



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI PENGARUH WAKTU TERHADAP KOROSI  
MIKROBIOLOGI BAJA KARBON API 5L *GRADE B* PADA  
LINGKUNGAN AIR FORMASI**

**SKRIPSI**

**MISKA RAHMANIATI**

**0706268732**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
JUNI 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI PENGARUH WAKTU TERHADAP KOROSI  
MIKROBIOLOGI BAJA KARBON API 5L *GRADE B* PADA  
LINGKUNGAN AIR FORMASI**

**SKRIPSI**

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

**MISKA RAHMANIATI**

**0706268732**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
JUNI 2011**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

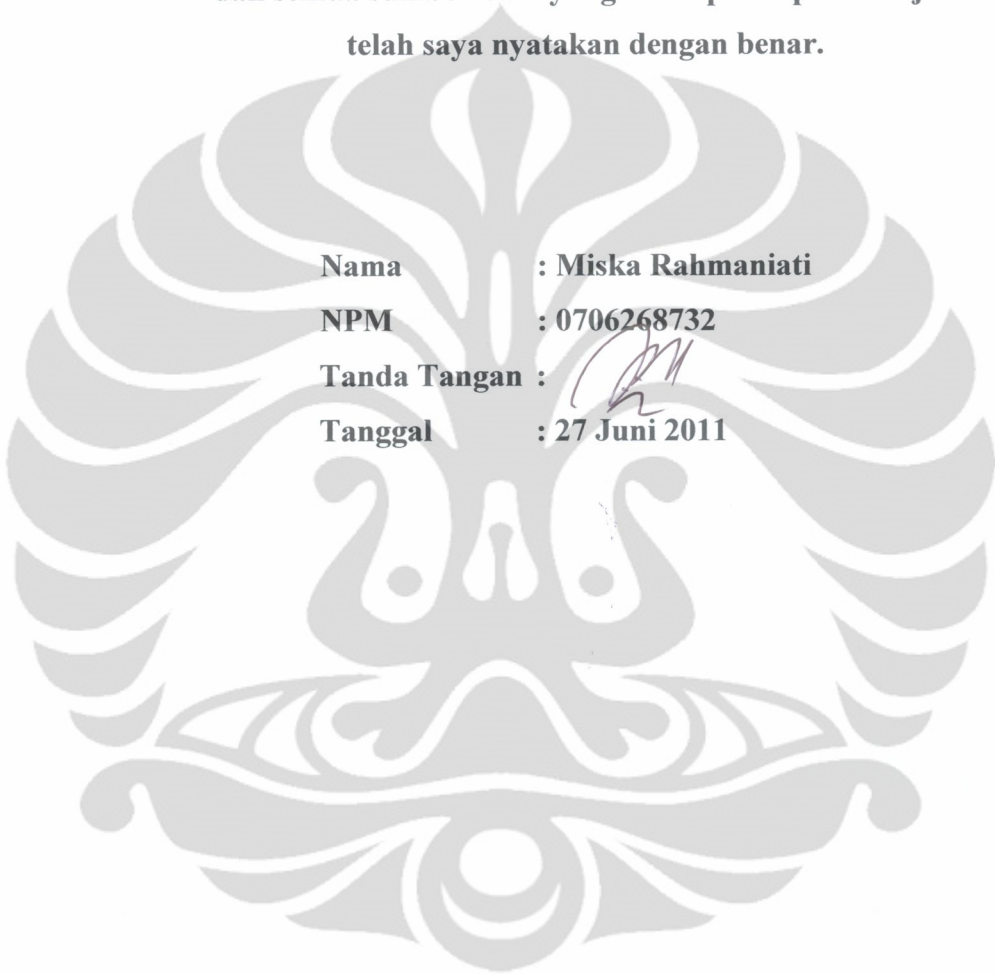
**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : Miska Rahmaniati**

**NPM : 0706268732**

**Tanda Tangan :** 

**Tanggal : 27 Juni 2011**



## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Miska Rahmaniati  
NPM : 0706268732  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Studi Pengaruh Waktu Terhadap Korosi  
Mikrobiologi Baja Karbon API 5L *Grade B* pada  
Lingkungan Air Formasi

**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 : Ir. Rini Riastuti, M.Sc (  )  
Penguji 1 : Dra. Sari Katili M.S. (  )  
Penguji 2 : Ir. Yunita Sadeli M.Sc (  )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 27 Juni 2011

## UCAPAN TERIMA KASIH

Seiring rasa syukur ke hadirat Allah SWT, saya ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Ir. Rini Riastuti M.Sc, sebagai dosen pembimbing skripsi yang telah bersedia meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan bimbingan, saran, dan kemudahan lainnya sehingga tugas skripsi ini dapat selesai dengan baik.
2. Orang tua, kakak, dan keluarga yang selalu memberikan dukungan dan doa kapanpun dan dimanapun.
3. VICO Indonesia, Muara Badak yang telah memberikan kesempatan untuk melakukan tugas akhir dan memberikan ilmu dan pengalaman yang sangat berharga.
4. Teman-teman yang selalu mengembalikan kepenatan menjadi keceriaan.

Saya berharap semoga skripsi ini dapat dijadikan manfaat dan menjadi sebuah kontribusi bagi kemajuan pengetahuan di bidang ilmu Metalurgi dan Material. Amin.

Depok, Juni 2011

Penulis,

Miska Rahmaniati

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

---

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

Nama : Miska Rahmaniati  
NPM : 0706268732  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

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

Studi Pengaruh Waktu terhadap Korosi Mikrobiologi  
Baja Karbon API 5L *Grade B* pada Lingkungan Air Formasi

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 memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik hak cipta.

Demikian Pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 27 Juni 2011

Yang menyatakan,



(Miska Rahmaniati)

## ABSTRAK

Nama : Miska Rahmaniati  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul : Studi Pengaruh Waktu terhadap Korosi Mikrobiologi Baja Karbon API 5L *Grade B* pada Lingkungan Air Formasi

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh waktu terhadap korosi mikrobiologi yang diaplikasikan pada material baja karbon API 5L *grade B*. Media lingkungan yang digunakan dalam penelitian ini adalah air formasi yang berasal dari sistem injeksi salah satu perusahaan minyak dan gas di Indonesia. Air formasi itu sendiri adalah produk buangan yang berasal dari proses pengolahan minyak dan gas yang kemudian diinjeksikan kembali ke dalam tanah melalui sumur yang tidak lagi aktif memproduksi. Penelitian dilakukan melalui metode uji celup korosi dengan lima periode waktu yang berbeda yaitu 3, 6, 9, 12, dan 15 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu memiliki pengaruh terhadap korosi mikrobiologi yang terjadi. Laju korosi yang dihitung dengan metode kehilangan berat menunjukkan nilai yang terus mengalami penurunan dengan adanya penambahan waktu dimana periode waktu tiga hari memiliki laju korosi terbesar yaitu 5.080 mpy dan laju korosi terkecil terjadi pada periode pencelupan selama lima belas hari dengan nilai sebesar 1.874 mpy. Fenomena ini memiliki kesesuaian dengan jumlah koloni bakteri yang juga mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya waktu dengan jumlah koloni terbesar pada periode pencelupan selama tiga hari yaitu sebesar 329000 cfu dan terus menurun hingga mencapai titik terkecilnya pada periode uji selama lima belas hari yaitu sebanyak 61000 cfu. Berdasarkan pengamatan terhadap morfologi kerusakan, penelitian ini menunjukkan adanya korosi seragam dengan adanya pembentukan *tubercle* yang disebabkan oleh bakteri aerob dan korosi sumuran yang disebabkan oleh bakteri pereduksi sulfat.

Kata kunci : korosi mikrobiologi, bakteri pereduksi sulfat, aerob, anaerob, metode kehilangan berat, laju korosi, *tubercle*.

## ABSTRACT

Name : Miska Rahmaniati  
Study Program : Teknik Metalurgi dan Material  
Title : Study of Time Effect to Microbiology Influenced Corrosion for API 5L Grade B Carbon Steel in Formation Water

The purpose of this research is to study the effect of time to microbiology influenced corrosion which applied to API 5L grade B carbon steel. Medium which used in this research is produced water disposal from one of oil and gas company's water well injection system in Indonesia. Produced water disposal itself is by-product from oil and gas processing which re-injected to the earth through injection well which is no longer active in production. The research was conducted using immersion corrosion test method in five different time period i.e. 3, 6, 9, 12, and 15 days. Result of this research shows that time really has an effect to microbiology influenced corrosion which occurred when the test conducted. Corrosion rate which counted using weight loss method shows gradually decreasing value to the increasing time period where three days period of immersing specimen has the highest corrosion rate in the amount of 5.080 mpy and fifteen days period has the lowest corrosion rate with the amount of 1.874 mpy. This phenomenon has consistency to the colony form unit which reduced to the increasing time which the most number of colonies is in three days period as many as 329000 cfu and gradually decrease to its fewest number of colonies in fifteen days period which has 61000 cfu. Based on specimen's failure morphology, this research shows the developing corrosion is uniform corrosion through the establishment of tubercle which caused by aerobic bacteria and pitting corrosion which caused by sulfate reducing bacteria (SRB).

Keywords : microbiology influenced corrosion, sulfate reducing bacteria, aerobic, anaerobic, weight loss method, corrosion rate, tubercle.



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang Penelitian	1
1.2. Tujuan Penelitian	3
1.3. Ruang Lingkup Penelitian	3
1.4. Sistematika Penulisan	3
<b>BAB 2 TEORI PENUNJANG</b>	<b>5</b>
2.1. Korosi	5
2.2. Korosi Mikrobiologi	8
2.3. Bakteri Penyebab Korosi	8
2.4. Pembentukan Biofilm	12
2.5. Mekanisme Serangan Korosi Mikrobiologi	14
2.5.1. <i>Iron Oxidizing Bacteria</i>	15
2.5.2. <i>Sulfate Reducing Bacteria</i>	16
2.6. Penanganan Korosi Mikrobiologi	18
2.6.1. Metode Fisika Mekanik	18
2.6.2. Metode Kimia	19
2.6.3. Metode Elektrokimia	22

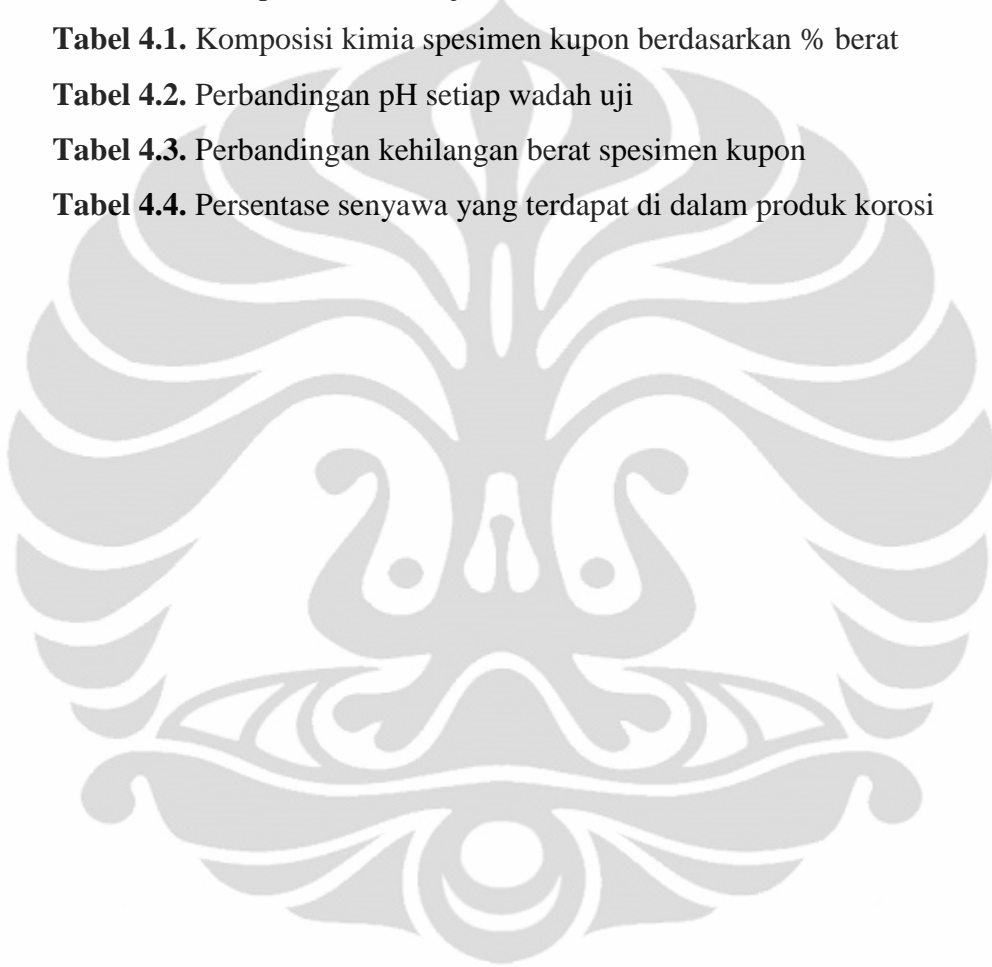
2.6.4.	Metode Biologi	22
2.7.	Uji Kehilangan Berat	22
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN</b>		<b>24</b>
3.1.	Diagram Alir Penelitian	25
3.2.	Prosedur Penelitian	25
3.2.1.	Preparasi Spesimen Kupon	26
3.2.2.	Pengujian Komposisi Kimia	27
3.2.3.	Pengujian Celup	28
3.2.4.	Pengujian Sampel Air Formasi	30
3.2.5.	Pengukuran pH	32
3.2.6.	Pembersihan Spesimen Kupon	33
3.2.7.	Perhitungan Laju Korosi dengan Metode Kehilangan Berat	34
3.2.8.	Karakterisasi Produk Korosi	34
3.2.9.	Pengamatan Kerusakan Kupon	35
<b>BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN</b>		<b>36</b>
1.1.	Latar Belakang Material	36
1.2.	Hasil Pengujian Komposisi Kimia	36
1.3.	Hasil Uji Celup	37
1.4.	Hasil Pengujian Sampel Air Formasi	38
1.5.	Hasil Pengukuran pH	45
1.6.	Hasil Perhitungan Laju Korosi	46
1.7.	Karakterisasi Produk Korosi	48
1.8.	Hasil Pengamatan Morfologi Kerusakan	51
<b>BAB 5 KESIMPULAN</b>		<b>54</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>		<b>55</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.1.</b> Skema proses produksi minyak dan gas	2
<b>Gambar 2.1.</b> Model sederhana reaksi elektrokimia dalam proses korosi	6
<b>Gambar 2.2.</b> Berbagai bentuk korosi	7
<b>Gambar 2.3.</b> Mekanisme pembentukan biofilm	13
<b>Gambar 2.4.</b> Mekanisme korosi oleh bakteri aerob dan anaerob	14
<b>Gambar 2.5.</b> Skematik korosi yang disebabkan oleh bakteri	15
<b>Gambar 2.6.</b> Skematik pembentukan inisiasi <i>pit</i> oleh keberadaan bakteri pereduksi sulfat	17
<b>Gambar 2.7.</b> Skematik metode <i>pigging</i>	19
<b>Gambar 3.1.</b> Diagram Alir Penelitian	25
<b>Gambar 3.2.</b> Bentuk Spesimen Uji Celup	27
<b>Gambar 3.3.</b> Sampel Air Formasi	29
<b>Gambar 3.4.</b> Pengujian Korosi dengan Uji Celup	30
<b>Gambar 3.5.</b> Inkubasi bakteri di dalam <i>anaerobic jar</i>	32
<b>Gambar 3.6.</b> Alat Uji XRD	35
<b>Gambar 4.1.</b> Spesimen kupon setelah uji celup	38
<b>Gambar 4.2.</b> Pertumbuhan koloni bakteri anaerob	39
<b>Gambar 4.3.</b> Pertumbuhan koloni bakteri aerob	40
<b>Gambar 4.4.</b> Pertumbuhan koloni bakteri sebelum pengujian celup	41
<b>Gambar 4.5.</b> Isolat bakteri aerob dan anaerob	42
<b>Gambar 4.6.</b> Perbandingan jumlah koloni dalam cawan petri	43
<b>Gambar 4.7.</b> Perbandingan jumlah koloni dalam wadah uji	44
<b>Gambar 4.8.</b> Perbandingan laju korosi spesimen kupon	48
<b>Gambar 4.9.</b> Deposit Produk Korosi	49
<b>Gambar 4.10.</b> Difraktogram produk korosi	49
<b>Gambar 4.11.</b> Hasil uji SEM permukaan spesimen kupon	52

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1.</b> Jenis bakteri yang berperan dalam korosi mikrobiologi	11
<b>Tabel 2.2.</b> Berbagai jenis biosida dalam dunia industri	21
<b>Tabel 2.3.</b> Konstanta perhitungan laju korosi berdasarkan satuannya	23
<b>Tabel 3.1.</b> Komposisi kimia baja karbon API 5L <i>Grade B</i>	27
<b>Tabel 4.1.</b> Komposisi kimia spesimen kupon berdasarkan % berat	36
<b>Tabel 4.2.</b> Perbandingan pH setiap wadah uji	46
<b>Tabel 4.3.</b> Perbandingan kehilangan berat spesimen kupon	47
<b>Tabel 4.4.</b> Persentase senyawa yang terdapat di dalam produk korosi	50



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil Pengujian Komposisi Kimia Spesimen Kupon	57
Lampiran 2. Hasil Pengujian XRD	58



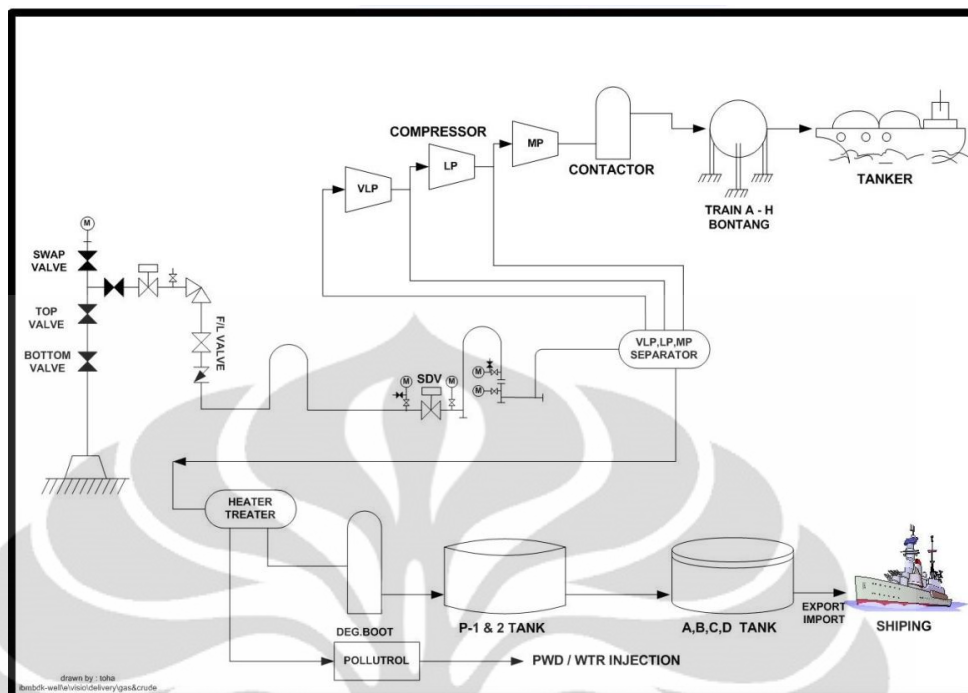
# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1. LATAR BELAKANG PENELITIAN

Saat ini era globalisasi memberikan fenomena kemajuan teknologi yang berkembang dengan sangat pesat dan tentunya memberikan pengaruh baik bagi manusia. Sampai saat ini manusia terus melakukan penelitian dan mencari sumber energi baru di berbagai penjuru dunia untuk memajukan peradabannya. Gas alam dan minyak bumi merupakan salah satu sumber energi yang dieksplorasi secara luas di seluruh belahan bumi. Jalur pipa merupakan media transfer utama dalam sistem produksi minyak dan gas. Hal ini menjadikan industri minyak dan gas sebagai salah satu yang berkaitan erat dengan fenomena korosi.

Minyak dan gas yang dieksplorasi dari dalam perut bumi diambil melalui sumur produksi melewati jalur pipa menuju satelit (stasiun pengumpul). Dari satelit, fluida yang terdiri minyak, gas, dan air tersebut kemudian dialirkan menuju separator yang berfungsi memisahkan gas, minyak/kondensat, dan air sehingga didapatkan sumber produksi utama yaitu minyak dan gas. Air merupakan produk yang secara alami ikut terbawa dari dalam sumur dan turut terlibat dalam proses produksi. Air yang disebut sebagai air formasi atau *produce water disposal* tersebut harus dipisahkan dari sumber produksi utama yaitu gas dan minyak untuk kemudian diberikan perlakuan pada *pollution control*.

Air formasi sebagai hasil buangan dari industri minyak dan gas pada awalnya tidak diberikan perlakuan yang tepat sehingga pembuangannya seringkali tidak berorientasi terhadap kesehatan dan keamanan lingkungan seperti misalnya dialirkan begitu saja ke laut atau sungai. Seiring dengan kemajuan pola pikir manusia akan kesadaran terhadap lingkungan, limbah air formasi tersebut kemudian dialirkan kembali ke dalam tanah melalui sumur-sumur yang sudah tidak produktif. Sumur-sumur tersebut umumnya disebut sebagai sumur injeksi atau *water well injection system*. Berikut adalah alur proses sistem pembuangan air formasi menuju sumur injeksi pada industri minyak dan gas.



Gambar 1.1. Skema proses produksi minyak dan gas<sup>(1)</sup>

Permasalahan yang terjadi pada jalur pipa yang digunakan dalam sistem sumur injeksi secara umum memiliki kesamaan dengan jalur pipa sumur produksi yaitu korosi. Interaksi yang dihasilkan antara material dengan lingkungannya secara terus menerus dapat menyebabkan terjadinya penurunan nilai baik secara perlahan maupun signifikan bergantung pada kondisi lingkungan dan material yang terlibat. Hasil perusakan dari reaksi kimia antara logam atau paduan logam dengan lingkungannya inilah yang disebut sebagai fenomena korosi. Salah satu bentuk korosi yang umum terjadi pada jalur pipa sistem injeksi adalah korosi mikrobiologi atau *Microbiology Influenced Corrosion*. Hal ini disebabkan oleh jalur pipa sistem injeksi yang sarat dengan air dimana air adalah media transport utama bagi mikrobiologi maupun nutrien yang berfungsi sebagai penyokong hidup mikrobiologi tersebut.

Mikrobiologi atau organisme biologis telah sekian lama diketahui sebagai salah satu kontributor terhadap korosi, meskipun pengakuan secara luas mengenai hal tersebut masih dipelajari sampai saat ini.<sup>(2)</sup> Penelitian ini dilakukan untuk mempelajari dan mengamati fenomena korosi yang disebabkan oleh mikrobiologi dalam hal ini bakteri melalui pendekatan terhadap *corrosion coupon* yang telah

diekspos dalam jangka waktu tertentu di dalam lingkungan air formasi yang berasal dari sebuah perusahaan gas dan minyak di Indonesia.

## **1.2. TUJUAN PENELITIAN**

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui laju korosi baja karbon API 5L *Grade B* terhadap perubahan waktu pencelupan pada lingkungan air formasi serta mengetahui produk korosi dan morfologi kerusakan yang dihasilkan oleh interaksi dari baja karbon dengan lingkungan air formasi tersebut.

## **1.3. RUANG LINGKUP PENELITIAN**

Ruang lingkup dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Material yang digunakan sebagai spesimen dalam penelitian ini adalah baja karbon rendah API 5L *Grade B* mengikuti material baja karbon yang umum digunakan sebagai pipa penyalur di dalam industri minyak dan gas.
2. Penelitian mengacu pada standar ASTM G31-72(2004) dan dikondisikan dalam skala laboratorium sehingga pengaruh tekanan dan temperatur seperti yang terjadi pada jalur pipa sebenarnya diabaikan.
3. Tidak ada penambahan nutrisi bagi bakteri selama pengujian celup berlangsung.
4. Pembahasan mengenai korosi yang terjadi pada hasil penelitian terbatas pada korosi mikrobiologi yang disebabkan oleh bakteri.
5. Lingkungan yang digunakan sebagai media ekspos spesimen adalah air formasi yang berasal dari sistem sumur injeksi salah satu perusahaan gas dan minyak di Indonesia.
6. Lamanya pengujian adalah 3, 6, 9, 12, dan 15 hari.
7. Perhitungan laju korosi menggunakan metode kehilangan berat atau *weight loss*.

## **1.4. SISTEMATIKA PENULISAN**

Hasil penelitian disusun secara sistematis dalam bentuk bab-bab yang saling berkaitan satu sama lain, sebagai berikut:



**BAB I PENDAHULUAN**

Menjelaskan tentang aspek penulisan antara lain latar belakang, maksud dan tujuan, batasan masalah, tempat dan waktu, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan laporan.

**BAB II TEORI PENUNJANG**

Merupakan penjelasan mengenai dasar teori yang berkaitan dengan korosi, korosi mikrobiologi, dan klasifikasi bakteri penyebab korosi beserta mekanisme dan peranannya dalam mempengaruhi korosifitas lingkungan.

**BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Membahas mengenai diagram alir penelitian, prosedur penelitian, dan pengujian yang dilakukan terhadap sampel.

**BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN**

Memberikan pembahasan mengenai pengolahan data yang didapat dari hasil pengujian yang telah dilakukan, baik berupa angka, gambar, maupun grafik dan kemudian memberikan analisa dari hasil pengujian tersebut dan membandingkannya dengan teori serta hasil penelitian lain sebelumnya.

**BAB V KESIMPULAN**

Menjabarkan kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan.

## **BAB II**

### **TEORI PENUNJANG**

#### **2.1. KOROSI**

Korosi merupakan hasil perusakan dari reaksi kimia antara logam atau paduan logam dengan lingkungannya.<sup>(3)</sup> Interaksi antara material dengan lingkungannya secara terus menerus dapat menyebabkan terjadinya penurunan nilai material baik secara perlahan maupun signifikan bergantung dari kondisi lingkungan dan material yang terlibat. Keberadaan korosi yang didefinisikan sebagai fenomena tidak pernah tidur merupakan sebuah kegiatan perusakan material yang memberikan kontribusi nyata degradasi material dalam segala aspek kegiatan di muka bumi ini.

Industri minyak dan gas alam merupakan salah satu yang berkaitan erat dengan fenomena korosi. Baja karbon sebagai material yang paling umum digunakan sebagai pipa-pipa penyalur produksi yang dialiri beragam fluida dengan tingkat korosifitas tertentu memberikan kondisi lingkungan yang disukai oleh korosi. Penanganan terhadap korosi yang tidak dilakukan dengan baik akan memberikan kerugian yang dapat mencapai angka yang tinggi. Berikut adalah beberapa contoh kerugian yang dapat dialami apabila fenomena korosi sudah memegang peranan dalam proses produksi:<sup>(4)</sup>

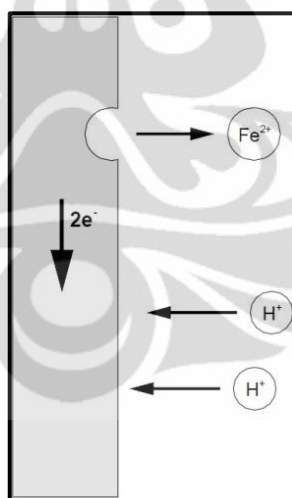
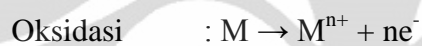
1. Pemberhentian produksi, dikarenakan oleh proses perbaikan material yang tidak dapat beroperasi.
2. Kehilangan produk, dimana produk yang bocor atau tumpah juga dapat memberikan efek bahaya pada lingkungan yang terkontaminasi serta mengurangi nilai keamanan bagi ekosistem yang ada di dalamnya.
3. Berkurangnya efisiensi, apabila akumulasi produk korosi mengganggu sistem kerja instrumen sehingga tidak memberikan performa yang optimal.
4. Kontaminasi, terjadi apabila produk korosi bereaksi dengan fluida yang mengalir di dalamnya khususnya untuk air minum yang akan dikonsumsi.

5. Keselamatan, kegagalan selama proses produksi dapat mengurangi tingkat keselamatan populasi yang berada di sekitar area produksi.

Mekanisme terjadinya korosi membutuhkan beberapa komponen utama sebagai syarat terjadinya korosi yang antara lain adalah:

1. Anoda, sebagai tempat terjadinya reaksi oksidasi
2. Katoda, sebagai tempat terjadinya reaksi reduksi
3. Elektrolit, sebagai penghantar arus listrik
4. Hubungan arus listrik antara anoda dengan katoda

Mekanisme korosi melibatkan reaksi elektrokimia yang terjadi antara anoda dengan katoda. Reaksi tersebut berupa transfer elektron yang melibatkan pelepasan elektron (oksidasi) dan penerimaan elektron (reduksi) seperti dalam contoh reaksi sederhana berikut:

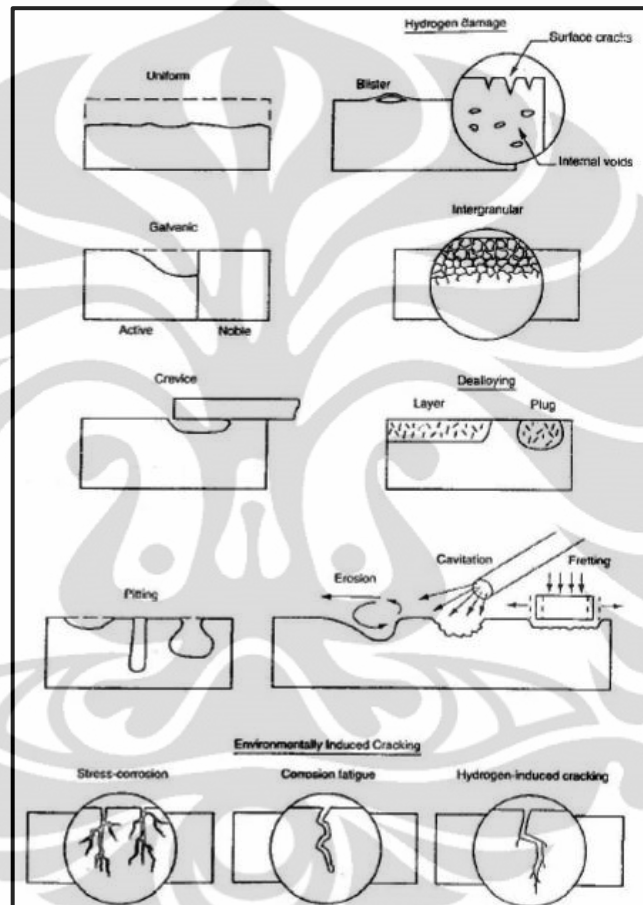


Gambar 2.1. Model sederhana reaksi elektrokimia dalam proses korosi <sup>(5)</sup>

Korosi secara umum terbagi menjadi beberapa bentuk berdasarkan mekanisme terjadinya yang antara lain adalah:

1. Korosi seragam
2. Korosi galvanik
3. Korosi celah

4. Korosi sumuran
5. *Environmentally induced corrosion*
6. Kerusakan akibat hidrogen
7. Korosi batas butir
8. Korosi erosi



Gambar 2.2. Berbagai bentuk korosi<sup>(3)</sup>

Korosi seragam merupakan bentuk korosi yang paling umum terjadi pada material logam namun bentuk korosi terlokalisasi merupakan jenis korosi yang tersembunyi, lebih membahayakan, dan lebih sulit untuk diprediksi dan dikendalikan.<sup>(6)</sup> Korosi terlokalisasi mungkin tidak mengonsumsi banyak material logam seperti pada korosi seragam namun kegagalan yang terjadi akibat korosi terlokalisasi akan terjadi lebih cepat dan seringkali terjadi sebelum sempat dilakukannya kegiatan pemantauan dan penanganan terhadap material yang terkorosi.

## 2.2. KOROSI MIKROBIOLOGI

Korosi Mikrobiologi atau umum disebut sebagai *Microbiology influenced corrosion* (MIC) dapat didefinisikan sebagai degradasi material yang disebabkan oleh adanya produk yang dihasilkan dari aktivitas metabolisme yang dilakukan oleh mikroorganisme. Korosi yang berhubungan dengan mikroorganisme telah diketahui lebih dari lima puluh tahun yang lalu namun studi tentang korosi mikrobiologi sendiri masih merupakan pengetahuan baru bagi dunia keilmuan.<sup>(7)</sup> Kehadiran korosi mikrobiologi ditandai dengan adanya ciri khas deposit berupa *tubercle* berwarna coklat kemerahan (*reddish brown*) dimana apabila deposit tersebut pecah maka di dalamnya akan ditemukan semacam lendir (*slime*) dengan deposit hitam berupa besi sulfida dan karakteristik berupa bau telur busuk yang menandakan adanya konsentrasi gas H<sub>2</sub>S.<sup>(8)</sup>

Korosi yang diakibatkan oleh keberadaan bakteri bukanlah sebuah jenis korosi yang baru, melainkan perpaduan antara berbagai bentuk korosi yang telah umum terjadi namun disebabkan oleh adanya aktivitas metabolisme bakteri.<sup>(9)</sup> Apabila bakteri telah membentuk sebuah koloni di permukaan logam atau substrat, maka bentuk korosi yang dapat terjadi antara lain adalah korosi seragam, korosi sumuran, korosi galvanik, korosi celah, *stress corrosion cracking* dan korosi erosi. Untuk dapat menyebabkan sebuah proses bio-korosi, bakteri bekerja secara simultan membentuk kondisi dimana reaksi korosi dapat terjadi.

## 2.3. BAKTERI PENYEBAB KOROSI

Organisme biologis telah sekian lama diketahui sebagai salah satu kontributor terhadap korosi, meskipun pengakuan secara luas mengenai hal tersebut masih dipelajari sampai saat ini. Mikrobiologi sendiri adalah cabang ilmu yang mempelajari bentuk kehidupan secara mikroskopik atau yang lebih dikenal sebagai mikroorganisme. Dikaitkan dengan fenomena korosi, mikroorganisme yang dapat menyebabkan degradasi terhadap material logam terbagi menjadi beberapa jenis antara lain adalah:<sup>(10)</sup>

1. Bakteri, organisme mikroskopik uniselular yang secara umum memiliki kemampuan melipatgandakan diri setiap 20 menit atau kurang dalam kondisi optimal.

2. Jamur, makhluk hidup heterotrof yang mencerna makanan secara eksternal dan menyerap molekul nutrisi ke dalam sel tubuh.
3. Algae, tumbuhan sederhana yang mengandung klorofil dan membutuhkan sinar matahari untuk tumbuh.
4. Protozoa, hewan bersel tunggal.

Mikroorganisme tersebut diatas memegang sebuah peranan terhadap terbentuknya korosi secara kimiawi melalui kegiatan metabolisme yang dapat menciptakan degradasi terhadap logam dan paduannya dengan cara membuat lingkungan menjadi korosif, membentuk deposit, dan membentuk lapisan berupa *slime*. Pembahasan berikutnya mengenai korosi mikrobiologi dibatasi hanya pada mekanisme korosi yang disebabkan oleh bakteri.

Bakteri merupakan mikroorganisme yang memiliki ukuran tubuh dengan rentang panjang  $<0,1 \mu\text{m}$  hingga  $5\mu\text{m}$ . Dengan ukuran tubuh yang sedemikian kecilnya maka dengan mudahnya bakteri akan melakukan penetrasi ke dalam material logam dan membentuk koloni yang terus tumbuh menjadi sebuah proporsi makroskopik.<sup>(11)</sup> Bakteri memiliki kemampuan untuk bergerak secara bebas. Bermigrasi menuju kondisi yang lebih disukai yang memiliki sumber makanan bagi kelangsungan perkembangbiakannya dan menjauhi kondisi yang tidak disukai yaitu yang bersifat toksik bagi kelangsungan hidupnya. Perkembangbiakan bakteri dapat berlangsung secara optimal apabila kondisi lingkungan memenuhi kriteria yang dapat mengontrol pertumbuhan bakteri. Beberapa parameter yang terlibat dalam keberlangsungan hidup bakteri antara lain adalah:<sup>(12)</sup>

1. Nutrien, merupakan sumber makanan utama bagi bakteri berupa sumber karbon, fosfor, nitrogen, dan sulfur.
2. Air, semua bakteri membutuhkan air sebagai media transport, pertumbuhan dan metabolisme. Air juga berfungsi sebagai pengangkut nutrien organik yang merupakan sumber makanan utama.
3. Temperatur, rentang optimum bagi bakteri yang terlibat dalam fenomena korosi untuk berkembang biak berkisar antara  $15 - 45^{\circ}\text{C}$  meskipun pada temperatur  $-10 - 99^{\circ}\text{C}$  tetap masih dapat ditemukan.

4. pH, bakteri secara umum dapat mengoptimalkan diri pada rentang pH 2 – 8 meskipun masih dapat hidup bebas pada rentang pH 0 – 10,5 dan perkembangbiakannya semakin lambat ketika mencapai pH 11 dan menjadi lumpuh seutuhnya pada pH 12,5.
5. Laju alir, laju alir yang tinggi tidak menjamin bakteri untuk tidak membentuk koloni pada sistem, namun pada kondisi stagnan meskipun hanya dalam periode yang singkat umumnya dapat menimbulkan sebuah masalah baru dimana memberikan kesempatan bagi bakteri untuk dapat berkoloni.

Secara umum bakteri dapat dikategorikan berdasarkan kebutuhannya terhadap oksigen yang antara lain adalah:<sup>(13)</sup>

1. Bakteri aerob, merupakan bakteri yang membutuhkan oksigen untuk menjaga kelangsungan hidupnya baik dalam berkembang biak maupun melakukan metabolisme.
2. Bakteri anaerob, merupakan bakteri yang menganggap oksigen adalah toksik bagi keberlangsungan hidupnya.
3. Bakteri fakultatif anaerob, bakteri yang membutuhkan oksigen namun dengan mudahnya dapat merubah sistem metabolisme tubuhnya menjadi anaerob apabila keberadaan oksigen dalam lingkungan tidak mencukupi.

Selain kebutuhan terhadap oksigen, bakteri juga dapat diklasifikasikan berdasarkan mobilitas pada lingkungannya. Klasifikasi terbagi menjadi dua yaitu:

1. *Planktonic bacteria*, yang dapat bergerak / berenang bebas pada fluida baik air maupun minyak.
2. *Sessile bacteria*, yang mengendap pada permukaan logam dengan membentuk lapisan (biofilm) sebagai tempat untuk melanjutkan proses perkembangbiakan.

Selama 200 tahun pertama cabang ilmu mikrobiologi, organisme yang dipelajari hanya terbatas pada organisme dalam bentuk *planktonic*. Namun di akhir tahun 1970an, perkembangan mikroskop mutakhir membuat para mikrobiologis dikejutkan dengan fakta bahwa biofilm dimana bakteri yang

menempatnya adalah *sessile bacteria*, diketahui sebagai media yang dominan sebagai tempat pertumbuhan bakteri di hampir seluruh sistem akuatik.<sup>(2)</sup> Sampai saat ini, penelitian mengenai jenis bakteri yang terlibat dalam fenomena korosi masih terus dipelajari. Berikut adalah beberapa spesies bakteri yang telah diidentifikasi sebagai mikroorganisme yang berperan dalam korosi.

Tabel 2.1. Jenis bakteri yang berperan dalam korosi mikrobiologi<sup>(2)</sup>

Genus or species	pH range	Temperature range °C	Oxygen requirement	Metals affected	Action
Bacteria					
<i>Desulfovibrio</i> Best known: <i>D. desulfuricans</i>	4-8	10-40	Anaerobic	Iron and steel, stainless steels, aluminum, zinc, copper alloys	Utilize hydrogen in reducing $\text{SO}_4^{2-}$ to $\text{S}^0$ and $\text{H}_2\text{S}$ ; promote formation of sulfide films
<i>Desulfotomaculum</i> Best known: <i>D. nigrificans</i> (also known as <i>Clostridium</i> )	6-8	10-40 (some 45-75)	Anaerobic	Iron and steel, stainless steels	Reduce $\text{SO}_4^{2-}$ to $\text{S}^0$ and $\text{H}_2\text{S}$ . (spore formers)
<i>Desulfomonas</i>	...	10-40	Anaerobic	Iron and steel	Reduce $\text{SO}_4^{2-}$ to $\text{S}_2$ and $\text{H}_2\text{S}$
<i>Thiobacillus thiooxidans</i>	0.5-8	10-40	Aerobic	Iron and steel, copper alloys, concrete	Oxidizes sulfur and sulfides to form $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; damages protective coatings
<i>Thiobacillus ferrooxidans</i>	1-7	10-40	Aerobic	Iron and steel	Oxidizes ferrous ( $\text{Fe}^{2+}$ ) to ferric ( $\text{Fe}^{3+}$ )
<i>Gallionella</i>	7-10	20-40	Aerobic	Iron and steel, stainless steels	Oxidizes ferrous (and manganous) to ferric (and manganic); promotes tubercule formation
<i>Sphaerotilus</i>	7-10	20-40	Aerobic	Iron and steel, stainless steels	Oxidizes ferrous (and manganous) to ferric (and manganic); promotes tubercule formation
<i>S. natans</i>	...	...	...	Aluminum alloys	
<i>Pseudomonas</i>	4-9	20-40	Aerobic	Iron and steel, stainless steels	Some strains can reduce $\text{Fe}^{3+}$ to $\text{Fe}^{2+}$
<i>P. aeruginosa</i>	4-8	20-40	Aerobic	Aluminum alloys	

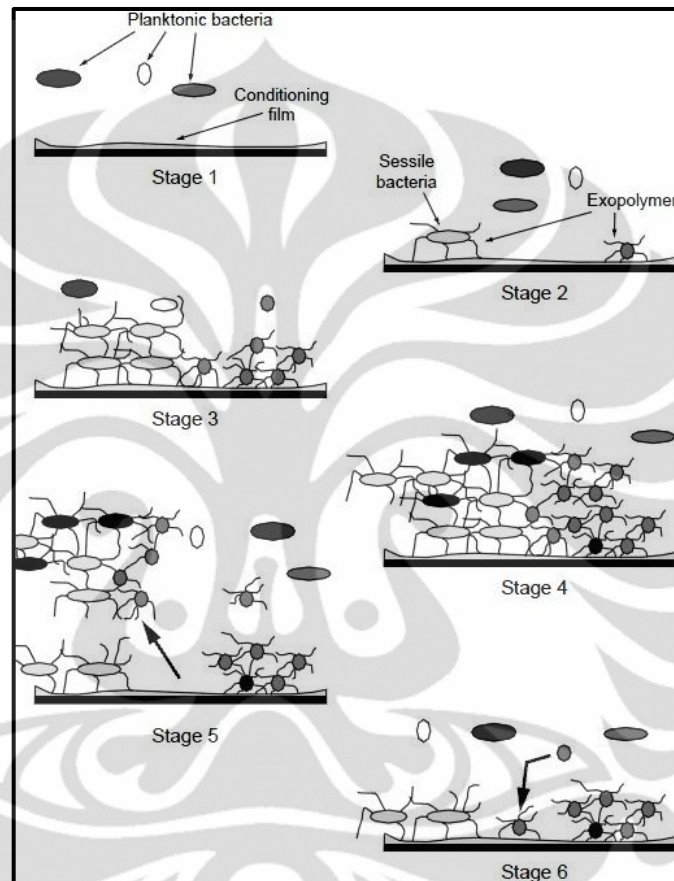


#### 2.4. PEMBENTUKAN BIOFILM

Mekanisme serangan korosi akibat bakteri diawali dengan adanya pembentukan biofilm pada permukaan logam yang merupakan media inisiasi bagi bakteri untuk berkoloni dan juga sebagai inisiator terjadinya korosi karena adanya diferensial aerasi (perbedaan kandungan oksigen) di bagian atas dan bawah permukaan biofilm. Biofilm merupakan sebuah lapisan biologis yang merupakan campuran berbentuk gel dan terdiri dari sel mikrobiologi beserta hasil ekskresinya berupa (eksopolisakarida) dan juga air. Mikroorganisme sendiri membentuk 5 - 25% volume matriks biofilm sementara 75 - 95% sisanya terdiri dari 95 - 99% air. Tidak seperti *scale*, biofilm merupakan lapisan dengan tekstur *spongy* yang dapat memperluas areanya pada permukaan logam apabila berinteraksi dengan aliran fluida. Keberadaan biofilm menjadi sangat stabil ketika fluida berada pada kondisi ambien sehingga apabila terjadi perubahan terhadap pH dan temperatur maka stabilisasi biofilm akan menurun.<sup>(11)</sup>

Pembentukan biofilm sendiri terdiri dari beberapa tahapan yang melibatkan peran kedua jenis bakteri baik *planktonic bacteria* maupun *sessile bacteria*. *Planktonic bacteria* yang bergerak bebas di dalam fluida tidak begitu saja menempel pada permukaan logam, namun menempel pada sebuah lapisan tipis yang terdiri dari partikel organik yang terserap oleh permukaan logam yang disebut sebagai *conditioning film* dan memulai keberadaannya sebagai *sessile bacteria* dengan mengekskresikan eksopolimer berbentuk semacam lendir (*slime*) yang adesif terhadap permukaan logam. Bakteri yang menempel tersebut kemudian melakukan replikasi diri dan membentuk biofilm yang dapat mengkapsulasi diri dari lingkungan sekitar. Ketika bakteri melanjutkan proses replikasi diri dan menghasilkan lebih banyak material eksopolimer, biofilm menjadi semakin tebal dan merubah kondisi di dalamnya. Bagian biofilm yang semakin tebal kemudian sedikit demi sedikit mulai lepas dari matriksnya mencari permukaan stabil lain untuk berkolonisasi. Sementara bagian yang ditinggalkan tersebut akan di kolonisasi kembali oleh *planktonic bacteria* atau *sessile bacteria* yang berdekatan dari daerah tersebut dan memulai pembentukan koloni baru seperti tahap awal secara berulang. Perubahan kondisi di bagian bawah biofilm yang terhalangi menyebabkan sulitnya nutrisi untuk masuk menyebabkan bakteri

memiliki tendensi untuk menyerap nutrisi dari material yang ditemelinya. Hal ini merupakan alur proses terjadinya fenomena korosi mikrobiologi pada sistem. Mekanisme proses pembentukan biofilm dapat divisualisasikan melalui gambar berikut.

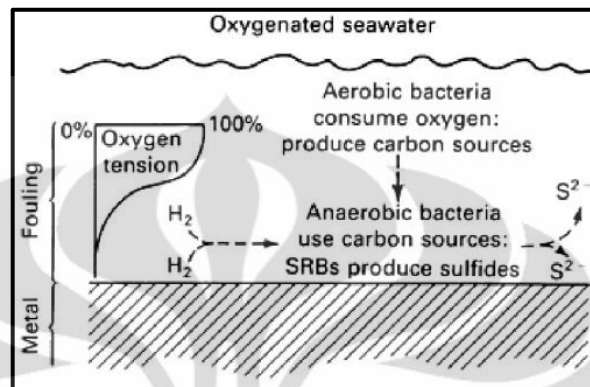


Gambar 2.3. Mekanisme pembentukan biofilm<sup>(2)</sup>

Ketika biofilm mulai terbentuk, bakteri yang berkoloni tersebut melakukan metabolisme dan mengekskresikan polimer ekstraselular yang disebut sebagai *slime* sebagai sebuah produk mutakhir yang dihasilkan oleh bakteri. Terdiri dari lapisan yang rekat pada permukaan logam, *slime* memiliki peran dalam keberlangsungan hidup bakteri yang antara lain adalah:

1. Menjaga bakteri untuk tetap lekat pada permukaan logam.
2. Menangkap partikulat bebas dalam fluida yang dapat berfungsi sebagai nutrisi.

- Menciptakan kondisi lingkungan ideal bagi bakteri anaerob dengan menghalangi masuknya oksigen seperti yang digambarkan oleh ilustrasi berikut.

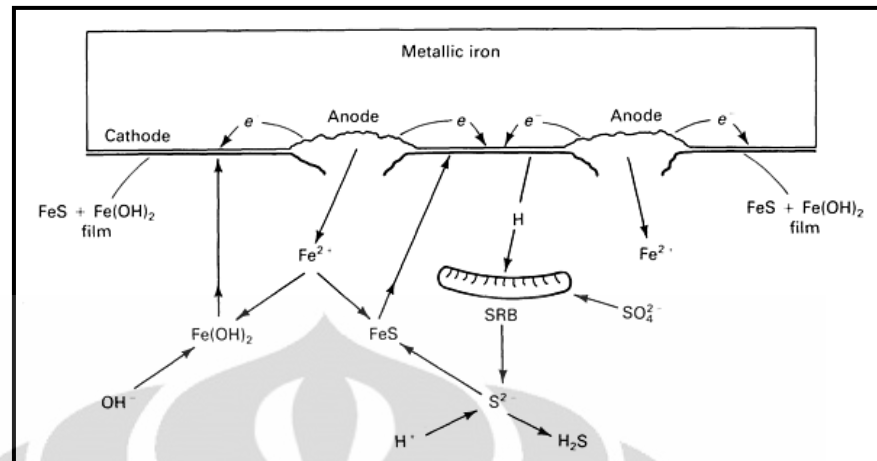


Gambar 2.4. Mekanisme korosi oleh bakteri aerob dan anaerob<sup>(5)</sup>

## 2.5. MEKANISME SERANGAN KOROSI MIKROBIOLOGI

Korosi pada sebuah sistem dapat terjadi apabila terjadi interaksi antar bakteri dalam struktur biofilm dimana korosi yang terjadi dapat diklasifikasikan menjadi:

- Primary corrosion*, dimana bakteri berperan langsung dalam proses korosi mikrobiologi. Bakteri jenis ini umumnya bersifat anaerob dan cenderung menghasilkan bentuk korosi terlokalisasi. Salah satu bakteri yang memiliki peran penting dalam korosi mikrobiologi jenis ini adalah bakteri pereduksi sulfat atau umum disebut sebagai *sulfate reducing bacteria* (SRB). Berikut adalah skematik korosi mikrobiologi yang disebabkan oleh adanya kontribusi bakteri pereduksi sulfat.



Gambar 2.5. Skematik korosi yang disebabkan oleh bakteri<sup>(11)</sup>

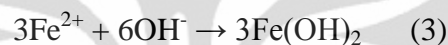
2. *Secondary corrosion*, dimana bakteri menghasilkan kondisi lingkungan yang membuat bakteri yang berperan langsung dalam proses korosi (*primary corrosion*) dapat tumbuh dan berkembang biak. Bakteri jenis ini umumnya bersifat aerob dan menghasilkan bentuk korosi seragam. Jenis bakteri yang menyediakan kondisi lingkungan seperti ini antara lain adalah bakteri pengoksidasi besi atau *iron oxidizing bacteria* dan bakteri penghasil *slime* atau *slime former bacteria*.

### 2.5.1. *Iron Oxidizing Bacteria*

Fenomena korosi yang disebabkan oleh bakteri pengoksidasi besi merupakan bakteri inisiator dalam alur proses korosi mikrobiologi karena bakteri tersebut yang berperan langsung terhadap proses korosi secara seragam dan juga berasosiasi dengan bakteri lain untuk menciptakan kondisi bagi bakteri anaerob. Kolonisasi bakteri dalam lapisan biofilm memulai fenomena korosi melalui keberadaan aktifitas dari bakteri pengoksidasi besi yang menghasilkan korosi seragam.

Dalam sebuah kondisi dengan laju alir fluida yang laminar, asosiasi antara deposit dalam bentuk *slime* bersamaan dengan bakteri pengoksidasi besi akan membentuk korosi secara seragam dan ditandai dengan adanya struktur seperti gunung berapi yang disebut sebagai *tubercle* dengan warna coklat kemerahan. Hal ini menciptakan perbedaan konsentrasi oksigen sehingga dapat menghasilkan reaksi Fe menjadi  $\text{Fe}^{2+}$  di bawah deposit yang dihasilkan oleh bakteri

pengoksidasi besi yang dapat mempercepat laju pembentukan *tubercle* dan menghasilkan permukaan logam di luar *tubercle* menjadi katodik dan permukaan di dalamnya menjadi anodik. Deposit ini merupakan cikal bakal terbentuknya lapisan biofilm. Reaksi katodik yang terjadi adalah reduksi oksigen terlarut membentuk  $\text{OH}^-$ . Reaksi anodik katodik ini menghasilkan korosi seragam dengan produk korosi berupa  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ . Reaksi yang terjadi untuk menghasilkan korosi seragam yang diakibatkan oleh bakteri pengoksidasi besi antara lain adalah:

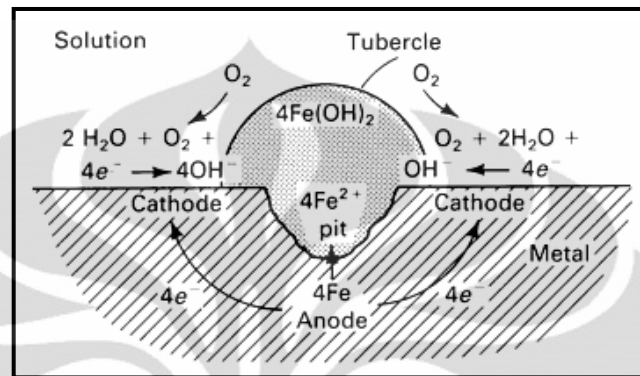


Produk korosi yang dihasilkan dari reaksi tersebut kemudian berinteraksi dengan biofilm membentuk apa yang disebut dengan *tubercle* yang memberikan kontribusi tersendiri bagi aliran fluida di dalam sistem jalur pipa.<sup>(2)</sup>

### 2.5.2. *Sulfate Reducing Bacteria*

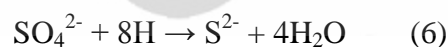
Bakteri pereduksi sulfat memegang peranan penting dalam fenomena korosi bakteri dikarenakan oleh perannya terhadap proses korosi terlokalisasi dimana telah dituliskan sebelumnya bahwa korosi yang terlokalisasi lebih sulit untuk di monitor dan dicegah sehingga dapat menyebabkan kegagalan tiba-tiba yang tidak diketahui sebelumnya. Peran bakteri pereduksi sulfat merupakan peristiwa berkelanjutan dari kondisi yang telah diciptakan oleh bakteri pengoksidasi besi. Mekanisme yang dihasilkan oleh bakteri pereduksi sulfat dalam korosi mikrobiologi melibatkan penghilangan atom hidrogen dari permukaan logam oleh bakteri tersebut menggunakan enzim yang disebut sebagai enzim hidrogenase. Hidrogen yang hilang tersebut kemudian digunakan oleh bakteri untuk mereduksi sulfat menjadi sulfid. Ketika *tubercle* mencapai titik stabilnya, beberapa biomassa mulai berdekomposisi menghasilkan sumber nutrisi yang digunakan bakteri pereduksi sulfat untuk menghasilkan  $\text{H}_2\text{S}$  dalam lingkungan anaerob. Dalam beberapa kasus bakteri pengoksidasi sulfat dapat menghasilkan pembentukan sulfat. Apabila dilanjutkan dari reaksi yang

dihasilkan oleh bakteri pengoksidasi besi, maka akan terbentuk produk korosi berupa FeS. Apabila terdapat sumber klorida dan bakteri pengoksidasi besi pada sistem, maka akan terbentuk kondisi asam di dalam *tubercle* menyebabkan terbentuknya *pitting* di bawah permukaan logam.



Gambar 2.6. Skematik pembentukan inisiasi *pit* oleh keberadaan bakteri pereduksi sulfat<sup>(2)</sup>

Tanpa adanya bakteri pereduksi sulfat, mekanisme korosi akan berhenti sampai reaksi (3) ketika permukaan ditutupi oleh hidrogen. Namun dengan adanya bakteri pereduksi sulfat maka akan terjadi fenomena depolarisasi katodik dimana terjadi reaksi perubahan sulfat menjadi sulfid yang menyebabkan peristiwa korosi berlanjut dengan reaksi berikut:



Tanpa adanya keterlibatan bakteri pereduksi sulfat, mekanisme terjadinya korosi akan berhenti pada reaksi (5) namun bakteri pereduksi sulfat mengakibatkan terjadinya depolarisasi katodik dan menyebabkan proses korosi terus berlanjut. Sampai saat ini mekanisme tersebut tidak dapat merepresentasikan keseluruhan proses. Diketahui bahwa lapisan besi sulfid (FeS) menghasilkan lapisan yang protektif terhadap korosi namun harus memiliki kontinuitas pada

seluruh permukaan. Sebaliknya apabila lapisan FeS tersebut tidak melapisi seutuhnya maka akan menginisiasi terbentuknya korosi galvanik dalam sistem. Selain itu juga dapat terbentuk substansi korosif yang lain seperti gas H<sub>2</sub>S.<sup>(2)</sup>

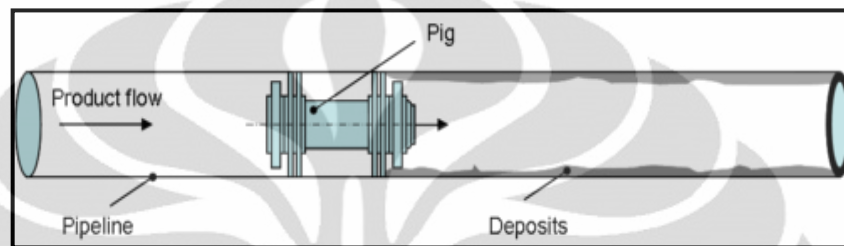
## 2.6. PENANGANAN KOROSI MIKROBIOLOGI

Dunia korosi yang menggunakan teknik dan metode secanggih dan sebaik apapun dalam mengenali, mempelajari, dan mendeteksi keberadaannya menjadi kurang akan nilai apabila permasalahan yang terdapat di dalamnya tidak dapat ditangani. Penanganan terhadap korosi dapat dilakukan dalam dua metode yaitu mengurangi permasalahan yang telah terjadi atau mencegah terjadinya permasalahan dari awal. Dalam dunia industri pilihan pertama menjadi yang lebih umum untuk digunakan. Korosi mikrobiologi sendiri dapat ditangani dengan empat jenis metode yang antara lain adalah metode fisika-mekanik seperti penggunaan sinar ultraviolet dan *pigging*, metode kimiawi seperti pemberian biosida, metode elektrokimia dengan proteksi katodik dan *coating*, dan metode secara biologis baik yang saat ini sudah digunakan maupun yang masih dalam penelitian.<sup>(14)</sup>

### 2.6.1. Metode Fisika Mekanik

Korosi mikrobiologi dapat digunakan dengan metode fisika mekanik dengan mengaplikasikan *pig* ke dalam jalur pipa dimana prosesnya disebut dengan *pigging*, mengaplikasikan sinar ultraviolet, dan juga dapat dilakukan dengan metode ultrasonik. *Pig* merupakan salah satu instrumen inspeksi dalam jalur pipa yang memberikan dua keuntungan sekaligus yaitu pembersihan dan penginspeksian bagian dalam pipa. *Pigging* dapat membantu menghilangkan kotoran, produk korosi, dan tentunya *tubercle* yang dihasilkan oleh bakteri yang menempel pada permukaan internal pipa. Dengan melakukan pembersihan ini, maka akan terjadi pengurangan turbulensi dalam pipa yang disebabkan oleh material pengotor yang dapat menghalangi pergerakan fluida yang mengalir. Hal ini memberikan dampak efisiensi aliran fluida di dalam pipa menjadi bertambah. Selain itu *pig* yang diaplikasikan ke dalam pipa akan menghasilkan informasi berupa data inspeksi pipa yang didapat selama *pig* berada dalam pipa. Namun

demikian *pigging* memiliki kebutuhan tersendiri untuk dapat diaplikasikan dalam sebuah jalur pipa. Jalur pipa yang akan dilakukan *pigging* harus memiliki *pig launcher* yang berfungsi sebagai jalur masuk *pig* ke dalam saluran pipa tersebut sehingga dibutuhkan desain khusus agar *launcher* tersebut sesuai untuk *pig* yang akan digunakan namun tetap tidak mengganggu jalur pipa yang sudah ada sebelumnya.



Gambar 2.6. Skematik metode *pigging*<sup>(15)</sup>

Teknik lain yang digunakan dalam metode fisika mekanis adalah dengan memberikan radiasi sinar ultraviolet dan mengaplikasikan gelombang ultrasonik. Radiasi sinar ultraviolet terhadap bakteri tidak difungsikan untuk mematikan bakteri yang berperan dalam korosi mikrobiologi melainkan untuk mereduksi reproduksi bakteri tersebut hingga 99.9999%. Namun demikian radiasi sinar ultraviolet memiliki penetrasi yang kurang baik sehingga sinar ultraviolet cenderung hanya efektif mengurangi reproduksi *planktonic bacteria* namun tidak efektif untuk *sessile bacteria*.

Mekanisme penggunaan gelombang ultrasonik diawali dengan terbentuknya gelembung kavitasi pada fluida yang diperoleh dari tekanan gelombang akustik yang dihasilkan. Gelembung tersebut kemudian pecah dan dapat merusak sel-sel mikroorganisme yang terdapat di dalam pipa. Teknik ini diketahui memiliki efisiensi yang cukup tinggi untuk menghancurkan biofilm yang masih lunak dan tipis karena kemampuan dari teknik bergantung pada energi dari banyaknya gelembung yang dihasilkan.

### 2.6.2. Metode Kimia

Penggunaan biosida merupakan teknik yang digunakan dalam metode kimia. Biosida sendiri merupakan senjata mematikan bagi mikroorganisme yang



terbagi menjadi dua kategori yaitu biosida pengoksidasi dan biosida non-pengoksidasi. Biosida pengoksidasi melakukan penetrasi dan menghancurkan sel-sel bakteri sementara biosida non-pengoksidasi melakukan penetrasi pada biofilm dan merusak mekanisme yang digunakan oleh bakteri untuk menghasilkan energi yang dibutuhkan. Berikut adalah tabel yang merangkum jenis-jenis biosida yang umum digunakan dalam dunia industri.



Tabel 2.2. Berbagai jenis biosida dalam dunia industri<sup>(2)</sup>

Microbiocide	Effectiveness <sup>(a)</sup>			Comments
	Bacteria	Fungi	Algae	
Chlorine	E	S	E	Oxidizing; reacts with -NH <sub>2</sub> groups; effective at neutral pH; loses effectiveness at high pH. Use concentration: 0.1–0.2 mg/L continuous free residual; 0.5–1.0 mg/L intermittent free residual
Chlorine dioxide	E	G	G	Oxidizing; pH insensitive; can be used in presence of -NH <sub>2</sub> groups. Use concentration: 0.1–1 mg/L. Intermittent free residual
Bromine	E	S	E	Oxidizing; substitute for Cl <sub>2</sub> and ClO <sub>2</sub> ; effective over broad pH range. Use concentration: 0.05–0.1 mg/L continuous free residual; 0.2 to 0.4 mg/L intermittent free residual
Organo-bromide (DBNPA)	E	NA	S	Nonoxidizing; pH range 6–8.5. Use concentration: 0.5–24 mg/L. Intermittent feed
Methylene bithiocyanate	E	S	S	Nonoxidizing; hydrolyzes above pH 8. Use concentration: 1.5–8 mg/L. Intermittent feed
Isothiazollinone	E	G	E	Nonoxidizing; pH insensitive; deactivated by HS <sup>-</sup> and -NH <sub>2</sub> groups. Use concentration: 0.9–13 mg/L. Intermittent feed
Quaternary ammonium salts	E	G	E	Nonoxidizing; tendency to foam; surface active; ineffective in highly oil- or organic-fouled systems. Use concentration: 8–35 mg/L. Intermittent feed
Organo-trin/ quaternary ammonium salts	E	G	E	Nonoxidizing; tendency to foam; functions best in alkaline pH. Use concentration: 7–50 mg/L
Glutaraldehyde	E	E	E	Nonoxidizing; deactivated by -NH <sub>2</sub> groups; effective over broad pH range. Use concentration: 10–75 mg/L. Intermittent feed

<sup>(a)</sup>E. excellent; G. good; S. slight; NA. not applicable

Penggunaan biosida secara terus menerus dapat mengakibatkan resistensi bakteri yang menyebabkan turunnya efektifitas penggunaan biosida. Resistensi yang terjadi pada bakteri terhadap biosida pengoksidasi jauh lebih menonjol

dibandingkan dengan biosida non-pengoksidasi. Untuk mengurangi resistensi bakteri dapat dilakukan kombinasi kedua jenis biosida sehingga menghasilkan mekanisme ganda yang dihasilkan oleh kedua jenis biosida. Efektifitas penggunaan biosida juga dapat ditingkatkan dengan melakukan kombinasi dengan melakukan metode fisika mekanik seperti *pigging*.

#### 2.6.3. Metode Elektrokimia

Metode elektrokimia dapat dilakukan dengan teknik proteksi katodik dan memberikan coating pada pipa. Proteksi katodik dengan memberikan tegangan sebesar  $-0.95V$  untuk memberikan proteksi terhadap bakteri pereduksi sulfat. Teknik proteksi katodik diketahui sebagai teknik yang kurang efektif karena hanya dapat bekerja pada bakteri pereduksi sulfat. Ketidakefektifan juga akan semakin bertambah karena adanya kemungkinan aplikasi tegangan yang dibutuhkan tidak didapatkan secara merata di sepanjang jalur pipa.<sup>(14)</sup>

#### 2.6.4. Metode Biologis

Beberapa tahun belakangan, kemungkinan pencegahan reproduksi bakteri yang menyebabkan korosi dipelajari dengan menggunakan metode biologis yaitu dengan menggunakan bakteri lain yang berfungsi untuk menyerang bakteri pengkorosi. Tidak seperti penggunaan biosida yang dapat bersifat toksik bagi lingkungan apabila digunakan secara terus menerus, metode biologis dipercaya sebagai metode yang lebih ramah lingkungan namun penelitian mengenai metode biologis masih berlanjut sampai saat ini sehingga belum memiliki aplikasi nyata dalam dunia industri.

### 2.7. UJI KEHILANGAN BERAT

Cepat lambatnya korosi yang terjadi pada material dipengaruhi oleh laju korosi yang terjadi. Laju korosi dapat diketahui melalui beberapa metode salah satunya dengan uji kehilangan berat atau *weight loss*. Uji kehilangan berat menggunakan kupon digunakan untuk merepresentasikan laju korosi yang dihasilkan selama periode ekspos di dalam fluida. Dimensi dan ukuran kupon dapat bervariasi disesuaikan dengan persyaratan pengujian yang dilakukan.

Kupon tersebut kemudian dipersiapkan dengan melakukan pembersihan sebelum dan sesudah kupon diekspos selama periode tertentu. Setelah dilakukan pembersihan awal, maka kupon ditimbang terlebih dahulu, kemudian dilakukan pengeksposan ke dalam fluida, dan pembersihan akhir. Kupon tersebut kemudian ditimbang kembali untuk mengetahui berat yang hilang selama ekspos berlangsung. Hasil dari kehilangan berat tersebut kemudian dimasukkan ke dalam perhitungan:<sup>(16)</sup>

$$\text{Laju korosi} = \frac{K \times W}{D \times A \times T} \quad (2.1)$$

Dimana:

K = konstanta, lihat pada Tabel 2.5

W = kehilangan berat (gram)

D = density (g/cm<sup>3</sup>), misalnya baja karbon = 7,86 g/cm<sup>3</sup>

A = luas daerah (cm<sup>2</sup>)

T = waktu ekspos (jam)

Tabel 2.3. Konstanta perhitungan laju korosi berdasarkan satuannya<sup>(14)</sup>

Satuan Laju Korosi	Konstanta
Mils per year (mpy)	3,45 x 10 <sup>6</sup>
Inches per year (ipy)	3,45 x 10 <sup>3</sup>
Milimeters per year (mm/y)	8,76 x 10 <sup>4</sup>
Micrometers per year (µm/y)	8,76 x 10 <sup>7</sup>

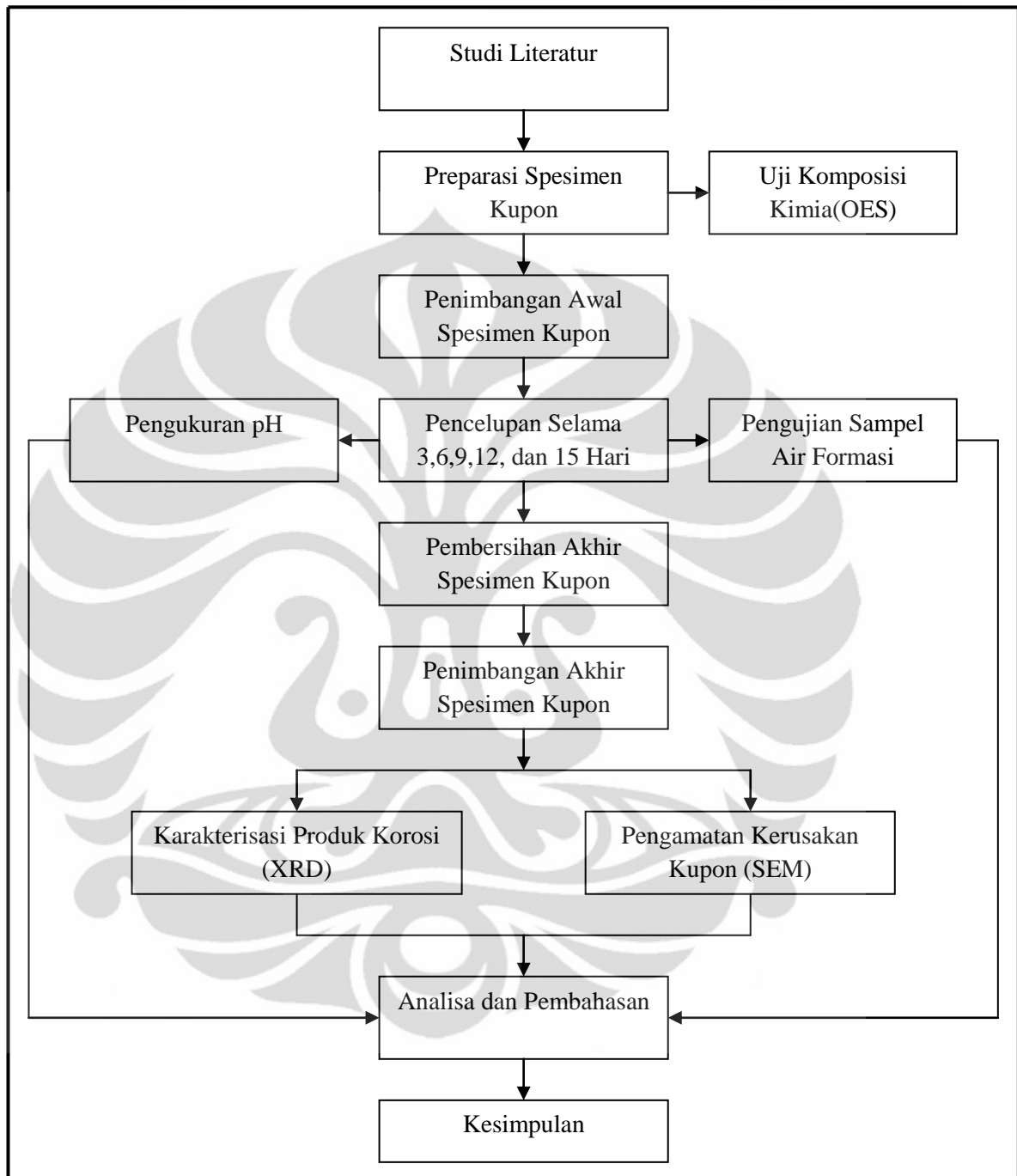
### **BAB III**

#### **METODOLOGI PENELITIAN**

Bab ini akan membahas seluruh prosedur kerja yang dilakukan selama penelitian berlangsung. Penjelasan tersebut disajikan dalam bentuk diagram alir dan penjelasan deskriptif mengenai keseluruhan tahapan kerja yang dilakukan. Penelitian yang dilakukan dalam penulisan skripsi ini menggunakan baja karbon API 5L *Grade B* seperti yang umum digunakan sebagai material pipa jalur produksi pada industri minyak dan gas. Penelitian dilakukan dengan pendekatan terhadap korosi mikrobiologi yang didapat dari lingkungan berupa fluida yang berasal dari jalur pipa sistem injeksi sebuah perusahaan minyak dan gas di Indonesia. Penelitian diawali dengan melakukan pembuatan spesimen untuk dilakukan uji celup sesuai dengan standar ASTM G31-72 tahun 2004.

Fluida yang digunakan sebagai media celup kemudian diukur pH dan diuji terhadap keberadaan bakterinya baik secara aerob maupun anaerob. Spesimen yang telah selesai dicelup dalam periode tertentu kemudian dikeringkan dan diambil produk korosinya untuk kemudian dibersihkan dan diukur laju korosinya dengan menggunakan metode uji kehilangan berat. Produk korosi yang telah diambil kemudian dianalisa dengan menggunakan XRD sementara spesimen baja yang telah bersih dan ditimbang kemudian diamati morfologi kerusakannya dengan menggunakan SEM.

### 1.1. DIAGRAM ALIR PENELITIAN



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

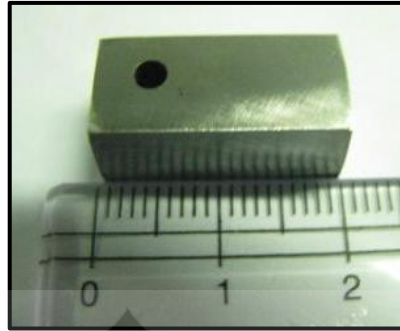
### 1.2. PROSEDUR PENELITIAN

Berikut adalah penjelasan mengenai keseluruhan tahapan kerja yang dilakukan dalam penelitian:

### 1.2.1. Preparasi Spesimen Kupon

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah pipa baja API 5L *Grade B*. Spesimen yang digunakan sebagai kupon dalam pengujian dipersiapkan dengan melakukan pemotongan hingga mencapai dimensi 20 x 10 x 10 mm. Pengujian ini menggunakan parameter waktu selama 3, 6, 9, 12, dan 15 hari sehingga membutuhkan lima buah spesimen untuk melakukan pengujian dan dipersiapkan tiga buah spesimen yang berfungsi sebagai cadangan. Sampel yang telah dipotong sesuai dengan dimensi yang ditentukan kemudian diberikan lubang pada bagian tengah atas dengan diameter 3 mm. Lubang yang diberikan pada spesimen dibuat untuk memberikan tali pengikat spesimen sehingga memudahkan proses peletakkan dan pengambilan ke dan dari wadah uji celup. Spesimen yang digunakan untuk semua pengujian dibuat dengan ukuran yang sama.

Spesimen yang telah memiliki ukuran sesuai dengan dimensi yang diinginkan serta telah dilubangi di bagian tengahnya kemudian diampas. Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan mesin amplas yang berada pada Laboratorium Metalografi Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia dengan menggunakan kertas amplas dengan ukuran 240 mesh. Pengamplasan yang diaplikasikan pada spesimen dilakukan untuk menghilangkan kotoran dan produk korosi yang menempel pada permukaan spesimen untuk mendapatkan spesimen dengan permukaan yang bersih, halus, dan rata sehingga dapat digunakan dalam pengujian celup korosi yang akan dilakukan pada tahap berikutnya. Setelah spesimen selesai diampas kemudian dicuci bersih dengan air mengalir dan dikeringkan. Proses pembersihan spesimen, dalam hal ini dengan pengamplasan, merupakan salah satu prasyarat untuk melakukan uji celup korosi untuk mendapatkan spesimen yang baik sehingga dapat digunakan dalam uji celup korosi sesuai dengan yang tercantum pada standar ASTM G31-72 (2004).



Gambar 3.2. Bentuk Spesimen Uji Celup

Spesimen yang telah dibersihkan dengan mesin amplas kemudian ditimbang dengan menggunakan timbangan *digital* yang terdapat pada Laboratorium Korosi Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia untuk mengetahui berat awal spesimen sebelum dilakukan pengujian celup. Penimbangan berat awal pada spesimen dimaksudkan untuk mendapatkan interval berat sebelum dan sesudah melakukan uji celup korosi sebagai data yang akan dipergunakan dalam menghitung laju korosi dengan metode kehilangan berat.

#### 1.2.2. Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia bertujuan untuk mengetahui komposisi unsur kimia dari material yang digunakan sebagai spesimen yang berfungsi sebagai kupon dalam uji celup korosi. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan ASTM A751-08 sebagai acuan. Material yang digunakan adalah baja karbon API 5L *Grade B* yang menurut data literatur memiliki komposisi sebagai berikut:

Tabel 3.1. Komposisi kimia baja karbon API 5L *Grade B* <sup>(17)</sup>

Komposisi	C	Mn	P	S	V	Ti
% (max)	0.28	1.20	0.03	0.03	0.03	0.04

Uji komposisi kimia dilakukan untuk mengetahui kesesuaian spesifikasi material yang digunakan dalam pengujian. Pengujian ini dilakukan di Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia dengan



menggunakan alat OES (*Optical Emission Spectrometer*). Pengujian komposisi kimia dengan menggunakan OES diawali dengan melakukan kalibrasi terlebih dahulu. Prinsip dari pengujian komposisi kimia dengan menggunakan OES adalah dengan melakukan pemanasan material dengan menggunakan busur (*arc*). Proses pemanasan tersebut mengakibatkan atom-atom elemen memiliki energi yang cukup untuk berpindah ke energi yang lebih tinggi. Atom kemudian tereksitasi ke energi yang lebih tinggi bersamaan dengan lepasnya sinar-x/*light/wave length* yang akan ditangkap oleh detektor. Hasil yang ditangkap oleh detektor memberikan informasi unsur yang berada di dalamnya. Setiap unsur memiliki karakteristik yang berbeda sehingga hasil yang dideteksi untuk setiap unsur akan berbeda-beda. Pada pengujian ini spesimen akan mengalami pemanasan sehingga dapat mengakibatkan perubahan struktur mikro dari spesimen tersebut sehingga pada pengujian komposisi kimia dengan OES, spesimen dibuat terpisah dan tidak digunakan untuk pengujian lainnya.

### 1.2.3. Pengujian Celup

Uji celup korosi atau *immersion corrosion testing* merupakan pengujian dalam skala laboratorium yang digunakan sebagai tahap awal sebelum melakukan pengujian kehilangan berat. Pengujian ini menggunakan standar ASTM G31-72 (2004) *Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals* sebagai acuan kerja. Spesimen yang telah dibersihkan dan ditimbang kemudian dipasang seutas tali pada lubang yang telah dipersiapkan.

Sebelum melakukan pencelupan, terlebih dahulu dipersiapkan wadah yang akan digunakan sebagai tempat dimana spesimen akan diekspos oleh fluida berupa air formasi. Wadah yang digunakan untuk pengujian adalah botol plastik dengan ukuran 1,5 liter yang dipotong sebesar  $\frac{2}{3}$  ukuran awal dan diberikan lubang pada bagian kanan dan kiri atas untuk mengikat tali yang telah dipasangkan pada spesimen. Wadah tersebut kemudian dibersihkan dengan air sabun kemudian dibersihkan dengan air mengalir hingga bersih dan kemudian dikeringkan. Wadah yang telah bersih dan kering kemudian diisi dengan fluida yang akan digunakan sebagai media ekspos spesimen selama uji celup berlangsung. Dalam pengujian ini, fluida yang digunakan sebagai lingkungan

pengkorosi adalah air formasi yang didapatkan dari salah satu perusahaan minyak dan gas di Indonesia.



Gambar 3.3. Sampel Air Formasi

Berdasarkan ASTM G31-72 (2004) yang digunakan sebagai acuan kerja, jumlah minimum fluida yang digunakan untuk setiap wadah adalah 0,2 ml untuk setiap  $\text{mm}^2$  luas permukaan spesimen kupon yang digunakan. Penelitian ini menggunakan kupon dengan dimensi 20 x 10 x 10 mm sehingga untuk dapat mengikuti kriteria uji celup korosi maka setiap wadah membutuhkan minimal 200 ml air formasi karena luas permukaan setiap spesimen adalah  $1000 \text{ mm}^2$ . Setelah air formasi dituangkan ke dalam wadah, spesimen yang sudah dipasangkan seutas tali kemudian diikatkan pada botol melalui lubang botol yang sudah dipersiapkan sebelumnya. Tali tersebut kemudian diikatkan sehingga spesimen menggantung di dalam botol dengan seluruh permukaan terekspos oleh lingkungan yaitu air formasi. Spesimen yang sudah dicelupkan ke dalam botol tersebut kemudian ditutup dengan menggunakan *plastic wrap* untuk menghindari masuknya debu, kotoran, air, maupun kemungkinan bakteri lain ke dalam wadah uji. Spesimen yang dicelup ke dalam wadah tersebut kemudian dидiamkan dalam periode waktu 3, 6, 9, 12, dan 15 hari untuk mengetahui besarnya laju korosi berdasarkan perbedaan parameter waktu yang diberikan.



Gambar 3.4. Pengujian Korosi dengan Uji Celup

#### 1.2.4. Pengujian Sampel Air Formasi

Uji celup korosi yang dilakukan dalam penelitian ini dilakukan dengan pendekatan terhadap korosi mikrobiologi yang disebabkan oleh bakteri. Untuk memastikan bahwa korosi yang terjadi pada spesimen yang diekspos oleh lingkungan air formasi benar-benar disebabkan oleh bakteri maka dilakukan uji keberadaan bakteri pada sampel air formasi yang berada didalam setiap wadah dimana pengujian ini dilakukan di akhir periode pencelupan. Pemilihan waktu pengujian pada hari terakhir pencelupan bertujuan untuk memberikan hasil yang paling representatif terhadap jumlah bakteri yang berperan dalam korosi mikrobiologi yang terjadi dalam setiap wadah sehingga dapat dipastikan bahwa bakteri masih hidup di dalam wadah dan berperan dalam proses korosi yang terjadi.

Uji bakteri pada sampel air formasi dilakukan dengan *surface plate method* yang menggunakan *nutrient agar* (NA) sebagai medium pertumbuhan bakteri. *Nutrient agar* merupakan medium yang umum digunakan untuk pertumbuhan bakteri karena sifatnya yang tetap padat meskipun dalam temperatur tinggi. Bakteri yang tumbuh pada permukaan *nutrient agar* dapat terlihat dengan jelas sehingga dapat diketahui morfologi bakteri tersebut secara visual. Tahapan pengujian pertumbuhan bakteri dengan *surface plate method* antara lain adalah sebagai berikut:<sup>(18)</sup>

1. Mencairkan *nutrient agar* dalam pemanas hingga larut dalam air.

2. Menuangkan *nutrient agar* cair ke dalam cawan petri steril kemudian didiamkan hingga dingin dan padat.
3. Mengambil sampel air formasi sebanyak 200  $\mu$ l dari wadah yang berisi spesimen yang telah dicelup selama periode tertentu (3, 6, 9, 12, atau 15 hari) dengan menggunakan pipet ukur dengan volume mikro.
4. Menuangkan sampel air formasi yang telah diambil dengan pipet ukur ke dalam cawan petri yang sudah diberikan *nutrient agar*.
5. Meratakan sampel air formasi yang berada di dalam cawan petri dengan menggunakan *dry glassy* yang telah disterilkan dengan alkohol dan bunsen.
6. Menutup cawan petri untuk menghindari adanya kontaminasi dari bakteri lain.
7. Melakukan inkubasi pada temperatur ruang selama 24-48 jam.
8. Mengamati koloni yang tumbuh dan mencatat jumlah dan morfologi koloni berdasarkan warna, bentuk, ukuran, dan konsistensi koloni.
9. Mengulangi tahapan yang sama untuk setiap air formasi dari wadah dengan periode pencelupan berbeda.

Untuk pengujian pertumbuhan koloni bakteri secara anaerob dilakukan dengan memasukkan cawan petri yang sudah diaplikasikan air formasi ke dalam *anaerobic jar* selama masa inkubasi berlangsung dengan bantuan *gas generating kit*. *Anaerobic jar* berfungsi sebagai ruang kedap udara bagi cawan petri yang berada di dalamnya. Dengan melakukan inkubasi di dalam *anaerobic jar* maka oksigen yang berasal dari lingkungan tidak dapat masuk ke dalam *anaerobic jar* sehingga tidak memberikan kontaminasi oksigen ke dalam cawan petri. *Gas generating kit* berfungsi untuk menyerap oksigen yang berada di dalam *anaerobic jar* yang telah ditutup. Oksigen ini masuk ketika proses penutupan *anaerobic jar* berlangsung. Dengan adanya kombinasi *anaerobic jar* dengan *gas generating kit* maka inkubasi dapat berlangsung dalam lingkungan yang bebas oksigen.



Gambar 3.5. Inkubasi bakteri di dalam *anaerobic jar*

Pengujian terhadap pertumbuhan koloni bakteri dilakukan untuk mengetahui bakteri aerob maupun anaerob yang berperan dalam korosi mikrobiologi yang terjadi pada setiap wadah uji. Dengan melakukan perhitungan maka dapat diketahui banyaknya *colony form unit* (cfu) bakteri yang berperan terhadap korosi mikrobiologi yang terjadi. Pengujian secara aerob dan anaerob dilakukan di Departemen Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia.

Setelah dilakukan inkubasi selama 24 jam kemudian koloni yang tumbuh pada cawan petri dicatat jumlah dan morfologi koloninya berdasarkan warna, bentuk, ukuran, dan konsistensi koloni. Setelah ditetapkan perbedaannya kemudian dilakukan isolasi bakteri di dalam tabung reaksi yang telah diisi *nutrient agar*.

#### 1.2.5. Pengukuran pH

Pengukuran terhadap pH dilakukan untuk mengetahui perubahan derajat keasaman lingkungan air formasi dari setiap wadah dengan periode celup berbeda dan juga dari keadaan awal sebelum spesimen diekspos ke dalam lingkungan

tersebut. Besarnya pH diukur menggunakan pH meter dengan menggunakan pH *buffer* 10. Tahapan pengukuran pH antara lain adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan pH *buffer* 10 dan aquades dalam wadah yang berbeda.
2. Menyalakan pH meter dan dicelupkan ke dalam pH *buffer* hingga menunjukkan angka 10.
3. Menyelupkan pH meter pada lingkungan air formasi yang akan diukur tunggu hingga angka pada pH meter stabil.
4. Membersihkan pH meter pada air mengalir.
5. Menyelupkan pH meter ke dalam aquades.
6. Mengulangi tahapan yang sama untuk lingkungan air formasi dengan periode pencelupan berbeda.

#### 1.2.6. Pembersihan Spesimen Kupon

Setelah kupon mencapai waktu ekspos yang diinginkan yaitu 3, 6, 9, 12, dan 15 hari, maka langkah berikutnya adalah melakukan pembersihan terhadap spesimen kupon. Penelitian terhadap korosi mikrobiologi yang terjadi pada spesimen yang telah diekspos ke dalam lingkungan air formasi tersebut akan dilanjutkan dengan pengamatan morfologi kerusakan yang terjadi pada spesimen dan juga pengamatan terhadap produk korosi yang menempel pada spesimen tersebut. Untuk mendukung penelitian lanjutan tersebut maka diperlukan proses pembersihan spesimen yang sesuai sehingga didapatkan sebuah rangkaian penelitian yang berkelanjutan dan valid.

Spesimen yang telah dicelup sesuai dengan periode yang ditentukan kemudian dikeluarkan dari wadah dan diletakkan dalam wadah yang bersih dan kering. Spesimen tersebut kemudian dikeringkan dengan menggunakan pengering atau *dryer*. Produk korosi kemudian diambil dari permukaan spesimen yang telah kering dengan melakukan pengikisan secara perlahan menggunakan bantuan spatula. Spesimen yang sudah bebas dari produk korosi kemudian dibersihkan kembali dengan metode kimia menggunakan HCl 0,5 molar yang diaplikasikan ke seluruh permukaan spesimen dengan menggunakan bantuan *cotton bud* untuk mendapatkan tingkat kebersihan yang baik tanpa merusak morfologi permukaan spesimen sehingga dapat diamati lebih lanjut. Sebagai rangkaian pembersihan

terakhir, spesimen tersebut kemudian diaplikasikan air sabun dan selanjutnya aquades pada seluruh permukaan spesimen juga melalui bantuan *cotton bud*.

#### 1.2.7. Perhitungan Laju Korosi dengan Metode Kehilangan Berat

Pengujian ini menggunakan metode kehilangan berat yang mengacu pada perhitungan laju korosi yang tertera pada ASTM G31-72 (2004). Spesimen yang telah benar-benar bersih kemudian ditimbang kembali dengan menggunakan timbangan *digital* yang sama dengan yang digunakan ketika melakukan penimbangan awal sehingga diketahui interval pengurangan berat sebelum dan setelah dilakukan pencelupan serta besarnya laju korosi mikrobiologi yang terjadi melalui perhitungan metode kehilangan berat juga dapat diketahui. Nilai interval berat yang hilang tersebut kemudian dimasukkan ke dalam perhitungan sebagaimana yang tertera pada persamaan 2.1.<sup>(16)</sup>

#### 1.2.8. Karakterisasi Produk Korosi

Deposit produk korosi yang telah diambil dari permukaan sampel dikarakterisasi dengan menggunakan XRD (*X-Ray Diffraction*) untuk mengetahui senyawa yang terbentuk selama korosi mikrobiologi berlangsung yang diakibatkan oleh adanya aktifitas dari bakteri yang berperan di dalamnya. Pengujian XRD dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Islam Negeri Jakarta. Secara umum XRD menggunakan prinsip pantulan sinar X yang mengekspos sampel dan kemudian ditangkap oleh detektor yang ada. Sinar X akan melakukan pemaparan dari berbagai sudut mulai dari  $\pm 10^\circ$  -  $\pm 90^\circ$  dengan kecepatan  $2^\circ$  setiap menitnya sehingga dibutuhkan waktu  $\pm 40$  menit untuk dapat menyelesaikan satu rangkaian uji XRD.





Gambar 3.6. Alat Uji XRD

Pengujian komposisi senyawa deposit produk korosi menggunakan analisa *X-Ray Diffraction* (XRD) melalui prosedur sebagai berikut:

1. Sampel deposit produk korosi dalam keadaan kering dihaluskan dengan mortar hingga berbentuk serbuk.
2. Sampel dimasukkan ke dalam wadah khusus dan dimasukkan ke *vacuum chamber*.
3. *Chamber* ditutup dan ekspos sinar-X dimulai.
4. Timbul *peak* pada monitor kemudian tunggu hingga pengujian selesai.

#### 1.2.9. Pengamatan Kerusakan Kupon

Morfologi kerusakan yang terjadi pada kupon dan disebabkan oleh korosi mikrobiologi diamati dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) yang terdapat di Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.



## BAB IV

### HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

#### 1.1. Latar Belakang Material

Material yang digunakan pada penelitian ini merupakan material pipa baja karbon API 5L *Grade B*. Pemilihan material dilakukan melalui pendekatan material yang umum digunakan sebagai jalur pipa produksi pada industri minyak dan gas. Material tersebut kemudian dipotong sehingga menghasilkan dimensi 20 x 10 x 10 mm yang digunakan sebagai kupon pada pengujian celup. Sebelum melakukan pengujian, seluruh permukaan pipa dibersihkan untuk menghasilkan permukaan yang bersih, halus, dan rata.

#### 1.2. Hasil Pengujian Komposisi Kimia

Material logam yang digunakan sebagai kupon diketahui merupakan material baja karbon API 5L *Grade B*. Untuk mengetahui kesesuaian terhadap material tersebut maka dilakukan pengujian komposisi kimia. Pengujian komposisi kimia menggunakan alat *optical emission spectrometer* (OES) menghasilkan komposisi kimia unsur sebagai berikut:

Tabel 4.1. Komposisi kimia spesimen kupon berdasarkan % berat

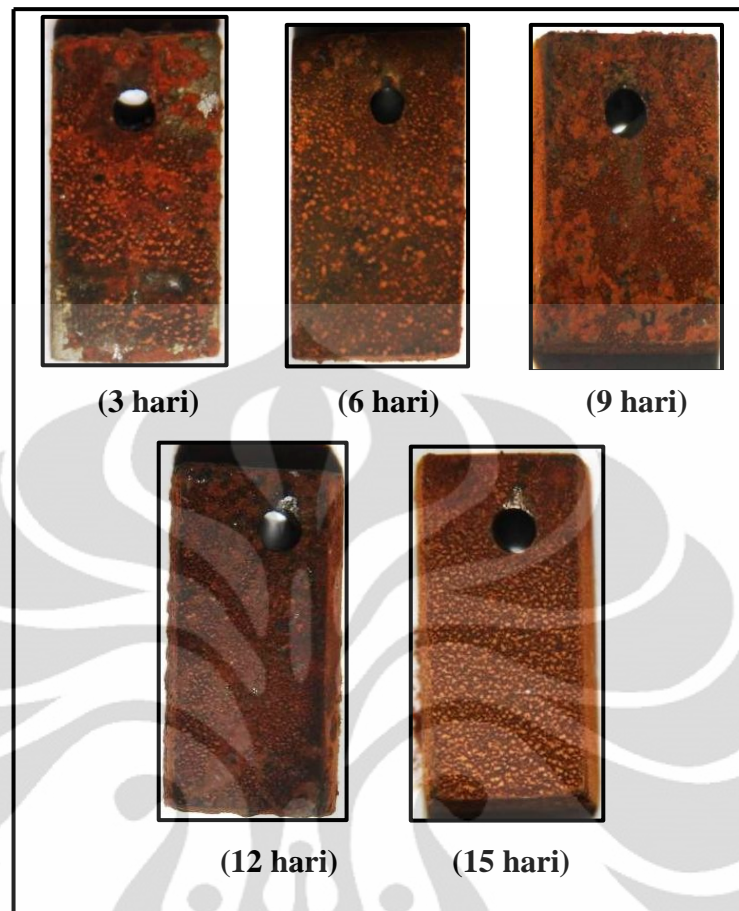
<b>C</b> (%)	<b>Si</b> (%)	<b>S</b> (%)	<b>P</b> (%)	<b>Mn</b> (%)	<b>Ni</b> (%)	<b>Cr</b> (%)
0.218	0.270	0.024	0.015	0.383	<0.005	0.026
<b>Mo</b> (%)	<b>Ti</b> (%)	<b>Cu</b> (%)	<b>Nb</b> (%)	<b>V</b> (%)	<b>Al</b> (%)	<b>Fe</b> (%)
<0.003	<0.002	0.004	<0.003	0.006	0.002	99.0

Hasil pengujian OES tersebut kemudian dibandingkan dengan data material yang didapatkan dari literatur seperti yang tertera pada tabel 3.1. Komposisi kimia yang didapatkan dari hasil pengujian sesuai dengan persyaratan spesifikasi standar komposisi kimia yang terdapat pada literatur yang tergolong ke dalam baja karbon rendah. Kesesuaian komposisi kimia merupakan sebuah

prasyarat sebelum melakukan pengujian-pengujian berikutnya. Dengan hasil tersebut maka pengujian dapat dilanjutkan ke tahap selanjutnya.

### 1.3. Hasil Uji Celup

Pengujian korosi mikrobiologi pada spesimen kupon baja karbon API 5L *Grade B* dilakukan dengan metode uji celup yang dilakukan pada lima buah spesimen kupon yang dicelup di dalam lima buah wadah yang berbeda dengan periode 3, 6, 9, 12, dan 15 hari. Setelah sampel dicelup sesuai dengan periode waktu tersebut, sampel kemudian diangkat dari wadah dan dikeringkan dengan menggunakan *dryer* hingga spesimen kupon benar-benar kering. Setelah sampel dikeringkan, kemudian dilakukan pengamatan secara visual. Berdasarkan pengamatan visual, kelima buah spesimen menunjukkan permukaan yang diselubungi oleh produk korosi berwarna coklat kemerahan (*reddish brown*). Warna coklat kemerahan merupakan hasil dari aktifitas bakteri dalam pembentukan biofilm. Hal ini konsisten dengan teori yang telah dijelaskan sebelumnya pada bab 2. Pengamatan secara visual tersebut kemudian didokumentasikan sebagai berikut:



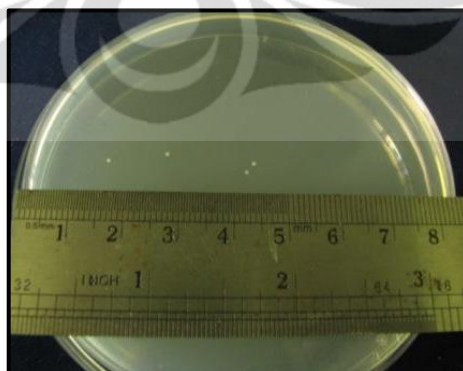
Gambar 4.1. Spesimen kupon setelah uji celup

#### 1.4. Hasil Pengujian Sampel Air Formasi

Pengujian sampel air formasi dilakukan untuk memastikan bahwa korosi yang terjadi selama periode celup berlangsung adalah benar korosi mikrobiologi yang disebabkan oleh adanya aktifitas bakteri untuk itu dilakukan perhitungan jumlah koloni bakteri dengan teknik *surface plate method*. Pengujian dilakukan dengan mengaplikasikan 200 $\mu$ l air formasi yang berasal dari lima buah wadah uji celup ke dalam lima buah cawan petri yang berbeda dengan medium *nutrient agar*. Pengambilan air formasi dari setiap wadah uji dilakukan pada hari terakhir setiap periode pengujian sehingga dapat memberikan representasi jumlah bakteri hidup yang berperan dalam korosi mikrobiologi yang terjadi dalam setiap wadah uji. Setelah diaplikasikan pada cawan petri kemudian air formasi tersebut diratakan dan diinkubasi dalam waktu 24-48 jam. Penelitian ini menggunakan masa inkubasi selama 24 jam. Pemilihan waktu inkubasi dipilih karena dalam

jangka waktu 24 jam cukup untuk menunjukkan adanya pertumbuhan koloni bakteri yang berasal dari air formasi tersebut. Jumlah koloni yang terdapat pada setiap cawan petri kemudian dihitung untuk mengetahui banyaknya bakteri yang berperan dalam setiap wadah uji.

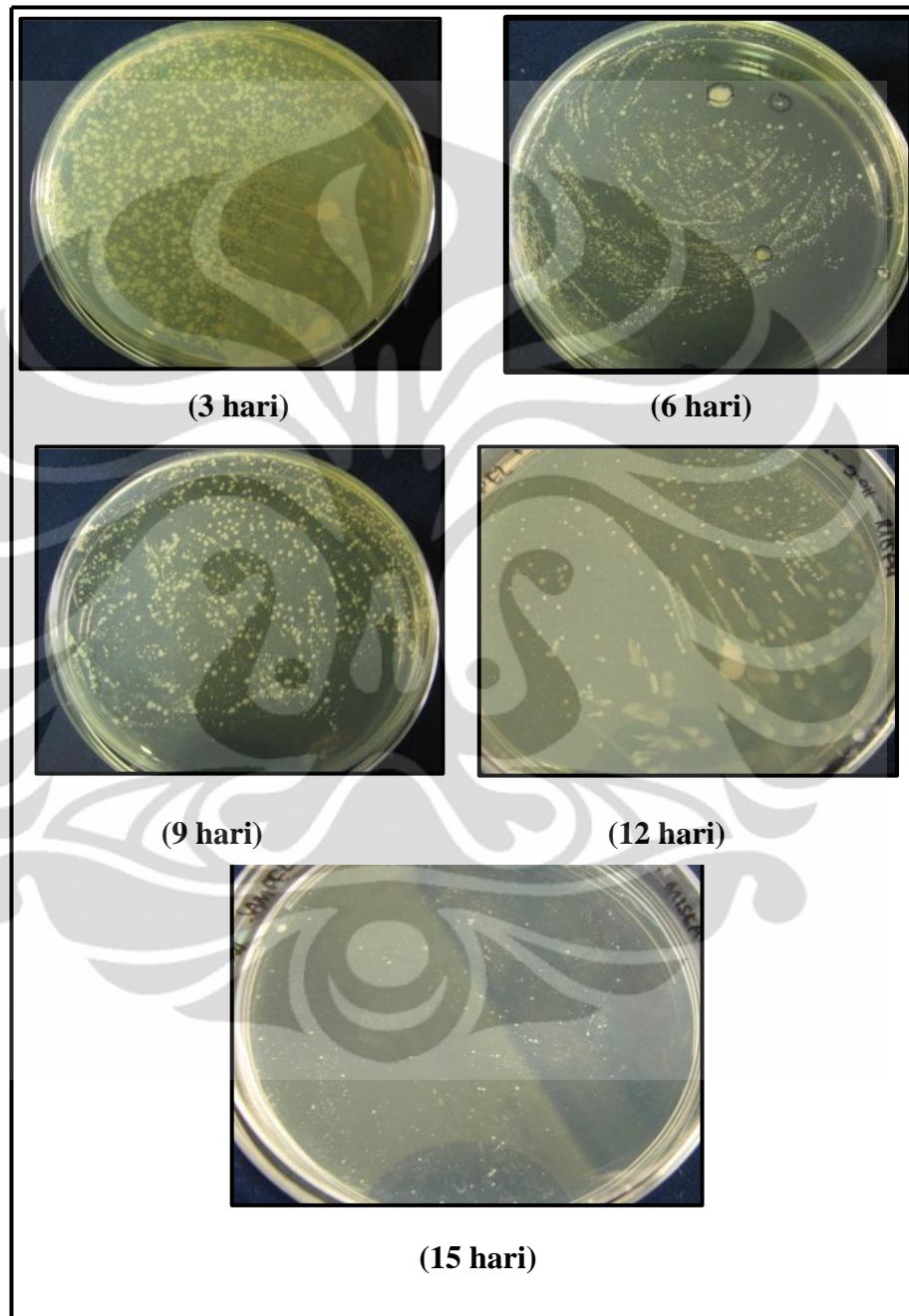
Pengujian terhadap pertumbuhan koloni bakteri ini dilakukan secara aerob untuk mengetahui bakteri aerob yang berperan. Pengujian secara aerob dan anaerob dilakukan pada wadah uji dengan periode uji 15 hari. Pengujian anaerob pada wadah uji dengan periode celup 15 hari dipilih karena periode tersebut merupakan periode uji yang paling lama dilakukan dalam penelitian ini. Periode uji terlama (15 hari) merupakan parameter pendukung bahwa bakteri anaerob seperti SRB atau bakteri pereduksi sulfat masih hidup dan beraktifitas memberikan kontribusi terhadap korosi mikrobiologi yang terjadi. Apabila dalam 15 hari bakteri anaerob tersebut masih hidup maka dapat dikatakan bahwa pada periode 3, 6, 9, dan 12 hari bakteri tersebut juga masih turut berperan dalam korosi mikrobiologi yang terjadi. Pembuktian mengenai peran bakteri anaerob akan didukung dengan analisa produk korosi yang dihasilkan oleh bakteri pereduksi sulfat dengan menggunakan uji XRD pada tahap selanjutnya. Berikut adalah hasil uji koloni bakteri pada lingkungan anaerob dengan air formasi yang berasal dari wadah uji 15 hari. Pengujian anaerob dilakukan di Departemen Biologi Fakultas MIPA Universitas Indonesia.



Gambar 4.2. Pertumbuhan koloni bakteri anaerob

Pengujian aerob dilakukan di dalam Laboratorium Kimia Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Berikut

adalah visualisasi dari pengujian sampel air formasi dari wadah uji 3, 6, 9, 12, dan 15 hari terhadap pertumbuhan koloni bakteri setelah dilakukan inkubasi selama 24 jam.



Gambar 4.3. Pertumbuhan koloni bakteri aerob

Pengujian terhadap pertumbuhan koloni bakteri juga dilakukan terhadap lingkungan air formasi pada keadaan *bulk* sebelum air formasi tersebut



didistribusikan ke dalam wadah uji untuk dilakukan pengujian celup. Hal ini bertujuan untuk mengetahui banyaknya jumlah koloni bakteri pada keadaan awal sebelum pengujian celup berlangsung. Berikut adalah hasil dari pertumbuhan koloni bakteri pada lingkungan air formasi sebelum pengujian celup berlangsung.



Gambar 4.4. Pertumbuhan koloni bakteri sebelum pengujian celup

Setelah melakukan uji pertumbuhan koloni bakteri kemudian dilakukan pengamatan terhadap morfologi koloni bakteri secara visual. Perbedaan morfologi koloni bakteri memberikan informasi kualitatif mengenai banyaknya jenis bakteri yang mungkin ada di dalam lingkungan uji celup. Dari 6 buah cawan petri yang telah berisi koloni bakteri baik anaerob maupun aerob diketahui bahwa terdapat lima jenis morfologi koloni bakteri yang berbeda-beda. Empat diantaranya merupakan koloni bakteri aerob dan satu diantaranya adalah koloni bakteri anaerob. Morfologi koloni bakteri aerob dan anaerob diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Koloni bakteri anaerob adalah yang memiliki jumlah paling sedikit dan berwarna putih dan terkonsentrasi hanya pada bagian tengah cawan petri.
2. Koloni memiliki warna putih kecoklatan dengan bentuk koloni yang besar dan tidak konsisten pada permukaan *nutrient agar*.
3. Koloni mengkilap dengan warna putih susu dengan bentuk bulat dan memiliki ukuran yang cukup besar.

4. Berwarna kuning, bulat, dan besar hanya berjumlah satu buah.
5. Memiliki warna putih kecoklatan dengan bentuk koloni kecil, bulat dan hampir merata pada permukaan *nutrient agar*.

Pengamatan morfologi diikuti dengan isolasi bakteri untuk memisahkan bakteri menjadi satu jenis morfologi dalam satu buah tabung reaksi yang sudah diisi dengan *nutrient agar*. Berikut adalah hasil isolasi bakteri berdasarkan morfologinya disusun berurutan sesuai dengan deskripsi diatas dimulai dari paling kiri yaitu deskripsi nomor 1 dan diakhiri dengan isolat paling kanan yaitu deskripsi morfologi nomor 5.



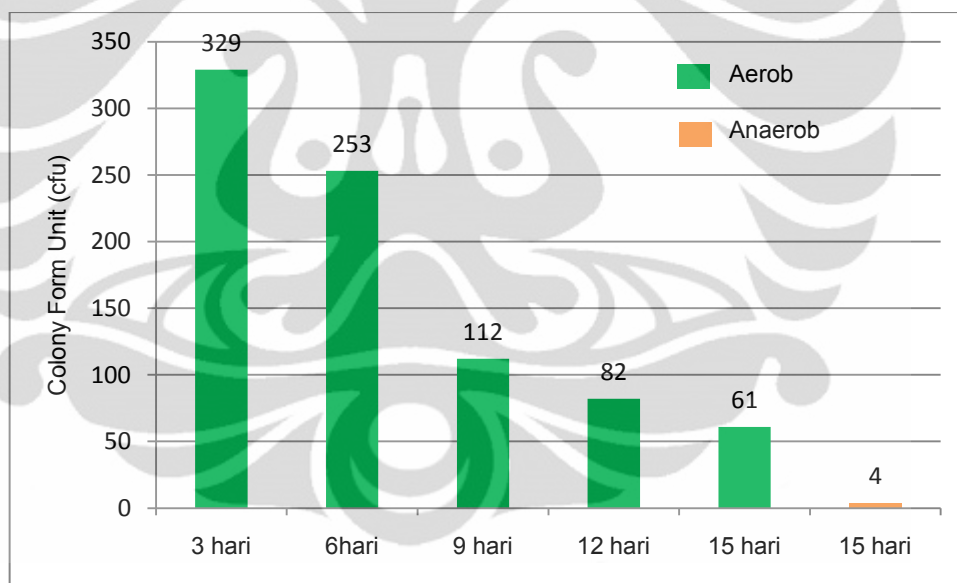
Gambar 4.5. Isolat bakteri Aerob dan Anaerob

Setelah dilakukan pengamatan morfologi koloni secara visual, tahap berikutnya adalah dengan menghitung jumlah *colony form unit* (cfu) bakteri yang terdapat dalam cawan petri. Perhitungan ini memberikan gambaran mengenai jumlah koloni bakteri yang ada di dalam setiap wadah uji melalui perhitungan perbandingan. Jumlah sampel air formasi yang diujikan dalam cawan petri adalah 200  $\mu$ l sedangkan jumlah sampel air formasi dalam setiap wadah uji celup adalah 200 ml sehingga:

$$\text{Koloni bakteri dalam wadah uji} = \frac{200 \text{ ml} \times \text{koloni bakteri dalam cawan petri}}{200 \mu\text{l}} \quad (4.1)$$

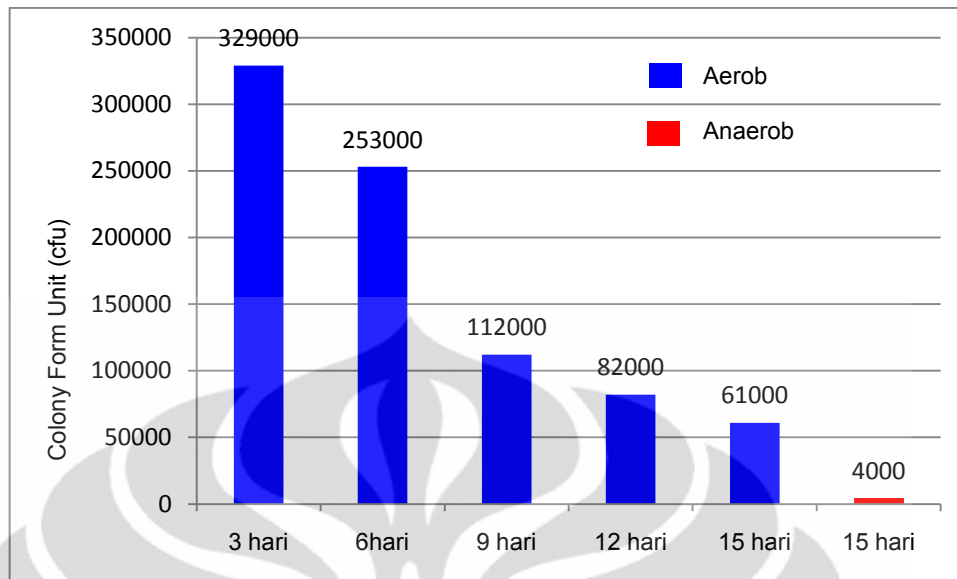
Dimana : 200 ml = 200000  $\mu\text{l}$

Melalui persamaan 4.1. diatas maka dapat diketahui jumlah koloni bakteri dalam setiap wadah uji dengan terlebih dahulu melakukan perhitungan koloni dalam setiap cawan petri. Jumlah koloni bakteri pada air formasi dalam keadaan *bulk* sebelum pengujian celup berlangsung memiliki jumlah koloni terbanyak yaitu sebesar 398 koloni dalam pengujian yang dilakukan dalam cawan petri. Hasil perhitungan banyaknya jumlah koloni bakteri baik yang terdapat dalam wadah uji maupun yang terdapat dalam cawan petri disajikan dalam bentuk grafik sebagai berikut:



Gambar 4.6. Perbandingan jumlah koloni dalam cawan petri





Gambar 4.7. Perbandingan jumlah koloni dalam wadah uji

Berdasarkan grafik di atas didapatkan informasi bahwa dalam suasana aerob, jumlah bakteri paling banyak ditemukan dalam wadah uji 3 hari yaitu berjumlah 329000 koloni dan jumlahnya semakin berkurang seiring dengan bertambahnya periode pencelupan dimana jumlah bakteri pada wadah uji yang telah dicelup selama 15 hari menunjukkan angka 61000 koloni. Penurunan terbesar terjadi pada hari ke-9 dimana interval koloni bakteri mencapai rentang tertingginya dari 253000 koloni menjadi 112000 koloni. Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa bakteri berada dalam keadaan optimal pada waktu celup 3 hari dan kemudian jumlahnya terus berkurang hingga mencapai 15 hari. Namun demikian jumlah bakteri pada pengujian hari terakhir yaitu 15 hari masih memiliki nilai yang signifikan yaitu 61000 koloni. Pengurangan jumlah koloni bakteri disebabkan oleh ketersediaan nutrisi di dalam wadah uji yang terus berkurang karena dikonsumsi secara terus menerus oleh bakteri seiring dengan bertambahnya periode pengujian celup mengingat tidak adanya penambahan nutrisi selama pengujian celup berlangsung. Tentunya pengujian yang dilakukan dalam skala laboratorium ini berbeda dengan kejadian aktual seperti yang terjadi di lapangan. Dalam keadaan sebenarnya terdapat *supply* minyak secara terus menerus selama sistem berjalan. Minyak yang berasal dari sisa produksi tersebut berfungsi sebagai nutrisi yang diserap oleh bakteri sebagai sumber energi sehingga bakteri terus hidup dan berkembang.

Lain halnya dengan bakteri aerob, bakteri anaerob menunjukkan jumlah yang jauh lebih sedikit jika dibandingkan dengan bakteri aerob yaitu 4 koloni di dalam cawan petri dan 2000 koloni di dalam wadah uji. Jumlah koloni bakteri berdasarkan kedua gambar diatas memberikan informasi banyaknya koloni bakteri yang berperan dalam korosi mikrobiologi dengan kategori *planktonic bacteria* karena menggunakan medium lingkungan air formasi sebagai alat uji bakteri. Untuk bakteri anaerob jumlah yang relatif sedikit apabila dibandingkan dengan bakteri aerob tersebut terjadi karena bakteri anaerob cenderung hidup di bawah lapisan biofilm dan menjadi *sessile bacteria*. Perbandingan terhadap bakteri aerob dan anaerob ini memberikan gambaran bahwa korosi mikrobiologi yang terjadi cenderung diakibatkan oleh bakteri aerob. Meskipun demikian tidak berarti bakteri anaerob tidak memiliki kontribusi terhadap terjadinya korosi mikrobiologi. Meskipun bakteri aerob memiliki kontribusi besar dalam korosi mikrobiologi yang terjadi namun bakteri anaerob memiliki tingkat bahaya yang jauh lebih tinggi karena menghasilkan korosi mikrobiologi ke bagian dalam material membentuk *pitting* sementara bakteri aerob menghasilkan korosi secara seragam. Presentasi jumlah bakteri tersebut memberikan dugaan terhadap bakteri yang memiliki keterlibatan dalam korosi yang terjadi pada spesimen kupon. Pernyataan ini meningkatkan tingkat kepercayaan akan korosi mikrobiologi yang terjadi dalam wadah uji memang benar diakibatkan oleh bakteri.

#### 1.5. Hasil Pengukuran pH

Pengukuran pH dilakukan pada hari terakhir periode pencelupan pada setiap lingkungan air formasi yang berada pada masing-masing wadah uji. Pengukuran pH juga dilakukan pada lingkungan air formasi pada keadaan awal (*bulk*) persis sebelum air formasi tersebut dimasukkan ke dalam wadah uji celup untuk dijadikan lingkungan uji celup korosi. Keadaan awal menunjukkan bahwa air formasi memiliki pH sebesar 8.2. pH tersebut berubah menjadi lebih asam ketika spesimen kupon dimasukkan ke dalam wadah uji dan diekspos oleh lingkungan air formasi. Berikut adalah tabel yang menunjukkan perubahan derajat keasaman pada setiap wadah uji:

Tabel 4.2. Perbandingan pH setiap wadah uji

Periode Uji Celup	pH
Fluida <i>Bulk</i>	8.2
3 hari	7.6
6 hari	7.8
9 hari	7.6
12 hari	7.9
15 hari	7.8

Hasil pengukuran pH seperti yang tertera pada tabel diatas menunjukkan adanya penurunan pH sehingga mencapai kondisi yang lebih asam dari kondisi awal yaitu 8.2. Penurunan pH tersebut tidak membentuk keseragaman namun menghasilkan rata-rata pH dalam rentang 7.6-7.9. Perubahan derajat keasaman ini dapat diakibatkan oleh aktivitas bakteri pereduksi sulfat yang menghasilkan asam sulfat atau H<sub>2</sub>S di dalam wadah uji namun tidak terjadinya penurunan pH yang signifikan diakibatkan oleh jumlah koloni bakteri pereduksi sulfat yang relatif sedikit. Keadaan ini konsisten dengan jumlah bakteri anaerob yang telah dihitung sebelumnya pada bagian hasil pengujian sampel air formasi terhadap jumlah koloni bakteri.

#### 1.6. Hasil Perhitungan Laju Korosi

Perhitungan laju dilakukan setelah spesimen dibersihkan dari seluruh produk korosi yang menyelubungi permukaan spesimen kupon. Pembersihan sebelum melakukan perhitungan laju korosi tertera pada standar ASTM G31-72 (2004) yang digunakan sebagai acuan kerja.

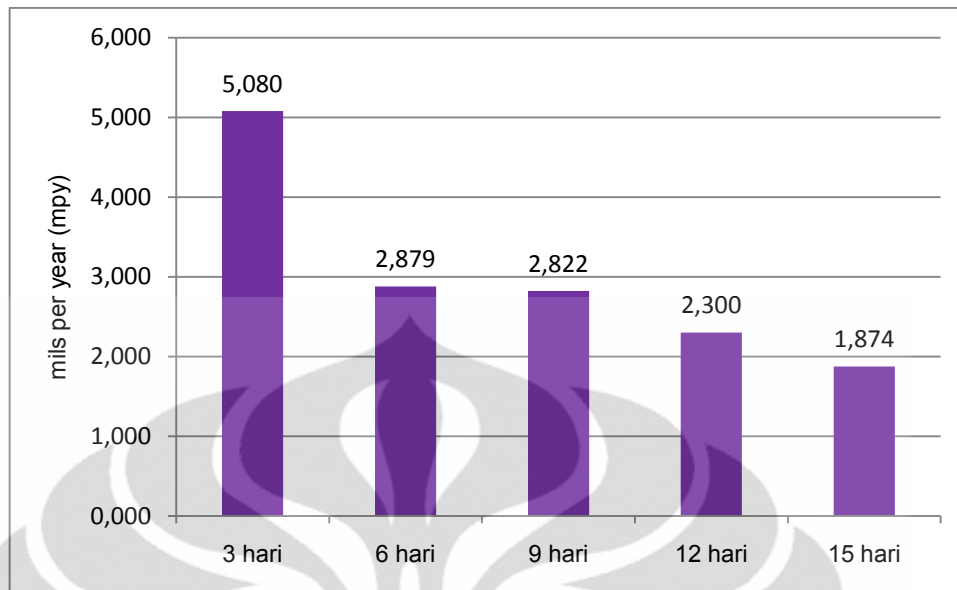
Dalam penelitian ini, satuan yang digunakan adalah mpy sehingga menggunakan konstanta sebesar  $3,45 \times 10^6$ . Spesimen memiliki dimensi 20 x 10 x 10 mm sehingga luas permukaannya adalah 1000 mm<sup>2</sup> atau 10 cm<sup>2</sup>. Luas permukaan tersebut kemudian dikurangi dengan luas permukaan dari lubang yang digunakan sebagai tempat untuk mengikat tali selama pengujian celup berlangsung. Lubang tersebut memiliki diameter sepanjang 3 mm dengan ketebalan 10 mm sehingga luas permukaan setiap spesimen adalah 1080 mm<sup>2</sup>.

Kehilangan berat dihitung dengan mengurangi berat spesimen sebelum melakukan uji celup dengan berat spesimen setelah melakukan uji celup. Hasil yang didapatkan dari pengurangan berat tersebut adalah sebagai berikut:

Tabel 4.3. Perbandingan kehilangan berat spesimen kupon

<b>Periode Uji Celup</b>	<b>Berat Awal (gram)</b>	<b>Berat Akhir (gram)</b>	<b>Kehilangan Berat (gram)</b>
3 hari	11.4508	11.4418	0.009
6 hari	10.6782	10.6680	0.0102
9 hari	10.9326	10.9176	0.015
12 hari	10.8885	10.8722	0.0163
15 hari	10.9204	10.9038	0.0166

Dari perhitungan kehilangan berat diketahui bahwa waktu memiliki pengaruh terhadap banyaknya berat yang hilang. Dari tabel diatas didapatkan informasi bahwa kehilangan berat berbanding lurus dengan hilangnya berat spesimen kupon yang diekspos di dalam lingkungan air formasi. Semakin lama periode waktu yang digunakan dalam melakukan uji celup maka semakin banyak berat yang hilang. Periode waktu celup selama 3 hari memiliki kehilangan berat yang paling sedikit yaitu sebanyak 0.009 gram dan jumlahnya semakin besar hingga mencapai 0.0166 gram pada periode celup selama 15 hari. Periode waktu celup yang berbanding lurus dengan hilangnya berat memberikan gambaran bahwa korosi mikrobiologi merupakan proses yang berlangsung secara simultan dan terus menerus menghasilkan akumulasi produk yang menjadi semakin besar pada setiap pertambahan waktu. Hasil perhitungan kehilangan berat diatas kemudian dimasukan ke dalam perhitungan laju korosi sebagaimana yang tertera pada standar ASTM G31-72 (2004) dengan menggunakan metode kehilangan berat sebagaimana yang tertera pada persamaan 2.1. kemudian hasil perhitungan laju korosi tersebut disajikan dalam bentuk grafik sebagai berikut:



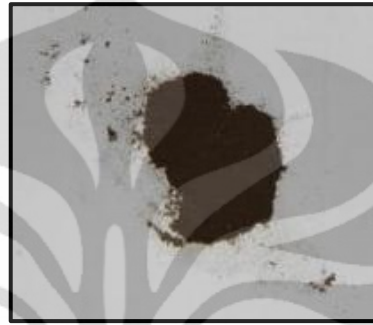
Gambar 4.8. Perbandingan laju korosi spesimen kupon

Hasil dari perhitungan laju korosi menunjukkan bahwa korosi mikrobiologi dihasilkan dengan laju paling cepat pada periode celup selama tiga hari. Keadaan ini sesuai dengan hasil yang didapatkan ketika melakukan perhitungan terhadap jumlah koloni bakteri dimana pada periode yang sama yaitu tiga hari menghasilkan jumlah koloni bakteri yang paling banyak sehingga dapat disimpulkan bahwa laju korosi terjadi karena adanya keberadaan bakteri. Sekali lagi hal ini mendukung pernyataan bahwa korosi yang terjadi memang benar adanya disebabkan oleh aktivitas bakteri yang berperan didalamnya. Pernyataan ini kemudian akan diperkuat melalui karakterisasi produk korosi yang akan dibahas pada bagian 4.7. Laju korosi terus mengalami penurunan dengan periode waktu yang semakin bertambah. Perhitungan laju korosi terus berkurang dengan bertambahnya periode waktu sehingga terjadi konsistensi dengan berkurangnya jumlah koloni bakteri dengan bertambahnya periode waktu celup. Kemudian dapat diketahui bahwa periode waktu celup memiliki peran dalam berkurangnya laju korosi dan jumlah koloni bakteri.

#### 1.7. Karakterisasi Produk Korosi

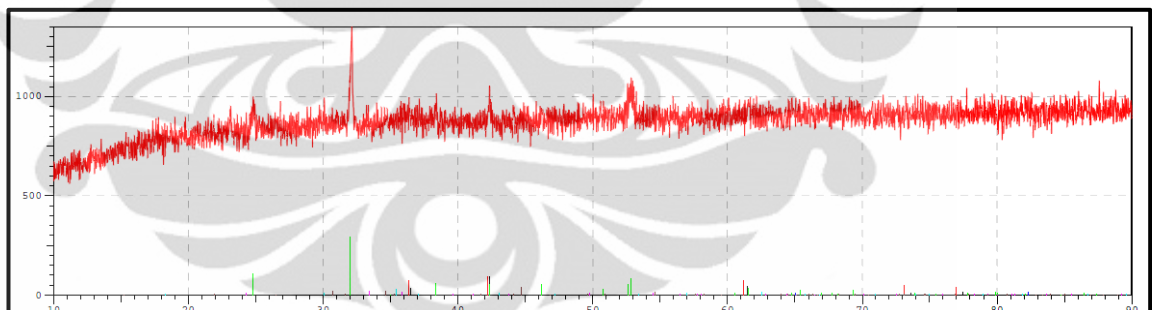
Pengujian yang dilakukan untuk melakukan karakterisasi produk korosi dibantu dengan menggunakan alat XRD (*X-Ray Diffraction*). Pengujian ini

bertujuan untuk mengetahui senyawa-senyawa yang dihasilkan selama korosi mikrobiologi berlangsung. Produk korosi diperoleh dari permukaan spesimen yang dikikis setelah spesimen diangkat dari wadah uji dan dikeringkan. Deposit produk korosi kemudian dihaluskan dengan menggunakan mortar sebelum dimasukkan dalam *chamber* yang berada pada alat XRD.



Gambar 4.9. Deposit Produk Korosi

Uji XRD menghasilkan beberapa nama senyawa yang menjadi bagian dari produk korosi yang dihasilkan selama pengujian celup berlangsung. Berikut adalah difraktogram hasil pengujian produk korosi dengan menggunakan XRD:



Gambar 4.10. Difraktogram produk korosi

Dari difraktogram produk korosi yang dihasilkan oleh XRD kemudian didapatkan beberapa *peak* yang menunjukkan senyawa yang dominan di dalamnya. Pengujian XRD menunjukkan bahwa terdapat lima senyawa dominan yang terdapat di dalam produk korosi yang diuji. Senyawa-senyawa tersebut didapatkan dari *data card* yang digunakan sebagai *software* yang mendukung alat XRD. *Data card* merupakan bentuk individu setiap senyawa yang didapat dari *peak* yang terdapat pada difraktogram dari hasil pengujian (disajikan pada

lampiran 1). Senyawa yang telah diketahui tersebut kemudian diolah dengan menggunakan *software* Xpolder yang dapat memberikan kalkulasi perkiraan jumlah atau presentase senyawa dari produk korosi tersebut.

Tabel 4.4. Persentase senyawa yang terdapat di dalam produk korosi

Senyawa	Persentase (%)
Fe(CO <sub>3</sub> )	66.07
(MgO) <sub>0.593</sub> (FeO) <sub>0.407</sub>	19.11
FeS	7.17
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.85
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	3.80

Senyawa yang dihasilkan didominasi oleh Fe(CO<sub>3</sub>) atau siderite sebanyak 66.07% dan diikuti oleh (MgO)<sub>0.593</sub>(FeO)<sub>0.407</sub>, FeS, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dan Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> atau magnetite. Adanya presentasi FeS menjadi pembuktian konkret akan keberadaan bakteri pereduksi sulfat atau SRB. Bakteri ini memiliki ciri khas tersendiri dalam aktivitasnya terhadap korosi mikrobiologi yaitu dengan menghasilkan FeS melalui beberapa tahapan reaksi berkelanjutan yang dilakukan oleh bakteri pereduksi sulfat sebagaimana yang telah dijelaskan pada bab 2 diatas. Pembentukan FeS diinisiasi oleh aktivitas dari bakteri aerob yang menghasilkan *uniform corrosion* melalui pembentukan *tubercle*. Namun dengan adanya bakteri pereduksi sulfat maka terjadilah peristiwa berkelanjutan dari kondisi *tubercle* yang telah diciptakan oleh bakteri aerob tersebut. Mekanisme yang dihasilkan oleh bakteri pereduksi sulfat dalam korosi mikrobiologi melibatkan penghilangan atom hidrogen dari permukaan logam oleh bakteri tersebut menggunakan enzim yang disebut sebagai enzim hidrogenase. Hidrogen yang hilang tersebut kemudian digunakan oleh bakteri untuk mereduksi sulfat menjadi sulfit. Ketika *tubercle* mencapai titik stabilnya, beberapa biomassa mulai berdekomposisi menghasilkan sumber nutrisi yang digunakan bakteri pereduksi sulfat untuk menghasilkan H<sub>2</sub>S dalam lingkungan anaerob. Apabila dilanjutkan dari reaksi yang dihasilkan oleh bakteri pengoksidasi besi, maka akan terbentuk produk korosi berupa FeS.

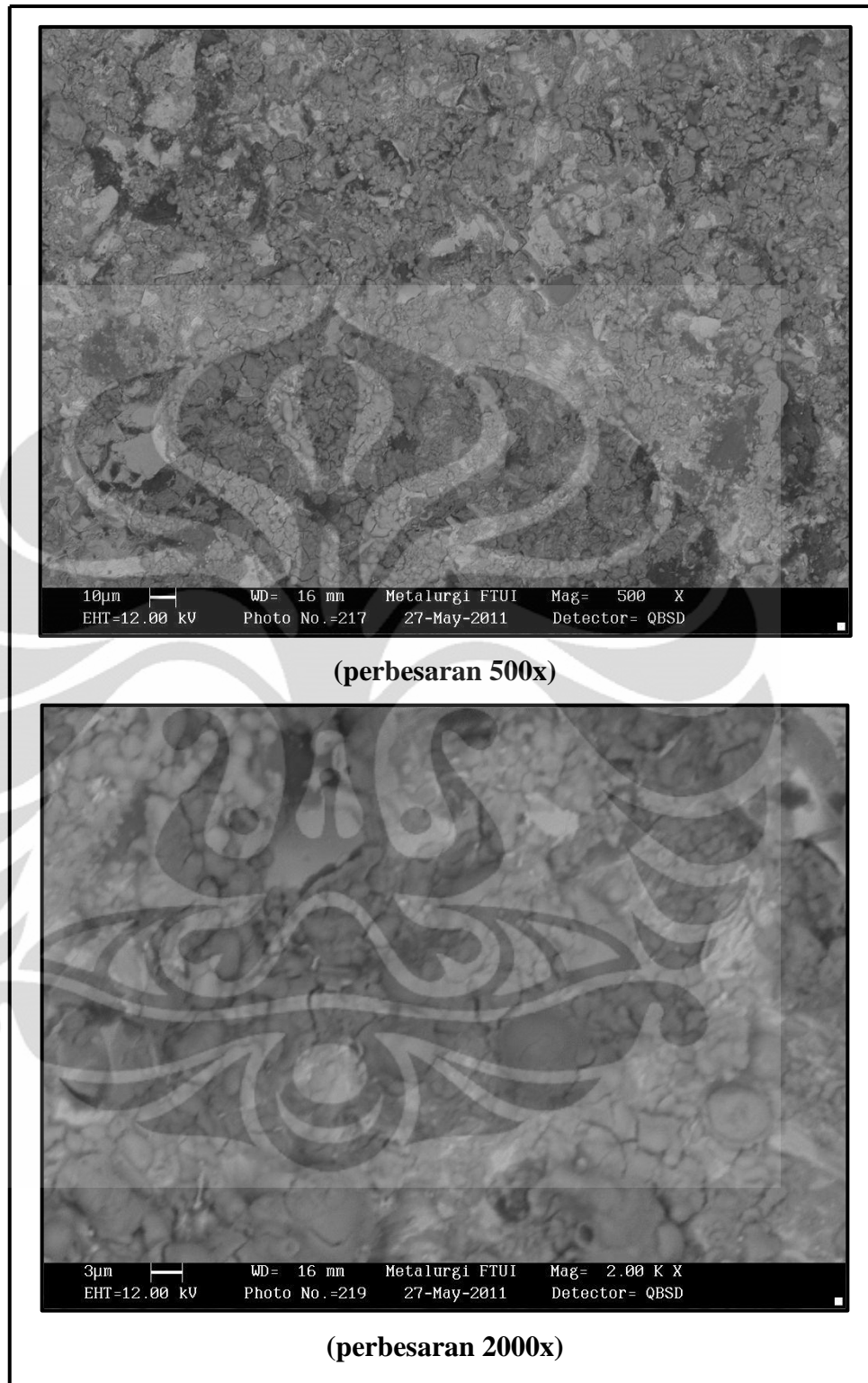
Lapisan besi sulfid (FeS) menghasilkan lapisan yang protektif terhadap korosi namun harus memiliki kontinuitas pada seluruh permukaan. Sebaliknya apabila lapisan FeS tersebut tidak melapisi seutuhnya maka akan menginisiasi terbentuknya korosi galvanik dalam sistem. Selain itu juga dapat terbentuk substansi korosif yang lain seperti gas H<sub>2</sub>S.<sup>(2)</sup>

Persentase FeS yang terdapat di dalam produk korosi tidak terlalu signifikan dan hanya mencapai angka 7.17%. Namun jumlah tersebut konsisten dengan keberadaan bakteri anaerob dalam wadah uji yang juga memiliki persentase yang tidak terlalu besar seperti yang ditunjukkan pada pembahasan uji sampel air formasi terhadap bakteri anaerob.

#### 1.8. Hasil Pengamatan Morfologi Kerusakan

Pengamatan terhadap morfologi kerusakan yang terjadi pada spesimen kupon merupakan tahapan terakhir dari rangkaian penelitian ini. Morfologi kerusakan pada spesimen dilakukan dengan menggunakan alat SEM (*Scanning Electron Microscope*) pada spesimen uji dengan periode celup selama lima belas hari. Spesimen ini dipilih karena memiliki periode celup dengan waktu yang paling lama dalam penelitian sehingga dianggap sebagai spesimen yang paling dapat merepresentasikan morfologi kerusakan yang terbentuk. *Quadrant back scattered detector* (QBSD) dipilih sebagai detektor yang digunakan dalam pengujian ini dan bertujuan untuk mendayagunakan kemampuan dari detektor tersebut mengetahui adanya keberadaan organisme biologis melalui adanya penampakan warna putih mengkilap dan tidak hanya memberikan informasi topografi permukaan seperti yang dilakukan oleh detektor SE (*secondary electron*). Berikut adalah hasil pengujian SEM yang memiliki perbesaran 500x dan 2000x:





Gambar 4.11. Hasil uji SEM permukaan spesimen kupon

Hasil uji SEM yang dilakukan pada permukaan spesimen kupon menunjukkan adanya ciri khas dari korosi mikrobiologi. Terlihat pada gambar

yang menunjukkan adanya pembentukan *tubercle* yang berbentuk seperti gunung-gunung di hampir seluruh permukaan spesimen kupon. Pembentukan *tubercle* merupakan hasil asosiasi antara deposit dalam bentuk *slime* bersamaan dengan bakteri pengoksidasi besi membentuk korosi secara seragam dan ditandai dengan adanya struktur seperti gunung berapi yang disebut sebagai *tubercle* dengan warna coklat kemerahan. Hal ini menciptakan perbedaan konsentrasi oksigen sehingga dapat menghasilkan reaksi Fe menjadi  $Fe^{2+}$  di bawah deposit yang dihasilkan oleh bakteri pengoksidasi besi yang dapat mempercepat laju pembentukan *tubercle* dan menghasilkan permukaan logam di luar *tubercle* menjadi katodik dan permukaan di dalamnya menjadi anodik.

*Tubercle* tersebut merupakan ciri khas korosi secara seragam (*uniform corrosion*) yang umumnya dihasilkan oleh bakteri pengoksidasi besi atau *iron oxidizing bacteria* yang merupakan bakteri aerob. Keberadaan pembentukan *tubercle* terlihat jauh lebih jelas pada perbesaran 2000x. Gambar dengan perbesaran 500x menunjukkan adanya beberapa titik hitam yang merupakan *pitting* dalam ukuran mikro. Keberadaan *pitting* menunjukkan ciri khas yang dihasilkan oleh bakteri pereduksi sulfat atau SRB yang berupa bakteri anaerob yang cenderung menghasilkan korosi ke arah dalam permukaan material logam.

## BAB V

### KESIMPULAN

Penelitian yang dilakukan dengan judul studi pengaruh waktu terhadap korosi mikrobiologi baja karbon API 5L *Grade B* menghasilkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:


1. Laju korosi mengalami penurunan seiring dengan terjadinya penurunan jumlah koloni bakteri. Terjadinya penurunan jumlah koloni bakteri seiring dengan bertambahnya periode pengujian celup disebabkan oleh ketersediaan nutrisi dalam wadah uji yang semakin lama semakin berkurang karena dikonsumsi oleh bakteri yang bersangkutan. Penurunan jumlah koloni bakteri seiring dengan bertambahnya waktu pengujian menyebabkan laju korosi yang terjadi pada spesimen cenderung mengalami penurunan dari periode 3, 6, 9, 12, hingga 15 hari.
2. Keadaan optimum bakteri ditunjukkan pada pengujian dengan periode waktu celup selama 3 hari dengan jumlah koloni bakteri paling tinggi yaitu sebesar 329000 cfu dan laju korosi yang juga paling tinggi yaitu sebesar 5,080 mpy.
3. Korosi mikrobiologi menghasilkan morfologi kerusakan berupa *uniform corrosion* dan *pitting corrosion*. *Tubercle* pada permukaan spesimen membentuk *uniform corrosion* yang dihasilkan oleh bakteri yang bersifat aerob sementara *pitting corrosion* dihasilkan oleh bakteri pereduksi sulfat atau SRB yang cenderung melakukan kerusakan ke arah dalam permukaan material logam.

## DAFTAR PUSTAKA

1. VICO Indonesia. *Delivery Gas & Crude*. 2011
2. Decker, Raymond F., Langer, Edward L.. ASM Metals Handbook Volume 13, Corrosion. United States of America: 1997
3. Jones, Denny A.. Principles and Prevention Corrosion, 2nd edition., Prentice Hall International, Inc., Singapore:1999
4. Javaherdashti, Reza., How Corrosion Affects Industry and Life. Springer-Verlag, London: 2000
5. Peabody, A.W.. Control of Pipeline Corrosion. NACE International, Texas: 2001
6. Baboian, Robert., Treseder, R.S.. NACE Corrosion Engineer's Reference Book. NACE International, Houston: 2002
7. Kearns, Jeffery R., Little, Brenda J.. Microbiologically Influenced Corrosion Testing. ASTM Special Technical Publication, Philadelphia. 1994
8. Borenstein, Susan Watkins. Microbiologically Influenced Corrosion Handbook. Woodhead Publishing, Cambridge: 1994
9. Suhartanti, Dwi. Laju Korosi Baja oleh *Desulfomicrobium Baculatum* dan *Desulfomonas Pigra*. FMIPA Universitas Ahmad Dahlan Yogyakarta: 2006
10. Sequira, C. A. C., Tiller, A.K., Microbial Corrosion-1. Elsevier Science Publisher, Essex: 1988
11. Roberge, Pierre R.. Microbes and Biofouling. Handbook of Corrosion Engineering, McGraw-Hill: 2000
12. [http://xnet.rrc.mb.ca/davidb/applied\\_microbiology.htm](http://xnet.rrc.mb.ca/davidb/applied_microbiology.htm)
13. Hartomo, Wahyu Ardi. Studi Pengaruh Waktu dan Biofilm *Bacillus Subtilis* pada Korosi Mikrobiologi AISI 1006 Akibat Bakteri Pengoksidasi Besi dan Bakteri Pereduksi Sulfat. Teknik Material ITB: 2010
14. Javaherdashti, Reza. Microbiologically Influenced Corrosion: An Engineering Insight. Springer-Verlag, London: 2008
15. [http://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulically\\_activated\\_pipeline\\_pigging](http://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulically_activated_pipeline_pigging)

16. ASTM G31-72. Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals. 2004
17. [http://tech.groups.yahoo.com/group/Migas\\_Indonesia/message/26474](http://tech.groups.yahoo.com/group/Migas_Indonesia/message/26474)
18. <http://deethebiokidz.blogspot.com/2010/12/teknik-isolasi-bakteri.html>





**CENTER FOR MATERIALS PROCESSING AND FAILURE ANALYSIS**  
**DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL-UNIVERSITAS INDONESIA**  
**LABORATORIUM UJI MATERIAL**  
 Kampus Baru UI - Depok 16424 - Indonesia  
 Phone : 021 - 788 49045, 786 3510 Fax : 021 - 78888 111, 7872 350 E-mail : cmpfa@metal.ui.ac.id, cmpfa.ui@gmail.com

---



**LAPORAN PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA**  
**COMPOSITION TEST REPORT**  
 Page 1 of 2

No Laporan <i>Report Nr</i>	0547	Bahan <i>Material</i>	Steel
Pemakai Jasa <i>Customer</i>	Halwan Jaya (Mahasiswa Metalurgi UI)	Identitas Bahan <i>Material Identity</i>	A
Alamat <i>Address</i>	-	Tanggal Terima <i>Receiving Date</i>	September 2 <sup>nd</sup> , 2010
No Kontrak <i>Contract Nr</i>	1004/PT.02/FT04/P/2010	Standar <i>Standard</i>	ASTM A751
Tanggal Uji <i>Date of Test</i>	September 3 <sup>rd</sup> , 2010	Mesin Uji <i>Testing machine</i>	Optical Emission Spectrometer

Kode Sampel <i>Sample Code</i>	C (%)	Si (%)	S (%)	P (%)	Mn (%)	Ni (%)	Cr (%)
A	0.218	0.270	0.024	0.015	0.383	<0.005	0.026
	Mo (%)	Ti (%)	Cu (%)	Nb (%)	V (%)	Al (%)	Fe (%)
	<0.003	<0.002	0.004	<0.003	0.006	0.002	99.0

Depok, September 7<sup>th</sup>, 2010  
**LABORATORIUM UJI MATERIAL**  
 Technical Manager,

  
  
 (Ahmad Ivan Karayan, ST, M.Eng)

FF-26/Met-UI Rev 1

---

Laporan hasil pengujian ini hanya berlaku untuk sampel yang diuji di Laboratorium Uji Material ; publikasi serta penggunaan dokumen ini atau sebagian dari padanya harus dengan izin dari Laboratorium Uji Material

\*\*\*\*\*

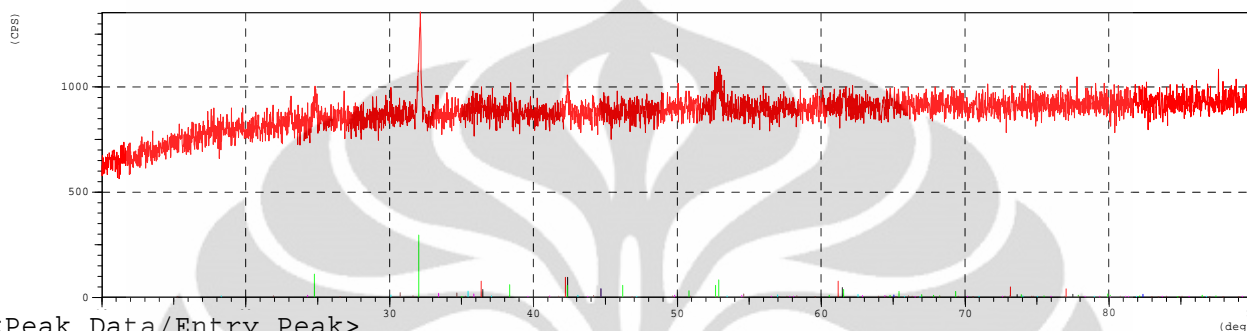
SEARCH / MATCH RESULT

\*\*\*\*\*

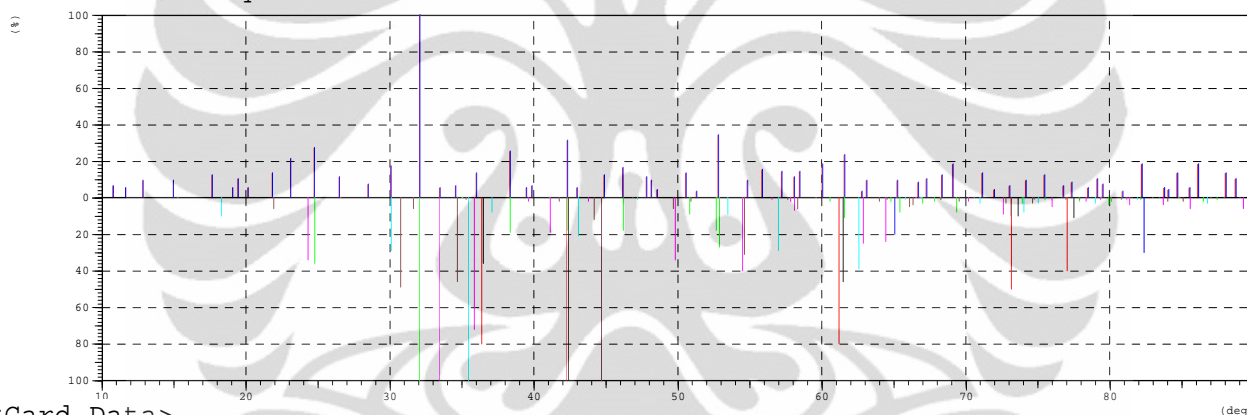
<Unknown Data>

Group Name : 22  
Data Name : Sampel  
File Name : Sampel.PKR  
Sample Name : Sampel  
Comment :  
Date & Time : 05-24-11 10:23:06

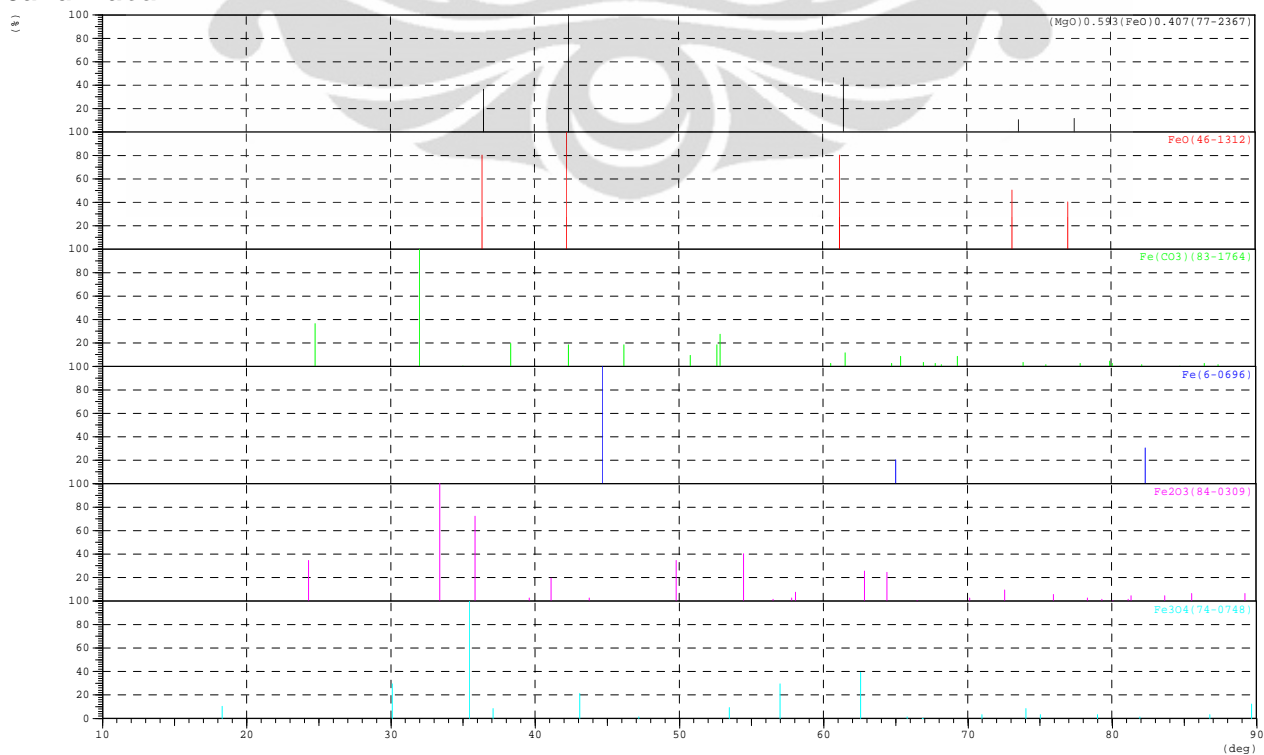
<Raw Data>

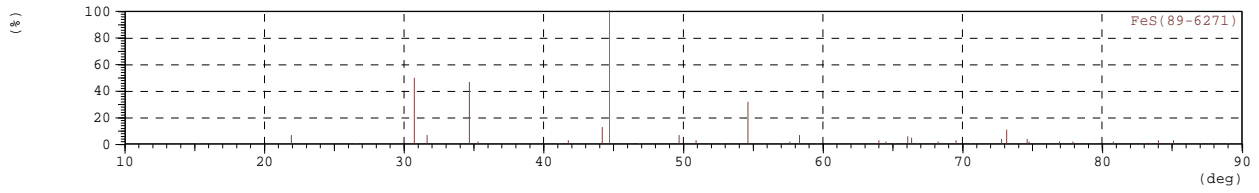


<Peak Data/Entry Peak>



<Card Data>







\*\*\*\*\*

## SEARCH / MATCH RESULT

\*\*\*\*\*

Group Name : 22  
 Data Name : Sampel  
 File Name : Sampel.PKR  
 Sample Name : Sampel  
 Comment :

&lt;Entry Card&gt;

No.	Card	Chemical Formula	S	L	d	I	R
		Chemical Name (Mineral Name)	Dx		WT%	S.G.	
1	77-2367	(MgO)0.593(FeO)0.407	0.389	0.800( 4/ 5)	0.628	0.789	0.396
			4.55	19.11	Fm-3m		
2	46-1312	FeO	0.226	1.000( 5/ 7)	0.512	0.710	0.364
		Iron Oxide ( W\PIustite )	6.03	-----	Fm-3m		
3	83-1764	Fe(CO3)	0.959	0.731(19/26)	0.700	0.611	0.313
		( Siderite )	3.94	66.07	R-3c		
4	6-0696	Fe	0.260	1.000( 3/ 6)	0.649	0.472	0.306
		Iron ( Iron, syn )	7.88	-----	Im-3m		
5	84-0309	Fe2O3	0.292	0.600(15/25)	0.589	0.311	0.110
			5.37	3.85	R-3c		
6	74-0748	Fe3O4	0.419	0.556(10/18)	0.606	0.316	0.106
		( Magnetite )	5.20	3.80	Fd-3m		
7	89-6271	FeS	0.290	0.578(26/45)	0.605	0.096	0.034
			5.28	7.17	P63mc		

Group Name : 22  
 Data Name : Sampel  
 File Name : Sampel.PKR  
 Sample Name : Sampel  
 Comment :

<Card List>

No.	Card	Chemical Formula	S	L	d	I	R
		Chemical Name (Mineral Name)	Dx		WT%	S.G.	
1	40-1245	TiH Titanium Hydride	0.122	1.000( 3/ 3)	0.840	0.700	0.588
				3.99	-----	P42/ncm	
2	22-0540	(Zr,Ca,Ti)O2 Calcium Titanium Zirconium Oxide ( Tazhera	0.206	0.875( 7/11)	0.790	0.749	0.518
				6.14	-----	Fm-3m	
3	43-0645	Sr2CrNbO6 Strontium Chromium Niobium Oxide	0.771	1.000( 7/ 7)	0.705	0.730	0.514
				5.65	-----	Pm3m	
4	50-1841	GdBa2Fe3O8.17 Barium Gadolinium Iron Oxide	0.743	0.900( 9/10)	0.803	0.689	0.497
				19.93	-----	Pm-3m	
5	14-0172	(Mn,Mg,Fe)SiO3.H2O Manganese Magnesium Iron Silicate Hydrate	0.169	1.000( 4/ 4)	0.853	0.575	0.490
				-----	-----	-----	
6	39-1168	Nb0.632Ta0.368H2.01 Niobium Tantalum Hydride	0.131	1.000( 6/ 6)	0.705	0.644	0.454
				9.02	-----	Fm3m	
7	50-1849	SmBa2Fe3O8.31 Barium Iron Samarium Oxide	0.700	0.900( 9/10)	0.779	0.644	0.451
				19.74	-----	Pm-3m	
8	82-2327	Sr0.6Bi0.4FeO2.7	0.840	0.750( 9/12)	0.787	0.759	0.448
				6.42	-----	Pm-3m	
9	50-1842	GdBa2Fe3O7.989 Barium Gadolinium Iron Oxide	0.781	0.800( 8/10)	0.774	0.716	0.443
				19.72	-----	Pm-3m	
10	85-1327	Al ( Aluminum )	0.288	1.000( 5/ 5)	0.648	0.666	0.432
				2.70	-----	Fm-3m	
11	45-0603	BaLaCuTiO5.5 Barium Copper Lanthanum Titanium Oxide	0.815	0.714( 5/ 8)	0.801	0.753	0.431
				6.44	-----	Pm-3m	
12	35-1393	Mg1-xFexO Magnesium Iron Oxide	0.332	0.800( 4/ 5)	0.604	0.890	0.430
				-----	-----	Fm3m	
13	89-4647	(NdBa2Fe3O8.64)0.3333	0.777	0.750( 9/12)	0.781	0.724	0.424
				6.58	-----	Pm-3m	
14	19-0363	Co4S3 Cobalt Sulfide	0.292	1.000( 9/20)	0.626	0.674	0.422
				-----	-----	-----	
15	48-0229	La0.3Bi0.35Ba0.35MnO3 Barium Manganese Bismuth Lanthanum Oxide	0.823	0.909(10/11)	0.607	0.760	0.419
				7.30	-----	Pm-3m	
16	50-1847	NdBa2Fe3O8.48 Barium Neodymium Iron Oxide	0.590	0.889( 8/ 9)	0.837	0.561	0.417
				19.64	-----	Pm-3m	
17	89-4650	(LaBa2Fe3O8.81)0.3333	0.743	0.750( 9/12)	0.792	0.702	0.417
				6.57	-----	Pm-3m	
18	89-4646	(LaBa2Fe3O8.89)0.3333	0.739	0.750( 9/12)	0.792	0.696	0.414
				6.57	-----	Pm-3m	
19	89-3134	Sr(TiMoO6)0.5	0.788	0.750( 9/12)	0.753	0.722	0.408
				5.64	-----	Pm-3m	
20	50-0450	BaFe4La3O11.8 Barium Iron Lanthanum Oxide	0.708	0.778( 7/ 9)	0.779	0.671	0.407
				---	-----	-----	

\*\*\*\*\* SEARCH / MATCH RESULT \*\*\*\*\*

Group Name : 22  
 Data Name : Sampel  
 File Name : Sampel.PKR  
 Sample Name : Sampel  
 Comment :

<Card List>

No.	Card	Chemical Formula	S	L	d	I	R
		Chemical Name (Mineral Name)	Dx		WT%	S.G.	
21	75-0541	LaFeO3	0.786	0.909(10/11)	0.626	0.711	0.405
			6.66	-----		Pm-3m	
22	84-0300	PdH0.64	0.268	0.800( 4/ 5)	0.571	0.886	0.404
			10.86	-----		F23	
23	26-1412	Eu(Cr0.5Ta0.5)O3	0.744	0.800( 8/11)	0.729	0.686	0.400
		Chromium Europium Tantalum Oxide	8.60	-----		Pm-3m	
24	16-0561	Cu(BrO3)2.6H2O	0.325	1.000( 8/ 8)	0.574	0.698	0.400
		Copper Bromate Hydrate	2.60	-----		F	
25	80-1054	(Ba.5La.5)FeO2.955	0.759	0.909(10/11)	0.640	0.685	0.399
			6.62	-----		Pm-3m	
26	50-0079	Sr0.84La0.16RuO3	0.802	0.889( 8/16)	0.682	0.655	0.397
		Strontium Lanthanum Ruthenium Oxide	6.70	-----		Pm-3m	
27	50-0484	La2Ba2Cu2Ti2O11	0.718	0.778( 7/ 9)	0.748	0.681	0.396
		Barium Copper Lanthanum Titanium Oxide	25.83	-----		Pm-3m	
28	77-2367	(MgO)0.593(FeO)0.407	0.389	0.800( 4/ 5)	0.628	0.789	0.396
			4.55	19.11		Fm-3m	
29	89-4648	(NdBa2Fe3O8.52)0.3333	0.783	0.833(10/12)	0.665	0.712	0.394
			6.60	-----		Pm-3m	
30	12-0154	Ag1.2Cu0.8S	0.368	1.000( 4/ 4)	0.647	0.601	0.389
		Copper Silver Sulfide	6.53	-----		Fm-3m	
31	17-0584	Cu3VO4	0.138	1.000( 7/ 7)	0.575	0.674	0.387
		Copper Vanadium Oxide	10.92	-----		I	
32	27-0788	Na0.5Sr0.25NbO3	0.743	0.857( 6/ 7)	0.629	0.718	0.387
		Sodium Strontium Niobium Oxide	-----	-----		-----	
33	82-1435	(Ba0.5La0.5)(Cu0.5Ti0.5)O3	0.763	0.750( 9/12)	0.717	0.719	0.387
			6.56	-----		Pm-3m	
34	45-0850	K2Al2O4	0.712	1.000( 9/10)	0.595	0.648	0.385
		Potassium Aluminum Oxide	0.69	-----		Fd3m	
35	78-0722	CrO.87	0.248	1.000( 5/ 5)	0.676	0.570	0.385
			6.64	-----		Fm-3m	
36	16-0563	Zn(ClO3)2.6H2O	0.182	1.000( 6/ 6)	0.641	0.586	0.376
		Zinc Chlorate Hydrate	2.05	-----		F	
37	89-3089	Sr(CrNbO6).5	0.792	0.750( 9/12)	0.692	0.723	0.375
			5.64	-----		Pm-3m	
38	48-1719	CoO	0.329	1.000( 5/ 8)	0.478	0.781	0.373
		Cobalt Oxide	6.43	-----		Fm-3m	
39	28-1203	Sr3Al2O6	0.696	0.750( 6/ 8)	0.737	0.674	0.373
		Strontium Aluminum Oxide	-----	-----		-----	
40	50-0078	Sr0.76La0.18Ru0.96O2.54	0.780	0.875( 7/14)	0.660	0.646	0.373
		Strontium Lanthanum Ruthenium Oxide	6.27	-----		Pm-3m	

\*\*\*\*\* SEARCH / MATCH RESULT \*\*\*\*\*

Group Name : 22  
 Data Name : Sampel  
 File Name : Sampel.PKR  
 Sample Name : Sampel  
 Comment :

<Card List>

No.	Card	Chemical Formula	S	L	d	I	R
		Chemical Name (Mineral Name)	Dx		WT%	S.G.	
41	39-0270	K2MgGeO4 Potassium Magnesium Germanium Oxide	0.878	0.700( 7/10)	0.750	0.708	0.372
				0.81	-----	F	
42	77-2368	(MgO)0.432(FeO)0.568	0.377	1.000( 5/ 5)	0.488	0.761	0.371
				4.93	-----	Fm-3m	
43	50-1850	SmBa2Fe3O7.994 Barium Iron Samarium Oxide	0.871	0.800( 8/10)	0.598	0.764	0.366
				19.37	-----	Pm-3m	
44	22-0473	AgTaO3 Silver Tantalum Oxide	0.872	0.800( 8/10)	0.655	0.698	0.365
				-----	-----	-----	
45	87-0644	Pt ( Platinum (H-loaded), syn )	0.263	0.800( 4/ 5)	0.507	0.900	0.365
				19.83	-----	Fm-3m	
46	46-1312	FeO Iron Oxide ( W\Piustite )	0.226	1.000( 5/ 7)	0.512	0.710	0.364
				6.03	0.00	Fm-3m	
47	73-2144	Fe.9420 ( Wuestite, syn )	0.343	1.000( 5/ 5)	0.488	0.743	0.363
				5.81	-----	Fm-3m	
48	16-0566	Co(ClO3)2.6H2O Cobalt Chlorate Hydrate	0.218	0.750( 6/ 8)	0.622	0.772	0.360
				2.00	-----	F	
49	89-4645	(LaBa2Fe3O8.93)0.3333	0.756	0.750( 9/12)	0.673	0.713	0.360
				6.54	-----	Pm-3m	
50	77-2373	(MnO)0.441(CaO)0.559	0.245	0.667( 4/ 6)	0.723	0.745	0.359
				4.14	-----	Fm-3m	
51	52-1698	Sr2Sc0.3Fe1.7O5 Strontium Iron Scandium Oxide	0.802	0.909(10/17)	0.543	0.727	0.359
				4.92	-----	Pm-3m	
52	77-0191	ZnO	0.310	1.000( 5/ 5)	0.488	0.735	0.359
				6.89	-----	Fm-3m	
53	39-1328	NbH2 Niobium Hydride	0.131	1.000( 6/ 6)	0.591	0.604	0.357
				6.68	-----	Fm3m	
54	49-1656	Al2Fe5GaO12 Aluminum Gallium Iron Oxide	0.171	1.000( 4/ 4)	0.645	0.553	0.357
				-----	-----	-----	
55	71-1178	CoO	0.329	0.800( 4/ 5)	0.603	0.739	0.356
				6.42	-----	Fm-3m	
56	89-4649	(LaBa2Fe3O8.88)0.3333	0.756	0.750( 9/12)	0.666	0.713	0.356
				6.53	-----	Pm-3m	
57	74-1216	VN	0.320	1.000( 5/ 5)	0.488	0.730	0.356
				5.50	-----	F23	
58	71-0257	Be	0.438	1.000( 5/ 5)	0.579	0.615	0.356
				1.85	-----	P63/mmc	
59	47-0700	Cu4MgO5 Copper Magnesium Oxide	0.388	0.800( 4/ 9)	0.683	0.651	0.356
				7.65	-----	F	
60	85-1164	TiC0.3N0.6H0.08	0.297	1.000( 5/ 5)	0.496	0.717	0.356
				-----	-----	Fm-3m	

\*\*\*\*\*

## SEARCH / MATCH RESULT

\*\*\*\*\*

Group Name : 22  
 Data Name : Sampel  
 File Name : Sampel.PKR  
 Sample Name : Sampel  
 Comment :

&lt;Card List&gt;

No.	Card	Chemical Formula	S	L	d	I	R
		Chemical Name (Mineral Name)	Dx		WT%	S.G.	
61	83-1764	Fe(CO <sub>3</sub> ) ( Siderite )	0.959	0.731(19/26)	0.700	0.611	0.313
				3.94	66.07	R-3c	
62	6-0696	Fe Iron ( Iron, syn )	0.260	1.000( 3/ 6)	0.649	0.472	0.306
				7.88	0.00	Im-3m	
63	84-0309	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.292	0.600(15/25)	0.589	0.311	0.110
				5.37	3.85	R-3c	
64	74-0748	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ( Magnetite )	0.419	0.556(10/18)	0.606	0.316	0.106
				5.20	3.80	Fd-3m	
65	89-6271	FeS	0.290	0.578(26/45)	0.605	0.096	0.034
				5.28	7.17	P63mc	