



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS KELAYAKAN OPERASIONAL
JALUR PIPA KONDENSAT MATERIAL API 5L GRADE B
TERHADAP DISAIN SISTEM PROTEKSI KATODIK**

TESIS

**R. IBRAHIM
1006827316**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI ILMU MATERIAL
PROGRAM PASCA SARJANA
JAKARTA
JULI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS KELAYAKAN OPERASIONAL
JALUR PIPA KONDENSAT MATERIAL API 5L GRADE B
TERHADAP DISAIN SISTEM PROTEKSI KATODIK**

TESIS

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Sains
pada Program Studi Ilmu Material, Fakultas Matematika dan
Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia**

**R. IBRAHIM
1006827316**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI ILMU MATERIAL
PROGRAM PASCA SARJANA
JAKARTA
JULI 2012**

Universitas Indonesia

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : R. Ibrahim
NPM : 1006827316
Tanda Tangan : 
Tanggal : 7 Juli 2012



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : R. Ibrahim
NPM : 1006827316
Program Studi : Ilmu Bahan-Bahan/Material
Judul Tesis : Analisis Kelayakan Operasional Jalur Pipa
Kondensat Material API 5L Grade B
terhadap Disain Sistem Proteksi Katodik

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Sains pada Program Studi Ilmu Bahan-Bahan/Material, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Ketua Dewan Penguji : Dr. Azwar Manaf, M.Met. (.....)
Sekretaris Sidang : Dr. Ir. M. Yudi M. Solihin, MBA, M.Sc. (.....)
Penguji I : Dr. Azwar Manaf, M.Met. (.....)
Penguji II : Dr. Budhy Kurniawan (.....)
Penguji III : Dr. Ir. M. Yudi M. Solihin, MBA, M.Sc. (.....)

Ditetapkan di : Jakarta

Tanggal : 7 Juli 2012

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah swt. karena atas berkat dan rahmat-Nya penulis diberikan segala jalan kemudahan dan kelancaran sehingga dapat menyelesaikan tesis ini. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, mulai dari awal perkuliahan hingga sampai pada penyusunan tesis ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. M. Yudi Masduky Solihin, MBA, M.Sc., selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, pikiran, dan tenaga untuk mengarahkan penulis dalam penyusunan tesis ini;
2. Dr. Azwar Manaf, M.Met. dan Dr. Budhy Kurniawan yang telah bersedia menjadi dosen penguji.
3. Ir. To'at Nursalam, Drs. Sundjono, Ari Yestesia, S.Si., dan pihak-pihak lainnya dari Pusat Penelitian Metalurgi-LIPI, yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data-data sekunder, literatur-literatur penunjang, saran-saran, dan juga melaksanakan pengujian akselerasi korosi;
4. Hendra Adinanta, ST dari Pusat Penelitian Fisika-LIPI dan Ngatenan, A.Md. dari Pusat Penelitian KIM-LIPI, yang telah banyak membantu dalam pengujian tarik material dan pembuatan preparat sampel uji;
5. Kedua orang tua dan keluarga yang telah banyak memberikan bantuan dukungan finansial, material, dan moral; serta
6. A. Daerobi, S.Si., M.Si., rekan seperjuangan selama kuliah yang telah memberikan saran-saran positif selama melakukan penelitian.

Akhir kata, semoga Allah swt. berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah banyak membantu. Semoga tesis yang sederhana ini dapat bermanfaat bagi yang membacanya.

Jakarta, Juli 2012,

R. Ibrahim

Universitas Indonesia

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : R. Ibrahim
NPM : 1006827316
Program Studi : Ilmu Bahan-Bahan/Material
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Jenis Karya : Tesis

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

“Analisis Kelayakan Operasional Jalur Pipa Kondensat Material API 5L Grade B terhadap Disain Sistem Proteksi Katodik”

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, 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 : Jakarta

Pada tanggal : 7 Juli 2012

Yang menyatakan



(R. Ibrahim)

Universitas Indonesia

ABSTRAK

Nama : R. Ibrahim
Program Studi : Ilmu Bahan-Bahan/Material
Judul : Analisis Kelayakan Operasional Jalur Pipa Kondensat Material API 5L Grade B terhadap Disain Sistem Proteksi Katodik

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kelayakan operasional jalur pipa kondensat material API 5L Grade B terhadap disain sistem proteksi katodik. Verifikasi disain dilakukan pada data-data sekunder seperti hasil survey resistivitas tanah; disain awal sistem proteksi katodik; *potential logger* saat pemasangan, setelah pemasangan, satu bulan setelah pemasangan, serta hasil komisioning; hasil perhitungan umur sisa; dan hasil pengujian anoda korban. Pengujian yang dilakukan adalah uji tarik dan uji komposisi kimia untuk menganalisis kelayakan konstruksi material API 5L Grade B serta uji metalografi dan laju korosi untuk menganalisis kelayakan disain sistem proteksi katodik pada jalur pipa kondensat material API 5L Grade B. Dari hasil verifikasi pengujian dengan komisioning menunjukkan bahwa sisa umur pakai memenuhi *design life*. Guna meningkatkan faktor keamanan, maka perlu dilakukan modifikasi disain dalam hal jumlah anoda korban magnesium 32 lbs yang diperlukan dari 96 batang menjadi 100 batang. Dari hasil perhitungan *most allowable operating pressure* (MAOP), pengujian tarik, dan pengujian komposisi kimia menunjukkan material API 5L Grade B dapat dinyatakan layak secara konstruksi sebagai material pipa kondensat. Sementara itu, dari hasil uji metalografi dan laju korosi menunjukkan sistem proteksi katodik layak secara disain untuk dipasang pada jalur pipa kondensat dengan material API 5L Grade B. Secara umum, jalur pipa kondensat dengan material API 5L Grade B yang dipasang sistem proteksi katodik dapat dinyatakan layak secara operasional.

Kata kunci: analisis kelayakan operasional, material API 5L Grade B, disain sistem proteksi katodik.

ABSTRACT

Name : R. Ibrahim

Study Program : Materials Science

Title : *Analysis of Operational Reliability of API 5L Grade B Material
Condensate Pipeline using Cathodic Protection System Design*

The main aim of this experiment is to analyze of the operational reliability of API 5L Grade B material condensate pipeline using cathodic protection system. Design verification was done by the secondary datas such as: soil resistivity; cathodic protection system design before verification; installation, before installation, one month after installation, and commissioning test potential loggers; remaining life assessment; and sacrificial anode laboratory test results. Tensile test and chemical composition test were done to analyze of constructional reliability of API 5L Grade B materials. Metallography and corrosion rate tests were done for analyzing of design reliability of condensate pipeline using cathodic protection system. The result of design verification showed that according to commissioning test, the cathodic protection system was reliable operationally, but, to increase safety factor, it is necessary to redesign of quantity of 32 lbs magnesium anodes from 96 pieces to 100 pieces. The result of most allowable operating pressure (MAOP) calculation, tensile test, and chemical composition test showed that API 5L Grade B material was reliable constructionally as a condensate pipeline material. The result of metallography and corrosion tests showed that cathodic protection system design was reliable to protect API 5L Grade B condensate pipeline from the external corrosion. Generally, API 5L Grade B condensate pipeline with cathodic protection system installed was reliable operationally.

Keywords: analysis of operational reliability, API 5L Grade B material, cathodic protection system design.

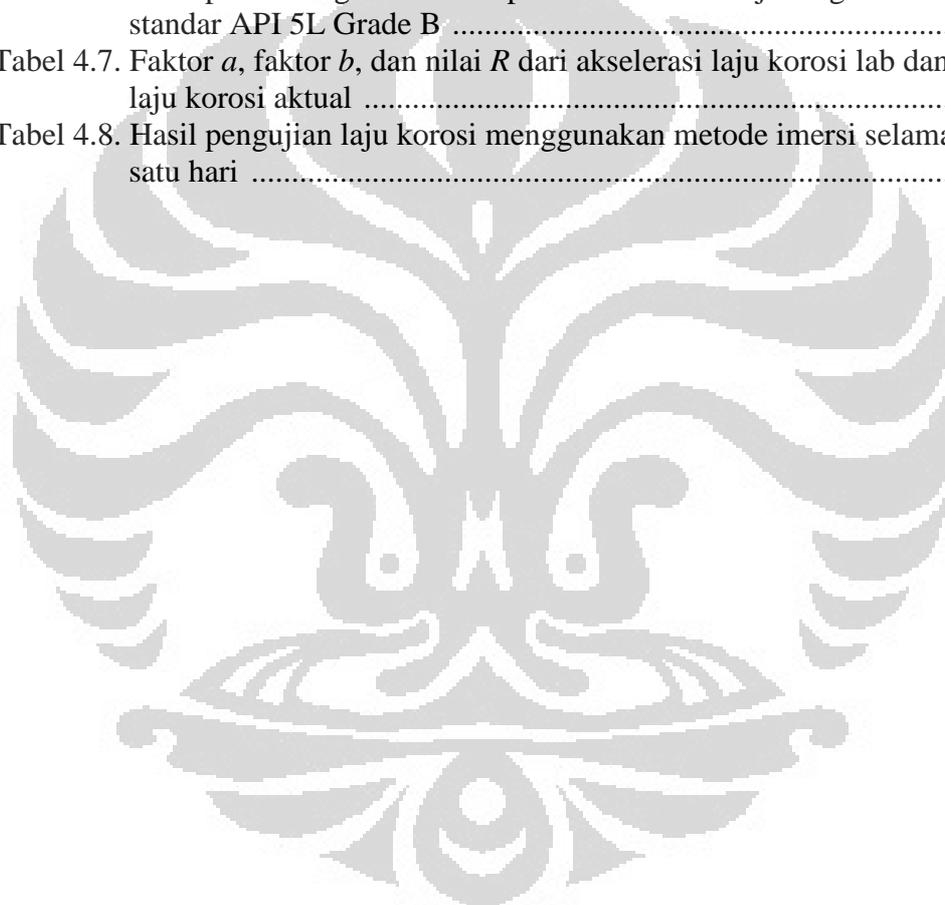
DAFTAR ISI

| | |
|---|-----------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS | ii |
| HALAMAN PENGESAHAN | iii |
| KATA PENGANTAR | iv |
| HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR | v |
| ABSTRAK | vi |
| DAFTAR ISI | viii |
| DAFTAR TABEL | x |
| DAFTAR GAMBAR | xi |
| DAFTAR LAMPIRAN | xii |
| BAB 1. PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1. Latar Belakang | 1 |
| 1.2. Tujuan | 2 |
| 1.3. Perumusan Masalah | 2 |
| 1.4. Ruang Lingkup Penelitian | 3 |
| 1.5. Hipotesis | 3 |
| BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA | 5 |
| 2.1. <i>Cathodic Protection</i> | 5 |
| 2.1.1. Pendahuluan <i>Cathodic Protection</i> | 5 |
| 2.1.2. Pemasangan | 6 |
| 2.1.3. Anoda Korban | 7 |
| 2.1.4. <i>Maintenance</i> pada Sistem Proteksi Katodik | 8 |
| 2.2. Proses Korosi pada Logam | 9 |
| 2.3. Korosi Galvanis | 12 |
| 2.4. Klasifikasi Korosivitas Tanah | 14 |
| 2.5. Erosi, Kavitasi dan <i>Pitting Corrosion</i> | 15 |
| BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN | 17 |
| 3.1. Diagram Alir Metode Penelitian | 17 |
| 3.2. Data-Data Sekunder | 18 |
| 3.2.1. Data Survey Resistivitas Tanah | 18 |
| 3.2.2. Data <i>Potential Logger</i> dan Hasil Komisioning | 19 |
| 3.2.3. Data Anoda Korban | 19 |
| 3.3. Pengujian Mekanik | 19 |
| 3.3.1. Bahan Uji | 19 |
| 3.3.2. Preparasi Bahan | 20 |
| 3.3.3. Uji Tarik | 20 |
| 3.3.4. Nilai Kekerasan Brinell | 21 |
| 3.4. Pengujian Komposisi Kimia | 22 |
| 3.5. Pengujian Laju Korosi | 22 |
| 3.5.1. Metode Kabut Garam (<i>Salt Fog</i>) | 22 |
| 3.5.2. Metode Imersi | 23 |
| 3.6. Analisis dan Pengujian Metalografi | 24 |

| | |
|--|-----------|
| 3.7. Pengolahan Data | 25 |
| BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN | 26 |
| 4.1. Analisis Pengaruh Material API 5L terhadap Hasil Disain | 27 |
| 4.1.1. Analisis <i>Tensile Strength</i> berdasarkan MAOP | 27 |
| 4.1.2. Analisis Pemilihan Material Pipa | 28 |
| 4.1.3. Analisis Hasil Pengujian Tarik dan Perbandingan dengan Standar | 32 |
| 4.1.4. Analisis Nilai Kekerasan Brinell | 34 |
| 4.1.5. Analisis Komposisi Kimia dan Perbandingan dengan Standar | 34 |
| 4.1.6. Pembahasan | 35 |
| 4.2. Analisis Kelayakan Disain Sistem Proteksi Katodik | 37 |
| 4.2.1. Analisis Metalografi Material API 5L Grade B Utuh | 37 |
| 4.2.2. Analisis Metalografi Material API 5L Grade B yang Terkorosi | 39 |
| 4.2.3. Analisis Laju Korosi | 40 |
| 4.2.4. Pembahasan | 46 |
| 4.3. Analisis Kelayakan Operasional Sistem Proteksi Katodik | 50 |
| 4.3.1. Analisis Tingkat Korosivitas Tanah | 50 |
| 4.3.2. Analisis Hasil Verifikasi Disain Sistem Proteksi Katodik | 50 |
| 4.3.3. Analisis Hasil Verifikasi Umur Pakai Berdasarkan <i>Potential Logger</i> dan Hasil Komisioning | 55 |
| 4.3.4. Analisis Hasil Verifikasi Anoda Korban | 56 |
| 4.3.5. Pembahasan | 56 |
| KESIMPULAN DAN SARAN | 59 |
| DAFTAR PUSTAKA | 60 |
| LAMPIRAN | 63 |

DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 2.1. <i>Galvanic series</i> | 8 |
| Tabel 2.2. Klasifikasi korosivitas tanah berdasarkan nilai resistivitas tanah .. | 14 |
| Tabel 2.3. Kalsifikasi derajat keasaman tanah | 14 |
| Tabel 4.1. Indeks pembobot | 29 |
| Tabel 4.2. Indeks sifat berbobot | 30 |
| Tabel 4.3. Hasil uji tarik untuk sampel API 5L utuh (tidak terkorosi) | 33 |
| Tabel 4.4. Hasil uji tarik untuk sampel API 5L terkorosi | 33 |
| Tabel 4.5. Perbandingan hasil uji tarik dengan standar API 5L Grade B | 34 |
| Tabel 4.6. Hasil perbandingan data komposisi kimia hasil uji dengan standar API 5L Grade B | 35 |
| Tabel 4.7. Faktor <i>a</i> , faktor <i>b</i> , dan nilai <i>R</i> dari akselerasi laju korosi lab dan laju korosi aktual | 43 |
| Tabel 4.8. Hasil pengujian laju korosi menggunakan metode imersi selama satu hari | 46 |



DAFTAR GAMBAR

| | | |
|--------------|--|----|
| Gambar 2.1. | Sketsa dari pipa yang terproteksi katodik, anoda korban, dan <i>rectifier</i> | 6 |
| Gambar 2.2. | Pipa terproteksi katodik dengan menggunakan sistem anoda korban | 7 |
| Gambar 2.3. | Reaksi elektrokimia yang menyebabkan korosi pada seng di dalam larutan asam | 12 |
| Gambar 3.1. | Diagram alir metode penelitian | 17 |
| Gambar 3.2. | <i>Specimen</i> uji standar ASTM E8 | 20 |
| Gambar 3.3. | <i>Universal Testing Machine</i> | 21 |
| Gambar 3.4. | Skema pengujian <i>salt fog</i> berdasarkan ASTM | 23 |
| Gambar 3.5. | Skema pengujian laju korosi dengan metode imersi | 24 |
| Gambar 4.1. | Sampel uji API 5L utuh dan struktur mikro sampel API 5L utuh tanpa etsa | 38 |
| Gambar 4.2. | Struktur mikro sampel API 5L utuh dengan etsa nital 2% menunjukkan fasa yang terbentuk adalah ferit dan perlit | 38 |
| Gambar 4.3. | Sampel uji API 5L terkorosi dan struktur mikro sampel API 5L terkorosi tanpa etsa | 39 |
| Gambar 4.4. | Struktur mikro sampel API 5L terkorosi dengan etsa nital 2% menunjukkan fasa yang terbentuk adalah ferit dan perlit, juga ditemukan adanya <i>pitting corrosion</i> . Sketsa bentuk <i>pitting corrosion</i> berdasarkan referensi | 39 |
| Gambar 4.5. | Kurva laju korosi material API 5L Grade B dengan akselerasi secara imersi | 40 |
| Gambar 4.6. | Kurva laju korosi material API 5L Grade B dengan akselerasi <i>salt spray</i> | 41 |
| Gambar 4.7. | Kurva laju korosi aktual | 41 |
| Gambar 4.8. | Perbandingan laju korosi material API 5L Grade B secara imersi, <i>salt spray</i> , dan kondisi aktual | 42 |
| Gambar 4.9. | Grafik hasil survey resistivitas tanah pada kedalaman 1.5 m .. | 51 |
| Gambar 4.10. | Grafik <i>potential logger</i> saat pemasangan sistem proteksi katodik | 53 |
| Gambar 4.11. | Grafik <i>potential logger</i> setelah pemasangan sistem proteksi katodik | 54 |
| Gambar 4.12. | Grafik <i>potential logger</i> satu bulan setelah pemasangan sistem proteksi katodik | 54 |
| Gambar 4.13. | Grafik <i>potential logger</i> hasil pengujian bersama (komisioning) | 55 |

DAFTAR LAMPIRAN

| | |
|--|----|
| Lampiran 1. Dimensi dan bentuk sampel uji tarik | 64 |
| Lampiran 2. Perhitungan-perhitungan disain untuk konstruksi pipa | 65 |
| Lampiran 3. Hasil survey resistivitas tanah | 67 |
| Lampiran 4. Distribusi anoda sebelum verifikasi disain CPS | 69 |
| Lampiran 5. <i>Potential logger</i> saat pemasangan CPS | 70 |
| Lampiran 6. <i>Potential logger</i> setelah pemasangan CPS | 73 |
| Lampiran 7. <i>Potential logger</i> satu bulan setelah pemasangan CPS | 74 |
| Lampiran 8. <i>Potential logger</i> hasil pengukuran bersama (komisioning) | 75 |
| Lampiran 9. Perhitungan-perhitungan verifikasi disain CPS | 76 |
| Lampiran 10. Distribusi anoda setelah verifikasi disain CPS | 85 |
| Lampiran 11. Verifikasi sisa umur pakai sistem proteksi katodik | 86 |
| Lampiran 12. Verifikasi hasil pengujian anoda magnesium 32 lbs | 88 |



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sektor minyak dan gas (migas) merupakan sektor yang paling strategis dalam kontribusinya terhadap perekonomian negara. Meskipun di Indonesia terdapat sektor-sektor lain yang memiliki potensi terhadap pemasukan negara seperti manufaktur, perbankan, agribisnis, dan aktuarial, namun migas tetap menjadi sektor yang paling diminati. Namun, semakin besarnya kebutuhan migas di Indonesia menyebabkan perusahaan-perusahaan yang bergerak di sektor migas semakin bertambah.

Semakin banyaknya investor asing yang masuk ke Indonesia untuk menjajal sektor migas menyebabkan sektor migas tidak hanya dimainkan oleh perusahaan-perusahaan nasional tetapi dimainkan pula oleh perusahaan-perusahaan migas internasional. Akibatnya, semakin banyak perusahaan-perusahaan yang bergerak di sektor migas di Indonesia yang berimplikasi kepada semakin meningkatnya kegiatan eksplorasi migas dan juga distribusi migas.

Khusus untuk kegiatan distribusi migas, pemasangan pipa-pipa distribusi migas pun mutlak meningkat seiring dengan semakin bertambahnya perusahaan migas di Indonesia. Penyaluran distribusi migas melalui bawah tanah pun semakin banyak dilakukan. Seperti kita ketahui pipa-pipa distribusi migas umumnya terbuat dari logam, khususnya baja. Logam, termasuk baja, dapat terkorosi. Korosi pada pipa berbahan baja tentunya akan menimbulkan dampak yang buruk yaitu kebocoran yang dapat berdampak pada berkurangnya distribusi hasil produksi, berkurangnya profit, naiknya *cost* penanggulangan kebocoran, hingga dapat menimbulkan dampak kecelakaan kerja hingga kematian. Oleh sebab itu, untuk pipa-pipa distribusi yang ditanam di bawah tanah pun mutlak harus diproteksi dari korosi. Proteksi korosi internal untuk pipa distribusi bawah tanah dapat dilakukan dengan pemilihan material yang tepat dalam arti sanggup menahan laju korosi erosi dan kavitas hingga umur disain yang ditentukan. Sedangkan proteksi yang terbaik untuk melindungi dari korosi eksternal pada pipa-pipa distribusi bawah tanah adalah *cathodic protection*. Oleh karena itulah

disain *cathodic protection* memegang peranan krusial dalam sistem proteksi korosi pipa-pipa distribusi bawah tanah karena ketepatan disain sistem proteksi katodik akan dapat mampu menahan serangan korosi eksternal akibat tanah yang korosif.

1.2. Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah

1. Menganalisis kelayakan operasional sistem proteksi katodik dengan cara melakukan verifikasi terhadap disain *cathodic protection system* dan analisa umur pakai berdasarkan data *potential logger* dari sebuah proyek yang dijadikan contoh kasus untuk kemudian dilakukan analisis pengambilan keputusan apakah perlu disain ulang (*redesign*) atau tidak.
2. Menganalisis kelayakan konstruksi material API 5L Grade B sebagai pipa kondensat dari proyek yang dijadikan contoh kasus.
3. Menganalisis kelayakan disain sistem proteksi katodik yang diinstalasi pada jalur pipa kondensat material API 5L Grade B.

1.3. Perumusan Masalah

Terdapat sebuah disain sistem proteksi katodik yang belum pernah diverifikasi. Salah satu risiko yang dapat ditimbulkan oleh pipa penyalur gas (kondensat) yang dinstalasi di bawah tanah adalah bahaya kebocoran gas yang juga dapat menimbulkan ledakan bila terdapat kesalahan disain.

Sebab-sebab yang mungkin dapat menimbulkan risiko tersebut adalah pengaruh korosi internal dan eksternal yang dapat mengurangi ketebalan efektif pipa distribusi sehingga mengurangi fungsi dari pipa distribusi. Untuk itu verifikasi disain dilakukan dengan mengecek kelayakan operasional dan konstruksi dari jalur pipa kondensat yang dipasang sistem proteksi katodik.

Untuk mengecek kelayakan operasional disain terhadap serangan korosi eksternal dilakukan verifikasi disain sistem proteksi katodik apakah sudah layak secara operasional maupun keamanannya. Kemudian karena data bahan pipa tidak disebutkan dalam disain sistem proteksi katodik, maka dilakukan analisa material pipa distribusi yang tepat untuk menahan korosi internal dengan cara pengujian

laboratorium dalam hal pengujian mekanik, komposisi kimia, serta uji metalografi. Dalam hal ini sampel uji menggunakan pipa API 5L Grade B. Verifikasi, pengujian, dan analisis tersebut digunakan sebagai dasar justifikasi teknis untuk *improvement* proyek pemasangan sistem proteksi katodik dari sisi faktor disain.

1.4. Ruang Lingkup Penelitian

1. Disain dan verifikasi disain sistem proteksi katodik hanya ditujukan untuk jalur pipa kondensat yang dijadikan contoh kasus.
2. Bahan pipa baja jenis API 5L Grade B utuh dan terkorosi digunakan untuk uji sampel yang terkorosi dalam hal pengujian mekanik dan metalografi.
3. Data sekunder *cathodic protection system* digunakan untuk verifikasi disain *cathodic protection system* dan bersama dengan analisis umur sisa sebagai bahan pengambilan keputusan awal apakah perlu *redesign* atau tidak.
4. Perbandingan data sekunder ukuran nominal pipa yang digunakan pada proyek pemasangan sistem *cathodic protection* dengan data-data hasil perhitungan disain dengan menggunakan material API 5L Grade B digunakan untuk menganalisa pengaruh material API 5L Grade B terhadap disain konstruksi pipa kondensat.

1.5. Hipotesis

Apabila hasil verifikasi data sekunder disain *cathodic protection* menunjukkan perlu adanya perbaikan disain (modifikasi desain) maka analisis keputusan awal adalah perlu *redesign* sistem *cathodic protection*, sebaliknya bila hasil verifikasi menunjukkan disain sudah benar maka keputusan awalnya adalah tidak perlu *redesign*. Apabila hasil verifikasi data sekunder *potential logger* menunjukkan umur sisa sistem *cathodic protection* masih memenuhi target umur disain maka analisis keputusan awal adalah tidak perlu *redesign* sistem *cathodic protection*, namun bila lebih rendah dari umur disain maka keputusan awal adalah perlu *redesign*. Apabila verifikasi hasil pengujian laboratorium anoda korban

menunjukkan tidak perlu adanya *redesign* sistem *cathodic protection* maka analisis keputusan awalnya adalah tidak perlu *redesign* sistem *cathodic protection*, namun bila verifikasi hasil pengujian anoda korban menunjukkan perlu adanya *redesign* maka keputusan awalnya adalah perlu dilakukan *redesign*. Jika ada satu saja dari keputusan-keputusan awal menunjukkan perlu adanya *redesign* maka keputusan yang diambil adalah perlu dilakukan *redesign*, namun bila tidak ada satu pun keputusan awal yang mengharuskan *redesign* maka disain awal proyek tetap digunakan.

Hasil pengujian material API 5L Grade B digunakan sebagai dasar analisis pengaruh material terhadap disain *cathodic protection*. Apabila hasil analisis pengaruh material API 5L Grade B tersebut menunjukkan pipa API 5L Grade B memenuhi kebutuhan operasional disain maka analisis keputusannya adalah pipa API 5L Grade B layak secara konstruksi digunakan sebagai pipa kondensat, namun bila hasil analisis pengaruh material API 5L Grade B tersebut menunjukkan pipa API 5L Grade B tidak dapat memenuhi kebutuhan operasional disain untuk menahan korosi internal maka analisis keputusan yang diambil adalah pipa API 5L Grade B tidak layak secara konstruksi sebagai pipa distribusi kondensat.

Hasil pengujian metalografi dan laju korosi digunakan sebagai dasar analisis kelayakan operasional jalur pipa kondensat material API 5L Grade B terhadap disain sistem *cathodic protection*. Apabila hasil pengujian metalografi dan laju korosi menunjukkan bahwa sistem *cathodic protection* diperlukan maka analisis keputusannya adalah secara disain sistem proteksi katodik layak diterapkan pada jalur pipa kondensat, namun apabila hasil pengujian metalografi dan laju korosi menunjukkan pipa API 5L Grade B yang digunakan masih cukup untuk menahan korosi internal dan eksternal sekaligus maka keputusan yang diambil adalah sistem proteksi katodik tidak layak diterapkan secara disain.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. *Cathodic Protection*

2.1.1. *Pendahuluan Cathodic Protection*

Cathodic protection mungkin merupakan metode yang paling penting dalam usaha pencegahan korosi. Prinsipnya adalah menggunakan penerapan arus listrik secara eksternal untuk menurunkan laju korosi menjadi nol. Permukaan logam yang terproteksi secara katodik dapat dijaga pada lingkungan korosif untuk jangka waktu yang lama. Ada dua jenis *cathodic protection* yaitu *impressed current cathodic protection* (ICCP) dan *sacrificial anode cathodic protection* (SACP), yang juga dikenal sebagai *galvanic cathodic protection* (Revie and Uhlig, 2008).

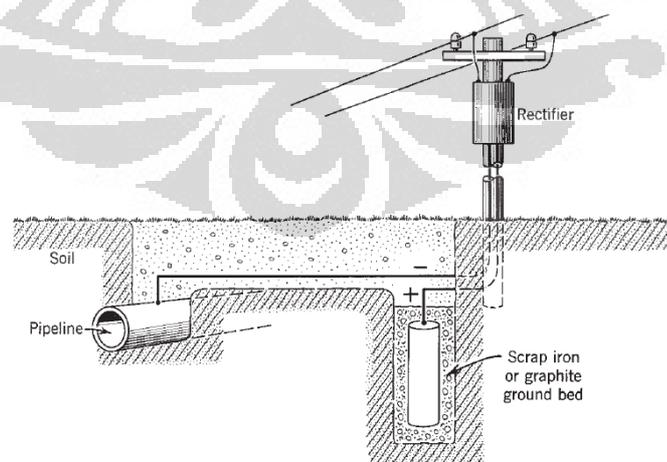
Mekanisme *cathodic protection* bergantung pada arus eksternal yang mempolarisasi permukaan secara keseluruhan ke dalam potensial termodinamik pada anoda. Permukaan menjadi *equipotential* (potensial pada anoda dan katoda menjadi sama), sehingga laju korosi menjadi lambat. Atau, bila diamati dari pandangan lain, pada *external current density* yang cukup tinggi, arus positif mengalir pada seluruh permukaan logam (termasuk area anodik), sehingga tidak ada kecenderungan ion-ion logam larut ke dalam garamnya (Revie and Uhlig, 2008).

Cathodic protection dapat diterapkan untuk melindungi logam, seperti baja, tembaga, timah, dan kuningan, terhadap korosi di semua jenis tanah dan hampir di semua *aqueous media*. *Pitting corrosion* dapat dicegah pada logam-logam pasif, seperti *stainless steel* dan aluminium. *Cathodic protection* sangat efektif untuk mengeliminasi *stress-corrosion cracking* (contohnya pada kuningan, *mild steel*, *stainless steel*, magnesium, aluminium), *corrosion fatigue* pada sebagian logam (tetapi bukan *fatigue*), korosi intergranular (contohnya pada duralumin, 18-8 *stainless steel*), atau dezincifikasi pada kuningan. *Cathodic protection* dapat digunakan untuk mencegah S.C.C. pada *high-strength steel*, tetapi tidak untuk *hydrogen cracking* pada beberapa baja. Korosi diatas *water line* (contohnya tangki air) tidak berpengaruh, karena *impressed current* tidak dapat

mencapai area logam yang tidak berkontak langsung dengan elektrolit. Begitu juga *protective current* diberikan pada *electrically screen areas*, seperti pada interior *water condenser tubes* (kecuali bila anoda korban dimasukkan ke *tubes*), sekalipun *water box* cukup terproteksi (Revie and Uhlig, 2008).

2.1.2. Pemasangan

Cathodic protection membutuhkan sumber arus listrik searah dan elektroda (anoda) korban yang biasanya lebih anodik dari besi atau grafit yang diletakkan pada jarak tertentu dari struktur yang akan diproteksi. Sumber arus searah (DC) dihubungkan dengan kutub positifnya ke elektroda korban dan kutub negatifnya dihubungkan dengan struktur yang akan diproteksi; dalam hal ini, arus listrik mengalir dari elektroda korban ke struktur yang diproteksi melalui elektrolit. Potensial yang diterapkan tidak terlalu *critical* – tetapi diperlukan hanya untuk mencukupi *current density* pada seluruh bagian struktur yang diproteksi. Pada tanah atau air yang memiliki nilai *resistivity* yang tinggi, potensial yang diterapkan harus lebih tinggi daripada kondisi *low resistivity* pada lingkungan. Atau, ketika kondisi ekstrim *long pipeline* hanya diproteksi oleh satu anoda korban saja, maka potensial yang diterapkan harus ditinggikan. Sketsa *cathodic protection* pada *buried pipeline* dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut (Revie and Uhlig, 2008).

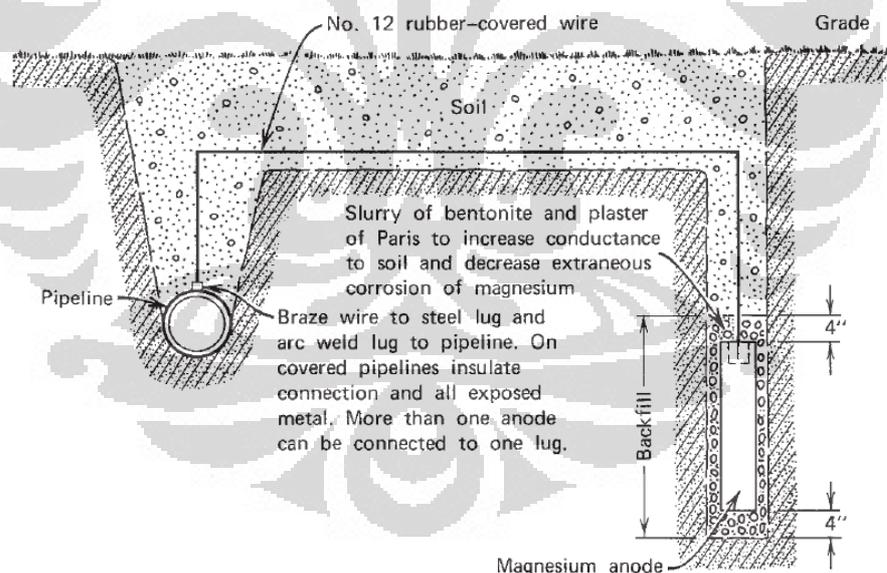


Gambar 2.1. Sketsa dari pipa yang terproteksi katodik, anoda korban, dan *rectifier* (Revie and Uhlig, 2008).

Sumber arus listrik biasanya adalah *rectifier* yang mensuplai potensial yang rendah (DC) dan berarus (Ampere) tinggi. Generator motor biasanya digunakan, meskipun perawatannya lebih sulit. *Windmill generator* digunakan pada area yang memiliki kecepatan angin yang cukup tinggi. Meskipun dalam periode *calm*, beberapa derajat proteksi pada baja berlangsung untuk sementara waktu karena adanya efek inhibisi (penghambatan) produk-produk elektrolisis alkalin yang terdapat pada permukaan katoda (Revie and Uhlig, 2008).

2.1.3. Anoda Korban

Jika anoda korban tersusun dari logam yang lebih aktif pada deret Galvani dibandingkan dengan logam yang diproteksi, maka sel Galvani akan terbentuk dengan arah arus listrik dari anoda korban ke katoda. Sumber arus (contohnya *rectifier*) kemudian dapat diabaikan, dan elektroda disebut anoda korban. Ilustrasinya dapat dilihat pada Gambar 2.2. berikut.



Gambar 2.2. Pipa terproteksi katodik dengan menggunakan sistem anoda korban (Revie and Uhlig, 2008).

Logam korban yang digunakan untuk *cathodic protection* terdiri dari *Magnesium-base alloy*, *Aluminum-base alloy*, hingga *Zinc* (Revie and Uhlig, 2008).

Untuk menentukan anoda korban yang digunakan dapat ditentukan melalui deret galvanis berikut, dimana logam yang lebih aktif dijadikan anoda korban.

Tabel 2.1. *Galvanic series* (Solihin, 2009).

| | |
|-----------------------|---|
| Aktif (Lebih Negatif) | Mg |
| | Zn |
| | Aluminum-Alloys |
| | CS |
| | Cast Iron |
| | 13% Cr (Type 410) Stainless Steel (Active) |
| | 18-8 (Type 304) Stainless Steel (Active) |
| | Naval Brass |
| | Yellow Brass |
| | Cu |
| | 70-30 Cu-Ni Alloy |
| | 13% Cr (Type 410) Stainless Steel (Passive) |
| | Ti |
| | 18-8 (Type 304) Stainless Steel (Passive) |
| | Graphite |
| | Gold |
| Aktif (Lebih Positif) | Platinum |

2.1.4. *Maintenance* pada Sistem Proteksi Katodik

Sistem proteksi katodik mencegah korosi pada permukaan logam yang dilindungi jika fungsinya berjalan dengan baik. Maka dari itu, dalam disainnya harus menambahkan pula *test station*. Selain itu, elektroda referensi juga harus disiapkan oleh staff *maintenance*. Kedua hal tersebut diperlukan untuk perawatan dan inspeksi sistem proteksi katodik agar fungsinya dapat dimonitoring secara rutin (Huck, 2002).

Sistem proteksi katodik harus dicek secara berkelanjutan setiap tahun oleh para NACE *specialists* yang bersertifikat. Untuk sistem anoda korban (SACP), inspeksi dilakukan untuk meyakinkan bahwa struktur yang diproteksi terpolarisasi dengan tepat. Sebagai tambahan, dengan cara pembacaan nilai potensial serta pengukuran *instant on/off voltages* yang dibandingkan dengan

referensi standar NACE, dapat digunakan untuk memastikan bahwa arus proteksi teraliri dengan baik. Untuk sistem arus paksa (ICCP), inspeksi yang dilakukan relatif sama dengan inspeksi pada sistem anoda korban (SACP). Instrumen *rectifier* yang mengalirkan listrik harus dicek secara rutin pada *regular bases* dan arus keluaran serta juga potensial sel referensi yang terbaca harus dibandingkan dengan angka yang terbaca pada *initial baseline* (Huck, 2002).

2.2. Proses Korosi pada Logam

Pada bahan logam, proses korosi yang terjadi normalnya merupakan proses elektrokimia, yaitu, reaksi kimia yang terdapat transfer elektron dari satu unsur ke unsur lainnya. Karakteristik dari atom-atom logam adalah melepaskan elektron, yang disebut oksidasi. Sebagai contoh, sebuah logam hipotetik M yang memiliki elektron valensi n akan teroksidasi mengikuti reaksi seperti berikut

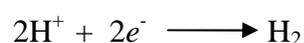


dimana M mengalami surplus ion positif dan melepaskan n elektron valensinya dalam prosesnya; sementara e^{-} digunakan sebagai simbolisasi elektron. Beberapa contoh dari oksidasi logam antara lain



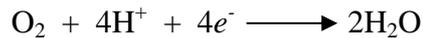
Lokasi dimana proses oksidasi terjadi disebut anoda; oksidasi seringkali disebut juga dengan reaksi anodik (Callister and Rethwisch, 2011).

Elektron yang terlepas hasil dari proses oksidasi logam harus ditransfer ke unsur kimia lainnya sekaligus menjadi bagian dari unsur kimia tersebut. Proses ini disebut dengan reaksi reduksi. Sebagai contoh, beberapa logam terkorosi pada larutan asam yang memiliki konsentrasi ion hidrogen (H^{+}) yang tinggi. Ion H^{+} kemudian akan tereduksi seperti reaksi berikut



dan gas hidrogen (H₂) pun terbentuk (Callister *and* Rethwisch, 2011).

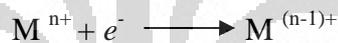
Beberapa reaksi reduksi yang mungkin terjadi bergantung pada kondisi lingkungan dari larutan asam dimana logam terekspos. Pada larutan asam yang memiliki oksigen terlarut, reduksi seperti berikut



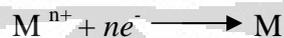
dapat terjadi. Atau, untuk larutan netral atau *basic aqueous* dimana oksigen juga terlarut, reaksi reduksi yang dapat terjadi adalah



Beberapa ion logam yang terdapat pada larutan dapat pula tereduksi, yaitu pada ion-ion yang memiliki valensi lebih dari satu. Reduksi yang terjadi adalah



pada reaksi tersebut valensi ion logam berkurang akibat menerima elektron. Atau, logam akan tereduksi secara keseluruhan dari ion menjadi logam netral mengikuti reaksi



Lokasi dimana reduksi terjadi disebut katoda. Sebagai tambahan, dapat saja terjadi dua atau lebih reaksi reduksi yang disebutkan diatas secara simultan (Callister *and* Rethwisch, 2011).

Reaksi elektrokimia secara keseluruhan mensyaratkan setidaknya ada satu oksidasi dan satu reaksi reduksi, dan akan menjadi penjumlahan dari keduanya atau lebih. Seringkali reaksi oksidasi saja atau reaksi reduksi saja disebut sebagai *half-reaction* karena tidak dapat membentuk akumulasi *net electrical charge*. Artinya, total laju oksidasi harus sama dengan total laju reduksi,

atau seluruh elektron yang terlepas hasil proses oksidasi harus digunakan untuk proses reduksi (Callister *and* Rethwisch, 2011).

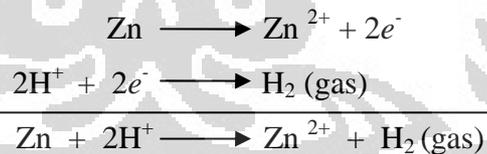
Sebagai contoh, anggaphlah logam seng terimersi pada larutan asam yang mengandung ion-ion H^+ . Pada beberapa bagian dari permukaan logam, seng akan teroksidasi atau terkorosi seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.3 dengan mengikuti reaksi berikut



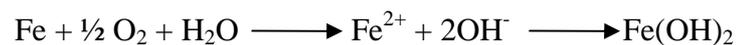
Karena seng merupakan logam, dan merupakan konduktor listrik yang baik, elektron-elektron yang terlepas akan ditransfer ke daerah yang cocok, dimana ion-ion H^+ tereduksi sesuai dengan reaksi berikut



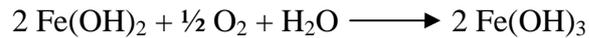
Jika tidak ada lagi reaksi reduksi dan oksidasi yang terjadi, maka total reaksi elektrokimia adalah penjumlahan dari kedua reaksi tersebut, atau bila dituliskan menjadi (Callister *and* Rethwisch, 2011)



Contoh lain adalah oksidasi besi di dalam air yang mengandung oksigen terlarut. Prosesnya terjadi dalam dua tahap. Tahap pertama, Fe teroksidasi menjadi Fe^{2+} [dalam bentuk $Fe(OH)_2$], yang dapat ditulis sebagai berikut

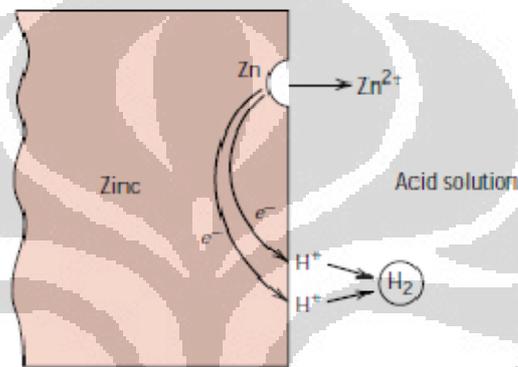


dan, pada tahap kedua, menjadi Fe^{3+} [dalam bentuk $Fe(OH)_3$], yang bila ditulis lengkap reaksinya adalah sebagai berikut



Senyawa Fe(OH)_3 biasa disebut sebagai *all-too-familiar rust* (Callister and Rethwisch, 2011).

Sebagai akibat dari oksidasi, ion-ion logam akan terlarut ke dalam larutan terkorosi menjadi ion-ion, atau akan membentuk senyawa *insoluble* bersama dengan unsur-unsur non-logam (Callister and Rethwisch, 2011).



Gambar 2.3. Reaksi elektrokimia yang menyebabkan korosi pada Zn di dalam larutan asam (Callister and Rethwisch, 2011).

2.3. Korosi Galvanis

Ketika dua logam terhubung secara listrik dan berada pada larutan yang konduktif (elektrolit), maka akan timbul beda potensial listrik antara keduanya. Beda potensial tersebut akan menimbulkan gaya dorong terhadap material terlarut yang lebih negatif. Hal tersebut juga membuat material yang lebih positif akan mengalami reduksi. Tabel 2.1 menunjukkan material emas (Au) dan platinum (Pt) cenderung bersifat lebih positif, hal ini berarti keduanya memiliki nilai potensial yang lebih besar atau bersifat lebih katodik. Sebaliknya seng (Zn) dan magnesium (Mg) cenderung bersifat lebih negatif, hal ini menunjukkan keduanya memiliki nilai potensial yang lebih kecil atau bersifat lebih anodik. Hal inilah yang akhirnya menjadi dasar pemilihan material yang akan diproteksi (katoda) dan material yang akan dikorbankan (anoda korban) (Schweitzer, 2007).

Bila kita lihat Tabel 2.1 akan didapatkan beberapa material yang sama namun memiliki tingkat kereaktifan yang berbeda atau dengan kata lain memiliki

tingkat positif dan negatif yang berbeda. Hal tersebut disebabkan oleh pengaruh logam dan paduannya dalam membentuk *surface films*, khususnya pada lingkungan yang teroksidasi. Lapisan *films* tersebutlah yang menyebabkan perbedaan nilai potensial pada material yang sama. Material yang diselimuti oleh *surface films* akan menjadi pasif (Schweitzer, 2007).

Reaksi antara dua material dapat diprediksi dari posisi relatif material pada deret galvanis. Ketika dibutuhkan penggunaan dua material yang tidak sama, maka dua material yang dipilih sebaiknya yang berdekatan pada deret galvanis. Semakin jauh jarak antara dua material pada deret galvanis, maka laju korosi yang terjadi akan semakin tinggi (Schweitzer, 2007).

Laju korosi juga disebabkan oleh luas area relatif antara anoda dan katoda. Karena pergerakan elektron adalah dari anoda menuju katoda, maka kombinasi antara luas area katoda yang lebih besar dengan luas area anoda yang lebih kecil tidaklah dianjurkan. Korosi yang terjadi pada anoda dapat 100-1000 kali lebih besar dibandingkan dengan apabila kedua area seimbang. Idealnya, luas area anoda harus lebih besar dibandingkan dengan luas area katoda (Schweitzer, 2007).

Perbedaan konsentrasi tanah, seperti kadar air dan resistivitas, dapat dijadikan dasar untuk penentuan area katodik dan area anodik. Dimana terdapat perbedaan konsentrasi oksigen pada air atau pada tanah lembab yang mengalami kontak langsung dengan logam pada area berbeda, katoda akan mengalami peningkatan pada konsentrasi oksigen yang relatif tinggi, sedangkan anoda akan mengalami peningkatan pada titik konsentrasi yang rendah. Bagian logam yang terlepas akan menjadi anoda sedangkan bagian logam yang tidak terlepas akan menjadi katoda (Schweitzer, 2007).

2.4. Klasifikasi Korosivitas Tanah

Klasifikasi korosivitas tanah dapat ditentukan dari hasil pengukuran resistivitas tanah atau berdasarkan hasil pemeriksaan tingkat keasaman tanahnya. Klasifikasi korosifitas tanah berdasarkan tingkat resistivitas tanah dengan

mengacu pada standar BS CP 7361 *Part. 1* dapat dilihat pada Tabel 2.2 berikut ini (BSI, 2012).

Tabel 2.2. Klasifikasi korosivitas tanah berdasarkan nilai resistivitas tanah (BSI, 2012)

| Resistivitas (ohm.cm) | Sifat Tanah |
|-----------------------|----------------|
| < 500 | Sangat Korosif |
| 500 – 2000 | Korosif |
| 2000 – 5000 | Korosif Sedang |
| 5000 – 10000 | Kurang Korosif |
| > 10000 | Tidak Korosif |

Sementara itu klasifikasi derajat keasaman tanah berdasarkan standar BS CP 7361 *Part. 1* adalah sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.3 berikut ini (BSI, 2012).

Tabel 2.3. Klasifikasi derajat keasaman tanah (BSI, 2012)

| Derajat Keasaman | pH | Sifat Korosivitas |
|------------------|-----------|----------------------|
| Ekstrim | < 4.5 | Sangat korosif |
| Sangat kuat | 4.5 – 5.0 | Korosif |
| Kuat | 5.0 – 5.5 | Korosif sedang |
| Medium | 5.5 – 6.0 | Netral |
| Ringan | 6.0 – 6.5 | |
| Netral | 6.5 – 7.3 | |
| Basa ringan | 7.3 – 7.8 | Tidak korosif |
| Basa medium | 7.8 – 8.4 | Korosif Interkristal |
| Basa kuat | 8.4 – 9.0 | |
| Basa sangat kuat | > 9.0 | |

2.5. Erosi, Kavitasi dan *Pitting Corrosion*

Erosi merupakan salah satu bentuk kerusakan pada pipa yang menyebabkan keausan secara mekanik akibat gesekan/tumbukan oleh cairan atau uap air pada kecepatan yang tinggi. Kerusakan ini dapat dipercepat oleh adanya

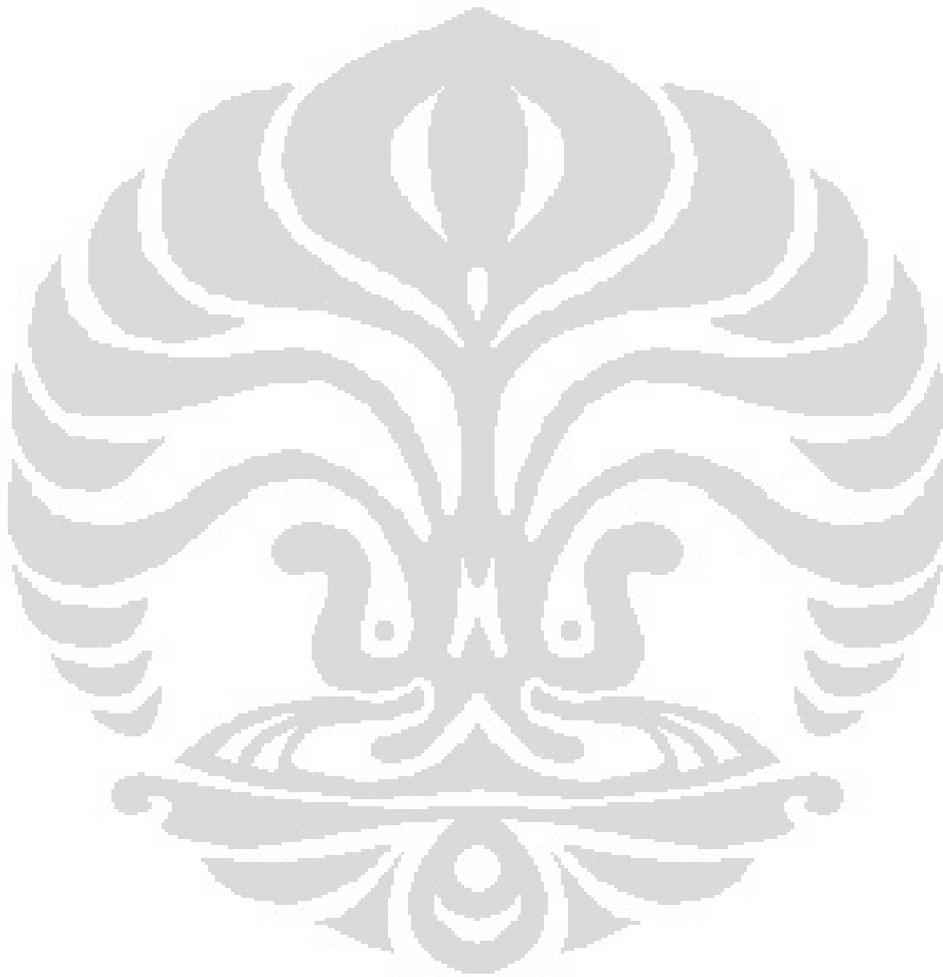
pengaruh tumbukan partikel-partikel padat dalam cairan atau zat terhadap permukaan pipa atau benda. Erosi akibat partikel padat adalah bentuk keausan akibat gerakan mekanik, contohnya erosi kavitasi. Erosi umumnya terjadi pada daerah atau bagian komponen dimana arah aliran fluida mengalami perubahan. Erosi dapat terjadi utamanya pada bagian saluran pemasukan *nozzle (inlet)* dan saluran pengeluaran *nozzle (outlet nozzle)*, tangki bertekanan (*pressure vessel*) atau dinding pipa, *elbows*, dan katup dimana arah aliran berubah (Natsir *et al.*, 2000).

Kecepatan aliran pada kisaran 1.2 – 4.6 m/s dapat menimbulkan erosi, contohnya yang terjadi pada *stainless steel*. Perlu juga digarisbawahi bahwa pada kecepatan aliran yang lebih tinggi hingga kisaran nilai 9.1 m/s, kavitasi dapat terjadi. Fakta lain menunjukkan kavitasi terjadi pada kecepatan aliran diatas kisaran 10 m/s (Chan *et al.*, 2002).

Komponen-komponen pembangkit uap sering mengalami kerusakan akibat erosi kavitasi. Efek erosi kavitasi ini menyebabkan terjadinya penipisan pada dinding pipa atau komponen. Erosi kavitasi paling efektif dihindari dengan mengurangi atau menurunkan kecepatan aliran atau temperatur, tetapi yang lebih banyak diterapkan adalah dengan mengurangi kecepatan aliran. Apabila hal ini tidak dimungkinkan, maka material atau bahan dilakukan perubahan untuk mengurangi efek erosi kavitasi, contohnya penggunaan baja tahan karat (*stainless steel*) (Natsir *et al.*, 2000).

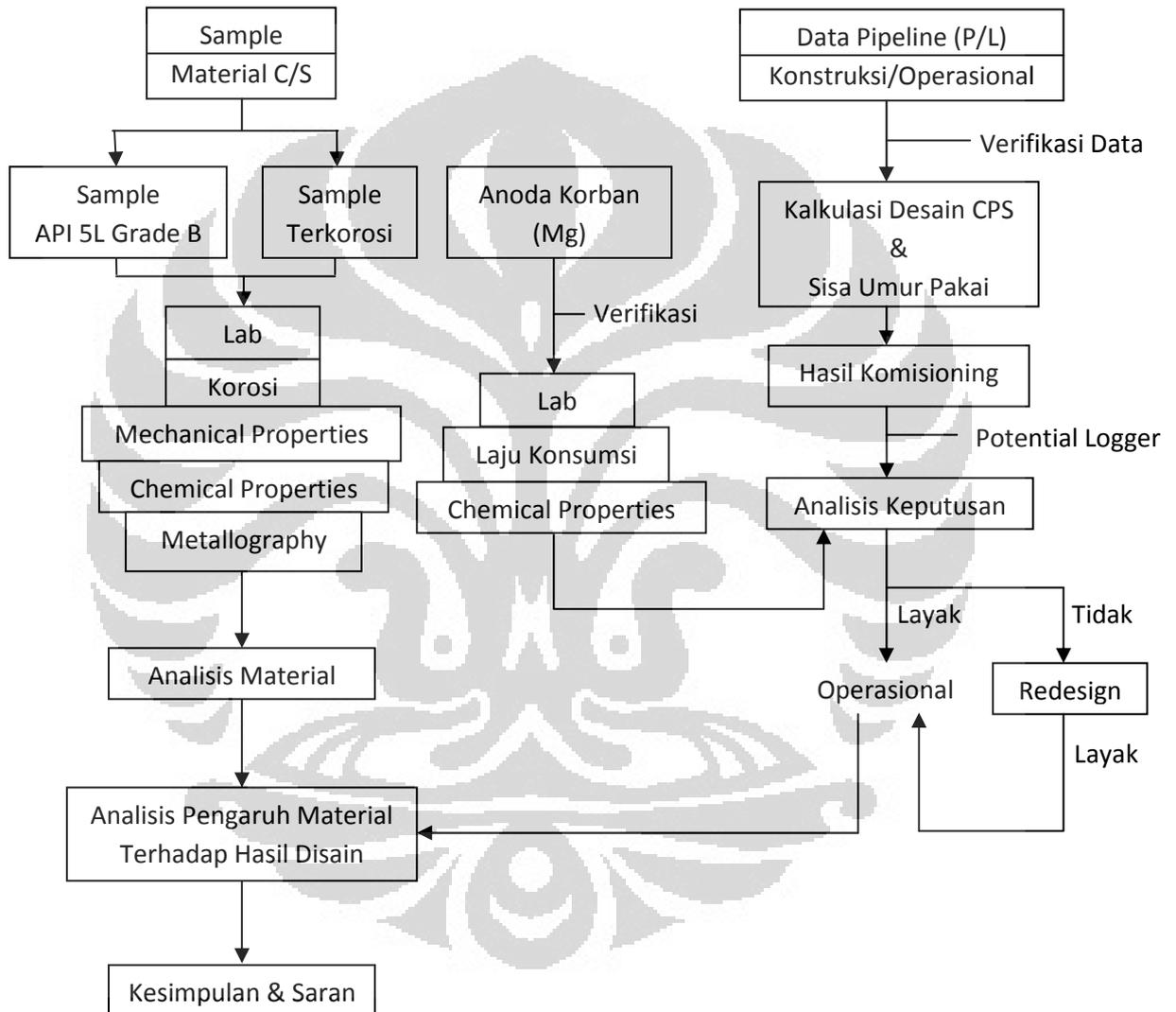
Kavitasi dan erosi dapat membentuk akumulasi *pitting* (Arndt, 2002). Adanya peningkatan aliran turbulen pada laju distribusi gas dapat menimbulkan *pitting corrosion* (Papavinasam *et al.*, 2007). *Pitting corrosion* merupakan bentuk korosi yang paling berbahaya dikarenakan kemunculannya yang sangat sulit diprediksi (Boucherit dan Tebib, 2005). Ketika laju pembentukan formasi *surface layer* sama dengan laju korosi yang disebabkan oleh fluida maka akan terbentuk *surface layer* yang solid yang biasa disebut *compact layer* (Demoz *et al.*, 2009). Ketika laju pembentukan formasi *surface layer* sampai pada kondisi yang tidak sama dengan laju korosi akibat aliran fluida, maka *surface layer* akan mulai terlepas (Demoz *et al.*, 2009). Ketika *surface layer* terlepas dari *base metal*, lapisan *base metal* yang mengalami pelepasan *surface layer* akan mengalami *pit*

initiation dan *pit growth* (Demoz *et al.*, 2009). Terlepasnya *surface layer* tersebut menyebabkan ketahanan permukaan *base metal* terhadap *pitting corrosion* mengalami penurunan (Demoz *et al.*, 2009). Laju *pitting corrosion* setelah terlepasnya *surface area* akan semakin meningkat bila ada fasilitasi akibat material asing yang menyentuh atau menumbuk permukaan *base metal* yang mengalami pelepasan *surface layer* (Demoz *et al.*, 2009).



BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Metode Penelitian



Gambar 3.1. Diagram alir metode penelitian

3.2. Data-Data Sekunder

Data-data sekunder yang diperoleh berupa data proyek pemasangan sistem proteksi katodik untuk jalur pipa kondensat dari suatu proyek pemasangan sistem proteksi katodik yang dilakukan pada tahun 2010. Dari data proyek tersebut diperoleh data-data yang dibutuhkan berupa survey resistivitas tanah, kalkulasi disain sistem proteksi katodik, hasil pengujian anoda korban, dan *potential logger* serta hasil komisioning untuk keperluan verifikasi disain sistem proteksi katodik.

3.2.1. Data Survey Resistivitas Tanah

Pengukuran resistivitas tanah sangat diperlukan baik untuk memprediksi *corrosive electrolyte* maupun dalam hal keperluan disain sistem proteksi katodik (Holtsbaum, 2009).

Prosedur pemeriksaan dalam menentukan kondisi resistivitas tanah menggunakan metoda *winner* atau *4-pins* yang mengacu pada standar prosedur NACE Task Group E4 09 (NACE, 2000). Prinsip kerjanya adalah mengukur arus listrik searah (I) dan perbedaan potensial (E). Dari hasil pengukuran tersebut kemudian diperoleh nilai tahanan tanah, yaitu

$$R = \Delta E/I \dots\dots\dots [1]$$

Dan untuk mengetahui tingkat konduktivitas tanah atau resistivitasnya dihitung berdasarkan rumus empiris sesuai dengan kedalamannya, yaitu

$$\rho = 2.\pi.a.R \dots\dots\dots [2]$$

dimana:

ρ = resistivitas tanah (ohm.cm)

a = jarak antara pin baja dengan pin baja lainnya atau radius kedalaman tanah (cm)

R = tahanan tanah yang diperoleh dari hasil pengukuran (ohm)

Data hasil pemeriksaan ditampilkan dalam bentuk format tabel, sehingga memberikan hasil yang cukup informatif dan memudahkan dalam menganalisa serta melakukan tindak lanjut.

Pemeriksaan tahanan tanah dilakukan secara interval dengan jarak per 250 m serta pada titik interval tersebut dilakukan pengukuran tahanan tanah untuk radius kedalaman 1.0 m, 1.5 m, dan 2.0 m sesuai dengan kedalaman pemasangan pipa sekitar ± 1.5 m.

3.2.2. Data *Potential Logger* dan Hasil Komisioning

Data *potential logger* yang diperoleh adalah pada saat pemasangan, setelah pemasangan, satu bulan setelah pemasangan, serta hasil komisioning. Data-data *potential logger* tersebut digunakan untuk verifikasi kelayakan operasional disain sistem proteksi katodik dan analisis umur sisa disain sistem proteksi katodik. Berdasarkan standar NACE RP-0169-2002 *section* 6, 6.2.2.1.1 disebutkan bahwa kriteria proteksi untuk baja terhadap tanah dengan menggunakan elektrode referensi Cu/CuSO₄ jenuh minimum proteksi katodik harus lebih negatif dari -0.85 V (NACE, 2002).

3.2.3. Data Anoda Korban

Data anoda korban berupa hasil pengujian elektrokimia dan hasil pengujian komposisi kimia. Data-data tersebut digunakan untuk memverifikasi kelayakan operasional yaitu apakah pemakaian anoda magnesium 32 lbs sudah tepat atau tidak untuk disain sistem proteksi katodik.

3.3. Pengujian Mekanik

3.3.1. Bahan Uji

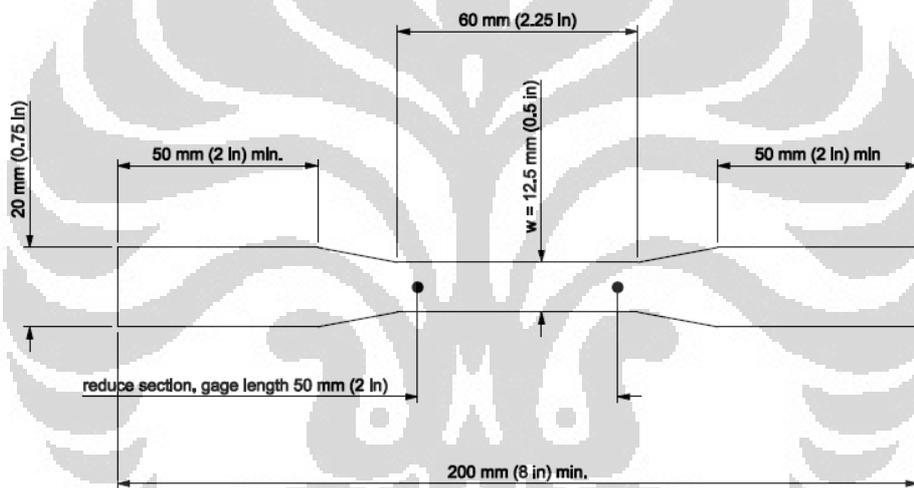
Pipa yang digunakan pada proyek yang diajarkan contoh kasus adalah pipa dengan diameter 3 (tiga) inch dan sch.40. Pipa jenis tersebut memiliki ketebalan sekitar 5.4 mm hingga 5.5 mm.

Untuk pengujian mekanik, digunakan pipa API 5L Grade B dengan ketebalan sekitar 5.4 mm – 5.5 mm sesuai dengan ketebalan pipa kondensat

diameter 3 (tiga) inch sch.40. Pipa untuk pengujian tersebut diperoleh dari PT. Inspektindo Pratama, Jakarta.

3.3.2. Preparasi Bahan

Preparasi bahan uji mekanik mengikuti standar ASTM E8 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2. Preparat sampel uji yang digunakan sebanyak 10 buah dengan rincian 5 (lima) sampel utuh (tidak terkorosi) dan 5 (lima) sampel terkorosi. Pembuatan preparat sampel uji dilakukan di Pusat Penelitian Kalibrasi, Instrumentasi, dan Metrologi, LIPI (Puslit KIM-LIPI), Kawasan PUSPIPTEK, Tangerang Selatan pada bulan Februari 2012.



Gambar 3.2. *Specimen* uji standar ASTM E8.

3.3.3. Uji Tarik

Uji tarik dilakukan untuk mengetahui batas-batas kekuatan, yaitu kekuatan tarik maksimum, kekuatan luluh maksimum, dan elongasi sampel uji. Kekuatan tarik maksimum merupakan kemampuan material menerima beban tarik statis kontinu yang besarnya merupakan hasil bagi antara gaya dan luas penampang melintang awal sampel (Solihin, 2002).

$$\sigma_u = P_u / A_o \dots\dots\dots [3]$$

dimana

σ_u = kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength-UTS*), (kgf/mm²)

P_u = beban maksimum (kg)

A_o = luas penampang melintang awal (mm²)

Pengujian tarik dilaksanakan di Pusat Penelitian Fisika LIPI (P2 Fisika-LIPI), Kawasan PUSPIPTEK, Tangerang Selatan pada hari Senin, 12 Maret 2012 dengan menggunakan alat *Universal Testing Machine* dengan merk 'Krystal Elmec' model UTK 10-E-PC yang memiliki kapasitas pengujian maksimum 100 kN. Bentuk alat uji dapat dilihat pada Gambar 3.3 berikut.



Gambar 3.3. *Universal Testing Machine.*

3.3.4. Nilai Kekerasan Brinell

Nilai kekerasan Brinell mempunyai korelasi linier dengan kekuatan tarik (*tensile strength*) pada baja yang mempunyai *tensile strength* antara 450 N/mm² sampai 2350 N/mm² (Pavlina *and* van Tyne, 2008). Untuk bahan baja berlaku rumus sebagai berikut (Pavlina *and* van Tyne, 2008):

$$Su = 3.45 HB \dots\dots\dots [4]$$

dengan:

Su = kekuatan tarik baja (*tensile strength*)

HB = nilai kekerasan Brinell

Sehingga dengan diketahui nilai *tensile strength* hasil pengujian, maka nilai kekerasan Brinell dapat dihitung menjadi

$$HB = Su/3.45 \dots\dots\dots [5]$$

3.4. Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan untuk mengetahui secara semi kuantitatif komposisi kimia pada bagian tertentu pada material atau bahan. Hasil pengujian komposisi kimia bahan pipa API 5L digunakan untuk mengidentifikasi secara semi kuantitatif kategori atau *grade* dari pipa sampel uji API 5L. Tingkat *grade* pipa API 5L kemudian dijadikan patokan apakah spesifikasi pipa yang diuji sesuai dengan kebutuhan disain konstruksi pipa kondensat.

Pengujian komposisi kimia pada material pipa API 5L sendiri dilakukan dengan menggunakan metode *spark* OES. Lokasi pengujian komposisi kimia berlangsung di Pusat Penelitian Metalurgi LIPI (P2M-LIPI), Kawasan PUSPIPTEK, Tangerang Selatan pada bulan Februari 2012.

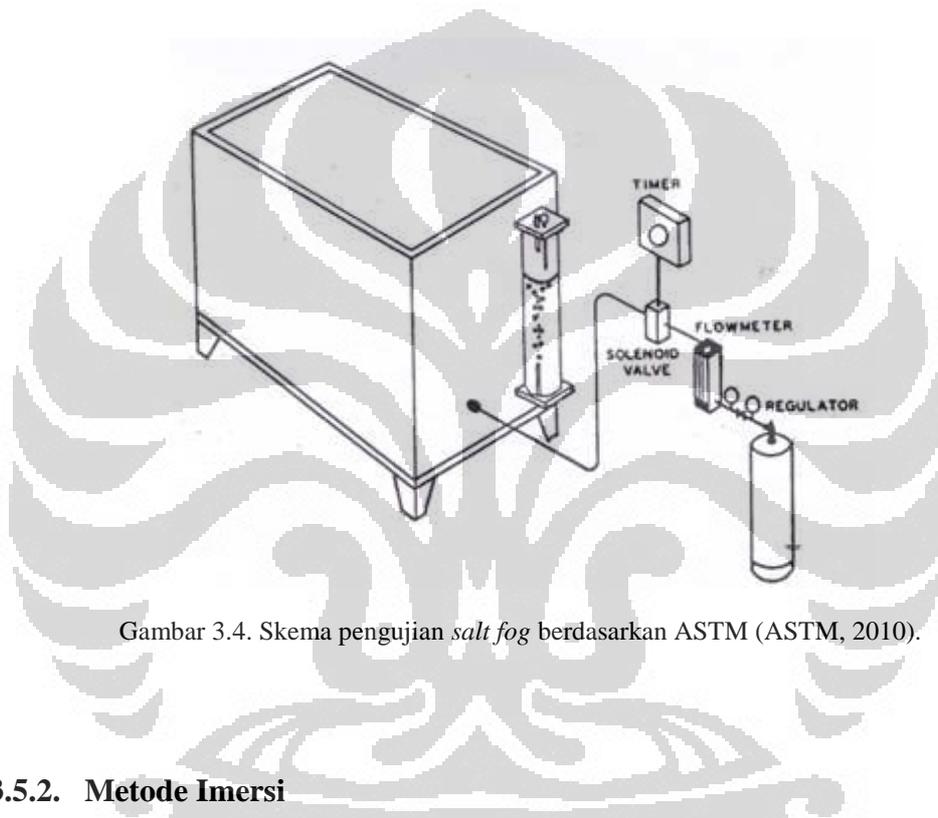
3.5. Pengujian Laju Korosi

3.5.1. Metode Kabut Garam (*Salt Fog*)

Laju korosi logam uji yang diteliti di laboratorium menggunakan alat semprot kabut garam berdasarkan ASTM B117. Kondisi operasi uji dengan kabut garam adalah sebagai berikut (Musalam dan Nasoetion, 2005):

- a. Konsentrasi larutan NaCl: 5% berat
- b. Temperatur operasi di chamber: 35 ± 1 °C
- c. Temperatur tower: 47 ± 2 °C
- d. Tekanan udara $0.7 - 1.7$ kg/cm²
- e. Jumlah kabut tertampung tiap 80 cm²: 1 – 2 ml/jam

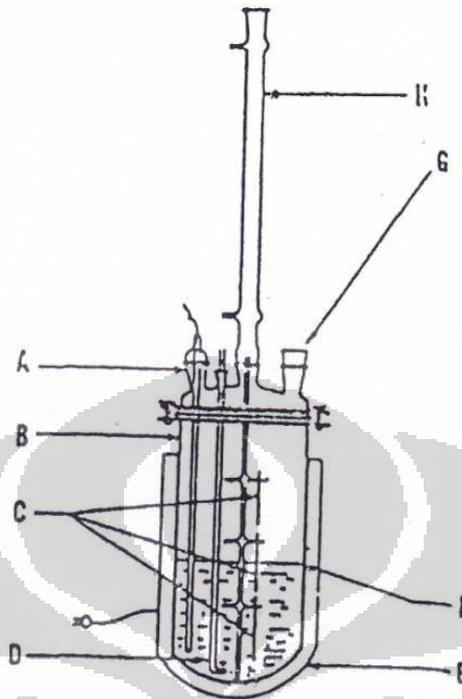
Pengujian laju korosi dengan metode kabut garam dimaksudkan untuk memprediksi laju korosi akibat tekanan hamburan berbentuk gas pada kondisi yang paling ekstrim. Pengujian laju korosi dengan metode kabut garam dilakukan di Pusat Penelitian Metalurgi LIPI (P2M-LIPI), Kawasan PUSPIPTEK, Tangerang Selatan pada bulan April 2012. Skema pengujian laju korosi dengan metode kabut garam dapat diilustrasikan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4. Skema pengujian *salt fog* berdasarkan ASTM (ASTM, 2010).

3.5.2. Metode Imersi

Pengujian laju korosi dengan metode imersi (*immersion method*) dilakukan dengan mengikuti standar NACE. Skema pengujian laju korosi dengan metode imersi dapat dilihat pada Gambar 3.5. Pada Gambar 3.5 tersebut terdiri dari beberapa komponen yaitu *thermowell* (A), *resin flask* (B), spesimen uji yang ditopang oleh penyangga bantuan (C), *gas inlet* (D), *heating mantle* (E), *liquid interface* (F), *opening inflask* sebagai komponen tambahan yang dapat ditambahkan bila diperlukan (G), dan *reflux condenser* (H). Komponen-komponen tersebut dapat dimodifikasi, disimplifikasi, atau bahkan ditambahkan komponennya yang disesuaikan dengan kebutuhan pengujian (NACE, 2002).



Gambar 3.5. Skema pengujian laju korosi dengan metode imersi (NACE, 2002).

Aparatus seperti pada Gambar 3.5 tersebut merupakan bentuk dasar saja, dan bentuk aparatus sangat ditentukan oleh tujuan pengujian dan kondisi sampel yang diuji oleh si penguji (NACE, 2002).

Pengujian imersi pada sampel API 5L Grade B dilakukan menggunakan skema yang sesuai dengan Gambar 3.5 dengan disimplifikasi. Pengujian laju korosi secara imersi dimaksudkan untuk mengetahui laju korosi material API 5L akibat pengaruh turbulensi yang mengakibatkan korosi-erosi dan kavitasi.

3.6. Analisis dan Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi yang dilakukan bertujuan untuk menganalisis kerusakan yang terjadi pada permukaan dalam pipa kondensat sekaligus untuk memprediksi penyebab-penyebab korosi internal yang terjadi pada permukaan dalam pipa kondensat hingga mengalami penurunan ketebalan efektif yang membuat terjadi penurunan fungsi pada pipa kondensat.

Pengujian metalografi dan analisis struktur mikro dilakukan dengan dua cara yaitu tanpa etsa dan menggunakan etsa. Pengujian tanpa etsa (*polished condition*) dilakukan untuk mengetahui struktur butir (*grain structure*). Pengujian dengan etsa dilakukan untuk menciptakan logam sampel terkorosi namun terkendali sehingga dapat terlihat dengan jelas kerusakan atau penyebab kegagalan fungsi yang terjadi (MIT, 2003). Secara umum, ringkasan langkah-langkah percobaan metalografi berdasarkan standar ASM adalah sebagai berikut (MIT, 2003):

- a. Pemotongan sampel uji dari objek
- b. *Mounting* sampel uji
- c. *Grinding* permukaan sampel uji yang di-*mounting* hingga rata
- d. *Polishing*
- e. Pengamatan mikroskopi
- f. Pendokumentasian dengan cara difoto untuk mendapat spesimen tanpa etsa
- g. *Etching* sampel uji
- h. Pengamatan mikroskopi untuk sampel uji yang di-etsa
- i. Pendokumentasian dengan cara difoto untuk mendapat spesimen di-etsa

3.7. Pengolahan Data

Dari data-data sekunder yang dikumpulkan kemudian diolah untuk verifikasi disain sistem proteksi katodik untuk menganalisis kelayakan operasional sistem proteksi katodik untuk mencegah korosi eksternal pada permukaan luar pipa. Sementara hasil pengujian mekanik dan komposisi kimia dimaksudkan untuk menganalisis kelayakan konstruksi pipa API 5L Grade B terhadap disain untuk mencegah korosi internal dari pada permukaan dalam pipa. Sementara hasil pengujian laju korosi dan metalografi dilakukan untuk mengetahui kelayakan disain dan operasional jalur pipa kondensat material API 5L Grade B yang dipasang sistem proteksi katodik.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian tentang analisis kelayakan operasional jalur pipa kondensat material API 5L Grade B terhadap disain sistem proteksi katodik merupakan sebuah studi kasus untuk menganalisis apakah sebuah proyek pemasangan sistem proteksi katodik yang diinstalasi pada sebuah jalur pipa kondensat dan telah dilakukan pengujian bersama (komisioning) sudah dapat dinyatakan layak secara operasional untuk diterapkan pada area tersebut. Selain itu penelitian ini juga ingin mencoba menganalisis apakah material API 5L Grade B dapat dan layak digunakan sebagai material pipa distribusi kondensat. Proyek yang digunakan untuk studi kasus ini sebelumnya sudah mendapatkan izin dari pimpinan proyek yang bersangkutan.

Untuk menganalisis kelayakan operasional jalur pipa kondensat yang dipasang sistem proteksi katodik maka diperlukan pengujian dan analisis secara struktural dan metalurgi serta analisis kelayakan secara operasional.

Pengujian dan analisis secara struktural dititikberatkan pada pipa distribusi yang digunakan yaitu material pipa yang cocok digunakan sebagai jalur pipa kondensat, dimensi pipa yang digunakan sebagai jalur pipa kondensat, serta analisis berdasarkan hasil pengujian laboratorium untuk mengetahui apakah pipa API 5L Grade B dapat digunakan sebagai material jalur pipa kondensat atau tidak berdasarkan kesesuaiannya dengan dimensi yang diperlukan. Pengujian laboratorium untuk analisis material pipa API 5L Grade B berupa uji mekanik dan komposisi kimia. Hasil pengujian dan analisis secara struktural digunakan sebagai bahan pertimbangan untuk analisis pengaruh material pipa API 5L Grade B terhadap hasil disain yaitu kesesuaian ukuran dan dimensi nominal dari pipa kondensat yang digunakan.

Pengujian dan analisis secara metalurgi yang diperlukan berupa pengujian dan analisis metalografi serta pengujian dan analisis laju korosi pada material pipa. Hasil-hasil dari pengujian dan analisis secara metalurgi digunakan sebagai bahan pertimbangan untuk pengambilan keputusan apakah pemasangan sistem proteksi katodik pada jalur pipa kondensat tersebut sudah layak secara

disain untuk diterapkan atau sistem proteksi katodik tersebut tidak perlu diinstalasi pada area tersebut.

Analisis kelayakan secara operasional dilakukan pada sistem proteksi katodik yang telah dipasang. Analisis dilakukan dengan memverifikasi disain sistem proteksi katodik berdasarkan kalkulasi ulang disain sistem proteksi katodik berdasarkan kebutuhan arus proteksi, bobot anoda, serta berdasarkan verifikasi ulang distribusi anoda berdasarkan data *potential logger*; verifikasi sisa umur pakai sistem proteksi katodik; dan verifikasi hasil pengujian laboratorium pada anoda magnesium. Analisis kelayakan secara operasional digunakan untuk bahan pengambilan keputusan apakah sistem proteksi katodik yang dipasang pada jalur pipa kondensat dengan material pipa API 5L Grade B sudah dapat dikatakan layak secara operasional. Analisis kelayakan secara operasional dilakukan bila hasil pengujian dan analisis metalografi menyatakan sistem proteksi katodik dinyatakan layak untuk diinstalasi, namun bila hasil pengujian dan analisis metalografi menyatakan sistem proteksi katodik tidak perlu diinstalasi pada jalur pipa kondensat di area produksi gas tersebut maka analisis kelayakan secara operasional tidak perlu dilakukan.

4.1. Analisis Kelayakan Konstruksi Material API 5L Grade B

4.1.1. Analisis *Tensile Strength* berdasarkan MAOP

Pipa yang digunakan pada proyek berdiameter 3 (tiga) inch dengan sch.40. Pipa dengan diameter 3 (tiga) inch dan sch.40 memiliki dimensi dengan diameter dalam 3.068 inch dan diameter luar 3.50 inch. Dengan ukuran tersebut maka pipa memiliki ketebalan sebesar 0.216 inch.

Untuk menghitung *tensile strength* maksimum yang dapat dibebankan pada pipa tersebut maka terlebih dahulu harus diketahui ketebalan pipa dan *maximum allowable operational pressure* (MAOP). Ketebalan pipa sudah kita ketahui sebesar 0.216 inch, maka kita tinggal membutuhkan nilai MAOP. Sayangnya, nilai MAOP tidak diketahui dari data sekunder laporan proyek. Untuk itu dilakukan studi literatur mengenai tekanan operasional maksimum yang dapat dikenai pada pipa distribusi gas, mengingat fluida yang dialirkan oleh pipa distribusi adalah kondensat dari gas. Nilai tekanan operasional tertinggi dari gas

alam yang umumnya dialirkan oleh pipa gas adalah 1450 psig dan terendah adalah 220 psig (Muhlbauer, 2004). Gas alam dengan tekanan 1450 psig biasanya dialirkan dengan pipa diameter nominal 40 inch, sedangkan gas alam dengan tekanan 220 psig biasanya dialirkan dengan pipa berdiameter nominal 4 (empat) inch. Dengan mempertimbangkan faktor keamanan yang lebih tinggi, maka tekanan gas sebesar 1450 psig digunakan dalam analisis perhitungan sebagai nilai MAOP meskipun diameter nominal pipa hanya 3 (tiga) inch.

Dengan mengetahui nilai ketebalan pipa dan nilai MAOP maka dapat dikalkulasi nilai *tensile strength* maksimum yang dapat dibebankan gas terhadap pipa distribusi. Berdasarkan perhitungan pada Lampiran 2, nilai *tensile strength* maksimum yang dapat dibebankan pada pipa adalah 71.03 MPa atau sebesar 71.03 N/mm². Berdasarkan standar API 5L nilai *tensile strength* minimum yang dapat dibebankan pada pipa API 5L adalah 331 N/mm². Oleh sebab itu, pipa spesifikasi API 5L dapat digunakan sebagai pipa distribusi kondensat.

4.1.2. Analisis Pemilihan Material Pipa

Parameter utama dalam pemilihan material pipa kondensat ditentukan dari nilai *tensile strength* berdasarkan MAOP yang diizinkan sesuai dengan hasil perhitungan. Dengan asumsi MAOP sebesar 1450 psig, maka kita peroleh hasil analisis awal yaitu semua pipa API 5L dapat digunakan sebagai material pipa distribusi kondensat dengan ukuran diameter nominal 3 (tiga) inch sch.40. Nilai *tensile strength* hasil analisis perhitungan MAOP didapatkan sebesar 71.03 N/mm². Standar API 5L menunjukkan nilai *tensile strength* minimum dari API 5L adalah 331 N/mm². Nilai *tensile strength* terendah dari API 5L tersebut adalah kategori API 5L Grade A. Idealnya kita harus gunakan material API 5L Grade A untuk material pipa kondensat. Akan tetapi kondisi di lapangan ternyata sulit memperoleh pipa API 5L Grade A dengan mudah dan bila diperoleh pun belum tentu dapat dipotong-potong untuk memudahkan distribusi serta harganya pun belum tentu cocok. Di satu sisi justru pipa API 5L Grade B sangat mudah diperoleh pada distributor pipa di Indonesia dan banyak pula toko-toko distributor yang menyediakan layanan pemotongan pipa API 5L Grade B tersebut untuk memudahkan distribusi. Sebetulnya baik API 5L Grade A maupun Grade B

memenuhi syarat MAOP sebagai pipa distribusi kondensat. API 5L Grade A paling memenuhi untuk optimasi tekanan operasional disain sementara API 5L Grade B, meskipun tidak seoptimum API 5L Grade A dalam optimasi tekanan operasional disain karena akan lebih *over design*, tetapi di satu sisi merupakan material yang paling optimum dalam hal kemudahan diperoleh dan kemudahan distribusinya dengan tetap memenuhi disain. Oleh karena itu, parameter yang digunakan untuk pemilihan material pipa tidak cukup hanya satu parameter saja tetapi dengan menggunakan lebih dari satu parameter dengan masing-masing parameter diberikan bobot pertimbangan yang berbeda berdasarkan tingkatan urgensinya. Untuk itu, kita dapat menggunakan metode analisis indeks pembobot dan indeks sifat berbobot sebagai langkah-langkah analisis pemilihan material pipa kondensat.

Untuk menganalisis indeks pembobot, kita tentukan terlebih dahulu parameter-parameter sifat yang dipertimbangkan dalam pemilihan material pipa kondensat. Parameter-parameter sifat yang dipilih adalah *tensile strength*, kelangkaan (tingkat kemudahan diperoleh), harga, mampu las, dan mampu mesin. Bobot dari parameter-parameter sifat tersebut tentunya tidak sama sehingga kita harus tentukan indeks pembobot dari masing-masing parameter sifat seperti pada Tabel 4.1 berikut ini.

Tabel 4.1. Indeks pembobot

| Sifat | 1-2 | 1-3 | 1-4 | 1-5 | 2-3 | 2-4 | 2-5 | 3-4 | 3-5 | 4-5 | Jumlah | <i>I</i> |
|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|----------|
| <i>Tensile Strength</i> (1) | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | 4 | 0.4 |
| Kelangkaan (2) | 0 | | | | 1 | 1 | 1 | | | | 3 | 0.3 |
| Harga (3) | | 0 | | | 0 | | | 0 | 0 | | 0 | 0.0 |
| Mampu Las (4) | | | 0 | | | 0 | | 1 | | 1 | 2 | 0.2 |
| Mampu Mesin (5) | | | | 0 | | | 0 | | 1 | 0 | 1 | 0.1 |

Dari analisis indeks pembobot diperoleh nilai bobot untuk parameter sifat *tensile strength*, kelangkaan, harga, mampu las, dan mampu mesin secara berturut-turut adalah 0.4, 0.3, 0.0, 0.2, dan 0.1. Dari nilai-nilai indeks pembobot tersebut dapat diketahui bahwa *tensile strength* merupakan parameter sifat utama yang menjadi dasar pertimbangan karena memiliki nilai indeks pembobot terbesar yaitu 0.4 atau 40%. Sementara parameter harga dapat kita eliminasi untuk analisis selanjutnya karena memiliki indeks pembobot nol. Selanjutnya nilai-nilai indeks pembobot yang tidak bernilai nol akan digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam analisis indeks sifat berbobot.

Parameter sifat yang digunakan untuk analisis indeks sifat berbobot adalah *tensile strength*, kelangkaan, mampu las, dan mampu mesin dengan masing-masing nilai bobot berturut-turut sebesar 0.4, 0.3, 0.2, dan 0.1. Sementara itu material-material yang akan dipertimbangkan adalah API 5L Grade A, API 5L Grade B, API 5L X42, API 5L X65, dan API 5L X80 yang merupakan pipa-pipa API 5L yang umumnya terdapat di pasaran Indonesia. Analisis indeks sifat berbobot dapat kita lihat pada Tabel 4.2 berikut ini.

Tabel 4.2. Indeks sifat berbobot

| Material | <i>Tensile Strength</i> (0.4) | Kelangkaan (0.3) | Mampu Las (0.2) | Mampu Mesin (0.1) | Nilai | <i>I</i> |
|----------------|----------------------------------|---------------------|--------------------|----------------------|--------|----------|
| API 5L Grade A | 0.215 | 4 | 0.36 | 0.818 | 1.4318 | 0.25 |
| API 5L Grade B | 0.172 | 5 | 0.36 | 0.667 | 1.7075 | 0.30 |
| API 5L X42 | 0.172 | 2 | 0.36 | 0.621 | 0.8029 | 0.14 |
| API 5L X65 | 0.134 | 1 | 0.36 | 0.692 | 0.4948 | 0.09 |
| API 5L X80 | 0.115 | 3 | 1 | 1 | 1.2460 | 0.22 |

Semua nilai yang terdapat pada tabel indeks sifat berbobot merupakan nilai-nilai relatif. Nilai relatif kelangkaan merupakan pengurutan dari nilai 1 (satu) hingga 5 (lima) dimulai dari yang paling sulit diperoleh hingga yang paling mudah diperoleh. Nilai relatif *tensile strength* diperoleh dengan membagi nilai *tensile strength* hasil analisis MAOP dengan nilai *tensile strength* minimum material

sesuai standar API 5L. Nilai *tensile strength* hasil perhitungan analisis MAOP adalah 71.03 N/mm^2 , sementara nilai *tensile strength* minimum untuk material API 5L Grade A, Grade B, X42, X65, dan X80 secara berturut-turut adalah 331, 413, 413, 530, dan 620 N/mm^2 . Sebagai contoh perhitungan kita ambil material API 5L Grade B dengan nilai *tensile strength* minimum 413 N/mm^2 . Nilai relatif *tensile strength* material API 5L Grade B diperoleh dengan cara membagi 71.03 dengan 413 sehingga diperoleh 0.172 . Material dengan nilai *tensile strength* paling mendekati 71.03 N/mm^2 akan memiliki nilai *tensile strength* relatif yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan material dengan nilai *tensile strength* paling mendekati 71.03 N/mm^2 merupakan material yang paling baik digunakan sebagai pipa kondensat bila ditinjau dari parameter *tensile strength*. Nilai relatif mampu las diperoleh berdasarkan komposisi unsur belerang (S) yang terdapat pada material sesuai dengan standar API 5L. Seperti kita tahu unsur S merupakan unsur yang tidak diinginkan bila ditinjau dari aspek las. Hal ini disebabkan karena unsur S dapat mudah mengikat Fe menjadi FeS. FeS memiliki titik cair lebih rendah dibandingkan titik cair baja sehingga dapat menimbulkan efek *hot shortness* (retak dalam keadaan panas). Komposisi unsur S maksimum pada API 5L Grade A, Grade B, X42, dan X65 adalah $0.05 \text{ wt.}\%$ sedangkan pada API 5L X80 adalah $0.018 \text{ wt.}\%$. Nilai relatif mampu las dihitung dengan membagi nilai terkecil dengan nilai komposisi S pada masing-masing material. Nilai terkecil adalah $0.018 \text{ wt.}\%$. Sebagai contoh perhitungan kita ambil material API 5L Grade B yang memiliki komposisi S sebesar $0.05 \text{ wt.}\%$. Kemudian nilai relatif mampu las dihitung dengan membagi 0.018 dengan 0.05 sehingga diperoleh nilai 0.36 . Semakin rendah komposisi unsur S pada material maka material tersebut akan semakin mudah dilas, oleh karena itu semakin tinggi tingkat mampu las maka nilai relatifnya akan semakin tinggi pada tabel indeks sifat berbobot tersebut. Nilai relatif mampu mesin didasarkan pada kandungan unsur karbon (C) pada masing-masing material. Seperti kita ketahui semakin banyak kandungan unsur C pada baja maka baja tersebut akan semakin keras, dan semakin keras maka tingkat mampu mesinnya akan semakin kecil. Komposisi unsur C maksimum pada material API 5L Grade A, Grade B, X42, X65, dan X80 secara berturut-turut adalah 0.22 , 0.27 , 0.29 , 0.26 , dan $0.18 \text{ wt.}\%$. Nilai relatif mampu las diperoleh

dengan membagi nilai terkecil komposisi C dengan nilai komposisi C pada masing-masing material. Kita ambil contoh untuk perhitungan pada material API 5L Grade B dengan komposisi maksimum unsur C sebesar 0.27 wt.%. Nilai terkecil yang ada adalah 0.18 wt.%, maka nilai relatif mampu mesin pada API 5L grade B kita hitung dengan cara membagi 0.18 dengan 0.27 sehingga diperoleh 0.667. Setelah semua nilai relatif pada tiap-tiap sifat dan material selesai dihitung, maka langkah selanjutnya adalah menghitung total nilai yang merupakan nilai sifat berbobot. Nilai sifat berbobot pada tiap-tiap material diperoleh dengan cara menjumlahkan nilai-nilai relatif dari semua sifat perbandingan yang telah diberi nilai bobot sesuai indeks pembobot. Sebagai contoh perhitungan kita ambil material API 5L Grade B. Nilai sifat berbobot pada material API 5L Grade B adalah $(0.172 \times 0.4) + (5 \times 0.3) + (0.36 \times 0.2) + (0.667 \times 0.1)$ sehingga diperoleh 1.7075. Setelah semua material diketahui nilai sifat berbobotnya maka ditentukan nilai indeks sifat berbobotnya dengan cara membagi masing-masing nilai sifat berbobot pada tiap-tiap material dengan total nilai sifat berbobot dari seluruh material. Hasil akhir yang diperoleh adalah indeks sifat berbobot untuk material API 5L Grade A, Grade B, X42, X65, dan X80 secara berturut-turut adalah 0.25, 0.30, 0.14, 0.09, dan 0.22. Bila semua nilai indeks sifat berbobot dijumlahkan hasilnya harus 1 (satu) atau sebesar 100%. Material yang paling optimum untuk dipilih sebagai pipa distribusi kondensat ditentukan dari nilai indeks sifat berbobot yang tertinggi. Material yang memiliki nilai indeks sifat berbobot tertinggi adalah API 5L Grade B dengan indeks sifat berbobot 0.30 atau 30%. Jadi, dengan pertimbangan tersebut, material API 5L Grade B dipilih sebagai material pipa kondensat.

4.1.3. Analisis Hasil Pengujian Tarik dan Perbandingan dengan Standar

Hasil pengujian tarik digunakan untuk menganalisis apakah material pipa API 5L yang diuji dapat digunakan sebagai pipa kondensat atau tidak. Hasil pengujian tarik dapat dilihat pada Tabel 4.3 dan 4.4. berikut ini

Tabel 4.3. Hasil uji tarik untuk sampel API 5L utuh (tidak terkorosi)

| Set Parameters | | | Test Parameter | | | Max. Load (N) | Tensile Strength (N/mm ²) | Elongation |
|-------------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|------------------|----------------------|---------------|---------------------------------------|------------|
| Gauge Length (mm) | Initial Width (mm) | Initial Thickness (mm) | Final Gauge Length (mm) | Break Width (mm) | Break Thickness (mm) | | | |
| 62 | 12.9 | 5.35 | 72.00 | 9.40 | 3.00 | 33 490 | 485.256 | 0.1613 |
| 62 | 12.8 | 5.35 | 73.00 | 9.25 | 3.10 | 33 615 | 490.873 | 0.1774 |
| 62 | 12.9 | 5.35 | 77.45 | 9.10 | 3.15 | 33 165 | 480.547 | 0.2492 |
| Higher Tensile Strength | | | | | | | 490.873 | 0.1774 |

Tabel 4.4. Hasil uji tarik untuk sampel API 5L terkorosi

| Set Parameters | | | Test Parameter | | | Max. Load (kN) | Tensile Strength (N/mm ²) | Elongation |
|-------------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|------------------|----------------------|----------------|---------------------------------------|------------|
| Gauge Length (mm) | Initial Width (mm) | Initial Thickness (mm) | Final Gauge Length (mm) | Break Width (mm) | Break Thickness (mm) | | | |
| 62 | 12.7 | 5.35 | 75.0 | 9.10 | 3.10 | 32 765 | 482.228 | 0.2097 |
| 62 | 13.0 | 5.35 | 74.0 | 9.30 | 3.20 | 32 190 | 462.832 | 0.1936 |
| 62 | 12.6 | 5.35 | 76.0 | 9.00 | 3.00 | 32 715 | 485.314 | 0.2258 |
| 62 | 12.8 | 5.35 | 74.4 | 9.15 | 3.15 | 33 515 | 489.413 | 0.2000 |
| Higher Tensile Strength | | | | | | | 489.413 | 0.2000 |

Dari hasil pengujian tarik dapat diketahui bahwa nilai *tensile strength* untuk sampel API 5L yang tidak terkorosi sebesar 490.873 N/mm² dan untuk sampel API 5L yang terkorosi sebesar 489.413 N/mm². Nilai-nilai tersebut tentunya berada pada kisaran diatas *tensile strength* maksimum yang dapat dibebankan akibat tekanan gas alam 1450 psig yaitu 71.03 N/mm². Maka pipa API 5L yang diuji lebih dari cukup untuk menahan tekanan operasional sebesar 1450 psig.

Sementara itu untuk mengetahui *grade* dari pipa API 5L yang diuji dilakukan perbandingan dengan standar API 5L. Hasil perbandingan dapat dilihat pada Tabel 4.5 berikut.

Tabel 4.5. Perbandingan hasil uji tarik dengan standar API 5L Grade B

| Tensile Strength (N/mm ²) | | |
|--|----------------------------------|--|
| Sampel API 5L (tidak terkorosi) | Sampel API 5L (terkorosi) | Standar API 5L untuk Grade B (API, 2010) |
| 491 | 489 | 413 min. |

Dengan nilai *tensile strength* 490.873 N/mm² dan 489.413 N/mm² untuk sampel API 5L utuh dan terkorosi secara berturut-turut serta dengan membandingkannya pada standar *tensile strength* minimum API 5L Grade B sebesar 413 N/mm², maka material pipa yang digunakan pada sampel uji cenderung masuk pada kategori API 5L Grade B.

4.1.4. Analisis Nilai Kekerasan Brinell

Dengan nilai *tensile strength* dari material API 5L Grade B sebesar 490.873 N/mm² dan 489.413 N/mm² untuk sampel utuh dan terkorosi secara berturut-turut, maka nilai *tensile strength* berada pada kisaran angka nilai antara 450 N/mm² sampai 2350 N/mm² sehingga nilai kekerasan Brinell dapat dihitung dengan menggunakan persamaan [5]. Dengan demikian nilai kekerasan Brinell untuk sampel API 5L Grade B utuh adalah 142.28 N/mm², sementara untuk sampel API 5L Grade B yang terkorosi adalah 141.86 N/mm². Dengan nilai *tensile strength* maksimum pipa kondensat yang diizinkan sebesar 71.03 N/mm², maka dengan juga menggunakan persamaan [5], nilai kekerasan Brinell yang diizinkan untuk menahan tekanan operasional maksimum 1450 psig adalah sebesar 20.59 N/mm². Dengan nilai kekerasan Brinell diatas 20.59 N/mm², material pipa API 5L Grade B sudah cukup mampu untuk menahan tekanan erosi yang tegak lurus dengan arah aliran kondensat.

4.1.5. Analisis Komposisi Kimia dan Perbandingan dengan Standar

Hasil uji komposisi kimia juga digunakan untuk menentukan *grade* dari pipa API 5L yang diuji. Hasil pengujian komposisi kimia dan perbandingannya dengan standar dapat dilihat pada Tabel 4.6. Dari hasil pengujian komposisi kimia tersebut yang kemudian dibandingkan dengan standar API 5L Grade B dalam hal

komposisi maksimum unsur karbon (C), belerang (S), fosfor (P), dan mangan (Mn) menunjukkan bahwa material yang digunakan sebagai sampel uji masuk pada kategori API 5L Grade B. Hasil ini cukup untuk menguatkan hasil pengujian tarik (mekanik) sebelumnya yang juga menunjukkan material sampel uji menunjukkan kecenderungan jenis API 5L Grade B.

Tabel 4.6. Hasil perbandingan data komposisi kimia hasil uji dengan standar API 5L Grade B

| Unsur | Komposisi Kimia (%) | |
|-------|---------------------|------------------------------------|
| | Metode Spark OES | Standar API 5L Grade B (API, 2010) |
| C | 0.158 | 0.27 max. |
| Si | 0.010 | |
| S | 0.014 | 0.05 max. |
| P | 0.014 | 0.04 max. |
| Mn | 0.338 | 1.15 max. |
| Ni | 0.012 | |
| Cr | 0.008 | |
| Mo | 0.001 | |
| Cu | 0.026 | |
| W | < 0.0001 | |
| Ti | 0.001 | |
| Sn | 0.002 | |
| Al | 0.044 | |
| Pb | < 0.0001 | |
| Zr | < 0.0001 | |
| Zn | < 0.0001 | |
| Fe | 99.37 | |

4.1.6. Pembahasan

Berdasarkan kalkulasi hasil perhitungan disain menunjukkan nilai *tensile strength* maksimum yang dapat dibebankan pada pipa untuk distribusi kondensat adalah 71.03 N/mm^2 . Sementara itu pipa API 5L memiliki spesifikasi *tensile strength* minimum yang dapat dibebankan adalah 331 N/mm^2 . Nilai *tensile strength* minimum 331 N adalah untuk pipa kategori API 5L Grade A. Sementara itu untuk pipa API 5L dengan spesifikasi *grade* diatas API 5L Grade A memiliki nilai *tensile strength* minimum diatas 331 N/mm^2 . Hal ini menunjukkan bahwa

semua pipa dengan spesifikasi API 5L dapat digunakan pada sebagai pipa kondensat yang diinstalasi di bawah tanah pada area produksi gas tersebut. Dengan penjabaran tersebut tentunya secara konstruksi pipa API 5L Grade B berarti juga dapat digunakan sebagai material pipa kondensat yang mendistribusikan kondensat gas karena nilai *tensile strength* minimum yang dimilikinya berada diatas pipa API 5L Grade A.

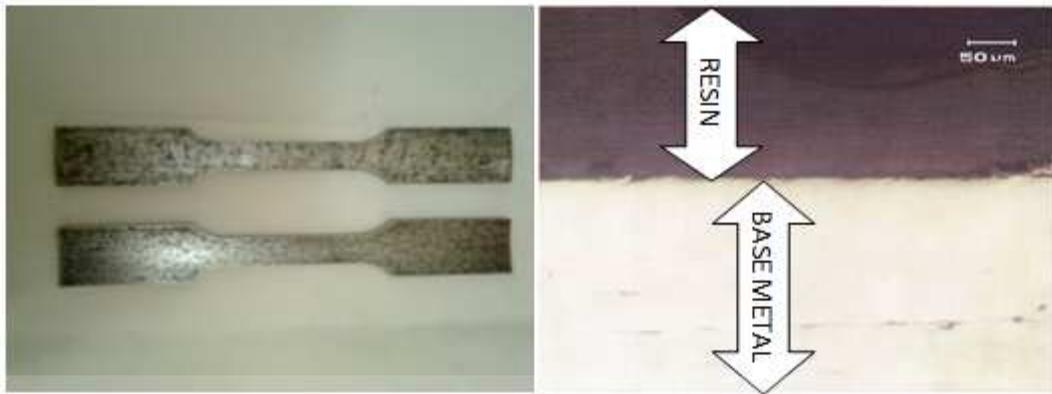
Penjabaran diatas menunjukkan bahwa berdasarkan kalkulasi disain dan dibandingkan dengan standar API 5L Grade B, pipa API 5L Grade B layak digunakan sebagai pipa distribusi kondensat pada area produksi gas tersebut. Namun, untuk lebih meyakinkan secara konstruksi tentunya pembuktian dengan kalkulasi disain saja tidak cukup, maka untuk itu diperlukan pula pengujian laboratorium dalam hal uji mekanik dan komposisi kimia. Hasil pengujian mekanik berupa uji tarik dan hasil pengujian komposisi kimia menunjukkan pipa yang diuji merupakan jenis API 5L Grade B. Berdasarkan hasil uji tarik tersebut pula lah dapat disimak bahwa *tensile strength* material API 5L Grade B berada diatas kisaran 71.03 N/mm^2 yang tepatnya 490.873 N/mm^2 untuk sampel yang tidak terkorosi dan 489.413 N/mm^2 untuk sampel yang terkorosi. Hal ini menunjukkan secara uji mekanik berupa uji tarik, material API 5L Grade B cukup untuk menahan *tensile strength* yang diizinkan untuk pipa distribusi kondensat yaitu 71.03 N/mm^2 . Sehingga ini menunjukkan pipa API 5L Grade B mampu menahan korosi internal akibat laju fluida kondensat yang memiliki tekanan operasional maksimum sebesar 1450 psig. Laju fluida kondensat tentunya memiliki kecepatan tertentu dalam pendistribusiannya. Kecepatan fluida yang sangat tinggi dapat menyebabkan erosi atau kavitasi-korosi. Selain itu aliran kondensat dengan kecepatan tertentu tentunya juga dapat menimbulkan turbulensi pada titik-titik tertentu. Adanya peningkatan aliran turbulen pada laju distribusi kondensat dapat menimbulkan *pitting corrosion*. Oleh sebab itu pemilihan pipa API 5L Grade B yang menunjukkan mampu menahan tekanan kondensat maksimum yang tegak lurus arah aliran fluida kondensat dengan nilai sebesar 1450 psig yang merupakan tekanan operasional tertinggi gas alam yang didistribusikan pada pipa, sehingga tentunya juga mampu menahan laju erosi, kavitasi-korosi, dan *pitting corrosion* hingga ketebalan pipa API 5L Grade B

tergerus atau terkorosi habis yaitu 0.216 inch atau sekitar 5.5 mm. Selain tekanan yang tegak lurus arah aliran fluida kondensat, tekanan kavitas dan erosi yang tegak lurus arah aliran kondensat juga berpotensi menjadi penyebab korosi internal tersebut. Tekanan kavitas yang tegak lurus arah aliran kondensat dapat terjadi bila ada turbulensi sehingga gelembung-gelembung fasa gas yang bergerak tegak lurus arah aliran fluida kondensat dapat menimbulkan kavitas-korosi yang apabila turbulensinya meningkat akan dapat menimbulkan resiko *pitting corrosion*. Untuk itu material pipa juga harus dapat menahan tekanan kavitas yang tegak lurus arah aliran fluida kondensat. Maka dari itu material pipa harus pula dapat menahan tekanan vertikal 20.59 N/mm² yang merupakan batas aman nilai kekerasan Brinell pada pipa kondensat pada tekanan 1450 psig. Nilai kekerasan Brinell sampel material API 5L Grade B yang diukur menunjukkan nilai 142.28 N/mm² untuk sampel utuh dan 141.86 N/mm² untuk sampel yang terkorosi. Nilai-nilai kekerasan Brinell pada sampel API 5L Grade B tersebut menunjukkan bahwa material pipa API 5L Grade B sanggup menahan tekanan vertikal kavitas dan erosi sebesar 20.59 N/mm². Jadi, secara konstruksi pipa API 5L Grade B sudah layak digunakan sebagai material pipa kondensat yang diinstalasi pada kedalaman tanah 1.5 m di area produksi gas tersebut untuk menahan laju korosi internal akibat pengaruh tekanan operasional kondensat yang tegak lurus arah aliran fluida kondensat maupun tekanan operasional gelembung-gelembung fasa gas dan erosi yang tegak lurus arah aliran fluida kondensat.

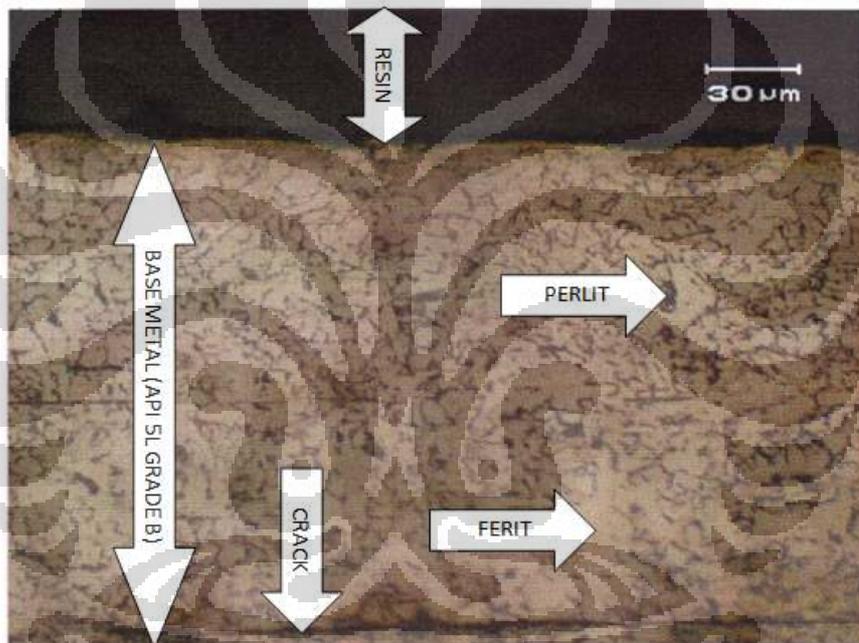
4.2. Analisis Kelayakan Disain Sistem Proteksi Katodik

4.2.1. Analisis Metalografi Material API 5L Grade B Utuh

Hasil pengujian metalografi pada material pipa API 5L Grade B yang utuh (tidak terkorosi) dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan 4.2. Gambar metalografi pada sampel pipa API 5L Grade B utuh tanpa etsa menunjukkan tidak terdapat cacat berupa korosi sumuran (*pitting corrosion*). Sedangkan pada gambar metalografi pipa API 5L Grade B utuh yang di-etsa dengan nital 2% menunjukkan struktur mikro API 5L didominasi oleh fasa ferit (berwarna terang) dan perlit (berwarna gelap).



Gambar 4.1. Sampel uji API 5L utuh (foto sebelah kiri) dan struktur mikro sampel API 5L utuh tanpa etsa (foto sebelah kanan).



Gambar 4.2. Struktur mikro sampel API 5L utuh dengan etsa nital 2% menunjukkan fasa yang terbentuk adalah ferit dan perlit.

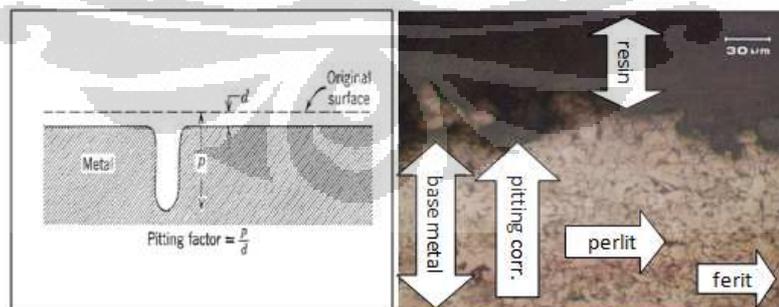
Fasa ferit dan perlit yang terjadi pada sampel API 5L Grade B menunjukkan sampel merupakan jenis baja karbon. Terdapat pula garis lurus panjang berwarna gelap yang merupakan *crack*, namun *crack* tersebut tidak akan dianalisis lebih lanjut karena terjadi akibat goresan yang disengaja saat membuat cacat buatan (alur grip) untuk keperluan uji tarik dimana sebelumnya sampel juga digunakan untuk pengujian uji tarik.

4.2.2. Analisis Metalografi Material API 5L Grade B yang Terkorosi

Hasil pengujian metalografi pada material pipa API 5L Grade B yang terkorosi dapat dilihat pada Gambar 4.3 dan 4.4. Gambar metalografi pada sampel pipa API 5L Grade B terkorosi tanpa etsa menunjukkan terdapat cacat pada bagian atas dari *base metal* dalam gambar metalografi yang terbentuk berupa korosi sumuran (*pitting corrosion*). Sedangkan pada gambar metalografi pipa API 5L Grade B terkorosi yang di-etsa dengan nital 2% menunjukkan struktur mikro API 5L didominasi oleh fasa ferit (berwarna terang) dan perlit (berwarna gelap). Fasa ferit dan perlit yang terjadi pada sampel API 5L Grade B menunjukkan sampel merupakan jenis baja karbon. Pada gambar metalografi sampel API 5L Grade B yang di-etsa dengan nital 2% juga menunjukkan adanya korosi sumuran (*pitting corrosion*) pada bagian atas *base metal* dalam gambar yang terlihat.



Gambar 4.3. Sampel uji API 5L terkorosi (foto sebelah kiri) dan struktur mikro sampel API 5L terkorosi tanpa etsa (foto sebelah kanan).

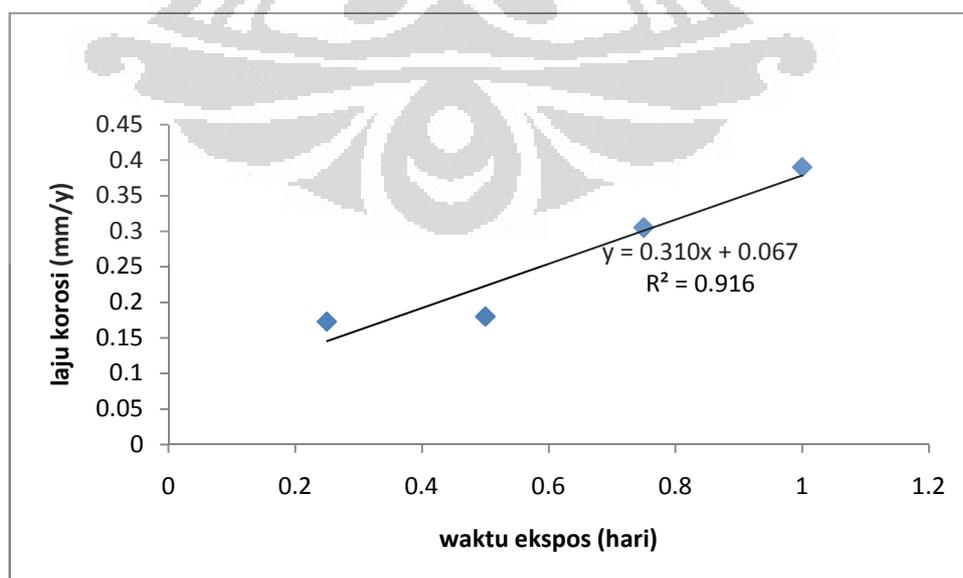


Gambar 4.4. Struktur mikro sampel API 5L terkorosi dengan etsa nital 2% menunjukkan fasa yang terbentuk adalah ferit dan perlit, juga ditemukan adanya *pitting corrosion* (gambar sebelah kanan). Sketsa bentuk *pitting corrosion* berdasarkan referensi (Revie and Uhlig, 2008) (gambar sebelah kiri).

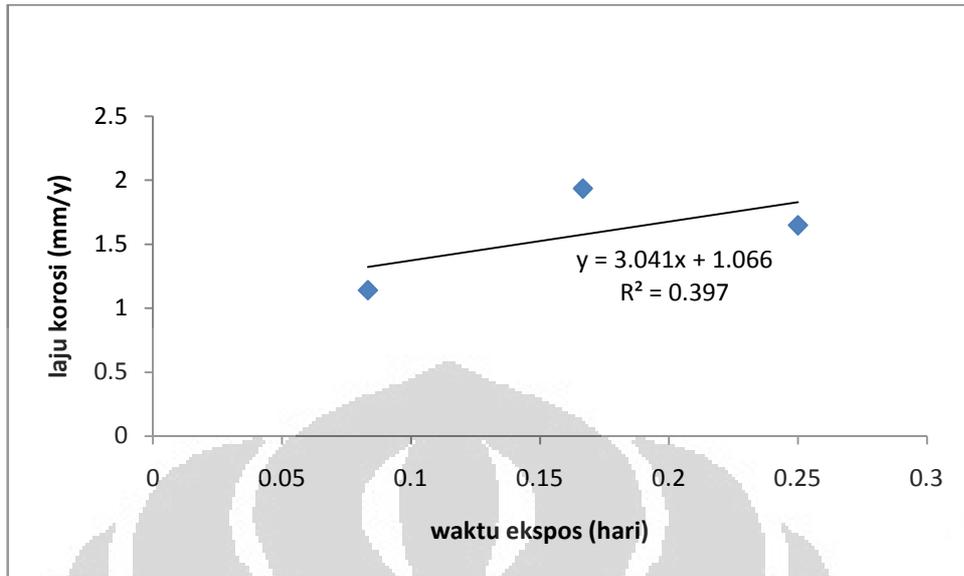
4.2.3. Analisis Laju Korosi

Analisis laju korosi didasarkan pada hasil pengujian laju korosi secara imersi, hasil pengujian laju korosi secara akselerasi *salt spray*, dan laju korosi aktual yang terjadi di lapangan sesuai dengan *potential logger*. Akselerasi secara imersi dimaksudkan untuk mengetahui laju korosi yang terjadi akibat pengaruh turbulensi gelembung-gelembung fasa gas ketika gas dialirkan dalam bentuk kondensat cair. Akselerasi secara *salt spray* dimaksudkan untuk menduga laju korosi akibat tekanan fasa gas sekaligus untuk menduga juga laju korosi ketika terjadi kondisi ekstrem dengan asumsi fluida yang dialirkan dalam bentuk gas secara keseluruhan. Laju korosi aktual digunakan sebagai pembanding untuk menggambarkan laju korosi yang sebenarnya terjadi di lapangan. Kurva laju korosi dengan akselerasi imersi, akselerasi *salt spray*, dan aktual dapat kita perhatikan pada Gambar 4.5, 4.6, dan 4.7. Ketiga kurva laju korosi pada Gambar 4.5, 4.6, dan 4.7 tersebut selanjutnya dikuantifikasi sehingga dapat diperoleh persamaan linier yang menghubungkan waktu ekspos dalam satuan hari sebagai absis dan laju korosi dalam satuan mm/tahun sebagai ordinat.

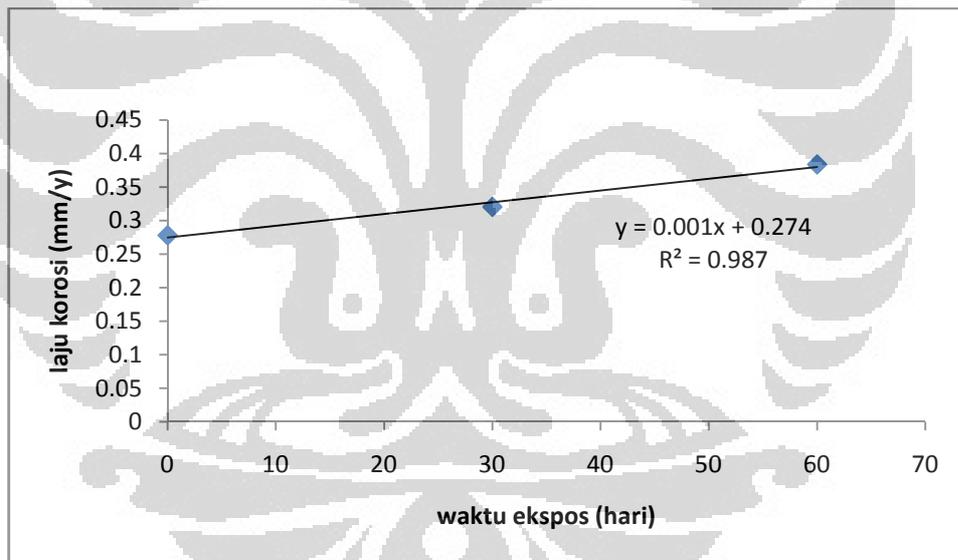
Persamaan garis linier yang diperoleh untuk laju korosi material API 5L Grade B dengan diakselerasi secara imersi adalah $y = 0.31x + 0.067$. Sedangkan persamaan garis linier yang diperoleh untuk laju korosi material API 5L Grade B dengan diakselerasi menggunakan metode *salt spray* adalah $y = 3.041x + 1.066$.



Gambar 4.5. Kurva laju korosi material API 5L Grade B dengan akselerasi secara imersi.

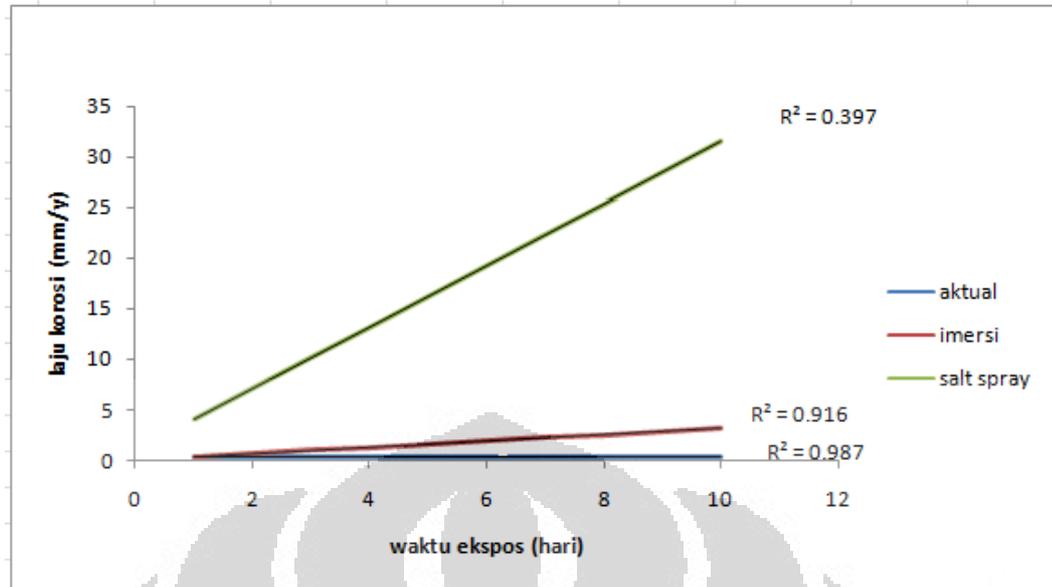


Gambar 4.6. Kurva laju korosi material API 5L Grade B dengan akselerasi *salt spray*.



Gambar 4.7. Kurva laju korosi aktual.

Sementara itu, persamaan garis linier untuk laju korosi aktual yang terjadi di lapangan adalah $y = 0.001x + 0.274$. Ketiga kondisi tersebut memiliki persamaan garis linier yang berbeda-beda sehingga harus dibandingkan terlebih dahulu untuk kemudian ditentukan kurva yang digunakan sebagai bahan analisis laju korosi. Perbandingan antara ketiga kurva persamaan linier laju korosi tersebut dapat disimak pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8. Perbandingan laju korosi material API 5L Grade B secara imersi, *salt spray*, dan kondisi aktual.

Bila kita perhatikan perbandingan kurva laju korosi pada Gambar 4.8, terlihat bahwa laju korosi aktual lebih stabil dibandingkan hasil akselerasi di laboratorium. Hal ini dikarenakan pengujian laboratorium dilakukan secara akselerasi dengan akselerator yang seragam, sementara kondisi lapangan adalah kondisi yang alamiah tanpa akselerator buatan. Namun, untuk menentukan kurva mana yang akan dipilih sebagai bahan analisis laju korosi tidak cukup ditentukan dari kestabilan atau kelandaian kurva. Kurva laju korosi harus benar-benar terdapat korelasi linier yang kuat antara absis dan ordinat sebagai acuan kevalidan data. Oleh karena itu, ketiga kurva tersebut dibandingkan nilai kuadrat regresi liniernya (R^2). Nilai R^2 sebesar 1 (satu) secara teori menunjukkan hubungan yang valid antara absis dan ordinat. Bila nilai R^2 semakin menjauh dari 1 (satu) maka kurva tersebut semakin tidak menggambarkan hubungan yang valid antara absis dan ordinat. Nilai R^2 pada kurva laju korosi yang diakselerasi secara imersi, *salt spray*, dan kondisi aktual secara berturut-turut adalah 0.916, 0.397, dan 0.987. Kurva laju korosi yang diakselerasi secara *salt spray* dapat kita eliminasi karena memiliki nilai R^2 dibawah 0.5 sehingga sudah dipastikan korelasi antara absis dan ordinatnya tidak valid. Oleh karena itu, kita tinggal membandingkan antara kurva laju korosi secara akselerasi imersi dan kurva laju korosi aktual yang keduanya dapat dianggap valid karena memiliki nilai R^2 diatas 0.5. Dari perbandingan

keduanya dapat dilihat bahwa kurva laju korosi yang terjadi di lapangan (aktual) adalah kurva yang paling valid karena memiliki nilai R^2 sebesar 0.987 atau yang paling mendekati kondisi ideal 1 (satu). Jadi, berdasarkan perbandingan antara ketiga kurva laju korosi tersebut, kurva linier laju korosi aktual memiliki korelasi absis dan ordinat paling valid sehingga ini menjadi dasar diperlukannya verifikasi data lapangan untuk menganalisa kelayakan operasional sistem proteksi katodik. Sementara itu, untuk data laju korosi laboratorium digunakan hasil akselerasi secara imersi karena memiliki nilai R^2 paling mendekati 1 (satu) dibandingkan hasil akselerasi secara *salt spray*.

Bila persamaan laju korosi adalah $y = ax + b$ dengan y adalah laju korosi dalam satuan mm/y dan x adalah lamanya waktu ekspos dalam satuan hari, maka dapat kita lihat bahwa korelasi antara waktu ekspos sebagai absis dan laju korosi sebagai ordinat dipengaruhi oleh dua faktor yaitu faktor a yang bersifat akseleratif (percepatan) dan faktor b yang merupakan faktor tak terduga (konstanta). Ketiga laju korosi dari akselerasi yang berbeda dapat kita tabulasikan seperti pada Tabel 4.7 berikut ini.

Tabel 4.7. Faktor a , faktor b , dan nilai R dari akselerasi laju korosi lab dan laju korosi aktual.

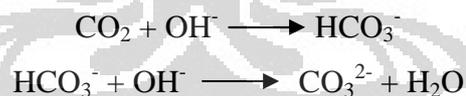
| Akselerasi | a (mm/tahun-hari) | b (mm/tahun) | R |
|-------------------|------------------------|-------------------|--------|
| <i>Salt spray</i> | 3.041 | 1.066 | 0.6301 |
| Imersi | 0.310 | 0.067 | 0.9571 |
| Aktual | 0.001 | 0.274 | 0.9935 |

Dari akselerasi *salt spray* terlihat bahwa faktor akseleratif lebih kecil dibandingkan faktor tak terduga. Dari nilai R sebesar 0.6301 menunjukkan bahwa 63.01% akselerasi korosi disebabkan oleh faktor akseleratif dan 36.99% disebabkan oleh faktor lainnya. Faktor akseleratif dominan disebabkan oleh anion Cl^- dari larutan $NaCl$, sementara faktor lain adalah uap air yang melepaskan anion OH^- . Anion Cl^- dapat menyebabkan pembentukan $FeCl_3$ dan OH^- dapat menimbulkan pembentukan $Fe(OH)_2$. Dari akselerasi secara imersi dapat dilihat bahwa faktor akseleratif lebih besar daripada faktor lainnya yang tak terduga. Dengan nilai R sebesar 0.9571 menunjukkan bahwa 95.71% akselerasi korosi disebabkan oleh faktor akseleratif dan 4.29% disebabkan oleh faktor tak terduga.

Faktor akseleratif dominan adalah turbulensi yang dapat memicu kavitasi dan juga erosi, sementara faktor lain yang tidak terduga disebabkan oleh adanya vibrasi yang mendadak. Dari data lapangan diperoleh bahwa faktor akseleratif yang mengakselerasi korosi terhadap permukaan luar pipa hampir mendekati nol akibat adanya penghambatan oleh proteksi katodik. Nilai R sebesar 0.9935 menunjukkan bahwa faktor akseleratif dari dalam tanah yang mengakselerasi laju korosi adalah sebesar 99.35%, sementara faktor lain hanya mengakselerasi laju korosi sebesar 0.65%. Faktor akseleratif dominan di lapangan berasal dari kandungan H_2O , CO_2 , dan oksida-oksida yang ada di dalam tanah. H_2O mengisi pori-pori antara butiran tanah dan akan membentuk reaksi:



Hidroksida (OH^-) bila bereaksi dengan permukaan luar pipa kondensat akan membentuk produk korosi $Fe(OH)_2$. Selain membentuk $Fe(OH)_2$, anion hidroksida (OH^-) juga akan bereaksi dengan gas CO_2 membentuk anion HCO_3^- dan HCO_3^- yang terbentuk juga akan membentuk anion CO_3^{2-} bila bereaksi dengan OH^- (hidroksida). Anion CO_3^{2-} dapat membentuk produk korosi $FeCO_3$. Reaksi pembentukan CO_3^{2-} adalah sebagai berikut:



Gas CO_2 berasal dari udara yang terperangkap di dalam pori-pori tanah, *surrounding water*, atau reaksi pembusukan vegetasi (tanaman). Sementara itu, oksida-oksida dapat berupa SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , N_2O , CaO , MgO , dan P_2O_5 . Senyawa-senyawa oksida yang terurai di dalam tanah dapat melepaskan anion O^{2-} yang bila bereaksi dengan permukaan luar pipa kondensat dapat membentuk produk korosi Fe_2O_3 . Sementara itu, faktor tak terduga yang dapat mempercepat laju korosi dapat berasal dari cacat bawaan pipa dari pabrik seperti cacat laminasi dan juga dari *third party damage* akibat faktor alam dan manusia seperti bencana alam (longsor, banjir, gempa bumi, dll.) dan sabotase dari manusia. Selain itu,

faktor tak terduga lainnya dapat berasal dari alkali yang bersentuhan dengan permukaan luar pipa yang terdiri dari NaOH atau Na₂CO₃. NaOH bila terurai dapat membentuk OH⁻ serta Na₂CO₃ bila terurai akan membentuk CO₃²⁻. Anion OH⁻ dan CO₃²⁻ seperti telah dibahas sebelumnya dapat membentuk produk korosi Fe(OH)₂ dan FeCO₃ bila bereaksi dengan permukaan luar pipa.

Perbedaan komparasi antara laju korosi yang diakselerasi secara imersi, *salt spray*, dan aktual yang terjadi di lapangan dipengaruhi oleh proteksi katodik yang menghambat laju korosi akibat faktor dominan. Faktor dominan di lapangan yang berupa kandungan H₂O, CO₂, dan oksida-oksida yang terdapat di dalam tanah ternyata menimbulkan percepatan korosi yang terendah, yaitu 0.001 mm/tahun-hari. Faktor dominan pada akselerasi korosi imersi yang berupa turbulensi fluida menimbulkan percepatan korosi sebesar 0.31 mm/tahun-hari. Sementara faktor dominan pada *salt spray* berupa anion Cl⁻ memberikan percepatan korosi sebesar 3.041 mm/tahun-hari, jauh lebih besar dibandingkan percepatan korosi imersi dan aktual. Pada akselerasi secara imersi dan kondisi *salt spray*, nilai percepatan lebih besar dibandingkan dengan faktor konstanta dari gabungan faktor-faktor non-dominan. Hal ini disebabkan karena tidak adanya penghambatan laju korosi. Sementara pada kondisi aktual, nilai percepatan akibat faktor akseleratif dominan lebih kecil dibandingkan dengan faktor konstanta akibat gabungan dari faktor-faktor non-dominan. Hal inilah disebabkan oleh adanya penghambatan laju korosi eksternal akibat pengaruh tanah hingga mendekati nol yang disebabkan oleh kerja sistem proteksi katodik yang dipasang.

Data laju korosi yang diperlukan adalah data lapangan dan data akselerasi laboratorium. Data lapangan (aktual) digunakan untuk menganalisis kelayakan operasional sistem proteksi katodik yang dipasang, sementara data akselerasi laboratorium digunakan untuk menganalisis kelayakan disain sistem proteksi katodik. Data akselerasi laboratorium yang digunakan adalah hasil akselerasi secara imersi karena memiliki korelasi absis dan ordinat yang lebih valid dibandingkan *salt spray*. Hasil pengujian laju korosi dengan metode imersi sebagai dasar hasil pengujian laboratorium pada sampel API 5L Grade B dapat dilihat pada Tabel 4.8 berikut.

Tabel 4.8. Hasil pengujian laju korosi menggunakan metode imersi selama satu hari.

| Material: API 5L Grade B | | Material Density: 7.87 g/cm ³ | | | Exposure Time: 1 day | |
|--------------------------|---------------------------------|--|----------------|---------------|--|-----------------------|
| Sample Code | Exposed Area (cm ²) | Initial Mass (g) | Final Mass (g) | Mass Loss (g) | Mass Loss per Unit Area (g/cm ²) | Corrosion Rate (mm/y) |
| A | 137.55 | 92.02 | 91.92 | 0.10 | 7.27 x 10 ⁻⁴ | 0.34 |
| B | 141.32 | 92.86 | 92.74 | 0.12 | 8.49 x 10 ⁻⁴ | 0.39 |
| C | 143.23 | 92.30 | 92.22 | 0.08 | 5.59 x 10 ⁻⁴ | 0.26 |
| Higher | | | | | | 0.39 |

Hasil pengujian laju korosi yang diakselerasi selama satu hari (24 jam) dengan metode imersi menunjukkan sampel API 5L Grade B memiliki laju korosi yang terbesar 0.39 mm/tahun.

4.2.4. Pembahasan

Pengujian secara metalurgi yang dilakukan terhadap sampel API 5L Grade B adalah pengujian metalografi dan pengujian laju korosi secara imersi sesuai dengan standar NACE. Pengujian secara metalurgi pada sampel pipa material API 5L Grade B seperti telah dijabarkan sebelumnya bertujuan untuk mengetahui apakah pemasangan sistem proteksi katodik pada pipa kondensat material API 5L Grade B yang ditanam pada kedalaman 1.5 m tersebut memang mutlak diperlukan atau sebenarnya tidak perlu diinstalasi.

Hasil pengujian metalografi menunjukkan terdapat *pitting corrosion* pada permukaan sampel pipa API 5L Grade B yang terkorosi. Hal ini menunjukkan laju aliran kondensat yang terus menerus dapat menimbulkan *pitting corrosion*. *Pitting corrosion* merupakan bentuk korosi yang paling berbahaya dikarenakan kemunculannya yang sangat sulit untuk diprediksi. Cacat korosi yang terjadi tentunya tidak langsung berupa *pitting corrosion* sekaligus, tetapi ada beberapa tahapan sebelumnya hingga terjadi *pitting corrosion* tersebut. Pertama-tama tentunya permukaan dalam pipa API 5L Grade B yang merupakan *base metal* akan berinteraksi dan bersentuhan dengan fluida kondensat. Interaksi dan sentuhan antara keduanya tentu menimbulkan reaksi korosi akibat perbedaan potensial antara keduanya sehingga akan menghasilkan produk korosi yang membentuk *coating* pada permukaan pipa API 5L Grade B. Lapisan *coating* yang

terbentuk tersebut biasa dinamakan *surface layer*. Ketika laju pembentukan formasi *surface layer* sama dengan laju korosi yang disebabkan oleh fluida maka akan terbentuk *surface layer* yang solid yang biasa disebut *compact layer*. Lapisan *compact layer* yang menempel pada permukaan *base metal* justru akan membuat *base metal* terlindungi dari *pitting corrosion*. Namun, ketika laju pembentukan formasi *surface layer* sampai pada kondisi yang tidak sama dengan laju korosi akibat beda potensial antara *base metal* dan fluida kondensat, maka *surface layer* akan mulai terlepas. Ketika *surface layer* terlepas dari *base metal*, lapisan *base metal* yang mengalami pelepasan *surface layer* akan mengalami *pit initiation* dan *pit growth*. Terlepasnya *surface layer* tersebut menyebabkan ketahanan permukaan *base metal* terhadap *pitting corrosion* mengalami penurunan. Laju *pitting corrosion* setelah terlepasnya *surface area* akan semakin meningkat bila ada fasilitasi akibat material asing yang menyentuh atau menumbuk permukaan *base metal* yang mengalami pelepasan *surface layer*. Material asing yang mungkin terjadi pada contoh kasus yang dibahas dapat diduga berupa produk korosi yaitu *surface layer* yang terlepas dimana produk korosi tersebut terlarut pada fluida kondensat sehingga ikut mengalir bersama fluida kondensat. Seperti yang telah dibahas sebelumnya, aliran fluida kondensat rawan terjadi turbulensi akibat pengaruh kecepatan aliran fluida kondensat. Turbulensi dapat menyebabkan erosi dari produk korosi (*surface layer*) yang terlepas tersebut serta kavitasi-korosi akibat terbentuknya rongga-rongga fasa gas pada aliran kondensat yang arahnya dapat sejajar maupun tegak lurus arah aliran kondensat. Aliran rongga udara yang tegak lurus arah aliran fluida tentunya merupakan salah satu perubahan arah aliran fluida akibat terjadinya turbulensi sehingga tentunya rawan terjadinya erosi. Seperti yang diketahui erosi umumnya terjadi pada daerah atau bagian komponen dimana arah aliran fluida mengalami perubahan. Adanya material asing yaitu produk korosi yang terlepas dan larut pada fluida kondensat tentunya juga dapat menimbulkan erosi. Produk korosi (*surface layer*) yang terlepas tersebut merupakan butiran-butiran partikel padat yang terbawa arus turbulensi sehingga menimbulkan gerakan-gerakan mekanik yang menumbuk *base metal*. Erosi yang terjadi akibat partikel padat tersebut merupakan bentuk keausan akibat gerakan mekanik. Selain itu erosi akibat rongga-rongga gas hasil

turbulensi di beberapa titik tidak disertai dengan fasilitasi produk korosi yang terlepas sehingga erosi tersebut dapat menimbulkan kavitasi-korosi pada *base metal*. Kavitasi tersebut merupakan erosi akibat hasil formasi dan kegagalan rongga-rongga (*cavities*) dalam fluida pada lapisan batas padat-fluid. Erosi dan kavitasi tersebut tentunya lama kelamaan akan menimbulkan *pitting corrosion*. Hal ini dikarenakan kavitasi dan erosi dapat membentuk akumulasi *pitting* yang bila dibiarkan akan menimbulkan *pitting corrosion* yang merupakan penyebab kegagalan fungsi (*failure*). Jadi, berdasarkan paparan-paparan tersebut, *pitting corrosion* yang terjadi pada permukaan pipa API 5L Grade B yang diuji metalografi diawali dengan adanya korosi akibat interaksi fluida kondensat dengan permukaan pipa, erosi dan kavitasi-korosi yang tentunya dalam waktu tertentu akan menimbulkan proses dimana ketebalan permukaan pipa API 5L semakin lama semakin berkurang hingga akhirnya mengalami *failure*.

Untuk mengetahui laju *failure* pada pipa API 5L Grade B tersebut maka dapat diukur dari laju korosi berdasarkan akselerasi laboratorium pada pipa API 5L Grade B tersebut. Hasil pengujian laju korosi yang diakselerasi secara imersi menunjukkan laju korosi terbesar pipa API 5L Grade B dari sisi ketebalan adalah 0.39 mm/tahun. Sementara itu umur disain yang diketahui dari jalur pipa kondensat yang dirancang pada proyek yang dijadikan contoh kasus adalah 20 tahun. Sehingga bila nilai laju korosi pipa API 5L Grade B dari sisi ketebalan dikalikan 20 tahun maka ketebalan pipa yang diperlukan untuk jalur pipa kondensat tersebut adalah 7.8 mm. Sementara itu pipa yang digunakan sebagai jalur pipa kondensat berukuran diameter nominal 3 (tiga) inch dan sch.40, sehingga ketebalan pipa tersebut adalah kurang lebih 5.5 mm. Ketebalan pipa sebesar 5.5 mm tersebut belum cukup untuk memenuhi ketebalan disain 7.8 mm sehingga masih diperlukan *coating* untuk menambah ketebalan hingga menjadi 7.8 mm. Anggaphlah ketebalan pipa API 5L Grade B yang digunakan sebagai pipa kondensat memiliki ketebalan 5.4-5.5 mm dan ketebalan lapisan *polyethylene* sebesar 1.2 mm, maka *coating* yang diperlukan harus memiliki nilai *coating breakdown* sebesar 20-22% untuk meningkatkan ketebalan efektif pipa menjadi 7.8 mm. Perhitungan tersebut didasarkan pada perhitungan *coating breakdown* untuk pipa dengan tebal 5.4 mm agar memperoleh ketebalan efektif 7.8 mm

sebesar 22% dan untuk pipa dengan tebal 5.5 mm agar memperoleh ketebalan efektif 7.8 mm adalah sebesar 20%. Pipa yang digunakan pada jalur pipa kondensat dari proyek tersebut dilapisi *coating* dengan nilai *coating breakdown* sebesar 20% sehingga dapat dikatakan memenuhi target minimum untuk memenuhi ketebalan efektif pipa 7.8 mm. Jadi, berdasarkan analisa laju korosi dan nilai *coating breakdown* dari *coating* yang digunakan, secara konstruksi disain pipa API 5L Grade B diameter 3 (tiga) inch sch.40 yang dilapisi *coating* dengan nilai *coating breakdown* 20% cukup mampu untuk menahan pengaruh korosi internal berupa korosi, erosi, kavitasi-korosi, dan *pitting corrosion* dalam jangka waktu 20 tahun sehingga dapat dinyatakan layak digunakan untuk pipa kondensat.

Paparan-paparan di atas menunjukkan pipa API 5L Grade B diameter 3 (tiga) inch sch.40 yang dilapisi *coating* dengan nilai *coating breakdown* 20% mampu menahan pengaruh korosi internal akibat laju aliran fluida kondensat di dalam pipa tersebut selama umur disain 20 tahun. Namun, pipa yang ditanam di bawah tanah tentunya tidak hanya menerima pengaruh korosi internal dari dalam pipa tetapi juga menerima pengaruh korosi eksternal pada permukaan luar pipa. Ini berarti ketebalan efektif yang terbentuk sebesar 7.8 mm hanya mampu menahan pengaruh korosi internal saja. Ketika pengaruh korosi eksternal akibat korosivitas tanah pada kedalaman 1.5 m ditambahkan tentunya ketebalan efektif 7.8 mm tidaklah cukup sehingga jalan yang dapat ditempuh adalah dengan memberikan perlindungan dari korosi eksternal pada permukaan luar pipa yang bersentuhan langsung dengan tanah yang korosif. Ada dua cara yang dapat dilakukan untuk memberikan proteksi pada jalur pipa kondensat tersebut dari korosi eksternal yaitu mengganti pipa dengan material yang sama namun ketebalan yang lebih besar atau tetap menggunakan disain pipa kondensat yang ada namun diberi sistem proteksi katodik. Dengan panjang jalur pipa kondensat sebesar 32 km, maka opsi mengganti pipa dengan pipa baru yang memiliki ketebalan lebih besar tentunya bukan cara yang optimum karena akan menghamburkan *cost*. Cara paling efektif yang dapat dilakukan adalah memilih opsi kedua yaitu menambahkan sistem proteksi katodik dengan sistem anoda korban untuk melindungi permukaan luar pipa dari serangan korosi eksternal.

Jadi, secara disain, pemasangan sistem proteksi katodik pada jalur pipa kondensat dengan diameter nominal 3 (tiga) inch dan sch.40 pada proyek yang dijadikan contoh kasus sudah sangat tepat diterapkan untuk menjaga jalur pipa kondensat dari serangan korosi eksternal untuk jangka waktu 20 tahun.

4.3. Analisis Kelayakan Operasional Sistem Proteksi Katodik

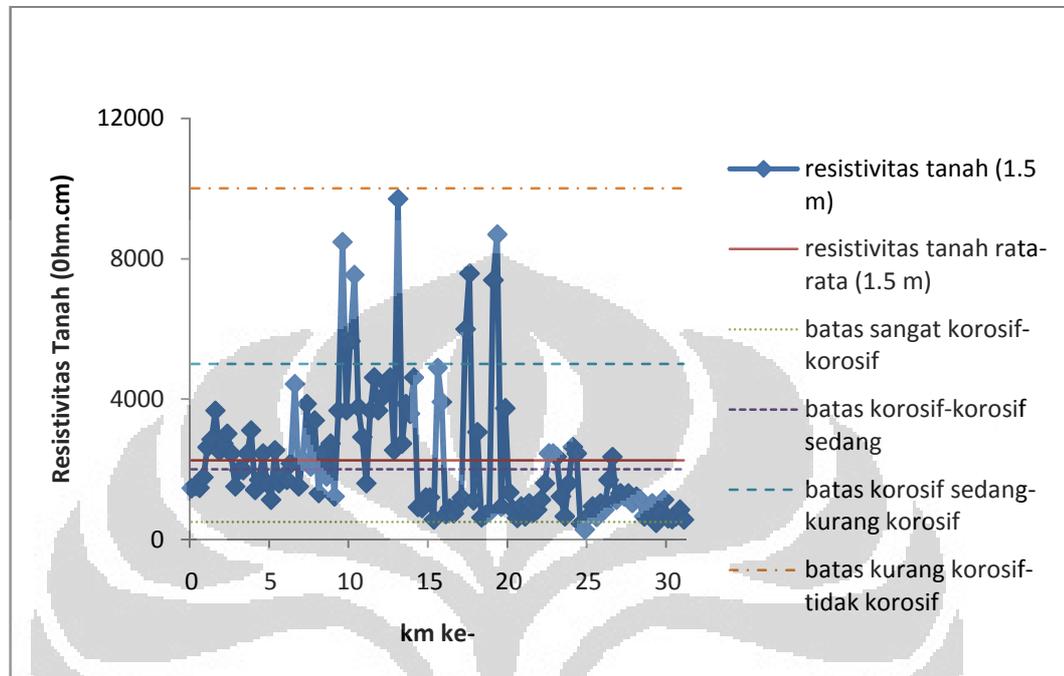
4.3.1. Analisis Tingkat Korosivitas Tanah

Berdasarkan hasil survey resistivitas tanah seperti yang terlihat secara lengkap pada Lampiran 3 dapat diketahui bahwa tingkat korosivitas tanah pada area pemasangan pipa kondensat dan sistem proteksi katodik yang dijadikan contoh kasus menunjukkan hasil yang bervariasi. Distribusi tingkat korosivitas tanah pada daerah tersebut dapat digambarkan pada grafik hasil survey resistivitas tanah pada kedalaman 1.5 m yang dapat dilihat dengan jelas di Gambar 4.9. Dari grafik hasil survey pada Gambar 4.9 tersebut, dapat kita lihat bahwa kondisi tanah pada kedalaman 1.5 m pada area produksi gas tersebut memiliki tingkat korosivitas bervariasi mulai dari yang kurang korosif, korosif sedang, korosif, hingga sangat korosif. Bila diseragamkan, pada kedalaman 1.5 m tanah tersebut memiliki nilai resistivitas pada *range* sebesar 2250.88 ohm.cm. Nilai resistivitas tanah rata-rata tersebut ditunjukkan dengan garis horizontal kontinu pada grafik diatas (Gambar 4.9). Garis tersebut berada pada selang batas korosif sedang-kurang korosif dan batas korosif-korosif sedang, sehingga secara umum kondisi tanah pada kedalaman 1.5 m pada area produksi gas tersebut berada pada kondisi korosif sedang. Sehingga dalam perhitungan disain sistem proteksi katodik, tanah di wilayah tersebut dianggap korosif sedang pada kedalaman 1.5 m.

4.3.2. Analisis Hasil Verifikasi Disain Sistem Proteksi Katodik

Pada data sekunder proyek pemasangan sistem proteksi katodik dari proyek yang dijadikan contoh kasus sepanjang 32 km dapat diketahui bahwa anoda yang digunakan adalah anoda magnesium 32 lbs tipe *D-shape*. Jumlah anoda magnesium 32 lbs yang digunakan sebanyak 96 batang. Distribusi anoda magnesium 32 lbs ditempatkan pada setiap jarak 500 m dengan jumlah anoda magnesium 32 lbs per lokasi sebanyak satu hingga tiga batang yang disesuaikan

dengan kondisi tanah. Sementara itu, *testbox/test point* dipasang setiap 1000 m atau setiap 1 (satu) km.



Gambar 4.9. Grafik hasil survey resistivitas tanah pada kedalaman 1.5 m

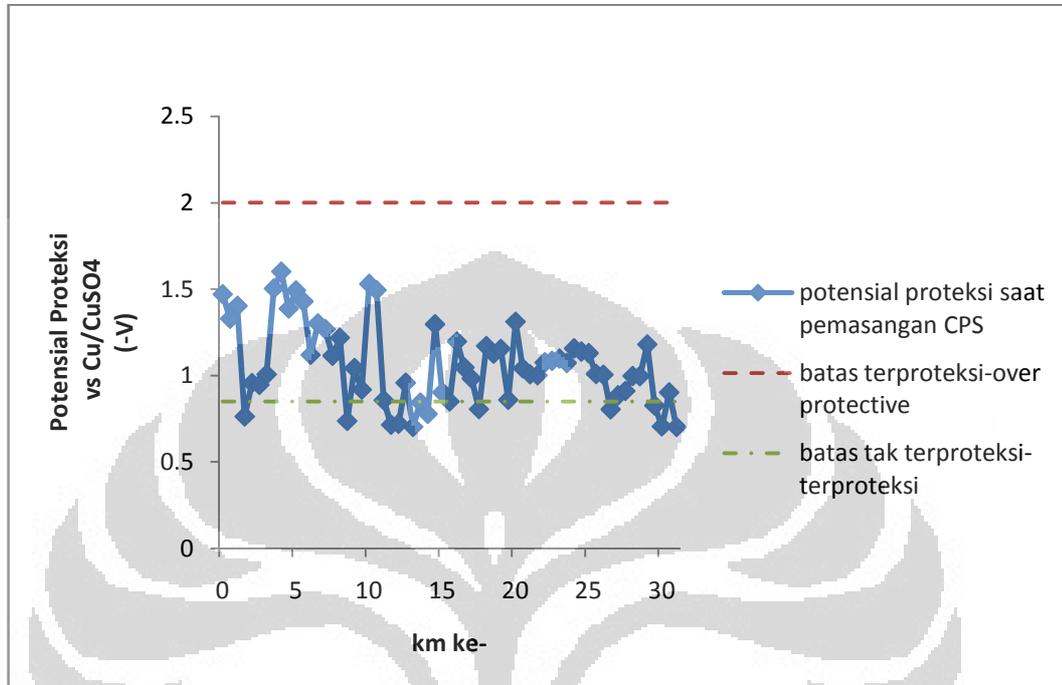
Berdasarkan verifikasi disain sistem proteksi katodik dengan metode kalkulasi ulang disain sistem proteksi katodik berdasarkan kebutuhan arus proteksi (*by current*) diperoleh hasil yaitu jumlah anoda magnesium 32 lbs yang diperlukan sebanyak 100 batang dengan jumlah *test box* sebanyak 32 buah. Sebaran anoda dilakukan sama seperti pada proyek yang telah dilakukan sebelumnya yaitu per 500 m dengan jumlah anoda Mg 32 lbs per *groundbed* sebanyak satu sampai tiga batang (rata-rata dua batang) yang juga disesuaikan dengan kondisi tanah.

Berdasarkan verifikasi disain sistem proteksi katodik dengan metode kalkulasi ulang disain sistem proteksi katodik berdasarkan bobot anoda (*by weight*) juga menunjukkan jumlah anoda korban magnesium 32 lbs yang diperlukan menunjukkan hasil yang sama seperti perhitungan *by current* yaitu 100 batang. Artinya baik berdasarkan perhitungan *by current* maupun *by weight*, jumlah anoda korban magnesium 32 lbs yang diperlukan adalah 100 batang.

Karena ada perbedaan hasil jumlah anoda korban yang diperlukan antara disain lama dengan hasil perhitungan ulang disain maka perlu ada modifikasi pada distribusi anoda. Distribusi anoda sebelum verifikasi disain dilakukan dapat dilihat secara lengkap pada Lampiran 4. Untuk memodifikasi kita tidak perlu mengubah semua distribusi anoda, tetapi cukup menambah kekurangan anoda korban yang diperlukan. Disain lama menunjukkan anoda korban sebanyak 96 batang sementara hasil verifikasi disain menunjukkan kebutuhan anoda korban sebanyak 100 batang. Artinya modifikasi distribusi anoda cukup dilakukan dengan menambahkan 4 (empat) buah anoda pada titik-titik *groundbed* yang dianggap paling rawan tidak terproteksi. Berdasarkan *potential logger* saat pemasangan sistem proteksi katodik pada Lampiran 5 dan Gambar 4.10, terdapat 10 titik dimana pipa tidak terproteksi dengan baik (potensial proteksi diluar nilai *range* -2 V hingga -0.85 V). Titik-titik tersebut berada pada km ke- 1.5, 8.5, 11.5, 12, 13, 14, 17.5, 26.5, 30, dan 31 yang menunjukkan nilai potensial proteksi secara berturut-turut yaitu -0.764 V, -0.738 V, -0.716 V, -0.722 V, -0.704 V, -0.778 V, -0.806 V, -0.805 V, -0.706 V, dan -703 V. Sepuluh titik tersebut harus dieliminasi kembali hingga menjadi empat titik saja yang akan mengalami penambahan anoda korban, sehingga verifikasi dilanjutkan kembali dengan pengecekan *potential logger* setelah pemasangan sistem proteksi katodik (Lampiran 6) untuk mengetahui apakah sepuluh titik-titik tersebut sudah terproteksi dengan baik setelah pemasangan sistem proteksi katodik.

Hasil verifikasi berdasarkan *potential logger* setelah pemasangan sistem proteksi katodik sesuai Lampiran 6 dan Gambar 4.11 dapat terlihat pada titik-titik di km ke- 12, 13, 14, 30, dan 31 yang menunjukkan *groundbed-groundbed* sudah terproteksi dengan baik. Artinya, masih ada lima titik yang tidak terproteksi dengan baik yaitu pada km ke- 1.5, 8.5, 11.5, 17.5, dan 26.5 sehingga masih perlu eliminasi satu titik *groundbed* lagi. Untuk itu, perlu dilakukan verifikasi lanjutan berdasarkan *potential logger* satu bulan setelah pemasangan sistem proteksi katodik (Lampiran 7 dan Gambar 4.12) serta hasil komisioning (lampiran 8 dan Gambar 4.13) pada lima titik *groundbed* tersebut. Namun, ternyata tidak ditemukan data potensial proteksi pada lima titik *groundbed* tersebut baik pada

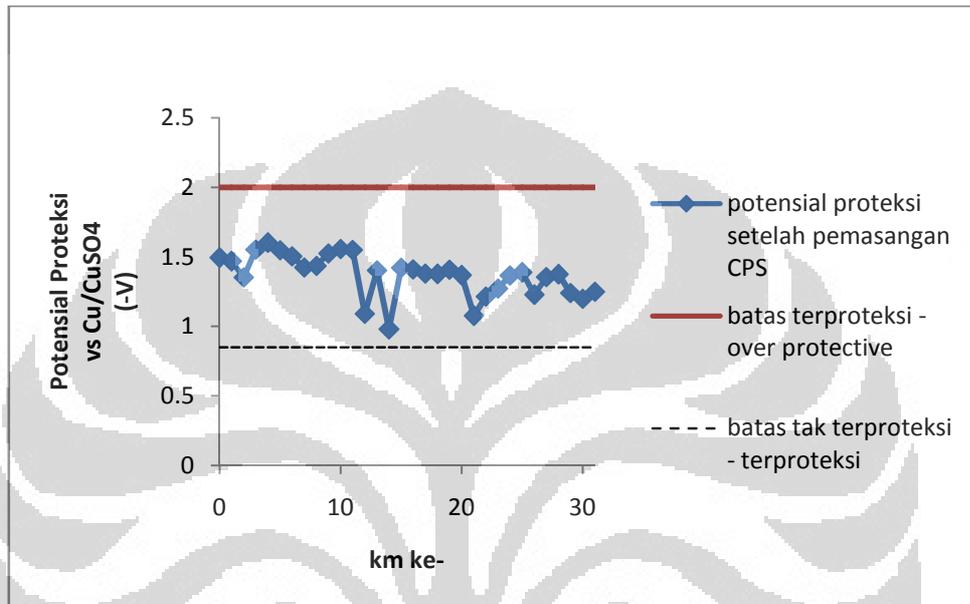
pada *potential logger* satu bulan setelah pemasangan sistem proteksi katodik maupun *potential logger* hasil komisioning.



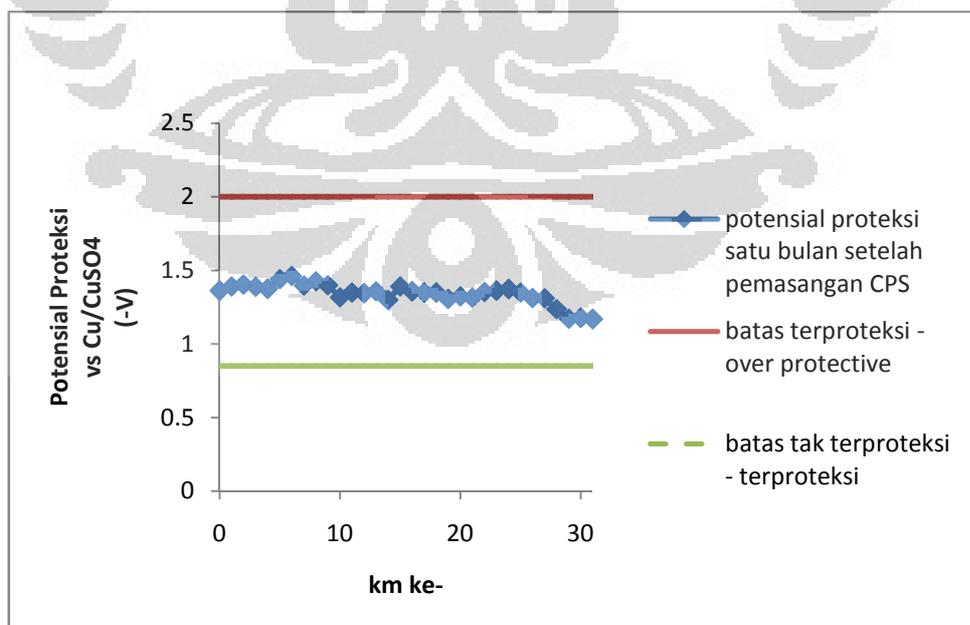
Gambar 4.10. Grafik *potential logger* saat pemasangan sistem proteksi katodik.

Oleh karena itu, proses eliminasi kembali dilanjutkan dengan cara pengecekan tingkat korosivitas tanah berdasarkan nilai resistivitas tanah pada kedalaman tanah 1.5 m (sesuai dengan Lampiran 3) di lima titik *groundbed* tersebut. Hasil verifikasi berdasarkan tingkat korosivitas tanah menunjukkan titik *groundbed* di km ke-8.5 memiliki kondisi tanah yang korosif, titik *groundbed* di km ke- 1.5, 11.5, dan 26.5 memiliki kondisi tanah kategori korosif sedang, sedangkan pada titik *groundbed* di km ke-17.5 memiliki kondisi tanah yang kurang korosif. Karena pada titik *groundbed* di km ke-17.5 memiliki kondisi tanah yang kurang korosif maka kondisi tanahnya jauh lebih aman dari serangan korosi eksternal sehingga titik di km ke-17.5 dieliminasi untuk penambahan jumlah anoda korban. Maka, jelaslah titik-titik *groundbed* yang dianggap paling tidak terproteksi adalah pada km ke- 1.5, 8.5, 11.5, dan 26.5 sehingga pada keempat titik *groundbed* tersebut perlu ditambahkan masing-masing satu batang anoda korban magnesium 32 lbs untuk mendongkrak nilai potensial proteksi agar menjadi terproteksi dengan baik. Sehingga, dengan penambahan 4 (empat) buah

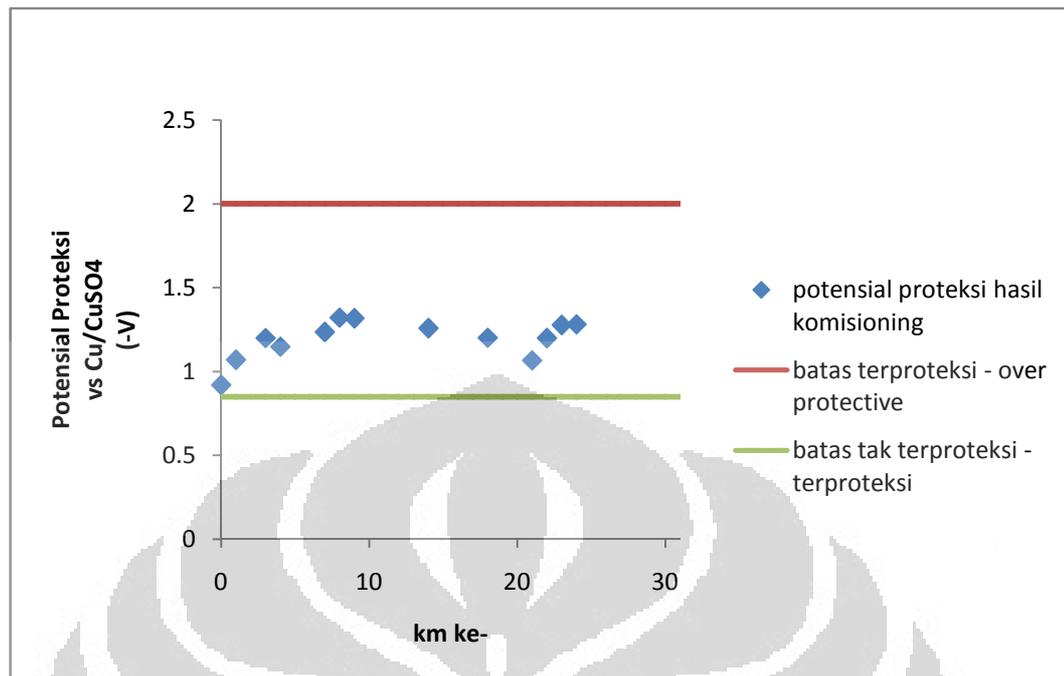
anoda korban magnesium 32 lbs, jumlah anoda korban kini menjadi 100 batang anoda setelah verifikasi disain sistem proteksi katodik. Perhitungan dan analisis secara lengkap verifikasi disain sistem proteksi katodik dapat dilihat pada Lampiran 9, sementara distribusi anoda pada jalur pipa kondensat hasil verifikasi disain sistem proteksi katodik dapat dilihat pada Lampiran 10.



Gambar 4.11. Grafik *potential logger* setelah pemasangan sistem proteksi katodik.



Gambar 4.12. Grafik *potential logger* satu bulan setelah pemasangan sistem proteksi katodik.



Gambar 4.13. Grafik *potential logger* hasil pengujian bersama (komisioning).

4.3.3. Analisis Hasil Verifikasi Sisa Umur Pakai Berdasarkan *Potential Logger* dan Hasil Komisioning

Verifikasi sisa umur pakai dapat dianalisis dari sisa umur pakai per anoda, sisa umur pakai saat pemasangan sistem proteksi katodik, sisa umur pakai setelah pemasangan sistem proteksi katodik, sisa umur pakai satu bulan setelah pemasangan sistem proteksi katodik, dan sisa umur pakai berdasarkan hasil komisioning. Perhitungan verifikasi secara lebih lengkap dapat dilihat pada Lampiran 11. Hasil verifikasi menunjukkan sisa umur pakai per anoda adalah 24.77 tahun. Sementara sisa umur pakai saat pemasangan sistem proteksi katodik, setelah pemasangan sistem proteksi katodik, satu bulan setelah pemasangan sistem proteksi katodik, dan hasil komisioning secara berturut-turut adalah 23.24 tahun, 26.64 tahun, 21.01 tahun, dan 38.19 tahun. Artinya secara keseluruhan hasil verifikasi sisa umur pakai menunjukkan angka-angka yang berkisar diatas umur disain 20 tahun. Sehingga berdasarkan verifikasi sisa umur pakai, sistem proteksi katodik yang dipasang dapat dinyatakan sudah layak secara operasional.

4.3.4. Analisis Hasil Verifikasi Anoda Korban

Verifikasi anoda korban dilakukan dengan cara mengecek data hasil pengujian elektrokimia dan komposisi kimia yang pernah dilakukan pada anoda korban yang digunakan, yaitu anoda magnesium 32 lbs tipe *D-shape*. Data lengkap hasil pengujian elektrokimia dan komposisi kimia anoda magnesium 32 lbs tipe *D-shape* dapat dilihat pada Lampiran 12.

Berdasarkan hasil pengujian elektrokimia dan komposisi kimia dan dengan dibandingkan pada standar ASTM, anoda magnesium 32 lbs yang digunakan masuk pada kategori Grade A. Sementara itu, berdasarkan hasil pengujian elektrokimia dapat diketahui nilai laju konsumsi (*consumption rate*) dari anoda magnesium 32 lbs adalah 16.05 lb/A-tahun. Maka, untuk kebutuhan arus proteksi berdasarkan hasil verifikasi disain sistem proteksi katodik pada Lampiran 9, untuk kebutuhan total arus proteksi sebesar 8.59 A selama umur disain 20 tahun diperlukan jumlah anoda magnesium 32 lbs sebanyak 86.17 batang. Oleh karena itu, hasil verifikasi disain sistem proteksi katodik sebelumnya yang menyatakan diperlukan 100 batang anoda magnesium 32 lbs dapat dikatakan layak secara operasional karena berjumlah diatas 86.17 batang sehingga tentunya sudah lebih dari cukup untuk memenuhi kebutuhan anoda korban berdasarkan laju konsumsi anoda magnesium 32 lbs.

4.3.5. Pembahasan

Untuk menganalisis kelayakan operasional sistem proteksi katodik maka diperlukan verifikasi disain sistem proteksi katodik, verifikasi analisa umur pakai, dan verifikasi hasil pengujian anoda korban. Jika ada satu saja dari ketiga verifikasi tersebut menunjukkan perlu adanya *redesign* sistem proteksi katodik maka keputusannya adalah *redesign* perlu dilakukan.

Hasil Verifikasi disain awal sistem proteksi katodik menunjukkan perlu adanya *redesign* dalam hal jumlah anoda korban yang diperlukan dari 96 batang menjadi 100 batang. Perbedaan hasil perhitungan antara disain awal dengan kalkulasi ulang disain dapat terjadi karena perbedaan metode hitung atau pun perbedaan pembulatan hitungan-hitungan. Perbedaan awalnya terjadi ketika

melakukan perhitungan ulang disain sistem proteksi katodik berdasarkan kebutuhan arus proteksi diperoleh jumlah anoda korban magnesium 32 lbs yang diperlukan adalah 100 batang sementara hasil perhitungan awal disain menunjukkan disain memerlukan hanya 96 batang anoda korban magnesium 32 lbs. Oleh karena itu perlu satu perhitungan ulang disain sistem proteksi katodik lagi untuk meyakinkan disain mana yang lebih tepat, maka dilakukanlah perhitungan ulang disain sistem proteksi katodik kembali tetapi dengan metode yang berbeda yaitu berdasarkan bobot anoda korban yang diperlukan. Hasil perhitungan ulang disain sistem proteksi katodik dengan berdasarkan kebutuhan bobot anoda korban menunjukkan bahwa jumlah anoda korban magnesium 32 lbs yang diperlukan adalah sebanyak 100 batang. Hasil tersebut berarti baik hasil kalkulasi ulang disain sistem proteksi katodik berdasarkan kebutuhan arus proteksi (*by current*) maupun hasil perhitungan ulang disain berdasarkan bobot anoda korban (*by weight*) menunjukkan hasil yang sama yaitu diperlukan sebanyak 100 batang anoda korban magnesium 32 lbs. Maka dari itulah analisis keputusan yang diambil adalah perlu adanya *redesign* dalam hal jumlah anoda korban magnesium 32 lbs dari 96 batang menjadi 100 batang anoda.

Hasil verifikasi analisis umur pakai menunjukkan secara keseluruhan berdasarkan umur sisa anoda dan umur sisa berdasarkan *potential logger* saat pemasangan, sesudah pemasangan, satu bulan setelah pemasangan, dan hasil komisioning menunjukkan umur sisa berkisar diatas umur disain 20 tahun. Nilai-nilai tersebut adalah sisa umur pakai anoda korban sebesar 24.77 tahun, sisa umur pakai saat pemasangan sistem proteksi katodik sebesar 23.24 tahun, sisa umur pakai setelah pemasangan sistem proteksi katodik sebesar 26.64 tahun, sisa umur pakai satu bulan setelah pemasangan sistem proteksi katodik sebesar 21.01 tahun, dan sisa umur pakai berdasarkan hasil komisioning sebesar 38.19 tahun. Artinya berdasarkan hasil verifikasi analisis umur pakai secara keseluruhan mulai dari disain hingga satu bulan setelah pemasangan sistem proteksi katodik menunjukkan bahwa tidak perlu ada *redesign* sistem proteksi katodik.

Verifikasi hasil pengujian anoda korban yang telah dilakukan sebelum dipasang menunjukkan dengan laju konsumsi anoda magnesium 32 lbs sebesar 16.05 lb/A-tahun, maka untuk umur disain 20 tahun diperlukan 86.17 batang

anoda magnesium 32 lbs sehingga penggunaan 100 batang anoda magnesium 32 lbs berdasarkan hasil verifikasi disain sistem proteksi katodik sudah lebih dari cukup untuk menahan korosi eksternal pada pipa kondensat. Hal ini menunjukkan bahwa berdasarkan verifikasi hasil pengujian anoda korban menyatakan tidak perlu ada *redesign* sistem proteksi katodik.

Analisis pengambilan keputusan yang diambil adalah berdasarkan akumulasi dari analisis pengambilan keputusan awal hasil verifikasi disain sistem proteksi katodik, keputusan awal hasil analisis umur sisa, serta analisis hasil verifikasi pengujian anoda korban yang telah dilakukan sebelum pemasangan sistem proteksi katodik. Berdasarkan analisis keputusan awal hasil analisis umur sisa dan verifikasi hasil pengujian anoda korban magnesium 32 lbs menyatakan tidak perlu dilakukan *redesign* sistem proteksi katodik. Sementara berdasarkan analisis keputusan awal hasil verifikasi disain sistem proteksi katodik ternyata menyatakan perlu adanya *redesign* dalam hal jumlah anoda korban magnesium 32 lbs yang diperlukan dari disain awal sebanyak 96 batang menjadi 100 batang. Berdasarkan hipotesis yang dirumuskan di Bab 1 yang menyatakan bila ada satu saja keputusan awal yang menyatakan harus dilakukan *redesign* maka keputusan akhir yang diambil adalah perlu adanya *redesign*, maka analisis pengambilan keputusan yang diambil adalah perlu dilakukan *redesign* sistem proteksi katodik dalam hal jumlah anoda korban dari 96 batang menjadi 100 batang anoda magnesium 32 lbs. Jadi, meskipun secara operasional disain sistem proteksi katodik yang dipasang pada jalur pipa kondensat dinyatakan sudah layak oleh hasil pengukuran bersama (komisioning), dengan pertimbangan faktor keamanan yang lebih tinggi, maka *redesign* dapat dilakukan dengan cara memodifikasi jumlah anoda korban magnesium 32 lbs yang diperlukan dari 96 batang menjadi 100 batang anoda. Distribusi penempatan anoda berdasarkan hasil verifikasi secara keseluruhan dapat dilihat pada Lampiran 10.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

1. Sistem proteksi katodik yang diinstalasi pada jalur pipa kondensat sudah layak secara operasional, namun perlu *redesign* jumlah anoda korban untuk meningkatkan faktor keamanan.
2. Material API 5L Grade B layak secara konstruksi untuk digunakan sebagai pipa kondensat.
3. Sistem proteksi katodik layak secara disain untuk diinstalasi pada jalur pipa kondensat guna menahan serangan korosi eksternal.

5.2. Saran

Untuk lebih meningkatkan faktor keamanan dapat dilakukan modifikasi disain sistem proteksi katodik dengan cara menambahkan 4 (empat) buah anoda tambahan pada titik-titik *groundbed* di km ke-1.5, 8.5, 11.5, dan 26.5 masing-masing sebanyak satu batang anoda magnesium 32 lbs.

Verifikasi kelayakan operasional sistem proteksi katodik sangat diperlukan sebagai dasar pembuatan SOP untuk pengecekan rutin ketebalan dan penentuan jadwal inspeksi.

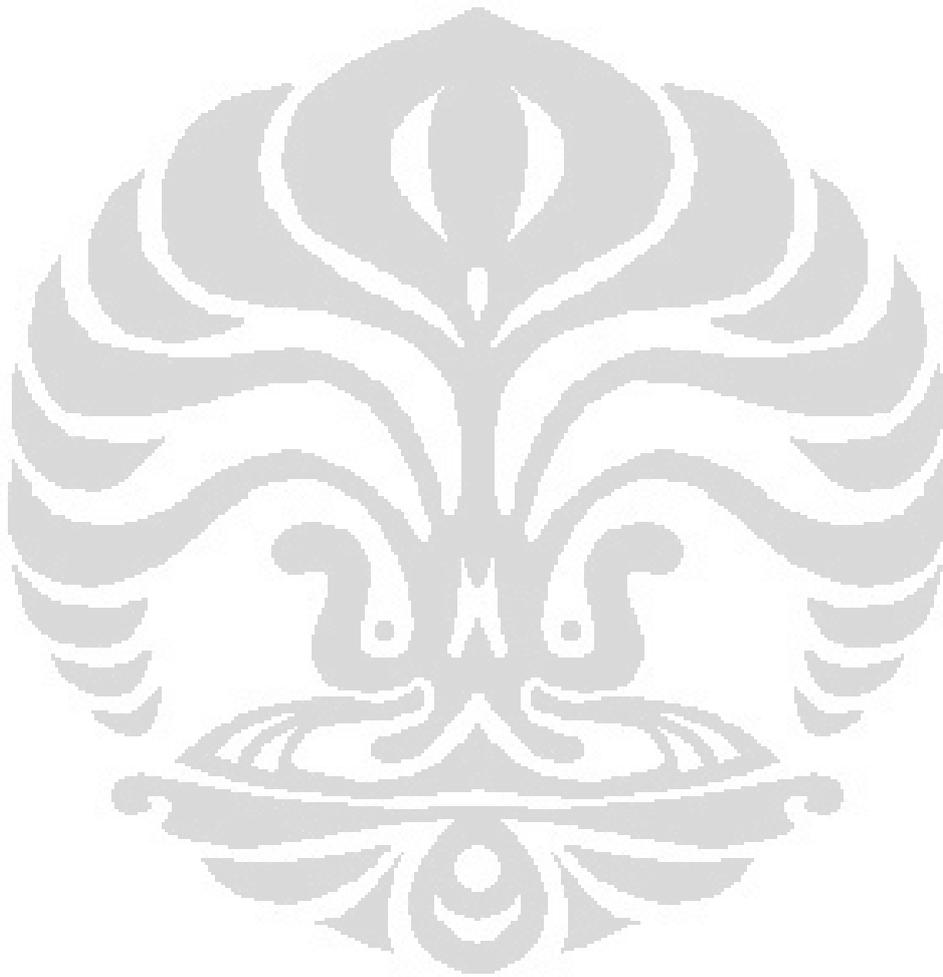
DAFTAR PUSTAKA

- API 5L. 2010. *Seamless and Welded Line Pipes for Conveying Water, Gaseous and Liquid Hydrocarbons and for The Construction of Chemical and Industrial Plants, Oil Refineries etc.* USA.
- Arndt, Roger. 2002. "Cavitation in Vortical Flows". *Annual Review of Fluid Mechanics* 34. pp. 143.
- ASTM. 2010. *Annual Handbook of ASTM Standards: Metal Test Method and Analytical Procedures Volume 03.02*. ASTM 100 Barr Harbor Drive, West Conshohochen, PA 19428.
- Boucherit, M. N. and Tebib, D. A. 2005. "A Study of Carbon Steels in Basic Pitting Environments". *Corrosion Methods and Materials* 52.6. pp. 365-370 (6).
- BSI. 2012. *Cathodic Protection: Code of Practice for Land and Marine Applications*. BSI-7361 part 1/1991.
- Callister, W. D. and Rethwisch. 2011. *Fundamentals of Materials Science and Engineering: an Integrated Approach*. John Wiley and Sons, USA.
- Chan, W. W., Cheng, F. T., and Chow, W. K. 2002. "Susceptibility of Materials to Cavitation Erosion in Hong Kong". *AWWA Journal/Aug 2002*. pp. 77.
- Demoz, A., Papavinasam, S., Omotoso, O., Michaelian, K., and Revie, R. W. 2009. "Effect of Field Operational Variables on Internal Pitting Corrosion of Oil and Gas Pipelines". *Corrosions* 65.11. pp. 741-747.
- Holtsbaum, W. B. 2009. *Cathodic Protection Survey Procedures*. NACE International, Houston.
- Huck, Ted. 2002. "Cathodic Protection Cuts Corrosion Costs". *Power Engineering/June 2002*. pp. 54.

- MIT. 2003. *The Metallographic Examination of Archeological Artifacts (Laboratory Manual)*. Summer Institute in Materials Science and Material Culture, MIT.
- Muhlbauer, W. K. 2004. *Pipeline Risk Management Manual (3rd Edition)*. GPP, USA, UK.
- Musalam, I. dan Nasoetion, R. 2005. "Penelitian Karakteristik Korosi Atmosfer di Daerah Pantai Utara Jakarta". *Jurnal Korosi*. Majalah Ilmu dan Teknologi LIPI, p.5.
- NACE. 2000. *Specialized Survey for Buried Pipelines*. NACE Task Group E 4-2, NACE International, Houston, Texas, USA.
- NACE. 2002. *Standard Test Method: Laboratory Corrosion Testing of Metals for the Process Industries*. NACE, Houston, Texas.
- NACE. 2002. *Corrosion of External Corrosion in Underground or Submerged Metallic Piping System*. NACE RP 0169-2002, USA.
- Natsir, M., Soedardjo, Arhatari, B. D., Andryansyah, Haryanto, M., dan Triyadi, A. 2000. "Analisis Kerusakan Pipa Boiler Industri". *Prosiding Presentasi Ilmiah Teknologi Keselamatan Nuklir-V*. Serpong, 28 Juni 2000, p.14-15.
- Papavinasam, S., Doiron, A., Revie, R. W., and Sizov, V. 2007. "Model Predicts Internal Pitting Corrosion of Oil, Gas Pipeline". *Oil and Gas Journal* 105.44 (Nov 26, 2007). pp. 68-72, 74.
- Pavlina, E. J. and van Tyne, C. J. 2008. "Correlation of Yield Strength and Tensile Strength with Hardness for Steels". *Journal of Materials Engineering and Performance* Volume 17(6) December 2008. pp. 892.
- Revie, R.W. and Uhlig, H.H. 2008. *Corrosion and Corrosion Control 4th Edition*. John Wiley and Son Inc., New Jersey.
- Schweitzer, Philip A. 2007. *Fundamental of Metallic Corrosion*. CRC Press, Boca Raton, FL.

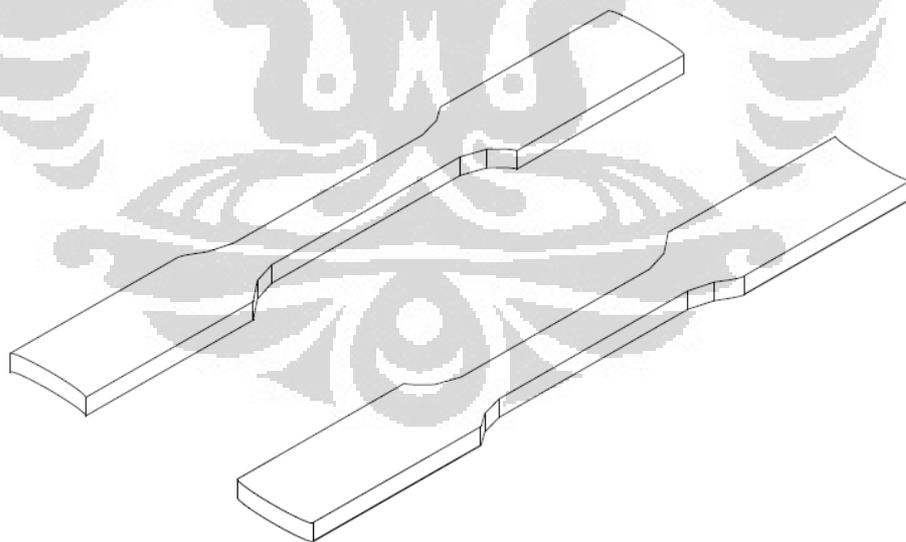
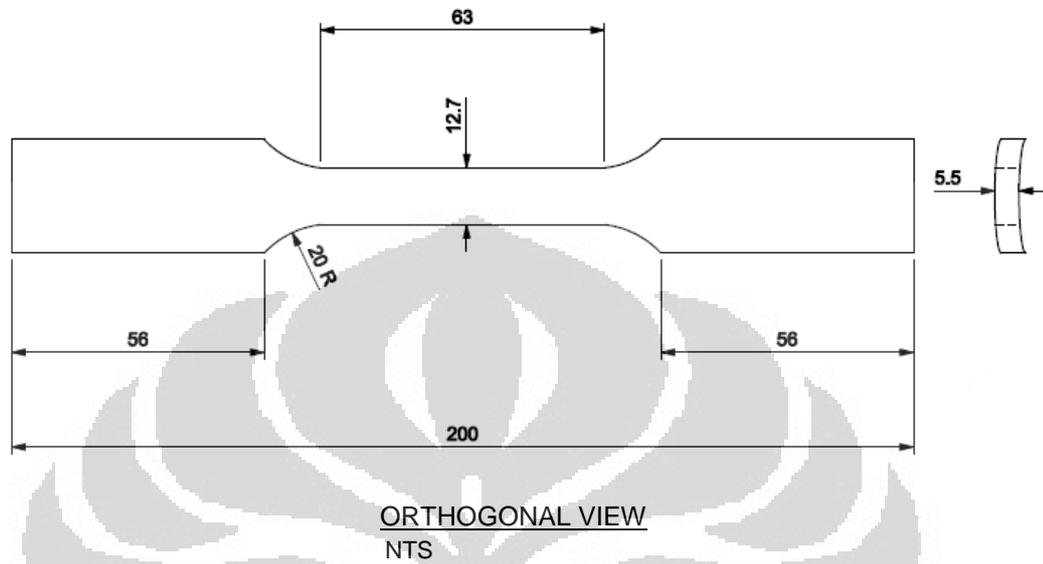
Solihin, M.Y.M. 2002. *Analisa Umur Pakai Sistem Pemipaan Produksi Minyak dan Gas*. Risk Management Book Series I, Jakarta.

Solihin, M.Y.M. 2009. *Modul Pengenalan Ilmu Korosi dan Pencegahannya*. Program Pasca Sarjana Materials Science UI, Jakarta.





Lampiran 1: Dimensi dan Bentuk Sampel Uji Tarik



Lampiran 2: Perhitungan-Perhitungan Disain untuk Konstruksi Pipa

A. M.A.O.P. dan *Tensile Strength*

Data teknis operasional untuk pipa diameter 3 inch sch.40:

$$p = 1450 \text{ psig,}$$

$$t = 0.216 \text{ inch}$$

$$D = 3.068 \text{ inch}$$

bila nilai *M.A.O.P.* adalah

$$p = 2.TS.t/D; \text{ dimana } TS \text{ adalah } \textit{tensile strength}$$

maka nilai *tensile strength* pipa menjadi

$$\begin{aligned} TS &= (p.D) / (2.t) \\ &= (1450 \times 3.068) / (2 \times 0.216) \\ &= 10\,297.69 \text{ psig} \end{aligned}$$

bila 1 psi = 0.07031 kg/cm², maka

nilai *tensile strength* menjadi

$$\begin{aligned} TS &= 724.03 \text{ kg/cm}^2 \\ &= 71\,027\,343 \text{ Pa} \\ &= 71.03 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Dengan persamaan $TS = 3.45 \text{ HB}$, maka nilai kekerasan Brinell maksimum yang dapat diterima menjadi

$$\begin{aligned} HB &= TS/3.45 \\ &= 71.03/3.45 \\ &= 20.59 \text{ MPa} \end{aligned}$$

B. Pemilihan Material Pipa

Berdasarkan analisa MAOP teraman pada sub bab IV.6.1 yang menunjukkan nilai *tensile strength* yang diperlukan konstruksi pipa untuk kondisi tekanan tinggi adalah 71.03 MPa.

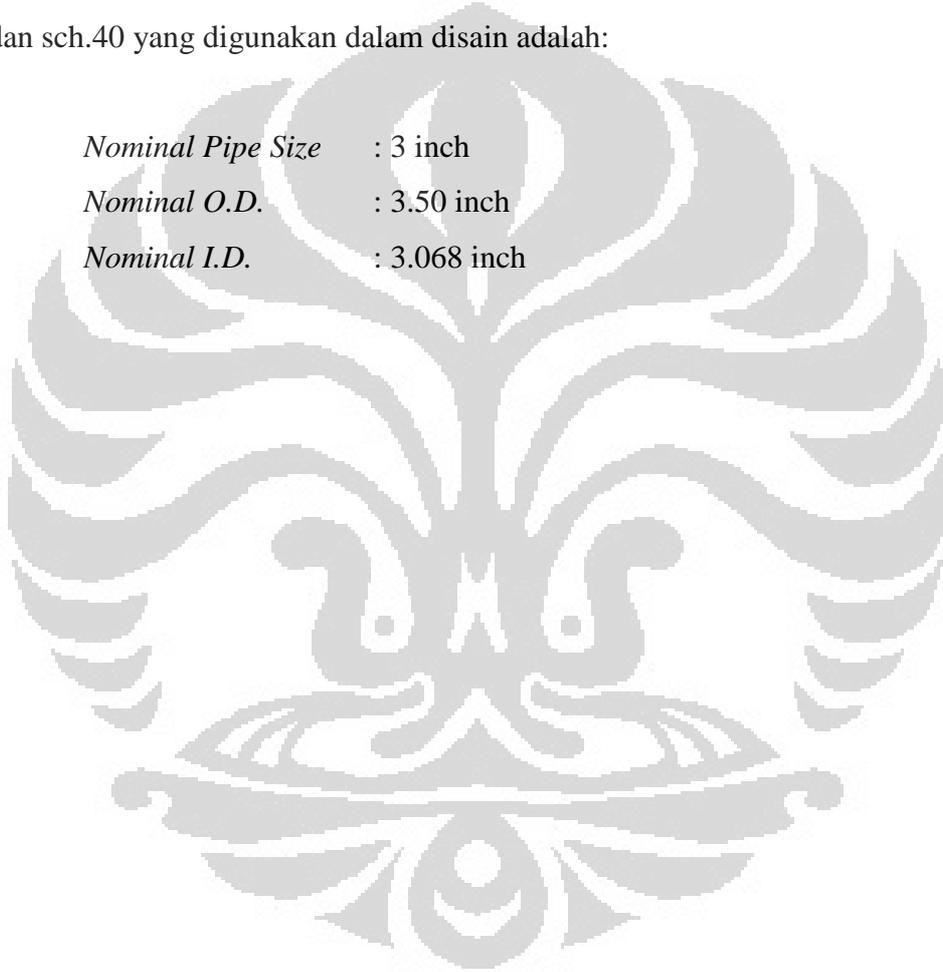
Lampiran 2: Perhitungan-Perhitungan Disain untuk Konstruksi Pipa (lanjutan)

Sedangkan berdasarkan standar API 5L nilai *tensile strength* minimum yang dapat diterima oleh material API 5L adalah 331 MPa. Maka untuk mendistribusikan kondensat dari gas alam dapat digunakan pipa API 5L.

C. Data Teknis Pipa yang Digunakan

Data teknis yang berupa dimensi dari pipa API 5L untuk ukuran 3 inch dan sch.40 yang digunakan dalam disain adalah:

| | |
|--------------------------|--------------|
| <i>Nominal Pipe Size</i> | : 3 inch |
| <i>Nominal O.D.</i> | : 3.50 inch |
| <i>Nominal I.D.</i> | : 3.068 inch |



Lampiran 3: Hasil Survey Resistivitas Tanah

| No. | KM | RESISTIVITAS TANAH (ohm-cm) | | | pH | Keterangan |
|-----|------|-----------------------------|--------------------|------------------|------|-----------------------------|
| | | Kedalaman 1 m | Kedalaman 1.5 m | Kedalaman 2 m | | |
| 1 | 0.0 | 1350.00 | 1460.00 | 1390.00 | 6.10 | SP Subang |
| 2 | 0.5 | 1760.00 | 1470.00 | 1580.00 | 6.10 | |
| 3 | 1.0 | 2340.00 | 2630.00 | 2680.00 | 6.10 | Sawah dekat <i>crossing</i> |
| 4 | 1.5 | 3265.60 | 3673.80 | 3642.40 | 6.20 | |
| 5 | 2.0 | 2072.40 | 2731.80 | 3516.80 | 6.20 | |
| 6 | 2.5 | 3077.20 | 2449.20 | 2386.40 | 6.20 | |
| 7 | 3.0 | 1758.40 | 1978.20 | 2009.60 | 6.20 | Kebun kelapa |
| 8 | 3.5 | 3391.20 | 2449.20 | 1884.00 | 6.20 | |
| 9 | 4.0 | 1444.40 | 1413.00 | 1381.60 | 6.10 | |
| 10 | 4.5 | 2637.60 | 2449.20 | 2009.60 | 5.90 | |
| 11 | 5.0 | 1444.40 | 1130.40 | 753.60 | 6.90 | Sawah dekat pintu air |
| 12 | 5.5 | 1695.60 | 1601.40 | 1507.20 | 6.50 | |
| 13 | 6.0 | 1884.00 | 1695.60 | 1884.00 | 6.40 | |
| 14 | 6.5 | 4396.00 | 4427.40 | 3893.60 | 6.20 | |
| 15 | 7.0 | 2449.20 | 2260.80 | 2009.60 | 6.50 | Depan kandang ayam |
| 16 | 7.5 | 2951.60 | 2072.40 | 2009.60 | 6.90 | |
| 17 | 8.0 | 1695.60 | 1318.80 | 1256.00 | 6.80 | |
| 18 | 8.5 | 1570.00 | 1789.80 | 1884.00 | 6.80 | |
| 19 | 9.0 | 1256.00 | 1224.60 | 1130.40 | 6.20 | |
| 20 | 9.5 | 753.60 | 8478.00 | 8792.00 | 6.90 | |
| 21 | 10.0 | 4835.60 | 5652.00 | 6405.60 | 6.90 | |
| 22 | 10.5 | 2637.60 | 3768.00 | 4647.20 | 7.00 | |
| 23 | 11.0 | 1821.20 | 1601.40 | 1632.80 | 6.80 | |
| 24 | 11.5 | 3642.40 | 4615.80 | 5275.20 | 6.20 | |
| 25 | 12.0 | 3830.80 | 4050.60 | 4647.20 | 6.80 | Depan makam |
| 26 | 12.5 | 4144.80 | 4615.80 | 5149.60 | 6.50 | |
| 27 | 13.0 | 816.40 | 9702.60 | 9796.80 | 6.50 | Depan kolam ikan |
| 28 | 13.5 | 2951.60 | 3862.20 | 4270.40 | 6.20 | |
| 29 | 14.0 | 3579.40 | 4615.80 | 5149.60 | 6.10 | Dekat ventilasi |
| 30 | 14.5 | 1030.00 | 890.00 | 810.00 | 5.90 | |
| 31 | 15.0 | 1920.00 | 1200.00 | 1100.00 | 6.90 | Daerah sawah |
| 32 | 15.5 | 3770.00 | 4890.00 | 3880.00 | 5.90 | |
| 33 | 16.0 | 750.00 | 720.00 | 850.00 | 6.90 | Depan pohon rambutan |
| 34 | 16.5 | 1060.00 | 740.00 | 560.00 | 6.50 | |
| 35 | 17.0 | 1650.00 | 1190.00 | 920.00 | 6.10 | Daerah sawah |
| 36 | 17.5 | 6880.00 | 7580.00 | 8100.00 | 5.80 | |
| 37 | 18.0 | 3100.00 | 3060.00 | 2560.00 | 6.20 | Depan pohon randu |
| 38 | 18.5 | 700.00 | 700.00 | 610.00 | 6.10 | |
| 39 | 19.0 | 7630.00 | 7390.00 | 7230.00 | 5.90 | Daerah lio |

Lampiran 3: Hasil Survey Resistivitas Tanah (lanjutan)

| No. | KM | RESISTIVITAS TANAH (ohm-cm) | | | pH | Keterangan |
|-----|------|-----------------------------|--------------------|------------------|------|-----------------------|
| | | Kedalaman 1 m | Kedalaman 1.5 m | Kedalaman 2 m | | |
| 40 | 19.5 | 1360.00 | 930.00 | 710.00 | 6.90 | |
| 41 | 20.0 | 2810.00 | 1340.00 | 1180.00 | 6.50 | |
| 42 | 20.5 | 684.50 | 612.30 | 577.76 | 6.20 | |
| 43 | 21.0 | 690.80 | 659.40 | 753.60 | 5.90 | Pintu air |
| 44 | 21.5 | 1004.80 | 753.60 | 628.00 | 6.80 | |
| 45 | 22.0 | 1318.80 | 1130.40 | 1381.60 | 6.20 | |
| 46 | 22.5 | 2826.00 | 2449.20 | 2260.80 | 6.90 | |
| 47 | 23.0 | 2009.60 | 2355.00 | 2135.20 | 6.00 | Kebun kacang |
| 48 | 23.5 | 1130.40 | 659.40 | 602.88 | 5.80 | |
| 49 | 24.0 | 2009.60 | 2637.60 | 1884.00 | 5.90 | Depan perumahan |
| 50 | 24.5 | 401.90 | 452.20 | 728.48 | 6.70 | |
| 51 | 25.0 | 672.00 | 668.80 | 828.96 | 5.80 | Depan pintu air |
| 52 | 25.5 | 653.10 | 640.60 | 514.96 | 6.30 | |
| 53 | 26.0 | 942.00 | 847.80 | 753.60 | 6.20 | Daerah makam |
| 54 | 26.5 | 2198.00 | 2355.00 | 2260.80 | 6.50 | |
| 55 | 27.0 | 1130.40 | 1318.80 | 1130.40 | 6.10 | |
| 56 | 27.5 | 1130.40 | 1318.80 | 1381.60 | 5.80 | |
| 57 | 28.0 | 1695.60 | 1224.60 | 879.20 | 6.20 | Depan pintu air |
| 58 | 28.5 | 596.60 | 659.40 | 615.44 | 5.90 | |
| 59 | 29.0 | 1130.40 | 1036.20 | 1004.80 | 6.80 | Sebelum kali Cigadung |
| 60 | 29.5 | 690.80 | 753.60 | 753.60 | 6.20 | |
| 61 | 30.0 | 577.80 | 602.90 | 565.20 | 6.80 | Setelah jembatan |
| 62 | 30.5 | 1067.60 | 659.40 | 690.80 | 6.80 | |
| 63 | 31.0 | 690.80 | 565.20 | 464.72 | 6.90 | SP Pegaden |

Lampiran 4. Distribusi Anoda Sebelum Verifikasi Disain CPS

| No. TB | Km | Jumlah Anoda Mg 32 lbs | No. TB | Km | Jumlah Anoda Mg 32 lbs |
|--------|-------|------------------------|--------|-------|------------------------|
| 00 | 0.00 | 1 | 16 | 16.00 | 2 |
| | 0.50 | 1 | | 16.50 | 1 |
| 01 | 1.00 | 1 | 17 | 17.00 | 2 |
| | 1.50 | 1 | | 17.50 | 1 |
| 02 | 2.00 | 2 | 18 | 18.00 | 1 |
| | 2.50 | 1 | | 18.50 | 2 |
| 03 | 3.00 | 2 | 19 | 19.00 | 1 |
| | 3.50 | 1 | | 19.50 | 1 |
| 04 | 4.00 | 2 | 20 | 20.00 | 2 |
| | 4.50 | 1 | | 20.50 | 2 |
| 05 | 5.00 | 2 | 21 | 21.00 | 2 |
| | 5.50 | 1 | | 21.50 | 1 |
| 06 | 6.00 | 2 | 22 | 22.00 | 2 |
| | 6.50 | 1 | | 22.50 | 1 |
| 07 | 7.00 | 2 | 23 | 23.00 | 2 |
| | 7.50 | 1 | | 23.50 | 2 |
| 08 | 8.00 | 2 | 24 | 24.00 | 2 |
| | 8.50 | 1 | | 24.50 | 3 |
| 09 | 9.00 | 2 | 25 | 25.00 | 2 |
| | 9.50 | 1 | | 25.50 | 2 |
| 10 | 10.00 | 1 | 26 | 26.00 | 2 |
| | 10.50 | 1 | | 26.50 | 1 |
| 11 | 11.00 | 2 | 27 | 27.00 | 2 |
| | 11.50 | 1 | | 27.50 | 1 |
| 12 | 12.00 | 1 | 28 | 28.00 | 2 |
| | 12.50 | 1 | | 28.50 | 2 |
| 13 | 13.00 | 1 | 29 | 29.00 | 2 |
| | 13.50 | 1 | | 29.50 | 1 |
| 14 | 14.00 | 1 | 30 | 30.00 | 2 |
| | 14.50 | 1 | | 30.50 | 2 |
| 15 | 15.00 | 2 | 31 | 31.00 | 3 |
| | 15.50 | 1 | | | |

Lampiran 5. *Potential Logger* Saat Pemasangan CPS

| No. TB | Km ke- | Jumlah Anoda | Potensial Proteksi vs Cu/CuSO ₄ (-V) | Arus Anoda (mA) | Arus Anoda Gabungan (mA) |
|--------|--------|--------------|---|-----------------|--------------------------|
| 00 | 0.0 | 1 | 1.470 | 10.35 | |
| | 0.5 | 1 | 1.329 | 9.39 | |
| 01 | 1.0 | 1 | 1.403 | 10.29 | |
| | 1.5 | 1 | 0.764 | 5.59 | |
| 02 | 2.0 | 2 | 0.957 | 17.58 | 24.30 |
| | | | | 11.57 | |
| | 2.5 | 1 | 0.947 | 21.67 | |
| 03 | 3.0 | 2 | 1.007 | 9.60 | 13.43 |
| | | | | 6.90 | |
| | 3.5 | 1 | 1.504 | 2.41 | |
| 04 | 4.0 | 2 | 1.601 | 0.40 | 0.40 |
| | | | | 0.40 | |
| | 4.5 | 1 | 1.387 | 22.15 | |
| 05 | 5.0 | 2 | 1.492 | 5.65 | 12.66 |
| | | | | 6.76 | |
| | 5.5 | 1 | 1.429 | 0.42 | |
| 06 | 6.0 | 2 | 1.120 | 13.22 | 23.84 |
| | | | | 16.70 | |
| | 6.5 | 1 | 1.302 | 3.69 | |
| 07 | 7.0 | 2 | 1.269 | 2.72 | 6.28 |
| | | | | 3.95 | |
| | 7.5 | 1 | 1.115 | 8.87 | |
| 08 | 8.0 | 2 | 1.219 | 7.67 | 12.01 |
| | | | | 5.86 | |
| | 8.5 | 1 | 0.738 | 21.94 | |
| 09 | 9.0 | 2 | 1.043 | 18.30 | 23.19 |
| | | | | 9.55 | |
| | 9.5 | 1 | 0.919 | 10.32 | |
| 10 | 10.0 | 1 | 1.530 | 0.75 | |
| | 10.5 | 1 | 1.494 | 0.04 | |
| 11 | 11.0 | 2 | 0.858 | 4.36 | 7.15 |
| | | | | 2.95 | |
| | 11.5 | 1 | 0.716 | 6.97 | |
| 12 | 12.0 | 1 | 0.722 | 8.36 | |
| | 12.5 | 1 | 0.958 | 10.29 | |
| 13 | 13.0 | 1 | 0.704 | 6.15 | |
| | 13.5 | 1 | 0.845 | 16.03 | |
| 14 | 14.0 | 1 | 0.778 | 6.07 | |
| | 14.5 | 1 | 1.297 | 41.57 | |

Lampiran 5. *Potential Logger* Saat Pemasangan CPS (lanjutan)

| No. TB | Km ke- | Jumlah Anoda | Potensial Proteksi vs Cu/CuSO ₄ (-V) | Arus Anoda (mA) | Arus Anoda Gabungan (mA) |
|--------|--------|--------------|---|-----------------|--------------------------|
| 15 | 15.0 | 2 | 0.903 | 37.14 | 44.67 |
| | | | | 11.51 | |
| 16 | 15.5 | 1 | 0.850 | 18.25 | 39.36 |
| | 16.0 | 2 | 1.197 | 22.45 | |
| 17 | 16.5 | 1 | 1.047 | 23.40 | 104.90 |
| | | | | 45.51 | |
| 18 | 17.0 | 2 | 0.983 | 64.37 | 104.90 |
| | 17.5 | 1 | 0.806 | 5.55 | |
| 19 | 18.0 | 1 | 1.171 | 10.30 | 42.73 |
| | 18.5 | 2 | 1.127 | 35.12 | |
| 20 | 19.0 | 1 | 1.155 | 14.07 | 11.71 |
| | | | | 19.5 | |
| 21 | 20.0 | 2 | 1.311 | 1.36 | 6.12 |
| | 20.5 | 2 | 1.042 | 5.46 | |
| 22 | 21.0 | 2 | 1.007 | 33.03 | 36.16 |
| | | | | 3.87 | |
| 23 | 21.5 | 1 | 1.002 | 74.60 | 103.40 |
| | 22.0 | 2 | 1.076 | 45.70 | |
| 24 | 22.5 | 1 | 1.086 | 4.50 | 50.17 |
| | | | | 23.0 | |
| 25 | 23.5 | 2 | 1.073 | 29.74 | 75.40 |
| | | | | 34.13 | |
| 26 | 24.0 | 2 | 1.157 | 23.11 | 41.45 |
| | 24.5 | 3 | 1.139 | 53.12 | |
| 27 | 25.0 | 2 | 1.130 | 13.21 | 42.43 |
| | | | | 23.15 | |
| 28 | 25.5 | 2 | 1.010 | 26.40 | 66.40 |
| | | | | 22.07 | |
| 29 | 25.5 | 2 | 1.010 | 49.02 | 77.50 |
| | | | | 10.04 | |
| 30 | 25.5 | 2 | 1.010 | 12.09 | 13.40 |
| | | | | 32.70 | |
| 31 | 25.5 | 2 | 1.010 | 52.13 | 13.40 |
| | | | | 2.44 | |

Lampiran 5. *Potential Logger* Saat Pemasangan CPS (lanjutan)

| No. TB | Km ke- | Jumlah Anoda | Potensial Proteksi vs Cu/CuSO ₄ (-V) | Arus Anoda (mA) | Arus Anoda Gabungan (mA) |
|--------|--------|--------------|---|-----------------|--------------------------|
| 26 | 26.0 | 2 | 1.005 | 6.78 | 35.43 |
| | | | | 27.78 | |
| | 26.5 | 1 | 0.805 | 23.82 | |
| 27 | 27.0 | 2 | 0.886 | 32.27 | 60.21 |
| | | | | 28.52 | |
| | 27.5 | 1 | 0.911 | 5.21 | |
| 28 | 28.0 | 2 | 0.998 | 11.84 | 27.80 |
| | | | | 15.22 | |
| | 28.5 | 2 | 0.997 | 5.60 | 8.18 |
| | | | | 2.41 | |
| 29 | 29.0 | 2 | 1.180 | 20.19 | 32.10 |
| | | | | 2.47 | |
| | 29.5 | 1 | 0.827 | 37.45 | |
| 30 | 30.0 | 2 | 0.706 | 43.85 | 73.70 |
| | | | | 26.49 | |
| | 30.5 | 2 | 0.903 | 41.20 | 39.22 |
| | | | | 23.11 | |
| 31 | 31.0 | 3 | 0.703 | 37.17 | 41.40 |
| | | | | 15.82 | |
| | | | | 7.52 | |

Lampiran 6: *Potential Logger* Setelah Pemasangan CPS

| No. TB | Km ke- | Jumlah Anoda | Potensial Proteksi vs Cu/CuSO ₄ (-V) | Arus Anoda Gabungan (mA) |
|--------|--------|--------------|---|--------------------------|
| 00 | 0.0 | 2 | 1.493 | 10.93 |
| 01 | 1.0 | 2 | 1.468 | 10.10 |
| 02 | 2.0 | 3 | 1.352 | 19.33 |
| 03 | 3.0 | 3 | 1.552 | 10.93 |
| 04 | 4.0 | 3 | 1.601 | 0.40 |
| 05 | 5.0 | 3 | 1.548 | 12.66 |
| 06 | 6.0 | 3 | 1.504 | 12.98 |
| 07 | 7.0 | 3 | 1.424 | 14.02 |
| 08 | 8.0 | 3 | 1.435 | 11.57 |
| 09 | 9.0 | 3 | 1.524 | 12.47 |
| 10 | 10.0 | 2 | 1.557 | 0.84 |
| 11 | 11.0 | 3 | 1.549 | 1.05 |
| 12 | 12.0 | 2 | 1.091 | 17.58 |
| 13 | 13.0 | 2 | 1.402 | 3.96 |
| 14 | 14.0 | 2 | 0.979 | 21.22 |
| 15 | 15.0 | 3 | 1.421 | 71.50 |
| 16 | 16.0 | 3 | 1.410 | 34.90 |
| 17 | 17.0 | 3 | 1.379 | 63.80 |
| 18 | 18.0 | 3 | 1.376 | 19.68 |
| 19 | 19.0 | 2 | 1.407 | 7.00 |
| 20 | 20.0 | 4 | 1.367 | 15.45 |
| 21 | 21.0 | 3 | 1.076 | 15.80 |
| 22 | 22.0 | 3 | 1.215 | 80.20 |
| 23 | 23.0 | 4 | 1.272 | 11.66 |
| 24 | 24.0 | 5 | 1.366 | 55.49 |
| 25 | 25.0 | 4 | 1.388 | 107.90 |
| 26 | 26.0 | 3 | 1.227 | 93.40 |
| 27 | 27.0 | 3 | 1.355 | 65.25 |
| 28 | 28.0 | 4 | 1.374 | 260.30 |
| 29 | 29.0 | 3 | 1.240 | 126.60 |
| 30 | 30.0 | 4 | 1.198 | 209.20 |
| 31 | 31.0 | 3 | 1.249 | 247.30 |

Lampiran 7. *Potential Logger* Satu Bulan Setelah Pemasangan CPS

| No. TB | Km ke- | Jumlah Anoda | Potensial Proteksi vs Cu/CuSO ₄ (-V) | Arus Anoda Gabungan (mA) |
|--------|--------|--------------|---|--------------------------|
| 00 | 0.0 | 2 | 1.361 | 12.16 |
| 01 | 1.0 | 2 | 1.390 | 27.06 |
| 02 | 2.0 | 3 | 1.404 | 16.66 |
| 03 | 3.0 | 3 | 1.388 | 26.05 |
| 04 | 4.0 | 3 | 1.374 | 19.91 |
| 05 | 5.0 | 3 | 1.440 | 27.77 |
| 06 | 6.0 | 3 | 1.462 | 44.82 |
| 07 | 7.0 | 3 | 1.397 | 28.52 |
| 08 | 8.0 | 3 | 1.425 | 23.21 |
| 09 | 9.0 | 3 | 1.400 | 32.52 |
| 10 | 10.0 | 2 | 1.317 | 17.53 |
| 11 | 11.0 | 3 | 1.350 | 26.59 |
| 12 | 12.0 | 2 | 1.344 | 22.50 |
| 13 | 13.0 | 2 | 1.358 | 17.47 |
| 14 | 14.0 | 2 | 1.300 | 43.46 |
| 15 | 15.0 | 3 | 1.390 | 78.40 |
| 16 | 16.0 | 3 | 1.357 | 39.65 |
| 17 | 17.0 | 3 | 1.348 | 68.90 |
| 18 | 18.0 | 3 | 1.348 | 27.45 |
| 19 | 19.0 | 2 | 1.306 | 10.62 |
| 20 | 20.0 | 4 | 1.324 | 37.77 |
| 21 | 21.0 | 3 | 1.315 | 15.80 |
| 22 | 22.0 | 3 | 1.354 | 51.40 |
| 23 | 23.0 | 4 | 1.361 | 82.50 |
| 24 | 24.0 | 5 | 1.372 | 48.05 |
| 25 | 25.0 | 4 | 1.350 | 87.10 |
| 26 | 26.0 | 3 | 1.313 | 87.60 |
| 27 | 27.0 | 3 | 1.311 | 68.50 |
| 28 | 28.0 | 4 | 1.237 | 87.30 |
| 29 | 29.0 | 3 | 1.172 | 115.90 |
| 30 | 30.0 | 4 | 1.177 | 168.50 |
| 31 | 31.0 | 3 | 1.168 | 247.50 |

Lampiran 8: *Potential Logger* Hasil Pengukuran Bersama (Komisioning)

| No. TB | Km ke- | Jumlah Anoda | Potensial Proteksi vs Cu/CuSO ₄ (-V) | Arus Anoda Gabungan (mA) |
|--------|--------|--------------|---|--------------------------|
| 00 | 0.0 | 2 | 0.919 | 82.40 |
| 01 | 1.0 | 2 | 1.069 | 65.70 |
| 02 | 2.0 | 3 | | |
| 03 | 3.0 | 3 | 1.200 | 52.82 |
| 04 | 4.0 | 3 | 1.148 | 36.92 |
| 05 | 5.0 | 3 | | |
| 06 | 6.0 | 3 | | |
| 07 | 7.0 | 3 | 1.235 | 44.09 |
| 08 | 8.0 | 3 | 1.322 | 34.30 |
| 09 | 9.0 | 3 | 1.317 | 33.67 |
| 10 | 10.0 | 2 | | |
| 11 | 11.0 | 3 | | |
| 12 | 12.0 | 2 | | |
| 13 | 13.0 | 2 | | |
| 14 | 14.0 | 2 | 1.258 | 15.91 |
| 15 | 15.0 | 3 | | |
| 16 | 16.0 | 3 | | |
| 17 | 17.0 | 3 | | |
| 18 | 18.0 | 3 | 1.202 | 44.70 |
| 19 | 19.0 | 2 | | |
| 20 | 20.0 | 4 | | |
| 21 | 21.0 | 3 | 1.066 | 136.20 |
| 22 | 22.0 | 3 | 1.199 | 71.70 |
| 23 | 23.0 | 4 | 1.277 | 112.60 |
| 24 | 24.0 | 5 | 1.281 | 57.23 |
| 25 | 25.0 | 4 | | |
| 26 | 26.0 | 3 | | |
| 27 | 27.0 | 3 | | |
| 28 | 28.0 | 4 | | |
| 29 | 29.0 | 3 | | |
| 30 | 30.0 | 4 | | |
| 31 | 31.0 | 3 | | |

Lampiran 9: Perhitungan-Perhitungan Verifikasi Disain CPS

A. Anoda Magnesium

Spesifikasi material anoda magnesium *prepacked* jenis *standard potential* tipe *D-shape* dengan berat 32 lbs (Lihat Lampiran 3) yang akan digunakan dalam disain sistem proteksi katodik untuk pipa diameter 3 inch sch.40 sepanjang 32 km adalah sebagai berikut:

a. Komposisi Anoda Magnesium

Spesifikasi material anoda Mg *prepacked* dengan berat 32 lbs tipe *D-shape* yang digunakan dalam disain ini adalah jenis *standard potential* dengan komposisi kimia material anoda magnesium sebagai berikut:

- i. Al : 5.0 – 7.0% max.
- ii. Mn : 0.15% min.
- iii. Zn : 2.0 – 4.0% max.
- iv. Si : 0.30% max.
- v. Cu : 0.10% max.
- vi. Ni : 0.003% max.
- vii. Fe : 0.003% max.
- viii. kotoran : 0.003% max.
- ix. Mg : sisanya

b. Komposisi *Backfill* Anoda Magnesium

Spesifikasi komposisi *backfill* untuk anoda Mg 32 lbs jenis *standard potential* sebagai media reaktif dalam meningkatkan reaktivitas material anoda terhadap lingkungan tanah adalah sebagai berikut:

- i. *Gypsum* : 75%
- ii. *Bentonite* : 20%
- iii. *Sodium sulfate*: 5%

c. Kabel Anoda

Spesifikasi material kabel anoda magnesium adalah jenis NYA 1c x 6 mm² dengan panjang 3 m.

Lampiran 9: Perhitungan-Perhitungan Verifikasi Disain CPS (lanjutan)

d. Kelistrikan

Data kelistrikan yang perlu diketahui pada anoda Mg adalah sebagai berikut:

- i. Potensial terbuka anoda vs Cu/CuSO₄ = -1.50 ~ -1.55 V
- ii. Tahanan *backfill* = 25~150 ohm.cm

B. Kondisi Disain dan Lapangan

a. Data Pipa

- i. Diameter luar pipa, OD = 3.50 inch = 0.0889 m
- ii. Panjang pipa, Le = 32 000 m
- iii. Jenis lapis lindung = *Polyken tape* (material: *polyethylene*, PE)

b. Kondisi tanah (resistivitas tanah) untuk kedalaman 1.5 m berdasarkan hasil pemeriksaan rata-rata kedalaman 1.5 m adalah 2250.88 ohm.cm.

c. Umur perlindungan (umur disain) untuk 20 tahun

d. Cacat *coating* (dC) saat pemasangan atau penyambungan sebesar 4.75%

e. Rapat arus atau *current density* (CD) sesuai dengan kondisi tanah dan pipa menggunakan *coating* yaitu 16.87 mA/m².

f. *Coating breakdown* (CB) selama umur proteksi (20 tahun) sebesar 20% dari total yang digunakan.

g. Penempatan anoda per 500 m (*groundbed spacing*, Sg = 500 m)

h. Penggunaan dan penempatan *test point* atau *test box* (TB) sebantak 32 unit.

C. Perhitungan Ulang Disain Berdasarkan Arus

a. Luas Permukaan Pipa

$$\begin{aligned} A &= \pi \cdot OD \cdot Le \\ &= \pi \times 0.0889 \times 32\,000 \\ &= 8\,937.20 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Lampiran 9: Perhitungan-Perhitungan Verifikasi Disain CPS (lanjutan)

b. Luas Permukaan yang Akan Diproteksi

$$\begin{aligned}A_p &= A \cdot dC \\ &= 8\,937.20 \times 4.75\% \\ &= 424.52 \text{ m}^2\end{aligned}$$

c. Total Kebutuhan Arus Proteksi

$$\begin{aligned}I_p &= A_p \cdot CD \cdot (1 + CB) \\ &= 424.52 \times 16.87 \times (1 + 20\%) \\ &= 8\,593.98 \text{ mA} \\ &= 8.59 \text{ A}\end{aligned}$$

d. Tahanan Anoda Mg 32 lbs per Batang

$$\begin{aligned}\text{Diameter anoda + backfill, } D &= 20 \text{ cm} \\ \text{Panjang anoda + backfill, } L &= 74.93 \text{ cm}\end{aligned}$$

Maka, tahanan anoda Mg 32 lbs per batang menjadi

$$\begin{aligned}R_a &= [\rho / (2 \cdot \pi \cdot L)] \cdot [\ln(4 \cdot L / D) - 1] \\ &= [2250.88 / (2 \times \pi \times 74.93)] \cdot [\ln(4 \times 74.93 / 20) - 1] \\ &= 8.16 \text{ ohm}\end{aligned}$$

Dengan faktor koreksi, $CF = 1.11$, maka tahanan anoda Mg 32 lbs per batang menjadi

$$\begin{aligned}R_a &= R_a \times CF \\ &= 8.16 \times 1.11 \\ &= 9.06 \text{ ohm}\end{aligned}$$

e. Arus Anoda Mg 32 lbs per Batang

Anode driving voltage (potensial dorong) Mg terhadap baja karbon adalah:

$$\begin{aligned}\Delta E &= -0.85 - (-1.5) \\ &= 0.65 \text{ V}\end{aligned}$$

Lampiran 9: Perhitungan-Perhitungan Verifikasi Disain CPS (lanjutan)

Berdasarkan potensial dorong tersebut, maka arus anoda Mg 32 lbs per batang menjadi

$$\begin{aligned}I_a &= \Delta E / R_a \\ &= 0.65/9.06 \\ &= 0.07 \text{ A}\end{aligned}$$

f. Kebutuhan Anoda Mg 32 lbs

$$\begin{aligned}N_{\text{anoda Mg 32 lbs}} &= I_p/I_a \\ &= 8.59/0.07 \\ &= 122.71 \\ &\sim 123 \text{ batang}\end{aligned}$$

g. Umur Anoda 32 lbs per Batang

Umur anoda Mg 32 lbs per batang untuk kondisi tanah (resistivitas tanah, ρ , yaitu) 2250.88 ohm.cm dengan sistem pemasangan anoda horizontal berdasarkan keluaran arus anoda adalah:

$$T_{\text{anoda Mg 32 lbs}} = [W.Q.U] / [8760.I_a]$$

dimana:

W = massa anoda Mg 32 lbs (14.528 kg)

Q = kapasitas arus anoda magnesium (1230 A.Hr./kg)

U = faktor koreksi untuk material anoda magnesium (0.85)

Maka, umur anoda menjadi:

$$\begin{aligned}T_{\text{anoda Mg 32 lbs}} &= [14.528 \times 1230 \times 0.85] / [8760 \times 0.07] \\ &= 24.77 \text{ tahun}\end{aligned}$$

h. Total Kebutuhan Anoda Mg 32 lbs untuk 20 Tahun

$$\begin{aligned}N_{\text{anoda Mg 32 lbs}} &= (20/24.77) \times 123 \\ &= 99.31 \\ &\sim 100 \text{ batang}\end{aligned}$$

Lampiran 9: Perhitungan-Perhitungan Verifikasi Disain CPS (lanjutan)

- i. Jangkauan Proteksi per Batang Anoda Mg 32 lbs (*Space of Anode, Sa*)

$$\begin{aligned} Sa &= I_a / [\pi \cdot OD \cdot dC \cdot CD] \\ &= 0.07 / [\pi \times 0.0889 \times 0.0475 \times 0.01687] \\ &= 312.78 \text{ m} \end{aligned}$$

- j. Jumlah *Groundbed* dengan *Space of Groundbed* 500 m

$$\begin{aligned} GB &= 31\,000 / 500 \\ &= 62 \end{aligned}$$

- k. Jumlah Anoda Mg 32 lbs per *Groundbed*

$$\begin{aligned} N \text{ per } groundbed &= S_g / S_a \\ &= 500 / 312.78 \\ &= 1.60 \end{aligned}$$

Dengan demikian distribusi anoda per *groundbed* rata-rata adalah 2 batang dengan sebaran 1-3 anoda per *groundbed* disesuaikan dengan tingkat resistivitas tanah.

- l. Jumlah *Test Box*

Dengan distribusi *test box* tiap 2 *groundbed*, maka jumlah *test poin/test box* yang diperlukan adalah

$$\begin{aligned} TB &= \text{Jumlah } Groundbed / 2 \\ &= 62 / 2 \\ &= 32 \end{aligned}$$

- m. Distribusi Anoda dan *Test Box* Hasil Verifikasi Berdasarkan Arus

Hasil verifikasi disain sistem proteksi katodik dengan kalkulasi ulang disain berdasarkan kebutuhan arus diperoleh jumlah anoda Mg 32 lbs yang diperlukan sebanyak 100 batang dengan jumlah *test box* sebanyak 32 buah. Sebaran anoda per 500 m dengan jumlah anoda per *groundbed* sebanyak 1-3 (rata-rata 2 batang) disesuaikan dengan kondisi resistivitas tanah.

Lampiran 9: Perhitungan-Perhitungan Verifikasi Disain CPS (lanjutan)

D. Perhitungan Ulang Disain Berdasarkan Berat Anoda

a. Kondisi Anoda Mg 32 lbs dan Disain

Umur disain, $Y = 20$ tahun

Kebutuhan arus proteksi, $I_p = 8.59$ A

Kapasitas arus anoda Mg 32 lbs, $C = 1230$ A.Hr./kg

Utility factor, $U = 0.85$

Net Weight of Anode, $Nwt = 14.528$ kg (32 lbs)

b. Minimum Massa Total Anoda

$$\begin{aligned} W &= [8760.Y.I_p] / [U.C] \\ &= [8760 \times 20 \times 8.59] / [0.85 \times 1230] \\ &= 1439.47 \text{ kg} \end{aligned}$$

c. Jumlah Anoda Mg 32 lbs yang Diperlukan

$$\begin{aligned} Q &= W/Nwt \\ &= 1439.47/14.528 \\ &= 99.08 \\ &\sim 100 \text{ batang} \end{aligned}$$

d. Distribusi Anoda

Dengan kebutuhan total anoda hasil perhitungan kalkulasi ulang disain berdasarkan bobot (*by weight*) dan arus (*by current*) yang sama yaitu total 100 batang anoda, maka distribusi anoda hasil kalkulasi ulang disain berdasarkan bobot sama seperti pada hasil kalkulasi *by current*.

E. Verifikasi Disain Sistem Proteksi Katodik Berdasarkan *Potential Logger*

Berdasarkan *potential logger* saat pemasangan sistem proteksi katodik yang tertera pada Lampiran 5, terdapat 10 titik dimana pipa tidak terproteksi dengan baik yaitu

Lampiran 9: Perhitungan-Perhitungan Verifikasi Disain CPS (lanjutan)

| KM ke- | Potensial Proteksi (V) |
|--------|------------------------|
| 1.5 | - 0.764 |
| 8.5 | - 0.738 |
| 11.5 | - 0.716 |
| 12.0 | - 0.722 |
| 13.0 | - 0.704 |
| 14.0 | - 0.778 |
| 17.5 | - 0.806 |
| 26.5 | - 0.805 |
| 30.0 | - 0.706 |
| 31.0 | - 0.703 |

Kemudian dilanjutkan dengan pengecekan *potential logger* setelah pemasangan sistem proteksi katodik untuk mengetahui apakah titik-titik yang tidak terproteksi dengan baik pada saat pemasangan sudah terproteksi setelah pemasangan berdasarkan data pada Lampiran 6. Hasilnya adalah sebagai berikut

| KM ke- | Potensial Proteksi (V) | | Verifikasi |
|--------|------------------------|--------------------|-------------|
| | Saat Pemasangan | Setelah Pemasangan | |
| 1.5 | - 0.764 | Tidak ada data | - |
| 8.5 | - 0.738 | Tidak ada data | - |
| 11.5 | - 0.716 | Tidak ada data | - |
| 12.0 | - 0.722 | - 1.091 | Terproteksi |
| 13.0 | - 0.704 | - 1.402 | Terproteksi |
| 14.0 | - 0.778 | - 0.979 | Terproteksi |
| 17.5 | - 0.806 | Tidak ada data | - |
| 26.5 | - 0.805 | Tidak ada data | - |
| 30.0 | - 0.706 | - 1.198 | Terproteksi |
| 31.0 | - 0.703 | - 1.249 | Terproteksi |

Lampiran 9: Perhitungan-Perhitungan Verifikasi Disain CPS (lanjutan)

Kemudian dilakukan kembali verifikasi pada titik-titik yang dianggap belum terverifikasi dengan data *potential logger* satu bulan setelah pemasangan dan hasil komisioning sesuai dengan data-data pada Lampiran 7 dan Lampiran 8. Hasil verifikasinya adalah sebagai berikut

| KM ke- | Potensial Proteksi (V) | | | Verifikasi |
|-----------|------------------------|-------------------------------|----------------------|------------|
| | Saat Pemasangan | 1 Bulan Setelah Pemasangan | Hasil Komisioning | |
| 1.5 | - 0.764 | Tidak ada data | Tidak ada data | - |
| 8.5 | - 0.738 | Tidak ada data | Tidak ada data | - |
| 11.5 | - 0.716 | Tidak ada data | Tidak ada data | - |
| 17.5 | - 0.806 | Tidak ada data | Tidak ada data | - |
| 26.5 | - 0.805 | Tidak ada data | Tidak ada data | - |

Namun karena tidak ada data pada satu bulan setelah pemasangan dan hasil komisioning untuk titik-titik yang tidak terproteksi baik saat pemasangan maka dilakukan verifikasi berdasarkan resistivitas dan tingkat kekorosivitasan tanahnya. Hasil verifikasinya adalah sebagai berikut

Lampiran 9: Perhitungan-Perhitungan Verifikasi Disain CPS (lanjutan)

| KM Ke- | Potensial Proteksi Saat Pemasangan (V) | Resistivitas Tanah Kedalaman 1.5 m (ohm.cm) | Tingkat Korosivitas Tanah | Verifikasi |
|--------|--|---|---------------------------|--------------------|
| 1.5 | - 0.764 | 3673.80 | Korosif Sedang | Tidak terproteksi |
| 8.5 | - 0.738 | 1789.80 | Korosif | Tidak terproteksi |
| 11.5 | - 0.716 | 3768.00 | Korosif Sedang | Tidak terproteksi |
| 17.5 | - 0.806 | 7580.00 | Kurang Korosif | Tak perlu proteksi |
| 26.5 | - 0.805 | 2355.00 | Korosif Sedang | Tidak terproteksi |

Berdasarkan hasil verifikasi tersebut maka perlu ada masing-masing tambahan 1 buah anoda pada titik-titik di km ke-1.5, 8.5, 11.5, dan 26.5 untuk meningkatkan potensial proteksi. Sehingga total perlu ada tambahan 4 anoda agar disain sistem proteksi katodik bekerja secara sempurna. Dengan adanya tambahan 4 anoda korban Mg 32 lbs yang diperlukan, maka total anoda korban yang diperlukan hasil verifikasi adalah menjadi 100 batang anoda Mg 32 lbs yang berarti sesuai dengan kalkulasi ulang disain baik berdasarkan arus maupun bobot anoda.

F. Distribusi Anoda Korban Mg 32 lbs Hasil Verifikasi

Dengan merujuk pada hasil verifikasi ulang disain sistem proteksi katodik berdasarkan kebutuhan arus, bobot anoda, dan *potential logger*, maka diperlukan 100 batang anoda Mg 32 lbs dengan distribusi sebaran seperti pada Lampiran 10.

Lampiran 10: Distribusi Anoda Setelah Verifikasi Disain CPS

| No. TB | Km | Jumlah Anoda Mg 32 lbs | No. TB | Km | Jumlah Anoda Mg 32 lbs |
|--------|-------|------------------------|--------|-------|------------------------|
| 00 | 0.00 | 1 | 16 | 16.00 | 2 |
| | 0.50 | 1 | | 16.50 | 1 |
| 01 | 1.00 | 1 | 17 | 17.00 | 2 |
| | 1.50 | 2 | | 17.50 | 1 |
| 02 | 2.00 | 2 | 18 | 18.00 | 1 |
| | 2.50 | 1 | | 18.50 | 2 |
| 03 | 3.00 | 2 | 19 | 19.00 | 1 |
| | 3.50 | 1 | | 19.50 | 1 |
| 04 | 4.00 | 2 | 20 | 20.00 | 2 |
| | 4.50 | 1 | | 20.50 | 2 |
| 05 | 5.00 | 2 | 21 | 21.00 | 2 |
| | 5.50 | 1 | | 21.50 | 1 |
| 06 | 6.00 | 2 | 22 | 22.00 | 2 |
| | 6.50 | 1 | | 22.50 | 1 |
| 07 | 7.00 | 2 | 23 | 23.00 | 2 |
| | 7.50 | 1 | | 23.50 | 2 |
| 08 | 8.00 | 2 | 24 | 24.00 | 2 |
| | 8.50 | 2 | | 24.50 | 3 |
| 09 | 9.00 | 2 | 25 | 25.00 | 2 |
| | 9.50 | 1 | | 25.50 | 2 |
| 10 | 10.00 | 1 | 26 | 26.00 | 2 |
| | 10.50 | 1 | | 26.50 | 2 |
| 11 | 11.00 | 2 | 27 | 27.00 | 2 |
| | 11.50 | 2 | | 27.50 | 1 |
| 12 | 12.00 | 1 | 28 | 28.00 | 2 |
| | 12.50 | 1 | | 28.50 | 2 |
| 13 | 13.00 | 1 | 29 | 29.00 | 2 |
| | 13.50 | 1 | | 29.50 | 1 |
| 14 | 14.00 | 1 | 30 | 30.00 | 2 |
| | 14.50 | 1 | | 30.50 | 2 |
| 15 | 15.00 | 2 | 31 | 31.00 | 3 |
| | 15.50 | 1 | | | |

Lampiran 11: Verifikasi Sisa Umur Pakai Sistem Proteksi Katodik

A. Sisa Umur Pakai per Anoda

$$\begin{aligned}T_{\text{anoda Mg 32 lbs}} &= [14.528 \times 1230 \times 0.85] / [8760 \times 0.07] \\ &= 24.77 \text{ tahun}\end{aligned}$$

B. Sisa Umur Pakai Saat Pemasangan

Berdasarkan data pada Lampiran 5 diperoleh:

$$I_a \text{ tertinggi} = 74.6 \text{ mA} = 0.0746 \text{ A}$$

$$n = 1$$

maka umur sisa anoda adalah:

$$\begin{aligned}T_{Mg \text{ 32 lbs}} &= (n \times Nwt \times C \times U) / (8760 \times I_a) \\ &= (1 \times 14.528 \times 1230 \times 0.85) / (8760 \times 0.0746) \\ &= 23.24 \text{ tahun}\end{aligned}$$

C. Sisa Umur Pakai Setelah Pemasangan

Berdasarkan data pada Lampiran 6 diperoleh:

$$I_a \text{ tertinggi} = 260.30 \text{ mA} = 0.2603 \text{ A}$$

$$n = 4$$

maka umur sisa anoda adalah:

$$\begin{aligned}T_{Mg \text{ 32 lbs}} &= (n \times Nwt \times C \times U) / (8760 \times I_a) \\ &= (4 \times 14.528 \times 1230 \times 0.85) / (8760 \times 0.2603) \\ &= 26.64 \text{ tahun}\end{aligned}$$

D. Sisa Umur Pakai Satu Bulan Setelah Pemasangan

Berdasarkan data pada Lampiran 7 diperoleh:

$$I_a \text{ tertinggi} = 247.50 \text{ mA} = 0.2475 \text{ A}$$

$$n = 3$$

maka umur sisa anoda adalah:

$$\begin{aligned}T_{Mg \text{ 32 lbs}} &= (n \times Nwt \times C \times U) / (8760 \times I_a) \\ &= (3 \times 14.528 \times 1230 \times 0.85) / (8760 \times 0.2475) \\ &= 21.01 \text{ tahun}\end{aligned}$$

Lampiran 11: Verifikasi Sisa Umur Pakai Sistem Proteksi Katodik (lanjutan)

E. Sisa Umur Pakai Berdasarkan Hasil Komisioning

Berdasarkan data pada Lampiran 8 diperoleh:

$$I_a \text{ tertinggi} = 136.20 \text{ mA} = 0.1362 \text{ A}$$

$$n = 3$$

maka umur sisa anoda adalah:

$$\begin{aligned} T_{Mg \ 32 \ lbs} &= (n \times Nwt \times C \times U) / (8760 \times I_a) \\ &= (3 \times 14.528 \times 1230 \times 0.85) / (8760 \times 0.1362) \\ &= 38.19 \text{ tahun} \end{aligned}$$

F. Analisa Umur Pakai Hasil Verifikasi

Hasil verifikasi umur pakai berdasarkan umur sisa anoda serta umur sisa disain berdasarkan *potential logger* saat pemasangan, setelah pemasangan, satu bulan setelah pemasangan, dan hasil komisioning menunjukkan umur sisa anoda Mg 32 lbs dan disain sistem proteksi katodik diatas 20 tahun. Sehingga umur sisa anoda dan disain berdasarkan *potential logger* sudah mencukupi umur disain yang ditentukan.

Lampiran 12: Verifikasi Hasil Pengujian Anoda Magnesium 32 lbs

A. Data Sampel Uji Anoda Korban

Data sampel uji anoda korban yang sebelumnya telah dilakukan pengujian elektrokimia dan komposisi kimia sebelum dilakukan pemasangan adalah sebagai berikut:

| | |
|-------------------------------|--|
| Material Anoda | : <i>Mg Anode Alloy Standard Potential</i> |
| Tipe/Jenis | : <i>D-shape</i> |
| Berat | : 32 lbs |
| Dimensi | : 5-1/2 x 5-3/4 x 18-6/7 (inches) |
| Kabel | : NYA 1c x 6 mm ² x 3 m |
| <i>Marking of Heat Number</i> | : 20909181, 21001251, 21001252, 21001253 |
| Tanggal Pengujian | : 22-24 Maret 2010 |
| Metode Pengujian | : <i>Spark Optical Emission Spectroscopy</i> (komposisi kimia) dan <i>Weight Loss</i> (uji elektrokimia) |

B. Laju Konsumsi Anoda Magnesium

Hasil pengujian elektrokimia yang telah dilakukan sebelumnya pada anoda magnesium dapat dilihat pada tabel berikut

| Item Test | Open Circuit Potential (V vs Cu/CuSO ₄) | Closed Circuit Potential (V vs Cu/CuSO ₄) | Consumption Rate (lb/A-Yr) | Actual Capacity (A.hr/lbs) | Current Efficiency (%) |
|-------------|---|---|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| HT 20909181 | -1.598 | -1.487 | 16.05 | 2645 | 55.75 |
| HT 21001251 | -1.525 | -1.478 | 16.03 | 2649 | 55.81 |
| HT 21001252 | -1.548 | -1.491 | 16.06 | 2647 | 55.61 |
| HT 21001253 | -1.546 | -1.483 | 16.07 | 2648 | 55.80 |

Lampiran 12: Verifikasi Hasil Pengujian Anoda Magnesium 32 lbs (lanjutan)

Sehingga hasil rata-rata yang diperoleh:

$$\text{Open circuit potential (vs Cu/CuSO}_4\text{)} = -1.554 \text{ V}$$

$$\text{Closed circuit potential (vs Cu/CuSO}_4\text{)} = -1.485 \text{ V}$$

$$\text{Consumption rate} = 16.05 \text{ lb/A-Yr}$$

$$\text{Actual capacity} = 2647.25 \text{ A.hr/lbs}$$

$$\text{Current efficiency} = 55.74 \%$$

Dengan *consumption rate* 16.05 lb/A-Yr, maka untuk kebutuhan arus proteksi 8.59 A selama umur disain 20 tahun diperlukan minimal jumlah anoda Mg 32 lbs sebanyak

$$\begin{aligned} N_{\text{anoda Mg 32 lbs}} &= [\text{consumption rate} \times I_p \times \text{Design Life}] / 32 \text{ lbs} \\ &= [16.05 \text{ lb/A-Yr} \times 8.59 \text{ A} \times 20 \text{ tahun}] / 32 \text{ lbs} \\ &= 2757.39 \text{ lbs} / 32 \text{ lbs} \\ &= 86.17 \text{ batang} \end{aligned}$$

Maka hasil verifikasi disain sebelumnya yang diperlukan 100 batang anoda Mg 32 lbs sudah cukup untuk memenuhi kebutuhan anoda berdasarkan *consumption rate* anoda Mg 32 lbs.

Sementara itu standar uji elektrokimia berdasarkan pengujian yang mengikuti ASTM G97 adalah sebagai berikut

| Item Test | Open Circuit Potential (V vs Cu/CuSO ₄) | Closed Circuit Potential (V vs Cu/CuSO ₄) | Consumption Rate (lb/A-Yr) | Actual Capacity (A.hr/lbs) | Current Efficiency (%) |
|-----------|---|---|----------------------------|----------------------------|------------------------|
| Grade A | 1.50 – 1.55 | 1.45 – 1.50 | 16.02 | 2645 | 50 min. |
| Grade B | 1.45 – 1.50 | 1.45 – 1.50 | 16.08 | 2645 | 50 min. |
| Grade C | 1.58 – 1.62 | 1.48 – 1.58 | 17.53 | 2423 | 50 min. |

Lampiran 12: Verifikasi Hasil Pengujian Anoda Magnesium 32 lbs (lanjutan)

Berdasarkan standar uji elektrokimia pada tabel diatas, maka anoda magnesium 32 lbs yang digunakan masuk pada kategori Grade A.

C. Komposisi Kimia Anoda Magnesium

Hasil pengujian komposisi kimia yang telah dilakukan sebelumnya adalah seperti pada tabel berikut

| Item No. | Chemical Composition (%) | | | | | | |
|----------|--------------------------|------|------|--------|--------|--------|-------|
| | Al | Zn | Mn | Cu | Ni | Fe | Si |
| 20909181 | 6.24 | 3.26 | 0.44 | 0.0018 | 0.0008 | 0.0015 | 0.007 |
| 21001251 | 6.35 | 3.33 | 0.43 | 0.0014 | 0.0006 | 0.0016 | 0.007 |
| 21001252 | 6.22 | 3.32 | 0.43 | 0.0016 | 0.0007 | 0.0017 | 0.006 |
| 21001253 | 6.27 | 3.37 | 0.44 | 0.0013 | 0.0006 | 0.0016 | 0.009 |

Sementara itu komposisi kimia anoda Magnesium 32 lbs berdasarkan standar ASTM B 843, Alloy AZ63 adalah sebagai berikut

| Element | Content (%) | | |
|------------------|-------------|------------|------------|
| | Grade A | Grade B | Grade C |
| Al | 5.3 – 6.7 | 5.3 – 6.7 | 5.3 – 6.7 |
| Zn | 2.5 – 3.5 | 2.5 – 3.5 | 2.5 – 3.5 |
| Mn | 0.15 – 0.7 | 0.15 – 0.7 | 0.15 – 0.7 |
| Si | 0.10 max. | 0.30 max. | 0.30 max. |
| Cu | 0.02 max. | 0.05 max. | 0.10 max. |
| Ni | 0.002 max. | 0.003 max. | 0.003 max. |
| Fe | 0.003 max. | 0.003 max. | 0.003 max. |
| Other Impurities | 0.30 max. | 0.30 max. | 0.30 max. |
| Mg | Remainder | Remainder | Remainder |

Berdasarkan standar pada tabel diatas, anoda magnesium 32 lbs yang digunakan masuk pada kategori Grade A.