ; pH 8,2 di air laut. Setelah 10 hari, baja tulangan dalam aquades berada di daerah pasif dengan potensial  $-0,183V$ ; pH 10 sedangkan di air laut, baja berada di daerah korosi dengan potensial  $-0,327V$  dan pH 9. Namun demikian, baja tulangan pada beton konvensional di dalam aquades dan air laut berada pada daerah korosi dari hari pertama hingga hari ke-10. Pada hari pertama pengujian, baja berada pada potensial  $-0,529$ ; pH 7,2 di aquades sedangkan di air laut, potensial baja  $-0,205V$ ; pH 8,2. Setelah 10 hari, nilai potensial baja sekitar  $-0,543 V$ ; pH 7,2 di aquades dan  $-0,319$ ; pH 8,2 di air laut. Oleh karena itu, beton geopolimer memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap korosi dibandingkan beton konvensional karena terjadi polikondensasi dari alumina dan silika membentuk *cross linked* aluminosilikat sehingga dapat menghambat difusi dari oksigen dan ion-ion agresif seperti ion klorida. Selanjutnya, kuat tekan beton geopolimer sebesar 45,3 Mpa lebih tinggi dibandingkan beton konvensional yaitu sekitar 39,49 Mpa dengan desain campur sama.

Kata kunci: air laut, aquades, beton geopolimer, potensial korosi

## ABSTRACT

Name : Dina Noermalasari  
Study Program : Metallurgy & Materials Engineering  
Title : Corrosion Behavior of Steel Bar in Fly Ash-Based Geopolymer Concrete in Aquades and ASTM Seawater

The purpose of this research was to study corrosion behavior of steel bar in fly ash-based geopolymer concrete and durability in aquades and ASTM seawater compared to conventional concrete that has similar mix design. An accelerated corrosion by applying high potential on the steel bar was performed to obtain reasonable test results in a relatively short time. The potential and pH values of the steel bar were plotted on Pourbaix diagram for concrete immersed in aquades and seawater. For the first days, steel bar in geopolymer concrete in aquades and seawater located on corrosive area with potential values are  $-0,293\text{V}$ ; pH 7,2 (aquades) and  $-0,427\text{V}$ ; pH 8,2 (seawater). After 10 days, in aquades, steel on passive area with potential  $-0,183\text{V}$ ; pH 10 whereas in seawater that has  $-0,327\text{V}$ ; pH 9, steel on corrosive area. However, steel bar in conventional concrete immersed in aquades and seawater located on corrosive area from first day until 10 days. For the first days, potential values of steel bar are  $-0,529$ ; pH 7,2 (aquadest) and  $-0,205\text{V}$ ; pH 8,2 (seawater). After 10 days, potential value of steel are  $-0,543$  V; pH 7,2 in aquades and  $-0,319$ ; pH 8,2 in seawater. Thus, geopolymer concrete is better than conventional concrete in order to resist the corrosion of the steel bars because polycondensation of alumina and silikat in geopolymer forming cross linked aluminosilikat that can impede diffusion of oxygen and aggressive species as chloride ions. Furthermore, for the same mix design, geopolymer concrete has higher compressive strength than conventional concrete, i.e. 45,3 Mpa and 39,49 Mpa respectively.

Keywords: aquadest, corrosion potential, geopolimer concrete, seawater



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	vi
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xii
<b>1. PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Ruang Lingkup Penelitian .....	4
<b>2. DASAR TEORI .....</b>	<b>5</b>
2.1 Beton Konvensional .....	5
2.2 Beton Geopolimer .....	7
2.3 Sifat Mekanik Beton.....	10
2.4 Prinsip Dasar Korosi .....	11
2.5 Korosi Baja Tulangan Dalam Beton .....	14
2.6 Korosi Beton Konvensional .....	20
2.7 Korosi Beton Geopolimer .....	21
2.8 Korosi Dipercepat.....	22
<b>3. METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>25</b>
3.1 Diagram Alir.....	25
3.2 Alat dan Bahan .....	26

3.3 Karakterisasi Abu Terbang.....	30
3.4 Persiapan Benda Uji .....	30
3.5 Persiapan Agregat.....	31
3.6 Pembuatan Beton Geopolimer.....	31
3.7 Pembuatan Beton Portland .....	32
3.8 Pembuatan Air Laut ASTM .....	32
3.9 Pengukuran Potensial Korosi .....	33
3.10 Pengukuran Kuat Tekan .....	34
3.11 Pengolahan Data.....	35
<b>4. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>36</b>
4.1 Karakteristik Abu Terbang.....	36
4.2 Komposisi Pasta .....	38
4.3 Desain Campur Beton ( <i>mix design</i> ).....	38
4.4 Analisis Pengujian Kuat Tekan .....	39
4.5 Pengamatan Visual .....	40
4.6 Hasil Pengukuran Potensial dan pH .....	44
4.7 Diagram Pourbaix.....	51
<b>5. KESIMPULAN.....</b>	<b>56</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>57</b>

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi abu terbang <sup>[2]</sup> .....	8
Tabel 3.1 Komposisi air laut ASTM.....	33
Tabel 4.1 Komposisi abu terbang.....	37
Tabel 4.2 Komposisi pasta geopolimer.....	38
Tabel 4.3 Komposisi pasta Portland.....	38
Tabel 4.4 Hasil uji kuat tekan beton geopolimer .....	39
Tabel 4.5 Hasil uji kuat tekan beton konvensional .....	39
Tabel 4.6 Klasifikasi kuat tekan beton.....	40
Tabel 4.7 Data hasil pengukuran potensial setengah sel dari beton konvensional	44
Tabel 4.8 Data hasil pengukuran potensial setengah sel dari beton geopolimer ..	48
Tabel 4.9 pH media pada beton Portland.....	50
Tabel 4.10 pH media pada beton geopolimer .....	50
Tabel 4.11 Laju korosi dari baja tulangan dalam waktu yang berbeda <sup>[55]</sup> .....	53
Tabel 4.12 Perbandingan beton portland dan geopolimer .....	55

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Reaksi geopolimerisasi dari geopolimer <sup>[2]</sup> .....	9
Gambar 2.2 Reaksi polimerisasi <sup>[2]</sup> .....	10
Gambar 2.3 Skematik sel korosi dalam suatu sistem sederhana <sup>[22]</sup> .....	11
Gambar 2.4 Skematik perilaku polarisasi aktif-pasif <sup>[24]</sup> .....	12
Gambar 2.5 Kondisi teoritis dari korosi, imun, pasif dari besi <sup>[26]</sup> .....	14
Gambar 2.6 Proses korosi pada permukaan baja <sup>[27]</sup> .....	15
Gambar 2.7 Lapisan pasif baja tulangan dalam beton rusak <sup>[5]</sup> .....	15
Gambar 2.8 Degradasi korosi baja tulangan dalam beton <sup>[27]</sup> .....	16
Gambar 2.9 Efek karbonisasi pada korosi baja tulangan dalam beton <sup>[5]</sup> .....	17
Gambar 2.10 Korosi yang disebabkan penetrasi ion klorida dalam beton <sup>[5]</sup> .....	18
Gambar 2.11 Pengaruh konsentrasi garam terhadap laju korosi <sup>[28]</sup> .....	19
Gambar 2.12 Model korosi untuk baja tulangan dalam beton <sup>[29]</sup> .....	20
Gambar 2.13 Skematik evolusi struktur pasta semen dengan rasio w/c rendah dan tinggi <sup>[5]</sup> .....	21
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian .....	25
Gambar 3.2 <i>Concrete mixer</i> .....	26
Gambar 3.3 Cetakan silinder .....	27
Gambar 3.4 Cetakan kubus .....	27
Gambar 3.5 Multimeter .....	28
Gambar 3.6 pH meter digital .....	28
Gambar 3.7 Benda uji dalam selimut beton .....	31
Gambar 3.8 Agregat yang digunakan pada penelitian .....	31
Gambar 3.9 Pengukuran potensial .....	34
Gambar 4.1 Pola difraksi dari abu terbang .....	36
Gambar 4.2 Bahan pembuatan beton geopolimer .....	39
Gambar 4.3 Baja tulangan .....	41
Gambar 4.4 Susunan peralatan pada pengujian korosi yang dipercepat .....	41
Gambar 4.5 Beton geopolimer dalam aquades .....	42
Gambar 4.6 Beton geopolimer dalam air laut .....	42
Gambar 4.7 Beton konvensional dalam aquades .....	43

Gambar 4.8 Beton konvensional dalam air laut.....	43
Gambar 4.9 Pengukuran potensial setengah sel.....	44
Gambar 4.10 Grafik potensial setengah sel beton Portland, air laut, • di aquades.....	45
Gambar 4.11 Potensial setengah sel baja dalam beton (1) di udara,segera setelah korosi, (2) di udara,setelah jenuh air, (3) di air setelah 5 menit di lingkungan 'artificial' <sup>[33]</sup> .....	46
Gambar 4.12 Perubahan potensial setengah sel terhadap waktu dari baja pada lingkungan 'artificial' <sup>[33]</sup> .....	46
Gambar 4.13 Nilai rata-rata potensial korosi pada perendaman di air laut • bare steel, ▲ galvanized steel, ☼ scratched galvanization, ◆ chromated galvanization <sup>[36]</sup> .....	47
Gambar 4.14 Grafik potensial setengah sel beton geopolimer di air laut, • di aquades.....	48
Gambar 4.15 Hasil pengukuran potensial setengah sel <sup>[32]</sup> .....	49
Gambar 4.16 Ikatan yang terjadi dalam geopolimer <sup>[2]</sup> .....	51
Gambar 4.17 Plot E dan pH beton konvensional pada Diagram Pourbaix Fe.....	52
Gambar 4.18 Pasivitas di potensial oksidasi di atas $E_p$ <sup>[24]</sup> .....	53
Gambar 4.19 Plot E dan pH beton geopolimer pada Diagram Pourbaix Fe.....	54

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Beton merupakan material konstruksi yang paling banyak digunakan. Secara umum konstruksi perkerasan jalan raya terdiri atas dua jenis, yaitu perkerasan lentur yang bahan pengikatnya adalah aspal dan perkerasan kaku dengan semen sebagai bahan pengikatnya. Jalan beton adalah jalan yang menggunakan semen sebagai pengikatnya. Jalan beton biasanya digunakan untuk ruas jalan dengan hirarki fungsional arteri untuk melayani beban lalu-lintas yang berat dan padat.

Beton pada umumnya menggunakan semen Portland sebagai pengikat antar agregatnya. Dalam memproduksi semen Portland tidak hanya dibutuhkan sumber daya alam dan energi yang besar tetapi juga menghasilkan emisi gas rumah kaca dalam jumlah banyak ke atmosfer. Lebih lanjut, penggunaan dari beton konvensional terkenal dengan masalah ketahanannya (*durability*) dan permasalahan jika masa curingnya pada temperatur tinggi (konstruksi selama musim panas, perlakuan panas selama *precasting*, dsb)<sup>[1]</sup>.

Penggunaan abu terbang sebagai pengganti semen Portland lewat proses yang disebut polimer anorganik yang dipelopori oleh seorang ilmuwan Prancis, Prof. Joseph Davidovits dapat digunakan sebagai alternatif untuk mengurangi penggunaan semen konvensional, semen Portland, yang kurang ramah lingkungan selama proses produksinya. Polimer anorganik alumina-silikat atau biasa dikenal dengan nama geopolimer merupakan hasil sintesis dari material yang terbuat dari hasil sampingan seperti abu terbang.

Abu terbang (*fly ash*) adalah abu sisa pembakaran batu bara yang dipakai dalam banyak industri. Karena terbentuk pada temperatur tinggi, struktur abu terbang umumnya *amorphous* dan reaktif. Walaupun abu terbang tidak memiliki kemampuan mengikat seperti halnya semen tetapi dengan kehadiran air dan ukuran partikelnya yang halus, oksida silika yang terkandung dalam abu terbang akan bereaksi secara kimia dengan aktivator yang berupa larutan alkali silikat dan menghasilkan zat yang memiliki kemampuan mengikat.

Material geopolimer memiliki sifat yang lebih baik dibandingkan beton konvensional seperti dapat diproduksi dari bahan-bahan buangan atau limbah industri seperti abu terbang<sup>[2]</sup>, memiliki sifat keawetan unggul dan dapat meningkatkan daya tahan beton yaitu ketahanan terhadap serangan asam<sup>[3]</sup>. Di samping itu, geopolimer merupakan "*Green Material*" dikarenakan konsumsi energi manufaktur yang rendah dan emisi gas buangan rendah.

Beton geopolimer dapat digunakan untuk *precasting* industri seperti sebagai bahan reparasi jalan beton karena masa curing yang cepat, hanya 4 jam setelah dicor, kuat tekan beton dapat mencapai 20Mpa<sup>[4]</sup>. Bandingkan dengan beton Portland yang masa curingnya lebih lama sekitar 28 hari sehingga membutuhkan akselerator kalsium klorida yang dapat menyebabkan beton terdegradasi. Bagaimana perilaku korosi beton geopolimer sebagai bahan reparasi jalan beton akan dibahas dalam tugas akhir ini.

## 1.2 Perumusan Masalah

Dengan berkembangnya infrastruktur, penggunaan beton bertulang di lingkungan laut sebagai bahan konstruksi semakin meningkat. Aspek yang mempengaruhi usia layan struktur beton bertulang yang berada pada lingkungan laut adalah penetrasi klorida yang dapat memicu terjadinya korosi. Adanya oksigen dan kelembaban juga dapat memicu terjadinya proses korosi yang terjadi secara elektrokimia. Beton dengan baja tulangan yang memiliki gradient ion klorida yang besar sangat rapuh terhadap serangan korosi terutama pada lingkungan yang memiliki siklus basah-kering, seperti struktur di lingkungan air laut dan jembatan-jembatan.

Beton konvensional memberikan perlindungan korosi terhadap logam karena memberikan suatu lingkungan yang bersifat alkalin. Akibat dari lingkungan beton ini, menyebabkan terbentuknya suatu lapisan (*adhering film*) yang bersifat pasif pada logam dan dapat melindungi logam dari korosi. Beton memberikan perlindungan terhadap baja dengan membentuk lapisan pasif pada permukaan baja<sup>[5]</sup>. Lapisan pasif dapat terbentuk dalam selimut beton pada pH lingkungan yang basa sekitar 12,5-13,8<sup>[6]</sup>.

Adanya tahanan listrik dalam beton (yaitu tahanan untuk mengalirkan arus) menyebabkan laju aliran arus yang dibawa oleh ion-ion akan rendah, sehingga proses reaksi anodik dan katodik akan berjalan lambat. Hal ini mengakibatkan laju korosi menjadi rendah. Namun demikian, korosi pada baja penguat dalam beton dapat terjadi apabila beton tidak mempunyai kualitas yang bagus, desain struktur yang tidak sesuai dengan lingkungan sekitar, ataupun perubahan lingkungan yang tidak diperhitungkan selama umur layanan beton berlangsung.

Lapisan pasif yang melindungi permukaan baja tulangan dari proses korosi lebih lanjut, dapat mengalami kegagalan fungsi yang disebabkan oleh beberapa hal berikut ini<sup>[7]</sup>:

- (1) Penguraian gas  $\text{CO}_2$  dan  $\text{SO}_2$  dari udara sekitar di dalam larutan pori sehingga memperkecil nilai pH beton dan dapat menyebabkan korosi
- (2) Penetrasi ion klorida yang dapat memecahkan lapisan pasif sehingga memicu terjadinya korosi sumuran pada baja tulangan

Masa curing yang lama dari beton menyebabkan untuk perbaikan jalan beton adalah dengan menggunakan akselerator untuk mempercepat proses pengerasan semen. Senyawa yang biasa dipakai sebagai akselerator adalah kalsium klorida. Namun demikian, penambahan zat tersebut tidak dianjurkan untuk ditambahkan pada beton bertulang karena ion – ion klorida dapat menyebabkan beton terkorosi. Sebenarnya akselerator yang tidak korosif dapat diperoleh di pasaran, misalnya senyawa – senyawa tertentu dari nitrat, format dan nitrit, hanya saja harganya lebih mahal dan kemampuan akseleratornya kurang efektif.

Banyaknya permasalahan dalam durabilitas yang diakibatkan oleh semen Portland berhubungan dengan kadar kalsium. Serangan sulfat oleh ion-ion dalam tanah dan air laut dapat merusak struktur beton yang diperkuat oleh baja, sebagai contoh. Saat semen mengeras,  $\text{C}_3\text{A}$  bereaksi dengan ion sulfat dengan kehadiran  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  untuk membentuk ettringate dan gypsum, sehingga dapat menyebabkan beton terdegradasi. Contoh lainnya korosi pada baja tulangan, biasanya disebabkan karbonisasi dari  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  sehingga dapat menurunkan nilai pH<sup>[8]</sup>.

Oleh karena itu, maka pada penelitian ini, akan dilakukan korosi yang dipercepat (*corrosion acceleration*) pada baja tulangan untuk mengetahui perilaku



korosi pada beton geopolimer dan membandingkannya dengan beton konvensional. Korosi yang dipercepat (*corrosion acceleration*) pada baja tulangan dalam beton dilakukan untuk mendapatkan hasil pengujian yang layak dalam waktu yang relatif singkat. Metode pengukuran yang digunakan adalah potensial setengah sel (*half-cell potential measurement*) sehingga potensial korosi pada baja tulangan pada beton dapat diketahui<sup>[9]</sup>. Adapun, hasil dari penelitian ini akan bermanfaat untuk aplikasi sebagai bahan reparasi konstruksi jalan beton.

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan penelitian ini adalah untuk mempelajari perilaku korosi pada baja tulangan dalam beton geopolimer serta daya tahan beton pada kondisi normal dan agresif (air laut) dengan membandingkannya terhadap beton konvensional.

### **1.4 Ruang Lingkup Penelitian**

Pada benda uji dilakukan korosi yang dipercepat dengan mengalirkan arus searah dalam media air laut ASTM dan aquades. Pembuatan air laut berdasarkan ASTM D 1141-90<sup>[10]</sup>. Metode pengukuran yang digunakan pada penelitian ini adalah pengukuran potensial setengah sel<sup>[11]</sup>. Pengujian korosi langsung dilakukan sehari setelah pengecoran pada beton geopolimer & 28 hari pada beton Portland. Selain itu, juga dilakukan pengujian kuat tekan untuk mengetahui daya tahan beton tersebut.

Dalam menentukan *mix design* beton geopolimer sebelumnya harus mengetahui komposisi yang tepat dari material geopolimer. Komposisi perbandingan antara prekursor dan aktivator harus ditentukan agar mendapatkan campuran yang terbaik untuk mendapatkan kuat tekan yang maksimal. Referensi untuk komposisi antara aktivator dan prekursor sesuai dengan penelitian Niken Swastika dengan asumsi kuat tekan binder yang dihasilkan 78,34 MPa. Dalam komposisi tersebut rasio *solution/ash* adalah 0,43. Untuk perbandingan dengan beton konvensional digunakan semen Portland tipe I. Adapun *mix design* yang digunakan pada semen Portland sama dengan geopolimer menghasilkan rasio *water/cement* sebesar 0,37.

## **BAB 2**

### **DASAR TEORI**

#### **2.1 Beton Konvensional**

Beton merupakan jenis material komposit yang memiliki sifat mekanis kuat tekan yang sangat baik tetapi kuat tariknya rendah. Oleh karena itu, beton biasanya diperkuat oleh baja tulangan. Baja dipilih karena memiliki kuat tarik yang relatif tinggi, ulet, dan harganya yang relatif murah. Beton dan baja dapat melekat dengan baik dan memiliki koefisien muai panas yang tidak berbeda jauh<sup>[12]</sup>.

Beton yang sering digunakan pada proyek – proyek konstruksi pada umumnya terdiri dari pasta semen dan agregat. Agregat bertindak sebagai pengisi yang akan meningkatkan kekuatan tekan sedangkan perbandingan air dan semen akan menghasilkan struktur dan komposisi pasta semen yang akan menentukan durabilitas dan kinerja beton.

##### **2.1.1 Agregat**

Dalam SNI T-15-1991-03, agregat didefinisikan sebagai material granular, misalnya pasir, kerikil, batu pecah, dan kerak tungku besi yang dipakai bersama-sama dengan suatu media pengikat untuk membentuk beton semen hidrolis atau adukan. Pada beton semen biasanya volume agregat yang digunakan adalah 65-75% dari volume total beton, sehingga kondisi agregat yang digunakan sangat berpengaruh pada karakteristik beton. Agregat bersifat inert pada beton dan mempunyai tiga fungsi utama yaitu :

- Sebagai material pengisi yang relatif lebih murah dari semen.
- Sebagai material padat yang tahan terhadap beban yang bekerja, abrasi, perkolasi air dan pengaruh cuaca.
- Mengurangi kembang-susut dari pasta semen

Berdasarkan ukurannya, agregat dibedakan menjadi :

- (1) Agregat halus (*fine aggregate*) diameter 0–5 mm disebut pasir
- (2) Agregat kasar (*coarse aggregate*) diameter > 5 mm, biasanya berukuran antara 5 hingga 40 mm, disebut kerikil.

### 2.1.2 Semen

Semen adalah istilah yang umum digunakan untuk menggambarkan campuran bahan organik dan anorganik yang menyusunnya. Secara umum, semen adalah material yang mempunyai sifat adhesif dan kohesif yang dapat mengikat butiran-butiran mineral menjadi satu kesatuan yang kompak. Berdasarkan Standar Eropa EN 197-1, semen dibagi menjadi lima jenis, yaitu:

CEM I : Semen Portland

CEM II : Semen Portland-komposit

CEM III : Semen dari slag tanur tinggi (*blast furnace*)

CEM IV : Semen pozzolanic

CEM V : Semen komposit

Jenis semen yang paling banyak digunakan adalah semen tipe I, untuk membangun rumah. Adapun bahan utama campuran semen Portland adalah<sup>[13]</sup>:

- Trikalsium Silikat ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) atau  $\text{C}_3\text{S}$
- Dikalsium Silikat ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) atau  $\text{C}_2\text{S}$
- Trikalsium Aluminat ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) atau  $\text{C}_3\text{A}$
- Tetrakalsium Alumino Ferrid ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) atau  $\text{C}_4\text{AF}$
- Gypsum ( $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )

### 2.1.3 Air

Dalam beton, air berfungsi sebagai campuran untuk membuat bahan pengikat, yaitu melalui bereaksi dengan semen. Semakin encer beton akan semakin mudah dikerjakan, dan sebaliknya semakin sedikit kadar air maka beton akan semakin sukar dikerjakan. Sifat ini digambarkan oleh workabilitas. Workabilitas yang dimaksud disini adalah fluiditas dari adonan dimana menyatakan kemampuan adonan tersebut untuk diaduk secara kontinu, kemampuan untuk dituang ke dalam cetakan, dan kemampuan untuk mengisi ruang dalam cetakan. Proporsi air dinyatakan dalam rasio air-semen (*water-cement ratio*), yaitu angka yang menyatakan perbandingan antara berat air (kg) dibagi berat semen (kg) dalam campuran beton.

## 2.2 Beton Geopolimer

Ditemukan oleh seorang ilmuwan Prancis, Prof. Joseph Davidovits pada akhir tahun 1970, geopolimer merupakan material yang dibentuk melalui polimerisasi silikon, aluminium, dan oksigen menjadi struktur *amorphous* 3 dimensi. Reaksi geopolimerisasi adalah eksotermis, berlangsung pada tekanan 1 atm, dan pada temperatur rendah (dibawah 100°C).

Geopolimer sebagai material yang relatif baru sangat potensial untuk menggantikan semen Portland terutama dalam aplikasinya sebagai bahan dasar pembuatan beton. Pada beton geopolimer, reaksi polimerisasi adalah polikondensasi membentuk aluminosilikat. Pada proses polimerisasi geopolimer sejumlah Si dan Al terdisolusi dengan alkali aktivator membentuk monomer-monomer. Monomer-monomer tadi akan terkondensasi membentuk jaringan tetrahedral.

Reaktan yang digunakan biasanya kaolinite atau metakaoline atau dapat juga grup material-material yang kaya akan  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  seperti fly ash, slag, limbah konstruksi dan mineral alam. Ikatan kimia S-O dan Al-O merupakan ikatan kovalen yang paling stabil. Derajat polikondensasi geopolimer lebih besar dibandingkan dengan semen.

Setiap prekursor memiliki kelebihan dan kekurangannya. Sebagai contoh, metakaolin sebagai prekursor memiliki kemampuan melarutkan tinggi dalam larutan reaktan, menghasilkan rasio Si/Al yang terkontrol dalam geopolimer, dan memiliki warna yang putih. Namun metakaolin relatif lebih mahal untuk diproduksi dalam jumlah besar karena ia harus dikalsinasi pada temperatur sekitar 500-700°C selama beberapa jam. Dalam hal ini penggunaan abu terbang sebagai material asal akan menguntungkan secara ekonomi<sup>[14]</sup>.

### 2.2.1 Abu Terbang

Abu terbang (*fly ash*) merupakan hasil samping pembakaran batu bara dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Abu terbang mengandung silikon dioksida ( $\text{SiO}_2$ ), aluminium oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dan besi oksida ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) serta oksida-oksida lain, diantaranya CaO, MgO,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ , dan  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Ukuran partikel *fly ash* antara 0.5 –100  $\mu\text{m}$ . Dulu, *fly ash* hasil pembakaran batu bara

dibuang di udara. Hal ini menyebabkan kerusakan lingkungan dan merusak kesehatan.

*Fly ash* hasil pembakaran batu bara sub-bituminous disebut *fly ash* ASTM jenis C yang tinggi kandungan kapur (lime)nya (lebih dari 10%). *Fly ash* dari batu bara bituminous dan antrasit disebut *fly ash* ASTM jenis F yang mengandung kurang 10% CaO serta mengandung 80-85 % alumina dan silika. Komposisi dari masing-masing abu terbang terdapat pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1 Komposisi abu terbang<sup>[2]</sup>**

Kandungan dan sifatnya	Jenis <i>Fly ash</i>	
	Jenis F	Jenis C
Silikon dioksida (SiO <sub>2</sub> ), aluminium oksida (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), besi oksida (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), min %	70.0	50.0
CaO %	< 10	> 10
Sulfur trioksida (SO <sub>3</sub> ), max %	5.0	5.0
Kelembaban, max %	3.0	3.0
<i>Loss On Ignition</i> , max %	6.0	6.0

### 2.2.2 Larutan Alkali Aktivator

Menurut A.Palomo, larutan alkalin yang menghasilkan kuat tekan yang baik adalah campuran dari NaOH dengan natrium silikat atau KOH dengan kalium silikat<sup>[15]</sup>. Natrium hidroksida berperan dalam memutuskan ikatan pada silika dan alumina pada abu terbang untuk membentuk [SiO<sub>4</sub>] dan [AlO<sub>4</sub>]<sup>-</sup> atau disebut sebagai proses disolusi<sup>[16]</sup>. Selanjutnya sebagai substansi yang menimbulkan sifat basa pada larutan, keberadaan natrium hidroksida dinilai cukup penting dalam pembentukan struktur geopolimer tahap dua yaitu proses polikondensasi dimana hanya dapat terjadi dalam lingkungan yang cukup basa.

Natrium silikat digunakan karena dapat larut bersama air dimana selanjutnya natrium silikat menyumbangkan kation Na<sup>+</sup> sebagai penyeimbang muatan dalam struktur *cross-linked* aluminosilikat<sup>[17]</sup>. Kadar natrium silikat harus optimum dimana cukup dalam memenuhi kebutuhan kation monovalen penyeimbang dalam proses polikondensasi tanpa mengakibatkan terbentuknya natrium karbonat di permukaan sebagai efek kelebihan kandungan natrium silikat.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Palomo, Grutzeck, dan Blanco, penggunaan larutan natrium hidroksida (NaOH) dan larutan natrium silikat ( $\text{Na}_2\text{Si}_3$ ) dapat menghasilkan kekuatan tekan yang tinggi. Kuat tekan dapat mencapai hingga 60 MPa jika di-*curing* pada suhu  $85^\circ\text{C}$  selama 5 jam<sup>[18]</sup>.

Sebagai tambahan, Swanepoel dan Strydom melakukan suatu penelitian tentang geopolimer yang diproduksi dengan pencampuran *fly ash*, kaolin, larutan natrium silikat, NaOH dan air. Kedua faktor waktu dan temperatur masa curing mempengaruhi kuat tekan tersebut, dan kekuatan optimum terjadi ketika material di-*curing* pada suhu  $60^\circ\text{C}$  selama 48 jam<sup>[19]</sup>.

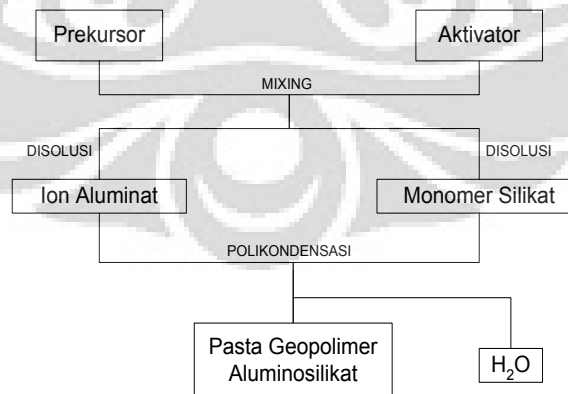
### 2.2.3 Reaksi Geopolimerisasi

Sintesa geopolimer aluminosilikat membutuhkan dua konstituen utama dalam reaksi pencampuran, yaitu: prekursor yang kaya akan kandungan Al dan Si dengan larutan alkali-silikat sebagai aktivator. Geopolimer dapat berupa salah satu dari 3 bentuk formula di bawah ini:

- Poly (sialate), formula monomer  $[-\text{Si-O-Al-O-}]$
- Poly (sialate-siloxo), formula monomer  $[-\text{Si-O-Al-O-Si-O-}]$
- Poly (sialate-disiloxo), formula monomer  $[-\text{Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-}]$

( *sialate* = *silicon-oxo-aluminate*, *siloxo* = *silicon-oxo* )

Gambar 2.1 menggambarkan reaksi geopolimerisasi yang terjadi pada beton geopolimer.



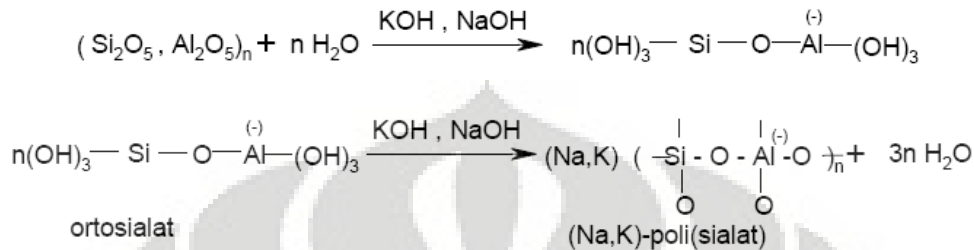
**Gambar 2.1 Reaksi geopolimerisasi dari geopolimer<sup>[2]</sup>**

Reaksi kimia yang terjadi pada proses polimerisasi terbagi dalam 3 tahapan, yaitu:

- (1) Disolusi atom Si dan Al dari sumber material prekursor disebabkan oleh ion hidroksida.

- (2) Penguraian ion prekursor menjadi monomer.
- (3) Polikondensasi dari monomer – monomer menjadi struktur polimer.

Proses polimerisasi akan menghasilkan geopolimer dengan hasil samping  $H_2O$  seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2<sup>[19]</sup>.



Gambar 2.2 Reaksi polimerisasi<sup>[2]</sup>

### 2.3 Sifat Mekanik Beton

Setiap struktur memiliki respon yang berbeda terhadap beban yang bekerja padanya. Dengan mengetahui perilaku struktur dapat diketahui deformasi dari struktur akibat beban yang bekerja padanya, model keruntuhan, kapasitas beban sebelum runtuh, dan faktor keamanan. Beberapa sifat mekanik dari beton adalah sebagai berikut:

- (1) Kuat Tekan

Beton memiliki kuat tekan yang tinggi. Rasio air-semen (w/c) berperan penting pada kuat tekan beton.

- (2) Kuat Tarik

Kekuatan tarik rendah sehingga mudah retak akibat beban kerja. Kelemahan dari beton ini diatasi dengan menggunakan baja sebagai penguat dalam beton. Kuat tekan dari beton biasanya tidak lebih dari 2 – 4 MPa<sup>[5]</sup>.

- (3) Getas

Beton merupakan material yang getas dimana tidak terjadi deformasi plastis sehingga tidak ada peringatan sebelum terjadinya perpatahan.

- (4) Perilaku susut dan rangkak

Jika beton terekspose pada kondisi basah dan kering dapat menyebabkan kehilangan kandungan air mengakibatkan kontraksi dan awal mula terjadinya retak dikarenakan tegangan internal meningkat. Penyusutan yang disebabkan oleh berkurangnya kadar air dalam beton disebut ‘*shrinkage*’

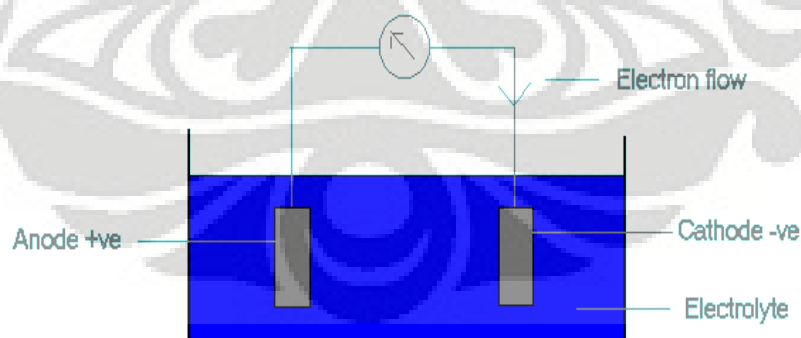
## 2.4 Prinsip Dasar Korosi

### 2.4.1 Pengertian Korosi

Korosi adalah degradasi atau penurunan mutu dari suatu material akibat reaksi kimia atau elektrokimia dengan lingkungan<sup>[21]</sup>. Peristiwa korosi tidak dapat dicegah, namun korosi dapat dikendalikan sehingga dapat diminimalisasi terjadinya kerugian-kerugian akibat terjadinya korosi. Kerugian-kerugian yang dapat ditimbulkan oleh korosi tidak hanya kerugian materi namun juga keselamatan manusia dan lingkungan.

Korosi dapat diklasifikasikan menjadi korosi basah (*wet corrosion*) dan korosi kering (*dry corrosion*)<sup>[22]</sup>. Korosi basah terjadi pada lingkungan basah atau lembab, biasanya melibatkan larutan aqueous atau elektrolit. Sedangkan korosi kering terjadi di lingkungan udara yang kering atau temperatur tinggi.

Proses korosi pada korosi basa merupakan proses elektrokimia, yaitu suatu proses yang terdiri dari proses oksidasi pada anoda (reaksi anodik) dan proses reduksi pada katoda (reaksi katodik) melalui suatu larutan yang dapat menghantarkan arus listrik yaitu elektrolit. Elektrolit merupakan faktor utama yang mendukung terjadi dan terus berlangsungnya proses korosi, yang dapat berupa air laut, larutan asam, maupun aquades. Gambar skematik suatu sel korosi sederhana dapat dilihat pada Gambar 2.3.



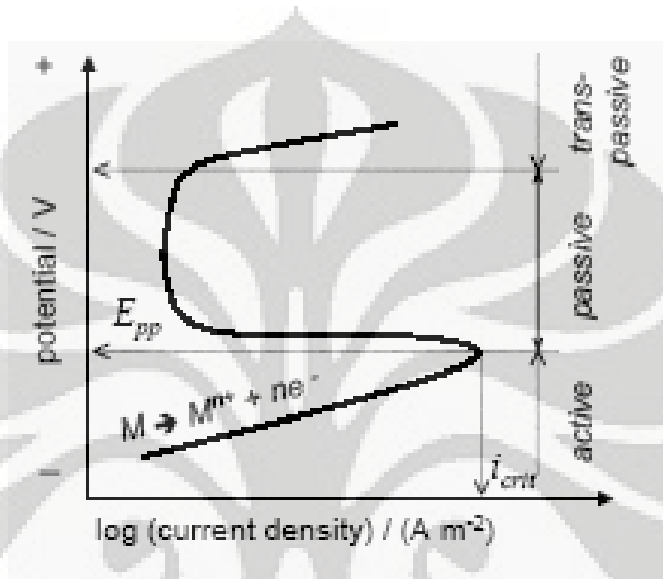
**Gambar 2.3** Skematik sel korosi dalam suatu sistem sederhana<sup>[22]</sup>

Pada sel korosi, elektron mengalir dari daerah dimana terjadi reaksi anodik menuju reaksi katodik. Ion mengalir melalui elektrolit untuk menyeimbangkan aliran dari elektron. Anoda mengalami korosi sedangkan katoda tidak. Selain itu, juga terdapat perbedaan potensial diantara anoda dan katoda<sup>[23]</sup>.



## 2.4.2 Passivasi

Passivasi didefinisikan sebagai suatu kondisi terbentuknya lapisan film pada permukaan dibawah keadaan teroksidasi dengan terpolarisasi anodik yang tinggi sehingga melindungi logam dari reaksi selanjutnya<sup>[24]</sup>. Lapisan pasif ini sangat tipis dan *fragile* pada pengukuran optikal, ketebalan lapisan transparan sekitar 1-10 nm.



Gambar 2.4 Skematik perilaku polarisasi aktif-pasif<sup>[24]</sup>

Gambar 2.4 memperlihatkan sifat logam dan paduan pada kondisi aktif-pasif. Pada potensial yang rendah, laju korosi yang terukur secara anodik tinggi dan akan terus meningkat (potensial korosi dalam keadaan aktif). Untuk kondisi di atas potensial pasif primer, E<sub>pp</sub>, lapisan yang terbentuk akan stabil dan laju korosi turun hingga nilai yang sangat rendah dalam kondisi pasif. Penurunan laju korosi pada kondisi pasif hingga 10<sup>6</sup> kali lebih rendah dari laju maksimum yang tercapai saat kondisi aktif. Lapisan pasif dapat pecah pada potensial yang lebih tinggi sehingga laju reaksi anodik akan kembali meningkat, keadaan ini disebut *transpassive*.

Passivasi dari logam dapat dicapai melalui beberapa cara, yaitu<sup>[25]</sup>:

- Passivasi anodik, yaitu pemberian potensial anodik dengan teknik elektrokimia untuk menghasilkan pembentukan lapisan protektif (pasif)
- *Autopassivation*, yaitu dengan penambahan unsur Cr dan logam lain ke dalam besi untuk menghasilkan stainless steel

- Passivasi kimia, yaitu pembentukan lapisan pasif dengan melakukan penambahan zat kimia kedalam lingkungan yang korosif seperti penambahan inhibitor

### 2.4.3 Diagram Pourbaix

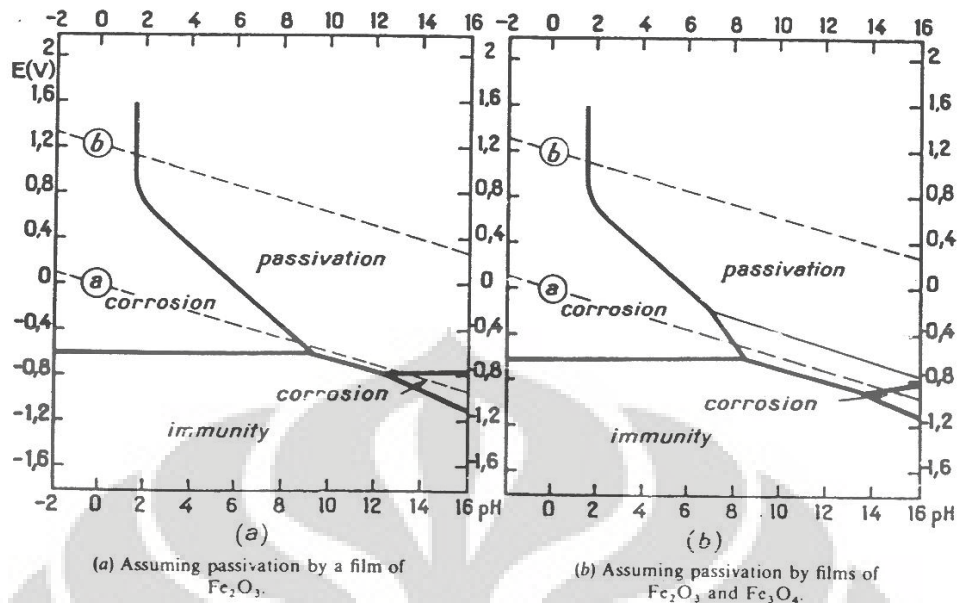
Diagram Pourbaix menggambarkan hubungan antara pH (absis) dengan potensial redoks (ordinat). Diagram ini berguna untuk mengetahui aspek termodinamika dari suatu reaksi elektrokimia. Dari diagram ini dapat diketahui kondisi logam apakah pasif, imun, ataupun aktif. Adapun kelebihan dan keterbatasan dari diagram Pourbaix adalah sebagai berikut:

#### Kelebihan

- dapat digunakan untuk memprediksi terjadinya reaksi korosi, sehingga dapat dilakukan pencegahan
- mengetahui daerah-daerah aktif, pasif dan imun
- memprediksi penanggulangan korosi dengan mengatur beda potensial agar tidak terkorosi

#### Keterbatasan

- hanya memprediksi apa yang dapat terjadi, dan bukan menyatakan apa yang akan terjadi
- tidak dapat menentukan kecepatan korosi
- hanya dapat digunakan pada logam murni dengan larutan sederhana, bila paduan menggunakan superimposed

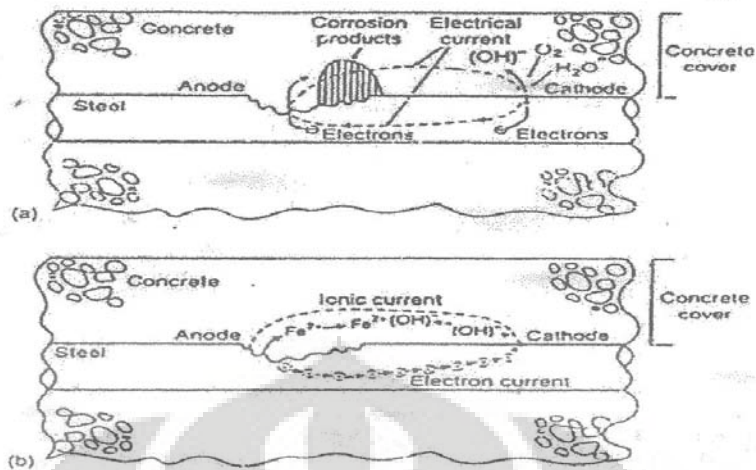


**Gambar 2.5 Kondisi teoritis dari korosi, imun, pasif dari besi<sup>[26]</sup>**

Gambar 2.5 merupakan diagram Pourbaix dari besi<sup>[26]</sup>. Informasi dari diagram ini berguna untuk mengontrol korosi dari logam murni pada lingkungan aqueous. Dengan mengubah potensial dan pH berada pada daerah imun dan pasif, korosi dapat dikontrol. Contohnya, dengan meningkatkan pH lingkungan menjadi sedikit basa, korosi dari besi dapat dikontrol. Dengan meningkatkan nilai potensial menjadi lebih positif dapat menurunkan kemungkinan terjadinya korosi karena pembentukan lapisan oksida pada permukaan logam.

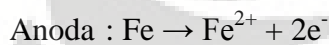
## 2.5 Korosi Baja Tulangan Dalam Beton

Korosi baja tulangan dalam beton merupakan proses elektrokimia yang melibatkan pasangan reaksi kimia dan aliran arus listrik. Proses korosi dimulai saat atom-atom dari anoda terurai menjadi ion-ion sehingga anoda menjadi negatif dari lingkungan sekitarnya. Elektron yang dihasilkan dari anoda mengalir menuju katoda melalui penghantar elektrolit. Proses korosi ini akan terus berkelanjutan apabila reaksi anoda dan katoda terus berlangsung, dan dalam suatu penghantar elektrolit.

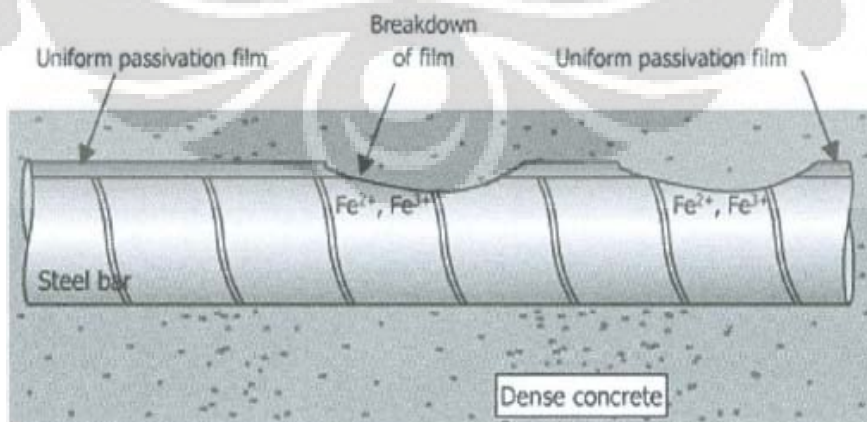


**Gambar 2.6 Proses korosi pada permukaan baja<sup>[27]</sup>**

Gambar 2.6 memperlihatkan reaksi elektrokimia yang terjadi di anoda dan katoda saat logam besi terkorosi. Reaksi yang terjadi adalah:



Perpindahan ion-ion ferro ( $\text{Fe}^{2+}$ ) dan ion-ion hidroksida ( $\text{OH}^-$ ) akan bereaksi membentuk produk korosi  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ . Karat dapat terbentuk pada baja tulangan dalam beton jika lapisan pasif pada baja rusak seperti yang terlihat pada Gambar 2.7. Karat yang terbentuk mencapai 3 hingga 9 kali volume baja tulangan yang terkorosi.<sup>[27]</sup> Akibatnya terbentuk tegangan tarik setempat yang memicu terbentuknya retak dan lebih lanjut akan menyebabkan delaminasi dan pengelupasan selimut beton.

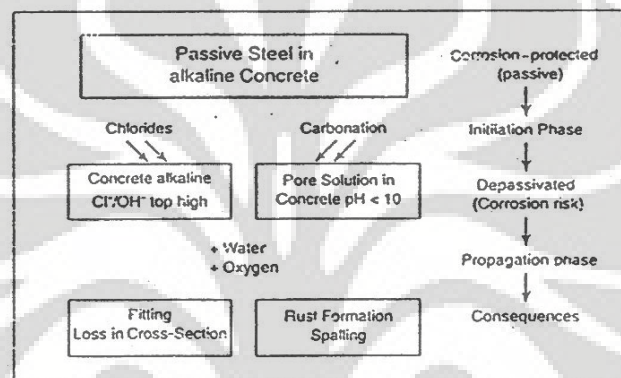


**Gambar 2.7 Lapisan pasif baja tulangan dalam beton rusak<sup>[5]</sup>**

## 2.5.1 Faktor Penyebab Korosi pada Baja Tulangan dalam Beton

### (1) Depasivasi

Dalam larutan pori basa yang tinggi pada beton yang terbentuk selama proses hidrasi semen, terbentuk lapisan oksida tipis (*passive film*) yang melindungi baja tulangan dari korosi. Namun demikian lapisan tersebut dapat pecah disebabkan oleh penurunan nilai pH akibat penguraian karbon dioksida dan sulfida dari atmosfer dan penetrasi ion klorida dari lingkungan seperti yang terlihat pada Gambar 2.8.



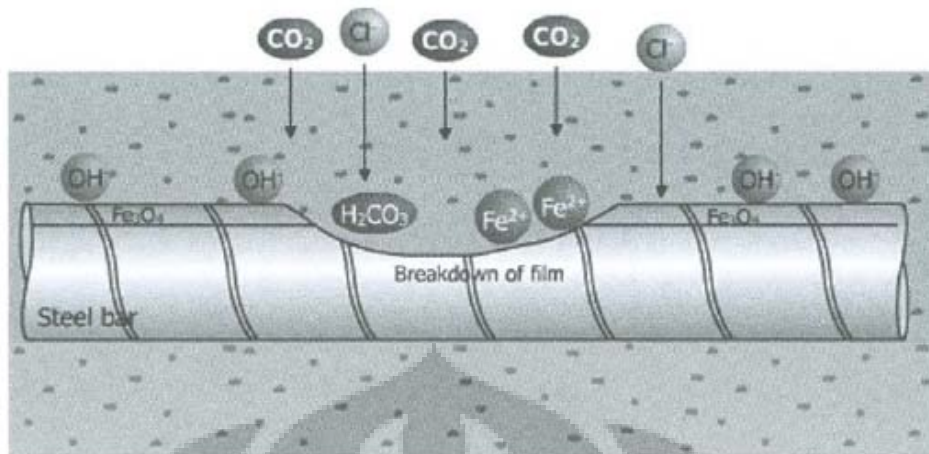
Gambar 2.8 Degradasi korosi baja tulangan dalam beton<sup>[27]</sup>

- Penguraian CO<sub>2</sub> (Karbonisasi)

Molekul-molekul gas karbon dioksida yang terdapat pada atmosfer dapat berpenetrasi ke dalam beton lalu bereaksi dengan senyawa-senyawa alkali hidroksida yang berada dalam larutan pori selimut beton, dengan reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut<sup>[5]</sup>:



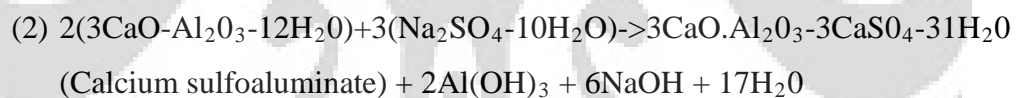
Pembentukan kalsium karbonat disertai penurunan kandungan air dan peningkatan berat beton, menyebabkan retak di permukaan. Gambar 2.9 memperlihatkan efek dari proses karbonasi dalam beton. Proses karbonasi menyebabkan penurunan alkalinitas dikarenakan penurunan pH. Hal ini dapat menyebabkan baja berpindah dari daerah pasif menjadi daerah aktif pada Diagram Pourbaix.



**Gambar 2.9 Efek karbonisasi pada korosi baja tulangan dalam beton<sup>[5]</sup>**

- Serangan Sulfat

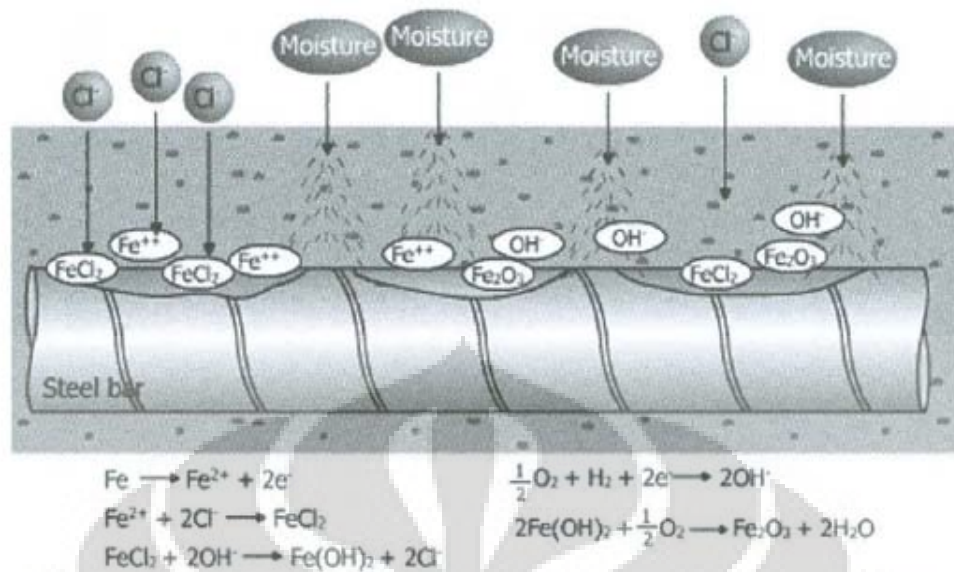
Beton yang kontak dengan air dalam tanah liat dapat terserang garam sulfat dari kalsium, magnesium, dan sodium. Garam sulfat juga terdapat pada air laut dan air payau. Reaksi utama yang terjadi adalah sebagai berikut:



Dua produk dari reaksi, gypsum dan ettringite (calcium sulfoaluminate) memiliki volum lebih besar dari senyawa yang digantikan, karenanya, serangan sulfat menyebabkan ekspansi dalam volum dan kerusakan pada beton.

- Efek Ion Klorida

Ion klorida dapat merusak lapisan pasif dan menyebabkan korosi pitting pada baja. Pitting merupakan reaksi autokatalitik yang berkelanjutan hingga terbentuk lubang pada baja tulangan dalam beton. Klorida bereaksi dengan ferit membentuk suatu paduan kompleks  $\text{FeCl}_2$ . Proses korosi sumuran ini dapat dilihat pada Gambar 2.10. Sumuran mulai terbentuk pada permukaan logam yang tidak seragam yaitu bagian logam yang tidak diberikan inhibitor, coating yang tergores, atau adanya endapan seperti slag, scale, debu dan pasir.

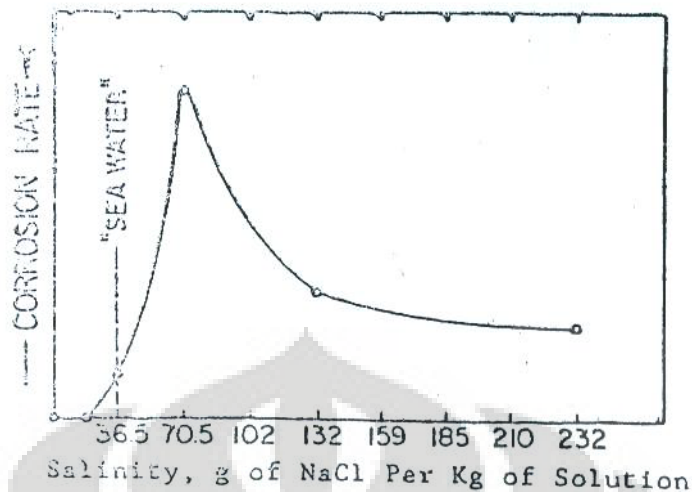


**Gambar 2.10** Korosi yang disebabkan penetrasi ion klorida dalam beton<sup>[5]</sup>

Karakteristik produk karat pada baja adalah porous dan mudah lepas. Sifat karat pada baja yang mudah lepas ini, menyebabkan ion agresif  $\text{Cl}^-$  pada air laut mudah merusak karat sehingga  $\text{O}_2$  mudah masuk dan kontak pada permukaan baja.

Kehadiran ion klorida dalam beton menghasilkan dua efek, yaitu (1) meningkatkan konduktivitas dari elektrolit; (2) lapisan proteksi oksida dapat rusak karena pembentukan besi klorida yang mudah larut. Dua efek ini memudahkan pelarutan dari ion logam. Ion klorida berasal dari komponen campuran beton, kalsium klorida yang ditambahkan sebanyak 2% dari berat semen. Selain itu, agregat yang berpori, yang terekspos air laut dapat menjadi sumber klorida.

Pengaruh ion klorida dari garam natrium klorida terhadap laju korosi dikemukakan oleh Griffin dan Henry seperti yang terlihat pada Gambar 2.11<sup>[28]</sup>. Laju korosi meningkat sejalan dengan peningkatan konsentrasi garam sampai mencapai batas maksimum. Kemudian laju korosi akan berkurang walaupun konsentrasi garam ditingkatkan. Perubahan ini menghasilkan suatu hubungan antara korosi dan konsentrasi garam yang dapat mengurangi kelarutan serta difusi oksigen dan dampak keberadaannya terhadap proses korosi.



**Gambar 2.11 Pengaruh konsentrasi garam terhadap laju korosi<sup>[28]</sup>**

Produk korosi memiliki volume yang lebih besar dari baja sehingga dapat menyebabkan tegangan tarik dalam beton. Jika tegangan tarik produk korosi lebih besar dari beton maka akan terjadi retak pada beton. Hal ini akan mengakibatkan terjadi peningkatan difusi ion klorida dan karbon dioksida pada tempat terjadinya retak di beton. Timbulnya keretakan ini akan mengakibatkan percepatan kerusakan (spalling) pada struktur baja tulangan dalam beton.

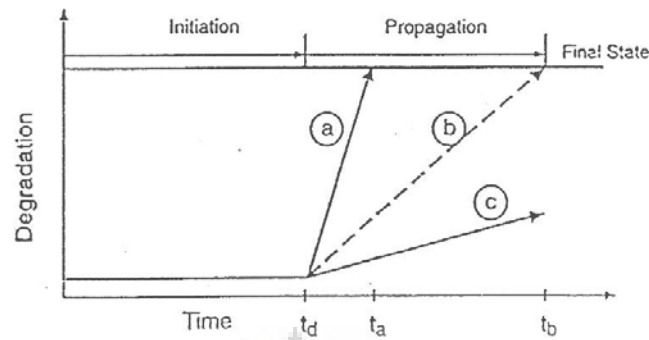
## (2) Efek Oksigen

Oksigen merupakan syarat terjadinya korosi. Jika tidak ada oksigen, maka korosi tidak dapat terjadi. Udara dapat berdifusi ke dalam beton. Air yang kontak dengan udara menjadi jenuh dengan oksigen dan total kandungan oksigen tergantung dari total padatan yang terlarut dan kelarutan oksigen. Kelarutan oksigen merupakan fungsi dari temperatur, tekanan, dan kandungan garam yang terlarut. Oksigen dapat menyebabkan terbentuknya perbedaan sel aerasi yang meningkatkan korosi pada permukaan baja.

### 2.5.2 Mekanisme korosi baja tulangan dalam beton

Proses degradasi yang terjadi pada material baja tulangan dalam beton dibagi menjadi 2 tahapan, yaitu tahap inisiasi dan tahap propagasi. Gambar 2.12 adalah perkembangan korosi baja dibandingkan dengan waktu,  $t_d$ , waktu depassivasi,  $t_a$ ,  $t_b$ , waktu yang dibutuhkan untuk mencapai keadaan akhir dengan laju korosi  $a$  dan  $b$ ; dan  $a, b, c$  adalah kenaikan laju korosi ( $a > b > c$ )<sup>[29]</sup>.





**Gambar 2.12 Model korosi untuk baja tulangan dalam beton<sup>[29]</sup>**

(1) Tahap inisiasi

Pada tahap ini ion atau zat agresif yang mempasivasi baja berpenetrasi dari permukaan ke material ruah dalam beton. Tahap ini berlangsung hingga baja mengalami depasivasi ( $t_d$ ). Lamanya tahap ini dipengaruhi oleh ketebalan lapisan beton, laju penetrasi dan konsentrasi ion-ion agresif yang dapat mendepasivasi baja. Laju penetrasi bergantung pada kualitas dari selimut beton (porositas dan permeabilitas) dan pada kondisi *microclimatic* (*wetting dan drying*) pada permukaan beton.

(2) Tahap propagasi

Ketika baja tedepasivasi karena ion klorida atau karbonasi, maka korosi dapat terjadi dengan hadirnya oksigen dan kelembaban lingkungan. Waktu untuk propagasi korosi diberikan oleh derajat kerusakan yang dapat diterima (*loss in cross section, spalling*) dan oleh laju korosi. Laju korosi menentukan waktu untuk mencapai keadaan akhir dari struktur dan laju korosi bervariasi tergantung pada temperatur, kelembaban, dan sebagainya.

## 2.6 Korosi Beton Konvensional

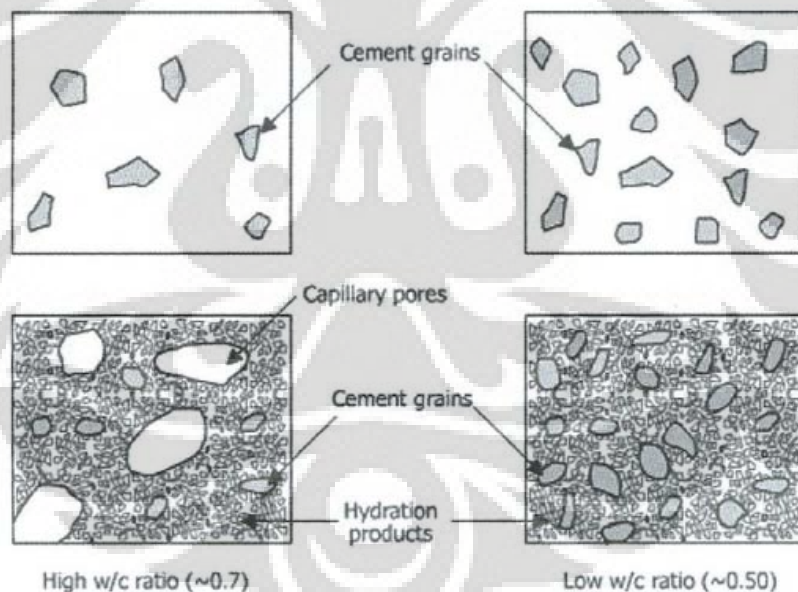
Reaksi dari semen dan air untuk membentuk pasta semen merupakan rangkaian reaksi hidrasi kompleks. Salah satu contoh reaksi hidrasi adalah sebagai berikut:



Peranan utama dari reaksi hidrasi semen dengan air yang menghasilkan larutan pori dalam beton adalah alkalinitas yang tinggi. Dengan penambahan kalsium hidroksida, terbentuk sodium dan potassium hidroksida mengakibatkan pH dari

beton umumnya menjadi 12,5 dan 13,6. Di bawah kondisi alkalin, baja tulangan memperlihatkan perilaku pasif, seperti yang telah diprediksi dalam Diagram Pourbaix dari besi. Dengan tidak adanya spesies korosif yang bepenetrasi ke dalam beton, baja karbon sebagai penguat biasanya memperlihatkan ketahanan korosi yang sangat baik<sup>[30]</sup>.

Kekuatan tekan dan densitas dari beton sangat dipengaruhi oleh rasio air semen. Gambar 2.13 memperlihatkan evolusi struktur pasta semen dengan rasio air-semen (w/c) rendah dan tinggi memperlihatkan produk hidrasi, butiran semen dan pori. Telah diketahui bahwa rasio air dengan semen (w/c) yang tinggi dalam beton menyebabkan penurunan kekuatan dan derajat porositas dalam beton<sup>[5]</sup>. Dengan kekuatan yang rendah, beton yang memiliki permeabilitas tinggi menjadi berkurang durabilitasnya. Namun demikian, pada kenyataannya, permasalahan dalam durabilitas menjadi lebih kompleks dan pertimbangan terhadap kekuatan sendiri menjadi tidak cukup.



Gambar 2.13 Skematik evolusi struktur pasta semen dengan rasio w/c rendah dan tinggi<sup>[5]</sup>

## 2.7 Korosi Beton Geopolimer

Pada beton geopolimer, produk reaksi utamanya adalah alkaline aluminosilicate gel dengan struktur tiga dimensi, jelas berbeda dari CSH yang terbentuk saat proses hidrasi Portland<sup>[8]</sup>. Mekanisme pengerasan (hidrasi) pada semen OPH merupakan terbentuknya senyawa kalsium silikat hidrat (CSH).

Senyawa kalsium yang bersifat alkali akan bereaksi dengan asam membentuk garam kalsium yang dapat menyebabkan terjadinya proses karbonisasi. Sedangkan mekanisme pengerasan pada geopolimer bukanlah merupakan proses hidrasi dari senyawa kalsium silikat seperti semen Portland. Akan tetapi, terjadi polikondensasi dari alumina dan silika membentuk senyawa aluminosilikat. Oleh karena itu, diharapkan material geopolimer memiliki ketahanan terhadap korosi yang lebih baik dari semen Portland.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa semen geopolimer memiliki ketahanan terhadap asam asetat dan asam sulfat yang jauh lebih baik dibandingkan semen Portland biasa<sup>[31]</sup>. Selain itu, menurut penelitian yang dilakukan Palomo dan Fernandez, pasta AAFA (alkali-activated fly ash) memperlihatkan hasil yang memuaskan pada lingkungan yang agresif seperti pada lingkungan air laut<sup>[8]</sup>.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Morris dan Hodge, baja dalam beton geopolimer berbahan dasar abu terbang memperlihatkan laju korosi yang rendah dan tidak terjadi reaksi yang merugikan dengan beton geopolimer yang dicuring maupun tidak dan memiliki laju korosi rendah jika beton basah maupun kering. Kombinasi dari kebasahan yang tinggi dan silikat terlarut akan menstabilkan lapisan protektif pada baja karbon selama matriks yang tersisa cukup alkalin. Hal ini memperlihatkan perilaku korosi dan elektrokimia pada beton geopolimer secara umum mirip dengan beton konvensional.

Penelitian lain dari Yodmune dan Yodsudjai menunjukkan bahwa dengan kuat tekan yang sama, beton geopolimer lebih baik dari beton konvensional dalam ketahanan terhadap korosi pada baja tulangan dalam beton<sup>[32]</sup>. Sebagai tambahan, menurut Miranda dan Fernandez, beton geopolimer yang bebas dari klorida dapat memfasilitasi baja tulangan secepat dan seefektif beton Portland.

## **2.8 Korosi Dipercepat**

Pada umumnya proses korosi berlangsung lambat sehingga efek dari proses ini tidak dapat diamati dalam waktu yang singkat. Korosi yang dipercepat (*corrosion acceleration*) pada baja tulangan dalam beton dilakukan untuk mendapatkan hasil pengujian yang layak dalam waktu yang relatif singkat. Korosi

pada baja tulangan dalam beton dapat dipercepat dengan pemberian potensial 3 V. Dengan mengaplikasikan faktor percepatan (potensial '*artificial*'), kondisi pengujian dapat mengalami perubahan dari kondisi lingkungan service yang sebenarnya.

Korosi yang dipercepat tidak terbatas pada sistem *lifecycle*, tetapi dapat digunakan untuk memberikan kondisi sebenarnya di lapangan terhadap terjadinya korosi sehingga dapat memberikan jawaban yang cepat, bagaimana sifat korosif dari material tersebut. Pengujian ini bersifat kualitatif dan tidak dapat digunakan untuk memprediksi umur pakai atau laju korosi.

Metode yang digunakan adalah pengukuran setengah sel (*half-cell potential measurement*) sehingga potensial korosi pada baja tulangan pada beton dapat diketahui. Cara termudah untuk menaksir sifat korosif pada baja adalah dengan mengukur potensial korosi. Parameter yang digunakan untuk menaksir kondisi dari baja tulangan dalam beton adalah dengan mengukur potensial setengah sel. Potensial setengah sel merupakan penurunan nilai potensial antara baja tulangan dan elektroda standar yang diletakkan di permukaan beton<sup>[29]</sup>.

Namun demikian, dibutuhkan juga data lain seperti kandungan ion klorida, kedalaman karbonasi, pengamatan delaminasi, laju korosi, dan kondisi lingkungan yang terekspos, sebagai tambahan terhadap pengukuran setengah sel, untuk menarik kesimpulan yang berkaitan dengan aktifitas dari baja penguat dan efeknya terhadap umur pakai dari struktur<sup>[11]</sup>.

Potensial setengah sel sesuai dengan kesetimbangan, dalam hal arus listrik, antara pelarutan logam dan reaksi reduksi, yang menghasilkan ion hidroksida (OH<sup>-</sup>). Terjadi pertukaran arus antara daerah pelarutan (reaksi oksidasi) dan reduksi oksigen. Pada beton, daerah pelarutan biasanya tetap dan relatif besar. Arus listrik (arus searah) dihubungkan pada daerah pelarutan dan daerah terjadinya reduksi oksigen. Nilai potensial dapat dihitung dengan menggunakan elektroda standar yang diletakkan pada permukaan beton

Baja tulangan sebagai anoda dan tembaga sebagai katoda dihubungkan melalui larutan elektrolit. Dengan mengalirkan arus listrik melalui rectifier, terjadi perpindahan elektron dari anoda menuju katoda. Dengan menggunakan kalomel

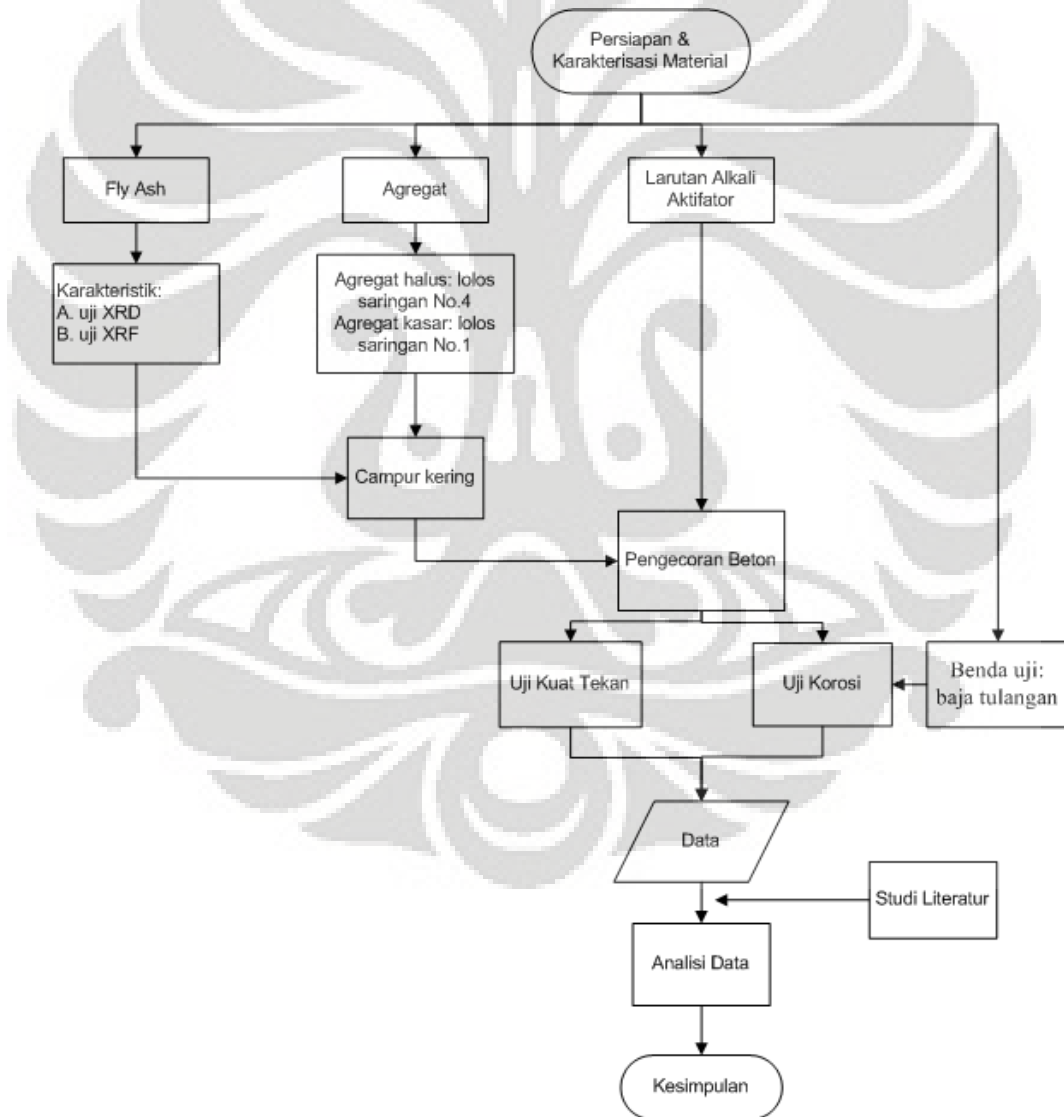
sebagai elektroda standar, nilai potensial setengah sel dari baja tulangan dalam beton dapat dihitung.



## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir

Berikut ini pada Gambar 3.1, diilustrasikan diagram alir yang menggambarkan secara umum kegiatan yang diajukan sebagai penelitian mengenai perilaku korosi pada baja beton bertulang geopolimer. Pada penelitian ini digunakan sampel beton geopolimer dan beton konvensional masing-masing sebanyak 6 sampel uji korosi dimana setiap sampel beton direndam dalam air aquades dan ASTM seawater dan 3 sampel uji kuat tekan.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

### 3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

**Alat :**

(1) *Concrete mixer*

Gambar 3.2 memperlihatkan *concrete mixer* yang terdapat pada laboratorium struktur di Departemen Teknik Sipil. Alat ini digunakan untuk mencampur bahan-bahan beton dengan baik.



**Gambar 3.2 Concrete mixer**

(2) Cetakan Beton

Untuk proses pengecoran beton digunakan cetakan yang terdapat pada laboratorium struktur di Departemen Teknik Sipil

- Untuk benda uji terhadap proses korosi  
Cetakan beton berbentuk silinder ( $D=100\text{mm}$ ;  $t=200\text{mm}$ ) seperti Gambar 3.3.



**Gambar 3.3 Cetakan silinder**

- Untuk benda uji terhadap kuat tekan  
Cetakan beton berbentuk kubus (15cm x15cm x 15cm) seperti Gambar 3.4.



**Gambar 3.4 Cetakan kubus**

- (3) Plastik  
Untuk menutup cetakan beton agar tidak terjadi penguapan berlebihan
- (4) Timbangan digital  
Untuk mengukur bahan-bahan pembuatan beton dan air laut ASTM, yang terdapat pada laboratorium struktur di Departemen Teknik Sipil dan laboratorium polimer di Departemen Teknik Metalurgi
- (5) Rectifier  
Untuk mengalirkan arus digunakan rectifier sebagai sumbernya, yang terdapat pada laboratorium korosi, Departemen Teknik Metalurgi



(6) Multimeter

Gambar 3.5 adalah alat untuk mengukur potensial dari baja tulangan yang terdapat pada laboratorium korosi, Departemen Teknik Metalurgi



**Gambar 3.5 Multimeter**

(7) pH meter

Gambar 3.6 adalah pH meter digital untuk mengukur pH larutan yang terdapat pada laboratorium kimia dasar di Departemen Teknik Kimia



**Gambar 3.6 pH meter digital**

(8) Elektroda kalomel

Sebagai elektroda standar untuk pengukuran potensial dari baja tulangan.

(9) Ember

(10) Kabel

(11) Gelas Kimia

**Bahan :**

(1) Benda Uji

Baja tulangan mild steel (D=14mm; t=140mm)

(2) Batangan tembaga

Tembaga digunakan sebagai katoda pada sel korosi

(3) Larutan rendam

- Aquades
- ASTM seawater

(4) Parameter beton

- Bahan Baku Geopolimer

Prekursor : Abu terbang yang berasal dari PLTU Suralaya

Larutan alkali aktivator : Waterglass (sodium silikat) dan sodium hidroksida

- Semen Portland

Jenis semen: Semen Portland tipe I

- Air

Air yang digunakan adalah air tanah dari laboratorium struktur di Departemen Teknik Sipil

- Agregat

Agregat yang digunakan dalam penelitian ini berupa agregat kasar (kerikil) dan agregat halus (pasir)

(5) Komposisi beton geopolimer dengan rasio solution/ash 0,43 adalah sebagai berikut:

- Abu terbang : 20,28%
- NaOH & NaSi : 6,83%
- Air : 1,85%
- Agregat pasir : 27,38%
- Agregat Kasar : 43,65%

(6) Komposisi beton Portland dengan rasio water/cement 0,37 adalah sebagai berikut:

- Semen : 21,10%
- Air : 7,87%
- Agregat halus : 27,38%
- Agregat kasar : 43,65%

### 3.3 Karakterisasi Abu Terbang

#### (1) Pengujian XRD

Pengujian XRD melalui teknik *Wide Angle X-ray Scattering* (WAXS) digunakan untuk mengetahui tingkat kristalinitas dan identifikasi fasa secara kualitatif dari sampel. Pada penelitian ini, pengujian ini berguna untuk mengetahui apakah abu terbang yang digunakan kristalin atau amorf.

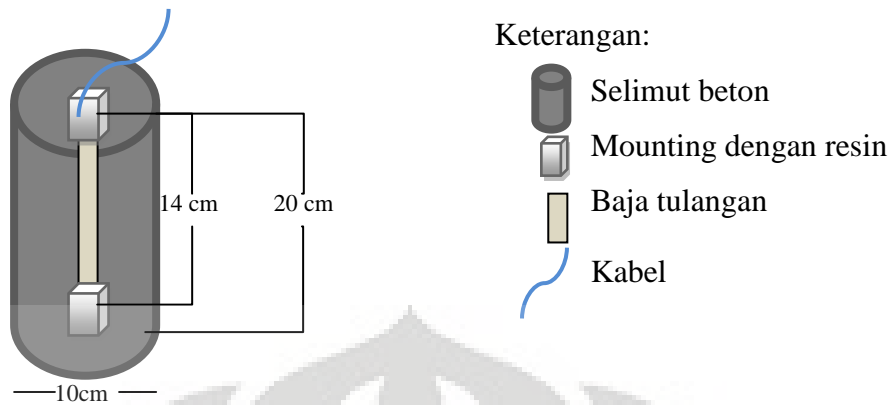
Sampel berupa serbuk yaitu abu terbang diletakkan pada tempat pengujiannya yang kemudian siap diuji pada mesin XRD. Selanjutnya didapatkan grafik dengan axis berupa  $2\theta$  dan ordinat berupa intensitas melalui perangkat lunak. Suatu senyawa memiliki  $2\theta$  dan intensitas spesifik sehingga untuk mengetahui senyawa apakah yang berada pada puncak suatu grafik XRD dapat dilakukan dengan mencocokkan data grafik tersebut dengan *database* yang dirangkum oleh *International Centre for Diffraction Data*.

#### (2) Pengujian XRF

X-Ray Fluorescence (XRF) digunakan untuk mengetahui komposisi kimia dari suatu material. Analisis unsur kimia terhadap sampel akan lebih teliti bila dilakukan dengan teknik XRF. Analisis XRF hanya efektif untuk unsur dengan berat molekul tinggi tetapi kurang akurat untuk unsur dengan berat molekul lebih ringan dari kalsium. Selain itu, kelemahan lain dari XRF adalah tidak dapat menentukan struktur dari atom yang membentuk material itu. Oleh sebab itu, biasanya digunakan juga XRD untuk mengetahui struktur materialnya.

### 3.4 Persiapan Benda Uji

- (1) Pemotongan baja tulangan (diameter 14mm; panjang 140 mm) dilanjutkan dengan machining.
- (2) Pengamplasan sampai permukaannya halus dan mengkilap.
- (3) Pemasangan kabel sebagai penghantar listrik pada sampel dengan solder.
- (4) Mounting dilakukan pada bagian atas dan bawah sampel, bagian yang akan diekspose terletak di tengah dengan ukuran  $\pm 60$ mm sesuai dengan Gambar 3.7.



**Gambar 3.7 Benda uji dalam selimut beton**

### 3.5 Persiapan Agregat

Agregat yang digunakan berupa agregat kasar dan agregat halus seperti Gambar 3.8.

- (1) Agregat kasar (kerikil) lolos saringan no.1.
- (2) Agregat halus (pasir) lolos saringan no.4.



**Gambar 3.8 Agregat yang digunakan pada penelitian**

### 3.6 Pembuatan Beton Geopolimer

- (1) Pembuatan larutan alkali aktivator dengan mencampurkan natrium silikat dan natrium hidroksida. Natrium hidroksida berbentuk pellet dilarutkan dengan air lalu dicampur ke dalam natrium silikat. Terjadi reaksi yang ditandai dengan kenaikan suhu.
- (2) Agregat kasar dan halus yang telah lolos uji saring serta abu terbang dicampur dalam keadaan kering di dalam concrete mixer.

- (3) Mencampur agregat dan abu terbang dengan larutan alkali aktivator yang telah dingin (temperatur turun) ke dalam concrete mixer dan diaduk sampai merata hingga terbentuk campuran yang homogen.
- (4) Tuangkan beton pada cetakan yang sebelumnya telah dilapisi dengan plastik lalu komaksi. Cetakan silinder dimana sampel baja diletakkan pada bagian tengahnya (uji korosi) dan cetakan kubus (uji kuat tekan). Setelah dicor, beton ditutup dengan plastik.
- (5) Pembukaan cetakan dilakukan satu hari setelah pembuatan beton.
- (6) Setelah beton dikeluarkan dari cetakan, dilakukan pengujian kuat tekan untuk sampel kubus sedangkan untuk uji korosi dilakukan perendaman ke dalam larutan aquadest dan ASTM seawater.

### **3.7 Pembuatan Beton Portland**

- (1) Agregat halus dan semen Portland dicampur di dalam concrete mixer lalu tambahkan air hingga terbentuk pasta.
- (2) Tambahkan agregat kasar lalu diaduk sampai merata hingga terbentuk campuran yang homogen.
- (3) Tuangkan beton dalam cetakan dan komaksi. Cetakan silinder dimana sampel baja diletakkan pada bagian tengahnya (uji korosi) dan cetakan kubus (uji kuat tekan).
- (4) Pembukaan cetakan dilakukan 1 hari setelah pembuatan beton.
- (5) Setelah beton dikeluarkan dari cetakan dilakukan curing selama 28hari.
- (6) Setelah itu, dilakukan pengujian kuat tekan untuk sampel kubus sedangkan untuk uji korosi dilakukan perendaman ke dalam larutan aquadest dan ASTM seawater.

### **3.8 Pembuatan Air Laut ASTM**

Air laut yang digunakan pada penelitian ini adalah air laut buatan sesuai standar ASTM D1141-90. Untuk pembuatan 10 L air laut prosedurnya adalah sebagai berikut:

- (1) Bahan kering NaCl dan Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dalam jumlah seperti pada Tabel 3.1 dilarutkan dalam air sebanyak 8-9 L.

- (2) Tambahkan 200ml larutan stock no.1 dan 100ml larutan stock no.2 lalu diaduk.
- (3) Pastikan volume yang dihasilkan sebanyak 10L dan diaduk kembali.
- (4) Ukur pH larutan dan atur pH sampai 8,2 dengan menambah beberapa milimeter NaOH 0,1N.

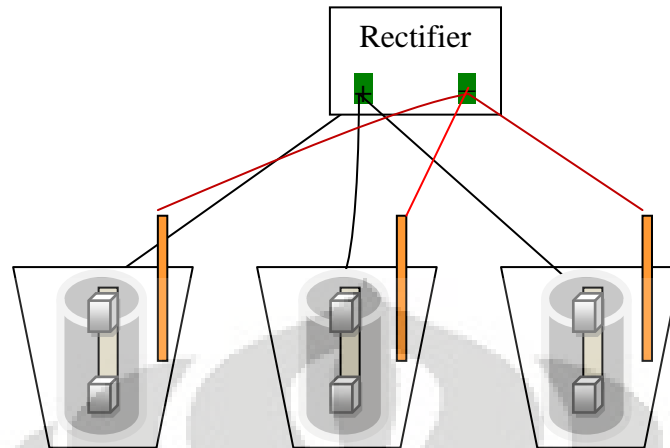
**Tabel 3.1 Komposisi air laut ASTM**

Bahan	Jumlah
Volume total 10L	
NaCl	245,34 gr
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> anhidrat	40,940 gr
<b>Stock no.1</b>	
MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	111,114 gr
CaCl <sub>2</sub> anhidrat	11,588 gr
SrCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	0,422 gr
Air	Ditambahkan hingga 200ml
<b>Stock no.2</b>	
KCl	6,945 gr
NaHCO <sub>3</sub>	2,01 gr
KBr	1,005 gr
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0,271 gr
NaF	0,03gr
Air	Ditambahkan hingga 100ml

### 3.9 Pengukuran Potensial Korosi

- (1) Susun peralatan seperti pada Gambar 3.9 dimana baja tulangan sebagai anoda dan batang tembaga sebagai katoda.
- (2) Pemberian potensial eksternal 3V dengan rectifier ke dalam sistem untuk mempercepat korosi selama 24 jam.
- (3) Pengukuran potensial secara manual dengan voltmeter. Elektroda yang digunakan adalah kalomel (SCE).
- (4) Ulangi untuk hari ke-2 hingga ke-10.

- (5) Ukur pH larutan dengan pH meter pada hari pertama dan terakhir.



Gambar 3.9 Pengukuran potensial

### 3.10 Pengukuran Kuat Tekan

Pengujian dilakukan dengan mesin uji tekan yang terdapat di laboratorium struktur dan material Departemen Teknik Sipil FTUI. Pengujian dilakukan pada hari ke-28 sampel dicor untuk beton geopolimer untuk mengetahui kekuatan beton jika dikenai beban. Hasil yang diperoleh dibandingkan dengan data teoritis beton konvensional dari pengujian lain.



Gambar 3.4 Mesin Uji Kuat Tekan

### 3.11 Pengolahan Data

#### Uji Korosi

Data yang didapat dari pengujian ini adalah nilai potensial dari baja tulangan dalam beton. Data tersebut diplot dalam grafik dengan x sebagai waktu (hari) dan y adalah nilai potensial (mV). Nilai potensial dari beton geopolimer dibandingkan dengan beton konvensional. Setelah pH diukur dengan pH meter, plot potensial dan pH ke dalam diagram Pourbaix

#### Uji Kuat Tekan

Data yang didapat dari pengujian ini adalah beban maksimum (Fmax) yang mampu diterima benda uji sebelum mengalami kegagalan. Kuat tekan dipengaruhi oleh luas permukaan yang dikenai oleh beban. Nilai kuat tekan ( $\sigma$ ) didapat berdasarkan persamaan:

$$\sigma = 0,098F/A \dots\dots\dots(3.1)$$

dimana:

$\sigma$  = kuat tekan (Mpa)

F = beban maksimum (kg)

A = luas permukaan sampel (cm<sup>2</sup>)



## BAB 4

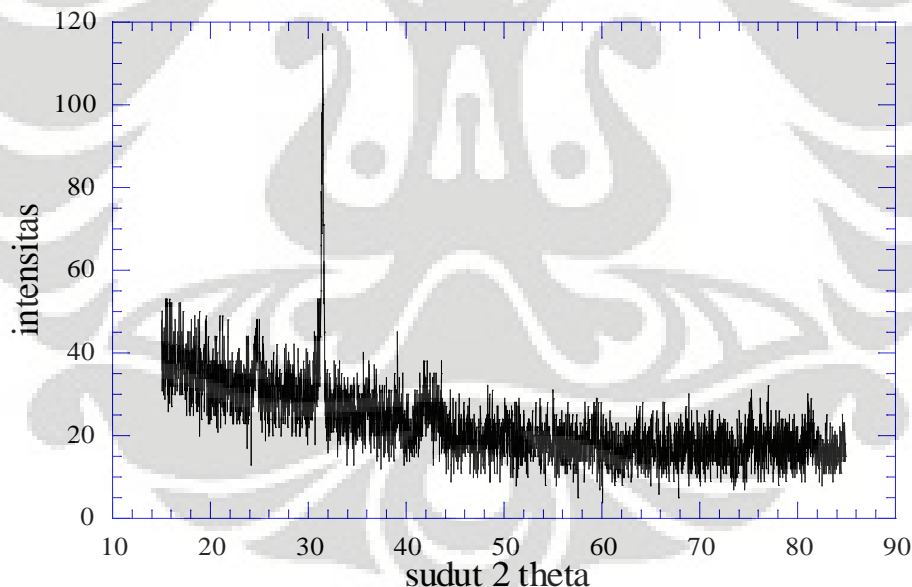
### HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Karakteristik Abu Terbang

##### 4.1.1 Analisis Hasil Uji XRD

Gambar 4.1 memperlihatkan hasil *X-Ray Diffraction* dari abu terbang yang berasal dari PLTU Suralaya. Pola difraksi dari abu terbang menunjukkan sifat amorf. Hal ini dapat dilihat dari lengkungan (hump) pada sudut  $2\theta$  sekitar  $20^\circ$  sampai  $30^\circ$ . Namun demikian, hasil uji XRD yang hanya satu jam kurang memenuhi, sehingga difraktogram masih kurang jelas.

Material yang memiliki sifat *amorphous* lebih mudah bereaksi dengan larutan alkalin atau aktivator dalam reaksi geopolimerisasi dibandingkan material kristalin<sup>[33]</sup>. Oleh karena itu, abu terbang yang digunakan pada penelitian memenuhi syarat sebagai prekursor untuk geopolimer.



**Gambar 4.1** Pola difraksi dari abu terbang

##### 4.1.2 Analisis Hasil Uji XRF

Pengujian XRF dilakukan untuk mengetahui komposisi senyawa kimia dari suatu material secara kuantitatif. Dari hasil pengujian diketahui bahwa abu

terbang mengandung  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang merupakan komponen utama untuk proses geopolimerisasi.

ASTM C618 menggolongkan abu terbang menjadi dua kelas berdasarkan kandungan kapur ( $\text{CaO}$ ) menjadi kelas F yaitu dengan kandungan  $\text{CaO}$  kurang dari 10% dan kelas C dimana kandungan  $\text{CaO}$  lebih dari 10%. Dalam penelitian ini abu terbang yang digunakan termasuk dalam ASTM C618 kelas F dengan kandungan  $\text{CaO}$  sekitar 5%. Adapun komposisi kimia dari abu terbang dapat dilihat pada Tabel 4.1

**Tabel 4.1 Komposisi abu terbang**

Chemical Formula	Wt. (%)
$\text{Al}_2\text{O}_3$	25.26
$\text{SiO}_2$	47.2992
S	0.2969
$\text{K}_2\text{O}$	0.7009
$\text{CaO}$	5.1482
$\text{TiO}_2$	1.7579
$\text{MnO}$	0.1238
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	16.5277
$\text{SrO}_2$	0.1743
$\text{MgO}$	2.7074

Kandungan abu terbang yang dapat mempengaruhi sifat-sifat geopolimer, diantaranya  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Berdasarkan hasil uji XRF, abu terbang Suralaya memiliki kadar silikat dan aluminat yang cukup untuk reaksi geopolimerisasi dan kadar  $\text{CaO}$  yang rendah sehingga kuat tekannya stabil.

Kandungan  $\text{CaO}$  dapat meningkatkan kecepatan pengerasan seperti pada reaksi hidrasi semen Portland. Kandungan  $\text{CaO}$  berpengaruh cukup baik untuk pengerasan awal karena  $\text{CaO}$  membantu reaksi hidrasi dan pengerasan awal pada geopolimer. Jika kandungan  $\text{CaO}$  tinggi (diatas 10%) dapat meningkatkan kuat tekan awal geopolimer namun keberadaannya membuat ketahanan dan kuat tekan geopolimer turun<sup>[34]</sup>. Oleh karena itu, abu terbang kelas F lebih banyak digunakan

sebagai bahan baku geopolimer karena geopolimer yang dihasilkan memiliki kekuatan yang stabil.

#### 4.2 Komposisi Pasta

Tabel 4.2 merupakan komposisi pasta dari beton geopolimer untuk uji korosi dan kuat tekan. Untuk pengujian korosi menggunakan cetakan silinder sedangkan cetakan kubus untuk uji kuat tekan. Sebagai perbandingannya, beton konvensional tipe I, yaitu semen Portland digunakan. Komposisi pasta Portland sesuai dengan Tabel 4.3.

**Tabel 4.2 Komposisi pasta geopolimer**



**Tabel 4.3 Komposisi pasta Portland**



#### 4.3 Desain Campur Beton (*mix design*)

Desain komposisi adonan sampel merupakan suatu perbandingan dari bahan penyusunnya yaitu abu terbang, natrium hidroksida, natrium silikat, dan air seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2. Dalam menentukan desain campur beton, sebelumnya harus mengetahui komposisi yang tepat dari material geopolimer.

Komposisi perbandingan antara prekursor dan aktivator harus ditentukan agar mendapatkan campuran yang terbaik untuk mendapatkan kuat tekan yang maksimal. Dalam penelitian ini, rasio *solution/ash* adalah 0,43. Dengan *mix*

*design* yang sama, rasio *water/cement* yang digunakan pada beton konvensional adalah sebesar 0,37.



**Gambar 4.2** Bahan pembuatan beton geopolimer

#### 4.4 Analisis Pengujian Kuat Tekan

Pengujian untuk kuat tekan dilakukan pada hari ke-28 setelah pengecoran. Tabel 4.4 menunjukkan hasil pengujian dari mesin uji kuat tekan untuk beton geopolimer dan beton Portland pada Tabel 4.5. Data yang diperoleh dari mesin uji adalah beban maksimum yang mampu diterima benda uji sebelum mengalami kegagalan.

**Tabel 4.4** Hasil uji kuat tekan beton geopolimer

Sampel ke-	Berat beton (kg)	Beban maksimum (kg)	Kuat tekan (MPa)
Sampel 1	7844	88000	38,33
Sampel 2	7823	107000	46,6
Sampel 3	7780	117000	50,96
<b>Rata-rata</b>		<b>104000</b>	<b>45,3</b>

**Tabel 4.5** Hasil uji kuat tekan beton konvensional

Sampel ke-	Berat beton (kg)	Beban maksimum (kg)	Kuat tekan (MPa)
Sampel 1	7864	94000	40,94
Sampel 2	7874	88000	38,33

Sampel 3	7860	90000	39,2
Rata-rata		90666,67	39,49

Sampel beton geopolimer rata-rata dapat menahan beban sebesar 104000kg. Kemudian beban maksimum dan luas permukaan sampel sebesar 15 cm x 15 cm dimasukkan ke dalam persamaan 3.1

$$\sigma = \frac{0,098 \times 104000\text{kg}}{225 \text{ cm}^2} = 45,3 \text{ MPa}$$

Dari perhitungan didapat nilai kuat tekan yang baik yaitu sebesar 45,3 MPa untuk beton geopolimer sedangkan beton konvensional menghasilkan kuat tekan sekitar 39,49 MPa. Dengan mix desain yang sama, kuat tekan beton geopolimer lebih tinggi daripada beton konvensional. *American Concrete Institute* (ACI) mengklasifikasikan beton berdasarkan kuat tekannya menjadi tiga kategori yang dapat dilihat pada Tabel 4.6 adalah sebagai berikut:

**Tabel 4.6 Klasifikasi kuat tekan beton**

<b>Kuat tekan rendah</b>	<b>Kurang dari 20 MPa</b>
<b>Kuat tekan medium</b>	<b>Di antara 20 dan 40 MPa</b>
<b>Kuat tekan tinggi</b>	<b>Lebih dari 40 MPa</b>

Jadi, dari hasil pengujian, beton geopolimer yang digunakan termasuk beton dengan kuat tekan yang tinggi. Selain itu, kuat tekan yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan beton Portland.

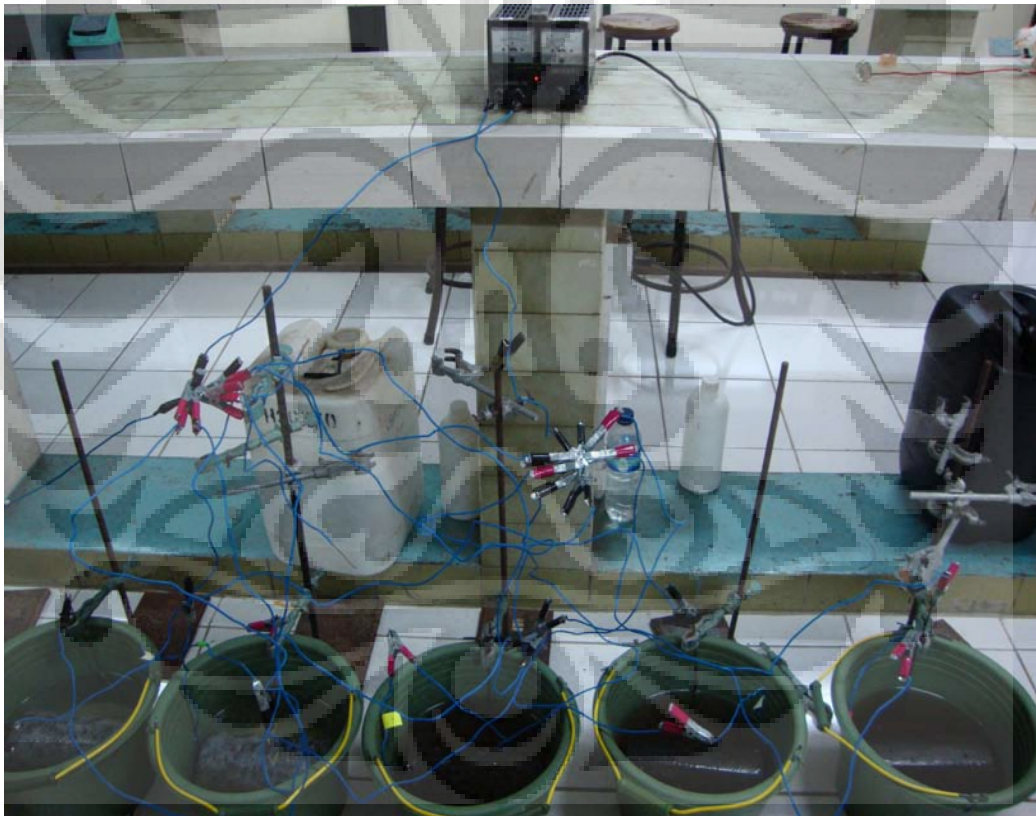
#### **4.5 Pengamatan Visual**

Untuk mengetahui perilaku korosi beton geopolimer dilakukan pembuatan sampel beton dengan baja tulangan sebagai penguat didalamnya. Baja tulangan yang telah dipreparasi sebelumnya dengan *machining, soldering, dan mounting* seperti pada Gambar 4.3 dimasukkan ke dalam beton geopolimer. Baja harus bebas dari sisa-sisa mounting, karat, dan kotoran. Hal ini dilakukan agar hasil pengujian korosi optimal.



**Gambar 4.3 Baja tulangan**

Sehari setelah pengecoran beton geopolimer dilakukan perendaman di dalam air laut dan aquades. Sedangkan untuk beton Portland pengujian dilakukan setelah hari ke-28. Selanjutnya, pada beton dialirkan arus listrik, dengan pemberian potensial sebesar 3 V, dimana baja tulangan dalam beton sebagai anoda dan batang tembaga sebagai katoda. Susunan peralatan pada pengujian dapat dilihat pada Gambar 4.4.

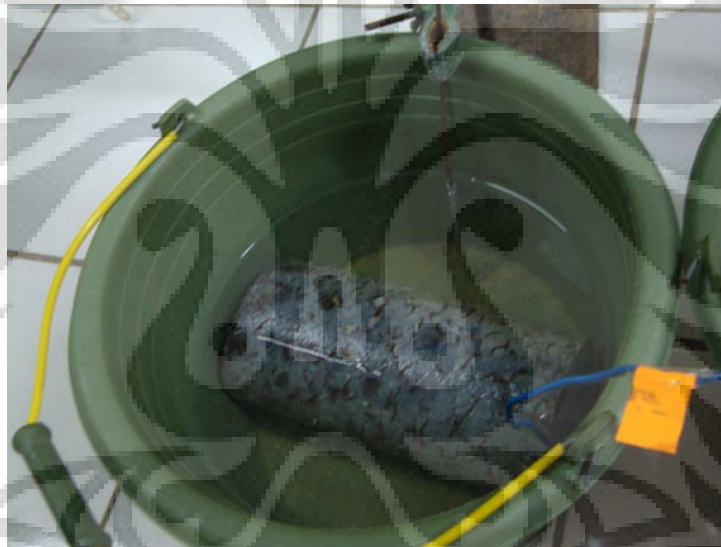


**Gambar 4.4 Susunan peralatan pada pengujian korosi yang dipercepat**

Proses korosi dimulai saat atom-atom dari anoda terurai menjadi ion-ion sehingga anoda menjadi negatif dari lingkungan sekitarnya. Elektron yang dihasilkan dari anoda mengalir menuju katoda melalui penghantar elektrolit. Ion mengalir melalui elektrolit untuk menyeimbangkan aliran dari elektron. Larutan elektrolit yang digunakan adalah air laut ASTM dan aquades.



**Gambar 4.5 Beton geopolimer dalam aquades**



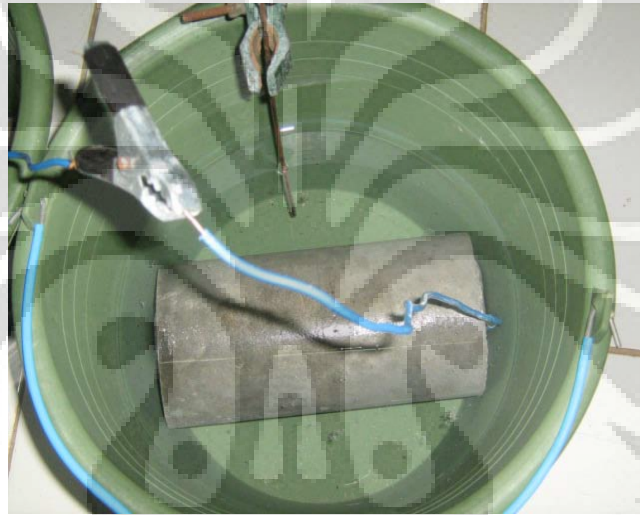
**Gambar 4.6 Beton geopolimer dalam air laut**

Gambar 4.5 merupakan sampel beton geopolimer yang direndam dalam media aquades. Dari gambar terlihat larutan menjadi keruh setelah perendaman namun demikian tidak terbentuk endapan. Larutan yang keruh ini disebabkan terdapat partikel-partikel dari beton yang melarut ke dalam aquades.

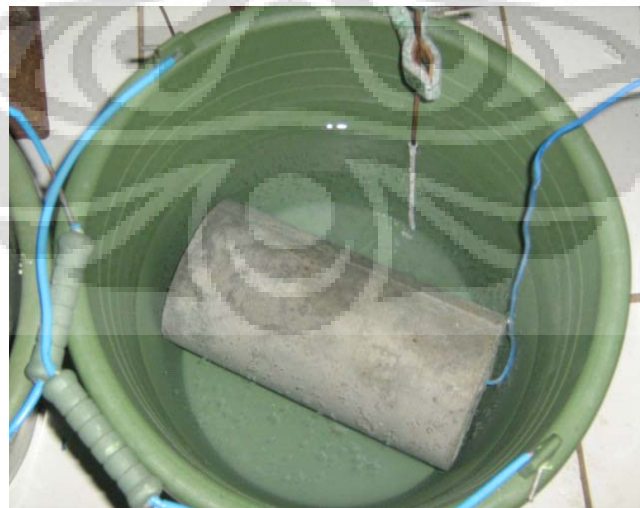
Pada beton geopolimer yang direndam pada air laut, warna beton berubah dari warna asal, menjadi agak keabuan seperti yang terlihat pada Gambar 4.6 Selain itu, terdapat endapan pada larutan elektrolitnya. Endapan ini kemungkinan adalah natrium klorida. Dari gambar juga terlihat retak-retak pada permukaan beton geopolimer. Retak ini terjadi karena derajat porositas yang tinggi dari beton

geopolimer disebabkan proses curing yang singkat. Pororsitas dipengaruhi oleh waktu *curing*. *Curing* dilakukan untuk mengurangi porositas sehingga kekuatan beton tetap terjaga.

Seperti yang terlihat pada Gambar 4.7, larutan aquades pada beton Portland masih jernih. Dengan waktu *curing* yang lebih lama sekitar 28 hari untuk mencapai kekuatan optimal, beton telah mengalami proses hidrasi yang maksimal. Sedangkan untuk beton yang direndam dalam air laut juga terbentuk endapan garam natrium klorida. Akan tetapi, dari Gambar 4.8 tidak terlihat adanya retak pada permukaan beton Portland.



**Gambar 4.7 Beton konvensional dalam aquades**



**Gambar 4.8 Beton konvensional dalam air laut**



#### 4.6 Hasil Pengukuran Potensial dan pH

Pengukuran potensial setengah sel dilakukan secara manual dengan multimeter. Gambar 4.9 memperlihatkan susunan peralatan dengan menggunakan elektroda standar. Elektroda yang digunakan adalah kalomel (SCE). Ujung dari elektroda dijaga agar tidak bersentuhan langsung dengan struktur. Oleh karena itu, digunakan Luggin Probe yang berisi kalium klorida (KCl) jenuh. Nilai potensial yang terukur pada multimeter diperoleh dengan menghubungkan elektroda kalomel dengan baja tulangan. Pengukuran dilakukan selama 10 hari.



Gambar 4.9 Pengukuran potensial setengah sel

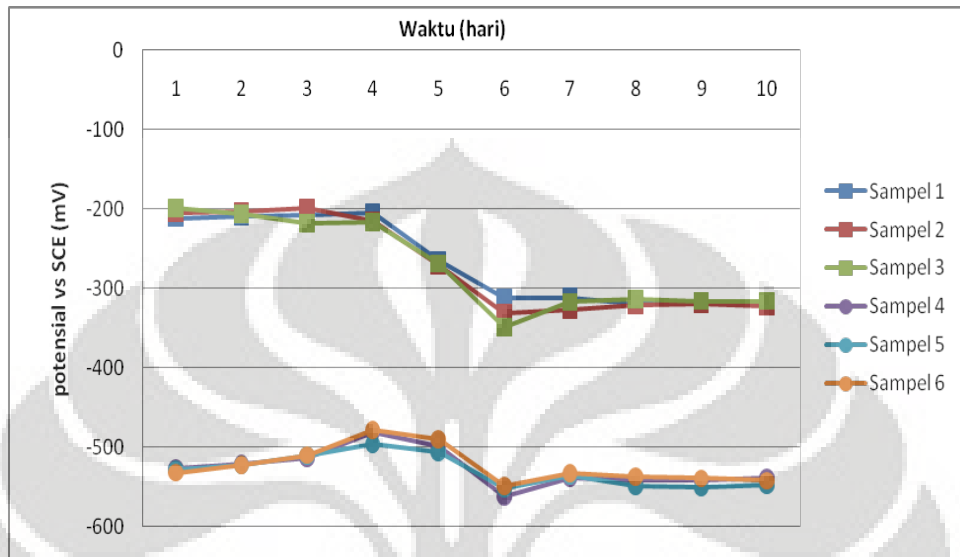
##### 4.6.1 Analisis hasil pengukuran potensial setengah sel beton konvensional

Tabel 4.7 memperlihatkan hasil pengukuran potensial setengah sel dari baja tulangan dalam beton Portland dalam media air laut ASTM dan aquades. Nilai potensial baja tulangan pada media air laut berkisar dari -200mV sampai -350mV sedangkan untuk media aquades dari -450mV hingga -550mV.

Tabel 4.7 Data hasil pengukuran potensial setengah sel dari beton konvensional

No. sampel	Media	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10
1	Air laut	-212	-210	-208	-205	-265	-312	-311	-319	-317	-318
2		-205	-203	-199	-215	-271	-331	-327	-321	-320	-322
3		-199	-207	-218	-217	-269	-349	-317	-314	-316	-316
4	Aquades	-527	-521	-513	-481	-498	-562	-538	-542	-542	-538
5		-528	-523	-511	-496	-506	-552	-536	-549	-551	-548
6		-532	-522	-510	-478	-490	-549	-533	-537	-539	-542

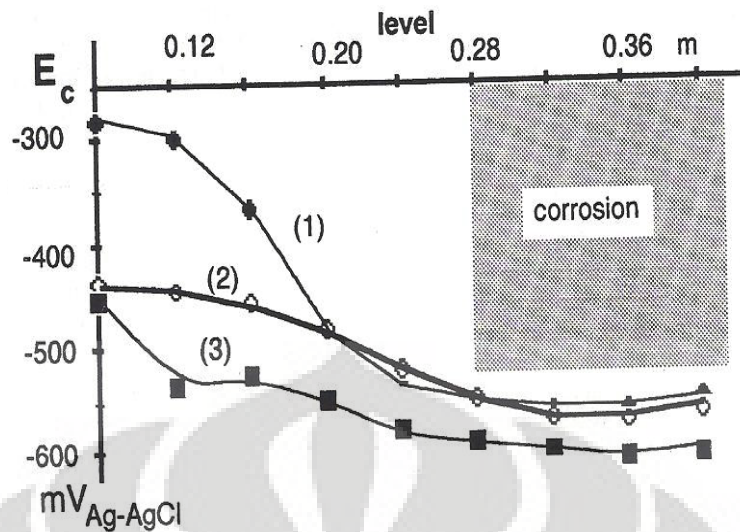
Hasil pengujian diplot dalam grafik dengan x sebagai waktu (hari) dan y adalah nilai potensial (mV) seperti yang terlihat pada Gambar 4.10. Dari grafik dapat dilihat nilai potensial setengah sel setelah hari ke-7 cenderung konstan.



**Gambar 4.10** Grafik potensial setengah sel beton Portland, ■ di air laut, ● di aquades

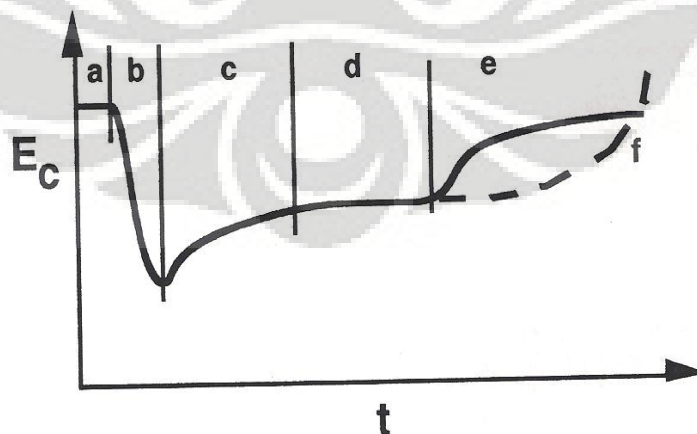
Penelitian tentang pengukuran potensial setengah sel dari baja tulangan di beton yang direndam dilakukan oleh Gilbert dan Andre dengan menggunakan sampel beton konvensional (semen Portland) yang diperkuat dengan baja tulangan di dalamnya<sup>[33]</sup>. Elektroda standar diletakkan di permukaan beton yang diberi lingkungan 'artificial' dengan mengaplikasikan oksigen dimana elektroda Ag-AgCl diisolasi dari lingkungan sekitar dengan *vessel*. Baja tulangan terkorosi dengan polarisasi anodik dimana titanium sebagai katoda dan baja sebagai anoda yang disambungkan dengan sumber DC (12 V) selama 66 jam.

Gambar 4.11 merupakan hasil pengujian dari beton yang direndam dalam air. Nilai potensial korosi yang diperoleh berkisar antara -500mV sampai -600mV dengan menggunakan elektroda Ag-AgCl. Jika nilai tersebut dikonversikan menjadi elektroda kalomel diperoleh nilai yang tidak berbeda jauh. Hal ini sesuai dengan pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini dimana nilai potensial dari beton konvensional yang diperoleh sekitar -550mV.



Gambar 4.11 Potensial setengah sel baja dalam beton (1) di udara,segera setelah korosi, (2) di udara,setelah jenuh air, (3) di air setelah 5 menit di lingkungan 'artificial'<sup>[33]</sup>

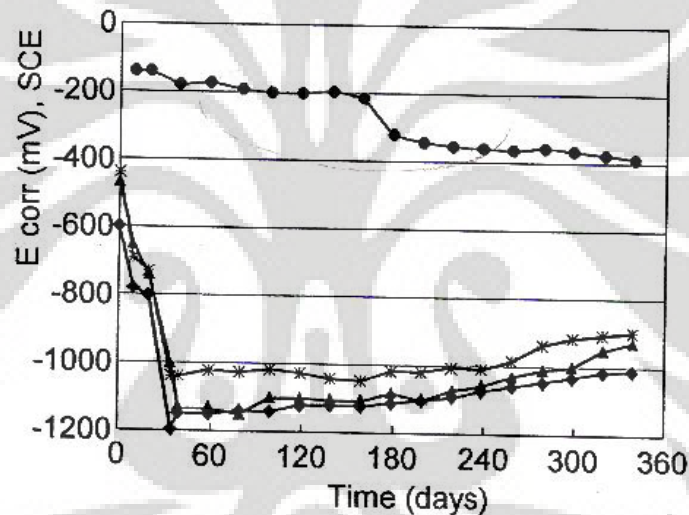
Dari pengujian yang dilakukan oleh Gilbert dan Andre disimpulkan bahwa potensial setengah sel dari baja tulangan tidak selamanya sama dan nilai  $E_c$  pada lingkungan 'artificial' sama dengan nilai yang diperoleh di lingkungan udara sebenarnya. Gambar 4.12 adalah tipikal kurva  $E_c$  dan waktu dengan beberapa tahap dimana (a) tahap awal, (b) tahap *water free*, (c) tahap *progressive drying*, (d) *plateau*, (e) tahap *re-immersion*, (f) tahap *hard drying*. Pada tahap *plateau* nilai potensial setengah sel adalah konstan. Nilai potensial setengah sel pada tahap ini mendekati nilai yang diperoleh saat baja tulangan dalam beton berada di lingkungan udara sebenarnya.



Gambar 4.12 Perubahan potensial setengah sel terhadap waktu dari baja pada lingkungan 'artificial'<sup>[33]</sup>

Fratesi, Moriconi dan Coppola melakukan penelitian tentang pengaruh dari galvanisasi baja sebagai penguat di dalam beton dengan membandingkannya terhadap baja tulangan biasa. Sampel beton menggunakan semen CE IV/A 42,5 dengan rasio w/c 0,5 sedangkan sampel baja dengan menggunakan plat baja<sup>[36]</sup>.

Setelah satu bulan dicuring, baton diekspose ke dalam lingkungan agresif, air laut dari pelabuhan Ancona. Dari grafik E dengan waktu pada Gambar 4.13 dapat dilihat bahwa nilai potensial baja dalam beton yang direndam dalam air laut selama 1 tahun berkisar antara -200mV sampai -400mV. Pengukuran nilai potensial dalam penelitian ini juga menunjukkan kisaran nilai yang sama dalam waktu yang relatif singkat karena proses korosi yang dipercepat.



Gambar 4.13 Nilai rata-rata potensial korosi pada perendaman di air laut ●bare steel, ▲galvanized steel, ✱scratched galvanization, ◆chromated galvanization<sup>[36]</sup>

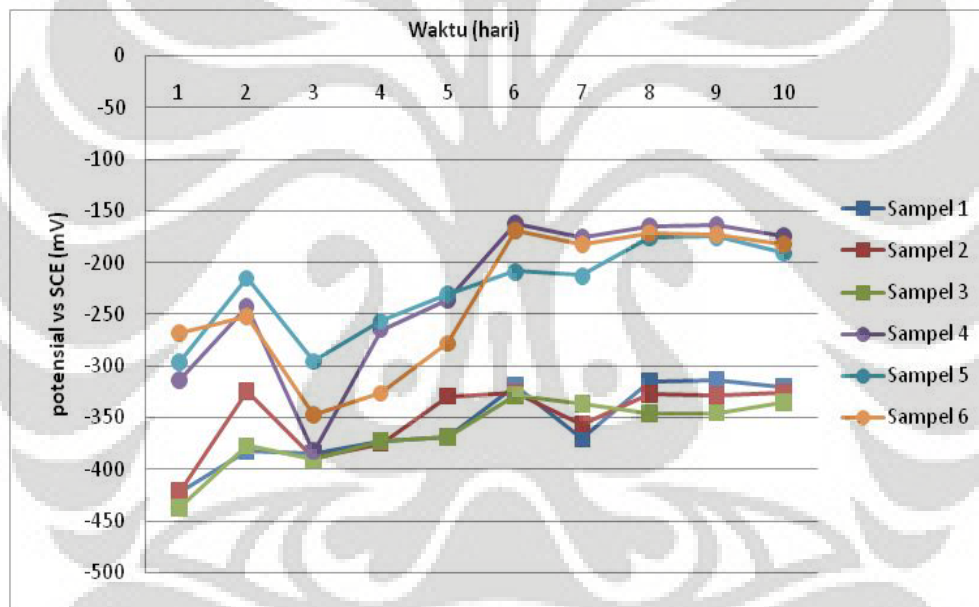
#### 4.6.2 Analisis hasil pengukuran potensial setengah sel beton geopolimer

Tabel 4.8 memperlihatkan hasil pengukuran potensial setengah sel dari baja tulangan dalam beton geopolimer dalam media air laut ASTM dan aquades. Nilai potensial baja tulangan pada media air laut berkisar dari -300mV sampai -450mV sedangkan untuk media aquades dari -150 hingga -400mV.

Tabel 4.8 Data hasil pengukuran potensial setengah sel dari beton geopolimer

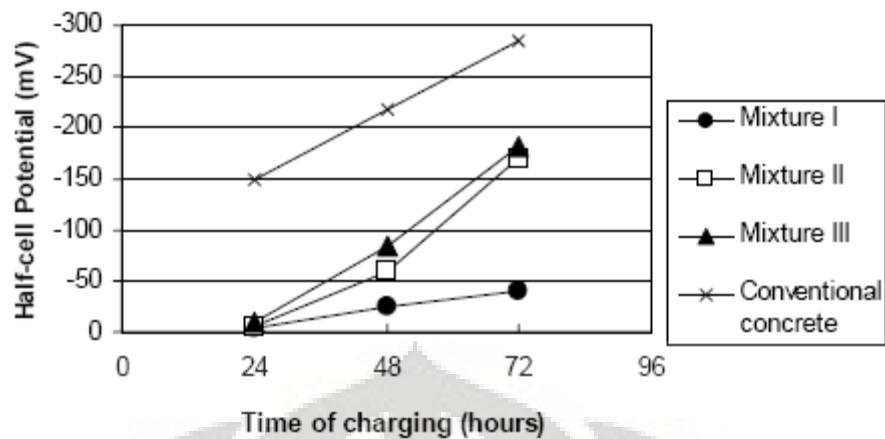
No. sampel	Media	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10
1	Air laut	-423	-383	-385	-373	-369	-320	-371	-316	-314	-321
2		-422	-324	-389	-375	-329	-326	-356	-327	-328	-326
3		-437	-377	-390	-372	-368	-328	-336	-346	-345	-335
4	Aquades	-314	-243	-383	-265	-236	-162	-176	-165	-164	-174
5		-297	-215	-296	-257	-231	-209	-213	-176	-175	-191
6		-268	-252	-347	-326	-278	-169	-183	-172	-173	-183

Hasil pengujian diplot dalam grafik dengan x sebagai waktu (hari) dan y adalah nilai potensial (mV) seperti yang terlihat pada Gambar 4.14. Dari grafik dapat dilihat nilai potensial setengah sel pada hari ke-8 hingga ke-10 cenderung konstan.



Gambar 4.14 Grafik potensial setengah sel beton geopolimer, ■ di air laut, ● di aquades

Penelitian tentang perilaku korosi baja tulangan dalam beton geopolimer berbahan baku abu terbang dilakukan oleh Yodmune dan Yodsujai<sup>[32]</sup>. Mereka menyatakan bahwa dengan kuat tekan sama, beton geopolimer memiliki ketahanan terhadap korosi lebih baik dari beton konvensional. Metode pengujian dengan korosi yang dipercepat dengan pemberian potensial yang tinggi (3V). Pada penelitian ini beton di-curing selama 7 hari sehingga terjadi pengerasan. Kemudian beton direndam dalam air dan di-charging hingga 3 hari. Dari Gambar 4.15 terlihat bahwa potensial setengah sel menurun dengan meningkatnya waktu charging.



Gambar 4.15 Hasil pengukuran potensial setengah sel<sup>[32]</sup>

Dari penelitian yang dilakukan oleh Yodmuneer dan Yodsujai terdapat beberapa kekurangan seperti tidak diketahui elektroda standar yang digunakan, waktu pengujian yang relatif singkat sehingga belum terbentuk potensial setengah sel yang konstan. Menurut Gilbert dan Andre nilai potensial setengah sel pada tahap *plateau* dimana  $E_c$  bernilai konstan mendekati nilai yang diperoleh saat baja tulangan dalam beton berada di lingkungan udara sebenarnya. Selain itu, pada penelitian ini beton sudah mengalami pengerasan, berbeda dengan penelitian yang dilakukan dalam skripsi ini.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Morris dan Hodge, baja dalam beton geopolimer berbasis dasar abu terbang memperlihatkan laju korosi yang rendah dan tidak terjadi reaksi yang merugikan dengan beton geopolimer yang dicuring maupun tidak dan memiliki laju korosi rendah jika beton basah maupun kering. Kombinasi dari kebasahan yang tinggi dan silikat terlarut akan menstabilkan lapisan protektif pada baja karbon selama matriks yang tersisa cukup alkalin.

#### 4.6.3 Analisis pH media

Dari hasil pengukuran dengan pH meter, pH awal dari aquades dan air laut ASTM pada beton konvensional berturut-turut adalah 7,2 dan 8,2. Setelah 10 hari *charging*, pH yang diukur bernilai 7,2 dan 8,2 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.9.

**Tabel 4.9 pH media pada beton Portland**

media/hari ke-	hari ke-1	hari ke-10
aquades	7,2	7,2
air laut ASTM	8,2	8,2

Untuk beton geopolimer, pada hari ke-1 nilai pH sama dengan Portland karena media yang digunakan berasal dari tempat yang sama. Kemudian setelah hari ke-10, pH diukur lagi dan didapat hasil pH 10 dari media aquades dan 9 pada air laut ASTM seperti yang terlihat pada Tabel 4.10.

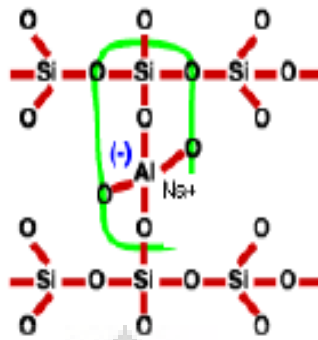
**Tabel 4.10 pH media pada beton geopolimer**

media/hari ke-	hari ke-1	hari ke-10
aquades	7,2	10
air laut ASTM	8,2	9

Nilai pH yang diperoleh dari pengujian ini sesuai dengan literatur<sup>[2]</sup>. Nilai pH dari geopolimer dengan menggunakan larutan alkali aktifator NaOH dengan natrium silikat atau KOH dengan kalium hidroksida pada air distilasi (aquades) berkisar antara 9,0 sampai 10,0.

Nilai pH dari beton geopolimer setelah 10 hari menjadi lebih basa pada semua media. Hal ini dapat terjadi akibat proses geopolimerisasi dari beton geopolimer. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut:

- (1) Fly ash yang mengandung aluminosilikat,  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , direaksikan dengan larutan basa kuat (NaOH) mengalami proses disolusi menjadi monomer yang kemudian bergabung menjadi oligomer aluminosilikat yaitu  $\text{Si}(\text{OH})_4$  dan  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  yang reaktif.
- (2) Polikondensasi (curing) sehingga menghasilkan geopolimer dengan hasil sampingan  $\text{H}_2\text{O}$ . Fakta bahwa atom Al memiliki koordinasi 4 dengan  $(\text{OH}^-)$  membuat ketidakseimbangan muatan negatif sehingga kehadiran ion  $\text{Na}^+$  berperan penting menjaga kenetralan muatan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.16.



Gambar 4.16 Ikatan yang terjadi dalam geopolimer<sup>[2]</sup>

Tidak semua  $\text{Na}^+$  bereaksi dengan  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  untuk proses polikondensasi. Ion  $\text{Na}^+$  yang berlebih akan berikatan dengan  $\text{OH}^-$  membentuk  $\text{NaOH}$  sehingga menyebabkan lingkungan menjadi basa. Selain itu, dari reaksi geopolimerisasi terdapat hasil sampingan  $\text{H}_2\text{O}$ . Oleh karena itu, pH dari beton geopolimer berubah menjadi lebih basa. Hal ini tidak terjadi dari beton Portland dimana pH media tidak mengalami perubahan yang signifikan.

#### 4.7 Diagram Pourbaix

Hasil pengukuran potensial dan pH dari larutan air laut dan aquades pada baja tulangan dalam beton konvensional dan beton geopolimer diplot ke dalam diagram Pourbaix E-pH.

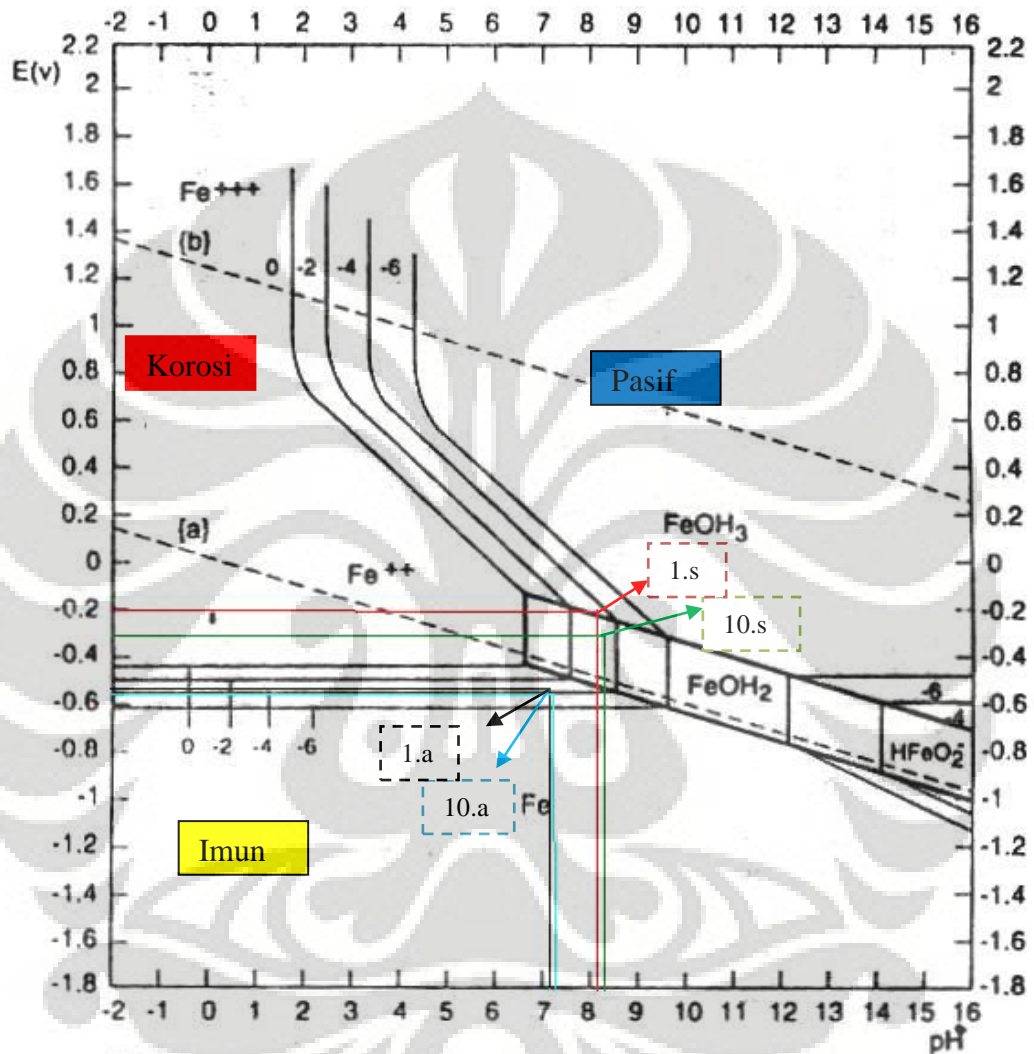
##### 4.7.1 Diagram Pourbaix Fe pada beton konvensional

Gambar 4.17 memperlihatkan diagram Pourbaix baja tulangan dalam beton geopolimer pada hari pertama *charging* dan hari ke-10 pengukuran. Pada hari pertama perendaman dalam aquades dan air laut, baja berada pada daerah korosi. Di dalam aquades, baja berada pada potensial  $-0,529\text{V}$  dengan pH 7,2 sedangkan dalam air laut, potensial baja berada pada  $-0,205\text{V}$  dengan pH sekitar 8,2. Hal ini disebabkan baja diberi potensial yang sangat tinggi sekitar 3 V sehingga baja tulangan dalam beton mengalami korosi yang dipercepat.

Setelah 10 hari *charging*, baja tulangan pada kedua media berada pada daerah korosi, dimana potensial baja  $-0,543\text{ V}$ ; pH 7,2 di aquades dan  $-0,319$ ; pH 8,2 di air laut. Dalam jangka waktu pengukuran tersebut, lapisan pasif diduga belum terbentuk atau telah terbentuk namun belum stabil sehingga baja mudah terserang korosi. Selain itu, adanya CSH yang terbentuk saat proses hidrasi



Portland dapat menimbulkan korosi<sup>[8]</sup>. Mekanisme pengerasan (hidrasi) pada semen OPH merupakan terbentuknya senyawa kalsium silikat hidrat (CSH). Senyawa kalsium yang bersifat alkali akan bereaksi dengan asam membentuk garam kalsium yang dapat menyebabkan terjadinya proses karbonisasi.



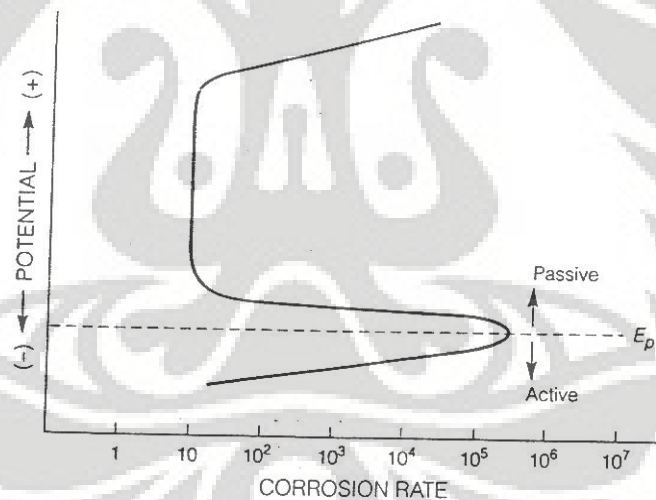
Gambar 4.17 Plot E dan pH beton konvensional pada Diagram Pourbaix Fe

Yalcyn dan Ergun mengukur laju korosi pada baja tulangan dalam beton konvensional selama 90 hari. Dari hasil penelitian, laju korosi tinggi pada awalnya (hari ke-1) dan menurun secara eksponensial dengan meningkatnya waktu hingga hari ke-90 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.11<sup>[35]</sup>. Menurunnya laju korosi disebabkan baja mengalami pasivasi. Juga dapat dilihat bahwa beton dengan gradien ion Cl<sup>-</sup> yang tinggi dari NaCl yang ditambahkan dalam beton memiliki laju korosi yang tinggi.

Tabel 4.11 Laju korosi dari baja tulangan dalam waktu yang berbeda<sup>[55]</sup>

Concrete	Life Time Days	Tafel Constants		Corrosion Rates, $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
		$\beta_a, \text{mV}$	$\beta_c, \text{mV}$	
Without admixture	1	524	160	0.53
	7	481	203	0.15
	28	421	219	0.25
	60	370	220	0.11
	90	306	289	0.07
6 kg $\text{Na}^+/\text{m}^3$	1	338	309	4.60
	7	365	339	3.80
	28	406	393	2.20
	60	423	391	1.70
	90	480	391	0.61
10 kg $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2/\text{m}^3$	1	195	375	1.40
	7	222	257	1.19
	28	304	236	0.60
	60	321	261	0.25
	90	397	142	0.09

Kurva polarisasi memperlihatkan kondisi aktif pasif dari suatu material. Pada daerah pasif terjadi peningkatan potensial oksidasi melewati daerah aktif, yang akan menurunkan laju korosi seperti yang terlihat pada Gambar 4.18. Penurunan laju korosi pada kondisi pasif hingga  $10^6$  kali lebih rendah dari laju maksimum yang tercapai saat kondisi aktif<sup>[24]</sup>.

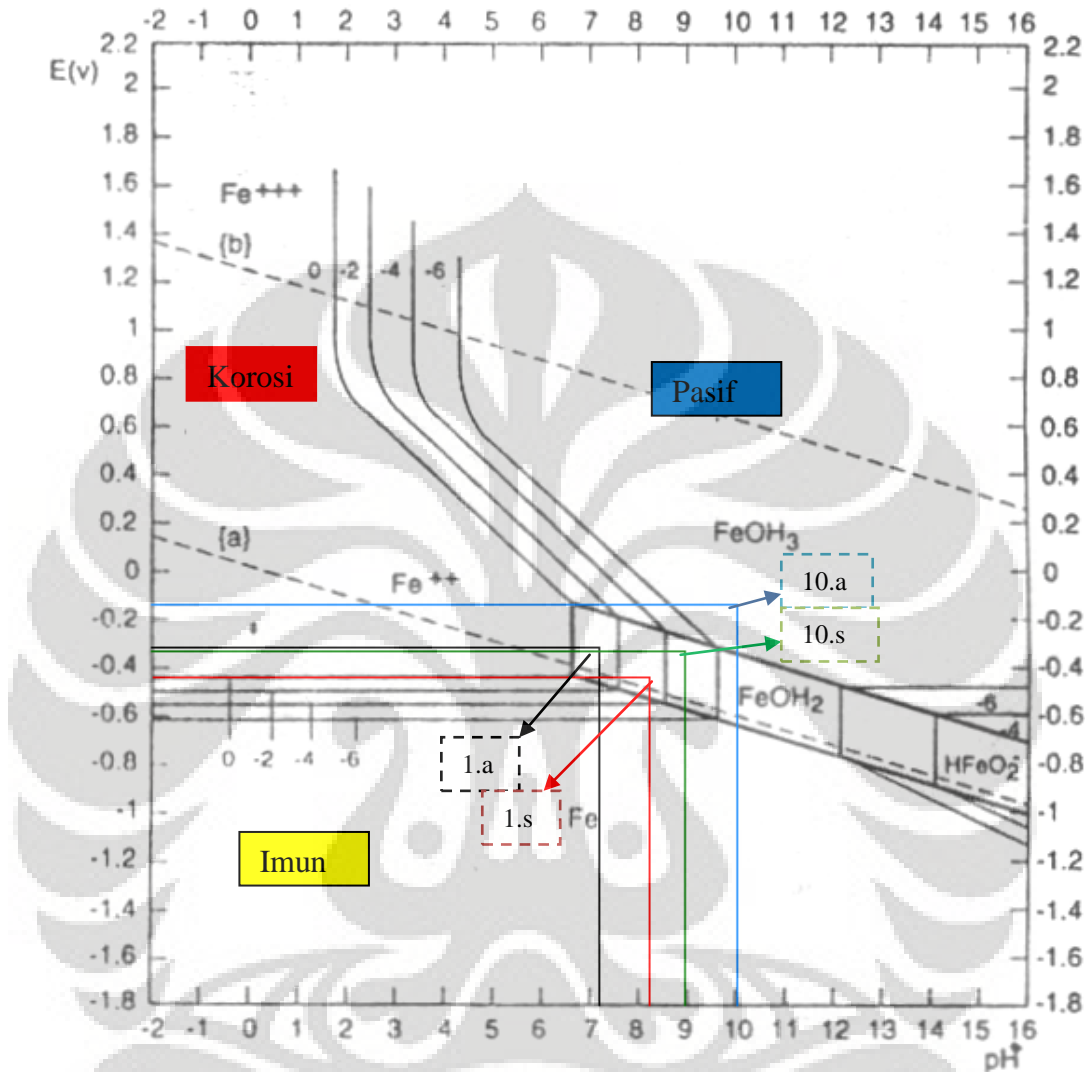


Gambar 4.18 Pasivitas di potensial oksidasi di atas  $E_p$ <sup>[24]</sup>

#### 4.7.2 Diagram Pourbaix Fe pada beton geopolimer

Gambar 4.19 memperlihatkan diagram Pourbaix baja tulangan dalam beton geopolimer pada hari pertama dan hari ke-10 pengukuran. Dapat dilihat bahwa baja berada pada daerah korosi pada hari pertama perendaman dalam aquades dan air laut akibat proses korosi yang dipercepat. Di dalam aquades, baja

berada pada potensial  $-0,293\text{V}$  dengan pH 7,2 sedangkan dalam air laut, potensial baja berada pada  $-0,427\text{V}$  dengan pH sekitar 8,2.



**Gambar 4.19 Plot E dan pH beton geopolimer pada Diagram Pourbaix Fe**

Hasil pengujian potensial baja tulangan dalam beton geopolimer pada hari ke-10 yang telah diplot dalam diagram Pourbaix menunjukkan bahwa baja tulangan dalam media aquades berada pada daerah pasif dengan potensial  $-0,183\text{V}$  dan pH 10. Akan tetapi, baja tulangan dalam beton yang direndam di air laut berada pada daerah korosi dengan potensial  $-0,327\text{V}$  dan pH 9 di diagram Pourbaix. Hal ini menunjukkan bahwa air laut merupakan larutan yang agresif. Adanya ion-ion klorida yang berpenetrasi ke dalam beton, walaupun dalam jumlah kecil yang dapat menghambat pembentukan dan merusak lapisan pasif. Beton geopolimer

dalam media aquades memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap korosi dibandingkan di air laut.

**Tabel 4.12 Perbandingan beton portland dan geopolimer**

Beton	Media	Hari ke-		Plot Diagram Pourbaix
		1	10	
Portland	Aquades	-0,529V; pH 7,2	-0,543 V; pH 7,2	Daerah korosi
	Air laut	-0,205V; pH 8,2	-0,319; pH 8,2	Daerah korosi
Geopolimer	Aquades	-0,293V; pH 7,2	-0,183V; pH 10	Daerah pasif
	Air laut	-0,427V; pH 8,2.	-0,327V; pH 9	Daerah korosi

Dari Tabel 4.12 dapat disimpulkan bahwa beton geopolimer memiliki ketahanan korosi lebih tinggi dibandingkan beton konvensional. Hal ini disebabkan mekanisme pengerasan pada geopolimer bukanlah merupakan proses hidrasi dari senyawa kalsium silikat seperti semen Portland. Akan tetapi, terjadi polikondensasi dari alumina dan silika membentuk *crosslinked* aluminosilikat sehingga dapat menghambat difusi dari oksigen dan ion-ion agresif seperti ion klorida.

## BAB 5

### KESIMPULAN

1. Difraktogram XRD dari abu terbang menunjukkan sifat amorf sehingga abu terbang yang digunakan pada penelitian memenuhi syarat sebagai prekursor untuk geopolimer
2. Beton geopolimer yang digunakan termasuk beton dengan kuat tekan yang tinggi yaitu sekitar 45,3 MPa. sedangkan beton konvensional menghasilkan kuat tekan sekitar 39,49 MPa. Dengan mix desain yang sama, kuat tekan beton geopolimer lebih tinggi daripada beton konvensional.
3. Baja tulangan pada beton konvensional di dalam aquades dan air laut berada pada daerah korosi dari hari pertama hingga hari ke-10. Pada hari pertama pengujian, baja berada pada potensial -0,529; pH 7,2 di aquades sedangkan dalam air laut, potensial baja berada pada -0,205V; pH 8,2. Setelah 10 hari, nilai potensial baja sekitar -0,543 V; pH 7,2 di aquades dan -0,319; pH 8,2 di air laut.
4. Pada hari pertama pengujian, baja dalam beton geopolimer berada pada daerah korosi dengan potensial -0,293V; pH 7,2 di aquades dan -0,427V; pH 8,2 di air laut. Setelah 10 hari, baja tulangan berada di daerah pasif di dalam aquades dengan potensial -0,183V; pH 10 sedangkan di air laut, baja berada di daerah korosi dengan potensial baja sebesar -0,327V; pH 9.
5. Beton geopolimer memiliki ketahanan korosi lebih tinggi dibandingkan beton konvensional karena terjadi polikondensasi dari alumina dan silika membentuk *crosslinked* aluminosilikat sehingga dapat menghambat laju difusi dari oksigen dan ion-ion agresif seperti ion klorida.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Miranda, J.M. dkk, *Corrosion Resistance in Activated Fly Ash Mortars*, Cem. Concr. Res. 35 (2005) 1210-1217
2. Davidovits, Joseph, *Geopolimer: Chemistry and Application*, Institut Geopolimer, 2008
3. Allahverdi, Ali dan Revara, Frantisek, *Sulfuric Acid Attack on Hardened Paste of Geopolymer Cements Part I. Mechanism of Corrosion at Relatively High Concentration*. 2004
4. Davidovits, J. *Properties of Geopolymer Cements*. Geopolymer Institute. 1994
5. Ahmad, Zaki, *Principle of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. Elsevier Science & Technology Books, 2006
6. Schutze, Michael, *Corrosion and Environmental Degradation*, Volume II, Wiley-NCH, 2000
7. Sastri, V.S, *Corrosion Inhibitors: Principles and Application*, John Willey & Sons, 1998
8. Fernandez A., Palomo A., Garcia I., *Durability of Alkali-Activated Fly Ash Cementitious Materials*. J Mater Sci, 2006
9. Bertolini, Luca dkk, *Corrosion of Steel in Concrete*, Wiley, 2004
10. ASTM D1141 *Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water*, 1990
11. ASTM C876 *Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*, 1991
12. Tjahjono, Elly, *Perancangan Struktur Material Beton*, Departemen Teknik Sipil, 2008
13. Gourley JT. *Geopolymers: Opportunities for Environmentally Friendly Construction Materials*. The Materials 2003 Conference: Adaptive Materials for Modern Society. Sydney, Australia, 2002
14. Neville, A.M., *Properties of Concrete*, 3rd ed., Longman Scientific & Technical, London, 1981

15. Palomo, A., M.W. Grutzeck, M.T. Blanco, *Alkali-activated Fly ashes A Cement For The Future*, Cement and Concrete Research, 1999
16. Chindaprasirt P., Rattanasak U., *A Comparative Study of Preparation and Properties of High Calcium Fly ash based Geopolymer*. International Conference on Pozzolan, Concrete and Geopolymer. Khon Kaen, Thailand. 2006
17. Barbosa, Valeria F. F., MacKenzie, Kenneth J.D., Thaumaturgo, Clelio. *Synthesis and Characterisation of Materials based on Inorganic Polymers of Alumina and Silica: Sodium Polysialate Polymers*. International Journal of Inorganic Material. 2000
18. Palomo A, Grutzeck MW, Blanco MT. *Alkali-Activated Fly ashes: A cement for the future*. Cem. Conc. Res. 1999;29(8):1323-9
19. Swanepoel JC, Strydom CA. *Utilisation of Fly ash in Geopolymeric Material*. Appl. Geochem. 2002;17(8):1143-8.
20. Xu, Hua and J.S.J. Van Deventer, *Geopolymerisation of Multiple Minerals*, Mineral Engineering, 2002
21. Uhlig H., *Corrosion and Corrosion Control* (3<sup>rd</sup> edition), Wiley, New York, 1985
22. Fontana, Mars G., *Corrosion Engineering*, McGraw-Hill, 1986
23. NACE *International Basic Corrosion Course Handbook*, 2000
24. Jones, Denny, *Principles and Prevention of Corrosion*, New York, Macmillan Publishing Comp, 1997
25. Piron, D.L., *Electrochemistry of Corrosion*, NACE, Houston, 1999
26. Pourbaix M, *Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solution*. Pergamon Press, 1966
27. Bentur, A., S. Diamond, *Steel Corrosion in Concrete: Fundamentals and Civil Engineering Practice*, E & FN Spon, 1988
28. ACI Committee 222, *Corrosion of Metals in Concrete*, 1989
29. Tuuti, K., *Corrosion of Steel in Concrete*, Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982
30. Roberge, Pierre R. *Handbook of Corrosion Engineering*, McGraw-Hill, 2000
31. Bakharev T, *Resistance of Geopolymer to Acid Attack*, Cement and Concrete Research, 35, 658-670

32. Yodmune, Serawut dkk, *Study on Corrosion of Steel Bar in Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*, International Conference on Pozzolan, Concrete, and Geopolimer. 2006
33. Lloyd, Redmond R., dkk, *Microscopy and microanalysis of inorganic polymer cements. J. Mater Sci*, 2008
34. Van Deventer, J.S., J.L.Provis, P.Duxon, *Reaction Mechanism in Geopolymeric Conversion of Inorganic Waste to Useful Products*, Journal of Hazardous Material, 2006
35. Grimaldi, Gilbert and Andre Raharinaivoo, *Measuring the half-cell potential of steel embedded in immersed concrete: Principle and Application*, Paris
36. Fratesi, R., G. Moriconi, and L. Coppola, *The Influence of Steel Galvanization on Rebars Behaviour in Concrete*, Italy
37. H.Yalcyn, and M. Ergun, *The prediction of corrosion rate of reinforcing steels in concrete*, Cement & Concrete Research, 1996

