

SKRIPSI

**PERILAKU KOROSI TULANGAN DALAM MORTAR YANG
TERBUAT DARI CAMPURAN AIR LAUT DAN *SILICA FUME***

***CORROSION BEHAVIOR OF REINFORCEMENT IN MORTAR
MADE FROM A MIXTURE OF SEAWATER AND SILICA FUME***

Disusun dan diajukan oleh:

MUHAMMAD NURHIDAYAT

D011 20 1073



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

PERILAKU KOROSI TULANGAN DALAM MORTAR YANG TERBUAT DARI CAMPURAN AIR LAUT DAN *SILICA FUME*

Disusun dan diajukan oleh

MUHAMMAD NURHIDAYAT
D011 20 1073

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 6 maret 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Dr. Eng. M. Akbar Caronge, ST., M.Eng.
NIP. 198604092019043001

Pembimbing Pendamping,



Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng
NIP. 196805292002121002

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng
NIP. 196805292002121002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini;

Nama : Muhammad Nurhidayat
NIM : D011 20 1073
Program Studi : Teknik Sipil
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{PERILAKU KOROSI TULANGAN DALAM MORTAR YANG TERBUAT DARI CAMPURAN AIR LAUT DAN *SILICA FUME*}

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 19 Desember 2023

Yang Menyatakan,


Muhammad Nurhidayat

ABSTRAK

MUHAMMAD NURHIDAYAT. *Perilaku Korosi Tulangan Dalam Mortar Yang Terbuat Dari Campuran Air Laut Dan Silica Fume* (dibimbing oleh Muhammad Akbar Caronge dan M. Wihardi Tjaronge)

Penggunaan bahan bangunan yang ramah lingkungan dan berkinerja tinggi menjadi fokus penelitian dalam industri konstruksi modern. Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi perilaku korosi dari mortar yang terbuat dari campuran air laut dan *silica fume*. Campuran tersebut dirancang untuk meningkatkan ketahanan korosi tulangan pada mortar melalui penggunaan bahan alternatif yang ramah lingkungan. Penelitian ini menggunakan benda uji berbentuk silinder dengan ukuran 5 cm x 10 cm sebanyak 10 buah. Terdapat lima variasi campuran, variasi pertama yaitu mortar normal dibuat dengan menggunakan air tawar, untuk variasi kedua dibuat dengan menggunakan air laut sebagai air pencampur, dan variasi ketiga, keempat, dan kelima mortar diproduksi dengan menggunakan air laut dan mengganti 5%, 7%, dan 10% semen campuran dengan *silica fume* menggunakan perbandingan berat semen. Pada penelitian ini parameter yang diperiksa: potensial korosi, waktu retak awal, lebar retak, dan kontur potensial korosi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan *silica fume* sebesar 5% dan 7% dapat meningkatkan ketahanan mortar terhadap korosi tulangan akibat air laut yang lebih baik. Penelitian ini memberikan pemahaman yang mendalam tentang sifat-sifat mortar yang mengandung campuran semen, air laut, dan *silica fume*.

Kata Kunci: *Silica Fume*, Air Laut, Semen Campuran, Potensial Korosi

ABSTRACT

MUHAMMAD NURHIDAYAT. *Corrosion Behavior Of Reinforcement In Mortar Made From A Mixture Of Seawater And Silica Fume* (supervised by Muhammad Akbar Caronge and M. Wihardi Tjaronge)

The use of environmentally friendly and high-performance building materials is the focus of research in the modern construction industry. This study aims to investigate the corrosion behavior of mortar made from a mixture of seawater and silica fume. The mixture is designed to improve the corrosion resistance of reinforcement in mortar through the use of environmentally friendly alternative materials. This study used cylinder-shaped test objects with a size of 5 cm x 10 cm as many as 10 pieces. There are five variations of the mixture, the first variation is normal mortar made using fresh water, for the second variation is made using seawater as mixing water, and the third, fourth, and fifth variations of mortar are produced using seawater and replace 5%, 7%, and 10% of mixed cement with silica fume using a cement weight ratio. In this study the parameters were examined: corrosion potential, initial crack time, crack width, and corrosion potential contours. The results showed that the addition of 5% and 7% silica fume increased the resistance of mortar to better corrosion of reinforcement due to seawater. This research provides a deep understanding of the properties of mortar containing a mixture of cement, seawater, and silica fume.

Keywords: Silica Fume, Sea Water, Mixed Cement, Corrosion Potential

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH.....	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	ix
KATA PENGANTAR.....	x
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Masalah.....	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian Terdahulu	6
2.2 Teori Mortar	8
2.3 Material Penyusun Mortar.....	10
2.3.1 <i>Portland Cement Composite</i>	10
2.3.2 Agregat Halus	12
2.3.3 Air Laut.....	12
2.3.4 <i>Silica Fume</i>	13
2.4 Sifat Mekanik Mortar	13
2.5 Korosi	15
2.6 Passivasi	16
2.7 Korosi Tulangan dalam Mortar	17
2.8 Akselerasi Korosi	18
2.9 Faktor Korosi Tulangan dalam Mortar	19
2.10 Mekanisme Korosi Tulangan dalam Mortar	22
2.11 Keretakan Mortar Akibat Korosi	23
2.12 Peran <i>Silica Fume</i> pada Perilaku Korosi Tulangan.....	24
2.13 Uji Potensial Mortar	25
BAB III METODE PENELITIAN	
3.1 Diagram Alir Penelitian	29
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian	30
3.3 Jenis Penelitian dan Sumber Data	30
3.4 Alat dan Bahan Penelitian.....	30
3.5 Benda Uji.....	32
3.6 Pemeriksaan Karakteristik Bahan Penyusun Mortar	32
3.6.1 Agregat Halus	32
3.6.2 <i>Silica Fume</i>	33
3.6.3 Semen Campuran.....	33
3.6.4 Air Laut.....	34

3.7	Prosedur Penelitian	34
3.7.1	Rancangan Campuran Mortar (<i>Mix Design</i>).....	34
3.7.2	Pembuatan Benda Uji	34
3.7.3	Perawatan (<i>curing</i>) Benda Uji	36
3.7.4	Uji Akselerasi	36
3.7.5	Uji Potensial Korosi (<i>half potential</i>)	37
3.8	Teknik Analisis	38
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1	Karakteristik Material	40
4.1.1	Agregat Halus	40
4.1.2	Air Laut.....	41
4.1.3	<i>Silica Fume</i>	41
4.2	Rancangan Campuran Mortar (<i>Mix Design</i>).....	42
4.3	Analisis Pengaruh Durasi Perendaman Terhadap Potensial Korosi.....	42
4.3.1	Laju Korosi	42
4.3.2	Waktu Retak Awal.....	45
4.3.3	Lebar Retak.....	46
4.3.4	Kontur Potensial Korosi	47
BAB V	PENUTUP	
5.1	Kesimpulan	53
5.2	Saran.....	53
	DAFTAR PUSTAKA	
	LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

Tabel 1.	Persyaratan spesifikasi properti mortar	9
Tabel 2.	Syarat fisika semen <i>Portland</i> komposit	10
Tabel 3.	Hubungan nilai potensial dan kemungkinan korosi tulangan	26
Tabel 4.	Pemeriksaan Agregat Halus	32
Tabel 5.	Properti dan Kandungan Senyawa Semen Portland Komposit (PCC)	33
Tabel 6.	Hasil Pemeriksaan Karakteristik Pasir (Agregat Halus)	40
Tabel 7.	Kandungan Senyawa Kimia Air Laut	41
Tabel 8.	Kandungan Senyawa Kimia <i>Silica Fume</i>	41
Tabel 9.	Rancangan Campuran Mortar dan Jumlah Sampel	42
Tabel 10.	Rata-Rata Potensial Korosi Tiap Komposisi Campuran Terhadap Waktu	43

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Skema sel korosi dalam sistem sederhana.....	16
Gambar 2.	Proses korosi pada permukaan baja.....	17
Gambar 3.	Lapisan pasif baja tulangan dalam mortar.....	18
Gambar 4.	Skema pengujian akselerasi korosi.....	19
Gambar 5.	Degradasi korosi baja dalam mortar.....	19
Gambar 6.	Efek karbonisasi korosi baja dalam mortar.....	20
Gambar 7.	Korosi Penetrasi ion klorida dalam mortar.....	21
Gambar 8.	Pengaruh kadar garam terhadap laju korosi.....	22
Gambar 9.	Model korosi untuk baja tulangan dalam mortar.....	23
Gambar 10.	Proses terjadinya korosi pada tulangan.....	25
Gambar 11.	Hasil potensial setengah sel aktual vs terukur.....	27
Gambar 12.	Kerangka prosedur penelitian di laboratorium.....	29
Gambar 13.	Alat yang digunakan.....	31
Gambar 14.	Bahan campuran mortar.....	31
Gambar 15.	Benda uji silinder.....	32
Gambar 16.	Perawatan (<i>Curing</i>) Benda Uji.....	36
Gambar 17.	Pengujian Akselerasi.....	37
Gambar 18.	Pengujian <i>Half-Cell Potential</i>	38
Gambar 19.	Data nilai potensial korosi mortar pengujian akselerasi 28 hari.....	42
Gambar 20.	Waktu retak awal setiap benda uji.....	45
Gambar 21.	Data lebar retak mortar pengujian akselerasi umur 28 hari.....	46
Gambar 22.	Kontur Hasil Uji Potensial Korosi Sampel NW (1).....	47
Gambar 23.	Kontur Hasil Uji Potensial Korosi Sampel NW (2).....	48
Gambar 24.	Kontur Hasil Uji Potensial Korosi Sampel SW (1).....	48
Gambar 25.	Kontur Hasil Uji Potensial Korosi Sampel SW (2).....	49
Gambar 26.	Kontur Hasil Uji Potensial Korosi Sampel SW-5SF (1).....	49
Gambar 27.	Kontur Hasil Uji Potensial Korosi Sampel SW-5SF (2).....	50
Gambar 28.	Kontur Hasil Uji Potensial Korosi Sampel SW-7SF (1).....	50
Gambar 29.	Kontur Hasil Uji Potensial Korosi Sampel SW-7SF (2).....	51
Gambar 30.	Kontur Hasil Uji Potensial Korosi Sampel SW-10SF (1).....	51
Gambar 31.	Kontur Hasil Uji Potensial Korosi Sampel SW-10SF (2).....	52

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
sf	<i>Silica fume</i>
NW	Air normal
SW	Air laut
CSE	Elektroda tembaga sulfat

KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur kita panjatkan kehadiran Allah SWT, atas berkat rahmat dan petunjuk-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “PERILAKU KOROSI TULANGAN DALAM MORTAR YANG TERBUAT DARI CAMPURAN AIR LAUT DAN *SILICA FUME*” yang merupakan salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa banyak kendala yang dihadapi dalam penyusunan tugas akhir ini, namun berkat bantuan dari berbagai pihak, maka tugas akhir ini dapat terselesaikan. Oleh karena itu, dengan segala ketulusan, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. **Bapak Prof. Dr. Eng. Muhammad Isran Ramli, ST., MT.**, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. **Bapak Prof. Dr. H. M Wihardi Tjaronge ST., M.Eng. dan Dr. Eng. Bambang Bakri, ST, MT.**, selaku ketua Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.
3. **Bapak Dr. Eng. M. Akbar Caronge, ST., MT.**, selaku dosen pembimbing I yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga selesainya penulisan ini.
4. **Bapak Prof. Dr. H. M Wihardi Tjaronge ST., M.Eng.**, selaku dosen pembimbing II, yang telah banyak meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan kepada kami.
5. **Bapak Dr. Eng. Rudy Djamaluddin, ST., M.Eng.**, selaku Kepala Laboratorium Struktur dan Bahan Jurusan Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin yang telah memberikan izin atas segala fasilitas yang digunakan.
6. **Kak Hasan, ST.**, selaku Laboran Laboratorium Struktur dan Bahan Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas segala bimbingan selama pelaksanaan penelitian di laboratorium.
7. Seluruh dosen Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

8. Seluruh staf dan karyawan Jurusan Teknik Sipil, staf dan karyawan Fakultas Teknik serta staf Laboratorium dan asisten Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

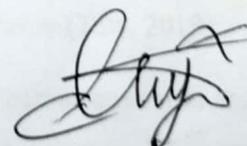
Yang teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua yang tercinta, yaitu ayahanda **Ete Dima, S.Pd** dan ibunda **Nurlaela, S.Pd** atas doa, kasih sayangnya, dan segala dukungan selama ini, baik spritiual maupun material, serta seluruh keluarga besar atas sumbangsih dan dorongan yang telah diberikan.
2. Rekan-rekan di **Laboratorium Riset Eco Material**, yang senantiasa memberikan semangat dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
3. **Nanda Awaliah Putri** yang selalu ada dalam membantu dalam segala hal, terlebih dalam menyelesaikan tugas akhir ini, dan menemani dalam keadaan suka dan duka.
4. **Entitas 21** yang selalu siap untuk direpotkan dalam berbagai hal terlebih dalam penyusunan tugas akhir ini.
5. Teman-teman mahasiswa Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin **Angkatan 2020** yang telah mengukir kenangan bersama yang sangat indah.

Penulis menyadari bahwa setiap karya buatan manusia tidak akan pernah luput dari kekurangan, oleh karena itu mengharapkan kepada pembaca kiranya dapat memberi sumbangan pemikiran demi kesempurnaan dan pembaharuan tugas akhir ini.

Akhirnya semoga Allah SWT melimpahkan rahmat dan hidayahnya-Nya kepada kita dan semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat, khususnya dalam bidang Teknik Sipil.

Gowa, 19 Desember 2023



Penulis

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara kepulauan terbesar di dunia yang terdiri dari 17.580 pulau dengan garis pesisir pantai sepanjang 81.000 km. Kondisi geografis ini mengakibatkan pembangunan sarana infrastruktur seperti jalan raya, pelabuhan, dermaga, dan lainnya sangat diperlukan. Peningkatan pembangunan infrastruktur menyebabkan penggunaan material konstruksi seperti mortar atau beton juga meningkat. Hal tersebut memiliki dampak secara langsung pada kenaikan kebutuhan material seperti air pencampur (*mixing water*). Miliaran ton air bersih di seluruh dunia dimanfaatkan sebagai air perawatan dan air pencampur dalam industri beton setiap tahunnya (Otsuki dkk, 2011).

Mortar merupakan campuran dari semen, agregat halus, air dan bahan tambah (*mineral admixture* dan *additive*). Pencampuran bahan - bahan penyusun tersebut akan menghasilkan adukan mortar yang mudah dicetak sesuai dengan wadah dan bentuk yang diinginkan. Salah satu sifat penting pada mortar yang dapat berpengaruh terhadap korosi tulangan adalah kepadatannya. Kepadatan mortar tergantung dari material penyusun seperti faktor air semen, gradasi agregat, dan bahan pengikat yang digunakan. Salah satu bahan penyusun yang sangat berpengaruh terhadap kekuatan mortar adalah air. Penggunaan air tawar sebagai bahan pencampur pada pembuatan mortar masih menjadi pilihan utama, sedangkan fenomena saat ini menunjukkan bahwa kebutuhan air tawar sebagai air bersih mulai berkurang. Pada konferensi PBB dan organisasi metodologi dunia mengatakan bahwa sekitar 5 milyar orang akan kekurangan air minum dan pada tahun 2025 serta setengah dari populasi manusia akan tinggal di daerah yang kekurangan air bersih (air tawar). Air laut yang begitu melimpah berpeluang menggantikan air tawar sebagai bahan pencampuran dalam beton (Tata, 2019).

Penggunaan air laut sebagai bahan pencampur dalam pembuatan mortar atau beton telah menjadi fokus penelitian sejumlah ahli sebelumnya. Meskipun demikian, tantangan yang dihadapi tidak bisa diabaikan. Salah satu permasalahan utama yang timbul adalah kandungan garam (NaCl) yang dimiliki air laut menjadi

suatu ancaman bagi penerapan struktur beton bertulang karena dapat mempercepat terjadinya korosi pada tulangan baja, utamanya pada bangunan pada daerah yang sering berinteraksi dengan air laut. Dampak korosi tersebut memiliki implikasi signifikan, memerlukan langkah-langkah pencegahan atau penyesuaian khusus pada campuran mortar agar kegagalan struktural dapat dihindari. Risiko ini mencakup potensi terjadinya retakan hingga terkelupasnya selimut mortar. Hal tersebut berarti diperlukan adanya langkah pencegahan atau perilaku khusus yang diberikan pada campuran mortar air laut agar tidak mengalami kegagalan akibat korosi. Salah satu solusi yang dapat diambil adalah mempertimbangkan penggunaan bahan pengikat yang lebih halus. Penggunaan bahan pengikat yang lebih halus tentunya dapat membuat pori-pori yang berada di dalam mortar berkurang sehingga menyebabkan penyerapan air semakin menurun. Hal tersebut tentunya sejalan dengan fungsi selimut mortar atau beton yang dibuat untuk melindungi tulangan baja yang terdapat di dalamnya dari terjadinya reaksi kimia dengan lingkungan sekitar. Pentingnya pemilihan bahan dan langkah-langkah desain yang cermat dalam penggunaan air laut sebagai bahan pencampur mortar tidak hanya menciptakan konstruksi yang tahan lama, tetapi juga memitigasi dampak negatif terkait korosi.

Menurut ACI Committee 234 (2019), salah satu bahan pengikat yang dapat meningkatkan kerapatan antara material penyusun mortar adalah *silica fume*. Bahan tersebut merupakan limbah sampingan dari industri silikon yang dihasilkan dari proses pengolahan silikon atau ferrosilicon yang dicuci dengan air dan dikeringkan. *Silica fume* memiliki ukuran partikel sangat kecil, sekitar 100 kali lebih kecil dari ukuran partikel semen, sehingga memiliki luas permukaan yang besar dan reaktif. *Silica fume* mampu mengisi pori dan merapatkan kekuatan, kepadatan dan daya tahan beton atau mortar. Selain itu *silica fume* memiliki sifat pozzolanic, yaitu kemampuan untuk bereaksi dengan kalsium hidroksida yang dihasilkan dari hidrasi semen, sehingga dapat membentuk produksi hidrasi yang lebih kuat dan tahan.

Berdasarkan uraian diatas, maka dilakukanlah penelitian ini untuk membandingkan sampel mortar campuran air tawar dengan mortar campuran air laut dan pengaruh penggunaan *silica fume* sebagai substitusi sebagian berat semen

terhadap laju korosi tulangan di dalam mortar. Hal ini juga sejalan dalam mewujudkan sistem pembangunan yang berkelanjutan di masa mendatang.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan penjelasan yang diberikan pada bagian latar belakang, dijabarkan beberapa uraian masalah, yaitu :

1. Bagaimana perilaku korosi tulangan dalam mortar dengan campuran air laut dan *silica fume*?
2. Bagaimana keretakan yang ditimbulkan korosi tulangan pada sampel mortar dengan campuran air laut dan *silica fume*?
3. Bagaimana kontur potensial korosi pada mortar campuran air laut dan *silica fume*?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan, maka tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis perilaku korosi tulangan dalam mortar campuran air laut dan *silica fume*.
2. Mengukur waktu awal dan lebar retak yang ditimbulkan korosi tulangan pada mortar campuran air laut dan *silica fume*.
3. Menggambarkan kontur potensial korosi pada mortar campuran air laut dan *silica fume*.

1.4 Manfaat Penelitian

Diharapkan penelitian ini bermanfaat untuk :

1. Dapat dijadikan sebagai acuan dan informasi para peneliti dalam mengembangkan penelitian tentang pencampuran mortar dengan menggunakan material laut dan *silica fume*.
2. Mengetahui perilaku korosi tulangan dalam mortar dengan menggunakan air laut sebagai air pencampuran dan *silica fume* sebagai substitusi sebagian berat semen.

3. Sebagai referensi bagi pekerja konstruksi yang berada di daerah pesisir yang sulit menemukan air bersih untuk mempertimbangkan penggunaan air laut dalam pembuatan mortar.

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian ini dapat berjalan dengan baik dan sesuai dengan sasaran yang ingin dicapai, maka diberikan batasan masalah sebagai berikut:

1. Menggunakan pasir dari Sungai Jeneberang, Kabupaten Gowa sebagai campuran mortar.
2. Menggunakan semen jenis PCC (*Portland Composite Cement*) hasil produksi PT. Semen Tonasa.
3. Menggunakan *Silica Fume* hasil produksi PT. Sika Indonesia sebagai pengganti sebagian berat semen dengan variasi 5%, 7%, dan 10%.
4. Menggunakan air tawar yang diperoleh dari Laboratorium Struktur dan Bahan, Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin.
5. Menggunakan air laut yang diambil dari Pantai Galesong, Kabupaten Takalar.
6. Perawatan benda uji dengan perendaman air tawar selama 28 hari.
7. Pengujian akselerasi dan potensial korosi pada sampel mortar berbentuk silinder dengan dimensi 5 cm x 10 cm pada waktu pengujian 0, 3, 6, 9, dan 24 jam.

1.6 Sistematika Penulisan

Secara umum tulisan ini terbagi dalam lima bab, yaitu: Pendahuluan, Tinjauan Pustaka, Metodologi Penelitian, Hasil Pengujian dan Pembahasan dan diakhiri oleh Kesimpulan dan Saran.

Berikut ini merupakan rincian secara umum mengenai isi dari kelima bab tersebut :

BABI PENDAHULUAN

Bab tersusun atas latar belakang, rumusan masalah, maksud dan tujuan penulisan, batasan masalah, dan sistematika penulisan yang berisi

tentang penggambaran secara garis besar mengenai hal yang akan dibahas pada bab selanjutnya.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menguraikan tentang informasi, konsep, teori, penelitian terdahulu, atau kerangka pemahaman yang menjadi landasan dilakukannya penelitian.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini membahas mengenai waktu dan lokasi penelitian, variabel penelitian, alat dan bahan pengujian, teknik pengumpulan data, dan teknik analisa data.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini merupakan penjabaran dari hasil pengujian karakteristik material, rancangan campuran mortar, akselerasi mortar, dan potensial korosi mortar serta membahas analisa dari data yang diperoleh saat pengujian.

BAB V PENUTUP

Bab ini memuat kesimpulan singkat mengenai hasil analisa yang diperoleh saat penelitian dan disertai dengan saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penggunaan air laut pada mortar dan beton masih dihindari oleh para pekerja konstruksi, salah satu penyebabnya adalah kandungan natrium klorida (NaCl) yang dapat menyebabkan korosi pada tulangan. Penelitian tentang pencampuran mortar dengan air laut sudah sering dilakukan oleh para peneliti sebelumnya. Tjahjani dkk. (2023), melakukan penelitian tentang pengaruh pemakaian bahan tambah guna menurunkan kadar NaCl pada mortar yang terbuat dari pasir laut dan air laut. Batu kapur, *silica fume*, *nano silica*, dan *superplasticizer* adalah jenis bahan tambah yang digunakan dalam penelitian tersebut. Hasil Penelitian menunjukkan bahwa campuran mortar menggunakan pasir laut dan air laut yang ditambahkan semen (PC), kapur (LS), *silica fume* (SF), *nano-silika* (NS), dan *superplasticizer* (SP), mengalami penurunan nilai NaCl dari 0,32% menjadi 0,25% yang berarti komposisi tersebut dapat digunakan untuk membuat mortar.

Penelitian yang dilakukan Astuti P. dan Zakir A. (2022), bertujuan untuk mengetahui pengaruh penggunaan air laut pada campuran mortar terhadap laju korosi tulangan yang diberi pencegahan dengan metode *surface concrete coating* dan *steel coating*. Metode tersebut diterapkan dengan pemberian cat berbasis bitumen pada sampel mortar campuran air laut dengan *Portland pozzola cement* (PPC) sebagai bahan pengikat. Benda uji yang digunakan berukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm, dengan dua tulangan baja berdiameter 12 mm. Digunakan pula dua variasi selimut mortar dengan tebal 3 cm dan 5 cm, dilakukan perawatan (*curing*) selama 28 hari dengan air laut. Metode *exposure condition* dengan variasi *dry-wet cycle*, *wet condition* dan *dry condition* digunakan untuk mengamati perilaku korosif tulangan. Nilai potensi korosi diperoleh dari pengujian half-cell potential (HCP) selama 56 hari. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode *steel coating* dan *surface concrete coating* memiliki nilai potensial korosi yang lebih rendah dibandingkan dengan sampel tanpa perlindungan. Pada tebal selimut mortar 5 cm juga menunjukkan nilai potensial korosi tulangan yang lebih positif dibandingkan dengan tebal selimut 3 cm. Oleh karena itu, metode *coating* dan penambahan

selimut beton adalah metode yang efektif untuk menurunkan korosi tulangan baja dalam beton.

Pengujian dilakukan oleh Sheng dkk (2022), bertujuan untuk memberi pemahaman lebih baik tentang reaktivitas mortar ramah lingkungan yang terbuat dari campuran air laut dan pasir laut. Mortar dibuat dengan campuran air laut (SW) dan pasir laut (SS) yang dikumpulkan dari Laut Timur Tiongkok untuk diuji pada berbagai umur, termasuk 10 hari, 33 hari, dan 91 hari. Perilaku fisika-kimia-mekanis diteliti menggunakan uji kompresi uniaksial (UCTs), Spektrometer Dispersi Energi (EDS), Difraksi Sinar-X (XRD), dan analisis mikroskop elektron pemindaian emisi medan termal (SEM) untuk mengetahui reaktivitas mortar dengan akumulasi usia. Hasil menunjukkan bahwa produk hidrasi dan komponen yang menguntungkan dihasilkan dalam mortar. Pengembangan garam Friedel yang merekatkan kembali retakan antarmuka pasir laut dan produk hidrasi dengan akumulasi usia di lingkungan kritis, mempertahankan porositas kerangka mortar.

Ali A. dan Tangke I. (2018), juga melakukan penelitian untuk memahami penggunaan air laut sebagai air pencampur dan air perawatan pada karakteristik pasta semen dan mortar. Pada penelitian ini, penulis membandingkan daya tahan mortar menggunakan PCC (*Portland Composite Cement*) dan PPC (*Pozollan Portland Cement*) yang dicampur dengan air tawar dan air laut alami dari perairan Pangkajene Kepulauan Sulawesi Selatan. Sampel dirawat (*curing*) dengan 3 metode, yaitu menggunakan perawatan air laut, perawatan air normal, dan perawatan di udara. Hasil pengujian menunjukkan bahwa konsistensi normal pasta semen campuran air tawar dan pasta semen campuran air laut tidak berbeda signifikan, memenuhi standar konsistensi normal antara 110%-120%. Namun, pasta semen dengan PPC memiliki konsistensi yang berbeda. Konsistensi pasta semen campuran air laut lebih kecil daripada semen campuran air tawar. Hal tersebut terjadi akibat komposisi senyawa kimia semen, utamanya senyawa Aluminium Oksida (Al_2O_3) dan Kalsium Oksida (CaO) sebagai senyawa yang berperan terhadap panas hidrasi semen dan reaksi hidrasi semen sehingga kelecakan mortar menurun.

Khatibmasjedi, M. (2018), meneliti ketahanan tulangan GFRP pada beton dengan campuran air laut. Daya tahan batangan GFRP dipelajari sifat mekaniknya

(kuat tarik, kuat tekan, kuat geser horizontal dan melintang, serta kuat rekat beton GFRP) setelah perendaman dalam air laut pada suhu 60°C selama 24 bulan. Hasilnya menunjukkan penggunaan air laut sebagai air pencampur tidak berpengaruh terhadap ketahanan batang GFRP. Batangan GFRP yang diekstraksi dari beton konvensional dan beton campuran air laut memperlihatkan kinerja yang sepadan, berarti penggunaan air laut sebagai air pencampur tidak berefek signifikan terhadap daya tahan batangan GFRP, sifat kuat tarik dan geser menunjukkan penurunan yang berimbang, kuat tekan memperlihatkan penurunan tertinggi pada kedua campuran beton, mikrigraf menampilkan sejumlah besar cacat (void) di dekat tepi jeruji yang mungkin terbentuk selama produksi.

2.2 Teori Mortar

Mortar semen portland adalah campuran antara pasir kwarsa, air suling dan semen portland dengan komposisi tertentu. Pasir kwarsa adalah pasir yang mengandung mineral silika > 90%, serta memenuhi persyaratan standar ASTM No.C 190 (SNI-03-6862:2002). Campuran pada mortar tidak memiliki agregat kasar (agregat yang tertahan saringan no.4 atau ukuran 4,75 mm) sehingga lebih halus dibandingkan campuran beton. Tjokrodinuljo (1992) menggolongkan mortar menjadi empat jenis berdasarkan bahan pengikatnya, yaitu:

a. Mortar Semen Portland

Mortar semen merupakan campuran antara semen, air, dan pasir pada proporsi yang sesuai. Perbandingan volume semen dan pasir berada di antara 1:2 hingga 1:6 tergantung pada penggunaannya. Mortar jenis ini lebih kuat dan tahan terhadap air sehingga sering digunakan pada bagian luar atau bagian yang berada di bawah tanah.

b. Mortar Kapur

Mortar kapur terbuat dari campuran antara kapur, semen merah, pasir, dan air. Pasir dan kapur mulanya dicampur pada kondisi kering kemudian diberi air secukupnya sehingga membentuk adukan dengan kelecakan yang baik. Saat proses pelekatan, kapur mengalami penyusutan sehingga perbandingan jumlah pasir dan kapur yang sering digunakan yaitu 1:3.

c. Mortar Polimer

Mortar polimer menggantikan semen portland sebagai bahan perekat dengan bahan polimer yang mengakibatkan kenaikan biaya. Hal tersebut akan sebanding bila diterapkan pada pengaplikasian yang sesuai, setara dengan menurunnya biaya pemakaian energi pekerja selama proses pengerjaan dan pemeliharaan.

d. Mortar Pozzolan

Pozzolan adalah bahan tambah yang berasal dari limbah industri yang memiliki kandungan silika dan alumina yang akan bereaksi dengan kapur bebas ketika bercampur dengan air. Sehingga, Mortar pozzolan merupakan campuran mortar yang diberi bahan tambah berupa pozzolan.

Spesifikasi mortar untuk pekerjaan unit pasangan (SNI 6882:2014) membagi mortar menjadi empat jenis berdasarkan kekuatan tekannya. Perbedaan properti di antara jenis mortar tersebut dapat dilihat pada **Tabel 1.** berikut.

Tabel 1. Persyaratan spesifikasi properti mortar

Mortar	Tipe	Kekuatan tekan rata-rata umur 28 hari, min, psi (Mpa)	Retensi air, min, %	Kadar udara, maks, % ^B	Rasio agregat (diukur dalam kondisi lembab, padat)
Semen-Kapur	M	2500 (17,2)	75	12	Tidak kurang dari 2 ¹ / ₄ dan tidak lebih dari 3 ¹ / ₂ jumlah dari volume-volume terpisah dari material sementisius
	S	1800 (12,4)	75	12	
	N	750 (5,2)	75	14 ^C	
	O	350 (2,4)	75	14 ^C	
Semen Mortar	M	2500 (17,2)	75	12	
	S	1800 (12,4)	75	12	
	N	750 (5,2)	75	14 ^C	
	O	350 (2,4)	75	14 ^C	
Semen Pasangan	M	2500 (17,2)	75	18	
	S	1800 (12,4)	75	18	
	N	750 (5,2)	75	20 ^D	
	O	350 (2,4)	75	20 ^D	

^B Kadar udara mortar kapur-semen portland tanpa bahan pembuat gelembung udara biasanya kurang dari 8%

^C Bila terdapat tulangan struktural dalam mortar semen-kapur atau mortar semen mortar, kadar udara maks.12%

^D Bila terdapat tulangan struktural dalam mortar semen pasangan, kadar udara maks. harus 18%

Sumber : SNI 6882:2014

2.3 Material Penyusun Mortar

2.3.1 *Portland cement composite*

Semen (menurut Standar BS EN 1971:2011) merupakan bahan pengikat hidrolis, yaitu bahan anorganik yang ditumbuk halus dan ketika bercampur dengan air, dengan menggunakan reaksi dan proses hidrasi membentuk pasta yang mengikat dan mengeras, setelah mengeras, tetap mempertahankan kekuatan dan stabilitasnya meskipun di dalam air. PCC atau Semen Portland Komposit, adalah semen Portland yang masuk kedalam kategori *Belended Cement* atau semen campur. Semen campur ini dibuat atau didesign karena dibutuhkannya sifat-sifat tertentu yang tidak dimiliki oleh semen portland tipe I. Guna memperoleh sifat tertentu pada semen campur maka perlu ditambahkan bahan aditif seperti Pozzolan, *Fly ash*, *silica fume*, dan lain sebagainya.

Menurut SNI 15-7064-2004, Semen Portland Komposit adalah bahan pengikat hidrolis hasil penggilingan antara terak semen portland dan gyps dengan satu atau lebih bahan anorganik atau hasil pencampuran antara bubuk semen portland dengan bubuk bahan anorganik lain. Bahan anorganik tersebut antara lain Terak Tanur Tinggi (*Blast Furnace Slag*), pozzolan, senyawa silicat, batu kapur dengan kadar total bahan anorganik 6 % – 35 % dari massa semen *Portland* komposit.

Syarat kimia untuk semen *Portland* komposit, kandungan SO_3 maksimum 4%, komposisi kimia yang lain sama dengan komposisi kimia semen *Portland*. Sedangkan syarat fisika semen *Portland* komposit dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Syarat fisika semen *portland* komposit

No.	Uraian	Satuan	Persyaratan
1.	Kehalusan dengan alat blaine	m ² /kg	Min.280
2.	Kekekalan bentuk dengan autoclave:		
	- Pemuai	%	Maks. 0,8
	- Penyusutan	%	Maks. 0,2
3.	Waktu pengikatan dengan alat vikat:		
	- Pengikatan awal	Menit	Min.45
	- Pengikatan akhir	Menit	Maks.375

No.	Uraian	Satuan	Persyaratan
4.	Kuat tekan:		
	- Umur 3 hari	Kg/cm ²	Min.125
	- Umur 7 hari	Kg/cm ²	Min.200
5.	Pengikatan semu:		
	- Penetrasi akhir	%	Min.50
6.	Kandungan udara dalam mortar	% volume	Maks.12

Sumber : SNI 15-7064-2004

Klinker semen *Portland* mengandung empat senyawa kimia utama, yang disebut dengan mineral-mineral klinker yaitu :

1. C₃S atau 3CaO.SiO₂ disebut *Trikalsium silikat*
2. C₂S atau 2CaO.SiO₂ disebut *Dikalsium silikat*
3. C₃A atau 3CaO.Al₂O₃ disebut *Trikalsium aluminat*
4. C₄AF atau 4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃ disebut *Tetrakalsium aluminoferrit*.

a. Sifat-sifat yang dimiliki Semen *Portland Cement Composite* :

1. Mempunyai panas hidrasi rendah sampai sedang
2. Tahan terhadap serangan sulfat
3. Kekuatan tekan awal kurang, namun kekuatan akhir lebih tinggi

Ditinjau dari sifat yang dimiliki oleh Semen PCC maka semen tersebut dapat digunakan sebagai alternatif atau pengganti semen portland tip II,IV atau V.

b. Standard Acuan Semen PCC

Standar acuan yang digunakan semen portland composite bersumber dari EN-197-1, European Standard CEM II Portland Composite Cement. Menurut EN 197-1 Portland Composite Cement CEM II terbagi 2 yaitu :

1. CEM II/A-M, komposisi semen ini terdiri dari, 80 – 90 % klinker/terak, 6 – 20 % bahan anorganik (Blast Furnace, silica fume, pozzolan, flyash, burn shale lime stone), 0 – 5 % Bahan tambahan Minor (gypsum)
2. CEM II/B-M, komposisi semen ini terdiri dari, 65-79 % klinker/terak, 21-35 % bahan anorganik (Blast Furnace, silica fume, pozzolan, flyash, burn shale lime stone), 0-5 % Bahan tambahan Minor (gypsum)

Sedangkan kalau mengacu ke standard ASTM maka standard yang digunakan adalah ASTM C 595, *Specification for Blended Cement*. Menurut standard ini maka *blended cement* terbagi menjadi :

1. Tipe IS = Portland Blast Furnace Slag Cement
2. Tipe IP = Portland Pozzolan Cement

2.3.2 Agregat halus

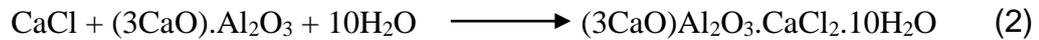
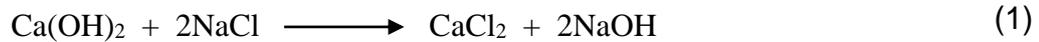
Menurut SNI 03-2847-2002 agregat halus adalah butiran halus yang memiliki kehalusan 2mm - 5mm. Agregat halus adalah agregat dengan besar butir maksimum 4,75 mm. Agregat halus yang baik harus bebas dari bahan organik, lempung atau bahan-bahan lain yang dapat merusak campuran beton ataupun batako. Pasir merupakan bahan pengisi yang digunakan dengan semen untuk membuat adukan. Selain itu juga pasir berpengaruh terhadap sifat tahanan susut, keretakan dan kekerasan pada batako atau produk bahan bangunan campuran semen lainnya.

2.3.3 Air laut

Tjaronge, dkk. (2011) meneliti pengaruh air laut pada kekuatan beton berongga yang menggunakan semen Portland komposit dan serat *mikro monofilamen polypropylene*. Uji kuat tekan dan kuat lentur dilakukan pada 3, 7 dan 28 hari menunjukkan kekuatan meningkat di air laut. Hasil memperlihatkan proses hidrasi tidak terganggu ketika beton berpori direndam air laut.

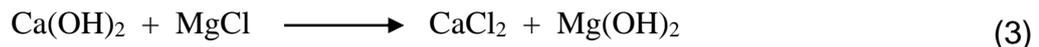
Pada proses hidrasi semen ketika bercampur dengan air laut dapat mempengaruhi ikatan kimianya dengan membentuk fase baru dalam mikrostruktur beton sehingga mempengaruhi sifat mekanis beton terutama pada durabilitas beton. Serangan klorida merupakan penyebab utama dari kerusakan struktur beton yang berpotensi dalam pembentukan mekanisme karat. Apabila ion klorida yang terkandung dalam air bereaksi dengan semen, maka sebagian produk hidrasi semen akan mengikat ion klorida dalam beton baik melalui pengikatan secara kimiawi maupun melalui adsorpsi secara fisik. Ion klorida yang tidak terikat oleh produk hidrasi akan menjelajah melalui pori-pori beton dan terpenetrasi kedalam lapisan galvanis baja (Marinescu dkk., 2010).

Proses serangan klorida pada mortar dapat dijelaskan dengan reaksi kimia berikut. NaCl dan MgCl setelah bereaksi dengan Ca(OH)₂ hasil hidrasi semen dari kalsium klorida, akan menjadi larut dimana akan menyebabkan kerugian dan pelemahan pada beton (Islam dkk., 2010).



Kalsium Kloroaluminat

(garam Friedel)



Pada lingkungan laut, penetrasi klorida kedalam beton yang berasal dari air laut membentuk garam *Friedel*. Garam *Friedel* ini menempati volume yang besar setelah kristalisasi pada pori-pori beton daripada senyawa yang digantikan.

2.3.4 Silica fume

Menurut standar Specification for Silica Fume for Use in Hydraulic Cement Concrete and Mortar (ASTM-C618-86), silica fume merupakan bahan yang mengandung SiO₂ lebih besar dari 85% dan merupakan bahan yang sangat halus berbentuk bulat dan berdiameter 1/100 diameter semen.

Silica fume adalah limbah sampingan dari industri silikon yang dihasilkan dari proses pengolahan silikon atau ferrosilicon yang dicuci dengan air dan dikeringkan. Silica fume memiliki ukuran partikel sangat kecil sehingga memiliki luas permukaan yang besar dan reaktif. Silica fume memiliki sifat yang unik, seperti kemampuan mengisi pori dan merapatkan kekuatan, kepadatan dan daya tahan beton atau mortar. Selain itu silica fume memiliki sifat pozzolanic, yaitu kemampuan untuk bereaksi dengan kalsium hidroksida yang dihasilkan dari hidrasi semen, sehingga dapat membentuk produksi hidrasi yang lebih kuat dan tahan (ACI committee 234, 2019).

2.4 Sifat Mekanik Mortar

Pada pembuatan mortar perlu diperhatikan sifat-sifat dari mortar yang diinginkan. Sifat utama yang diketahui yaitu sifat mekanik mortar. Hal tersebut dipengaruhi dari proses perhitungan dan pembuatan campuran mortar. Sifat

mekanik mortar terbagi dalam dua kondisi, yaitu mortar segar dan mortar yang telah mengeras. Pada standar ASTM C 91, SNI 03-6882-2002 diterangkan sifat mortar yang diuraikan sebagai berikut.

a. Sifat mortar segar

Sifat mortar segar adalah sifat ketika mortar belum mengeras. Beberapa sifat mortar segar tersebut antara lain :

1. *Workability* atau tingkat kemudahan pengerjaan mortar ditandai dengan nilai *flow* yang dihasilkan oleh suatu komposisi campuran yang sangat berkaitan dengan jumlah air yang digunakan. Semakin banyak air maka semakin mudah tinggi pula kemudahan pengerjaannya. Pengujian *flow* dilakukan menggunakan alat *flow table* (meja leleh) sesuai spesifikasi yang terdapat dalam SNI 03-6882-2002.
2. Waktu Ikut merupakan durasi yang diperlukan suatu campuran mortar untuk mencapai kekuatan 500 psi (3,5 MPa). Penetrometer adalah alat yang digunakan untuk mengetahui waktu ikat adukan mortar. Hasil adukan mortar segar ditusuk dengan alat tersebut sedalam 25 cm hingga mencapai 500 psi. Waktu yang dibutuhkan hingga memperoleh angka 500 psi itulah yang merupakan waktu ikat pada suatu campuran mortar segar.

b. Sifat Mortar Keras

Sifat mortar keras merupakan sifat disaat mortar sudah mengeras. Beberapa sifat mortar keras yaitu :

1. Penyerapan air (absorpsi) adalah persentase berat air yang mampu diserap oleh agregat pada mortar jika direndam dalam air (Sitorus,2009). Pencampuran air dan semen akan membentuk pasta yang disebut pasta semen. Pasta tersebut berperan sebagai pengisi rongga antar butiran-butiran agregat halus juga bersifat sebagai bahan pengikat sehingga akan membentuk suatu massa padat. Absorpsi pada mortar dapat diperoleh dengan rumus yang terdapat dalam ASTM C 1403-00, sebagai berikut :

$$A_t = (W_t - W_0) \times 1000 / L_1 \cdot L_2$$

Dimana :

W_t : Berat kering jenuh permukaan dari benda uji (gram)

W_0 : Berat kering oven dari benda uji (gram)

$L_1.L_2$: Luas permukaan benda uji (cm²)

2. Kerapatan

Kerapatan (*density*) merupakan besarnya kerapatan massa yang dinyatakan dalam berat per-satuan volume mortar pada temperatur dan tekanan tertentu. Semakin besar kerapatan sampel mortar, maka semakin baik pula kekuatannya. Pencampuran agregat dan bahan pengikat yang dapat mengisi ruang kosong pada mortar akan menghasilkan mortar dengan kerapatan yang tinggi. Penggunaan komposisi air pada suatu campuran juga dapat berpengaruh terhadap kerapatan mortar yang dihasilkan.

2.5 Korosi

Daya tahan mortar dapat pula dilihat dari kemampuannya untuk melindungi tulangan dari terjadinya korosi. Perlindungan kimia terjadi pada mortar yang memiliki kadar alkali tinggi serta perlindungan fisika dipengaruhi oleh ketebalan selimut mortar yang berperan sebagai penghalang dari material agresif. Meski terdapat sifat proteksi, korosi pada tulangan telah menjadi penyebab terbesar terjadinya kegagalan karena dapat menimbulkan retak hingga terkelupasnya selimut mortar. Penetrasi air utamanya yang mengandung NaOH (air laut) dapat memicu terjadinya korosi atau karat pada tulangan mortar.

Korosi merupakan penurunan mutu pada suatu material akibat terjadinya reaksi kimia dengan lingkungan. Peristiwa korosi tidak dapat dicegah tetapi dapat dikendalikan sehingga meminimalisir/mengurangi terjadinya kerugian yang diakibatkan oleh hal tersebut. Kerugian yang ditimbulkan dari terjadinya korosi tidak hanya berupa materi tetapi dapat pula mengancam keselamatan manusia dan lingkungan.

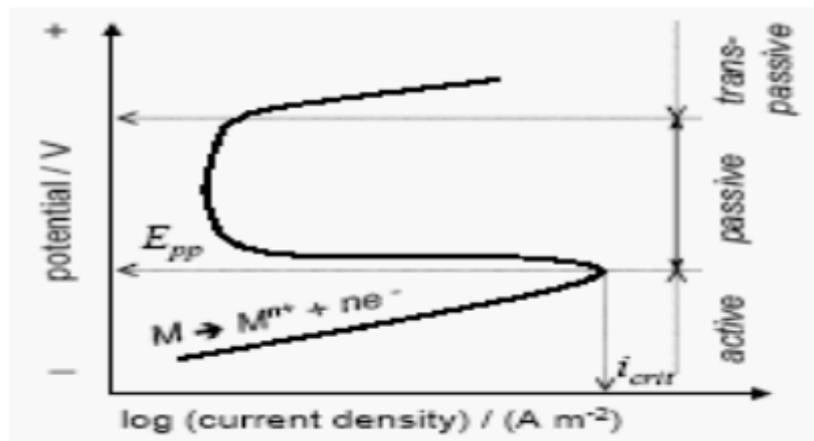
Peristiwa korosi dapat digolongkan menjadi korosi basah dan korosi kering. Korosi basah (*wet corrosion*) terjadi pada lingkungan yang basah atau lembab, sedangkan korosi kering terjadi di lingkungan udara kering atau temperatur tinggi. Proses korosi basah merupakan proses elektrokimia, yaitu terjadinya proses oksidasi pada anoda (anodik) dan proses reduksi pada katoda (katodik) melalui

larutan yang dapat mengalirkan arus listrik atau disebut elektrolit. Air laut adalah suatu contoh elektrolit yang dapat menyebabkan terjadinya proses korosi.

Pada sel korosi, elektron mengalir dari daerah yang mengalami reaksi anodik menuju daerah dengan reaksi katodik. Ion mengalir melalui elektrolit untuk menyeimbangkan aliran dari elektron. Anoda mengalami korosi sedangkan katoda tidak. Selain itu terdapat pula perbedaan potensial diantara anoda dan katoda (Dina Noermalasari, 2009).

2.6 Passivasi

Pasivasi merupakan suatu kondisi kimia dengan terbentuknya lapisan film pada permukaan suatu bahan pada keadaan teroksidasi dengan terpolarisasi anodik yang tinggi sehingga mengakibatkan bahan menjadi inert (pasif). Lapisan tersebut sangat tipis pada permukaan optikal dengan ketebalan lapisan transparaan berkisar 1 sampai 10 nm.



Gambar 1. Skema sel korosi dalam sistem sederhana (Jones and Denny, 1997)

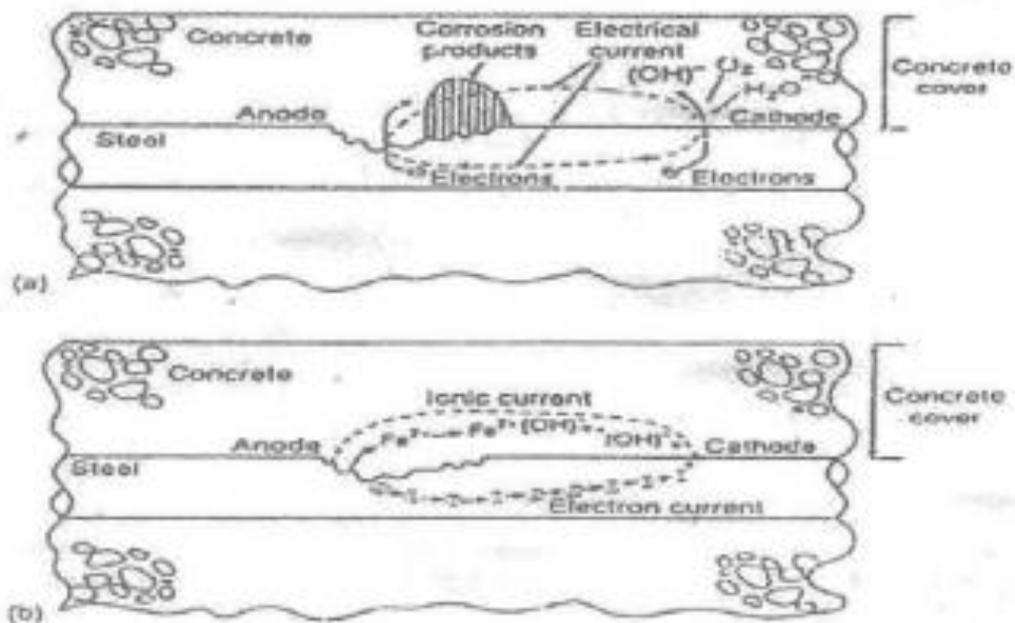
Gambar di atas memperlihatkan sifat logam serta panduan pada kondisi aktif-pasif. Laju korosi yang terukur secara anodik tinggi dan terus meningkat (potensial korosi kondisi aktif) pada potensial yang rendah. Pada kondisi di atas potensial pasif primer, lapisan yang terbentuk akan stabil dan laju korosi menurun sampai nilai yang cukup rendah dalam kondisi pasif. Laju korosi dapat mengalami penurunan hingga 10^6 kali dari laju korosi maksimum saat kondisi aktif. Lapisan pasif akan pecah pada kondisi potensial yang lebih tinggi sehingga laju reaksi anodik akan kembali meningkat, keadaan ini disebut *transpassive*.

Pasivasi logam dapat dicapai dengan beberapa cara, diantaranya yaitu :

- Autopassivation, yaitu dengan penambahan unsur Cr dan logam lain ke dalam besi untuk menghasilkan stainless steel.
- Pasivasi anodik, yaitu pemberian potensial anodik dengan teknik elektrokimia guna membentuk lapisan protektif.
- Pasivasi kimia, yaitu pembentukan lapisan pasif dengan melakukan penambahan zat kimia ke dalam lingkungan yang korosif seperti penambahan inhibitor.

2.7 Korosi Tulangan dalam Mortar

Koroai tulangan pada mortar merupakan proses elektrokimia yang melibatkan pasangan reaksi kimia dan aliran arus listrik. Proses korosi dimulai ketika atom-atom dan anoda terurai menjadi ion-ion sehingga anoda menjadi negatif dari lingkungan sekitarnya. Elektron yang dihasilkan dari anode mengalir menuju katoda melalui penghantar elektrolit. Proses ini akan terus berlanjut bila reaksi anoda dan katoda terus berlangsung dalam suatu penghantar elektrolit.

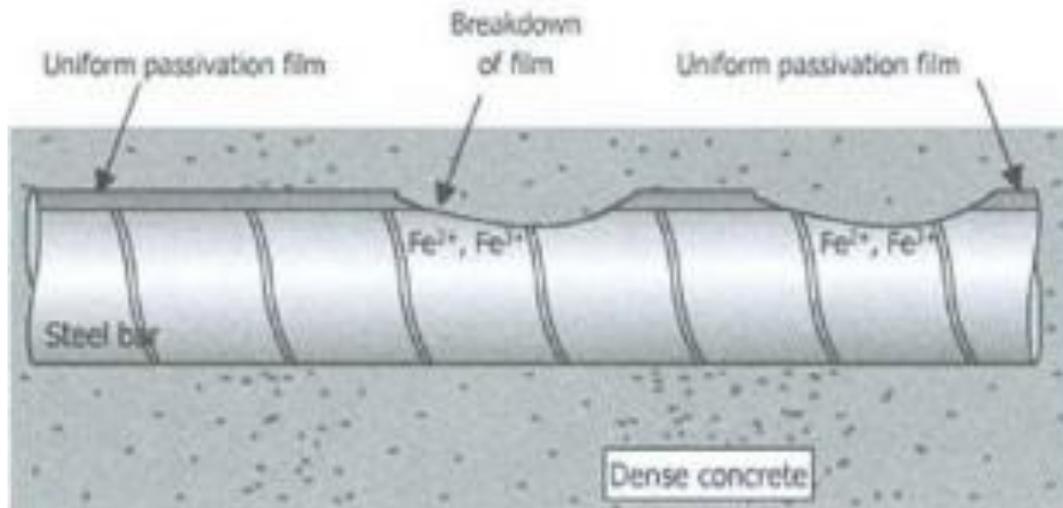


Gambar 2. Proses korosi pada permukaan baja (Bentur and Diamond S., 1988)

Gambar di atas menunjukkan terjadinya reaksi elektrokimia di anoda dan katoda saat baja terkorosi. Adapun reaksi yang terjadi yaitu :



Perpindahan ion ferro (Fe^{2+}) dan ion-ion hidroksida (OH^-) akan bereaksi membentuk produk korosi $\text{Fe}(\text{OH})_2$. Karat akan terbentuk pada tulangan dalam mortar jika lapisan pasif pada baja rusak. Karat tersebut dapat mencapai 3 sampai 9 kali volume baja tulangan yang terkorosi. Akibatnya terbentuk tegangan tarik yang memicu retakan dan lebih lanjut dapat menyebabkan delaminasi dan pengelupasan pada selimut mortar.

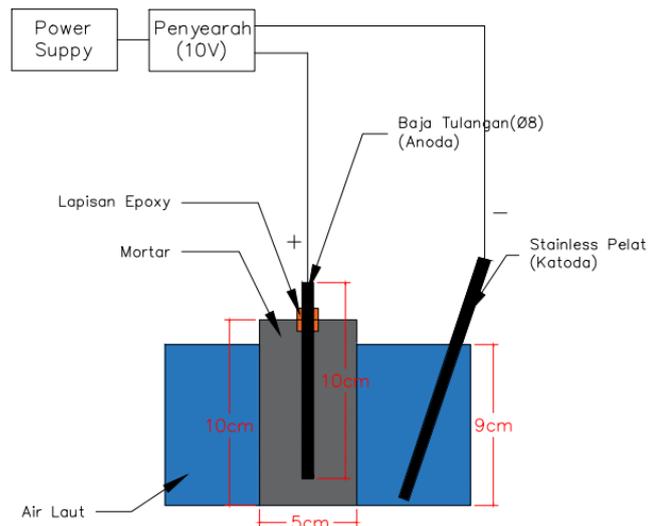


Gambar 3. Lapisan pasif baja tulangan dalam mortar (Ahmad dan Zaki, 2006)

2.8 Akselerasi Korosi

Induksi korosi pada tulangan bertujuan untuk melakukan simulasi terhadap perilaku korosi yang dapat merusak mortar. Proses korosi dimulai dengan pemberian energi anodik yang konstan sebesar 10 V. Pengujian serupa pernah dilakukan oleh peneliti lain. Pada metode ini, sebuah energi potensial positif yang konstan diberikan pada tulangan yang tertanam dalam mortar dan arus dari baja tulangan guna melawan electrode dihitung secara berkala (Afifah Dina, 2017).

DC *power supply* digunakan dalam proses akselerasi korosi untuk mengalirkan arus konstan sebesar 10 Volt ke permukaan tulangan. Positif terminal (+) pada *power supply* akan terhubung dengan tulangan dan negatif terminal (-) ke *stainless plate* sebagai penghantar arus ke permukaan tulangan. Uji akselerasi dilakukan guna membandingkan korosi dari mortar yang menggunakan bahan pengikat. Skema representasi penelitian akselerasi korosi dapat ditunjukkan pada gambar berikut.

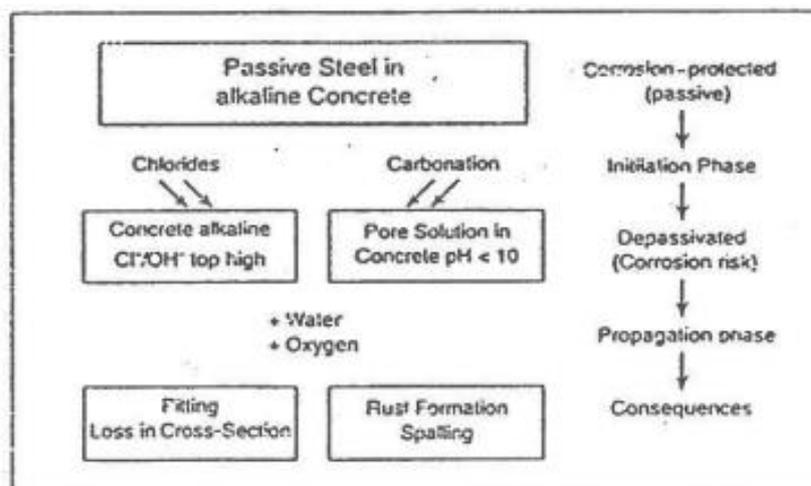


Gambar 4. Skema pengujian akselerasi korosi

2.9 Faktor Korosi Tulangan dalam Mortar

a. Depasivasi

Pada larutan pori basa tinggi pada mortar yang terbentuk selama proses hidrasi semen, terbentuk lapisan oksida tipis (pasif film) yang melindungi tulangan dari korosi. Meskipun demikian, lapisan tersebut akan pecah disebabkan dari penurunan nilai pH akibat penguraian karbon dioksida dan sulfida dari atmosfer serta penetrasi ion klorida dari lingkungan seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 5. Degradasi korosi baja dalam mortar (Bentur and Diamond S., 1988)

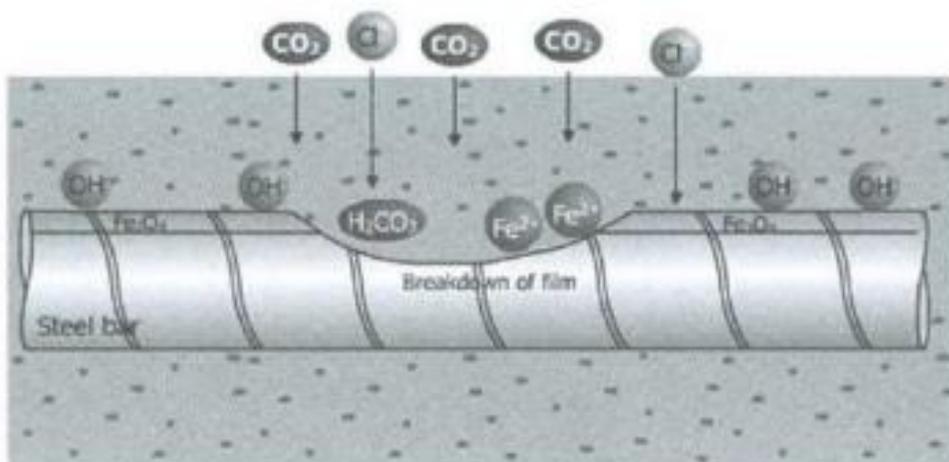
b. Karbonisasi

Molekul- molekul gas karbon dioksida (CO_2) yang terdapat di atmosfer dapat melakukan penetrasi ke dalam mortar kemudian bereaksi dengan senyawa-

senyawa alkali hidroksida yang berada dalam larutan pori selimut mortar, dengan reaksi sebagai berikut :

1. $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$ (asam karbonat)
2. $\text{H}_2\text{CO}_3 \longrightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ (penurun pH)
3. $\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \longrightarrow \text{CaCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Pembentukan kalsium karbonat disertai dengan menurunnya kadar air dan meningkatnya berat mortar yang berakibat terjadinya retak di permukaan. Gambar x memperlihatkan pengaruh dari proses karbonisasi dalam mortar. Proses tersebut menyebabkan penurunan alkalinitas dikarenakan penurunan pH. Hal ini akan menyebabkan baja berpindah dari kondisi pasif ke kondisi aktif.



Gambar 6. Efek karbonisasi korosi baja dalam mortar (Ahmad dan Zaki, 2006)

c. Serangan Sulfat

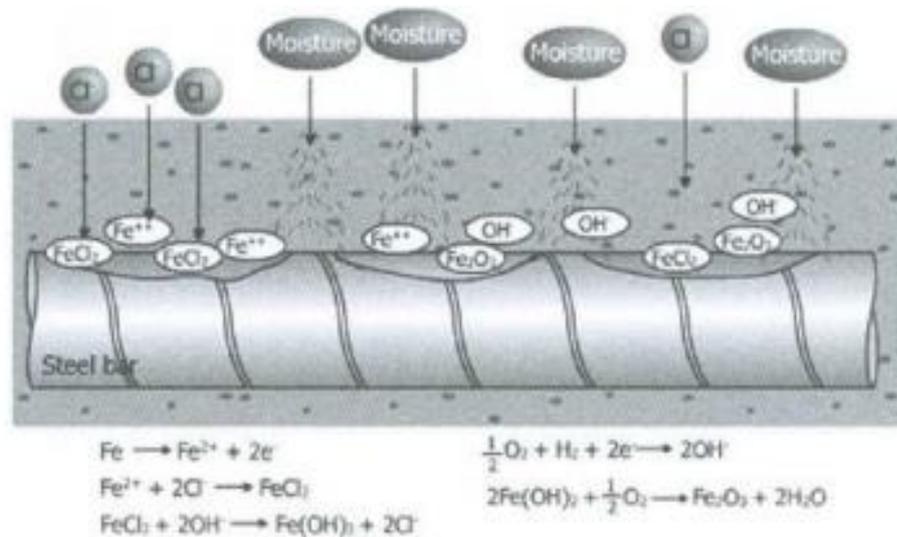
Mortar yang mengalami kontak dengan air dalam tanah liat dapat terserang garam sulfat dari kalsium, magnesium, dan sodium. Garam sulfat juga terdapat pada kandungan air laut dan air payau. Reaksi utama yang terjadi adalah sebagai berikut :

1. $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{NaOH} + 8\text{H}_2\text{O}$
(Gypsum)
2. $2(3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}) + 3(\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}) \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$
3. Calcium sulfoaluminate) + $2\text{Al}(\text{OH})_3 + 6\text{NaOH} + 17\text{H}_2\text{O}$

Dua produk dari reaksi gypsum dan ettringite (calcium sulfoaluminate) memiliki volume lebih besar dari senyawa yang digantikan karena serangan sulfat menyebabkan ekspansi dalam volume dan kerusakan pada mortar.

d. Efek Ion Klorida

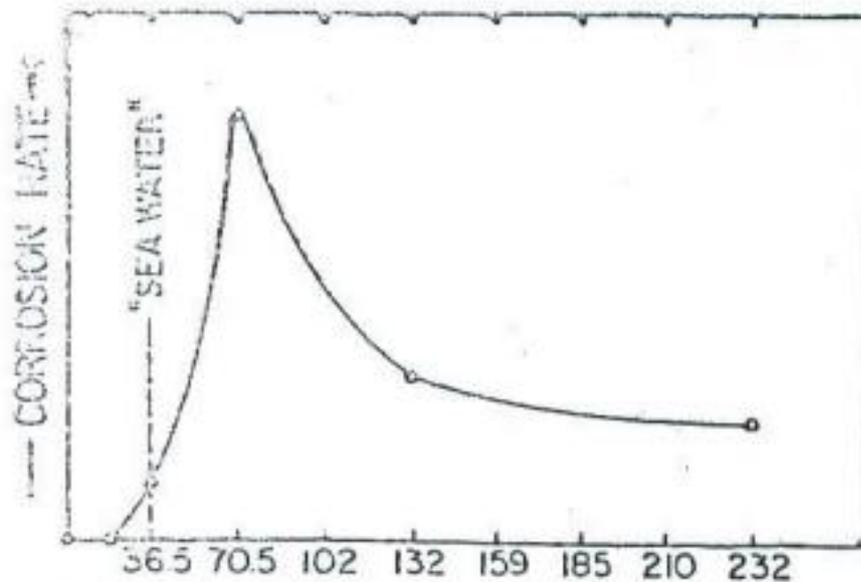
Ion klorida bersifat merusak lapisan pasif sehingga menyebabkan korosi pada baja. Pitting merupakan reaksi autokatalik yang berkelanjutan hingga membentuk lubang pada tulangan dalam mortar. Klorida bereaksi dengan ferit kemudian membentuk paduan kompleks FeCl_2 . Proses korosi sumuran ini dapat dilihat pada gambar x. Sumuran mulai terbentuk di permukaan logam yang tidak seragam yaitu bagian coating tergores, tidak diberi inhibitor, atau adanya endapan berupa slag, scale, pasir, dan debu.



Gambar 7. Korosi penetrasi ion klorida dalam mortar (Ahmad dan Zaki, 2006)

Ion klorida dalam mortar menghasilkan dua efek, yaitu mengakibatkan lapisan proteksi oksida rusak karena pembentukan besi klorida yang mudah larut dan meningkatnya konduktivitas dari elektrolit. Efek tersebut akan mempermudah pelarutan ion logam. Ion klorida yang berasal dari komponen campuran mortar, kalsium klorida yang ditambahkan sebanyak 2% dari berat semen. Selain itu agregat yang berpori dan terekspos air laut dapat menjadi sumber klorida.

Pengaruh ion klorida dari garam natrium klorida terhadap laju korosi diutarakan oleh Griffin dan Henry seperti pada gambar x. Laju korosi meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi garam hingga batas maksimum. Kemudian laju korosi akan berkurang walaupun konsentrasi garam dinaikkan. Perubahan ini menghasilkan suatu hubungan antara korosi dan konsentrasi garam yang dapat mengurangi kelarutan serta difusi oksigen dan dampaknya terhadap korosi.



Gambar 8. Pengaruh kadar garam terhadap laju korosi (ACI committee, 1989)

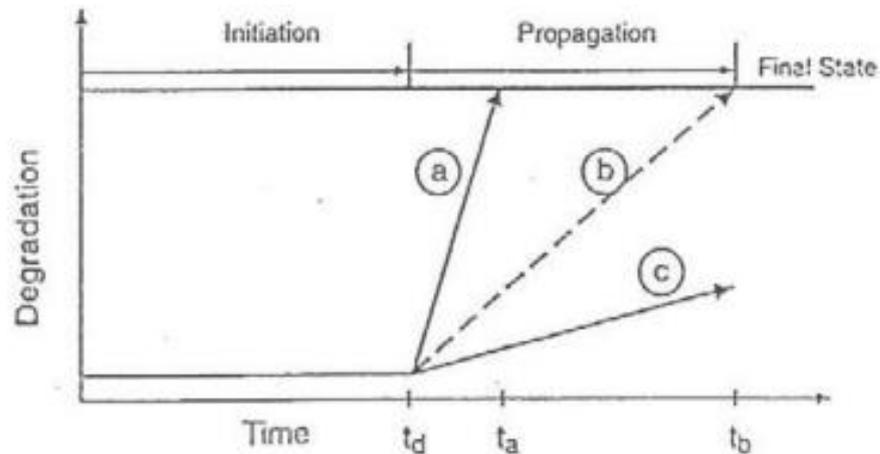
Produk korosi memiliki volume yang lebih besar dari volume baja sehingga mengakibatkan terjadinya tegangan tarik dalam mortar. Jig tngangan tersebut lebih besar dari mortar maka akan timbul retak pada permukaan mortar. Hal ini menyebabkan terjadinya peningkatan difusi ion klorida dan karbon dioksida pada retakan yang terjadi di mortar. Munculnya keretakan akan mengakibatkan percepatan kerusakan (*spalling*) pada struktur baja meningkat di dalam mortar.

e. Efek Oksigen

Oksigen merupakan syarat terjadinya korosi. Jika tidak ada oksigen, maka korosi tidak akan terjadi. Udara dapat berdifusi ke dalam mortar. Air yang mengalami kontak dengan udara akan jenuh oksigen dan kandungan totalnya tergantung dari padatan yang terlarut dan kelarutan oksigen serta banyaknya kandungan garam terlarut. Oksigen menyebabkan terjadinya perbedaan sel differensiasi aerasi yang menghasilkan korosi di permukaan baja.

2.10 Mekanisme Korosi Tulangan dalam Mortar

Proses degradasi pada mineral baja dalam mortar terbagi atas 2 tahapan, yaitu tahap inisiasi dan tahap propagasi. Perkembangan korosi baja terhadap waktu (t_d), waktu depasivasi (t_a), waktu untuk mencapai keadaan akhir (t_b), dengan laju korosi a , b , c , dan kenaikan laju korosi ($a > b > c$), dapat dilihat pada gambar x.



Gambar 9. Model korosi untuk baja tulangan dalam mortar (Tuuti, 1982)

a. Tahap inisiasi

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

b. Tahap propagasi

Ketika baja terdepasivasi karena ion klorida atau karbonasi, maka korosi dapat terjadi dengan hidrasi oksien dan kelembaban lingkungan. Lama propagasi korosi diberikan oleh derajat kerusakan yang dapat diterima (*loss in cross section, spalling*) dan oleh laju korosi. Laju korosi menentukan durasi untuk mencapai keadaan akhir dari struktur dan laju korosi bervariasi tergantung pada temperatur, kelembaban, dan sebagainya. (Dina Noermalasari, 2009)

2.11 Keretakan Mortar Akibat Korosi

Penyebab keretakan terhadap durabilitas dari mortar adalah pengaruh fungsi kompleks dari kualitas mortar yang terdiri dari kondisi lembab, lebar retak, tipe, kedalaman, frekuensi, dan orientasi permukaan serta penanganan retak (ACI 222 R-01, 1996). Penyebab keretakan dan lebar retak tulangan akibat korosi pada mortar merupakan hal yang menimbulkan banyak perbedaan. Sebelumnya,

penelitian dan diskusi telah dikhususkan untuk topik ini tanpa sampai pada kesimpulan. Secara umum, ada dua sudut pandang, yaitu :

- a. Keretakan mengurangi massa kinerja dari struktur dengan akses yang lebih cepat yaitu akses kelembaban, ion klorida dan oksigen untuk mencapai perkuatan, sehingga mempercepat proses korosi, karena koosi pun akan dilokalisasi ke daerah yang hancur.
- b. Keretakan mengakselerasi proses korosi karena korosi juga akan dilokalisasi ke daerah yang hancur.

2.12 Peran *Silica Fume* pada Perilaku Korosi Tulangan

Silica Fume merupakan suatu bahan yang memiliki sifat sebagai pengikat pada campuran mortar ataupun beton. Meski memiliki sifat yang relatif sama, bahan tersebut juga memiliki perbedaan utamanya dalam hal penyerapan air. *Silica fume* adalah material pozzolan yang halus, dimana komposisi silika lebih banyak dihasilkan dari tanur tinggi atau sisa produksi silicon atau alloy besi silikon. Dilihat dari sifat kimianya, secara geometris *silica fume* mengisi rongga-rongga diantara bahan semen dan mengakibatkan diameter pori mengecil serta total volume pori juga berkurang. Sedangkan dari sifat mekaniknya, *silica fume* memiliki reaksi yang bersifat pozzolan (bahan yang mempunyai kandungan senyawa silika/silika dioksida dan alumunia) yang bereaksi terhadap batu kapur yang dilepas semen. (ACI Report No. 234R-18, 2019)

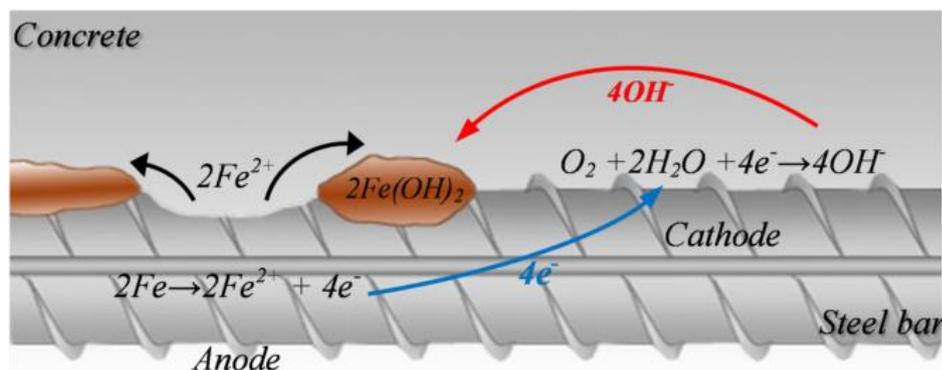
Berdasarkan uraian tersebut, dapat diartikan bahwa *silica fume* dapat membuat homogenitas (kerapatan) mortar meningkat karena dapat mengisi pori-pori di antara semen sebagai bahan pengikat utama. Artinya bahan ini dapat menjadi pelengkap guna membuat suatu sampel mortar yang rapat dan memiliki porositas rendah. Rendahnya porosita mortar akan sangat berpengaruh pada penyerapan air (absorpsi) yang terjadi jika direndam di dalam air. Hal tersebut sejalan dengan tujuan penggunaannya dalam penelitian ini yaitu menghambat proses terjadinya reaksi antara ion-ion klorida yang terkandung di dalam air laut untuk masuk dan bereaksi secara oksidasi terhadap tulangan yang terdapat di dalam sampel mortar.

Keuntungan fisik dari partikel *silica fume* yang halus yaitu akan menempati ruang kecil diantara partikel agregat pada adukan semen. Rongga yang menjadi kelemahan dari mortar akan menimbulkan efek yang mencegah bersatunya semen Portland dengan permukaan agregat. Bagian tersebut nantinya akan diisi oleh partikel dari *silica fume* yang sangat halus sehingga air tidak terperangkap di dalam partikel padat. Oleh karena itu, absorpsi dari daerah bidang pemisah agregat akan menjadi lebih kecil dibanding dengan campuran tanpa *silica fume* (Reni Oktaviani T. dkk, 2017)

2.13 Uji Potensial Mortar

Pada struktur beton bertulang, terdapat lapisan pelindung alami yang terbentuk di permukaan dan mencegah batang mengalami korosi. Seiring berjalannya waktu, klorida (dari garam penghilang lapisan es atau paparan laut) dan/atau CO₂ menembus beton dan merusak lapisan pelindung tersebut. Klorida mengganggu kestabilan lapisan film pasif yang menyebabkan kerusakan lokal, sementara CO₂ menurunkan pH beton di bawah tingkat stabilitas lapisan pasif. Dengan adanya oksigen dan air, reaksi elektrokimia memulai proses korosi.

Korosi dapat diilustrasikan seperti terlihat pada **Gambar 10**. Logam (rebar) bereaksi dalam larutan (tersedia pada pori-pori beton) dan melepaskan elektron dari anoda (tempat terjadinya oksidasi) ke katoda (tempat terjadi reduksi). Ion positif yang terbentuk pada permukaan anoda akan bereaksi dan menghasilkan produk samping korosi. Reaksi elektrokimia ini menciptakan perbedaan potensial, dan akibatnya menimbulkan arus korosi, antara area anodik dan katodik pada permukaan tulangan baja. Arus ini, atau distribusi potensial pada permukaan penguat, penting untuk pengukuran potensial setengah sel.



Gambar 10. Proses terjadinya korosi pada tulangan (Sarah, 2023)

Skema di atas mewakili sel yang masing-masing sisinya disebut sebagai setengah sel. Setiap setengah sel diwakili oleh sebuah elektroda dalam larutan (elektrolit) dan kedua setengah sel dihubungkan bersama. Karena salah satu elektroda memiliki kecenderungan korosi yang lebih tinggi dibandingkan elektroda lainnya, elektroda tersebut (anoda) akan teroksidasi dan pada gilirannya akan menyumbangkan elektron. Guna menjaga keseimbangan sistem dan menyeimbangkan muatan dalam elektrolit, akan terjadi pertukaran ion melalui jembatan garam. Voltmeter akan mengukur beda potensial (tegangan) antara kedua elektroda, yang menunjukkan laju pelarutan anoda.

Elektroda referensi yang potensialnya diketahui diperlukan untuk menerapkan konsep ini pada beton dan menginterpretasikan hasil potensial korosi. Biasanya, untuk aplikasi beton bertulang, elektroda tembaga/tembaga sulfat (Cu/CuSO₄) atau elektroda perak/perak klorida (Ag/AgCl) digunakan sebagai referensi setengah sel. Elektroda referensi ini dihubungkan ke setengah sel lainnya yang diwakili oleh rebar tertanam (Gambar 2b). Dengan menghubungkan elektroda acuan tersebut ke baja tulangan dan menempatkan elektroda acuan pada permukaan beton, beda potensial antara dua setengah sel dapat diukur.

ASTM C876 memberikan panduan tentang bagaimana pengukuran ini dapat dilakukan, dan hubungan antara nilai potensial yang diukur dan kemungkinan korosi. Interpretasi hasilnya bersifat kualitatif dan didasarkan pada elektroda tembaga sulfat (CSE). Pedoman interpretasi umum yang diusulkan oleh ASTM, dimana rentang potensial yang diukur dikategorikan dalam tiga kategori; kemungkinan lebih dari 90%, kemungkinan kurang dari 10%, atau kemungkinan korosi yang tidak pasti dipelihatkan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Hubungan nilai potensial dan kemungkinan korosi tulangan

Potensial Terukur (mV CSE)	Kemungkinan Aktivitas Korosi Baja
> -200	Kurang dari 10%
-200 sampai -350	Tidak Pasti
< -350	Lebih dari 90%

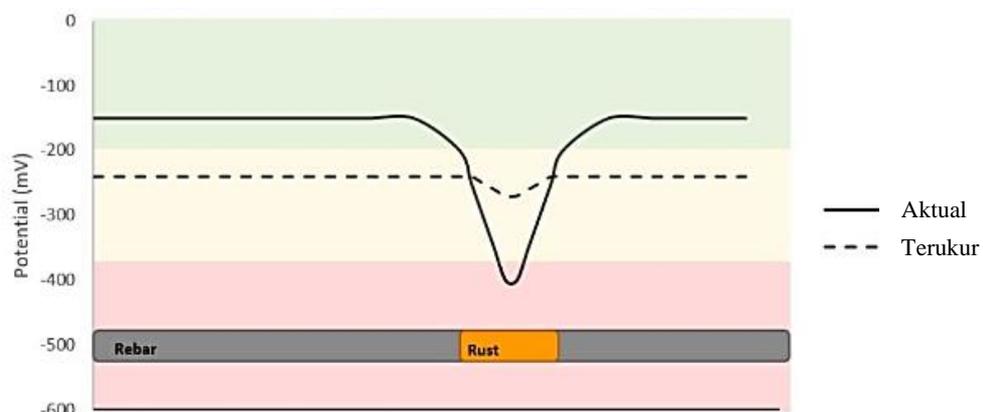
Sumber : ASTM C876

Sekilas, metode pengujian ini tampak sangat sederhana dan terdiri dari langkah-langkah berikut:

1. Identifikasi lokasi tulangan,
2. Membuat sambungan dengan tulangan (dapat diperlukan lebih dari satu sambungan apabila terdapat diskontinuitas antar tulangan),
3. Siapkan permukaan beton melalui pembasahan.

Pengukuran dilakukan dengan cepat karena nilai potensial hanya memerlukan waktu beberapa detik untuk stabil sebelum pengukuran berikutnya dapat dilakukan. Namun, ada keterbatasan penting dalam interpretasi data yang perlu dipertimbangkan. Pengaruh kondisi beton (kering atau basah), adanya klorida, tidak adanya oksigen pada permukaan tulangan (akibat jenuh), ketebalan lapisan penutup, resistivitas beton, dan suhu merupakan faktor-faktor yang dapat mempengaruhi hasil dengan menggeser pembacaan potensialnya menuju nilai yang lebih positif atau negatif. Hal ini dapat membuat interpretasi data menjadi sulit ketika menggunakan pedoman yang diberikan dalam ASTM C876 (**Tabel 3**), terutama di sekitar rentang pengukuran yang tidak pasti.

Selain itu, pengukuran setengah sel dianggap sebagai pengukuran zonal karena akan mengambil pengukuran potensial rata-rata lingkungan sekitar. Sebuah contoh diilustrasikan pada **Gambar 11**. Potensi yang diukur akan menunjukkan rata-rata pada jarak tertentu dan letak sebenarnya dari tulangan yang terkorosi sulit untuk dibedakan, bahkan dengan pemetaan potensi korosi.



Gambar 11. Hasil potensial setengah sel aktual vs terukur (Sarah, 2023).

Namun demikian, teknik ini digunakan secara luas karena merupakan satu-satunya teknik pemantauan korosi yang distandarisasi oleh ASTM. Perangkat

XCell™ Giatec menggunakan elektroda perak/perak klorida, menjadikan perangkat NDT ini lebih stabil dan akurat dibandingkan perangkat setengah sel yang menggunakan elektroda tembaga/tembaga sulfat. Hal ini dapat sangat berguna dalam melakukan penilaian cepat dan mengidentifikasi daerah dimana mungkin terdapat aktivitas korosi yang relatif lebih tinggi. Hasil dari teknik potensi korosi tetap bersifat kualitatif karena hanya memberikan informasi mengenai kemungkinan terjadinya aktivitas korosi, bukan informasi kuantitatif seperti laju korosi pada tulangan; ini adalah informasi yang lebih berguna ketika menentukan rencana tindakan untuk perbaikan atau mitigasi korosi.